



Revista Politécnica

ISSN: 1900-2351

ISSN: 2256-5353

[rpolitecnica@elpoli.edu.co](mailto:rpolitecnica@elpoli.edu.co)

Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Colombia

Figueroa-Moran, Oscar Deivy; Mesa-Erazo, Daniel Esteban;  
Pareja-Peña, Juan Sebastián; Valencia-Enriquez, Diego  
INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FIBRAS SOBRE LA  
RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTANTE  
Revista Politécnica, vol. 20, núm. 39, 2024, Enero-Junio, pp. 48-65  
Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid  
Medellín, Colombia

DOI: <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v20n39a4>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=607877254004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en [redalyc.org](https://www.redalyc.org)

[redalyc.org](https://www.redalyc.org)

Sistema de Información Científica Redalyc  
Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante  
Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia

# INFLUENCIA DE LA DISTRIBUCIÓN DE FIBRAS SOBRE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DEL CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Oscar Deivy Figueroa-Moran<sup>1</sup>, Daniel Esteban Mesa-Erazo <sup>2</sup>, Juan Sebastian Pareja-Peña<sup>3</sup>, Diego Valencia-Enriquez<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Civil, [osfigueroa@umariana.edu.co](mailto:osfigueroa@umariana.edu.co).

<sup>2</sup>Ingeniero Civil, [dmesa@umariana.edu.co](mailto:dmesa@umariana.edu.co).

<sup>3</sup>Ingeniero Civil, [jpareja@umariana.edu.co](mailto:jpareja@umariana.edu.co).

<sup>4</sup>Ph.D. en Ciencias en la Especialidad de Astrofísica. Docente Universidad Mariana, Calle 18 No. 34 - 104, 52001 Pasto, Colombia. [diegovalencia5@gmail.com](mailto:diegovalencia5@gmail.com)

## RESUMEN

El concreto ha sido durante mucho tiempo un material crucial en proyectos de obra civil. Mejorarlo es clave para aumentar su eficiencia y resistencia a diferentes fuerzas. Este estudio se enfoca en cómo la adición de fibras sintéticas y de acero influye en la resistencia a flexión del concreto autocompactante. Mediante la creación de vigas de concreto, se realizan ensayos de flexión y análisis de las fibras. Se observa que las fibras sintéticas mejoran mínimamente la resistencia a la flexión, pero aumentan la resistencia a la ruptura y fisuramiento. Las fibras de acero ofrecen un aumento significativo en la resistencia a la flexión. La distribución de fibras reveló que se segregaron en la parte superior de las vigas, donde la resistencia a la flexión fue mayor. Estos hallazgos respaldan la importancia de considerar cuidadosamente los materiales adicionales para mejorar la eficiencia y durabilidad del concreto en proyectos de ingeniería civil.

**Palabras clave:** Ingeniería civil, Concreto, Resistencia a compresión, resistencia a flexión, Fibras de acero, Distribución.

Recibido: 16 de junio de 2023. Aceptado: 30 de octubre de 2023

Received: June 16, 2023. Accepted: October 30, 2023

## INFLUENCE OF FIBER DISTRIBUTION ON FLEXURAL STRENGTH OF SELF-COMPACTING CONCRETE

## ABSTRACT

Concrete has long been a crucial material in civil engineering projects. Improving it is key to enhancing its efficiency and resistance to various forces. This study focuses on how the addition of synthetic and steel fibers influences the flexural strength of self-compacting concrete. Through the creation of concrete beams, flexural tests, and fiber analysis are conducted. It is observed that synthetic fibers minimally enhance flexural strength but increase resistance to rupture and cracking. Steel fibers offer a significant increase in flexural strength. Fiber distribution revealed segregation at the top of the beams, where flexural strength was higher. These findings support the importance of carefully considering additional materials to enhance the efficiency and durability of concrete in civil engineering projects..

**Keywords:** Civil Engineering, Concrete, Compressive Strength, Flexural Strength, Steel Fibers, Distribution.

Cómo citar este artículo: O. Figueroa, D. Mesa, J. Pareja, D. Valencia. "Influencia de la distribución de fibras sobre la resistencia a flexión del concreto autocompactante", *Revista Politécnica*, vol.20, no.39 pp.48-65, 2024. DOI:10.33571/rpolitec.v20n39a4

## 1. INTRODUCCIÓN

El concreto es el material más usado en obras civiles a nivel mundial, por esta razón siempre se ha estado en constante búsqueda del mejoramiento de este, mediante la añadidura de aditivos y materiales a la mezcla, con las cuales se busca el mejoramiento de sus propiedades, para que el desempeño cumpla con los requerimientos de las diferentes disposiciones que se le da en nuestra sociedad. “El concreto a lo largo de su historia ha presentado avances tecnológicos importantes, siendo más notorio el desarrollo del concreto autocompactante” [1]. Es por lo que, para la realización de esta investigación, se hará uso de este tipo de concreto, que según [2], su fluidez hace que sea fácil de vaciar, rellenar sin requerimiento de vibrado para su colocación y compactación, obteniendo las propiedades estructurales igual o mayor a la requerida y una vida útil igual o superior a la de un concreto compactado por vibración.

Las utilidades del concreto se han extendido a múltiples campos de la construcción. Se hallan en gran porcentaje en las obras civiles que hacemos uso día a día, puentes, edificaciones, canales, vías, etc [3]. Por lo que se requiere el óptimo desempeño de este y sus componentes, con el fin de asegurar que el uso de estos sea seguro y cumpla correctamente con el propósito para el cual ha sido diseñado. Teóricamente, los concretos tienen mejor rendimiento cuando son sometidos a compresión; en cambio al ser sometidos a tensión y flexión, tienen un menor desempeño [4]. Por lo que existen varios tipos de procesos para lograr el mejoramiento de este. Actualmente existen varios métodos aplicativos [5], [6], [7] que nos permiten la mejora de estas propiedades. Una de ellas corresponde al uso de fibras sintéticas y de acero.

El concreto reforzado con fibras se utiliza en la construcción, en donde se emplean varios tipos de fibras entre ellas las de acero que son las más usadas, pero también de distintos materiales, entre ellas fibras sintéticas, fibras de vidrio o fibras naturales. El beneficio más provechoso de emplear este material en el concreto reforzado con fibras, es que “Ayudan a prevenir el fisuramiento del concreto en estado endurecido y a reducir el ancho de la fisura si esta se presenta; además las fibras ayudan a mejorar la tenacidad del material, esto significa que el concreto reforzado con fibras puede seguir sosteniendo cargas aun después de una fisuramiento” (Ministerio de comercio, industria y turismo, 2015) [8]. Es decir que, al adicionarlos al concreto, se espera que se reduzcan costos, y se mejore algunas de sus propiedades como es su resistencia a flexión. Según los resultados de simulaciones y experimentos realizada por Deeb, Kulesegaram, & Karihaloo [9], [10], muestra que las fibras y agregados de mayor peso no se segregan, sino que permanecen distribuidos homogéneamente en la mezcla a lo largo del flujo. Por lo que, basados en antecedentes, se procura obtener la mejor distribución.

En general, el concreto se emplea para variados tipos de elementos estructurales en una obra, que están sometidos constantemente a compresión y flexión, por lo tanto, el conocer como la distribución puede influir en la mejora de estas características, es el lineamiento para la elaboración de este trabajo. Para ello se hace uso de herramientas fotográficas, ensayos de laboratorio, con el fin de comprender la causa, comportamiento y la repercusión de la distribución de fibras en el concreto, haciendo uso de variados tipos de materiales en las fibras, con diferentes propiedades físicas. “El concepto de incluir fibras como refuerzo en elementos estructurales es una idea usada desde la antigüedad” [11]. Permitiendo así, la obtención de resultados sobre qué cualidades permiten al concreto conseguir las características necesarias y suficientes, para cumplir su función en obra, enfocada en el mejoramiento de la resistencia a flexión y fisuramiento de elementos de concreto.

La importancia del estudio de distribución de fibras radica en que los materiales empleados para dicho proceso deben ser medidos. Su uso en grandes proporciones puede generar el fallo de las características mecánicas, o el uso en pocas proporciones puede ser insuficiente para lograr cambios significativos en sus características. Por lo tanto, la cantidad de fibra añadida a una mezcla de concreto autocompactante es limitada y depende del tipo de fibra utilizada y de la composición de la mezcla. (Deeb, Kulesegaram, & Karihaloo) [10]. Por lo que el mantener una buena elección de materiales, análisis y comprensión de la distribución que se genere de los ensayos, es vital para su calificación.

La tendencia actual de preservación del medio ambiente impulsa el interés de estudiar diferentes tipos de material que compongan la fibra, como pueden ser de origen natural o materiales reutilizables, que sean costeables, otorguen buenas características mecánicas y que tengan buena relación con el entorno. Como ya se ha probado en investigaciones previas. Quintero Garcia & Gonzales Salcedo [12] concluyeron que las fibras de estopas de coco pueden ser implementadas en la construcción de elementos que en su mayoría

estarían sometidos a flexión. Siendo así un antecedente claro de los potenciales efectos que las fibras naturales pueden proveer. En ese trabajo, los autores mencionan que las cantidades de volumen y medidas de longitud de las fibras se relacionan con la mezcla que se trabaja y así poder concluir como los porcentajes influyen al final en los ensayos. Se tiene un margen de uso porque se resalta que la implementación excesiva puede ser perjudicial. Se destaca además las ganancias que obtiene en el producto cuando se trata de losas o vigas, ya que mejora mecánicamente la flexión.

Así mismo, Pelisser et al., [13], en su estudio de análisis sobre el efecto que produce el incluir fibras sintéticas como polipropileno, vidrio, nylon y PET, en el fisuramiento de las mezclas de concreto en estado plástico y su fraguado, como agentes que reducen en cierta medida (variando el tipo de material) el desgaste y deterioro de las estructuras de concreto por el método de Kraai. Este estudio demuestra en gran medida las ventajas que pueden evidenciarse por ensayos de laboratorio los múltiples beneficios que el compuesto fibra/cemento puede lograr con un correcto equilibrio entre el volumen y material.

Campusano Brown & Silva Saavedra [14] realizan un estudio similar, enfocado al estudio de la distribución de fibras para uso estructural. Se hace referencia principalmente a un estudio en el que destaca el comportamiento de las mezclas con diferentes distribuciones, homogéneas y segregadas, y a que cantidades puede ocurrir con mayor repetición. De estas mezclas en estado fresco se analiza la capacidad de llenado, viscosidad, capacidad de paso y resistencia a la segregación. Además, destaca los comportamientos mecánicos de la mezcla en cuestión, compresión y flexo-tracción.

Deeb, Kulasegaram, & Karihaloo [9] y [10] centran su investigación en la creación de un modelado 3D que permite detallar y predecir el comportamiento individual de las fibras al momento de realizar la distribución de laboratorio haciendo uso del ensayo de L-box. Se recomienda en principio, una mayor atención al abrir la compuerta del instrumento debido a que genera dificultad y demora en la realización del ensayo, además de que se denota un tipo de comportamiento en cuanto a la dirección que por tendencia las fibras toman entre el inicio y final del ensayo. También hace hincapié en que el uso de programas informáticos, brindan en comparación de métodos experimentales, un alto grado de confianza y fiabilidad.

En este trabajo, se presenta el estudio de la distribución de fibras en concreto autocompactante y como estas se relacionan con la resistencia a flexión en el concreto. Por lo tanto, el manuscrito está organizado de la siguiente manera: En la sección 2 se describe la metodología, en la sección 3 se muestran los resultados, la sección 4 se tienen la discusión de los mismos y en la última sección se presentan las conclusiones.

## **2. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo del proyecto fue necesario hacer diferentes ensayos de laboratorio que permitan obtener los resultados necesarios y así determinar cuál fue el comportamiento de las fibras. Estos ensayos corresponden al análisis de la resistencia a flexión, en estado endurecido. Los ensayos en laboratorio son una excelente herramienta para obtener información clara sobre los efectos que se generan al realizar los procesos (distribución/implementación de fibras) y de esta manera poder realizar un análisis más detallado a los datos correspondientes para saber cómo se modifican las capacidades mecánicas y categorizar el desempeño en laboratorio. Para que el proceso a realizar en laboratorio sea el adecuado y dotar de mayor fiabilidad los resultados, se toma en cuenta los ensayos que están descritos en la norma técnica colombiana que regulan la práctica de estos, como lo son: ensayos de resistencia a la compresión, método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión y análisis de la manejabilidad del concreto, entre otros que se especificarán más adelante [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21] y referencias allí. La figura 1 muestra en detalle la metodología llevada en el proyecto para analizar la influencia de la distribución de fibras sobre la resistencia a flexión del concreto autocompactante. A continuación, se describen las consideraciones, procedimientos y actividades que se llevan a cabo para el cumplimiento y desarrollo de los objetivos planteados para la investigación.

### **2.1. Fibras**

Como se ha explicado anteriormente, el trabajo consiste en estudiar el comportamiento de las fibras en mezclas de concreto autocompactante. Para ello se describe el proceso que se lleva a cabo en cuanto a la selección de fibras en base a su disponibilidad y la facilidad de adquisición. Se eligen las fibras por cada tipo, es decir sintéticas y de acero (Ver figura 2). Se revisa en principio la disponibilidad en el mercado regional y distribuidoras de material de construcción cercano. Los materiales que no se puedan adquirir fácilmente, se

buscará la existencia por medio de pedidos y finalmente, al no existir el producto como tal, se procederá a la elaboración de estos.

## 2.2. Diseño de mezcla

Para la elaboración de los especímenes se debe realizar un diseño de mezcla de concreto, en base a las propiedades de los agregados finos y gruesos, la resistencia de diseño y los aditivos que se

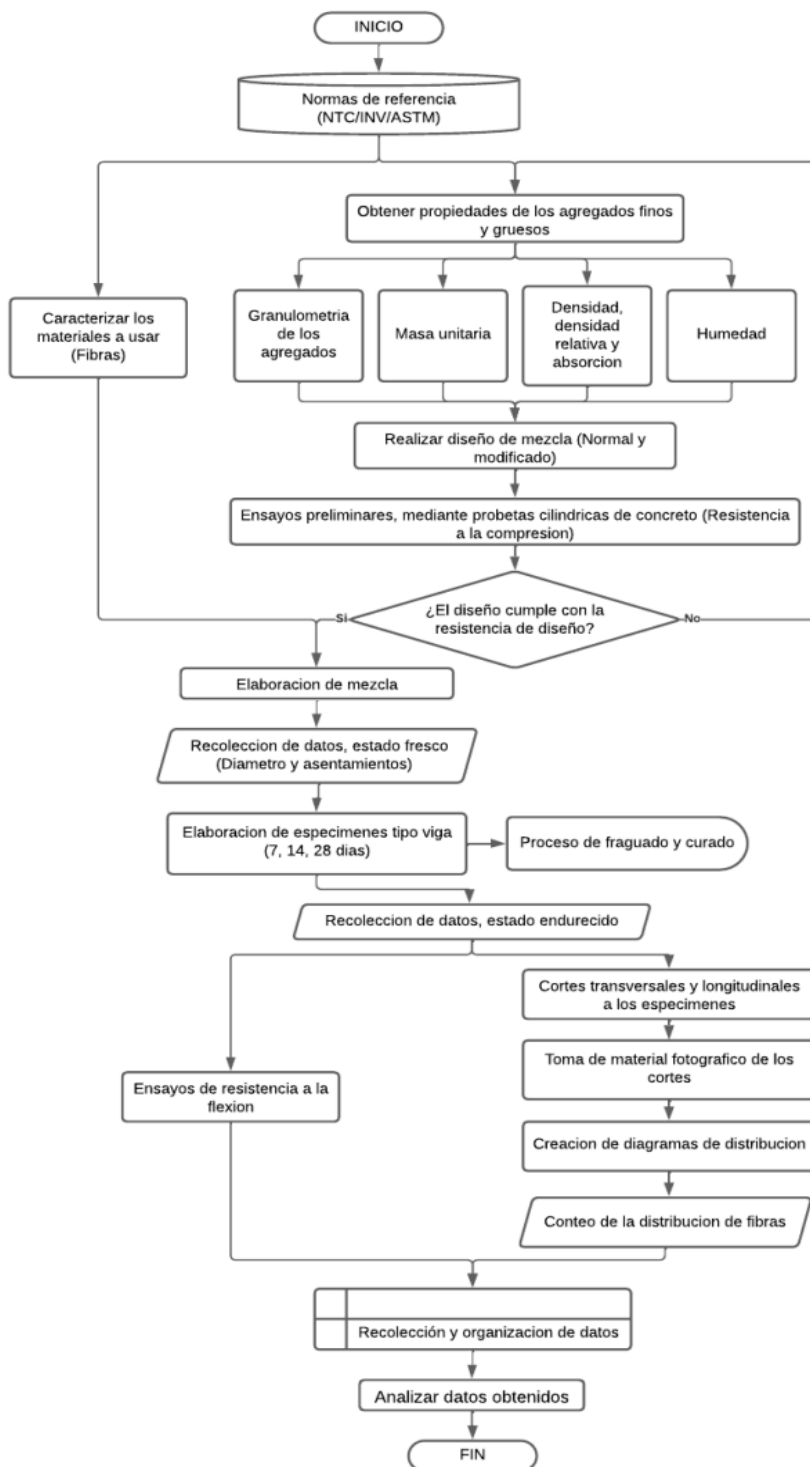


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología

---

vayan a emplear, obteniendo así las cantidades y la dosificación requerida para la elaboración del concreto según las norma NTC 174.

Primeramente, se debe realizar ensayos a los agregados con el fin de obtener datos de absorción, humedad, densidades y granulometría (Ver figura 1). Estos datos modifican las cantidades en el diseño y por lo tanto se procura que el material usado para todo el proceso investigativo sea constante para no afectar los valores del diseño y su dosificación. Por otro lado, el diseño de mezcla además se verá modificado por el uso de aditivo plastificante. Con el fin de obtener el concreto autocompactante, se realiza el cálculo de su cantidad en base al peso del cemento y el porcentaje de dosificación brindado por el proveedor.

### **2.3. Elaboración de especímenes tipo viga y ensayos a flexión**

Ya obtenida la dosificación adecuada para la elaboración de especímenes de concreto a una resistencia deseada (Ver figura 1), se elaboran las probetas de ensayo tipo viga. Se elaboran tres especímenes por cada día necesario de curado (7, 14, 28 días) como se indica en la norma NTC 454. Para los especímenes de vigas se hace uso de la NTC 550, norma la cual establece las dimensiones que debe tener el molde y recomendaciones necesarias para el desarrollo de estos especímenes.

Inicialmente se hace uso de vigas con dimensiones 15×15×50 cm, el llenado del concreto en el molde se hace en dos capas iguales, el método de compactación es por apisonamiento haciendo uso de la varilla compactadora y el martillo con cabeza de goma. Por cada capa se generan 25 golpes con la varilla distribuidos en toda el área. Para la última capa, al igual que los especímenes cilíndricos es necesario enrasar y dar un acabado superficial con una llana metálica. Las recomendaciones para el desencofrado y curado son exactamente iguales que con los especímenes cilíndricos.

Para el ensayo a flexión de las vigas y determinar su resistencia se hizo uso de la norma ASTM C 293 en donde al igual que el ensayo a compresión se hace uso de la máquina universal con la diferencia que los apoyos van a cambiar. Para el montaje del espécimen en la prensa es necesario que previamente tomemos algunos datos de la viga como lo son la masa, las dimensiones y la edad de curado. La viga debe ser marcada en el centro y para los apoyos en los extremos se debe seguir la recomendación de la norma la cual indica que debe ser de 1" en cada extremo.

### **2.4. Análisis de la distribución**

Con los especímenes fracturados, ya sea en forma transversal o longitudinal se procede a realizar un análisis de distribución de las fibras (Ver figura 1) con ayuda de material fotográfico (Ver figura 3). En las imágenes de las secciones a analizar de cada una de las vigas se crea una cuadrícula 3x3, de 5 centímetros. En esta malla, la posición de las fibras se reemplaza por un punto el cual ayudará a obtener una mejor lectura del esquema de distribución y disposición que se nos presenta. Las fotografías y conteo se realizan tanto a los cortes transversales y longitudinales del elemento, para posteriormente realizar un tratamiento estadístico de la información.

El número de fibras se registra en una tabla por cada elemento, con los cuales se obtiene los valores de desviación estándar, promedio y el coeficiente de variación, para un mejor comedimiento de la distribución de las fibras en el elemento.

## **3. RESULTADOS**

Teniendo en cuenta la sección anterior, a continuación, se registran los datos obtenidos a partir del desarrollo de las actividades establecidas. Primero se describe la selección de fibras teniendo en cuenta la disponibilidad de estas, luego se desarrolla el diseño de mezcla convencional para comparar con un diseño de mezcla modificado con aditivos. Para ello se debe dosificar nuevamente en base a las propiedades descritas en la ficha técnica del aditivo a añadir (plastificante, Plastocret de SIKA). Con el diseño de mezcla se procede a realizar los especímenes de viga, como se describe en la sección 3.3 y finalmente se procede al análisis de distribución de las fibras en relación a las medidas a flexión.

### 3.1. Selección de fibras

Las fibras que se emplearon como añadidura para la mezcla de concreto se seleccionaron en base al tipo de material del cual están fabricadas, para generar un punto de comparación entre sus propiedades físicas y mecánicas, y el desempeño a flexión. La elección de estos materiales se vio limitada por la baja oferta de este tipo de materiales en las ferreterías locales, incluso en medios digitales. Se limitó este estudio a fibras sintéticas y fibras de acero, como se muestra en la figura 2, para comparar la distribución de ellas en relación a las pruebas mencionadas. La fibra de acero que se empleó se obtiene de los cortes realizados al alambre galvanizado, procurando que las fibras obtenidas sean alargadas y cilíndricas como sus contrapartes comerciales; el diámetro propuesto es 1 mm y su longitud es de 4 cm, esto debido a que no había existencia de estas en el mercado local. La cantidad que se empleó fue basada en fichas técnicas de las fibras de acero utilizadas comercialmente, con una densidad de  $20 \text{ kg/m}^3$ . Dado al tamaño que presentan las fibras, tienen una fácil manejabilidad, trabajabilidad y aplicación a la mezcla de concreto, la cual no requiere de actividades previas o posteriores a su empleamiento, además, que la dosificación es fácil de aplicar sin afectar a los demás materiales de la mezcla.

La fibra sintética seleccionada para la realización de los ensayos es: Fibras sintéticas de copolímeros, marca MAXTEN. Su proveedor describe el uso de estas para la reducción de fisuras por contracción plástica, además de su mejora de resistencia al impacto, abrasión, incremento de resistencia a la fatiga, incremento de la tenacidad del concreto generando una larga vida útil en los productos de concreto. La cantidad que se empleó fue basada en fichas técnicas de las fibras, con una densidad de  $3 \text{ kg/m}^3$ .



Figura 2. Fibras sintéticas y de acero galvanizado

### 3.2. Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla se realizó la caracterización de los agregados, de lo cual se obtuvieron los siguientes valores para la realización de dicho diseño de mezcla, registrados en la tabla 1.

Tabla 1. Características físicas de los agregados

| Características físicas                     | Agregado grueso | Agregado fino | Cemento                      |         |
|---------------------------------------------|-----------------|---------------|------------------------------|---------|
| Masa unitaria suelta (kg/m <sup>3</sup> )   | 1200            | 1460          | Densidad (g/m <sup>3</sup> ) | 3.1     |
| Masa unitaria compacta (kg/m <sup>3</sup> ) | 1480            | 1590          | Tipo de Uso                  | General |
| Densidad aparente seca (kg/m <sup>3</sup> ) | 2253            | 2465          |                              |         |
| Absorción (%)                               | 2.5%            | 13.7%         |                              |         |

|                      |           |      |
|----------------------|-----------|------|
| Humedad (%)          | 1%        | 3%   |
| Forma                | Triturado | -    |
| Módulo de finura (%) | -         | 2.24 |

En la tabla 2, se registran los valores de la dosificación tanto para un concreto convencional, y con aditivo, para las características de los materiales adquiridos.

Tabla 2. Dosificación concreto convencional y modificado.

| Material  | Concreto convencional  |       | Concreto con aditivo   |       |
|-----------|------------------------|-------|------------------------|-------|
|           | w (kg/m <sup>3</sup> ) | v (L) | w (kg/m <sup>3</sup> ) | v (L) |
| Agua      | 310.0                  | 306.9 | 310.0                  | 218.0 |
| Cemento   | 360.0                  | 116.1 | 360.0                  | 116.1 |
| A. Fino   | 686.0                  | 278.3 | 681.9                  | 276.6 |
| A. Grueso | 873.2                  | 387.6 | 873.2                  | 387.6 |
| Aire      | 0.0                    | 0.0   | 0.0                    | 0.0   |
| Aditivo   | -                      | -     | 1.8                    | 1.7   |

El aditivo plastificante “Plastocrete” tiene como propiedad, la reducción del agua. Pero debido a que el diseño de mezcla se enfoca en un concreto autocompactante, el cual tiene un estado altamente fluido, esta reducción no es considerada y el agua del diseño de concreto convencional se mantiene. Se elaboraron especímenes con diferente mezcla (Convencional y con aditivo Plastificante) donde se pudo notar la diferencia de manejabilidad del concreto autocompactante. El llenado de los moldes se facilitó dada a la fluidez sin segregar los materiales, característica fundamental para asegurar que las fibras no se segregan de la mezcla. Ambos tipos de dosificación se probaron mediante la elaboración de especímenes tipo cilindro, obteniendo los resultados obtenidos en las tablas 3 y 4. Éstas tablas muestran resultados de resistencia a compresión para concreto convencional tabla 3 y modificado tabla 4 para tres especímenes por cada día necesario de curado (7, 14, 28 días).

Tabla 3. Resistencias a compresión, concreto convencional

| Espécimen - Cilindros | Edad (Días) | Medidas   |               |             | Resistencia esperada (MPa) | Resistencia obtenida (MPa) |
|-----------------------|-------------|-----------|---------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
|                       |             | Masa (kg) | Diámetro (mm) | Altura (mm) |                            |                            |
| 1                     | 7           | 3.536     | 102           | 205         | 13                         | 13.02                      |
| 2                     |             | 3.537     | 102           | 205         |                            | 14.64                      |
| 3                     |             | 3.474     | 102           | 205         |                            | 13.08                      |
| 1                     | 14          | 3.375     | 101           | 203         | 18                         | 17.96                      |
| 2                     |             | 3.495     | 101           | 205         |                            | 18.25                      |
| 3                     |             | 3.361     | 102           | 205         |                            | 18.46                      |
| 1                     | 28          | 3.489     | 101           | 203         | 20                         | 21.92                      |
| 2                     |             | 3.693     | 102           | 206         |                            | 20.76                      |
| 3                     |             | 3.440     | 102           | 205         |                            | 19.68                      |

Tabla 4. Resistencias a compresión, concreto modificado

| Espécimen - Cilindros | Edad (Días) | Medidas   |               |             | Resistencia esperada (MPa) | Resistencia obtenida (MPa) |
|-----------------------|-------------|-----------|---------------|-------------|----------------------------|----------------------------|
|                       |             | Masa (kg) | Diámetro (mm) | Altura (mm) |                            |                            |
| 1                     | 7           | 3.734     | 101           | 202         | 13                         | 13.52                      |

|   |    |       |     |     |    |       |
|---|----|-------|-----|-----|----|-------|
| 2 |    | 3.643 | 102 | 204 |    | 12.56 |
| 3 |    | 3.921 | 101 | 205 |    | 14.01 |
| 1 | 14 | 3.612 | 103 | 203 | 18 | 17.92 |
| 2 |    | 3.460 | 102 | 205 |    | 18.56 |
| 3 |    | 3.325 | 102 | 203 |    | 18.21 |
| 1 | 28 | 3.571 | 101 | 202 | 20 | 22.01 |
| 2 |    | 3.609 | 101 | 201 |    | 21.43 |
| 3 |    | 3.803 | 101 | 203 |    | 19.87 |

En las tablas 3 y 4 se puede observar que los valores de resistencia concuerdan con los valores esperados. La desviación media (DM) más alta, entre la resistencia esperada y los valores medidos en el concreto convencional, es para los especímenes con un curado de 14 días, que equivale a un 9.7% de desviación. Mientras que para concreto modificado, la DM más alta es para los especímenes con un curado de 28 días, esta equivale a un 8.7% de desviación.

### 3.3. Elaboración de especímenes tipo viga y ensayo a flexión

Ya obtenida la dosificación adecuada para la elaboración de especímenes de concreto a una resistencia deseada, se elaboraron las probetas de ensayo tipo viga. Se elaboró tres especímenes por cada día necesario de fraguado (7, 14, 28 días). Para los especímenes de vigas se hace uso de la NTC 550, esta norma establece las dimensiones que debe tener el molde y recomendaciones necesarias para estos especímenes. Sin embargo, en este caso, ahora los especímenes de viga se realizan sin fibras, e incluyendo fibras sintéticas y fibras de acero.

Para el ensayo a flexión de las vigas y determinar su resistencia se hizo uso de la ASTM C 293 en donde al igual que el ensayo a compresión se hace uso de la máquina universal con la diferencia que los apoyos van a cambiar. Para el montaje del espécimen en la prensa fue necesario que previamente se tomarán algunos datos de la viga como lo son la masa, las dimensiones y la edad de curado. La viga debe ser marcada en el centro y para los apoyos en los extremos se debe seguir la recomendación de la norma, la cual indica que debe ser de 1" en cada extremo. Los datos que se obtuvieron a partir de ensayar las vigas en estado fresco y a diferentes días de curado, se registran en la Tabla 5.

Tabla 5. Datos de laboratorio de vigas y sus resistencias

| Edad<br>(Días) | Tipo de viga                      | No.<br>de<br>viga | Medidas      |              |                |               |             | Resistencia<br>obtenida<br>(MPa) |
|----------------|-----------------------------------|-------------------|--------------|--------------|----------------|---------------|-------------|----------------------------------|
|                |                                   |                   | Masa<br>(kg) | Base<br>(mm) | Altura<br>(mm) | Largo<br>(mm) | Luz<br>(mm) |                                  |
| 7              | Vigas sin<br>fibras               | 1                 | 25.90        | 150          | 150            | 545           | 495         | 1.67                             |
|                |                                   | 2                 | 26.00        | 154          | 151            | 543           | 500         | 2.48                             |
|                |                                   | 3                 | 26.13        | 152          | 151            | 545           | 500         | 2.26                             |
|                | Vigas con<br>fibras<br>sintéticas | 1                 | 25.38        | 155          | 152            | 540           | 495         | 2.15                             |
|                |                                   | 2                 | 25.18        | 155          | 151            | 542           | 495         | 2.43                             |
|                |                                   | 3                 | 25.14        | 154          | 153            | 543           | 495         | 2.2                              |
|                | Vigas con<br>fibras de<br>acero   | 1                 | 24.50        | 148          | 151            | 545           | 492         | 2.80                             |
|                |                                   | 2                 | 25.28        | 147          | 151            | 545           | 493         | 2.98                             |
|                |                                   | 3                 | 25.32        | 150          | 150            | 545           | 491         | 3.01                             |
| 14             | Vigas sin<br>fibras               | 1                 | 24.84        | 151          | 150            | 544           | 490         | 2.25                             |
|                |                                   | 2                 | 25.70        | 156          | 157            | 542           | 490         | 2.55                             |
|                |                                   | 3                 | 24.54        | 150          | 150            | 535           | 485         | 2.78                             |
|                | Vigas con<br>fibras<br>sintéticas | 1                 | 24.12        | 150          | 150            | 544           | 490         | 2.81                             |
|                |                                   | 2                 | 25.13        | 151          | 151            | 543           | 486         | 2.61                             |
|                |                                   | 3                 | 24.96        | 149          | 151            | 542           | 495         | 2.60                             |

|    |                             |   |       |     |     |     |     |      |
|----|-----------------------------|---|-------|-----|-----|-----|-----|------|
|    | Vigas con fibras de acero   | 1 | 25.16 | 147 | 150 | 545 | 495 | 3.40 |
|    |                             | 2 | 25.46 | 150 | 150 | 545 | 494 | 3.30 |
|    |                             | 3 | 25.21 | 150 | 149 | 545 | 493 | 3.44 |
| 28 | Vigas sin fibras            | 1 | 24.54 | 150 | 151 | 544 | 495 | 2.9  |
|    |                             | 2 | 25.02 | 149 | 150 | 545 | 494 | 2.74 |
|    |                             | 3 | 25.00 | 150 | 151 | 545 | 495 | 3.20 |
|    | Vigas con fibras sintéticas | 1 | 25.14 | 150 | 151 | 543 | 495 | 3.02 |
|    |                             | 2 | 24.99 | 151 | 151 | 545 | 493 | 3.15 |
|    |                             | 3 | 25.13 | 152 | 149 | 544 | 492 | 2.98 |
|    | Vigas con fibras de acero   | 1 | 25.00 | 147 | 151 | 545 | 496 | 4.01 |
|    |                             | 2 | 25.42 | 150 | 150 | 545 | 493 | 3.80 |
|    |                             | 3 | 24.98 | 151 | 150 | 545 | 495 | 4.10 |

### 3.4. Análisis de la distribución

Para realizar un análisis de la distribución de las fibras en relación con los ensayos a flexión, se ejecutó el conteo de las fibras existentes en una cuadrícula ubicada en corte transversal y longitudinal mediante imágenes digitales a partir de los cortes realizados a los especímenes fallados. La posición de las fibras se reemplaza por un punto el cual ayudó a tener una mejor lectura del esquema de distribución y disposición. La distribución se obtuvo mediante la sección de una cuadrícula, como se muestra en la figura 3, de donde se obtuvo el diagrama de distribución situado del lado izquierdo de la misma, producto de la superposición de la cuadrícula al material fotográfico recolectado como se muestra al lado derecho de la figura 3. El registro numérico y el cálculo de la desviación estándar, promedio de fibras y el coeficiente de variación que se obtuvieron de la figura 3 se registran en la tabla 6.

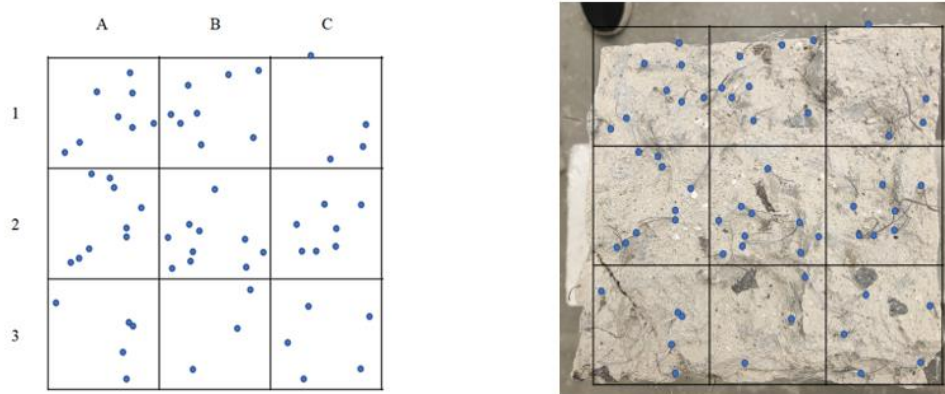


Figura 3. Diagrama de distribución y superposición en material fotográfico, corte transversal - Viga 1 (7 días), fibras sintéticas 3x3, de 5 centímetros cada cuadrícula. En la figura, el lado izquierdo muestra la localización de las fibras en la cuadrícula, mientras que el lado derecho de la figura muestra la fotografía donde se ha ubicado la posición de las fibras.

Tabla 6. Conteo, corte transversal – Viga 1 (7 días). La tabla indica la etiqueta (No. de viga) de viga, y el número de fibras en cada una de las cuadrículas identificadas con el número en las filas y letras mayúsculas en las columnas.

|                                   |   |    |      |
|-----------------------------------|---|----|------|
| No. Viga                          |   |    | 1    |
| Edad (Días)                       |   |    | 7    |
| Eje                               | A | B  | C    |
| 1                                 | 8 | 8  | 4    |
| 2                                 | 9 | 10 | 7    |
| 3                                 | 5 | 3  | 5    |
| Promedio                          |   |    | 6.56 |
| Desviación estándar de la muestra |   |    | 2.4  |
| Coeficiente de variación          |   |    | 37%  |

Esta extracción de información se realiza igualmente para las secciones longitudinales de la viga presentadas en la figura 4 y tabla 7.

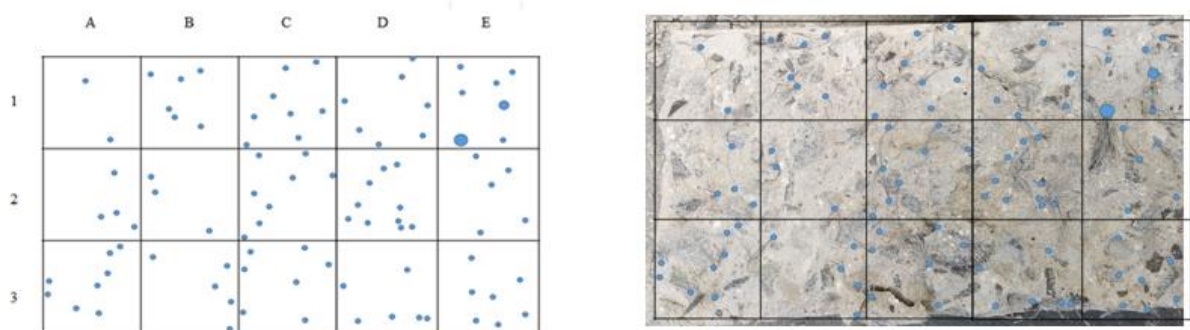


Figura 4. Diagrama de distribución y superposición en material fotográfico, corte longitudinal - Viga 1 (7 días), fibras sintéticas

Tabla 7. Conteo, corte longitudinal – Viga 1 (7 días)

|                                   |   |   |   |    |      |
|-----------------------------------|---|---|---|----|------|
| No. Viga                          |   |   |   |    | 1    |
| Edad (Días)                       |   |   |   |    | 7    |
| Eje                               | A | B | C | D  | E    |
| 1                                 | 2 | 6 | 8 | 7  | 15   |
| 2                                 | 4 | 3 | 8 | 10 | 5    |
| 3                                 | 8 | 5 | 7 | 6  | 7    |
| Promedio                          |   |   |   |    | 6.73 |
| Desviación estándar de la muestra |   |   |   |    | 3.1  |
| Coeficiente de variación          |   |   |   |    | 46%  |

Las tablas 6 y 7 muestran la etiqueta de la viga, o número de viga, la edad de la viga y el número de fibras identificadas en cada uno de las celdas. Así, por ejemplo, en la tabla 7, en la celda correspondiente al eje 2, columna B, se encontró 3 fibras. Este ejercicio, se realizó para todas las vigas que se realizaron con la inclusión de fibras.

#### 4. DISCUSIÓN (O ANÁLISIS DE RESULTADOS)

En este trabajo se estudia cómo la distribución de las fibras en especímenes de concreto tipo viga afecta la resistencia mediante ensayos a flexión. Con la ayuda de cortes transversales y longitudinales en las vigas se extrae la distribución de fibras con el fin de registrar su posicionamiento en un área representativa y así relacionar con los datos obtenidos sobre su resistencia. Este trabajo se desarrolló en cuatro etapas, la primera fue la selección de fibras, la segunda se basó en el diseño de mezcla, la siguiente parte se limitó a la

elaboración de especímenes y pruebas a flexión y en la última parte se consideró la relación entre la distribución de las fibras y las pruebas de resistencia a flexión.

La selección de fibras estuvo sujeta a la disponibilidad de ellas en el mercado. Por lo tanto, fue posible adquirir las sintéticas y se tuvo que usar alambre galvanizado para la construcción de fibras de acero con características similares a las que se encuentran en el mercado. En cuanto a los materiales que se emplearon para el diseño de mezcla, se obtiene una arena que presenta propiedades altas de absorción (ver tabla 1), lo cual afecta en gran medida al agua que se debe usar en la dosificación de la mezcla de concreto. El agregado grueso seleccionado tiene como tamaño máximo nominal, 1/2", lo cual favoreció en la alta fluidez que se buscaba para el concreto autocompactante, además de cumplir correctamente con los límites necesarios de su granulometría.

Los especímenes realizados como probetas preliminares, se desarrollaron con la función de verificar si la resistencia de diseño cumple con los requisitos de la norma, mostrando que estos experimentos obtuvieron los resultados esperados. La resistencia y los porcentajes que se esperaban de esta en los diferentes días de curado se lograron comprobar mediante los ensayos de compresión, obteniendo como promedio una resistencia mínimamente superior a la esperada y verificando así, que el diseño de mezcla cumple correctamente en cantidades del material (ver tablas 3 y 4). Este proceso se realizó para verificar el diseño de mezcla convencional y el que tenía como adición el plastificante, en ambas ocasiones se cumplió con dicho propósito como se muestra en la tabla 4.

A partir de los ensayos realizados a las vigas en estado endurecido se obtuvo un cambio notorio en la resistencia a flexión de las vigas, como se muestra en la Figura 4. En esta figura se muestra la resistencia a flexión promedio en función de los días de curado de las vigas sin fibras (línea azul), vigas con fibras sintéticas (línea naranja) y vigas fibras de acero (línea gris). Ya que las vigas usan el mismo tipo de diseño de mezcla, se tiene un punto de comparación claro sobre las que tienen fibras. Se obtiene en general que mayor tiempo de días de curado, la resistencia aumenta en todos los tipos de vigas. Sin embargo, las vigas que cuentan con fibras sintéticas tuvieron un aumento mínimo de la resistencia a flexión y una alta resistencia a la fisuración, manteniendo unido los fragmentos posteriores a la falla del ensayo. Mientras que las que cuentan con fibras de acero presentaron mayor resistencia a flexión, pero esta no presentó una mayor resistencia a la ruptura, pues la presencia de las fibras era menor a la de las sintéticas. Además, las vigas con fibras sintéticas tienen una mejor dispersión a través de toda la viga, como se muestra en la columna de coeficiente de variación de la tabla 8. Lo que permitía que la viga se mantuviera más unida posterior al ensayo a flexión.

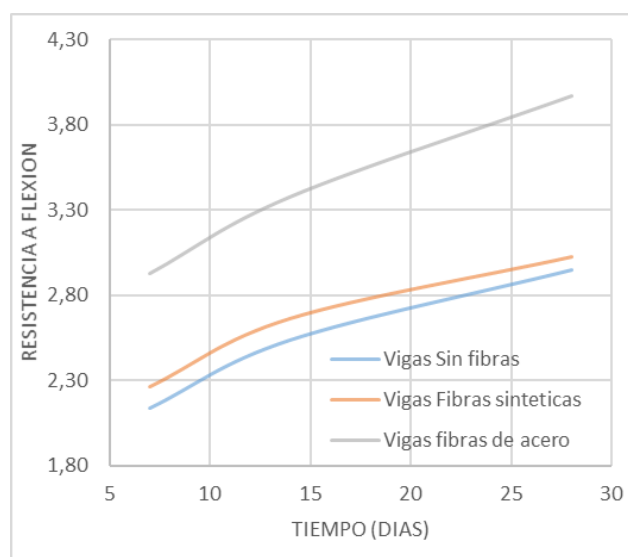


Figura 5. Resistencias a flexión a través de los días de curado

La densidad y presentación de las fibras como material, generan al mezclarse una diferencia considerable de la distribución, es decir, las fibras sintéticas al ser de material de copolímeros tienen mayor cantidad de material disperso en la viga a pesar de contar con una dosificación baja. Se logra así, tener tres tipos de

materiales con tres tipos de distribuciones, vigas sin presencia de fibras, vigas con alta presencia de fibras (Sintéticas) y con media presencia de fibras (Acero). Por lo que se procedió a realizar el análisis de la distribución de las fibras mediante el conteo de ellas en una cuadrícula en las vigas que tienen fibras.

El conteo manual de fibras ayudó a registrar de manera cuantitativa la existencia de fibras en los especímenes, dado que, además, el conteo se realizó de manera transversal y longitudinal se puede visualizar no solo la repartición de estas en la zona de falla si no también un segmento importante y representativo del espécimen. También, el organizar el conteo de fibras en una cuadrícula 3×3 ayudó a establecer las diferencias que no son fácilmente visibles y que establecen puntos determinantes junto con los datos recolectados de las resistencias. Como se puede observar en la tabla 8, los porcentajes del coeficiente de variación son altos. Estos datos numéricos significan que la distribución no es tan homogénea como se planteó en un principio. Las fibras se dispersan de manera irregular en la viga por lo que se dice que las fibras tanto sintéticas como de acero se segregaron en gran medida, teniendo una mayor presencia en unas zonas que en otras. La desviación estándar obtenida para las vigas, demuestra que hay una alta dispersión de estos datos (ver tabla 8).

Sin embargo, se puede obtener en qué región de la viga se segregan las fibras, para ello se obtuvo la Figura 6. Esta figura muestra la resistencia a flexión como función de la razón del número de fibras en la parte superior de la viga en el corte transversal, sobre el número de fibras en la parte inferior ( $Nv3/Nv1$ ). Si la razón es menor que uno, entonces significa que el número de fibras en la parte superior es mayor. Esta figura muestra que de los 18 especímenes realizados, 13 muestran que las fibras se segregaron para la parte superior de la viga. De los cuales, las vigas que se realizaron con fibras sintéticas están representadas con círculos y las que vigas que se elaboraron con fibras de acero se muestran con cuadros y los colores representan los diferentes días de curado, así para el rojo las vigas con 7 días, el verde las vigas para 14 días y el gris las vigas para 28 días. De la figura se puede inferir que las vigas con fibras que se segregaron en la parte superior presentan mayor resistencia a la flexión, esto se puede analizar desde el pandeo de las fibras y cómo las fuerzas actúan en los límites inferior y superior de la misma.

Tabla 8. Tabla resumen del conteo de fibras con sus respectivas resistencias

| Edad (Días) | Tipo de viga                | No. de viga | Conteo fibras corte transversal |                     |                           | Conteo fibras corte longitudinal |                     |                           | Promedio, desviación estándar de la muestra |                     |                          | Resistencia obtenida (MPa) |
|-------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------|----------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|
|             |                             |             | Promedio de fibras por celda    | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Promedio de fibras por celda     | Desviación estándar | Coefficiente de variación | Promedio de resistencia                     | Desviación estándar | Coefficiente de varianza |                            |
| 7           | Vigas con fibras sintéticas | 1           | 6.56                            | 2.4                 | 37%                       | 6.73                             | 3.1                 | 46%                       | 2.3                                         | 0.15                | 7%                       | 2.15                       |
|             |                             | 2           | 11.78                           | 6.38                | 54%                       | 6.17                             | 3.11                | 50%                       |                                             |                     |                          | 2.43                       |
|             |                             | 3           | 7.33                            | 2.6                 | 35%                       | 4.89                             | 2.32                | 47%                       |                                             |                     |                          | 2.2                        |
|             | Vigas con fibras de acero   | 1           | 1.44                            | 0.88                | 61%                       | 1.5                              | 1.69                | 113%                      | 2.9                                         | 0.11                | 4%                       | 2.80                       |
|             |                             | 2           | 1.44                            | 0.53                | 37%                       | 0.93                             | 0.8                 | 86%                       |                                             |                     |                          | 2.98                       |
|             |                             | 3           | 1.89                            | 0.78                | 41%                       | 1.61                             | 1.5                 | 93%                       |                                             |                     |                          | 3.01                       |

|    |                             |   |       |      |     |      |      |      |     |      |    |      |
|----|-----------------------------|---|-------|------|-----|------|------|------|-----|------|----|------|
| 14 | Vigas con fibras sintéticas | 1 | 10.11 | 2.32 | 23% | 6    | 4.23 | 71%  | 2.7 | 0.12 | 4% | 2.81 |
|    |                             | 2 | 12.33 | 5.24 | 42% | 7.67 | 4.47 | 58%  |     |      |    | 2.61 |
|    |                             | 3 | 5.67  | 2.55 | 45% | 10.2 | 7.75 | 76%  |     |      |    | 2.60 |
|    | Vigas con fibras de acero   | 1 | 1.44  | 0.88 | 61% | 1.06 | 1    | 94%  | 3.4 | 0.07 | 2% | 3.40 |
|    |                             | 2 | 1     | 0.5  | 50% | 1.07 | 0.8  | 75%  |     |      |    | 3.30 |
|    |                             | 3 | 1.78  | 0.67 | 38% | 1.61 | 1.24 | 77%  |     |      |    | 3.44 |
| 28 | Vigas con fibras sintéticas | 1 | 8.22  | 3.73 | 45% | 7.39 | 2    | 27%  | 3.1 | 0.09 | 3% | 3.02 |
|    |                             | 2 | 8.78  | 3.19 | 36% | 8.89 | 4.1  | 46%  |     |      |    | 3.15 |
|    |                             | 3 | 8     | 3.08 | 39% | 5.28 | 1.56 | 30%  |     |      |    | 2.98 |
|    | Vigas con fibras de acero   | 1 | 2     | 1.12 | 56% | 0.94 | 1.06 | 113% | 4.0 | 0.15 | 4% | 4.01 |
|    |                             | 2 | 1.33  | 0.71 | 53% | 0.73 | 0.7  | 96%  |     |      |    | 3.80 |
|    |                             | 3 | 2.22  | 0.67 | 30% | 1.5  | 1.04 | 69%  |     |      |    | 4.10 |

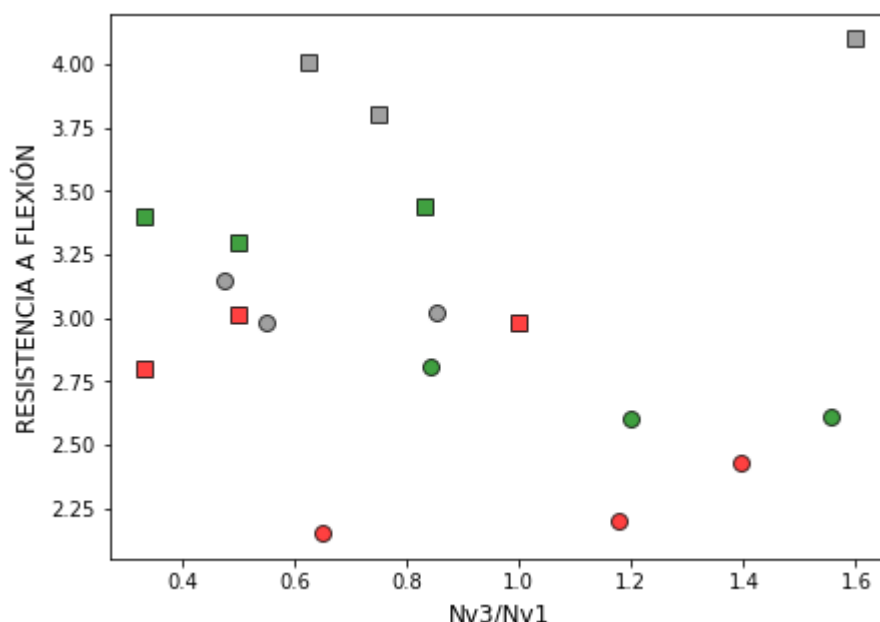


Figura 6. Se muestra la resistencia a flexión como función de la razón del número de fibras en la parte superior de la viga en el corte transversal, sobre el número de fibras en la parte inferior ( $Nv3/Nv1$ ). Las vigas que se realizaron con fibras sintéticas están representadas con círculos y las que vigas que se elaboran con fibras de acero se muestran con cuadros y los colores representan los diferentes días de curado, así el rojo representa las vigas con 7 días, el verde las vigas para 14 días y el gris las vigas para 28 días.

## 5. CONCLUSIONES

Se puede adquirir mayor ganancia a la resistencia a flexión usando fibras de acero elaboradas por distribuidores, pues las fibras que se elaboraron de manera manual son una presentación simple de las que se hallan en el mercado. En el mercado se pueden hallar fibras con dobleces y longitudes mayores con las cuales se pueden lograr mayores dosificaciones en la mezcla y así lograr mayor presencia de estas.

Las fibras sintéticas son una gran optativa para la ganancia de características favorables en una obra, el fisuramiento se reduce y la resistencia a flexión aumenta. Los datos y la experiencia recolectada en su empleamiento, durante los ensayos a flexión y posteriores a este, dejan un buen precedente del emplazamiento que se le puede brindar en el avance de nuevas formas de asegurar las obras civiles.

Las fibras tienen una distribución y disposición regular, según los datos de desviación y coeficiente de variación, dieron resultados altos, lo cual denota que las fibras estaban dispersas de una manera no homogénea, principalmente, en estos experimentos las fibras se segregan en la parte superior de las vigas. Las fibras de acero representan un aumento significativo en la resistencia a flexión y, de la misma manera que las fibras sintéticas, generan un aumento de la resistencia a la ruptura y fisuramiento.

La ganancia de la resistencia a la flexión se relaciona con la presencia de fibras mayormente encontradas en una zona superior de la viga. La fila 1 de las cuadrículas dibujadas, de la mayoría de las vigas, cuenta con mayor presencia de este material, y en estos experimentos resulta en una ganancia en la resistencia. Esta zona se ve mayor afectada por esfuerzos de compresión a diferencia de su zona paralela que soporta esfuerzos de tensión. En un trabajo futuro se planea colocar las fibras de manera estratégica para evaluar resistencia en diferentes zonas de la viga.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo agradecen a la Facultad de Ingeniería y a la Dirección de Investigaciones de la Universidad Mariana, Colombia por la financiación del Proyecto con acuerdo 239.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Quiliche Neira, J. S. (2018). Influencia del polvo de mármol y superplastificante sobre la compresión, porosidad, capacidad del paso y relleno de un concreto autocompactante. [Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Civil]. Repositorio Universidad Privada del Norte. Trujillo, Perú.
- [2] Huamani Huarancca, I. (2018). Concreto autocompactante: Diseño, beneficios y consideraciones básicas para su uso en la ciudad de Ayacucho. Ayacucho, Perú. [Tesis para optar el título profesional de: Ingeniero Civil] Repositorios nacionales Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.
- [3] García Estrada, J. M. (2020). Guía teórica básica del concreto, como material de construcción Guatemala, Guatemala [Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio del sistema bibliotecario de Universidad de San Carlos Guatemala.
- [4] Mehta, P. K., & Monteiro, P. (1998). Concreto: estructura, propiedades y materiales. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (pp. 33-56). IMCYC
- [5] Muñoz Cebrián, F. (2011). Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de polipropileno multifilamento: Influencia del porcentaje de fibra adicionado [Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València].
- [6] Suárez-Guerra, F. (2020). Evaluación de las propiedades de fractura en cementos y yesos adicionados con diversos tipos de fibras plásticas [Trabajo de fin de grado]. Repositorio de Trabajos Académicos de la Universidad de Jaén
- [7] Chilón Quispe, S. N. (2018). Influencia de la fibra sintética (SIKA® fiber force PP-48) en el comportamiento mecánico de un concreto autocompactante con  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$  [Tesis para optar el título de: Ingeniero Civil]. Repositorio Universidad Nacional de Cajamarca.
- [8] Ministerio de comercio, industria y turismo. (2 de Febrero de 2015). Reglamento técnico aplicable a alambre de acero liso, grafilado y mallas electrosoldadas, para refuerzo de concreto que se fabriquen, importen o comercialicen en Colombia.
- [9] DEEB, R.; KULASEGARAM, S.; KARIHALOO, B. L. 3D modelling of the flow of self-compacting concrete with or without steel fibers. Part I: slump flow test. Computational Particle Mechanics, 2014, vol. 1, p. 373-389. <https://doi.org/10.1007/s40571-014-0002-y>.
- [10] DEEB, Rola; KULASEGARAM, Sivakumar; KARIHALOO, Bhushan Lai. 3D modeling of the flow of self-compacting concrete with or without steel fibres. Part II: L-box test and the assessment of fibre reorientation during the flow. Computational Particle Mechanics, 2014, vol. 1, p. 391-408. <https://doi.org/10.1007/s40571-014-0003-x>
- [11] Herencia Chuquihuanga, Q., Pano Loayza, G. R., & Lara Guillén, W. N. (2018). Análisis experimental de concreto autocompactante con fibras sintéticas. Repositorio Institucional – Pontificia Universidad Católica del Perú
- [12] García, S. L. Q., & Salcedo, L. O. G. (2006). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Ingeniería y Desarrollo, (20), 134-150.

- 
- [13] Pelisser, F., Neto, A. B. D. S. S., La Rovere, H. L., & de Andrade Pinto, R. C. (2010). Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking. *Construction and building materials*, 24(11), 2171-2176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.041>.
- [14] Raby Sandoval, A. M. (2016). Caracterización de hormigón autocompactante reforzado con fibras sintéticas para uso estructural. [Tesis para optar el título de: Ingeniero Civil]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile
- [15] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Colombia–NTC, N. T. (2018). NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos.
- [16] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, (1995). NTC 92. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas.. Bogotá, Colombia.
- [17] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Colombiana, N. T. (2000). NTC 174: Especificaciones de los agregados para concreto.
- [18] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). DE, E. Y. C. D. E., & OBRA, C. E. (2000). NTC 550. Concretos, Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto en Obra.
- [19] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Colombiana, N. T. (1998). NTC 454. Ingeniería Civil y Arquitectura. Concretos. Concreto Fresco. Toma de Muestras.
- [20] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Colombiana, N. T. (2010). NTC 673. Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.
- [21] American Society for Testing and Materials. (2001). ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading). Philadelphia: ASTM.

