

Análisis técnico del esfuerzo residual del pavimento rígido reforzado con macrofibra estructural sintético

Marca, E.^a, Balderrama, O.^b

- a Ingeniero Civil de la U.M.R.P.S.X.CH Facultad de Ingeniería Civil, Técnico Universitario Superior en Topografía (U.M.R.P.S.X.CH.), Sucre, Bolivia, eliomarcamamani27@gmail.com.
- b Ingeniero Civil de la U.M.R.P.S.X.CH., Diplomado en Investigación y Formación Tutorial (CEPI), Diplomado en Geotecnia Aplicada (Universidad Autónoma del Beni “José Ballivián”), Sucre, Bolivia, osbama@hotmail.com

RESUMEN

Aplicar nuevas tecnologías a nuestras carreteras con el fin de extender la vida útil de la misma, debe ser la premisa de todo Ingeniero de Vías. Las Macrofibras le brindan al pavimento un comportamiento dúctil posterior a la fisuración. Para trabajar con Macrofibra estructural aplicado en pavimento rígido se debe conocer primeramente el dato de Esfuerzo Residual además de la adherencia de la misma en la matriz. El dato de Esfuerzo Residual depende principalmente del tipo de Macrofibra, tipo de Agregado, cantidad de Macrofibra, geometría de la Macrofibra. La investigación está centrada en obtener los Esfuerzos Residuales mediante el ensayo americano ASTM C 1609 bajo diferentes dosificaciones de Macrofibra en vigas prismáticas, las mismas fueron ensayadas a los 7 días y a los 28 días de curado. Se analizaron las características del Hormigón Reforzado con Fibra (HRF) en estado fresco y estado endurecido. Finalmente a partir de los resultados se obtiene una cantidad optima de Macrofibras para un Esfuerzo Residual buscado y su posterior aplicación en Vías.

Palabras clave: Esfuerzo Residual, macrofibras, carga residual, hormigón reforzado con fibra, deflexión.

ABSTRACT

Applying new technologies to our roads in order to extend their useful life must be the premise of every Roads Engineer. Macrofibers give the pavement a ductile behavior after cracking. To work with structural Macrofiber applied to rigid pavement, the Residual Strengths data must first be known, in addition to its adherence in the matrix. The Residual Strengths data depends on the type of Macrofiber, type of Aggregate, amount of Macrofiber and geometry of the Macrofiber. The research is focused on obtaining the Residual Strengths through the American test ASTM C 1609 under different dosages of Macrofiber in prismatic beams, they were tested at 7 days and 28 days of curing. The characteristics of Fiber Reinforced Concrete (FRC) in fresh and hardened state were analyzed. Finally, analyzing the results, an optimal amount of Macrofibers is obtained for a Residual Strengths sought and its subsequent application.

Key words: Residual Strengths, macrofibers, residual load, fiber reinforced concrete, deflection.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad las fibras siempre estuvieron presentes en la construcción, es el caso concreto del adobe, donde en su mezcla con el barro se utilizan fibras naturales para su elaboración. En el mundo las fibras tienen una mayor relevancia desde hace 40 años atrás, a nivel sudamericano desde hace 20 años y en nuestro país tomaron su importancia aproximadamente hace 5 años.

En el proyecto de pavimento rígido de la autopista La Paz – El Alto se utilizó Macrofibra Estructural Sintético en la matriz, siendo este proyecto el primero y el único del País.

Al momento de trabajar con el hormigón reforzado con fibras (HRF) se nos presentan algunas interrogantes ¿Cuánta Macrofibra se debe adicionar a la Matriz?, ¿Aumenta la resistencia?, ¿Qué es el Esfuerzo Residual?

Macrofibras

Existe en el mercado una gran variedad de fibras de diferentes materiales (metálicas, sintéticas, naturales, vidrio) las cuales a su vez se clasifican también según la funcionalidad en Microfibras y Macrofibras.

Las Microfibras tienen una dimensión más pequeña con respecto a las Macrofibras y ayudan a prevenir las fisuras cuando en el hormigón fresco se presenta el fenómeno de retracción plástica durante el fraguado, su dosificación va desde 0,3 a 1,2 kg/m³ y tiene los diámetros de 0,023 a 0,050 mm.

Las Macrofibras tienen una función mucho más compleja orientada a lo estructural, el análisis se lo realiza post fisuración en estado endurecido, incrementa la Tenacidad y el Esfuerzo Residual del pavimento.

Tiene muchos usos, como pisos industriales, pavimentos de concreto, estructuras pre-moldeadas, concreto proyectado (Shotcrete), etc.



Figura 1. Macrofibras Sintéticas TTOGO

Dosificación

Las dosificaciones de las Macrofibras varían dependiendo del valor de Esfuerzo Residual que se busque de acuerdo a la aplicación que le demos a la misma.

Diferentes tipos de Macrofibras requieren diferentes niveles de dosificación para lograr el mismo valor de Esfuerzo Residual.

Las Macrofibras metálicas y sintéticas tienen un mayor uso en los pavimentos rígidos sin embargo su dosificación es significativamente diferente entre ambas como lo muestra la siguiente Tabla.

Tabla 1. Dosificación

Libro	Metálicas (kg/m ³)	Sintéticas (kg/m ³)
Roesler, 2019	14,8 – 44,5	1,8 – 4,8
Sika, 2010	20,0 – 50,0	2,0 – 9,0
ACPA, 2015	19,0 – 59,0	2,4 – 4,4

La Matriz

La mezcla o Matriz del HRF definen las propiedades físicas y químicas de pavimento cuyos componentes podemos mencionar al agregado fino, al agregado grueso, al cemento, al agua, los aditivos y las fibras. El HRF (Hormigón Reforzado con Fibra) no es más que la Matriz de armadura tridimensional que aumenta notablemente la resistencia mecánica posterior a la fisuración del concreto.

La preparación de la matriz es de la siguiente manera:



Figura 2. Elaboración del HRF

Las propiedades del HRF en estado fresco son:

- Las fibras afectan su trabajabilidad
- Existe una reducción del asentamiento
- Se ve afectado el contenido de aire en algunos casos.

Las propiedades del HRF en estado endurecido son:

- La resistencia a compresión y a la flexión no cambian comparación con el concreto simple
- Se mejora el Esfuerzo Residual y la Tenacidad post – fisuración
- Se reduce el número de fisuras y el ancho de las mismas.

Características del HRF

Las características de un HRF principalmente son las siguientes:

- Tenacidad
- Esfuerzo Residual.

Tenacidad

El concepto de tenacidad se resume como la capacidad de absorción de energía antes de colapsar y se lo cuantifica mediante el área de la curva Esfuerzo vs Deformación, siendo la misma una de las propiedades más importantes del HRF.

Esfuerzo Residual f_{150}^D

El Esfuerzo Residual es esa tensión nominal que le otorgan las Macrofibras a la Matriz posterior a la fisuración en los ensayos a flexión.

Una vez que se presentan las fisuras en el pavimento las Macrofibras actúan cociendo y ramificando la matriz, produciéndose una transmisión de cargas y por ende una redistribución de esfuerzos que le permite a la estructura seguir siendo funcional.

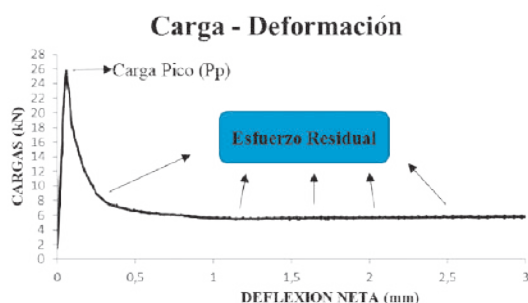


Figura 3. Esfuerzo Residual

La principal acción de las Macrofibras comienza luego de la primera fisura, donde se inician los fenómenos de arrancamiento y deslizamiento Fibra-Matriz. Las Macrofibras mantienen controlado las fisuras, limitando el ancho, dando al material una capacidad residual.

El valor del Esfuerzo Residual depende principalmente de los siguientes factores:



Figura 4. Factores que influyen en el Esfuerzo Residual

Existe muchos ensayos para obtener el Esfuerzo Residual, entre los más importantes tenemos, el ensayo americano ASTM C 1609 y el ensayo europeo EN14651.

ASTM C 1609 (Norma Americana)

Este método de prueba es una extensión del ensayo ASTM C 78 pero incorporando un sistema de circuito cerrado. Evalúa el rendimiento a flexión del Hormigón Reforzado con Fibra, utilizando parámetros de la Curva de Carga-Deflexión Neta (Figura 5) que es obtenida a través de la carga en dos puntos de la viga, lo que implica que entre ellos exista una región de flexión pura, generándose la fisura. Para ello se utiliza un equipo de ensayo cuya cualidad principal es la de generar un **sistema de circuito cerrado servocontrolado de prueba**. Los soportes de rodillos en los apoyos deben tener la libertad de girar sobre sus ejes para lograr la estabilidad del testigo. Si la grieta se presenta fuera del tercio central, el ensayo debe ser descartado.

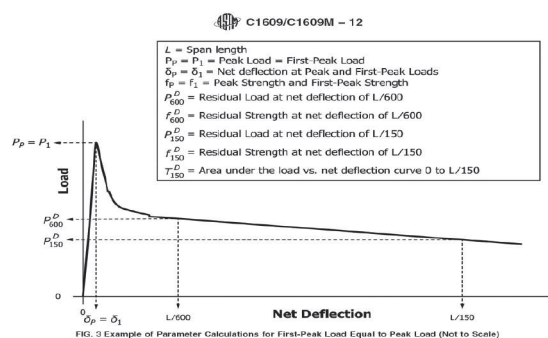


Figura 5. Curva Carga vs Deflexión

En el ensayo ASTM C 1609 se refiere al valor de la tensión obtenida a través de la carga residual (P_{600}^D y P_{150}^D) cuando el desplazamiento del tramo alcanza L/600 o L/150 de la longitud, dependiendo del Límite de Estado con la que se desea diseñar.

Para el cálculo del **Esfuerzo Residual** (f_{600}^D y f_{150}^D) reemplazamos los valores de las cargas residuales P_{600}^D y P_{150}^D halladas en las deflexiones correspondientes a L/600 (0,75mm) y L/150 (3,00 mm) en la ecuación 1.

$$f = \frac{PL}{bd^2} \text{ Ecuación 1}$$

f=Fuerza (MPa) d = Altura de la viga (mm)

P= Carga (N) b = Prof. de la viga (mm)

L= La luz entre los apoyos (mm)

Equipo de ensayo

La máquina de ensayo debe ser capaz de tener un funcionamiento **servocontrolado** de circuito cerrado llamado también bucle de control cerrado, donde en la Deflexión Neta de la Luz entre los apoyos se mide y controla con dos aparatos transductores (LVDT). Las mismas controlan la velocidad de aumento de la deflexión para el servocontrol.



Figura 6. Equipo de Ensayo

Los transductores o LVDT son dispositivos electrónicos (sensores) que miden la Deflexión Neta de la viga y deben ser ubicado en la parte central de la luz sobre una plantilla a ambos lados de la viga como lo señala la figura 7, de tal manera que se promedia la deflexión de ambos transductores para la determinación precisa de la Deflexión Neta en la mitad del tramo sin incluir los efectos del asiento o torsión del espécimen sobre sus soportes. Los sensores de desplazamiento LVDT se ubican a cada lado de la viga mediante una plantilla rectangular que rodea la misma tal como señala la figura 7. La sujeción de la plantilla en la viga de ensayo es a través de soportes adecuados que no realicen presión, de tal modo que la viga pueda tener la libertad de rotación en estos puntos al momento de realizar en ensayo. El promedio de las mediciones realizadas por los LVDT representa la Deflexión Neta, los apoyos en la parte inferior del equipo

representan la Luz y generalmente están a una distancia de 450 mm dependiendo del tamaño de los testigos.

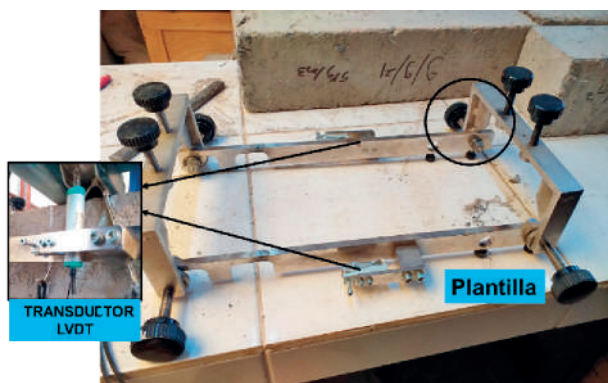


Figura 7. Plantilla

Preparación de las vigas prismáticas de HRF

Se debe preparar probetas prismáticas de acuerdo a lo recomendado por la ASTM C 192 y los tamaños especificados podemos encontrarlo también en la primera columna de la tabla 2 cuya fuente corresponde a la ASTM C 1609.

El tiempo de curado de las probetas antes de realizar el ensayo **no está aún definido**, pero el análisis que realiza Jeffery Roesler; siendo el mismo uno de los componentes de equipo en la ASTM C 1609, recomienda realizar un curado de **siete días** porque es la edad óptima para realizar el ensayo ya que el hormigón se encuentra en un estado más dúctil, lo que nos permite analizar preferentemente las Macrofibras.

El ensayo se realiza en función de dos tasas de deflexión, mismos que están especificados en la tabla 2. Hasta una deflexión neta de L/900 la tasa de aumento de la deflexión neta debe estar de acuerdo con la segunda columna de la tabla 2, para deflexiones netas más allá de L/900 la tasa de aumento de la deflexión neta permitido está especificado en la tercera columna de la tabla 2.

Tabla 2. Tasa de incrementos

Tasa de incrementos de la deflexión neta		
Tamaño viga (mm)	Antes L/900 (mm/min)	Después L/900 (mm/min)
100x100x350	0,025 – 0,075	0,05 – 0,20
150x150x500	0,035 – 0,10	0,05 – 0,30

Qué Valores de Esfuerzo Residual debemos tomar?

Los autores que hicieron investigaciones muy importantes del uso de Macrofibras en Pavimentos Rígidos, Roes-

ler Jeffery de Canada y participante activo de la norma ASTM C 1609; Raul Zerbino de Argentina, investigador de LEMIT y docente de la Universidad de La Plata; Juan Pablo Cobarruvias de Chile autor del software de diseño OptiPave, recomiendan usar una Macrofibra cuyo rendimiento de Esfuerzo Residual sea de **0,68MPa a 1,5 MPa** dependiendo de la aplicación que le demos a las Macrofibras que pueden ser en Pavimento Rígido, capa de rodadura en puentes, Overlays o recapados, etc.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para proceder con el trabajo de investigación, la preparación de las vigas se los realizo en el laboratorio del SEDCAM Sucre y el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil perteneciente a la Universidad de San Francisco Xavier de Chuquisaca.

Para el ensayo de Esfuerzo Residual nos dirigimos a la ciudad de La Paz porque existe un solo equipo en todo Bolivia para realizar la misma y lo tiene la ABC La Paz.

Macrofibras TTOGO FSE 40

La Macrofibra Sintética TTOGO FSE 40 es de industria brasilera tiene forma de filamentos retorcidos, también descrito como fibras fibriladas, su performance estructural fue verificado por medio del ensayo europeo EN 14651.



Figura 8. Macrofibras TTOGO

Se puede apreciar que tiene una ventaja fundamental además de ser resistente a los alcalinos, tiene una mayor dispersión tridimensional en la Matriz, pero su desventaja principal es la formación de ERIZOS cuando la dosificación es muy alta.

Fases y ensayos de Laboratorio

Tabla 3. Características Macrofibras TTOGO

Característica	Descripción
Color	Gris
Forma	Torcida, fibrilada
Composición	Polipropileno
Densidad	0,92 g/cm ³
Largo	54 mm
Diámetro	0.7 mm
Resistencia a tracción	650±25 MPaEN10002.1
Módulo de elasticidad	5,6±0,25 MPaEN10002.1
Pérdida de masa en medio alcalino	<2% (100 años) Rec. Comité 303

Tabla 4. Fases de laboratorio

Fases experimentales de laboratorio				
	Técnicas de ensayo	Descripción del ensayo	Material	Caridad ensayos
Primera fase	Caracterización del material	Análisis granulométrico por tamizado	Gravas, Gravillas y Arenas	6
		Peso específico	Gruesos y arenas	6
		% Absorción	Grueso y arenas	6
		Contenido de humedad	Grueso y arenas	6
		Masas unitarias compactadas	Grueso	2
Segunda fase	Diseño y preparación de las Mezclas % de macrofibras ACI 211	Consistencia plástica y Seca	Grueso, Arena, Cemento, Agua, Macrofibras	2
Tercera fase	Revenimiento ASTM C 143	Control de asentamientos	HRF	12
Cuarta fase	Preparación probetas prismáticas ASTM C 192	Se comenzó con vaciado de las probetas con sus respectivos contenidos de macrofibras	Hormigón reforzado con macrofibra	15
Quinta fase	Curando	7 días y 28 días	Vigas	15
Sexta fase	Resistencia mecánica ASTM C 1609	Ensayo a flexión con equipo servocontrolado	Vigas	12
Séptima fase	Interpretación de resultados			

Laboratorio SEDCAM Sucre



Figura 9. Trabajos en el SEDCAM

Bandas granulométricas

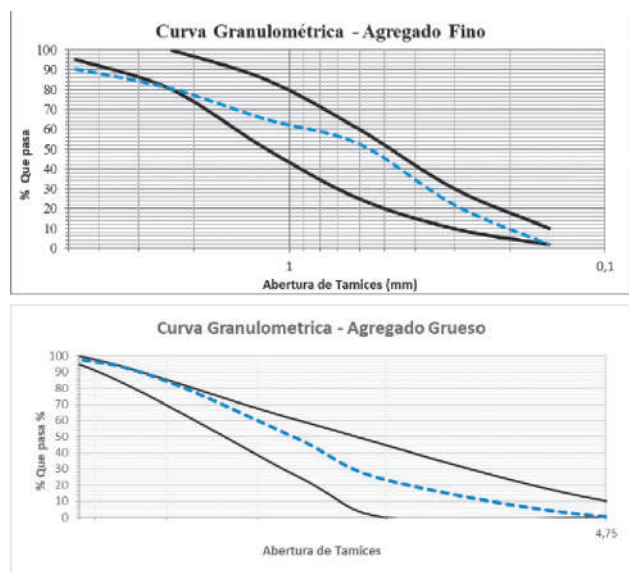


Figura 10. Bandas granulométricas

Características del Agregado

Tabla 5. Características

Ensayos	Finos	Gruesos
Peso Específico	2,63	2,61
Absorción (%)	1,46	1,25
Humedad (%)	0,66	1,53
M.U.C.		1700,00
Módulo de finura (Mf)	2,88	

Dosificación de Macrofibra

Tabla 6. Dosificaciones

	Nº vigas	Macrofibra
Mezcla	Prismáticas	kg/m ³
Tipo 2	4	2
	4	5
	4	8

Composición del HRF

Tabla 7. Materiales de la Matriz método ACI 211

Material (2 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP-40 Fancesa	350,79
Arena		732,93
Gravas	TMN=25 mm	1056,67
Agua		195,88
Macrofibra	TTOGO FSE 40	2,00

Material (5 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP-40 Fancesa	350,67
Arena		724,31
Gravas	TMN=25 mm	1056,67
Agua		195,81
Macrofibra	TTOGO FSE 40	5,00

Material (8 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP-40 Fancesa	350,55
Arena		715,69
Gravas	TMN=25 mm	1056,67
Agua		195,75
Macrofibra	TTOGO FSE 40	8,00

Control del revenimiento



Diseño de matriz plástica	
Dosificación (kg/m ³)	Asentamiento (cm)
Vigas con 2.0	0,5
Vigas con 5.0	7.3
Vigas con 8.0	0.8

Figura 11. Asentamientos

Laboratorio Facultad de Ingeniería Civil



Figura 12. Facultad de Ingeniería Civil

Bandas Granulométricas

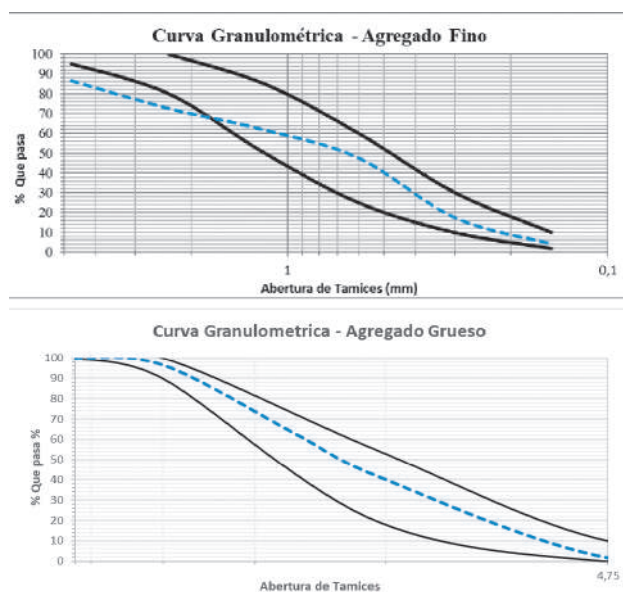


Figura 13. Bandas Granulométricas

Características del Agregado

Tabla 8. Características

Ensayos	Finos	Gruesos
Peso Específico	2,61	2,37
Absorción (%)	2,56	1,80
Humedad (%)	1,05	0,57
M.U.C.		1510,27
Módulo de finura (Mf)	3,10	

Dosificación de Macrofibra

Tabla 9. Dosificaciones

	Nº Vigas	Macrofibra
Mezcla	Prismáticas	kg/m ³
Tipo 1	3	3,5
	3	4,5
	3	5,5

Composición del HRF

Tabla 10. Materiales de la Matriz ACI 211

Material (3,5 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP - 40 Fancesa	428,34
Arena	San Juan	752,72
Gravas	TMN = 19 mm	895,92
Agua	Potable	212,20
Macrofibra	TTOGO FSE 40	3,50

Material (4,5 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP - 40 Fancesa	428,25
Arena	San Juan	749,85
Gravas	TMN = 19 mm	895,92
Agua	Potable	212,16
Macrofibra	TTOGO FSE 40	4,5

Material (5,5 Kg/m ³)		Kg/m ³
Tipo	Características	
Cemento	IP - 40 Fancesa	428,17
Arena	San Juan	746,99
Gravas	TMN = 19 mm	895,92
Agua	Potable	212,11
Macrofibra	TTOGO FSE 40	5,5

Control del revenimiento



Diseño de Matriz Seca	
Dosificación (kg/m³)	Asentamiento (cm)
Vigas con 3,5	2,20
Vigas con 4,5	2,10
Vigas con 5,5	1,20

Figura 14. Asentamientos

Laboratorio ABC La Paz



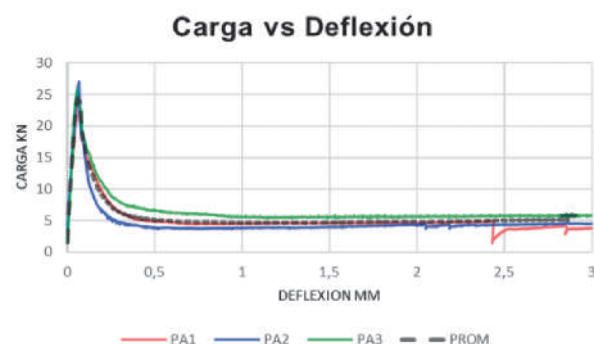
Figura 15. Trabajos en la ABC La Paz

Codificación de vigas

Tabla 10. Codificación

VIGAS CON CURADO DE 7 DÍAS (Lab A)					
Cód	Fibra	Cód	Fibra	Cód	Fibra
PA1	3,5	PB1	4,5	PC1	5,5
PA2	kg/m³	PB2	kg/m³	PC2	kg/m³
PA3		PB3		PC3	
VIGAS CON CURADO DE 28 DÍAS (Lab B)					
PZ1	8.0		5 kg/m³		
PZ2	kg/m³	PY1			

ASTM C 1609 (Dosificación 3,5 kg/m³)



Viga	Tasa de carga mm/min		Tiempo (min)	P _p (kN)	p ₁₅₀ ⁺ /150 (kN)	f ₁₅₀ ⁺ /150 (MPa)
	Antes L/900	Después L/900				
PA1	0.035	0.05	74	25.18	3.83	0.51
PA2	0.06	0.1	32	27.09	4.55	0.61
PA3	0.06	0.1	33	25.8	5.81	0.77
Promedio				26.02		0.63

Figura 16. Esfuerzos Residuales 3,5 kg/m³

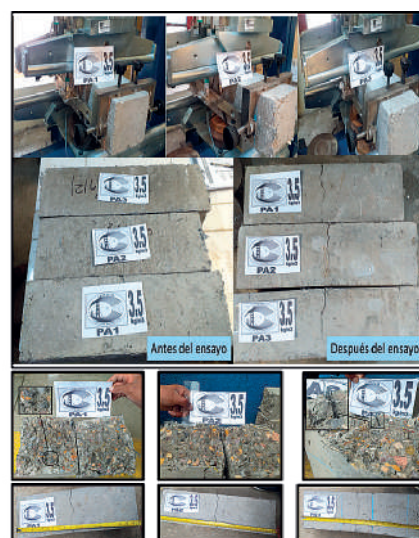
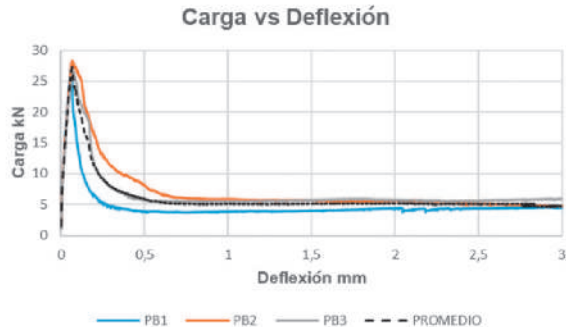


Figura 17. Vigas ensayadas e inspección visual

La viga **PA2** representa de mejor manera la dosificación de 3.5 kg/m³ por que tuvo un mejor comportamiento en el ensayo a diferencia de PA1 que no demostró mucha adherencia las fibras con la Matriz. La viga PA3 queda descartada porque se encontraron fibras fibriladas enteras que no se distribuyeron correctamente provocando esta situación un Esfuerzo Residual más alto de lo esperado.

ASTM C 1609 (Dosificación 4,5 kg/m³)



Viga	Tasa de carga mm/min		Tiempo (min)	P _p (kN)	P ₁₅₀ ¹⁵⁰ δ=3 mm (kN)	f ₁₅₀ ¹⁵⁰ (MPa)
	Antes L/900	Después L/900				
PB1	0,06	0,1	32	27,09	4,54	0,60
PB2	0,06	0,1	33	28,38	4,72	0,62
PB3	0,06	0,1	30	26,68	5,96	0,79
Promedio				27,38		0,67

Figura 18. Esfuerzos Residuales 4,5 kg/m³

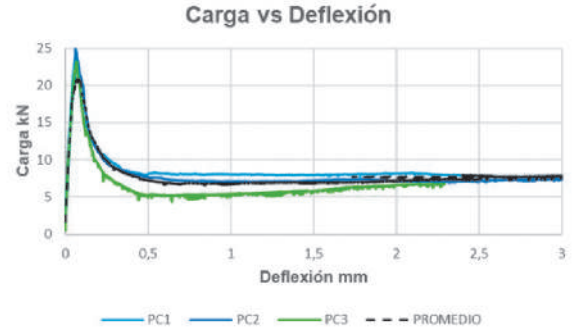


Figura 19. Vigas ensayadas e inspección visual

Concluyendo el comportamiento de la PB3 fue el más óptimo porque demostró tener adherencia de las fibras con la matriz además de tener un corte con una dife-

rencia de 10mm del centro de la viga. En PB1 y PB2 se encontraron muchas fibras fibriladas enteras, sin llegar a distribuirse completamente y la fisura en ambos testigos estuvo muy alejada de la parte central de la viga.

ASTM C 1609 (Dosificación 5,5 kg/m³)



Viga	Tasa de carga mm/min		Tiempo (min)	P _p (kN)	P ₁₅₀ ¹⁵⁰ δ=3 mm (kN)	f ₁₅₀ ¹⁵⁰ (MPa)
	Antes L/900	Después L/900				
PC1	0,035	0,1	50	24,59	7,80	1,04
PC2	0,060	0,1	33	21,95	4,48	0,60
PC3	0,035	0,1	32	23,25	6,74 ¹	0,89 ²
Promedio				23,26		0,84

Figura 20. Esfuerzos Residuales 5,5 kg/m³



Figura 21. Vigas ensayadas e inspección visual

La viga PC1 es la que tiene una mejor distribución de Macrofibras, la distancia de la fisura a la parte media mínima y su comportamiento en el ensayo no mostro muchas anomalías por lo tanto es la que representa de mejor. PC2 demostró un buen comportamiento en el ensayo, pero el resultado no es coherente por la mala distribución de Macrofibras y respecto a PC3 la prensa

de ensayo solo finalizo hasta una deflexión de 2,24 mm pero la curva se proyecta cerca de PC1.

RESULTADOS

Esfuerzos Residuales (curado 7 días)

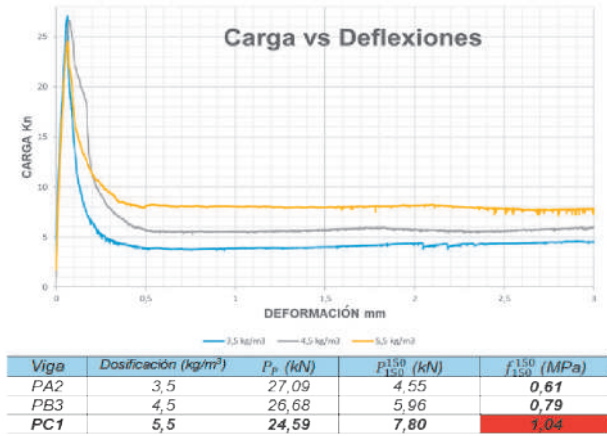


Figura 22. Resumen de Esfuerzos Residuales

Valor óptimo de Esfuerzo Residual f_{150}^D

Las experiencias y bibliografías recomiendan el valor de $f_{150}^{150} = 1 \text{ MPa}$ para aplicaciones de Pavimento Rígido por lo que la viga PC1 con dosificación de 5,5 kg/m³ de Macrofibras TTOGO tiene un $f_{150}^{150} = 1,04 \text{ MPa}$ confirmando de esta manera ser la dosificación más recomendable pero debemos tomar en cuenta que esta dosificación se puede mejorar utilizando un plastificante, de este modo evitaremos los erizos y tendremos una mejor trabajabilidad en la Matriz.

Debemos aclarar que estas vigas fueron preparadas en la Facultad de Ingeniería Civil (Lab A) perteneciente a la Universidad de San Francisco Xavier de Chuquisaca y tienen un curado de 7 días.

ASTM C 1609 (curado 28 días)

Con el análisis de estas vigas queremos identificar si existe un nivel de dificultad para realizar el ensayo ASTM C1609 ya que según estudios realizados por la Universidad de Costa Rica afirman que el hormigón va almacenando energía internamente con la edad y cuando se realiza el ensayo ASTM C 1609 este explota muy rápidamente sin poder verificar su Capacidad Residual.

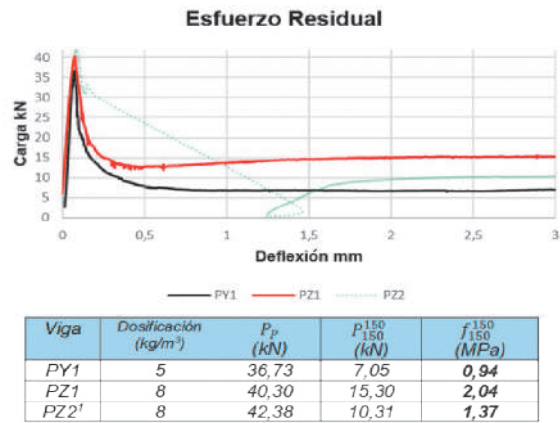


Figura 23. Resumen de Esfuerzos Residuales

Resumen total de Esfuerzos Residuales

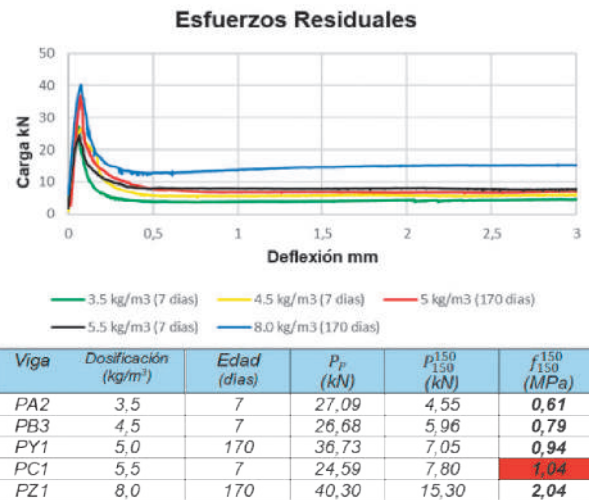


Figura 24. Resumen total de Esfuerzos Residuales

Esfuerzos Residuales (Diferentes edades similar dosificación)

En la figura 25 observamos el ensayo de 2 vigas de diferentes edades y con una mínima diferencia en la dosificación. Las vigas son de 5,5 kg/m³ con edad de 7 días y 5,0 kg/m³ con edad superior a 170 días.

Podemos verificar que las cargas P_p para 5,0 kg/m³ es de 36,73 kN y para 5,5 kg/m³ a 24,59 kN, tal diferencia se presenta por las diferencias de edades del HRF.

Es muy importante analizar el comportamiento de la curva de carga, el mismo que tiene diferentes valores al presentarse la fisura en el P_p , luego en esta curva de carga sufren una caída en ambas vigas pero cuando se encuentran en la fase residual los valores se acercan a un valor de f_{150}^{150} común a pesar de tener diferentes edades pero dosificaciones casi similares.

La viga con mayor Esfuerzo Residual corresponde a la viga PC1 que tiene 5,5 kg/m³ de Macrofibra y 7 días de curado. La edad que beneficia al ensayo porque se llegaría a apreciar el trabajo de las Macrofibras en su totalidad.

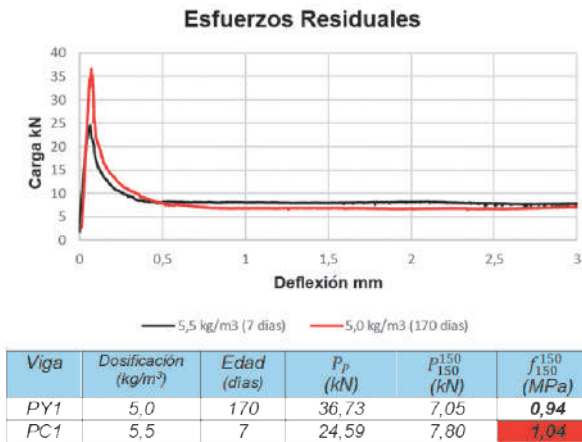


Figura 25. Resumen total de Esfuerzos Residuales

CONCLUSIONES

Las Macrofibras Sintéticas de Polipropileno le otorgan al Pavimento Rígido una capacidad de comportamiento *Pseudoductil*, se demostró que comportamiento post-fisuración después de alcanzar el Primer Pico, existe un Esfuerzo Residual otorgado por las Macrofibras a través de la transferencia de cargas y propiedades de la Matriz; para una alta dosificación de fibras obtenemos un mayor Esfuerzo Residual y por ende una mayor capacidad de absorción de energía, aplicable solamente a la trabajabilidad del HRF. **Diferentes TIPOS DE MACROFIBRAS requieren diferentes niveles de dosificación para lograr el mismo valor de Resistencia Residual.**

Existen muchas investigaciones acerca de los Esfuerzos Residuales como también tenemos normativas para su aplicación. Tenemos para el DISEÑO las normas ACI 360, ACI 544.3R, ACI 544.4R, RILEM, FIB MODEL CODE 2010; para evaluar el DESEMPEÑO se encuentran ASTM C 1609, EN 14651.

La distribución de las macrofibras es muy importante a la hora de encontrar el Esfuerzo Residual. Se identificaron Macrofibras fibriladas enteras sin distribuirse correctamente en las vigas de mayor dosificación sobre todo en las de 8,0 kg/m³ y 5,5 kg/m³, lo que precisamente confirma que se debe usar un plastificante para ayudar a su distribución. La distancia de la fisura generada por el ensayo ASTM C 1609 al centro de la viga fue fundamental a la hora de elegir el Esfuerzo Residual por su grado de mayor autenticidad por recomendaciones de los laboratoristas de la ABC. Se observó que este tipo de fibras tiene un beneficio fundamental en la adherencia con los

agregados porque la orientación es **realmente tridimensional** lo que no sucede con fibras más rígidas cuya orientación solo se puede realizar en dos direcciones.

Las Macrofibras afectan el revenimiento de la matriz sobre todo cuando es de una consistencia seca por lo. Para diseño de una matriz plástica solo se observaron dificultades en el testigo de 8kg/m³ por la segregación.

Los autores que hicieron investigaciones muy importantes del uso de Macrofibras en Pavimentos Rígidos, Roesler Jeffery de Canada y participante activo de la norma ASTM C 1609; Raul Zerbino de Argentina, investigador de LEMIT y docente de la Universidad de La Plata; Juan Pablo Cobarruvias de Chile autor del software de diseño OptiPave, recomiendan usar una Macrofibra cuyo rendimiento de Esfuerzo Residual sea de 1MPa alcanzando la misma con una dosificación de 5,5 kg/m³.

Las Macrofibras TTOGO aumentan la carga en el Primer Pico en función a la dosificación y características de la Matriz, lo que no implica que ayuden en la resistencia a flexión, porque la Matriz debe de ser trabajable. La trabajabilidad está condicionada a la formación de erizos en la Matriz por la cantidad de Macrofibras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 544.1R-96, 2002. *Report on fiber Reinforced Concrete*. s.l.:s.n.
- American Concrete Pavement Association, 2015. *Capas de Refuerzo con Hormigon*. Canada: ACPA.
- Argañaz, P. L. y otros, s.f. *Modelacion del Comportamiento Ciclico de Hormigon Reforzdo con Fibras*.
- ASTM 1399, 2010. *Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete*. *ASTM International*.
- ASTM C 78, 2002. *Metodo de ensayo normalizado para determinar la resistencia a la flexion del hormigon*. *ASTM*.
- ASTM C 995-01, 2001. *Standard Test Method for Time of Flow of Fiber-Reinforced Concrete Through Inverted Slump Cone*. *ASTM INTERNATIONAL*.
- ASTM C1609/C1609M-12, 2012. *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete*. *ASTM International*.
- Committe ACI, 1997. *Standar Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete*. *ACI*.

- Covarrubias V., J. P., 2019. *Pavimentos Eficientes para Caminos Vecinales*, Santiago de Chile: s.n.
- CR-2010, 2010. *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes*. Costa Rica: s.n.
- fib, 2010. *Model Code 2010*. Germany: s.n.
- Instituto del Cemento Portland Argentino, 2012. *Diseño y Construcción de Pavimentos de Hormigón*, San Salvador de Jujuy: s.n.
- LEMIT-CIC, 2013. Macrofibras Sintéticas para el Refuerzo de Hormigón. *Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia*, pp. 330 - 335.
- MACCAFERRI, 2007. *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón*. s.l.:s.n.
- Menotti , D., Torrijos , M., Giaccio , G. & Zerbino , R., 2011. Respuesta Post Fisuración de Hormigones Reforzados con Fibras. *Facultad de Ingeniería UNLP*.
- Roesler, J., 2021. *Fibras en Pavimentos de Hormigón y Recapados*, La Paz: ABC Bolivia.
- Roesler, J., Bordelon, A., Brand, A. & Amirkhanian, A., 2019. Fiber-Reinforced Concrete for Pavement Overlays. *National Concrete Pavement Technology Center*.
- Roesler, J., Bordelon, A., Brand, A. & Amirkhanian, A., 2019. *Fiber-Reinforced Concrete for Pavement Overlays: Technical Overview*. Iowa: s.n.
- Sika, 2010. *Concrete Hormigón Reforzado con Fibras*. s.l.:s.n.
- TTOGO, 2020. *Informe Técnico*. Brasil: s.n.
- Zerbino, R., 2013. Uso de Macrifibras Sintéticas en Hormigón. *Tecnología*, pp. 12-18.
- Zerbino, R., 2019. *Hormigones Reforzados con Fibras*, Buenos Aires: ICPA.