

# PAIN 2017

## Programa de apoyo a la iniciación en la investigación

### TÍTULO DE LA INVESTIGACIÓN:

Análisis experimental de concreto autocompactable con fibras sintéticas.

### AUTORES:

Herencia Chuquihuanga, Qenti Pablo  
Fano Loayza, Gonzalo Rodrigo  
Lara Guillén, Wilfredo Nilo

### FACULTAD - ESPECIALIDAD:

Ciencias e Ingeniería – Ingeniería Civil

### DOCENTE ORIENTADOR(A):

Ginocchio Celi, Juan Francisco

### AÑO (\*):

2018

(\*) Año de finalización de la investigación

# **Análisis experimental de concreto autocompactable con fibras sintéticas**

Qenti Herencia Ch.<sup>1</sup>, Gonzalo Fano L.<sup>1</sup>, Wilfredo Lara G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias e Ingeniería (PUCP).

## **1. Resumen**

En este artículo se discute y analiza el comportamiento que provoca la incorporación de macro y microfibras de polipropileno en mezclas de concreto autocompactable (CAC) basado en la tecnología del policarboxilato. Para realizar una evaluación amplia sobre el impacto de las fibras, se utilizaron dos cantidades de cemento, ambas dentro del rango establecido por el American Concrete Institute (ACI) y del Experts for Specialised Construction and Concrete Systems (EFNARC). Se hizo un análisis en estado fresco y estado endurecido del concreto. Para los ensayos en estado fresco, se eligieron los ensayos de flujo de asentamiento y de flujo T50, anillo J e índice de estabilidad visual, que miden las propiedades de capacidad de relleno, capacidad de paso y de resistencia a la segregación, respectivamente. En los ensayos en estado endurecido, se eligieron los ensayos de resistencia a la compresión y flexión. Los resultados en estado fresco no muestran un beneficio en el CAC al incluir fibras sintéticas de polipropileno. Asimismo, en estado endurecido, la inclusión de fibras disminuye la resistencia a la compresión, aunque sí beneficia la ductilidad. Se concluye que no es necesario añadir fibras a una mezcla de CAC debido a que producen una disminución en el rendimiento de las propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido (a excepción de la ductilidad).

Palabras claves: Concreto autocompactable, macrofibras, microfibras, diseño de mezclas

## **1. Abstract**

In this article we discuss and analyze the behavior that causes the incorporation of polypropylene macro and microfibers in self-compacting concrete mixtures (SCC) based on polycarboxylate technology. To perform an evaluation of the impact of the fibers, two quantities of cement were used, both within the range established by the American Concrete Institute (ACI) and the Experts for Specialized Construction and Concrete Systems (EFNARC). The tests are divided with respect to the state of the concrete: fresh state and hardened state. For the fresh tests, the T50, J-ring and visual stability index flow and settlement tests were chosen, which measure the properties of filling capacity, flow capacity and resistance to segregation, respectively. In a hardened state, compression and flexural strength tests were chosen. The results in fresh state don't show a benefit in the SCC when including synthetic polypropylene fibers. Also, in a hardened state, the inclusion of fibers decreases the resistance to compression, although it does benefit the ductility. It is concluded that it is not necessary to add fibers to a SCC mixture because they produce a decrease in the performance of the properties both in the fresh state and in the hardened state (with the exception of ductility).

Keywords: Self-compacting concrete mixtures, macrofibers, microfibers, Mix desing

## 2. Introducción

La tecnología del concreto es una disciplina de la Ingeniería Civil que abarca un conjunto de conocimientos científicos orientados hacia la aplicación, técnica, práctica y eficiencia del uso del concreto en la construcción (García, 2013). Una mejora en la eficiencia que se desarrolla en el concreto es la autocompactación y la trabajabilidad. Fue así que se originó el concepto de concreto autocompactable (CAC). Sin embargo, debido a la tendencia del concreto a fisurarse, se realizan estudios acerca de los componentes del concreto, tradicionales y nuevos, para controlar este fenómeno. Un avance es el empleo de fibras poliméricas.

### 2.1 Origen del CAC

Desde los años 80, la disminución de trabajadores especializados en compactación del concreto en obra afectaba directamente en la calidad de las construcciones. Es por ello que en 1986 Okamura, junto con Ozawa y Maekawa en la universidad de Tokio proponen un tipo de concreto que se compacte y pueda llegar a todas las partes del encofrado por solo la acción de su propio peso (Okamura & Ouchi, 2003). Sus investigaciones demuestran que para obtener una mayor fluidez era necesaria una variación de la relación agua-cemento; sin embargo, para no afectar la viscosidad es que se emplea los aditivos superplastificantes (Vilanova, 2015).

La idea no es totalmente desarrollada sino hasta 1988 donde se presenta el primer prototipo utilizando los materiales disponibles de la época y el superplastificante. En un inicio fue nombrado como concreto de alto rendimiento, pero luego fue denominado como concreto de alta durabilidad. Para evitar confusión con otro tipo de concreto se le renombra como concreto autocompactable de alto rendimiento (Okamura & Ouchi, 2003).

### 2.1 Origen de las fibras

El concepto de incluir fibras como refuerzo en elementos estructurales es una idea usada desde la antigüedad (Geotexan, 2014). Actualmente, se evalúa el uso de fibras sintéticas debido a su fácil almacenaje, manipuleo y baja densidad. Este tipo de fibras son diversas respecto a su composición molecular; existen acrílicas, de carbón, de nylon, de poliéster, de polietileno y de polipropileno (Benavides Cerezo & González Salcedo, 2012). Otra clasificación es según la funcionalidad, tamaño y dosificación de las fibras; dividiéndose en macro y microfibras.

## 3. Propiedades

### 3.1. Del CAC

Según el ACI 237R 07 (2007), el CAC es un concreto altamente fluido sin que se produzca segregación y sin modificar la viscosidad. Estas bondades se verifican en base a tres propiedades importantes en estado fresco: capacidad de paso, capacidad de relleno y resistencia a la segregación.

#### Capacidad de relleno

La capacidad de relleno o fluidez limitada, es la característica por la cual el concreto fluye libremente en un encofrado, para tomar la forma de éste sin ninguna necesidad de instrumentos mecánicos, más que por la acción de su propio peso. Esta propiedad provee al concreto un acabado final liso y sin cangrejas, ya que la mezcla es capaz de cubrir todos los espacios del elemento perfectamente (ACI 237R-07, 2007). Para lograr la capacidad de relleno, se necesita un porcentaje alto de finos, pues estos le dan la movilidad y fluidez a la mezcla, reduciendo la fricción que existe entre sus partículas. Otra manera de lograr esta característica es el uso de superplastificantes, pues actúan sin necesidad de aumentar la cantidad de agua, la cual finalmente contribuye a la segregación.

Se cuantifica con los ensayos de flujo de asentamiento, embudo V, Orimet y de flujo T50.

## **Capacidad de paso**

El ACI 237R 07 refiere que la capacidad de paso es la condición de fluir libremente a través de espacios estrechos en el encofrado o a través del armado sin indicios de bloqueo del agregado grueso ni otros fenómenos (segregación y exudación) relacionados con la pérdida de homogeneidad.

Para cuantificar se utiliza los ensayos de anillo J, caja L, caja U y caja de relleno.

## **Resistencia a la segregación**

Es la capacidad que tiene el concreto de mantenerse homogéneo, sin separación de sus agregados o exudación del agua de la mezcla. Está directamente relacionada con la viscosidad; si la mezcla es altamente viscosa, la velocidad de deformación será muy baja y fluirá muy lentamente. Es por eso que para mantener una composición homogénea se debe conseguir una viscosidad adecuada del concreto (ACI 237R-07, 2007).

Existen dos tipos de segregación:

- Segregación dinámica, que puede corregirse en la etapa del diseño mediante las pruebas hechas en el concreto en estado fresco, y se evidencia cuando el concreto está fluyendo en el encofrado.
- Segregación estática, que se produce por el fenómeno de sedimentación en la mezcla y se presenta cuando el concreto se encuentra en reposo dentro del encofrado.

La resistencia a la segregación se calificó mediante el índice de estabilidad visual y embudo V a T50min.

## **3.2. De la fibra de polipropileno**

Están diseñadas para ser compatibles con el medio alcalino de la mezcla de concreto. El aporte en la mezcla de concreto se puede diferenciar si se considera el tamaño de la fibra, para lo cual se han dividido en dos grupos: macrofibra y microfibra.

### **Macrofibra**

Las macrofibras tienen la función de prevenir la fisuración en estado endurecido, reducir el tamaño de la fisura y permitir el adecuado comportamiento de la estructura ante una eventual fisuración. (Lievano, 2011)

### **Microfibra**

Las microfibras evitan el agrietamiento y la microfisuración del concreto en estado fresco o antes de las 24 horas. (Lievano, 2011) Así también las fisuras por temperatura en estado endurecido.

## **4. Programa experimental**

El programa experimental detalla las características de los materiales, la metodología de trabajo y los diseños de mezclas.

### **4.1. Materiales**

Los materiales empleados en esta investigación son los siguientes: agregado fino, agregado grueso, cemento, aditivo superplastificante, aditivo modulador de viscosidad, macrofibras y microfibras.

A continuación, se presenta la tabla 4.1 con las propiedades físicas de los materiales.

**Tabla 4.1** PROPIEDADES DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL CAC.

Material	Propiedad	Valor	Unidad
Agregado fino	Peso específico de la masa ( <i>bulk</i> )	2.72	g/cm <sup>3</sup>
	Peso <i>bulk</i> superficialmente seco	2.75	g/cm <sup>3</sup>
	Peso específico aparente	2.82	g/cm <sup>3</sup>
	Módulo de finura	1.72	-
	Humedad de absorción	1.32	%
Agregado Grueso	Peso específico de la	2.75	g/cm <sup>3</sup>
	Peso <i>bulk</i> superficialmente	2.78	g/cm <sup>3</sup>
	Peso específico aparente	2.85	g/cm <sup>3</sup>
	Módulo de finura	3.46	-
	Humedad de absorción	1.26	%
Cemento	Densidad	3.15	g/cm <sup>3</sup>
Reductor de agua	Dosis	800-1500	ml/100kg
	Densidad	1.06	g/cm <sup>3</sup>
Modulador de viscosidad	Dosis	400-560	ml/100kg
	Densidad	1.12	g/cm <sup>3</sup>
Microfibras	Densidad	0.91	g/cm <sup>3</sup>
	Dosificación	0.6	kg/m <sup>3</sup>
	Longitud	12	mm
Macrofibras	Gravedad específica	0.91	-
	Dosificación	1	kg/m <sup>3</sup>
	Longitud	48	mm

Fuente: Elaboración Propia

## 4.2. Metodología

La metodología consiste en la ejecución de ensayos para medir las propiedades del CAC en estado fresco y en estado endurecido.

### Estado Fresco

Dado que el comportamiento en estado fresco del CAC difiere ampliamente del correspondiente al concreto convencional, los métodos de ensayo tradicionales resultan no eficientes. Las propiedades del CAC en estado fresco, como la capacidad de paso, capacidad de relleno y resistencia a la segregación, deben ser determinadas y cuantificadas por ensayos representativos.

En la sección 3.1 se mencionaron los ensayos que miden las propiedades del CAC en estado fresco. A continuación, se especifican todos los ensayos que se emplearon para ejecutar la etapa experimental.

#### - Flujo de asentamiento

Para realizar el ensayo se necesita un cono de Abrams de metal con un diámetro superior de 100 mm, inferior de 200 mm y con una altura de 300 mm, además en la base se requiere una placa de material rígido no absorbente de por lo menos 700x700 mm donde se le marcará un círculo que indique la ubicación de la parte inferior del cono, así como un círculo concéntrico de 500 mm de diámetro para realizar el ensayo de flujo T50 de manera simultánea. El procedimiento consiste en rellenar el cono de Abrams completamente sin ningún tipo de varillado ni compactado y levantar el cono a ritmo constante. Luego, cuando la mezcla esté estable, medir dos diámetros perpendiculares entre sí de la expansión, y sacar el promedio aritmético (EFNARC, 2002).

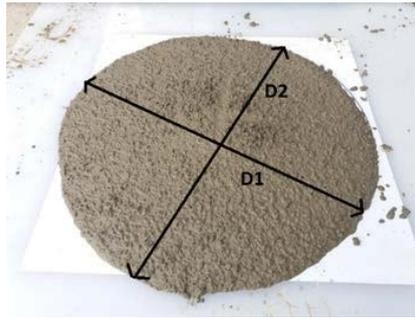


Foto 4.1. Diámetros perpendiculares entre sí.

Según el EFNARC (2002), con la condición de tener áridos de un máximo tamaño de 20 mm, el rango para aceptar que se trata de un CAC está entre 650 y 800 mm. Esto es independiente de la cantidad de material o resistencia del concreto.

En ACI 237R-07 (2007) la expansión diametral depende del elemento estructural a llenar para el cual se tiene un rango mínimo y máximo que puede alcanzar la expansión del concreto. El valor permite la comparación del flujo lateral y el potencial de relleno que pueda poseer el CAC. Los valores comunes que propone el ACI están en el rango de 450 mm a 760 mm y los criterios que se adoptan se muestran en la tabla correspondiente.

Tabla 4.2. RANGO DE ACEPTACIÓN SEGÚN EL EFNARC PARA VERIFICAR UNA MEZCLA

Método	Unidad	Mínimo	Máxima
Flujo de asentamiento por cono de Abrams	mm	650	800

Fuente: EFNARC

Tabla 4.3. RANGO DE ACEPTACIÓN SEGÚN EL ACI PARA VERIFICAR UNA MEZCLA AUTOCOMPACTABLE. (FUENTE: DACZKO & CONSTANTINER, 2001)

CARACTERÍSTICAS DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES		SLUMP FLOW		
		<550 mm	550 a 650 mm	>650 mm
Nivel de refuerzo	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Elementos de forma complicada	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Elementos profundos	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Excelentes acabados superficiales	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Elementos largos	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Paredes delgadas	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Contenido de agregado grueso	Bajo			
	Medio			
	Alto			
Energía de colación	Bajo			
	Medio			
	Alto			

Fuente: ACI

#### - Flujo T50

Consiste en medir el tiempo que tarda la mezcla en llegar a los 500 mm de diámetro contado desde el levantamiento del cono de Abrams. Se establece como un criterio para verificar la rapidez con la que el concreto puede expandirse.

Según la investigación de EFNARC (2005), el rango de tiempo que debe transcurrir hasta llegar a los 500 mm es de 2 a 5 segundos para edificaciones. El ACI indica que el tiempo que debe transcurrir hasta llegar a los 500 mm debe ser de 2 a 5 segundos.

**Tabla 4.4.** RANGO DE TIEMPO PERMISIBLE PARA CONDICIÓN DE CONCRETO AUTOCOMPACTABLE SEGÚN ACI Y EFNARC.

Método	Unidad	Mínimo	Máxima
Ensayo de flujo T50	segundos	2	5

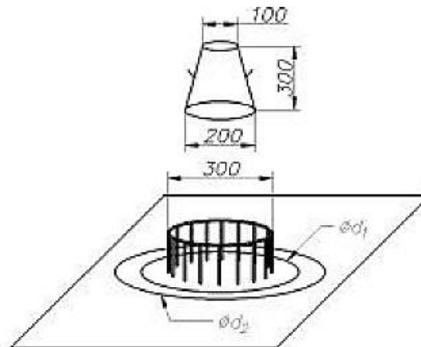
Fuente: ACI Y EFNARC

- Anillo J

Para este ensayo se requiere de una placa base de asiento que será de por lo menos 700x700 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro. También se debe disponer de un anillo de 300 mm de diámetro y 100 mm de altura con varillas incrustadas a su alrededor las cuales tendrán una separación entre sí de aproximadamente 48 mm. Por último, se deberá colocar, con la parte inferior ubicada en la marca de la base y concéntrica al anillo J, el cono truncado, con unas dimensiones internas de 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.

Después eleve el cono verticalmente y permita que el hormigón fluya hacia el exterior libremente. Mida el diámetro final del hormigón en dos direcciones perpendiculares y posteriormente calcule el promedio de los dos diámetros medidos (en mm).

También mida la diferencia de altura entre el hormigón justo en el interior de las barras y el que se encuentra justo en el exterior de las mismas. Calcule el promedio de la diferencia de altura en cuatro lugares (en mm) (EFNARC, 2005).



**Figura 4.1.** Elementos necesarios para realizar el ensayo de anillo J (Fuente: EFNARC)

En la norma ASTM C1621/C1621M-17 especifica que este ensayo está dirigido solamente para mezclas de concreto autocompactable con agregado grueso de tamaño nominal no superior a 25 mm. Un indicador para conocer si cumple con la capacidad de paso del CAC es medir la diferencia entre el flujo de asentamiento y el flujo del anillo J, si se obtiene una diferencia menor a 25 mm significa que cumple con la capacidad de paso, pero una diferencia mayor a 50 mm significa una deficiencia en esta propiedad.

- Índice de estabilidad visual (IEV)

Este índice está considerado por el ACI y por las normas NTP, en las publicaciones ACI 237R-07 y NTP 339.219, respectivamente. Con este índice puede ser observada visualmente la estabilidad de CAC por examinación de la masa de concreto y por tanto puede ser usada para control de calidad de las mezclas de concreto autocompactable. Para ambos casos se utiliza la clasificación de Daczko & Kurtz. Los valores corresponden a criterios que cualitativamente aseguran la estabilidad del CAC. Sin embargo, estos valores no cuantifican una propiedad del concreto. A continuación, se detallan las especificaciones que dictan tanto las normas ACI y NTP.

**Tabla 4.5. CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD SEGÚN LA ACI Y NTP. (FUENTE: DACZKO & KURTZ 2001).**

	Valor de VSI	Criterio
<b>ACI</b>	<b>0 = Muy estable</b>	Ninguna evidencia de segregación.
	<b>1 = Estable</b>	No hay presencia de halo de mortero o apilamiento de agregado. Ligero sangrado o burbujas de aire en la superficie de concreto en la mezcladora o carretilla.
	<b>2 = Inestable</b>	Ligero halo de mortero (< 10 mm) y/o apilamiento de agregado en el espécimen. Notable sangrado en la pasta.
	<b>3 = Muy inestable</b>	Gran halo de mortero (> 10 mm) y/o un apilamiento de agregado en el centro. Capa gruesa de pasta en la superficie.
<b>NTP</b>	<b>0 = Alta estabilidad</b>	No hay evidencia de segregación o exudación.
	<b>1 = Estable</b>	No hay evidencia de segregación, ligera exudación observada como un resplandor sobre la masa del concreto.
	<b>2 = Inestable</b>	Una corona ligera de mortero $\leq 10$ mm y/o pila de agregados en el interior de la masa de concreto.
	<b>3=Inestabilidad alta</b>	Clara segregación por evidencia de una corona de mortero grande > 10 mm y/o una pila de agregados grandes en el centro de la masa de concreto.

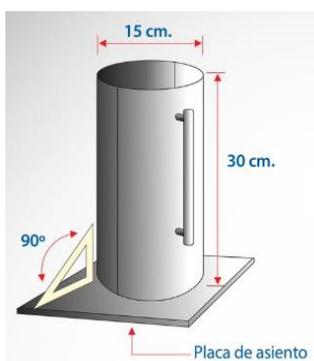
Fuente: ACI Y NTP

### Estado endurecido

El análisis del CAC en estado endurecido se basa en los mismos ensayos que se aplican al concreto convencional. Estos son los ensayos de resistencia a la compresión y flexión de vigas de concreto reforzadas con fibra.

#### - Ensayo de resistencia a la compresión

Las indicaciones que dicta la NTP 339.034 consisten en aplicar una carga de compresión axial a cilindros moldeados o extracciones de diamantina a una velocidad normalizada en un rango hasta que se produce la falla. La resistencia será medida entre la carga máxima alcanzada entre el área de la sección de la probeta. Se tienen probetas normalizadas de 6" de diámetro y 12" de alto.

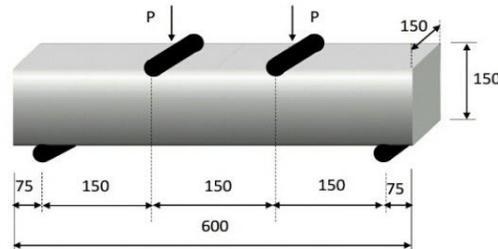


**Figura 4.2.** Medidas estándar de un molde de una probeta de concreto para ensayo de compresión. (Fuente: Aceros Arequipa).

Se requiere generalmente una cantidad de tres probetas como mínimo por día, que deben ser previamente llevadas a un proceso de curado (almacén de humedad) antes de realizar los ensayos, los cuales deben ser realizados en condición húmeda. Si las medidas de los diámetros entre probetas similares difieren en más del 2%, no se recomienda ensayar. La velocidad de carga será con una velocidad de esfuerzo de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s que se tratará de mantener constante.

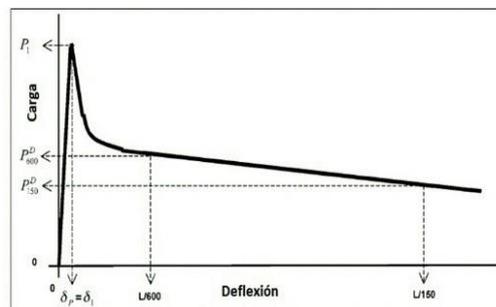
## - Ensayo de flexión

El ensayo de flexión, descrito en la norma ASTM C1609, evalúa la respuesta que tiene el concreto frente a la flexión. A la viga se le aplica una carga a cada tercio de su lado más largo por medio de un equipo servo-hidráulico de lazo cerrado. Las dimensiones de la viga son 150 x 150 x 600 mm. De manera similar a una probeta estándar, la viga debe ser llevada a un proceso de curado antes de ensayarla.



**Figura 4.3.** Medidas estándar de una viga de concreto para el ensayo de flexión. (Fuente: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural)

Por medio de este ensayo se obtiene la carga máxima que puede soportar el concreto por flexión, la cual es la primera carga más alta de la curva en el diagrama de carga versus deflexión. En este mismo gráfico se puede observar las resistencias residuales frente a los efectos de tracción y flexión luego que el concreto se ha agrietado y la tenacidad que es el área bajo la curva descrita.



**Figura 4.4.** Comportamiento de la deflexión debido a la aplicación de la carga a cada tercio de la viga. (Fuente: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural)

La aplicación de la carga ejercida por la máquina se encuentra regulada por una velocidad constante que puede variar entre 0.06 a 0.12 mm/min.

### 4.3. Diseños de mezclas

#### Mezcla definitiva 350 kg/m<sup>3</sup>

Para obtener la dosificación definitiva de la mezcla con cantidad de cemento de 350 kg/m<sup>3</sup> se realizaron seis ensayos de pruebas bajo el criterio descrito en el ACI 237R-07. En el manejo de las cantidades de los materiales se tuvo en consideración lo siguiente:

- La cantidad de cemento se mantiene constante.
- La cantidad de agregado grueso y fino (en volumen) se calcula a partir de las proporciones de pasta y mortero (en volumen).
- Para cambiar la cantidad de agua de la mezcla, se evalúa el cambio de dosis del aditivo súperplastificante.

A partir de la mezcla definitiva, se deciden las dosificaciones con fibra. En las especificaciones del manual “Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable” del EFNARC, se indica que la dosificación máxima de fibras es 1 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Por ello, las dosificaciones de macro y microfibras no superan este valor. Las relaciones entre microfibras (m) y macrofibras (M), en peso, se muestran a continuación:

- Dosificación 1: 0.6/1 (m/M).
- Dosificación 2: 0.5/1 (m/M).
- Dosificación 3: 0.4/1 (m/M).

Los diseños de mezclas definitivos son los siguientes:

- **MI350-SF:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 350 kg/m<sup>3</sup> de concreto, sin fibra.
- **MI350-CF-D1:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 350 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 1 de fibras.
- **MI350-CF-D2:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 350 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 2 de fibras.
- **MI350-CF-D3:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 350 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 3 de fibras.

**Tabla 4.6. DOSIFICACIÓN UTILIZADA PARA TODAS LAS MEZCLAS CON UNA CANTIDAD DE CEMENTO DE 350 KG/M<sup>3</sup>.**

MATERIAL	UNIDAD	MI-350-SF	MI-350-CF-D1	MI-350-CF-D2	MI-350-CF-D3
CEMENTO TIPO I	Kg	350	350	350	350
AGUA	Kg	210	210	210	210
ARENA	Kg	1209.5	1209.5	1209.5	1209.5
PIEDRA	Kg	648.6	648.6	648.6	648.6
GLENIUM SCC 3800	ml	5250	5250	5250	5250
DOSIS	ml/kg	15	15	15	15
MASTER SET R770i	ml	1750	1750	1750	1750
DOSIS	ml/kg	5	5	5	5
INCIDENCIA ARENA	%	60	60	60	60
INCIDENCIA PIEDRA	%	40	40	40	40
PASTA	%	34	34	34	34
MORTERO	%	75	75	75	75
MACRO FIBRA	g	-	1000	1000	1000
MICRO FIBRA	g	-	600	500	400

Fuente: Elaboración Propia

### Mezcla definitiva 450 Kg/m<sup>3</sup>

Para obtener la dosificación definitiva de la mezcla con cantidad de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup> se realizaron 16 ensayos de prueba bajo el criterio descrito en el ACI 237R-07. En el manejo de las cantidades de los materiales se tuvo en consideración lo siguiente:

- La cantidad de cemento se mantiene constante.
- La cantidad de agregado grueso y fino (en volumen) se calcula a partir de las proporciones de pasta y mortero (en volumen).
- Para cambiar la cantidad de agua de la mezcla, se evalúa el cambio de dosis del aditivo súperplastificante.

A partir de la mezcla definitiva, se deciden las dosificaciones con fibra. En las especificaciones del manual “Especificaciones y directrices para el hormigón autocompactable” del EFNARC, se indica que la dosificación máxima de fibras es 1 kg/m<sup>3</sup> de concreto. Por ello, las dosificaciones de macro y microfibras no superan este valor. Las relaciones entre microfibras (m) y macrofibras (M), en peso, se muestran a continuación:

- Dosificación 1: 0.6/1 (m/M).
- Dosificación 2: 0.5/1 (m/M).
- Dosificación 3: 0.4/1 (m/M).

Los diseños de mezclas definitivos son los siguientes:

- **MI450-SF:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 450 kg/m<sup>3</sup> de concreto, sin fibra.
- **MI450-CF-D1:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 450 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 1 de fibras.
- **MI450-CF-D2:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 450 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 2 de fibras.
- **MI450-CF-D3:** Mezcla con cemento tipo I, en cantidad de 450 kg/m<sup>3</sup> de concreto, con la dosificación 3 de fibras.

**Tabla 4.7. DOSIFICACIÓN UTILIZADA PARA TODAS LAS MEZCLAS CON UNA CANTIDAD DE CEMENTO DE 450 KG/M<sup>3</sup>.**

MATERIAL	UNIDAD	MI-450-SF	MI-450-CF-D1	MI-450-CF-D2	MI-450-CF-D3
CEMENTO TIPO I	Kg	450	450	450	450
AGUA	Kg	210	210	210	210
ARENA	Kg	1091.7	1091.7	1091.7	1091.7
PIEDRA	Kg	676.8	676.8	676.8	676.8
GLENIUM SCC 3800	ml	5850	5850	5850	5850
DOSIS	ml/kg	13	13	13	13
MASTER SET R770i	ml	2250	2250	2250	2250
DOSIS	ml/kg	5	5	5	5
INCIDENCIA ARENA	%	60	60	60	60
INCIDENCIA PIEDRA	%	40	40	40	40
PASTA	%	34	34	34	34
MORTERO	%	74	74	74	74
MACRO FIBRA	g	-	1000	1000	1000
MICRO FIBRA	g	-	600	500	400

Fuente: Elaboración Propia

### Secuencia de mezclado

Se inicia echando a la mezcladora el 70% de la cantidad total de agua, el cual contiene Glenium SCC 3800 especificada en la dosificación. Luego se añade el cemento tipo I. Treinta segundos después, se vierten el agregado grueso y el agregado fino. Se mezcla dos minutos más y se carga el 30% de agua, que contiene el aditivo Master Set R770i según la dosificación. Para el caso de las mezclas con fibra, se añadió la macro y la microfibra luego de verter la cantidad final de agua, cuando visualmente la mezcla mostrara una consistencia fluida.

## 5. Resultados de los ensayos

Se presentan los resultados de los ensayos en estado fresco y en estado endurecido.

### 5.1. En estado fresco

Los resultados en estado fresco se obtuvieron de los ensayos de flujo de asentamiento, flujo T50, anillo J e índice de estabilidad visual.

#### Mezclas de 350 Kg/m<sup>3</sup>

Los resultados obtenidos en el ensayo de flujo de asentamiento fueron 440 mm, 419 mm, 380 mm y 397 mm de diámetro para las mezclas MI350-SF, MI350-CF-D1, MI350-CF-D2 y MI350-CF-D3 respectivamente.

Para las cuatro mezclas se registró “expansión insuficiente” en el ensayo flujo T50, ya que los diámetros de las mezclas no llegaron a los 500 mm.

En el ensayo anillo J, la mezcla MI350-SF se expandió 400 mm. Las mezclas MI350-CF-D1, MI350-CF-D2 y MI350-CF-D3 se expandieron 333 mm, 370 mm y 380 mm respectivamente.

Los resultados obtenidos de las mezclas MI350-SF, MI350-CF-D1, MI350-CF-D2 del ensayo de índice de estabilidad visual fueron 0. No presentaron exudación ni segregación. La mezcla MI350-CF-D3 presentó una anomalía; se observa un halo significativo de exudación y el valor del índice es 2.

La diferencia de alturas tanto exterior como interior del anillo J da como resultado que para la mezcla MI-350-SF se tiene una diferencia 38 mm, para MI-350-CF-D2 y MI-350-CF-D3, les corresponde 42 mm y 51 mm respectivamente. La mezcla MI350-CF-D1 no dio un resultado ya que no hubo paso del concreto desde el interior del anillo hacia el exterior, lo que arrojaría una diferencia de alturas muy elevada. Todos los valores son mayores a 10 mm, es decir, no se cumple la capacidad de paso bajo este criterio.

Finalmente, se evalúa el porcentaje de reducción entre los ensayos de expansión diametral y de anillo J. La mezcla MI350-CF-D1 tuvo una reducción de diámetro en su expansión de 21%. Mientras las mezclas MI350-SF, MI350-CF-D2 y MI350-CF-D3 tuvieron una reducción de 9%, 3% y 4% respectivamente.

**Tabla 5.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE 350 KG/M<sup>3</sup> EN ESTADO FRESCO.**

	<b>MI-350-SF</b>	<b>MI-350-CF-D1</b>	<b>MI-350-CF-D2</b>	<b>MI-350-CF-D3</b>
<b>EXPANSION DIAMETRAL (mm)</b>	440	419	380	398
<b>EXPANSIÓN DIAMETRAL T50 (s)</b>	Expansión Insuficiente	Expansión insuficiente	Expansión insuficiente	Expansión insuficiente
				
<b>ANILLO J (mm)</b>	400	332.5	370	380
<b>Hext (mm)</b>	85	-	102	102
<b>Hint (mm)</b>	47	-	60	51
				
<b>IEV</b>	0	0	0	2
<b>REDUCCION DE DIMETRO EX. DIAMETRAL Y ANILLO J</b>	9%	21%	3%	4%

Fuente: Elaboración Propia

### **Mezclas de 450 Kg/m<sup>3</sup>**

Los resultados obtenidos en el ensayo flujo de asentamiento fueron 540 mm, 525 mm, 540 mm y 505 mm de diámetro para las mezclas MI450-SF, MI450-CF-D1, MI450-CF-D2, MI450-CF-D3, respectivamente.

Los tiempos registrados en el ensayo flujo T50 fueron 1.93 s, 1.23 s, 1.33 s y 5.65 s para las mezclas MI450-SF, MI450-CF-D1, MI450-CF-D2, MI450-CF-D3, respectivamente.

En el ensayo anillo J, la mezcla MI450-SF se expandió 540 mm. Las mezclas MI450-CF-D1, MI450-CF-D2 y MI450-CF-D3 se expandieron 465 mm, 465 mm y 425 mm, respectivamente.

Los resultados obtenidos de las mezclas MI450-SF, MI450-CF-D2, MI450-CF-D3 del ensayo de índice de estabilidad visual fueron 1. Presentaron una ligera exudación y acumulación de agregado en cierto sector. La mezcla MI450-CF-D1 presenta una correcta expansión sin exudación ni segregación. El valor asignado del índice es 0.

La diferencia de alturas tanto exterior como interior del anillo J da como resultado que para la mezcla MI450-SF se tiene 19 mm de diferencia, para MI450-CF-D1, MI450-CF-D2 y MI450-CF-D3 les corresponde 25 mm, 35mm y 30 mm respectivamente. Como los valores son mayores a 10 mm según este parámetro no se cumple la capacidad de paso.

Finalmente, se evalúa el porcentaje de reducción entre los ensayos de expansión diametral y de anillo J. La mezcla MI450-SF tuvo una reducción de diámetro en su expansión de 0%, mientras que las mezclas MI450-CF-D1, MI450-CF-D2 Y MI450-CF-D3 tuvieron una reducción de 11%, 14% y 16% respectivamente.

**Tabla 5.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LAS MEZCLAS DE 450 KG/M<sup>3</sup> EN ESTADO FRESCO.**

	MI-450-SF	MI-450-CF-D1	MI-450-CF-D2	MI-450-CF-D3
<b>EXPANSION DIAMETRAL(mm)</b>	540	525	540	505
<b>EXPANSION DIAMETRAL T50 (s)</b>	1.93	1.23	1.33	5.65
				
<b>ANILLO J (mm)</b>	540	465	465	425
<b>Hext (mm)</b>	86	78	86	82
<b>Hint (mm)</b>	67	53	51	52
				
<b>IEV</b>	1	0	1	1
<b>REDUCCION DE DIAMETRO EX. DIAMETRAL Y ANILLO J</b>	0%	11%	14%	16%

Fuente: Elaboración Propia

## 5.2. En estado endurecido

Los resultados en estado endurecido se obtuvieron de los ensayos de resistencia a la compresión, flexión.

### Mezclas de 350 kg/m<sup>3</sup>

- Resistencia a la compresión

Realizado con las medidas de las probetas estándar normalizadas (6"x12") para un total de 23 probetas repartidas en cuatro diseños de mezcla y ensayadas a los 7 y a los 28 días. Para los días asignados se tomaron tres probetas para el ensayo. Los resultados obtenidos son el promedio aritmético de cada caso.

**Tabla 5.3. RESULTADOS DE LOS ESFUERZOS MEDIDOS A 7 Y 28 DÍAS PARA CADA DISEÑO CON CANTIDAD DE CEMENTO 350 KG/M<sup>3</sup>.**

<b>EDAD (días)</b>	<b>PROBETA</b>	<b>ESFUERZO (MPa)</b>	<b>ESFUERZO PROMEDIO (MPa)</b>
7	MI-350-SF	30.2 - 27.2 - 32.5	30.0
	MI-350-CF-D1	21.4 - 16.0 - 12.8	16.7
	MI-350-CF-D2	14.3 - 13.7 - 11.6	13.2
	MI-350-CF-D3	12.5 - 12.0	12.3
28	MI-350-SF	39.9 - 37.6 - 37.4	38.3
	MI-350-CF-D1	25.7 - 26.3 - 27.6	26.5
	MI-350-CF-D2	17.8 - 16.3 - 14.6	16.2
	MI-350-CF-D3	12.5 - 25.8 - 18.8	19.0

Fuente: Elaboración Propia

#### - Ensayo de flexión

Este ensayo, que permite medir la tenacidad, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C1609 con las vigas de medidas estandarizadas de 150 x 150 x 500 mm. Se ensayaron 4 vigas, una por diseño de mezcla, a velocidad de 0.1 mm/minuto. Como se aprecia en la Tabla 5.4, la viga con mezcla MI350-SF es la que falla con mayor fuerza para el primer agrietamiento, en comparación con las demás mezclas que incluyen fibra sintética.

La tenacidad de cada viga fue 5 J, 22.09 J, 13.17 J y 11.28 J para las mezclas de MI350-SF, MI350-CF-D1, MI350-CF-D2 y MI350-CF-D3, respectivamente.

**Tabla 5.4. RESULTADOS DE CARGA DE FALLA Y DEFLEXIÓN PARA CADA DISEÑO CON CANTIDAD DE CEMENTO 350 KG/M<sup>3</sup>.**

<b>VIGA</b>	<b>CARGA DE FALLA (KN)</b>	<b>DEFLEXIÓN (mm)</b>
MI-350-SF	37.44	0.215
MI-350-CF-D1	34.60	0.184
MI-350-CF-D2	30.00	0.229
MI-350-CF-D3	22.83	0.242

Fuente: Elaboración Propia

### **Mezclas de 450 kg/m<sup>3</sup>**

#### - Resistencia a la compresión

Realizado con las medidas de las probetas estándar normalizadas (6"x12") para un total de 24 probetas repartidas en cuatro diseños de mezcla y ensayadas a los 7 y a los 28 días. Para los días asignados se tomaron tres probetas para el ensayo. Los resultados obtenidos son el promedio aritmético de cada caso.

**Tabla 5.5. RESULTADOS DE LOS ESFUERZOS MEDIDOS A 7 Y 28 DÍAS PARA CADA DISEÑO CON CANTIDAD DE CEMENTO 450 KG/M<sup>3</sup>.**

<b>EDAD (días)</b>	<b>PROBETA</b>	<b>ESFUERZO (MPa)</b>	<b>ESFUERZO PROMEDIO (MPa)</b>
7	MI-450-SF	33.9 - 39.9 - 35.3	36.4
	MI-450-CF-D1	27.0 - 26.0 - 30.8	27.9
	MI-450-CF-D2	24.9 - 23.6 - 20.3	22.9
	MI-450-CF-D3	35.8 - 39.8 - 38.1	37.9
28	MI-450-SF	42.3 - 47.8 - 50.0	46.7
	MI-450-CF-D1	28.6 - 32.6 - 44.8	35.3
	MI-450-CF-D2	34.8 - 31.8 - 31.5	32.7
	MI-450-CF-D3	43.4 - 41.9 - 41.5	42.3

Fuente: Elaboración Propia

#### - Ensayo de flexión

Este ensayo, que permite medir la tenacidad, se realizó de acuerdo a la norma ASTM C1609 con las vigas de medidas estandarizadas de 150 x 150 x 500 mm. Se ensayaron 4 vigas, una por diseño de mezcla, a velocidad de 0.1 mm/minuto. Como se aprecia en la Tabla 5.6, la viga con mezcla MI450-SF es la que falla con mayor fuerza para el primer agrietamiento, en comparación con las demás mezclas que incluyen fibra sintética.

Para la tenacidad se obtuvieron 5.7 J, 22.80 J, 11.16 J y 8.06 J para las mezclas MI450-CF-SF, MI450-CF-D1, MI450-CF-D2 y MI450-CF-D3, respectivamente.

**Tabla 5.6. RESULTADOS DE CARGA DE FALLA Y DEFLEXIÓN PARA CADA DISEÑO CON CANTIDAD DE CEMENTO 450 KG/M<sup>3</sup>.**

<b>VIGA</b>	<b>CARGA DE FALLA (KN)</b>	<b>DEFLEXIÓN (mm)</b>
MI-450-SF	45.21	0.326
MI-450-CF-D1	32.48	0.244
MI-350-CF-D2	30.68	0.194
MI-350-CF-D3	48.54	0.438

Fuente: Elaboración Propia

## 6. Discusión de resultados

### 6.1. En estado fresco

#### Mezclas de 350 Kg/m<sup>3</sup>

El primer parámetro a evaluar de la Tabla 5.1 son los diámetros obtenidos en la expansión diametral. Al comparar estos diámetros con los sugeridos por el EFNARC (Tabla 4.8), se verifica que no cumplen con el valor mínimo para asegurar la condición de capacidad de relleno, debido a que todos los valores son menores al mínimo de 650 mm. Para el caso de los parámetros establecidos por el ACI (Tabla 4.9), con los diámetros obtenidos, en general las mezclas podrían trabajar de manera eficiente en elementos con bajas características estructurales.

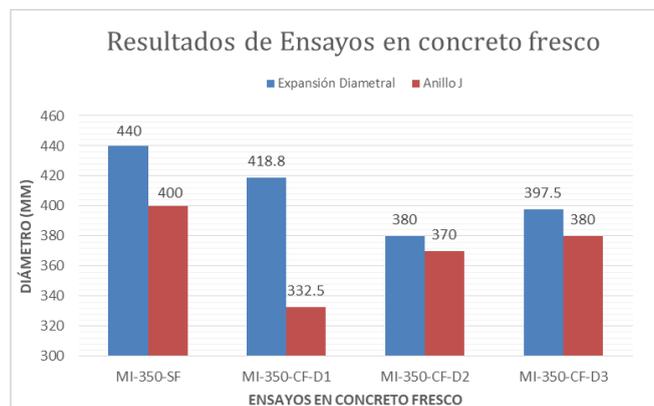
En lo que respecta al ensayo de flujo T50, los diámetros máximos son insuficientes para medir el tiempo ya que son menores a 500 mm, con lo que se reafirma el no cumplimiento de los requisitos para la capacidad de relleno.

En la Tabla 5.1 también se muestran los valores de los diámetros medidos para cada diseño de mezcla en el ensayo del anillo J donde la mezcla sin fibras posee el diámetro mayor a comparación de las mezclas con fibras por lo que sí se puede considerar cierto bloqueo de las fibras al libre paso del concreto por las armaduras del anillo J. Además, como la diferencia de alturas entre el interior y exterior del concreto medido en las barras son valores que superan los 10 mm se comprueba que tanto la dosificación con inclusión de fibras y sin fibras no cumplen con la condición de capacidad de paso.

En lo que respecta al índice de estabilidad visual, en general se obtuvo una estabilidad que podría calificarse como Muy estable o de Alta estabilidad, según las tablas establecidas por el ACI o la NTP, respectivamente. Sin embargo, para el caso de la mezcla con menor cantidad de microfibras se asignó una calificación de Inestable debido a la aparición de apilamiento de mortero en la parte central y una cantidad notable de sangrado.

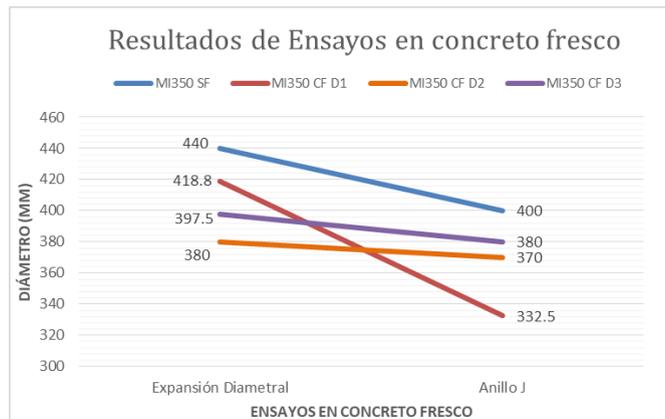
En el Gráfico 6.1 se han agrupado los resultados de los ensayos de expansión diametral y de anillo J de las cuatro mezclas con la cantidad de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup>. Se observa que los diámetros obtenidos en los ensayos de expansión diametral son mayores a los de los ensayos de anillo J tanto para la mezcla sin fibra como las que sí incluyen fibra. También el gráfico muestra que los dos diámetros obtenidos en la mezcla sin fibra son mayores a todos los obtenidos en las mezclas que incluyeron fibra.

Respecto a los resultados entre los ensayos de las mezclas con fibras, se observa que los obtenidos por el ensayo de anillo J muestran una tendencia de que a menor cantidad de micro fibra se produce un mayor diámetro. Algo similar no se puede afirmar de los resultados obtenidos a través de los ensayos de expansión diametral, en donde los resultados no muestran un patrón de tendencia respecto a la dosificación de fibra. Adicionalmente, se ve una tendencia de que a menor presencia de microfibra en la mezcla, la diferencia entre los diámetros de la expansión diametral y anillo J difiere menos.



**Figura 6.1.** Gráfico de Barras de los ensayos de Expansión Diametral y Anillo J de las dosificaciones de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

En el gráfico de líneas, a parte de lo descrito anteriormente, se puede visualizar de mejor manera que la variación en la dosificación de microfibra no genera una tendencia de proporcionalidad con los diámetros obtenidos ni en los ensayos de expansión diametral ni en los de anillo J.



**Figura 6.2.** Gráfico de Líneas de los ensayos de Expansión Diametral y Anillo J de las dosificaciones de cemento de 350 Kg/m<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

### Mezclas de 450 Kg/m<sup>3</sup>

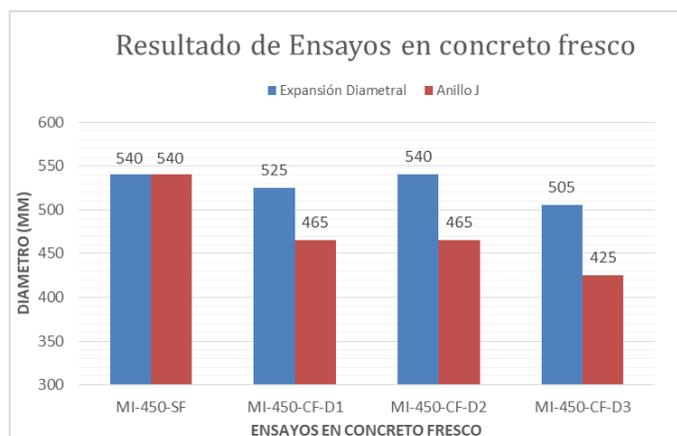
El primer parámetro a evaluar de la Tabla 5.1 son los diámetros obtenidos en la expansión diametral. Al comparar estos diámetros con los sugeridos por el EFNARC (Tabla 4.8), se verifica que no cumplen con el valor mínimo para asegurar la condición de capacidad de relleno, debido a que todos los valores son menores al mínimo de 650 mm. En el caso de los parámetros establecidos por el ACI (Tabla 4.9) con los diámetros obtenidos, en general las mezclas podrían trabajar de manera eficiente en elementos con bajas características estructurales.

Para el caso del ensayo de flujo T50 en la Tabla 5.2, los valores obtenidos no cumplen con el rango de valores recomendados por el EFNARC y ACI (Tabla 4.10).

En la Tabla 5.2 también se muestran los valores de los diámetros medidos para cada diseño de mezcla en el ensayo del anillo J donde la mezcla sin fibras posee el diámetro mayor a comparación de las mezclas con fibras por lo que sí se puede considerar cierto bloqueo de las fibras al libre paso del concreto por las armaduras del anillo J. Además, como la diferencia de alturas entre el interior y exterior del concreto medido en las barras son valores que superan los 10 mm se comprueba que tanto la dosificación con inclusión de fibras y sin fibras no cumplen con la condición de capacidad de paso.

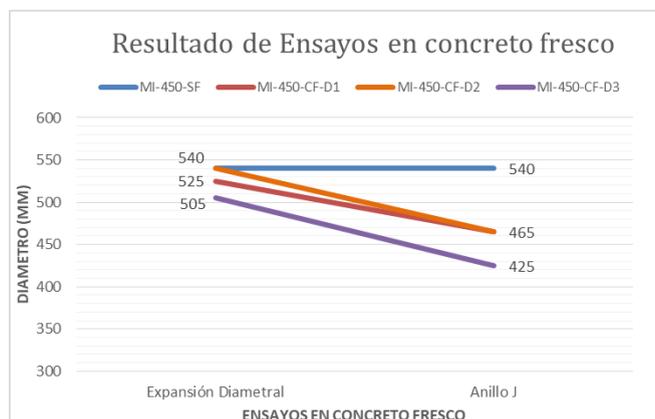
En lo que respecta al índice de estabilidad visual, en general se obtuvo una estabilidad que podría calificarse como Estable, según las tablas establecidas por el ACI o la NTP, respectivamente.

En el Gráfico 6.3 se han agrupado los resultados de los ensayos de expansión diametral y de anillo J de las cuatro mezclas con 450 Kg/m<sup>3</sup> de cemento. Se observa que para la mezcla sin fibra los dos diámetros obtenidos son iguales y mayores en ambos casos a los diámetros obtenidos con las mezclas con fibras, para las cuales además se muestra que los diámetros registrados de los ensayos de expansión diametral son mayores a de los ensayos de anillo J. Con los resultados de este ensayo se puede apreciar una tendencia a que el diámetro disminuya cuando la cantidad de microfibra también disminuye. Sin embargo, esta relación no se cumple para los ensayos de expansión diametral en donde el diámetro obtenido de la mezcla MI450-CF-D2 es igual al diámetro obtenido en la mezcla sin fibra.



**Figura 6.3.** Gráfico de Barras de los ensayos de Expansión Diametral y Anillo J de las dosificaciones de cemento de 450 Kg/m<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

En el gráfico de líneas se puede comprobar que no existe una tendencia proporcional entre la cantidad de microfibra utilizada y los diámetros obtenidos para los ensayos de expansión diametral ni los ensayos de anillo J.

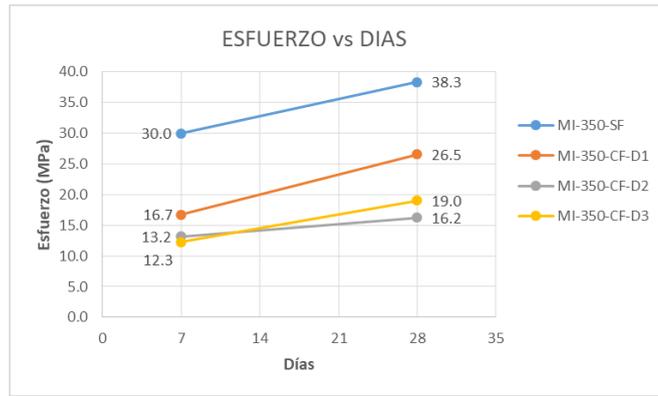


**Figura 6.4.** Gráfico de Líneas de los ensayos de Expansión Diametral y Anillo J de las dosificaciones de cemento de 450 Kg/m<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

## 6.2. En estado endurecido

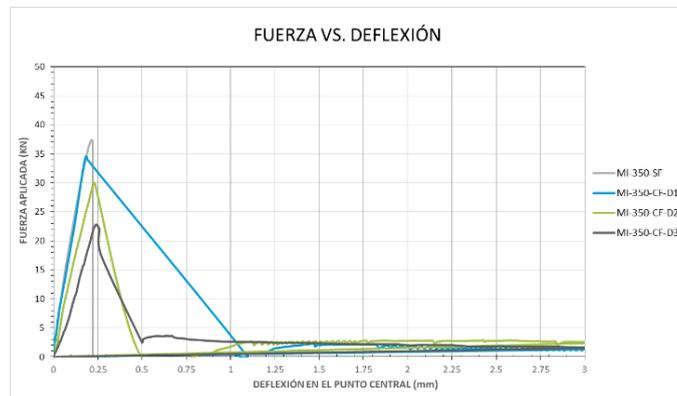
### Mezclas de 350 Kg/m<sup>3</sup>

En el Gráfico 6.5 se han agrupado, en líneas de tiempo de 7 y 28 días, las resistencias a la compresión registradas de cada mezcla de 350 Kg/cm<sup>3</sup>. La primera característica a señalar es la significativa disminución que se produce en la resistencia de la mezcla sin fibras a las mezclas con fibras, la cual es un promedio del 50%. Para el caso de las resistencias a 7 días de las mezclas que incluyen fibras se cumple una relación de proporcionalidad entre la cantidad de fibras y el esfuerzo. Sin embargo, esta tendencia no se puede afirmar para las resistencias obtenidas a 28 días, en las cuales se produce una anomalía en las 2 mezclas con menos cantidad de microfibras.



**Figura 6.5.** Variación de resistencia a la compresión en el tiempo de las mezclas con una dosificación de cemento de 350 Kg/cm<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

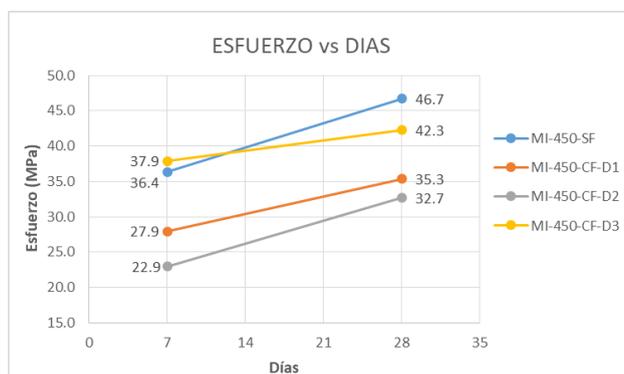
En el Gráfico 6.6 se muestra el comportamiento registrado por el ensayo de flexión de vigas. Respecto a las cargas máximas de falla obtenidas, se observa que las mezclas con fibras ofrecen una menor resistencia que la mezcla sin fibras. Esta tendencia de disminución se mantiene al disminuir la cantidad de microfibra. Por otro lado, también se nota que, luego del primer agrietamiento, todos los valores de carga disminuyen abruptamente por lo que no hay un trabajo de la fibra al no aportar en la resistencia. Sin embargo, debido a que la máquina sigue reportando valores de deflexión se puede afirmar que la fibra aun soporta la carga que se aplica.



**Figura 6.6.** Variación de la deflexión y carga durante el tiempo de prueba de las mezclas con una dosificación de cemento de 350 Kg/cm<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

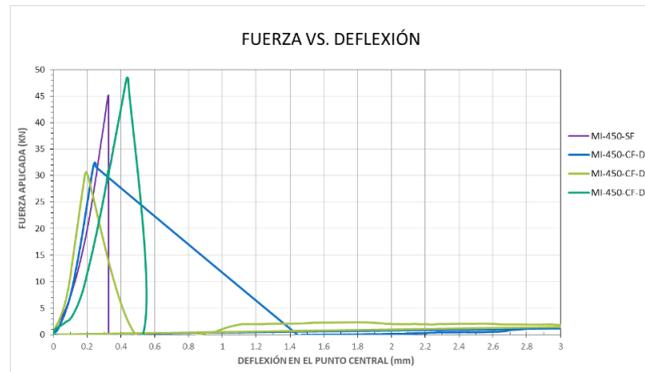
### Mezclas de 450 Kg/m<sup>3</sup> de cemento

En el Gráfico 6.7 se han agrupado, en líneas de tiempo de 7 y 28 días, las resistencias a la compresión registradas de cada mezcla de 450 Kg/cm<sup>3</sup>. Según lo que se ve en el gráfico, para las mezclas de ambos días no se puede observar ninguna tendencia tanto si se compara la mezcla sin fibra con las que sí tienen fibra como si realiza un análisis de solo las mezclas con fibra. Para el primer caso es debido que, a los 7 días, la mezcla con menor cantidad de microfibra ofrece una mayor resistencia que todas las mezclas. En el segundo caso, la mezcla con menor cantidad de microfibras muestra una mayor resistencia que las otras mezclas con fibra.



**Figura 6.7.** Variación de resistencia a la compresión en el tiempo de las mezclas con una dosificación de cemento de 450 Kg/cm<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

En el Gráfico 6.6 se muestra el comportamiento registrado por el ensayo de flexión de vigas. Al igual que en la resistencia a la compresión, la mezcla con la menor cantidad de microfibra muestra un comportamiento anómalo respecto a las otras mezclas que incluyen fibras, las cuales muestran un comportamiento proporcional entre la carga y la cantidad de microfibra, llegando incluso a superar la carga máxima de falla de la mezcla sin fibra. De la misma manera ocurre con las deflexiones, en donde la mezcla con menor microfibra registra un mayor valor. Sin embargo, en esta característica no se observa ninguna relación entre el valor de la deflexión y la cantidad de microfibra de las otras mezclas que incluyen fibra.



**Figura 6.8.** Variación de la deflexión y carga durante el tiempo de prueba de las mezclas con una dosificación de cemento de 450 Kg/cm<sup>3</sup>. (Fuente: Elaboración Propia)

## 7. Conclusiones

Las propiedades que debe cumplir el concreto autocompactable (CAC) son capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación. Ante la alta inestabilidad que presenta el CAC, la incorporación de nuevas adiciones debe garantizar que la mezcla no pierda dichas propiedades. El uso de macro y microfibras genera una mejora del concreto convencional tanto en durabilidad como en ductilidad.

La conclusión general de esta investigación es que no es necesario añadir fibras a una mezcla de CAC debido a que producen una disminución en el rendimiento de las propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido (a excepción de la ductilidad).

### 7.1. Sobre el diseño de mezclas

Se diseñaron ocho mezclas de CAC en base a dos parámetros. El primer parámetro es el contenido de cemento de la mezcla, con dos variaciones: 350 kg/m<sup>3</sup> y 450 kg/m<sup>3</sup> de volumen de concreto. El segundo parámetro es la dosificación de micro y macrofibra. Para el caso de la macrofibra se mantuvo la dosis en 1 kg/m<sup>3</sup> de concreto indicada por el EFNARC como dosis máxima.

La cantidad de cemento sí influyó en la producción de CAC; a mayor cantidad, la mezcla se vuelve inestable. En el caso de la microfibra, la cantidad (en peso) depende de su relación con la macrofibra (se propusieron valores de 0.6, 0.5 y 0.4). Las cantidades de macro y microfibras no generaron dificultades en la elaboración del CAC; visualmente, las mezclas se observaron estables. Por lo tanto, para encontrar los diseños de mezclas definitivos hay que variar la pasta de cemento, la dosis de aditivos y el volumen de agregado grueso.

### 7.2. Del estado fresco

La capacidad de relleno es la característica por la cual el concreto fluye libremente en un encofrado por la acción de su propio peso. Los ensayos elegidos para medir esta propiedad son ensayo de flujo de asentamiento y ensayo flujo T50. Para determinar el efecto de la adición de fibras en esta característica, los resultados obtenidos se comparan con respecto a la mezcla sin fibra. Los resultados en flujo de asentamiento indican que se produce una alta variabilidad en

las reducciones entre los diámetros, indiferente a la dosificación de macro y microfibras. Por otro lado, el tiempo que al concreto le toma llegar a los 500 mm de diámetro no es interferido por el uso de fibras. Se concluye que el uso de fibra reduce la expansión, pero no la velocidad de expandirse.

La capacidad de paso es la característica de fluir libremente a través del armado, sin indicios de bloqueo del agregado grueso. El ensayo elegido para medir esta propiedad es el ensayo de anillo J, del cual se puede obtener expansión diametral y la retención ante la presencia de un obstáculo mediante la diferencia de alturas en las varillas. Para determinar el efecto de la adición de fibras en esta característica, los resultados obtenidos se comparan con respecto a la mezcla sin fibra y también con los diámetros obtenidos en los ensayos de flujo de asentamiento. Es evidente el bloqueo que generan las fibras en la expansión diametral, así como que también se genera una retención ante la presencia de las varillas del anillo J.

La resistencia a la segregación es la capacidad que tiene el concreto de mantenerse homogéneo, sin separación de sus agregados o exudación del agua de la mezcla. Mediante la tabla de Daczko & Kurtz se establece la estabilidad de la mezcla. Visualmente las fibras no alteran la estabilidad de la mezcla. Por lo tanto, el uso de fibras no interfiere con la reacción natural de la mezcla.

### **7.3. Del estado endurecido**

La resistencia a la compresión muestra que el uso de fibras disminuye la resistencia requerida del CAC. Además, se determina que entre las mezclas con inclusión de fibras no se puede establecer una tendencia de aumento o disminución de resistencia de acuerdo a la cantidad de microfibras que se utilice.

La resistencia a la flexión en vigas muestra que al incorporar fibras al CAC se produce una disminución en la carga de rotura respecto a la carga de la mezcla sin fibras. También se produce una tendencia de disminución de carga que es proporcional a la disminución de microfibras en la mezcla. Por otro lado, respecto a la deflexión, no se puede concluir que la presencia de fibra aumente o disminuya la flexión con respecto a las muestras sin fibra. Asimismo, entre las mezclas que contienen fibra se produce una tendencia de que a menor presencia de microfibras en la mezcla resulta una mayor deflexión. Para los valores de tenacidad de las mezclas con fibra muestran valores mayores a la tenacidad de la mezcla sin fibra, esto se debe al trabajo adicional que ofrece la fibra luego de registrada la carga máxima. Finalmente, entre las mezclas con fibra se puede afirmar que existe una relación proporcional entre la cantidad de microfibras y la tenacidad obtenida.

## **REFERENCIAS**

- American Concrete Institute. (2001). Control of Cracking in Concrete Structures, ACI 224R-01.
- American Concrete Institute. (2011). Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete, ACI 214R-11.
- American Concrete Institute. (2007). Self-Consolidating Concrete”, ACI 237R-07.
- American Concrete Institute. (1996). Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 5441R-96.
- American Society for Testing and Materials. (2016). Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM C33/C33M-16e1.
- American Society for Testing and Materials. (2018). Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM C78 / C78M-18.
- American Society for Testing and Materials. (1990). Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure, ASTM C116/C116M.
- American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, C127-15.

American Society for Testing and Materials. (2014). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, ASTM C136/C136M-14.

American Society for Testing and Materials. (2011). Standard Specification for Portland Cement, ASTM C150/C150M-11.

American Society for Testing and Materials. (2014). Standard Test Method for Bleeding of Concrete, ASTM C232/C232M-14.

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM C494/C494M-17.

American Society for Testing and Materials. (2006). Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third- Point Loading), ASTM C1018.

American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete, ASTM C1116/C1116M - 10a(2015).

American Society for Testing and Materials. (2015). Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete, C1399/C1399M - 10(2015).

American Society for Testing and Materials. (2012). Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM C1609/C1609M-12.

American Society for Testing and Materials. (2017). Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring, ASTM C1621/C1621M.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (1997). Cementos. Cemento Portland. Requisitos, NTP 334.009.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2013). HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo estándar para determinar la fluidez de asentamiento del concreto auto compactado, NTP 339.219:2008.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2008). Hormigón (Concreto). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas, NTP 339.034.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2011). Agregados. Extracción y preparación de las muestras, NTP 400.010:2011.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2013). Agregado. Método de ensayo normalizado para el peso específico y absorción del agregado fino, NTP 400.022:2013.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2002). Agregado. Método de ensayo normalizado para el peso específico y absorción del agregado grueso, NTP 400.021:2002.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2002). Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto), NTP 400.037:2002.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales- INDECOPI. (2014). Requisito granulométrico para agregado grueso y fino, NTP 400.037.

EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.

UK. BASF. (2016). MasterGlenium SCC 3800. Lima.

BASF. (2017). MasterSet R 770i. Lima.

EUCOMEX. (s.f.). FIBERSTRAND 100 Microfibras de polipropileno. México.

- MyPhor. (s.f.). Especificaciones Técnicas Fibra de Polipropileno MPH FIBER PLUS. Madrid.
- NASVIK, J. (2006). El ABC del Concreto Autocompactable. *TECNOLOGÍA*, 50-55. México.
- Rabanal, D., & Su, A. (2017). Diseño de un Concreto Autocompactable. Chiclayo: Universidad Señor de Sipán.
- Geotexan (2014). Fibras Sintéticas para Reforzar Hormigón. Minas de Riotinto, España: Geotexan, geosintéticos de alta calidad. <https://geotexan.com/fibras-sinteticas-para-reforzar-hormigon/>
- Benavides Cerezo, W., & González Salcedo, L. O. (2012). Fibras de Polipropileno para reforzamiento de matrices cementicias: Una recopilación sobre fibras comercialmente disponibles. Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- Lievano, M., & Gutierrez Torres, A. P. (2011). Caracterización de Fisuras en Vigas de Concreto Reforzado con Condición de Fibras de Polipropileno Sometidas a Flexión Dinámica. Pontificia Universidad Javeriana , Bogotá D.C.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (abril de 2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- García, Johnny (febrero del 2013). Conceptos generales sobre el concreto y los materiales para su elaboración [Mensaje en un blog]. ING.JOHNNY GARCIA UPN. Recuperado de <https://ingjohnnygarciaupn.wordpress.com/2013/02/09/conceptos-generales-sobre-el-concreto-y-los-materiales-para-su-elaboracion/>
- Vilanova, Angel (5 de julio del 2013). Hormigón Autocompactable [Mensaje en un blog]. Tecnología hormigón. Recuperado de <http://tecnologiahormigon.blogspot.com/2015/07/origen-del-hormigon-autocompactante.html>