



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INCIDENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LA FIBRA EN ALGUNAS
PROPIEDADES MECÁNICAS EN LA ZONA DE CONEXIÓN DE UN
PANEL DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO.

Wilmar Echeverri Patiño

Ingeniero Civil

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Arquitectura

Medellín, Colombia

2017

Incidencia de la orientación de la fibra en algunas propiedades
mecánicas en la zona de conexión de un panel de concreto de ultra
alto desempeño.

Wilmar Alberto Echeverri P.

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Construcción

Director:

Juan Carlos Ochoa B; PhD

Codirector:

Andrés Mauricio Núñez; PhD

Línea de Investigación:

Materiales

Universidad Nacional de Colombia

Facultad De Arquitectura

Medellín, Colombia

El desarrollo del hombre depende fundamentalmente de la invención. Es el producto más importante de su cerebro creativo

Nicola Tesla.

Agradecimientos.

A Juan Carlos que con su paciencia me acompañó en este proceso, Andrés que compartió conmigo su conocimiento y Carolina por su apoyo constante.

Resumen

La tecnología del concreto ha tenido una evolución importante desde el siglo XX. El material que conocemos actualmente ha cambiado de manera drástica durante todos esos años. Los desarrollos en nuevos cementos, nuevos aditivos y nuevas aplicaciones muestran un material diferente en desempeño al que se conoció a principios del siglo pasado. Son conocidos los avances en concretos autocompactantes, fibroreforzados y los concretos de alta resistencia, diseñados para mejorar las propiedades bien en estado fresco o endurecido. Estos concretos fueron el insumo para diseñar los concretos de ultra alto desempeño, los cuales poseen las mejores características de cada uno de ellos, un nuevo material que puede ser usado en diferentes aplicaciones.

Los concretos de ultra alto desempeño poseen propiedades diferentes a los concretos tradicionales. Su buen comportamiento a sollicitaciones mecánicas a tracción y altos esfuerzos a compresión simple, hace posible utilizarlo para elementos esbeltos y de altas relaciones área/espesor. Es el caso del uso en fachadas de edificación y paneles de gran formato que tradicionalmente han sido construidos con materiales como el acero o materiales poliméricos, debido a sus bajos pesos y altos comportamientos mecánicos.

Los paneles en concreto de ultra alto desempeño tienen varias ventajas respecto a otros fabricados en concreto tradicional u otros materiales: una de ellas es que por sus bajos espesores tienen bajo peso y por tanto es posible aumentar el tamaño del panel según se requiera; otra ventaja es la posibilidad de conectar el elemento a la estructura del edificio, de manera directa, a través de tornillos, siendo éste un proceso constructivo simple y eficiente.

En la presente investigación se analizó el comportamiento de esa conexión en un panel con características geométricas específicas variando la forma de elaboración del panel prefabricado. Aunque posee las ventajas de un material como el concreto de ultra alto desempeño, la forma de colado cambia las condiciones de posición de la fibra metálica y por consiguiente su comportamiento mecánico.

Palabras clave:

Concreto de ultra alto desempeño, fibras, resistencia a la tracción directa, resistencia a compresión, paneles de gran formato, orientación de fibra, conexión seca

Abstract

The Concrete technology has had a big evolution since the twentieth century. The material we know nowadays has changed drastically over the years. Developments in new cements, new admixtures and new applications show a different material in performance that was known at the beginning of the last century. Developments in self-compacting concrete, fiber reinforced concrete and high strength concretes are known, designed to improve the properties either in a fresh or hardened state. These concrete were the input for the ultra-high performance, which has the best characteristics of each of them and creates a new material to be used in different applications.

Ultra high performance concretes have different properties than standard concretes. It has an excellent behavior to tensile mechanical stresses and high stresses to simple compression, makes it possible to use this material for slender elements and high area/thickness ratios. It is the case of the use in building facades and large format panels that have traditionally been made it with materials such as steel or polymeric materials, due to their low weights and high mechanical behavior.

Ultra high performance concrete panels have several advantages compared to others manufactured in standard concrete or other materials: one of them is because of its low thicknesses, they have low weight and therefore it is possible to increase the size of the panel as required; Another advantage is the possibility of connecting the element to the structure of the building, directly, through screws, this being a simple and efficient construction process.

In the present investigation, the behavior of this connection was analyzed in a panel with specific geometric characteristics varying the form of elaboration of the precast panel, although it possesses the advantages of a material like the concrete of ultra-high performance, the form of casting changes the conditions of orientation of the metallic fiber and consequently its mechanical behavior.

Keywords:

Ultra High Performance concrete, fibers, compressive strength, tensile strength, fiber orientation, connection.

Contenido

1	Introducción.....	15
2	Concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras (uhpfrc)	16
2.1	Generalidades.....	16
2.2	Proceso de producción y mezclado	18
3	Conexiones de paneles en fachadas.	20
4	Antecedentes	24
5	Objetivo general	27
5.1	Objetivos específicos	27
6	Materiales y Métodos	27
6.1	Materiales.....	27
6.1.1	Cemento	28
6.1.2	Arena.....	28
6.1.3	Humo de Sílice	29
6.1.4	Fibra metálica.	30
6.1.5	Aditivo superplastificante.	30
6.1.6	Concreto Fibro – reforzado de ultra alto desempeño (UHPFRC) .	30
6.2	Fabricación de paneles	39
6.3	Resistencia a compresión y Módulo de aplastamiento.	42
6.4	Visualización de fibras metálicas.	49
7	Resultados y Discusión	52
7.1	Incidencia de la zona de vaciado del panel en la cantidad y orientación de la fibra metálica.....	52
7.2	Comportamiento a compresión y módulo de aplastamiento.....	58
7.3	Incidencia de la cantidad y orientación de la fibra en la resistencia a compresión y el módulo de aplastamiento.....	67

8	Conclusiones y recomendaciones.....	73
8.1	Conclusiones.....	73
8.2	Recomendaciones.....	75
9	Bibliografía.	76
10	Anexo.	79

Lista de figuras.

Figura 1. Curva esfuerzo-deformación en primera fisura y máxima tensión en tracción directa.....	18
Figura 2. Geometría conexiones. Fuente (Echavarria A, 2015).....	21
Figura 3. Tomografía de espécimen de UHPFRC en la zona de conexión. (Fuente propia. Imagen elaborada en el tomógrafo de la Universidad KTH en Suiza).	22
Figura 4. Falla por aplastamiento de un elemento de UHPFRC (Fuente propia).....	22
Figura 5. Falla por tensión en UHPFRC. (Fuente propia).....	23
Figura 6. Falla por cortante en conexión en UHPFRC. (Fuente propia)	23
Figura 7. Falla segmentada en conexión en un elemento de GRC (Glass Reinforced Concrete). (Fuente (Camacho T. Esteban., 2013)).	24
Figura 8. Orientación de corte de probetas en UHPFRC. (Fuente. Adaptado de Maya & Graybeal, 2016)	25
Figura 9. Sección transversal de las fibras observadas a través de análisis de imágenes (Fuente. Adaptado de Maya & Graybeal, 2016).....	25
Figura 10. Curva granulométrica de la arena.	29
Figura 11. Procedimiento para la realización del ensayo de flujo.	32
Figura 12. Procedimiento para la fabricación de la mezcla.	33
Figura 13. Mezcladora planetaria Ziclos. (Centro Argos para la innovación).	34
Figura 14. Procedimiento para la elaboración de especímenes para el ensayo a compresión.	35
Figura 15. Evolución de resistencias mezcla UHPFRC (repeticiones).	37
Figura 16. Procedimiento para la elaboración de especímenes para el ensayo a tracción.	38
Figura 17. Probeta para el ensayo de tracción directa.	38
Figura 18. Geometría del molde del panel.	39
Figura 19. Secciones de vaciado PT – PC – PE.	40
Figura 20. Procedimiento para el vaciado del panel.....	41
Figura 21. Plano de espécimen extraído de placa. (Adaptado Fuente (Camacho T. Esteban., 2013).)	42
Figura 22. Dispositivo para fallar la conexión.	43
Figura 23. Flujo ensayo a compresión espécimen.	44
Figura 24. Prensa Hidráulica MTS. (Centro Argos para la Innovación).	45
Figura 25. Procedimiento para el ensayo de aplastamiento en dispositivo con perno. Foto propia y gráfica extraída de la norma UNE-EN 383.	46
Figura 26. Procedimiento para la lectura de imágenes y reconocimiento de fibras.	50
Figura 27. Secciones P3C1H secuenciales después de la fotografía evaluadas mediante el algoritmo en Matlab, a. Foto original. b. Foto sin poros. c. Objetos detectados.	52
Figura 28. Cantidad de fibra en zona de vaciado PT.	53
Figura 29. Cantidad de fibra en zona de vaciado PC.	54
Figura 30. Cantidad de fibra en zona de vaciado PE.	55
Figura 31. Densidad de fibra en la sección cortada en cada zona de vaciado.	56
Figura 32. Valores de K en las diferentes zonas de vaciado.	57

Figura 33. Valores de F_{max} en las zonas de vaciado PT-PC-PE.....	59
Figura 34. Valores promedio de resistencia a compresión en las diferentes zonas de vaciado.	60
Figura 35. Curva carga – deformación G1.	62
Figura 36. Curva carga – deformación G2.	63
Figura 37. Curva carga – deformación G3.	64
Figura 38. Curva carga – deformación G4.	65
Figura 39. Curva carga – deformación G5.	66
Figura 40. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PT).	67
Figura 41. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PC).	68
Figura 42. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PE).	69
Figura 43. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PT).	70
Figura 44. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PC).	71
Figura 45. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PE).	72

Lista de tablas

Tabla 1. Dosificación convencional de un UHPRFC. (Fuente (Perry & Eng, 2016a)) ..	19
Tabla 2. Composición química del cemento.....	28
Tabla 3. Resistencia Mecánica del cemento.	28
Tabla 4. Caracterización química Humo de sílice.	29
Tabla 5. Características de la fibra metálica	30
Tabla 6. Caracterización química aditivo superplastificante.	30
Tabla 7. Mezclas iniciales de UHPFRC.....	31
Tabla 8. Comportamiento en estado plástico repeticiones mezcla seleccionada.	34
Tabla 9. Resistencia a tracción directa mezcla M4.....	39
Tabla 10. Descripción de muestras de paneles y zonas de vaciado	49
Tabla 11. Características de especímenes evaluados en aplastamiento.	61
Tabla 12. Datos de ensayo de aplastamiento.	61

Glosario.

UHPFRC: Ultra High Performance Fiber reinforced Concrete

Strain hardening: Endurecimiento por deformación.

Strain softening: Ablandamiento por deformación.

Tomografía: Técnica radiográfica que permite obtener imágenes detalladas.

Deformación elástica: deformación de un elemento sometido a una carga en un periodo de tiempo.

Módulo de aplastamiento: parámetro de capacidad de carga por longitud de un elemento sometido a un esfuerzo.

Símbolos

d : Espesor del perno en espécimen.

t : Espesor del panel

b : Ancho del panel.

W/D_h : Relación entre ancho del espécimen y el diámetro de la conexión.

e/D_h : *Relación entre la distancia a la testa y el espesor de la conexión.*

K : *Coefficiente de transversalidad de la fibra en una sección.*

fib/mm^2 : Densidad de fibra en la sección cortada.

W : Ancho del espécimen evaluado.

e : distancia de la conexión a la testa.

D_h : espesor de la conexión.

fib : Cantidad de fibras.

1 INTRODUCCIÓN

El concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado con Fibras (UHPFRC por sus siglas en inglés) es un material de mayores resistencias mecánicas comparado con un concreto convencional. Presenta un mejor comportamiento a compresión, tracción y módulo elástico. Estas características hacen que el UHPFRC sea un material apropiado para la fabricación de elementos de mayor esbeltez, menor peso y de alguna singularidad arquitectónica.

Las conexiones más utilizadas en paneles de fachada de bajo peso son secas. Una conexión seca es aquella que puede atornillarse de manera directa a la estructura de la edificación según sea la necesidad geométrica. Esto facilita el proceso constructivo y disminuye los componentes del sistema toda vez que no se requiere de una estructura adicional de soporte de los paneles.

La zona de mayor vulnerabilidad en un panel fachada es su conexión. En esta zona existe una discontinuidad del material que afecta la distribución de los esfuerzos ocasionando fallas mecánicas que podrían producir el desprendimiento del panel de la fachada.

En los paneles fabricados con UHPFRC el comportamiento mecánico de la conexión depende, en gran medida, de la cantidad y orientación de la fibra. A mayor cantidad y una orientación perpendicular de la fibra respecto al sentido de la carga se espera una mejor respuesta mecánica.

En este trabajo se estudiaron las relaciones entre la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión de un panel fabricado con UHPFRC, su resistencia a la compresión y módulo de aplastamiento. Para estudiar estas relaciones se fabricaron varios paneles, los cuales se vaciaron desde distintas zonas del molde, un vaciado fue desde la parte superior del molde, otro desde la zona media y el último desde la zona donde está ubicada la conexión. Se evaluó el efecto de la orientación de vaciado del panel sobre la cantidad y la orientación

de la fibra en la zona de conexión. Posteriormente se evaluó la resistencia a compresión y el módulo de aplastamiento en la misma zona para correlacionar los anteriores resultados de la fibra con su comportamiento mecánico.

Al identificar la cantidad y orientación de la fibra que garantice el mejor comportamiento mecánico en la zona de conexión se espera aportar al mejoramiento de los procedimientos de fabricación industrial de paneles de fachada en UHPFRC.

2 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO REFORZADO CON FIBRAS (UHPFRC)

2.1 Generalidades

El Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado con Fibras es un material que posee una matriz cementante, compuesta por cemento Portland, adiciones minerales, arenas con altos contenidos de sílice, aditivos de última generación y fibras metálicas, sintéticas o naturales; además se puede emplear adiciones de filler calcáreo, para mejorar el comportamiento en estado fresco y en estado endurecido (Naaman, 2009) (Park, Kang, Koh, Kim, & Fehling, 2008).

El UHPFRC es un material que posee diferencias sustanciales frente a los concretos convencionales. Desarrolla una resistencia a compresión entre 120 MPa y 200 MPa, resistencia a tracción entre 6 MPa y 10 MPa, resistencia a la flexo tracción entre 10 MPa y 20 MPa y un módulo elástico entre 40 GPa – 70 GPa; comportamientos mecánicos superiores a los normalmente encontrados en concretos convencionales (Springer J, 2008). El concreto convencional posee resistencias a la compresión entre 21 MPa y 42 MPa, la resistencia a la tracción directa no supera los 0.1 MPa, el comportamiento en flexo-tracción más alto puede estar alrededor de los 5 MPa y el módulo elástico es de aproximadamente 21 GPa.

Cuando la ductilidad es más importante que la resistencia mecánica (compresión, tracción, flexo-tracción), se buscan concretos que tengan mayor

deformación que los convencionales, incluso a tracción directa (Makita & Brühwiler, 2014) (Camacho E, 2013). Para mejorar la ductilidad del concreto se recomienda el uso de fibras las cuales mejoran la resistencia residual, entendida como la capacidad para disipar energía después de la falla. (Camacho E, 2013).

El comportamiento a tracción, cortante y el aumento en la resistencia residual se ven influenciados por la cantidad y la orientación de fibras, pues de ellas depende que el material obtenga resistencias mayores en ambas direcciones. El UHPFRC puede verse como un material anisotrópico, sin embargo, cuando existe una orientación preferencial y una buena distribución de fibras da lugar a un material isotrópico (Abrishambaf, Cunha, & Barros, 2015) (Camacho E, 2013). Para lograr una buena distribución se recomienda el uso de plastificantes que además mejoran la trabajabilidad del concreto y disminuyen la relación agua/material cementante (a/mc) aportando al incremento de la resistencia mecánica (Lohaus, Ränge, & Fehling, 2008).

Las fibras metálicas, otorgan al UHPFRC mayor resistencia a tracción directa después de la primera fisura (Naaman, 2009). La fibra otorga la posibilidad de propagación del esfuerzo a través de la matriz de concreto y promueve tres modos de falla a tracción en los materiales de base cemento: fallos frágiles, cuasi frágiles y de endurecimiento post-fisuración los cuales se muestran en la Figura 1 (Japan Society of Civil Engineers, 2008). Se observa, en el punto (1) un esfuerzo en la zona flexible y un esfuerzo después de la primera fisura en el punto 3 donde el material sigue ganando resistencia, debido a la disipación de energía a través de la fibra metálica.

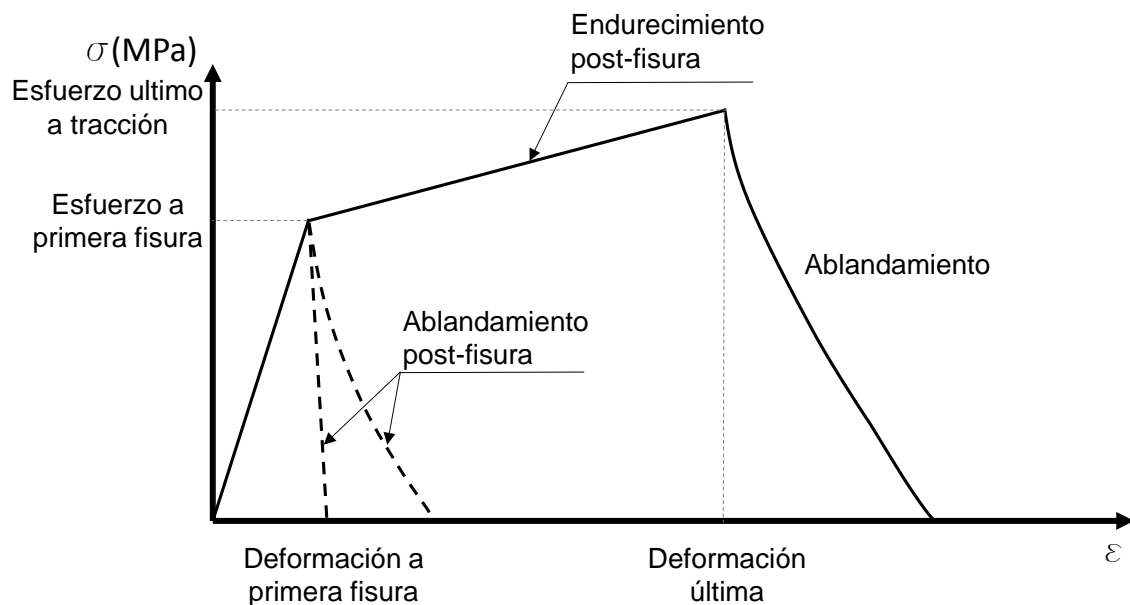


Figura 1. Curva esfuerzo-deformación en primera fisura y máxima tensión en tracción directa.

(Fuente: modificada de (Japan Society of Civil Engineers, 2008)).

Otros beneficios de la inclusión de fibras en el UHPFRC están asociados al control de la contracción plástica y por secado. Las fibras resisten los esfuerzos debidos al cambio volumétrico producido en la hidratación de la pasta y la pérdida de humedad del material en estado plástico (Abrishambaf et al., 2015)

La durabilidad del UHPFRC comparado con el concreto convencional es mayor. Respecto a la permeabilidad al ión cloruro existen reportes de valores menores a 100 culombios (Abrishambaf et al., 2015) medido por la prueba rápida de cloruros (ASTM C 1202), lo cual demuestra que es un material poco permeable ya que los valores para concretos convencionales superan los 1000 culombios.

Así mismo se ha demostrado su mejor desempeño a otros ataques químicos como exposición a sulfatos, reactividad álcali sílice y carbonatación. La razón tiene que ver con los altos volúmenes de adiciones minerales, usadas en la mezcla, y los bajos niveles de relación a/mc (Russel, G & Graybeal, 2013).

2.2 Proceso de producción y mezclado

El UHPFRC requiere de condiciones especiales de fabricación, colocación y curado (Graybeal B., 2014). El curado a temperaturas elevadas, el uso de

cámaras de presión y los procesos de colocación controlados, son los que han permitido la obtención de materiales con altos niveles de ductilidad y aumentos considerables en la resistencia a la rotura y resistencia a la tracción (Abrishambaf et al., 2015).

El proceso de producción de UHPFRC varía según las características de las materias primas. Para lograr una buena compacidad se requiere buena granulometría de los materiales y la normalización de los tiempos de mezclado. (Hebel et al, 2014) demuestran la necesidad de mezclar los materiales cementantes con otros minerales, en estricto orden, y con una energía de mezclado específica, que optimice los comportamientos en estado plástico y estado endurecido. Las cantidades y proporciones son determinantes, pues de ellas dependen las propiedades mecánicas y se asegura que el material se comporte bien en estado plástico. En la Tabla 1 se muestra la dosificación convencional para un UHPFRC según (Perry & Eng, 2016a).

Tabla 1. Dosificación convencional de un UHPFRC. (Fuente (Perry & Eng, 2016a))

Material	kg/m³	% por peso.
Cemento	712	28.5
Arena	1020	40.8
Humo de sílice	231	9.3
Cuarzo	211	8.4
Aditivo	30.7	1.2
Acelerante	30	1.2
Fibras de acero	156	6.2
Agua	109	4.4

3 CONEXIONES DE PANELES EN FACHADAS.

Las conexiones en elementos de fachada se dividen en secas y húmedas y su uso depende del espesor, peso y responsabilidad estructural del panel (Cristina Bayo P, 2011). Con el fin de disminuir los costos del sistema y tener procesos más eficientes, se suelen utilizar conexiones secas (atornilladas). Este tipo de conexiones necesitan de buenas características mecánicas, pues estarán sometidas a diferentes esfuerzos según sea la carga aplicada en la instalación y el uso mismo del panel (Instituto Español Del Cemento, 2008).

Las conexiones secas atornilladas en UHPFRC poseen ventajas en la instalación del panel en la estructura (Instituto Español Del Cemento, 2008). Sin embargo, cuando se vacía la zona de conexión, es común tener variabilidad en la posición de la fibra, situación que es causa determinante para cambios en el comportamiento mecánico en esa zona y que produce daños y fisuración del elemento (Camacho E, 2013).

Según Abrishambaf et al., (2015), los porcentajes mínimos y la posición de la fibra hace que existan cambios significativos en el comportamiento mecánico del elemento de concreto. Una de las razones asociadas a este comportamiento es su forma de vaciado. Esta variable puede causar falla del elemento en cualquier posición del plano (L. F. Maya & Graybeal, 2016).

Las conexiones secas atornilladas son utilizadas en elementos que poseen alta resistencia a la tracción y bajo peso. Estos elementos están sometidos a esfuerzos de manera directa, sin ningún soporte externo y las cargas son asumidas totalmente por él.

La constitución de una conexión seca atornillada se muestra en la Figura 2, donde se identifica la distancia e como aquella magnitud entre el eje del perno y la testa del elemento; d como el espesor del perno; t el espesor del elemento y b el ancho; estas magnitudes y la relación entre ellas son determinantes en el comportamiento de la conexión.

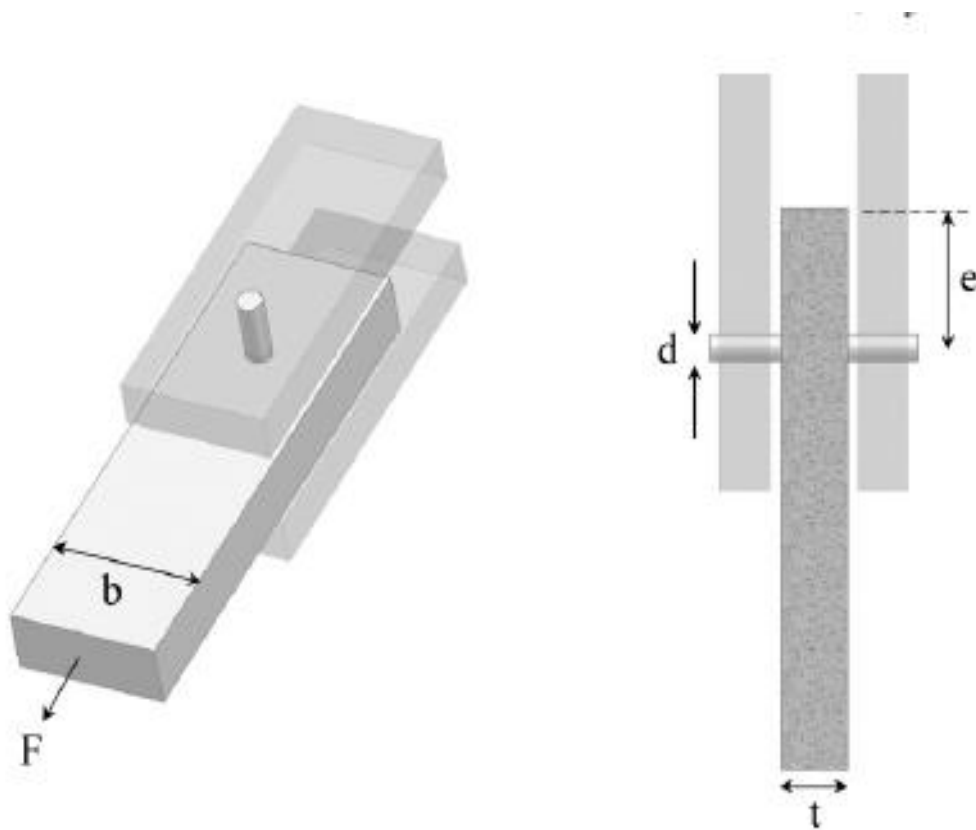


Figura 2. Geometría conexiones. Fuente (Echavarría A, 2015)

Las fallas en conexiones secas dependen de si el material es isotrópico como el acero o anisotrópico como el concreto. También están reguladas por la geometría del elemento y más específicamente por la distancia e (Echavarría A, 2015). Cuando se utiliza UHPFRC existe una condición adicional que es la orientación de las fibras en la conexión, pues esta regula su comportamiento mecánico. La orientación de la fibra está a su vez relacionada con el proceso de vaciado del elemento (Ferrara L, 2008). Se asume que existe una relación entre la distancia del punto de vaciado inicial y la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión. En la

Figura 3 se observa la orientación típica de las fibras en la zona de conexión, en esta zona se observa la posición de la fibra orientada en diferentes direcciones en función del flujo del material.



Figura 3. Tomografía de espécimen de UHPRFC en la zona de conexión. (Fuente propia. Imagen elaborada en el tomógrafo de la Universidad KTH en Suiza).

Los tipos de falla más comunes en una conexión seca son por: aplastamiento, tensión, cortante o la combinación de ellas (Camacho E, 2013). La falla por aplastamiento sucede debido a la concentración de esfuerzos a compresión en la perforación, lo que genera un cambio de forma del material (ver Figura 4). Se considera una falla dúctil pues permite una considerable deformación antes de la rotura. En el caso de materiales fibroreforzados la falla por aplastamiento se asocia a la posición y cantidad de fibra presente en las zonas de contacto del perno (Camacho E, 2013).



Figura 4. Falla por aplastamiento de un elemento de UHPFRC (Fuente propia)

La falla por tensión sucede debido a la fuerza de tracción que actúa en el sentido transversal del espécimen. Normalmente ocurre en materiales de baja resistencia a la tracción directa, como el concreto convencional, o que su comportamiento no es ortotrópico. La adición de fibras en el concreto busca mejorar el comportamiento a tracción directa del concreto y por consiguiente disminuir la posibilidad de que se presenten fallas a tensión. En la Figura 5 se puede observar este tipo de falla.



Figura 5. Falla por tensión en UHPFRC. (Fuente propia)

La falla por cortante sucede debido a un esfuerzo puntual en la conexión, donde existe una combinación de esfuerzos de compresión y tracción que desprenden la porción de menor distancia a la testa, como se muestra en la Figura 6



Figura 6. Falla por cortante en conexión en UHPFRC. (Fuente propia)

La falla combinada, es aquella donde se producen diferentes tipos de esfuerzo y por lo tanto se presentan varias fallas en el espécimen. Debido a esto se genera

una propagación de la grieta desde el orificio hasta la parte final del elemento. Este comportamiento puede verse en la Figura 7



Figura 7. Falla segmentada en conexión en un elemento de GRC (Glass Reinforced Concrete). (Fuente (Camacho E, 2013)).

4 ANTECEDENTES

(L. Maya & Graybeal, 2016) estudiaron el comportamiento mecánico de paneles fabricados con UHPFRC en relación con la cantidad de fibra en diferentes secciones. Para ello realizaron cortes en 3 direcciones de flujo de vaciado, 0° , 45° y 90° , como se ve en la Figura 8 y se contaron las fibras con un analizador de imágenes. En la Figura 9 se observan como puntos blancos, fibras que tienen orientación en sentido perpendicular a la cara de corte; las líneas blancas corresponden a las fibras paralelas. De esta manera se puede hacer el conteo de fibras en cada orientación. Los resultados obtenidos demostraron que la mayor cantidad de fibras depende de la orientación del flujo de vaciado como también lo señalan. (Kang, Lee, Kim, & Kim, 2011). En el primer caso se demostró que la mayor cantidad de fibras está en la dirección de flujo 0° y la resistencia mecánica del panel depende de la cantidad y orientación de la fibra. A mayor cantidad de fibra en la sección de corte mayor resistencia a la tracción.

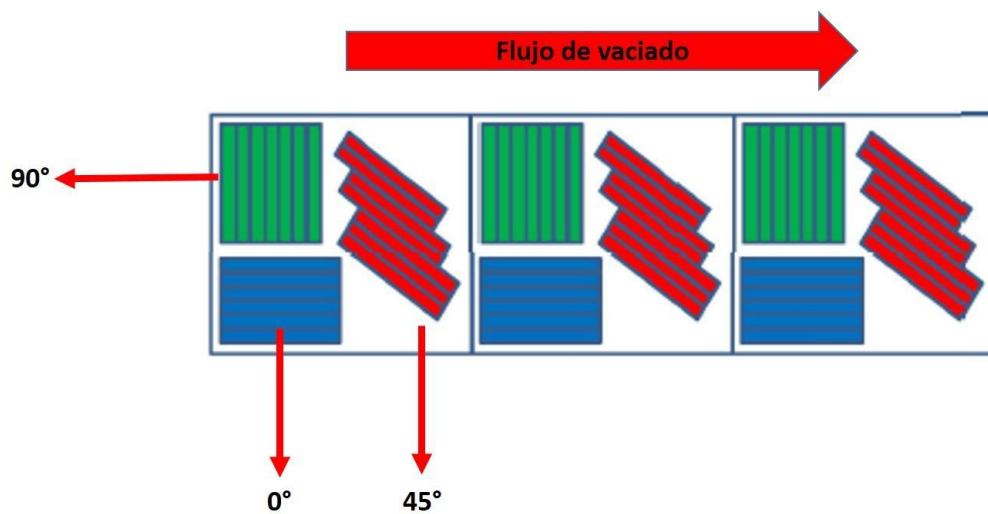


Figura 8. Orientación de corte de probetas en UHPFRC. (Fuente. Adaptado de Maya & Graybeal, 2016)

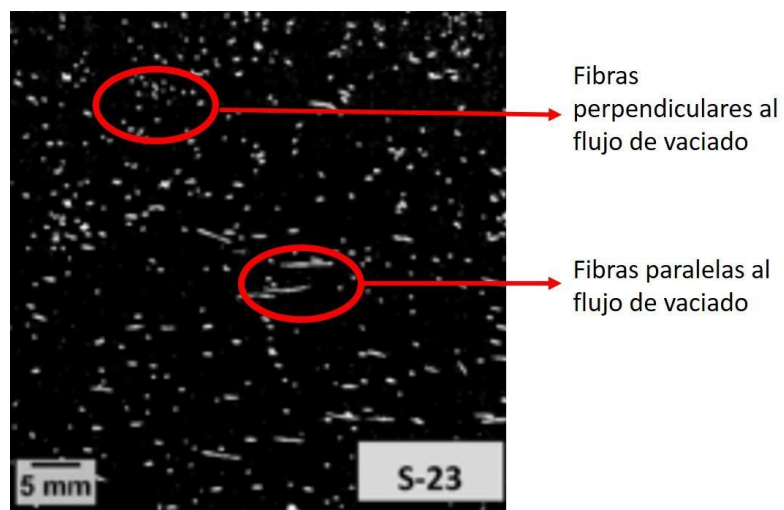


Figura 9. Sección transversal de las fibras observadas a través de análisis de imágenes (Fuente. Adaptado de Maya & Graybeal, 2016)

(Kim, Kang, Park, Ryu, & Fehling, 2008) mostraron que el comportamiento mecánico en primera fisura de un espécimen no depende de la orientación de la fibra. Sin embargo, su comportamiento en disipación de energía después de la primera fisura, sí está relacionado con la orientación preferencial de la fibra y el sentido del vaciado, logrando hasta 20% más de resistencia a la tracción.

(Yoo, Kang, & Yoon, 2014) estudiaron la influencia de la longitud de la fibra y el ángulo de posición según el flujo de vaciado. Demostraron que mientras más larga sea la fibra, menor desempeño mecánico tendrá en el rango plástico pues se afecta mucho más su posición en la sección del elemento, de hecho cambia sustancialmente cuando las fibras son mayores a 19 mm.

(Echavarría & Echavarría, 2015) identifican que ese comportamiento mecánico en la conexión de un panel fabricado con UHPFRC está en función de las propiedades elásticas del material y la geometría de la sección evaluada. Por otro lado (Camacho E, 2013), observó falla dúctil en conexiones atornilladas sometidas a esfuerzos de tracción e identificó diferentes modos de falla, siendo la más común la asociada a tensión neta en la conexión.

Existen varios estudios que detallan la orientación de la fibra y su relación con el comportamiento mecánico del material, así mismo se ha estudiado el comportamiento de la fibra en la conexión, sin embargo, existen algunos vacíos relacionados con el proceso de colocación y la relación de la posición de la fibra en las zonas de conexión, analizar estos detalles en función de diferentes formas de vaciado para materiales fibro-reforzados fue lo que se buscó en los objetivos de esta investigación.

5 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la incidencia que tiene la orientación de la fibra metálica en el comportamiento mecánico de la zona de conexión, de un panel fabricado con concreto de ultra alto desempeño UHPFRC.

5.1 Objetivos específicos

Identificar la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión de un panel de UHPFRC en estado endurecido cuando se utilizan diferentes formas de vaciado.

Evaluar la resistencia a compresión y módulo de aplastamiento de un panel fabricado con UHPFRC en distintas condiciones de vaciado.

Correlacionar la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión con la resistencia a compresión y el módulo de aplastamiento.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Materiales

Se realizó la caracterización de materias primas locales y se aplicó el diseño de mezclas propuesto por (Perry & Eng, 2016b) para obtener un concreto con una resistencia a compresión mínima de 120 MPa.

Las materias primas utilizadas fueron: cemento gris Tipo HE según ASTM C-1157, humo de sílice, arena de sílice, fibras metálicas OL 13 mm de longitud y 0.2 mm de espesor y súper plastificante.

A continuación, se describen las características de cada una de las materias primas y las mezclas fabricadas para la investigación.

6.1.1 Cemento

El cemento utilizado en la investigación fue de tipo HE según ASTM C-1157. Las características y composición se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición química del cemento

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃
Cemento HE	4.25	19.83	0.40	3.38	0.06	2.46	61.25	0.27	0.18	0.07	3.00

Así mismo en la Tabla 3 se muestra el comportamiento mecánico del cemento evaluado según la NTC 220.

Tabla 3. Resistencia Mecánica del cemento.

Edad de curado	1 día	3 días	7 días	28 días
Resistencia	15.22	27.33	34.6	47.8

6.1.2 Arena

La arena utilizada es proveniente de la planta Minagar ubicada en el departamento de Cundinamarca, Colombia. El contenido de sílice es del 95% y la granulometría es la que se presenta en Figura 10.

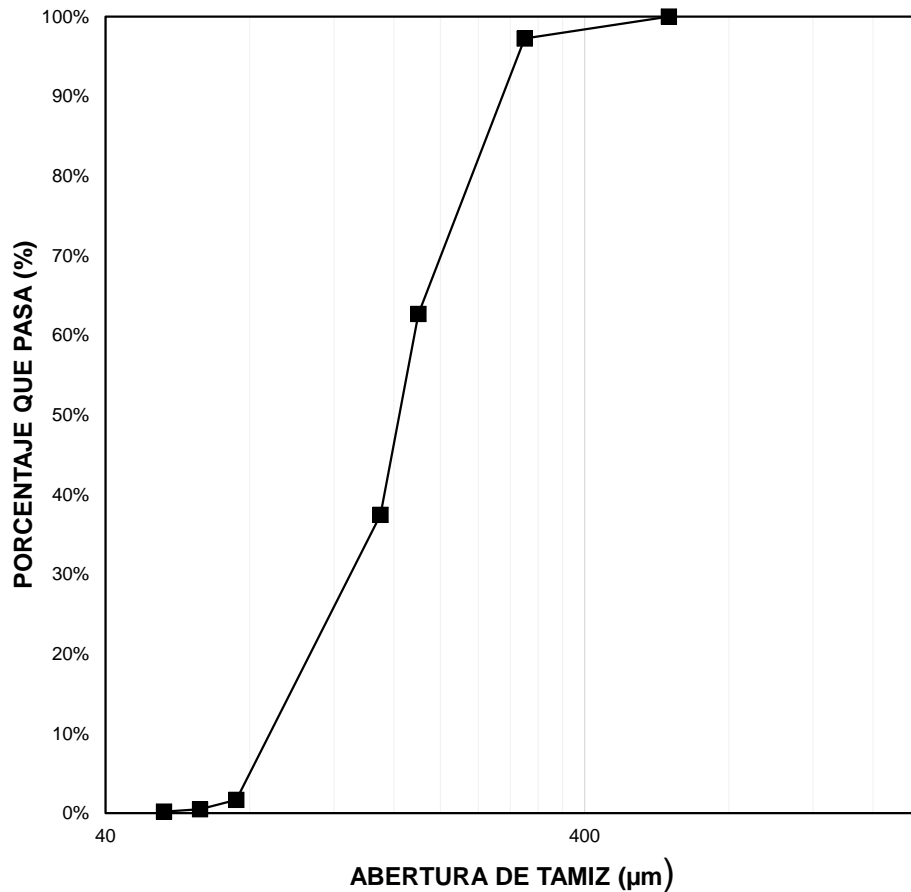


Figura 10. Curva granulométrica de la arena.

6.1.3 Humo de Sílice

El humo de sílice es distribuido en Colombia por Toxement. Los resultados de la caracterización se describen en la Tabla 4. Esta materia prima cumple con las características descritas en (Perry & Eng, 2016a).

Tabla 4. Caracterización química Humo de sílice.

	LOI	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
						%					
Humo Sílice	2.85	90.66	0.01	0.54	1.48	0.08	0.80	1.16	0.46	1.38	0.07

La densidad del humo de sílice es de 2.337 g/cm³

6.1.4 Fibra metálica.

La fibra metálica es referencia OL 13/0,20 de alto carbono y alta resistencia mecánica a la tracción. Es producida por Bekaert y distribuido por Proalco, ver las características en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de la fibra metálica

Diámetro de fibra (mm)	Longitud de fibra (mm)	Modulo elástico (GPa)	Esfuerzo a tensión (MPa)
0.2	13	40	2600

6.1.5 Aditivo superplastificante.

El aditivo usado en la mezcla es un policarboxilato con un 40% de sólidos, que mejora la trabajabilidad del material. El aditivo es producido por BASF y sus características se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Caracterización química aditivo superplastificante.

%	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Br
Masterglenium	64.68	0.881	0.23	3.50	1.25	7.45	11.64	6.82

6.1.6 Concreto Fibro – reforzado de ultra alto desempeño (UHPRC)

Con el propósito de obtener una fluidez de 21 ± 1 cm, se realizaron 4 mezclas con diferentes dosificaciones que se identifican en la Tabla 7, como M1, M2, M3 y M4. La muestra M1 corresponde a la dosificación propuesta por (Perry & Eng, 2016a) y M2, M3 y M4 son mezclas modificadas para obtener la mezcla control.

En las mezclas M2 y M3 se conservó el contenido de cemento, humo de sílice y fibra y se modificaron los contenidos de arena, agua y aditivo. Una vez medida la fluidez se observó que no cumplían con el parámetro de control y se decidió hacer la mezcla M4, disminuyendo la cantidad de cemento, de arena y de aditivo, y se aumentó la cantidad de humo de sílice y agua; la mezcla M4 cumplió con el parámetro de flujo de 21 ± 1 cm.

Tabla 7. Mezclas iniciales de UHPFRC.

Mezcla	M1	M2	M3	M4
		gr		
Cemento	878.75	878.75	878.75	850.00
Humo sílice	87.87	87.87	87.87	116.03
Arena	1213.95	1217.26	1164.07	1142.10
Agua	179.12	181.96	193.85	200.26
Aditivo	21.97	17.57	26.36	25.50
Fibra	153.00	153.00	153.00	153.00

La consistencia se obtuvo mediante el ensayo de flujo estático recomendada por (L. F. Maya & Graybeal, 2016). Se llevó a cabo empleando el cono de mini slump y una tabla de flujo con superficie no absorbente. El procedimiento se describe en la Figura 11

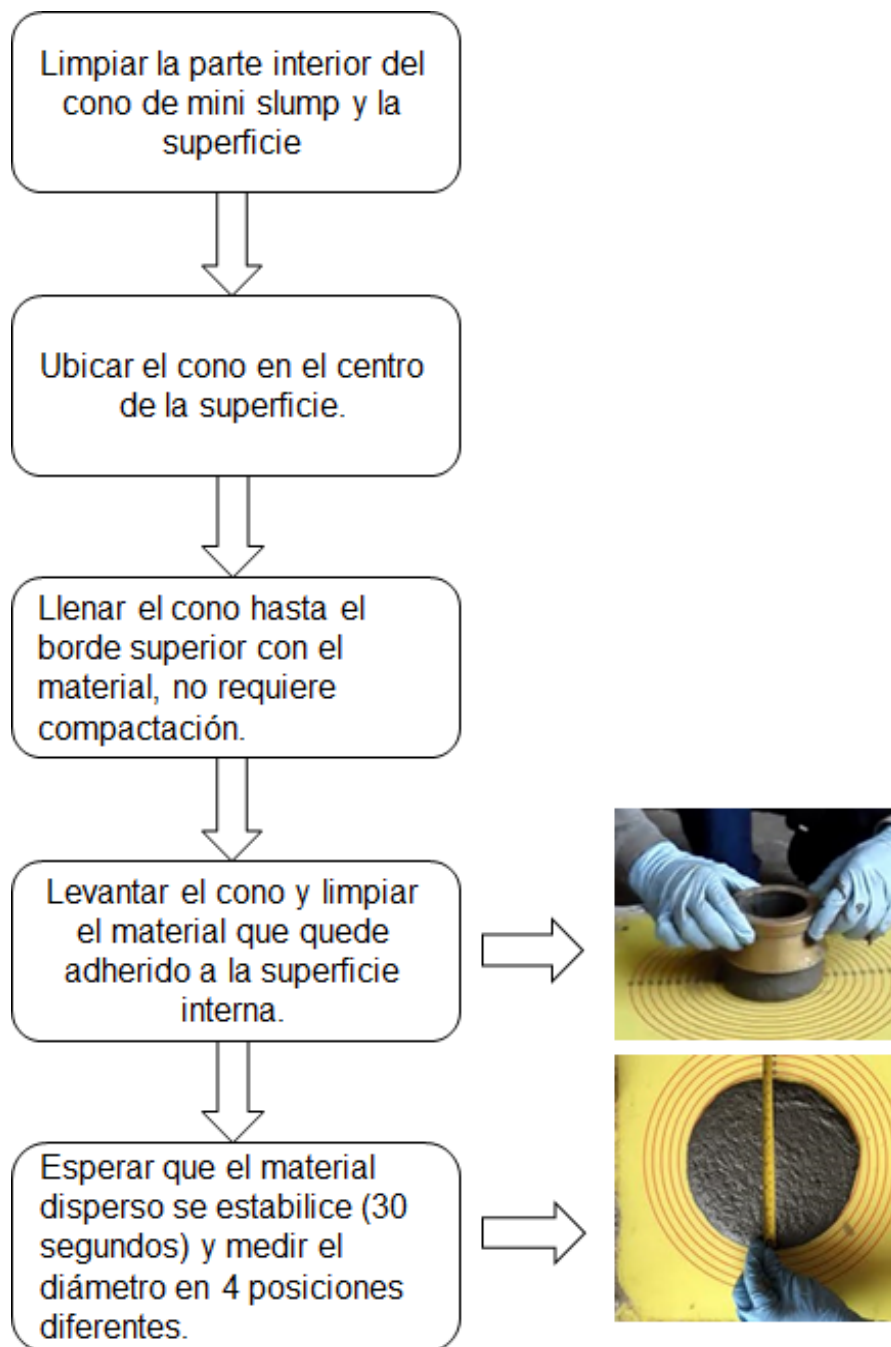


Figura 11. Procedimiento para la realización del ensayo de flujo.

La fluidez se obtiene por el promedio de las cuatro medidas de diámetro (\emptyset prom).

Algunos de los factores determinantes para obtener un buen flujo son el tiempo de mezclado y el orden en que se adicionan los materiales en la mezcladora. Se

recomiendan tiempos de mezclado entre 7 y 18 min (Hoang et al., 2016), dependiendo de los componentes y de la energía del equipo. El procedimiento y los tiempos de mezclado se describen en la Figura 12.

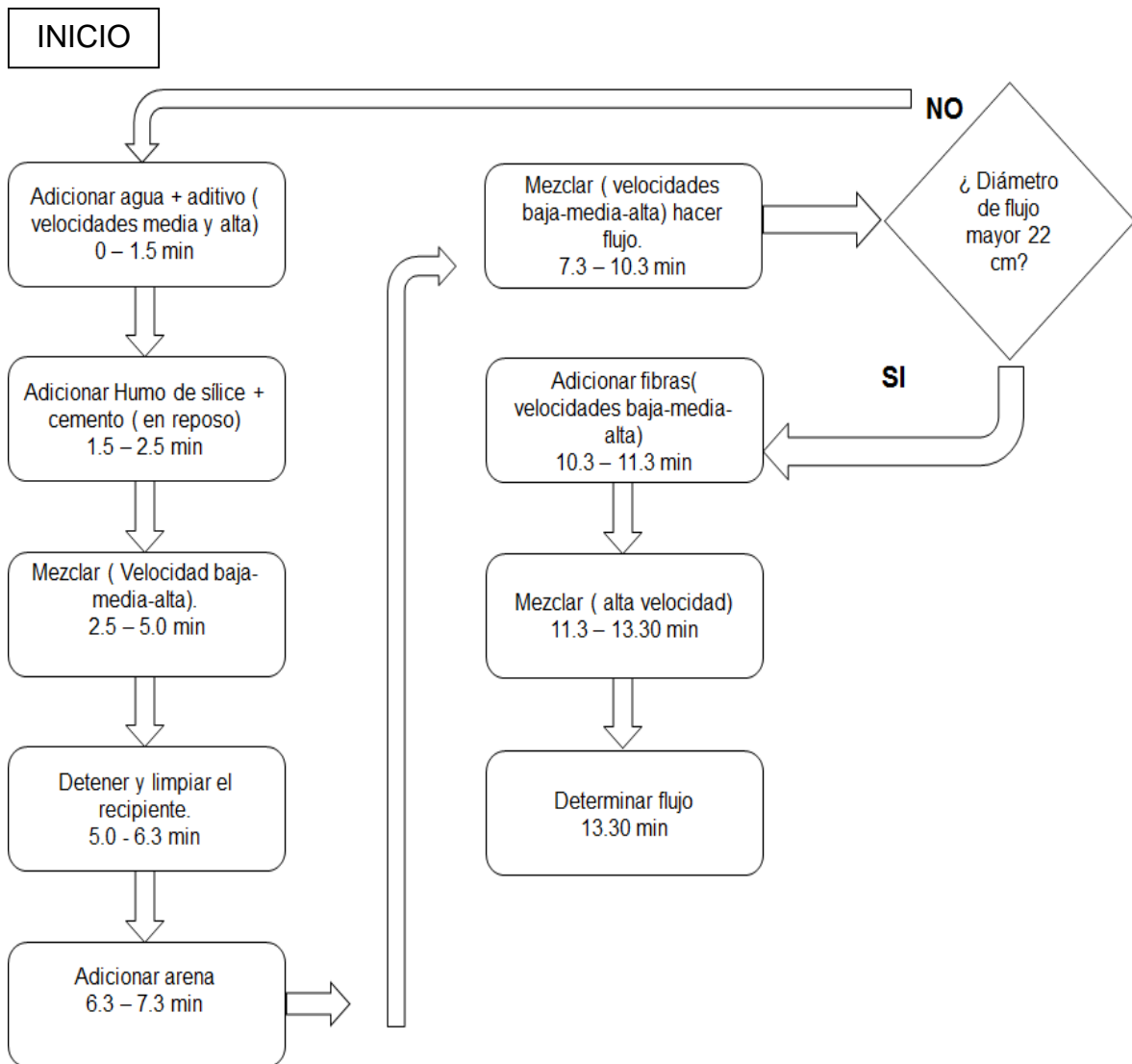


Figura 12. Procedimiento para la fabricación de la mezcla.

El equipo usado para este procedimiento fue una mezcladora planetaria de alta velocidad con capacidad de 40 litros, según se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Mezcladora planetaria Ziclos. (Centro Argos para la innovación).

Una vez obtenido el diseño de mezcla que cumplía con el parámetro de fluidez (M4), se realizaron 3 repeticiones con el propósito de verificar la dosificación patrón. En la Tabla 8 se muestran los resultados de fluidez de las 3 repeticiones.

Tabla 8. Comportamiento en estado plástico repeticiones mezcla seleccionada.

Mezcla	M4.1	M4.2	M4.3
	gr		
Cemento	850.00	850.00	850.00
Humo sílice	116.03	116.03	116.03
Arena	1142.10	1142.10	1142.10
Agua	200.26	200.26	200.26
Aditivo	25.50	25.50	25.50
Fibra	153.00	153.00	153.00

La resistencia a compresión es uno de los parámetros más importantes que se evaluaron en las mezclas seleccionadas. El procedimiento sigue las

recomendaciones de la ASTM C109 (modificado) y está descrito en el flujograma mostrado en la Figura 14.

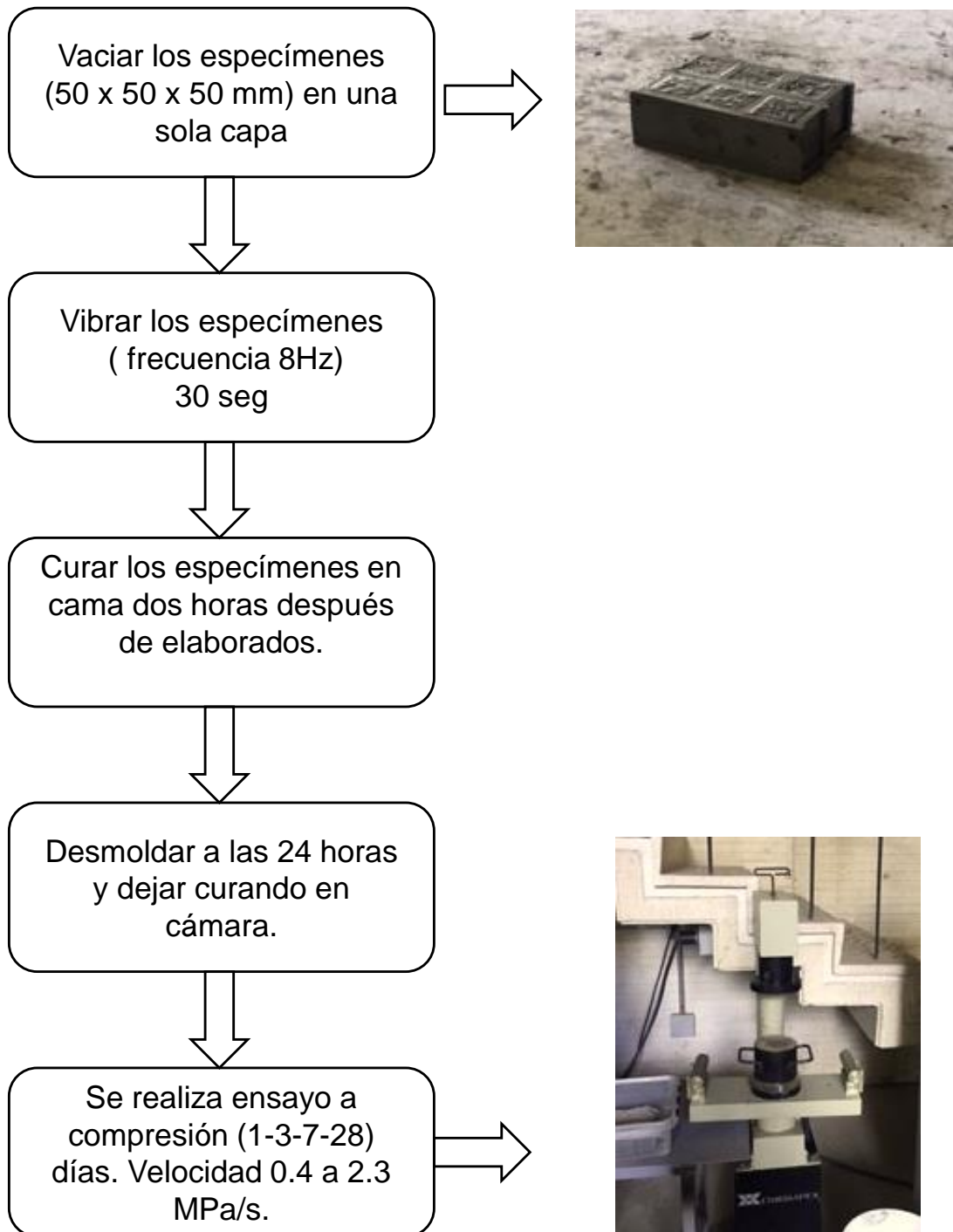


Figura 14. Procedimiento para la elaboración de especímenes para el ensayo a compresión.

La resistencia a compresión, f_m , se obtiene del promedio de 3 cubos a diferentes edades y se calcula mediante la Ec. 1.

$$f_m = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión (MPa).

P : Carga máxima total en (N)

A : Área de la superficie (mm²)

Los resultados obtenidos a diferentes edades de curado (1-3-7-28 días) de la muestra M4 se observan en la Figura 15. A 1 día de curado se obtuvo una resistencia promedio de 3 muestras de 49.96 MPa, a los 3 días 103.33 MPa, a los 7 días 123.33 MPa y a los 28 días 143.33 MPa.

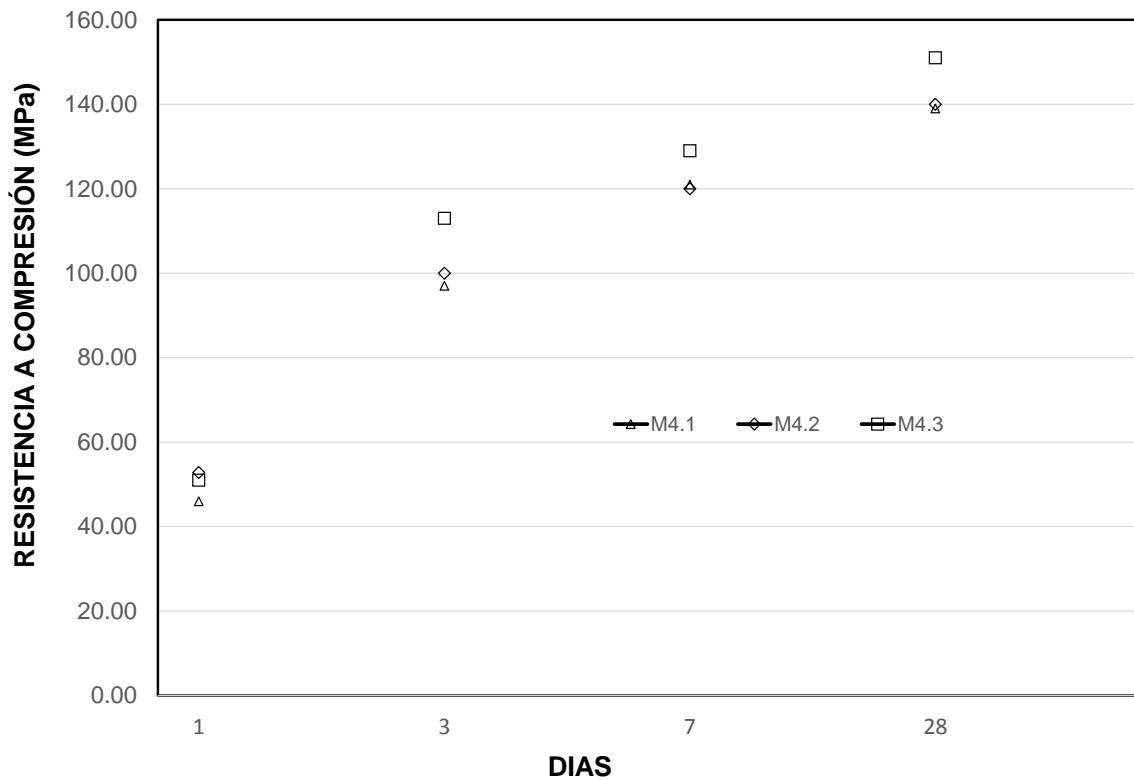


Figura 15. Evolución de resistencias mezcla UHPFRC (repeticiones).

Para determinar la resistencia a la tracción directa del material se aplicó el ensayo basado en la recomendación de la sociedad de ingenieros civiles de Japón, JSCE HPRFRC (2008). El procedimiento se describe en la Figura 16

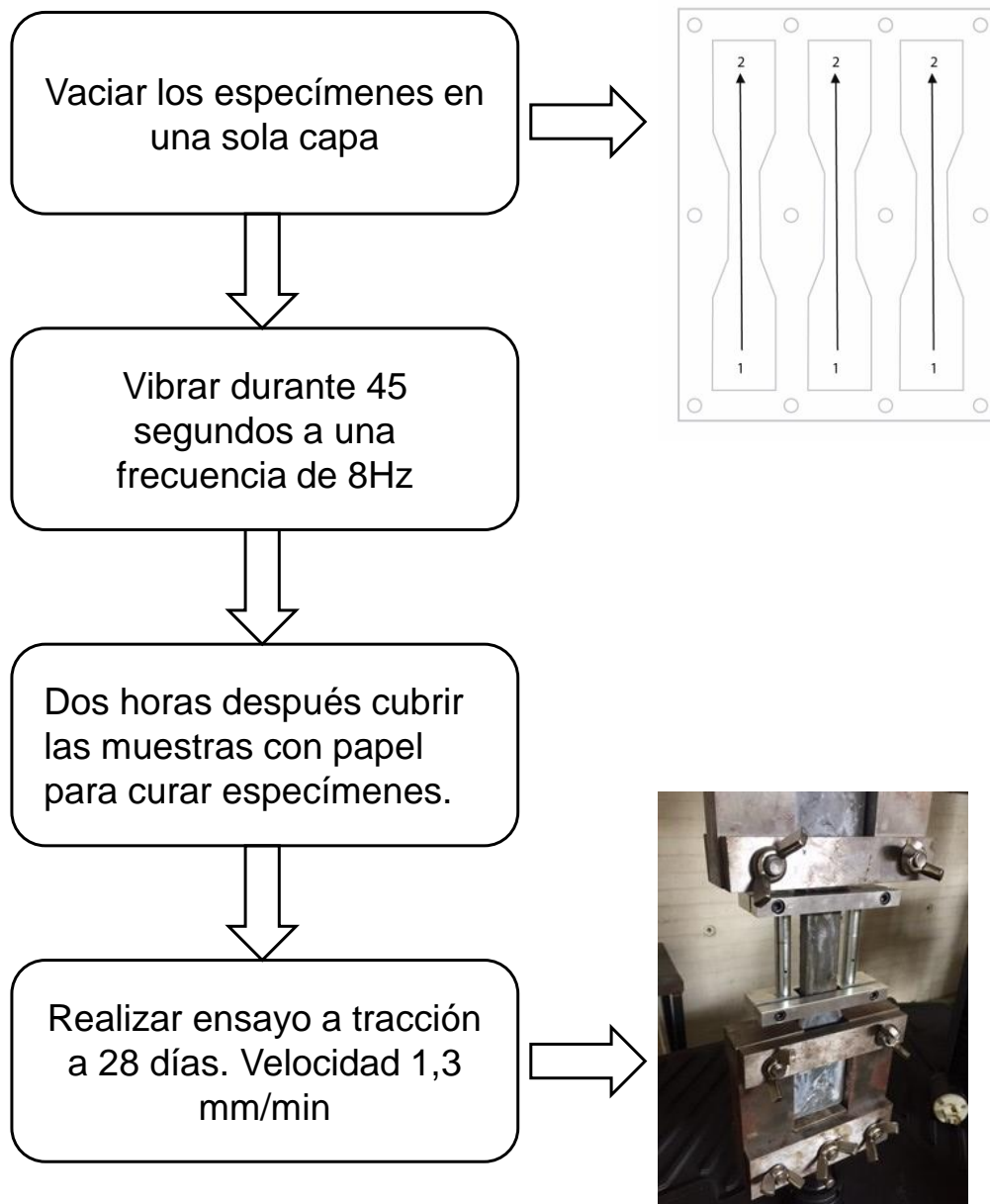


Figura 16. Procedimiento para la elaboración de especímenes para el ensayo a tracción.

La resistencia a tracción directa se obtiene aplicando la Ec. 2.

$$f_t = \frac{f_{ty}}{A_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde;

f_{ty} : Carga, (N)

A_0 : Área inicial de la sección transversal del elemento, (mm²).

f_y : Esfuerzo a tracción, (MPa)

Las dimensiones de la probeta para este ensayo a tracción se presentan en la en la Figura 17.

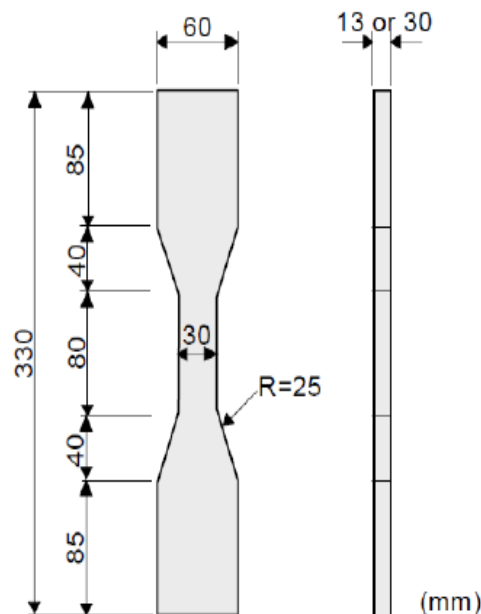


Figura 17. Probeta para el ensayo de tracción directa.

Se realizó el ensayo a tracción directa de la mezcla M4. Los resultados se muestran en la Tabla 9. Resistencia a tracción directa mezcla M4. El promedio del f_t fue 9.76 MPa.

Tabla 9. Resistencia a tracción directa mezcla M4.

Espécimen	F_t (MPa)
M4.1	9.50
M4.2	10.10
M4.3	9.70

6.2 Fabricación de paneles

Para la fabricación de los paneles se utilizó la mezcla M4. Se vaciaron en un molde cuya forma y dimensiones aparecen en la Figura 18.

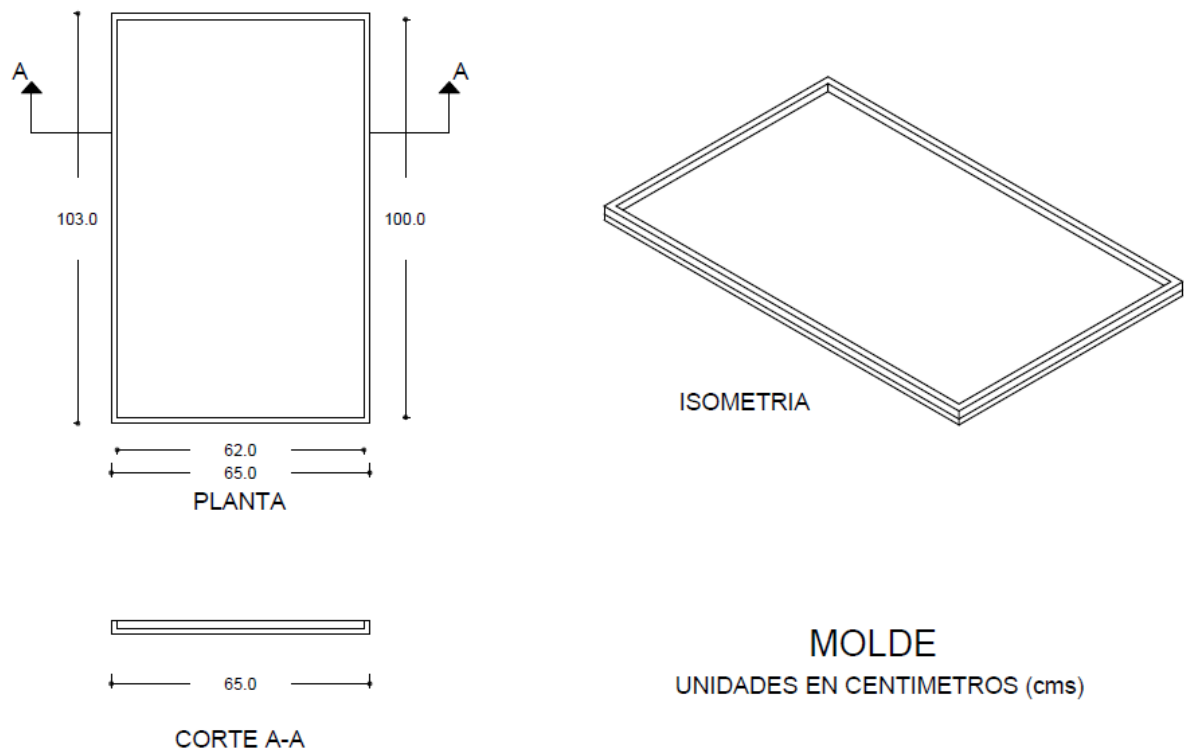


Figura 18. Geometría del molde del panel.

Con el fin de identificar el efecto del vaciado en la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión se seleccionaron 3 puntos. El primero cerca la zona de conexión en los primeros 33 cm del molde y se denominó (PT), el segundo punto de vaciado en el centro del molde entre los 33 y 66 cm se denominó (PC), y el tercero entre los 66 y 100 cm se denominó (PE), según se observa en la Figura 19.

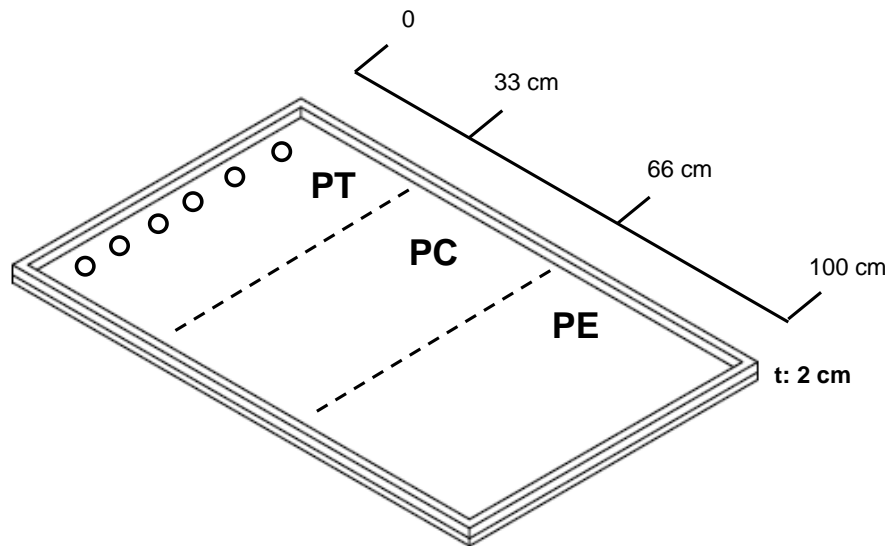


Figura 19. Secciones de vaciado PT – PC – PE.

Se fabricaron 4 paneles por cada punto de vaciado, en cada mezcla se verificó su desempeño en estado plástico y en estado endurecido, el procedimiento de vaciado de los paneles se observa en la Figura 20.

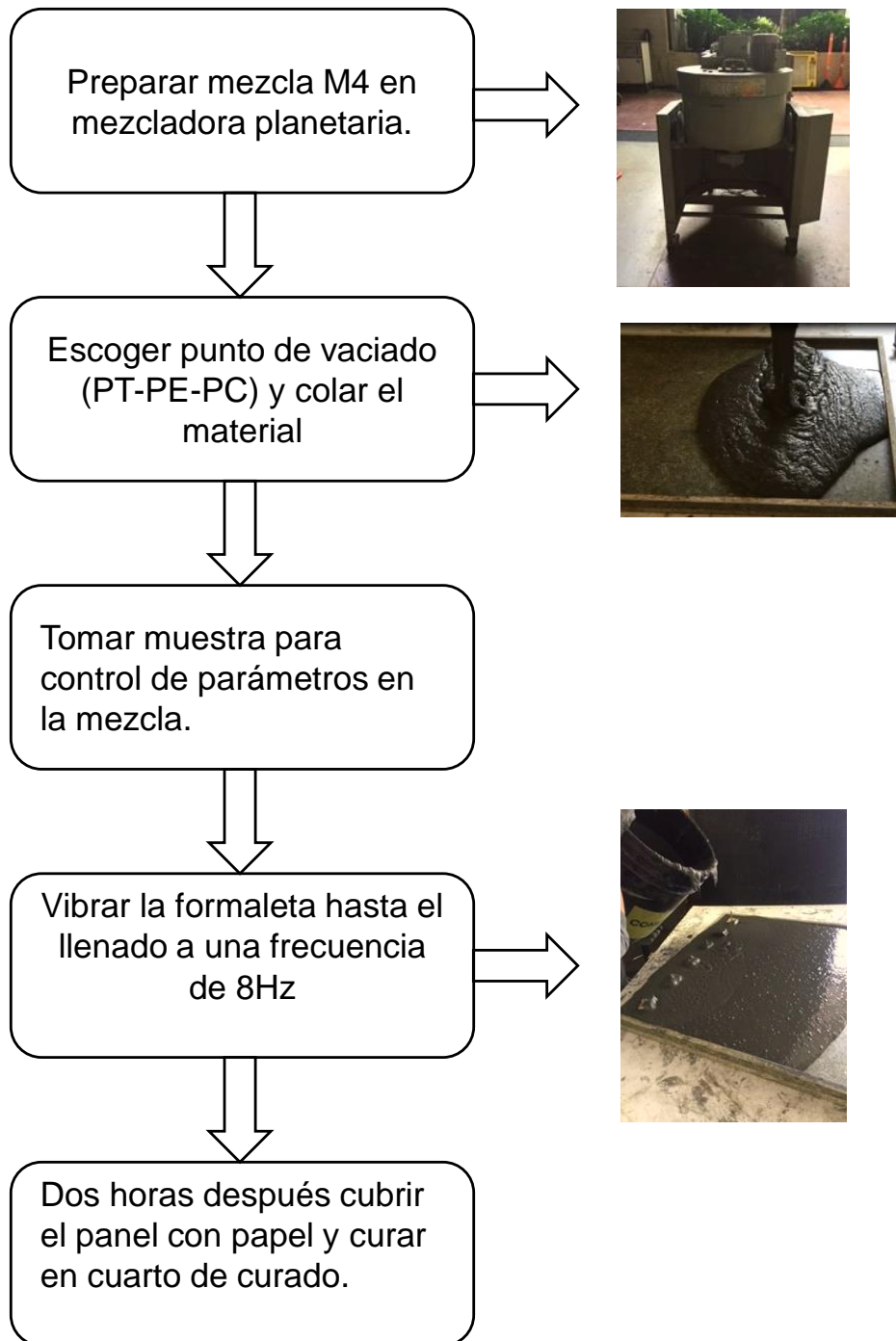


Figura 20. Procedimiento para el vaciado del panel

Para proceder con la evaluación mecánica y observación de fibras se seleccionó una geometría de corte para los especímenes de W/Dh : 5 y e/Dh mayor a 1.0, siguiendo las recomendaciones de (Camacho T. Esteban., 2013). En la Figura 21 se muestra la geometría del corte con el que se evaluó el comportamiento mecánico del material.

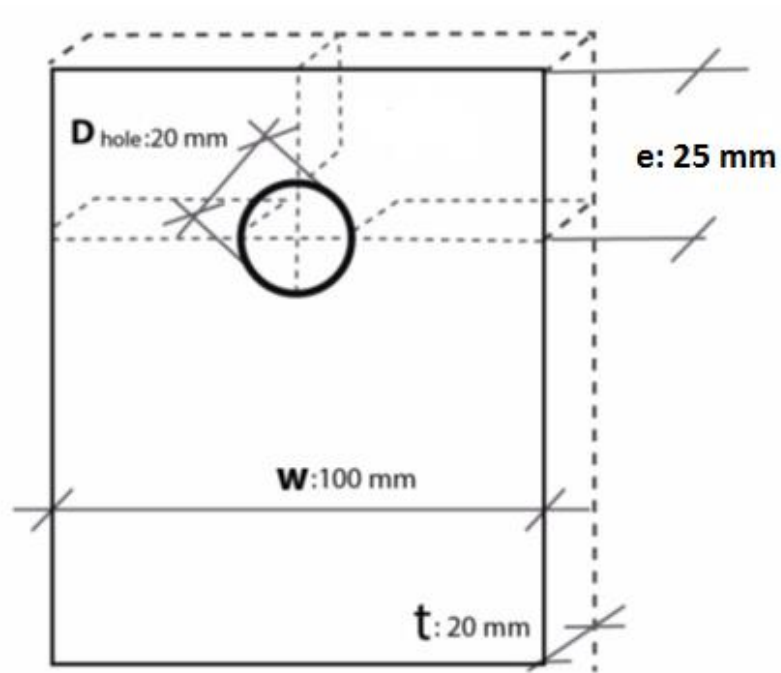


Figura 21. Plano de espécimen extraído de placa. (Adaptado Fuente (Camacho T. Esteban., 2013).)

6.3 Resistencia a compresión y Módulo de aplastamiento.

Con el fin de verificar el comportamiento mecánico, se desarrolló un procedimiento de evaluación del espécimen, para lo cual se diseñó un dispositivo mecánico de aplastamiento en la zona de conexión ejerciendo carga directamente en el perno, según se observa en la Figura 22

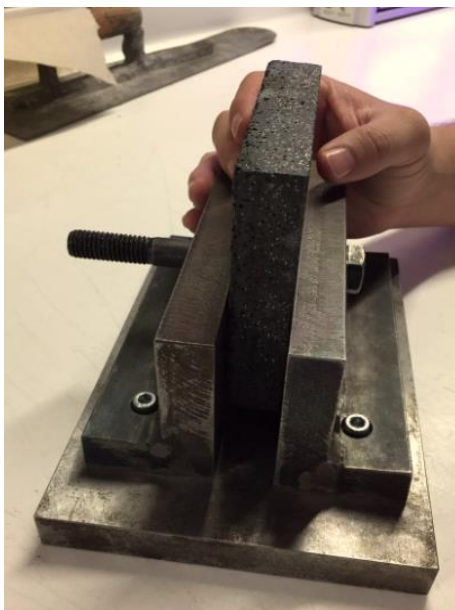


Figura 22. Dispositivo para fallar la conexión.

Las evaluaciones de resistencia a compresión en los especímenes se hicieron siguiendo el procedimiento que se muestra en la Figura 23

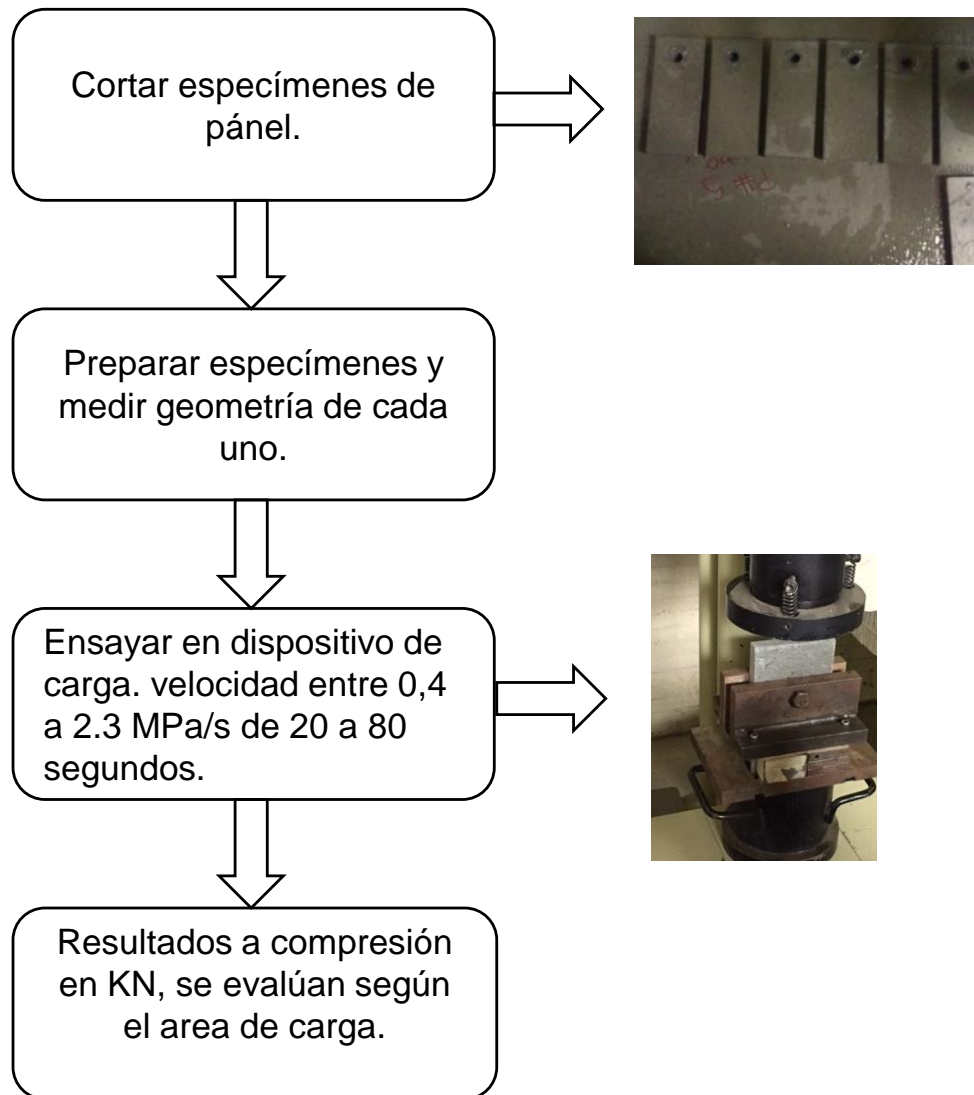


Figura 23. Flujo ensayo a compresión espec men.

La resistencia a tracción directa se obtiene aplicando la Ec. 3

$$f_m = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

f_m : Resistencia a la compresión (MPa).

P: Carga máxima total (N).

A: Área de la superficie (mm²).

El ensayo de aplastamiento se realizó en el mismo dispositivo usado para compresión. El equipo usado para este ensayo es una prensa electromecánica de alta precisión marca MTS, con 1000 Hz de control de velocidad con una capacidad de 600 kN y autoajustable para medición de desplazamiento en la carga. Según se muestra en la Figura 24



Figura 24. Prensa Hidráulica MTS. (Centro Argos para la Innovación).

El procedimiento de realización del ensayo sigue el flujograma descrito en la Figura 25

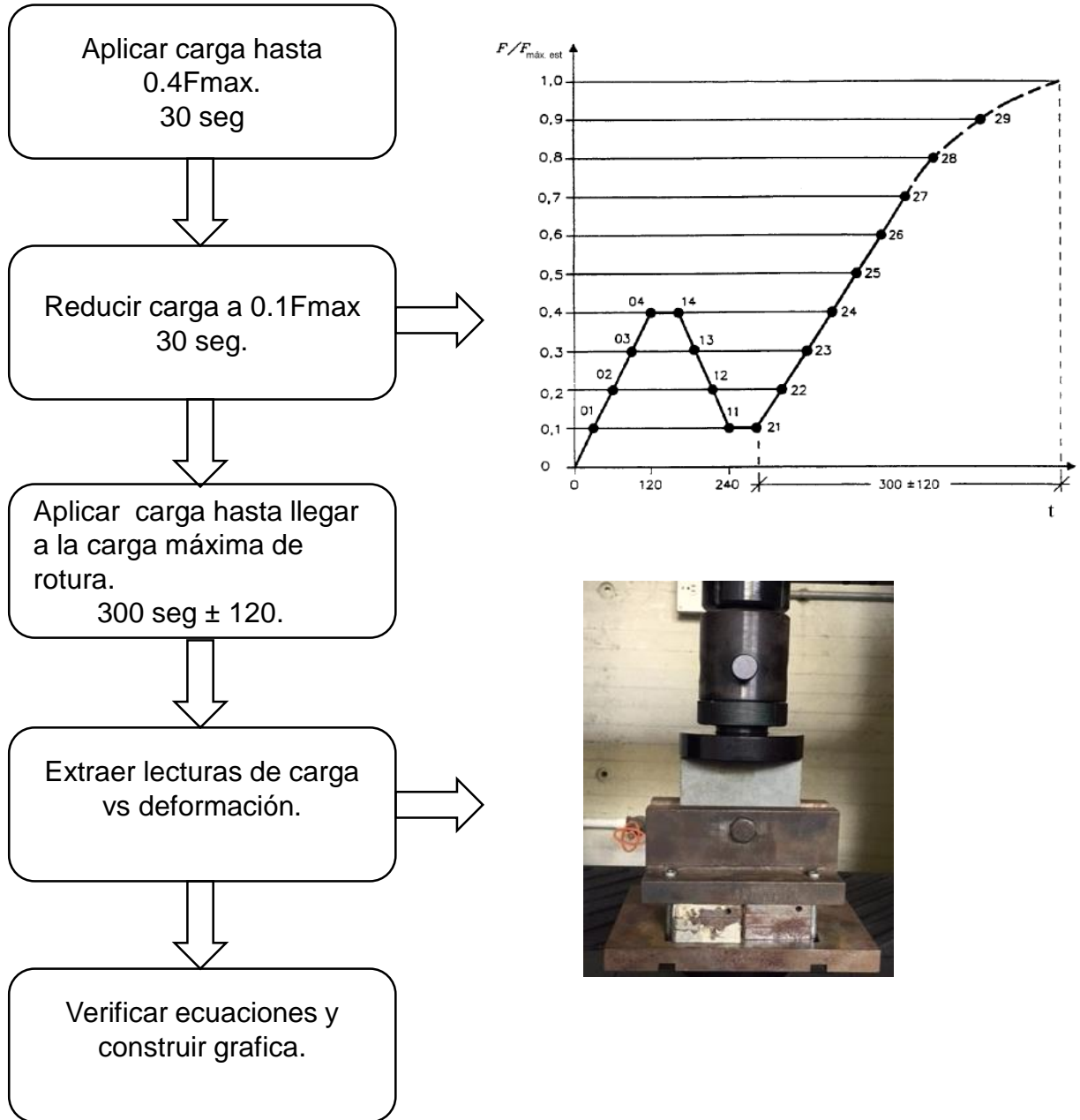


Figura 25. Procedimiento para el ensayo de aplastamiento en dispositivo con perno. Foto propia y gráfica extraída de la norma UNE-EN 383.

Con los datos obtenidos se calculan las características mecánicas a través de las siguientes ecuaciones.

$$\text{Resistencia al aplastamiento} \quad Fh: \frac{Fmax}{d*t} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Fh, est: \frac{Fmax,est}{d*t} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde

Fh : Resistencia al aplastamiento (N/mm²)

Fh, est : Resistencia al aplastamiento estimado (N/mm²)

t : Espesor

d : Diámetro de conexión. (mm)

$Fmax$: Resistencia a compresión máxima del elemento (N/mm²)

$$\text{Deformación Inicial:} \quad wi : w04 \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\text{Deformación Inicial Modificada:} \quad wi, mod: \frac{4}{3} (w04 - w01). \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

wi : Aplastamiento o deformación (mm)

wi, mod : Aplastamiento inicial (mm)

$$\text{Deformación Elástica:} \quad we: \frac{2}{3} (w14 + w24 - w11 - w21). \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

we : Deformación elástica (mm)

$$\text{Módulo de aplastamiento Inicial:} \quad ki: \frac{0.4*Fh,st}{wi} \quad \text{Ecuación 9}$$

Módulo de aplastamiento: $ks: \frac{0.4*Fh,st}{wi,mod}$ Ecuación 10

Módulo de aplastamiento elástico: $ke: \frac{0.4*Fh,st}{we}$ Ecuación 11

Deformación bajo la carga 0.6Fmax: $w60$ Ecuación 12

Deformación Bajo carga 0.8 Fmax: $w80$ Ecuación 13

Donde

ki : Módulo de aplastamiento inicial (N/mm²)

ks : Módulo de aplastamiento (N/mm²)

ke : Módulo de aplastamiento elástico (N/mm²)

6.4 Visualización de fibras metálicas.

Para realizar el proceso de visualización de fibras se vaciaron 4 paneles por cada zona de vaciado (PT – PC – PE), de cada panel se cortaron 6 especímenes ubicados en la zona de conexión. Estos especímenes se numeraron según la Tabla 10

Tabla 10. Descripción de muestras de paneles y zonas de vaciado

Panel	Zona de vaciado	Probeta	Nomenclatura
MP1	PT	1-6	PT1 a PT6
MP2	PT	7-12	PT7 a PT12
MP3	PT	13-18	PT13 a PT18
MP4	PT	19-24	PT19 A PT24
MP5	PC	1-6	PC1 a PC6
MP6	PC	7-12	PC7 a PC12
MP7	PC	13-18	PC13 a PC18
MP8	PC	19-24	PC19 A PC24
MP9	PE	1-6	PE1 a PE6
MP10	PE	7-12	PE7 a PE12
MP11	PE	13-18	PE13 a PE18
MP12	PE	19-24	PE19 A PE24

El proceso de visualización de la fibra comienza por el corte de especímenes, los cuales son extraídos de la placa, el flujograma mostrado en la Figura 28, establece los pasos necesarios para identificar las fibras en las secciones cortadas.

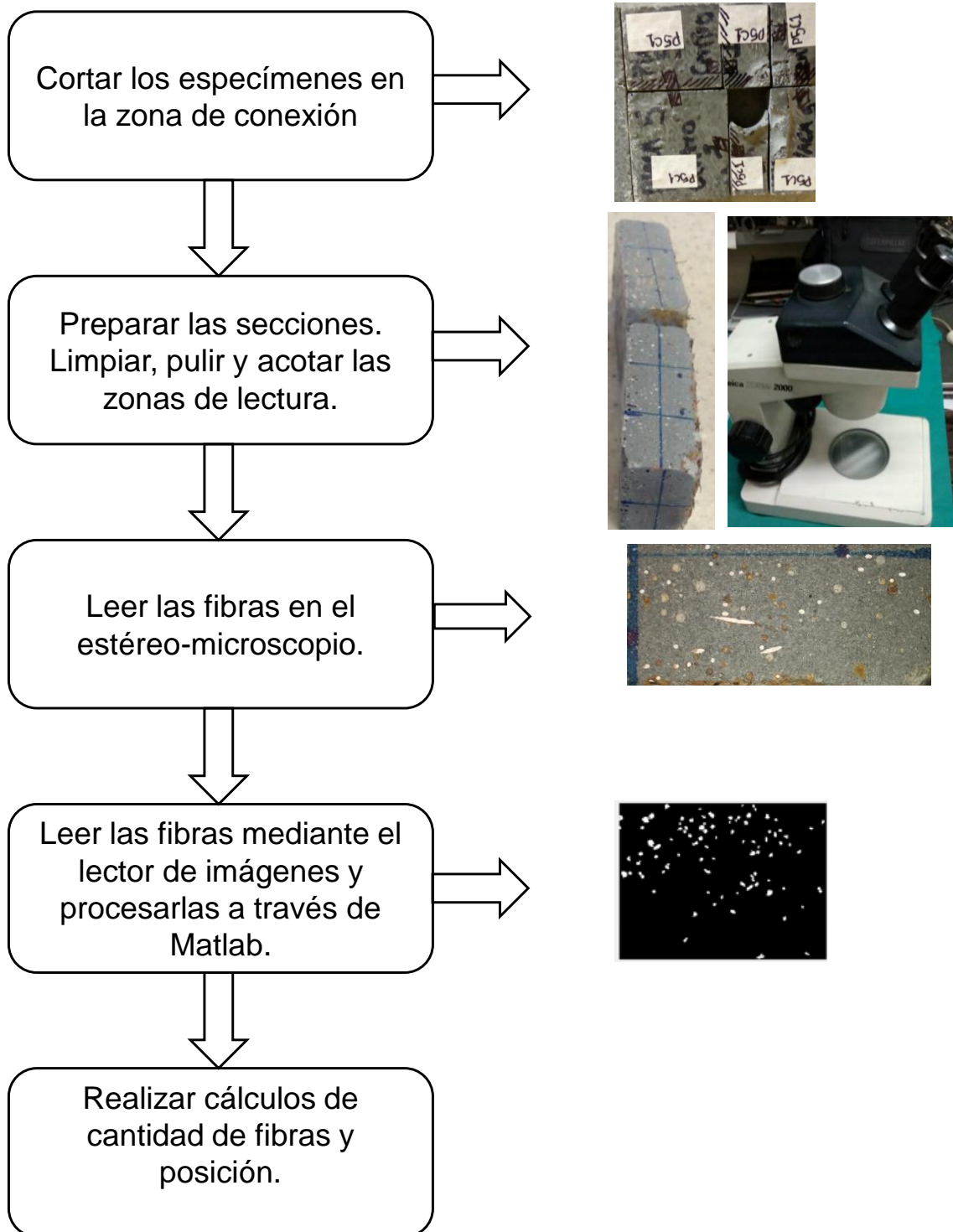


Figura 26. Procedimiento para la lectura de imágenes y reconocimiento de fibras.

El conteo de fibras y la determinación de la orientación se realizaron a través de un algoritmo diseñado en Matlab. Por medio de éste algoritmo se identificaron cantidades y posición de las mismas en el plano transversal del corte.

Para identificar valores es necesario proceder con las ecuaciones de la página 53.

$$N_x : \sum N_i \quad \text{Ecuación 6}$$

$$K_x : f_t / N_x \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\alpha : N_x / A_x \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde

N_x : Número de fibras totales en una sección específica, (#)

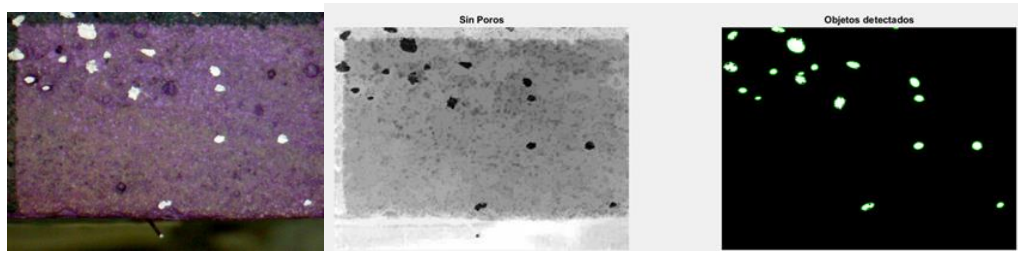
f_t : Número de fibras longitudinales en el panel, (#)

K_x : Coeficiente de orientación, (%)

α : Densidad de fibra en la sección, (#/mm²).

El algoritmo se construyó con varias premisas: la primera seleccionar los elementos brillantes resaltados en la imagen con el fin de verificar la presencia de fibra; la segunda ocultar poros que pueden parecerse a fibras; la tercera identificar las fibras transversales al corte a través de su excentricidad.

Estas premisas son descritas en el algoritmo realizado en Matlab presentado en el anexo 1, después de esta disposición se procedió con el conteo y validación de cada sección seleccionada. En la Figura 27 se muestra la secuencia de las imágenes antes del conteo en el proceso que se realiza a través del algoritmo.



a.

b.

c.

Figura 27. Secciones P3C1H secuenciales después de la fotografía evaluadas mediante el algoritmo en Matlab, a. Foto original. b. Foto sin poros. c. Objetos detectados.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 Incidencia de la zona de vaciado del panel en la cantidad y orientación de la fibra metálica.

Con el propósito de identificar la incidencia de la zona de vaciado en la cantidad y orientación de la fibra metálica en la conexión, se efectuaron lecturas de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 6.4

En el gráfico de la Figura 28 se observan los datos obtenidos de las muestras MP1 a MP4 que corresponden a la zona PT. El promedio de las 4 muestras fue 452 fibras. El panel MP2 presenta mayor desviación posiblemente por variaciones en las condiciones de vaciado.

La sección de vaciado PT, es la que se encuentra más cercana a las zonas de conexión, en la cual se observa la mayor cantidad de fibras, con 452 fibras en promedio y una densidad de 0.25 fib/mm^2 . Este parámetro mostró una gran presencia de fibras en los cortes.

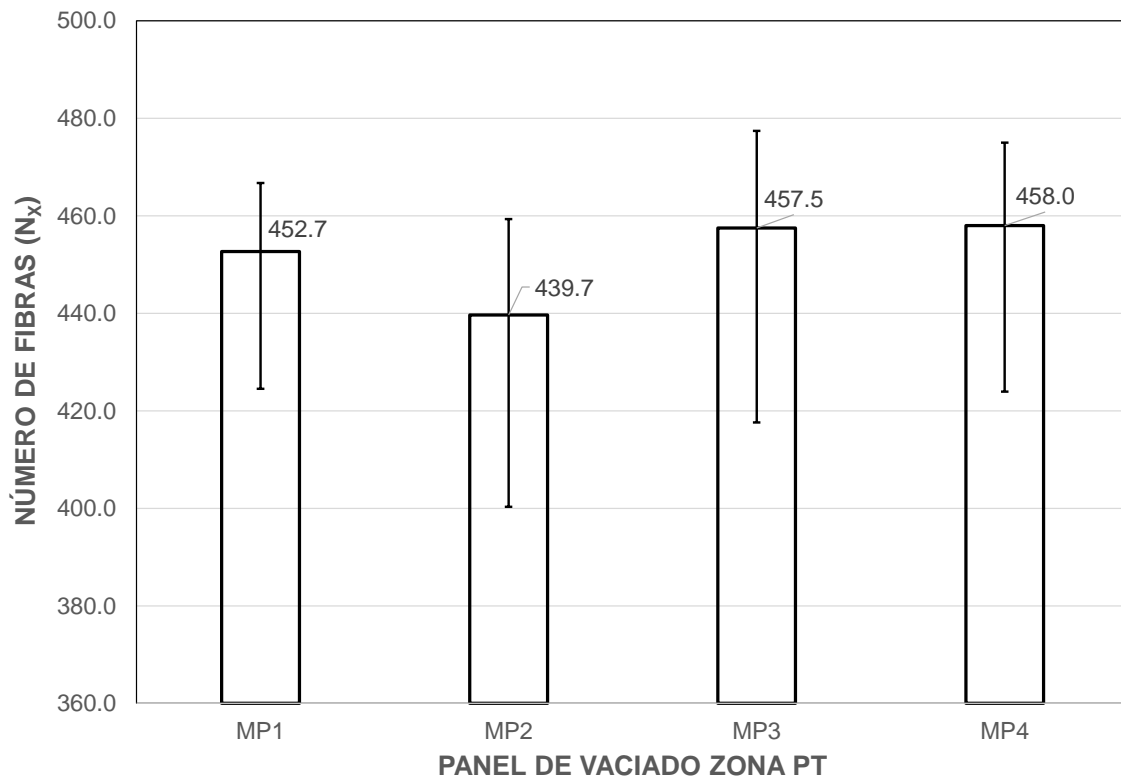


Figura 28. Cantidad de fibra en zona de vaciado PT.

En el gráfico de la Figura 29 se observan los datos obtenidos de los paneles MP5 a MP8 que corresponden a la zona PC. El promedio de las 4 muestras fue 278 fibras. La muestra MP8 presenta menor desviación posiblemente tiene un mejor control en el proceso de elaboración y colado del panel.

La sección de vaciado PC, es la que se encuentra en el centro del panel, se encontraron menos cantidad de fibras por mm^2 , una densidad de $0.15 \text{ fib}/\text{mm}^2$. Estos resultados son considerablemente menores que los encontrados en la zona de vaciado PT.

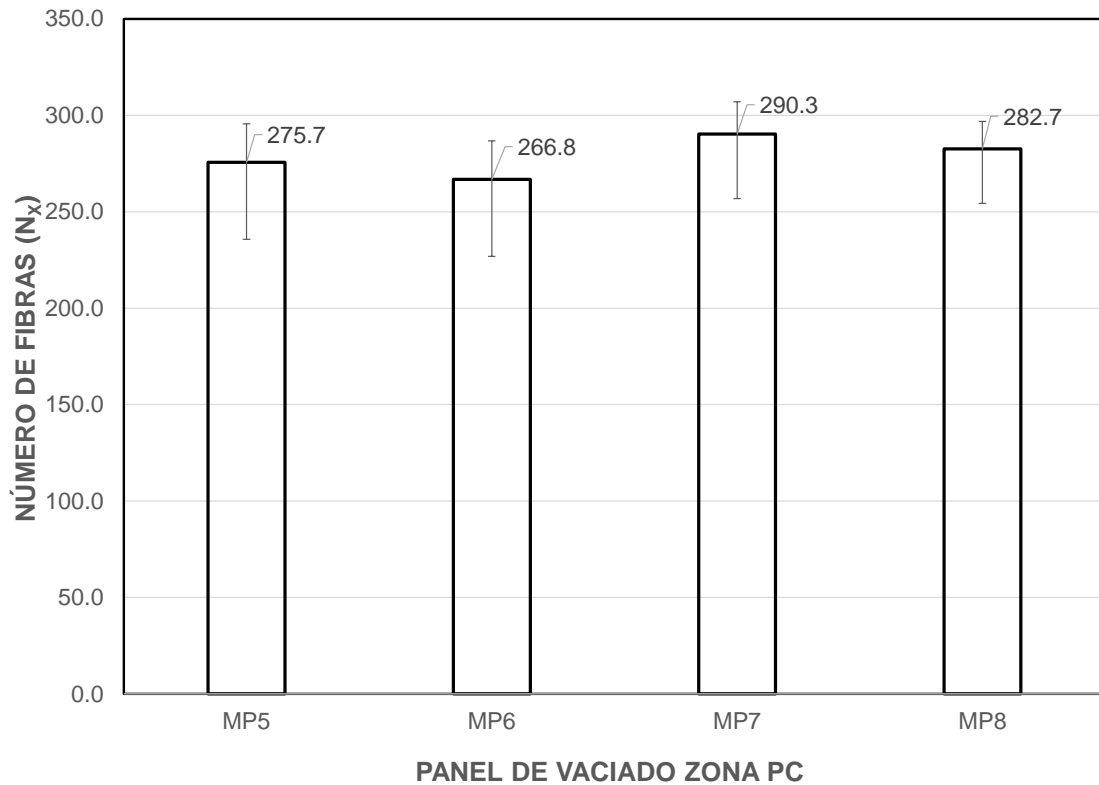


Figura 29. Cantidad de fibra en zona de vaciado PC.

En el gráfico de la Figura 30 se observan los datos obtenidos de las muestras MP9 a MP12 que corresponden a la zona PE. El promedio de las 4 muestras fue 330 fibras. El panel M12 presenta mayor desviación posiblemente por variaciones en las condiciones de vaciado.

La sección de vaciado PE, es la que se encuentra más alejada a la conexión, tiene una densidad de 0.18 fib/mm². Este parámetro mostró también una disminución importante comparada con la zona de vaciado PT pero menor que la zona PC.

Este fenómeno está asociado a la distancia que debe recorrer la fibra en el desplazamiento horizontal al llegar a la conexión, existe una distribución mayor en la zona donde se vacía directamente, por esta razón es posible tener mayor presencia de fibra cuando la zona de vaciado es PT en el panel.

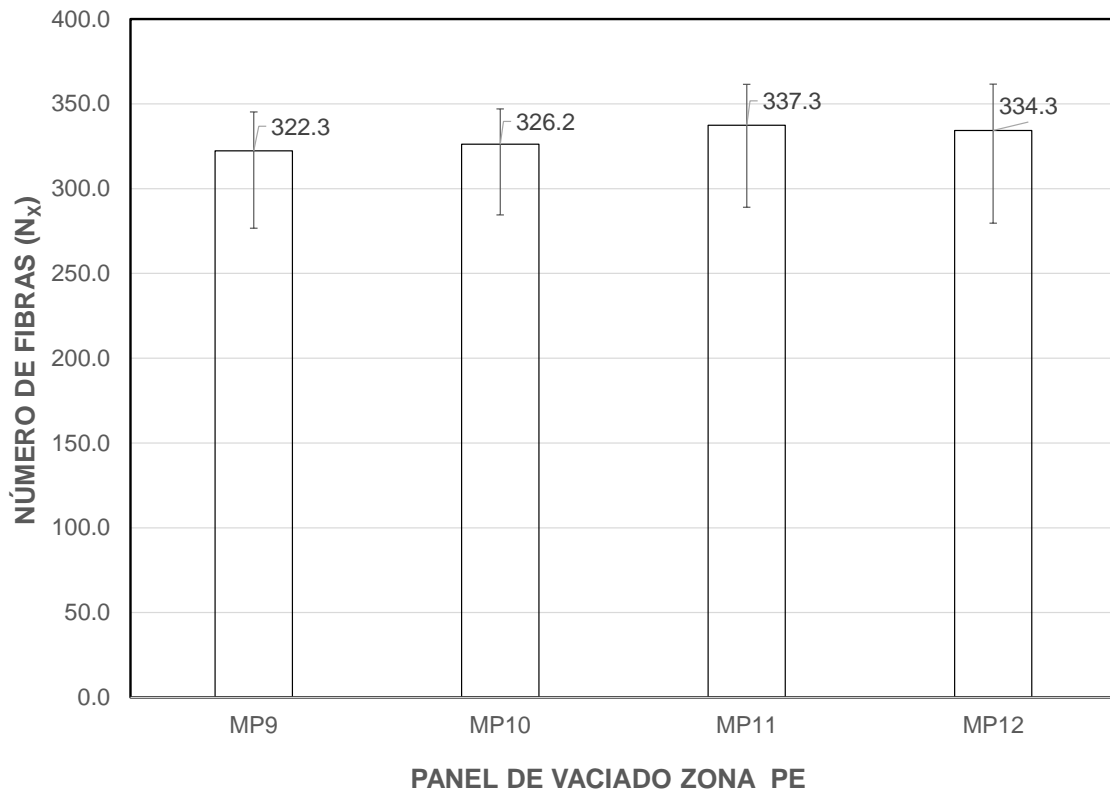


Figura 30. Cantidad de fibra en zona de vaciado PE.

En la Figura 31 se muestran 3 curvas que representan las densidades de fibra cuando se vacía de diferentes zonas el panel, para 4 paneles diferentes. Se presentó una diferencia de densidades de fibra en los vaciados realizados en PT frente a lo encontrado en PC y PE. Mientras que en los vaciados en la zona PT tienen un promedio de 0.25 fib/mm² en PC y PE son de 0.15 y 0.18 fib/mm² respectivamente.

Cuando el UHPFRC tiene el mismo flujo para diferentes paneles la cantidad de fibra dentro de la zona acuosa tiende a dispersarse de manera homogénea, sin embargo, la distancia recorrida hasta el punto donde se deposita debido a la geometría de la formaleta incide en el número de fibras disponibles en la sección, en el caso del punto de conexión existe además una barrera, en esta zona es más apropiado vaciar directamente para evitar largos recorridos de fibras a través del panel.

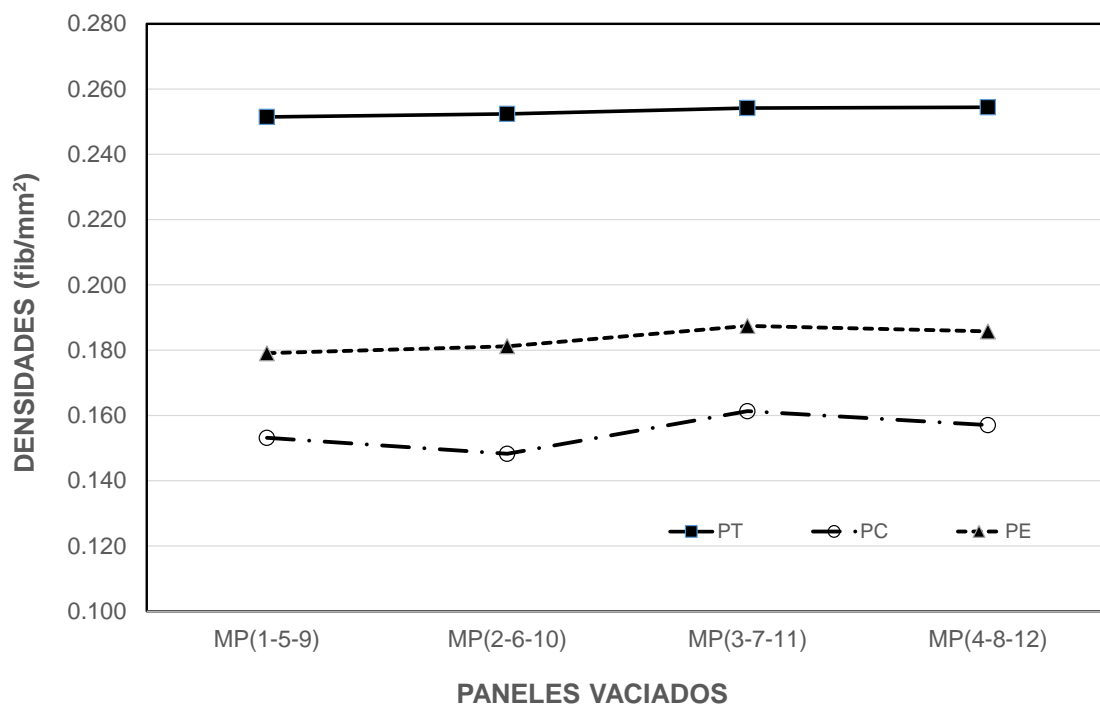


Figura 31. Densidad de fibra en la sección cortada en cada zona de vaciado.

Otro parámetro de conteo fue el factor de transversalidad, el cual está asociado a la cantidad de fibra orientada en el sentido transversal de vaciado del panel comparado con la cantidad de fibra total encontrada en la sección. A este valor lo llamamos **K** y su unidad está en porcentaje (%).

En la Figura 32, se observa que el valor de **K** en la posición PT es mucho mayor, comparado con las zonas de vaciado PC y PE. En PT se obtuvo un promedio de **K**: 79%, en PC de 59% y en PE de 64%, estos valores muestran la diferencia determinante que se presenta en la zona de vaciado más cercana a la conexión.

Según lo concluye (Abrishambaf et al., 2015) las zonas en las que las fibras están orientadas de manera paralela al flujo, el comportamiento a tracción es menor que aquellas en las que las fibras están orientadas de manera transversal. En el caso de la zona de vaciado PT se evidencia mayor presencia de fibras transversales en el corte, lo cual puede ser más apropiado para obtener un mejor comportamiento mecánico en la zona de conexión.

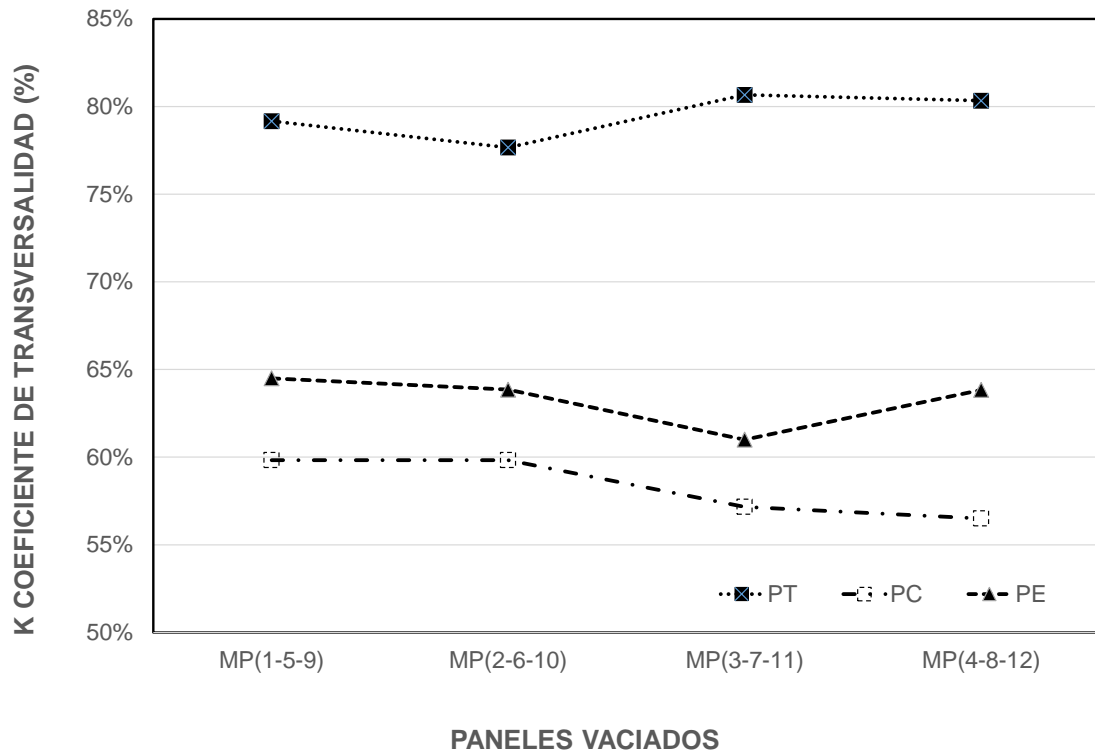


Figura 32. Valores de K en las diferentes zonas de vaciado.

7.2 Comportamiento a compresión y módulo de aplastamiento.

En esta sección el objetivo fue evaluar la resistencia a compresión y módulo de aplastamiento de un panel fabricado con UHPFRC en distintas condiciones de vaciado. El procedimiento de evaluación se describe en la sección 6.3

En el proceso de evaluación mecánica a compresión se ensayaron paneles vaciados en diferentes zonas. Según se observa en la Figura 33, las resistencias a compresión obtenidas de los especímenes extraídos en la zona de vaciado PT, fue en promedio de 106.9 MPa a compresión hasta la falla en la conexión, en la zona PC fue en promedio de 73.94 MPa y en la zona PE fue de 82.8 MPa.

Los valores mostraron importantes diferencias, entre la zona PT frente a PC y PE. Este comportamiento está asociado a la mejor orientación de la fibra en la zona de conexión que se muestra en la Figura 32. Así mismo los valores de desviación estándar en los resultados de resistencia a compresión, cuando el vaciado se efectúa en la zona PT y en la zona PC son bajos y coinciden con datos de desviación para este tipo de fenómeno, los valores encontrados para la zona PE son más altos.

La resistencia a compresión en la zona de conexión está en función de la orientación de la fibra y ésta a su vez está asociada a la zona de vaciado escogida, en este caso la zona PT mostró un mejor desempeño mecánico.

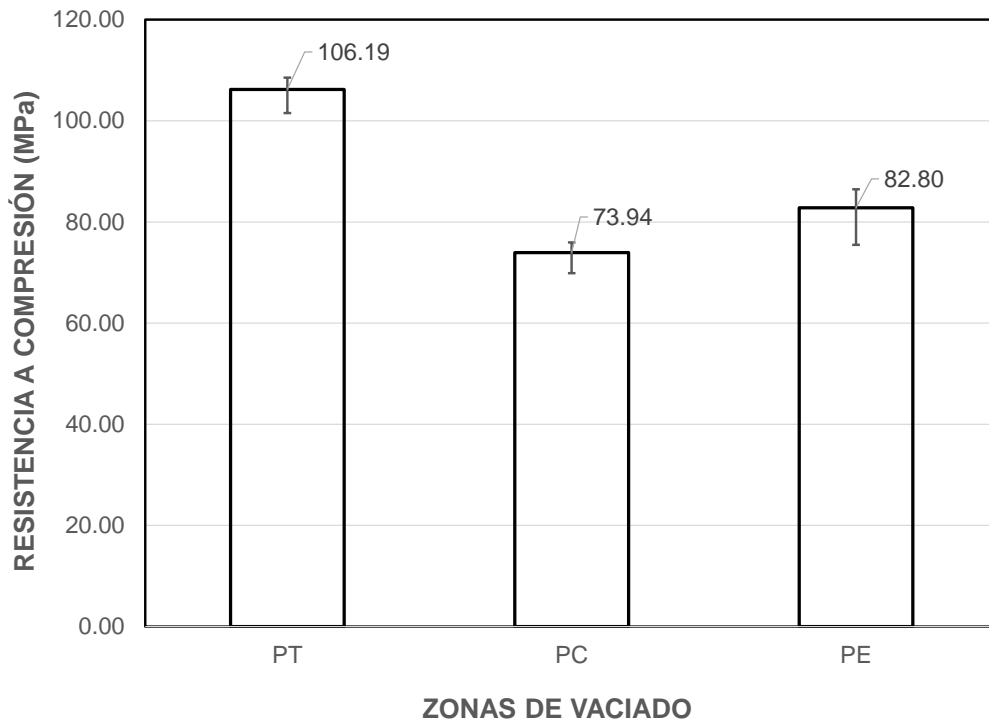


Figura 33. Valores de F_{max} en las zonas de vaciado PT-PC-PE.

Según lo observado en la Figura 34, las evaluaciones mecánicas a compresión de los especímenes que fueron vaciados desde diferentes puntos del panel, se pudo concluir que existe una notoria diferencia entre los valores de resistencia a compresión obtenidos en la zona de vaciado PT y la zona de vaciado PC y PE,

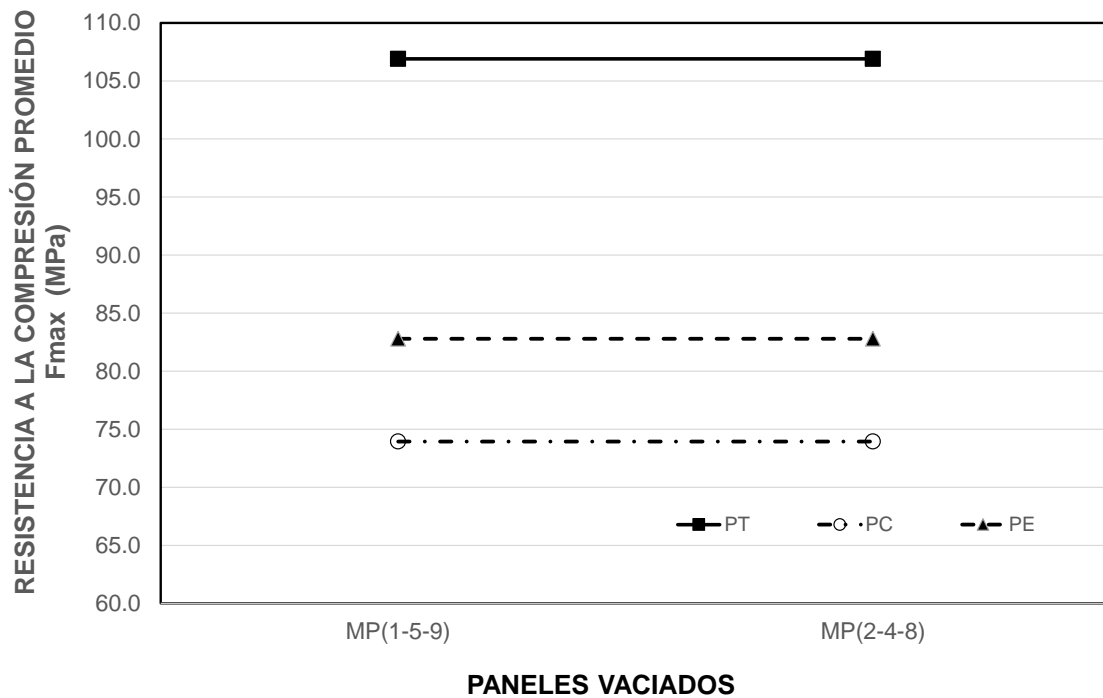


Figura 34. Valores promedio de resistencia a compresión en las diferentes zonas de vaciado.

Para determinar el módulo de aplastamiento se escogió el panel de mayor resistencia a compresión vaciado en la zona PT, de este se evaluaron 5 especímenes. Fueron sometidos a la carga máxima verificando su desplazamiento tal como se explica en la sección 6.3.

En la Tabla 11 se describe la geometría de cada uno de los especímenes fallados, los cuales son nombrados G1 –G2 –G3 –G4 y G5, el espécimen se mostró en la sección 6.2 Figura 25. Adicionalmente en la Tabla 10 se muestra el peso y la masa unitaria del material, con el fin de caracterizarlo antes de proceder con el ensayo de aplastamiento.

Tabla 11. Características de especímenes evaluados en aplastamiento.

Variable	Peso (gr)	L (altura) (mm)	B (Ancho) (mm)	Diámetro (mm)	Espesor (mm)	e (distancia a la testa) (mm)	Volumen (mm ³)	Masa unitaria (kg/m ³)
G1	503.7	106.1	96.6	20.9	20.7	34.4	204981.1	2457.35
G2	502.7	106.5	95.4	21.0	20.7	34.7	203521.7	2470.00
G3	496.9	105.7	96.8	20.7	20.9	32.5	206852.6	2402.12
G4	522.9	107.9	102.0	20.6	20.6	36.5	215405.3	2427.51
G5	482.0	105.1	95.4	22.7	20.1	40.1	193844.1	2486.53

En la Tabla 12 se muestran los resultados de la evaluación de deformación de los 5 especímenes que fueron vaciados desde la zona PT. Las variables son descritas en la sección 6.3. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 25 se realiza el proceso de validación, el objetivo es encontrar k_e , el cual es el parámetro de modulo elástico evaluado en el espécimen con la conexión, esto desarrollado en la gráfica Carga vs deformación.

Tabla 12. Datos de ensayo de aplastamiento.

Variable	Símbolo	Unidad	Valor				
			G1	G2	G3	G4	G5
Deformación en ciclo 1 en 10 % F_{max}	W01	mm	0.218	0.228	0.179	0.201	0.150
Deformación en ciclo 1 en 40 % F_{max}	W04	mm	0.558	0.508	0.633	0.555	0.416
Deformación en fin ciclo 2	W14	mm	0.558	0.508	0.633	0.556	0.439
Deformación en fin ciclo 3	W11	mm	0.311	0.245	0.356	0.335	0.198
Deformación en ascenso de carga final	W21	mm	0.312	0.245	0.356	0.335	0.198
Deformación en ciclo 5 en 40 % F_{max}	W24	mm	0.623	0.652	0.586	0.541	0.422
Deformación en ciclo 5 en 60 % F_{max}	W26	mm	0.901	0.858	0.784	0.740	0.567
Deformación en ciclo 5 en 80 % F_{max}	W28	mm	1.137	1.073	1.126	0.934	0.740
Diámetro del elemento de fijación	d	mm	12.500	12.500	12.500	12.500	12.500
espesor en milímetros	t	mm	20.440	20.720	20.900	20.150	12.800
Fuerza máxima	f_{max}	kN	39.629	48.617	33.259	36.781	32.750
Deformación inicial	w_i	mm	0.558	0.508	0.633	0.555	0.416
Deformación inicial corregida	$w_i \text{ mod}$	mm	0.454	0.373	0.605	0.472	0.355
Fuerza máxima experimental	f_h	kN/mm ²	0.155	0.188	0.127	0.146	0.132
Fuerza máxima estimada	$f_h \text{ est}$	kN/mm ²	0.137	0.135	0.134	0.139	0.141
Deformación elástica	W_e	mm	0.372	0.446	0.337	0.285	0.310
modulo aplastamiento inicial	K_i	kN/mm ³	0.111	0.148	0.080	0.105	0.127
modulo aplastamiento	k_s	kN/mm ³	0.121	0.145	0.089	0.118	0.159
módulo de aplastamiento elástico	k_e	kN/mm ³	0.147	0.121	0.159	0.195	0.183

Se graficó la curva de comportamiento de la carga vs la deformación. En la Figura 35 se muestra el comportamiento del espécimen cargado y su desplazamiento, siguiendo con la rampa propuesta por la norma UNE-EN 383.

En el espécimen G1, se presentó una deformación elástica de 0.372 mm y un módulo de aplastamiento elástico de 0.147 kN/mm³, parámetros que coinciden con el comportamiento asociado a este tipo de materiales fibroreforzados, en especial para restricciones con tornillo. Estos datos coinciden con lo reportado por (Sigrist & Rauch, 2008) para materiales de este tipo, los valores ejercidos en conexiones no tienen reporte en el estado del arte actualmente.

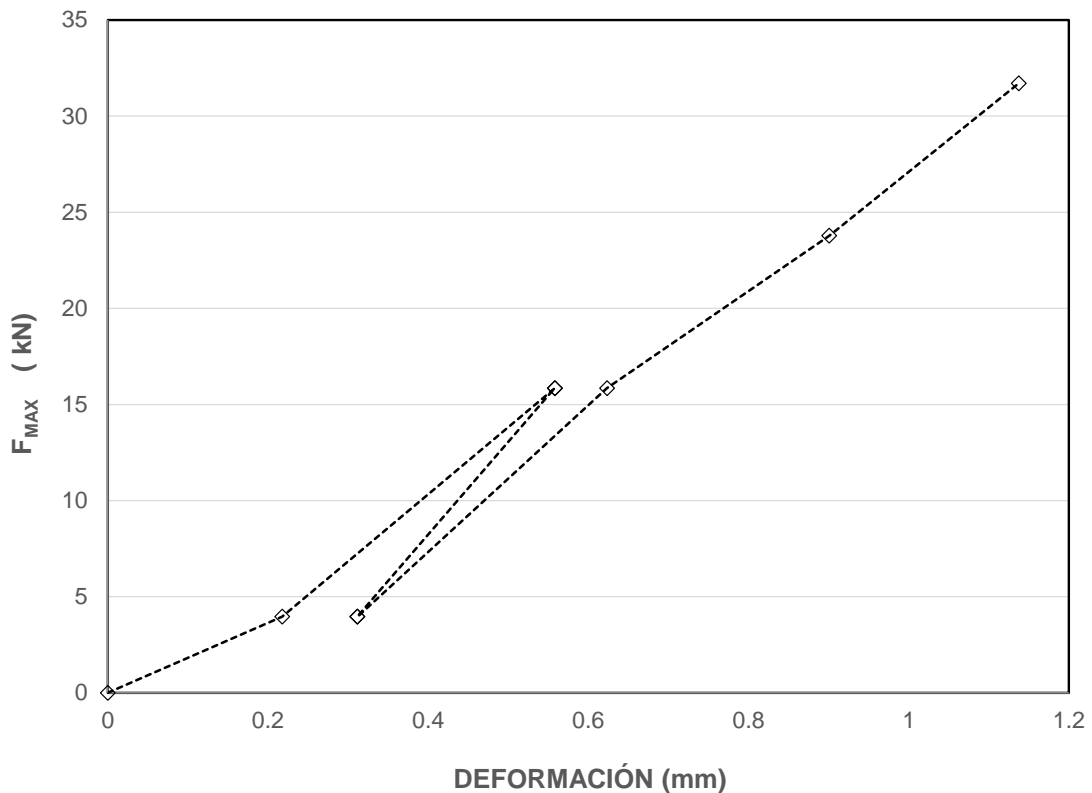


Figura 35. Curva carga – deformación G1.

En el espécimen G2, mostrado en la Figura 36, se presentó una deformación elástica de 0.446 mm y un módulo de aplastamiento elástico de 0.121 kN/mm³. El comportamiento es similar al espécimen G1, el cual obtuvo una resistencia compresión mayor. Adicionalmente en las zonas de la gráfica donde por 30s se mantiene la carga aplicada según Figura 25, no se evidenció una disminución del desplazamiento, sin embargo la deformación al 80% de la carga es de 1 mm, similar al anterior espécimen.

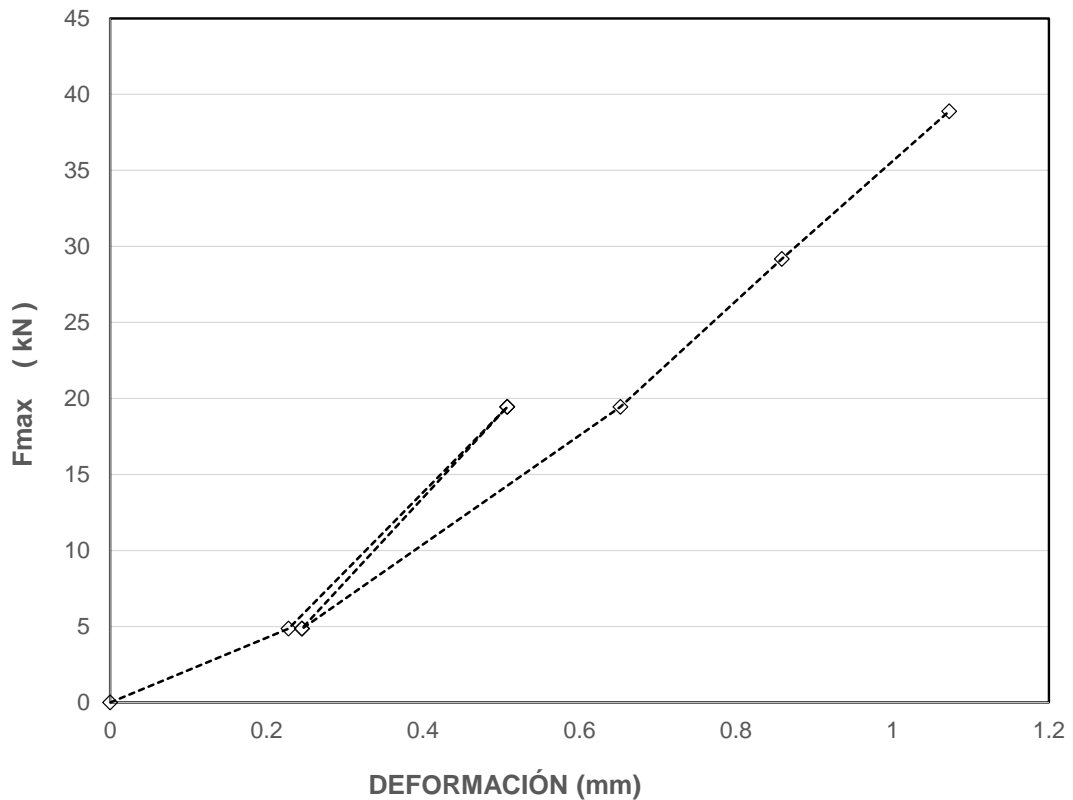


Figura 36. Curva carga – deformación G2.

En el espécimen G3, mostrado en la Figura 37, se presentó una deformación elástica de 0.337 mm y un módulo de aplastamiento elástico de 0.159 kN/mm³. El comportamiento es similar a los especímenes G1 y G2; G3 obtuvo una resistencia compresión menor que los dos anteriores, adicionalmente en las zonas de la gráfica donde por 30s se mantiene la carga aplicada según Figura 25, no se evidenció una disminución del desplazamiento, sin embargo la deformación al 80% de la carga es de 1.12 mm, similar al anterior espécimen.

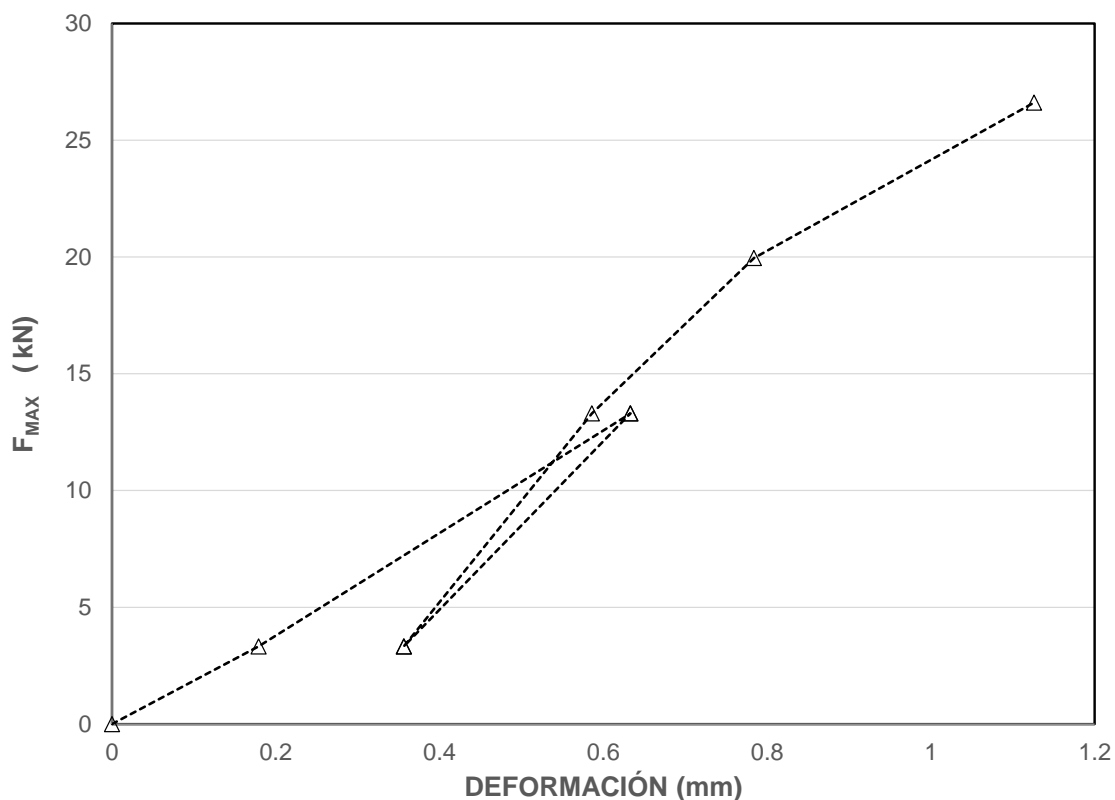


Figura 37. Curva carga – deformación G3.

En el espécimen G4, mostrado en la Figura 38, se presentó una deformación elástica de 0.285 mm y un módulo de aplastamiento elástico de 0.195 kN/mm³, el comportamiento es sutilmente menor que los anteriores especímenes, adicionalmente en las zonas de la gráfica donde por 30s se mantiene la carga aplicada según Figura 25. Procedimiento para el ensayo de aplastamiento en dispositivo con perno. Se evidenció una disminución del desplazamiento, también la deformación al 80% de la carga es de 0.934 mm, similar a las anteriores muestras.

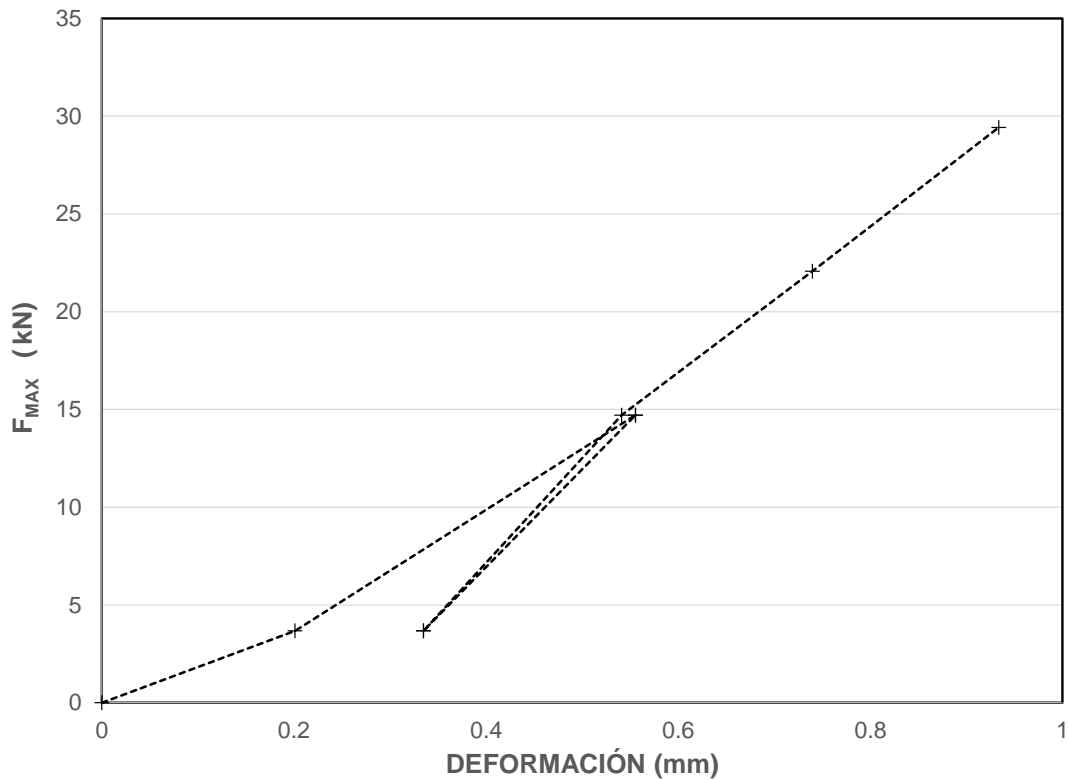


Figura 38. Curva carga – deformación G4.

En el espécimen G5, mostrado en la Figura 39, se presentó una deformación elástica de 0.310 mm y un módulo de aplastamiento elástico de 0.183 kN/mm³, el comportamiento es sutilmente menor que los anteriores especímenes, adicionalmente en las zonas de la gráfica donde por 30s se mantiene la carga aplicada según Figura 25. Procedimiento para el ensayo de aplastamiento en dispositivo con perno. Se evidenció una disminución del desplazamiento, también la deformación al 80% de la carga es de 0.7 mm, menor que los anteriores.

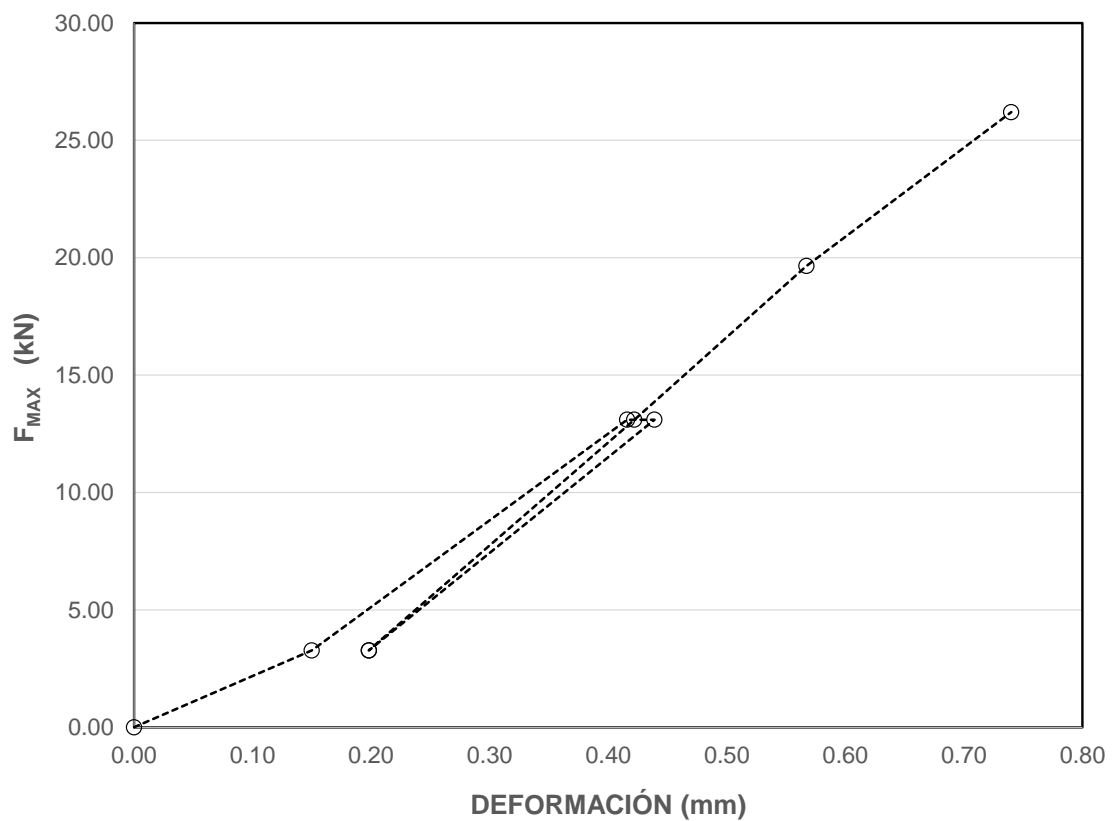


Figura 39. Curva carga – deformación G5.

El comportamiento en la deformación es similar en cada espécimen, la carga máxima coincide con la resistencia a compresión evaluada para estos materiales y los desplazamientos en las zonas de conexión evaluados en diferentes cargas, muestran ductilidad del material, pues el concreto posee esfuerzo adicional después de la primera fisura.

7.3 Incidencia de la cantidad y orientación de la fibra en la resistencia a compresión y el módulo de aplastamiento.

Se realizó el comparativo de la cantidad de fibras y su orientación, con los resultados encontrados en la resistencia a compresión en los diferentes paneles, este análisis fue determinante para encontrar una relación entre estas variables en una conexión atornillada.

En la Figura 40, se muestra la relación entre el número de fibras que se encontraron en una sección cortada y la resistencia a compresión de un espécimen con tornillo en la sección de vaciado PT.

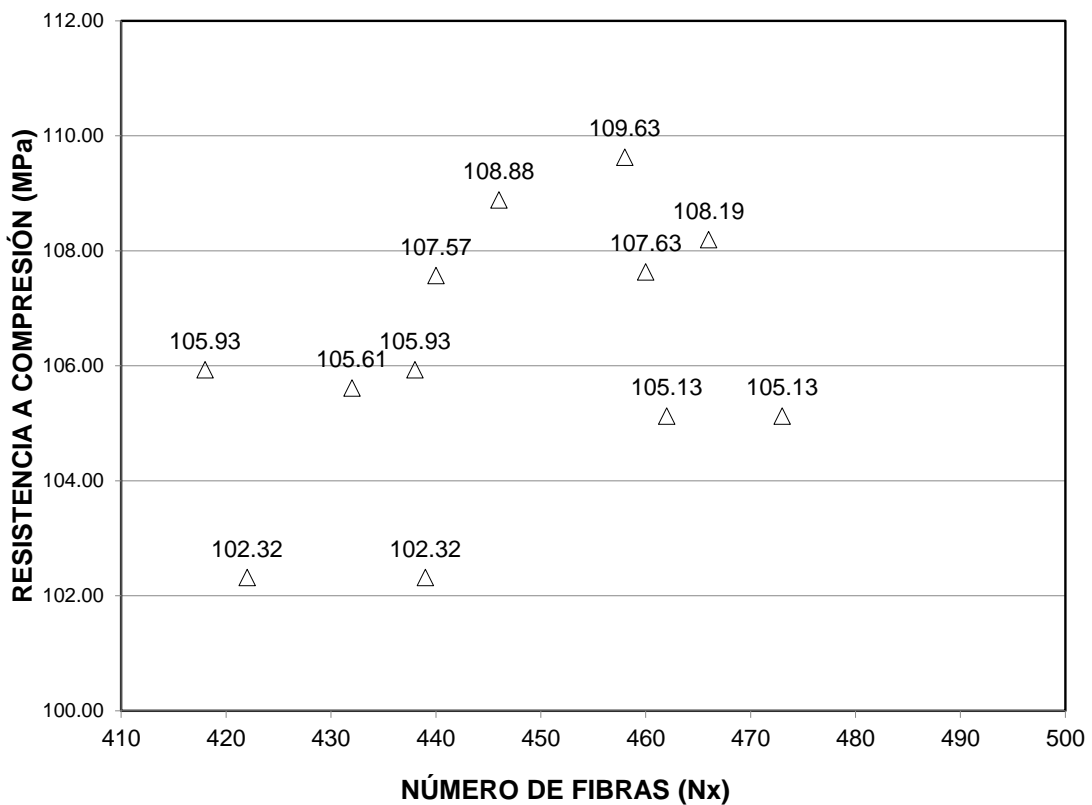


Figura 40. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PT).

En la Figura 41, se muestra la relación entre el número de fibras que se encontraron en una sección cortada y la resistencia a compresión de un espécimen con tornillo en la sección de vaciado PC. Se observan valores entre 78 y 88 MPa para una cantidad de fibra menor que la encontrada en la sección PT, no existe una relación entre las variables, el resultado es más una nube de puntos que una descripción de un fenómeno.

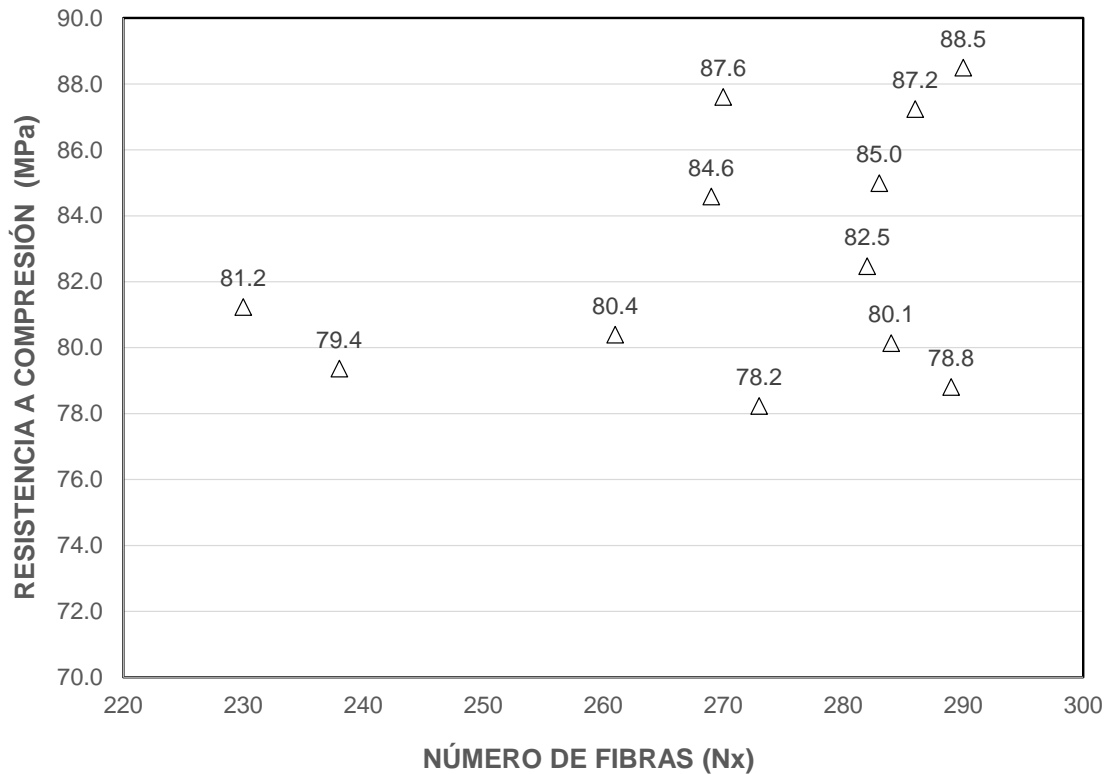


Figura 41. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PC).

En la Figura 42, se muestra la relación en la sección de vaciado PC, donde se observan valores entre 70 y 78 MPa para una cantidad de fibra menor que la encontrada en la sección PT y muy similar a lo encontrado en PC.

Aunque existe una diferencia entre las zonas de vaciado, no es posible describir un comportamiento a compresión comparado con la cantidad de fibras según la zona de vaciado.

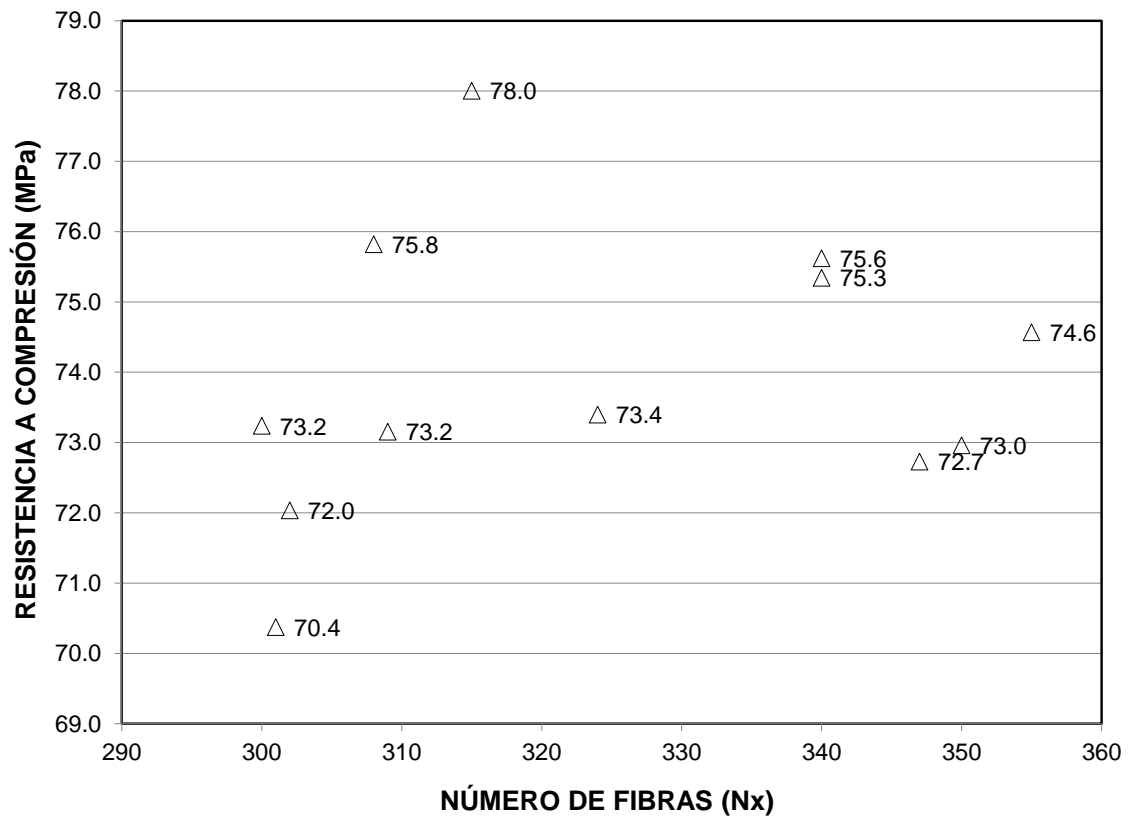


Figura 42. Curva Resistencia a compresión vs Número de fibras (PE).

Para establecer una relación adecuada entre las zonas de vaciado y estos dos parámetros, es necesario identificar la relación que existe entre el coeficiente de orientación K y la resistencia a compresión del espécimen.

En la Figura 43 se muestra la relación entre la constante K de transversalidad y la resistencia a compresión del espécimen en la zona de vaciado PT, donde es evidente que para un porcentaje superior al 70% existe un valor de resistencia a compresión mayor en los demás especímenes.

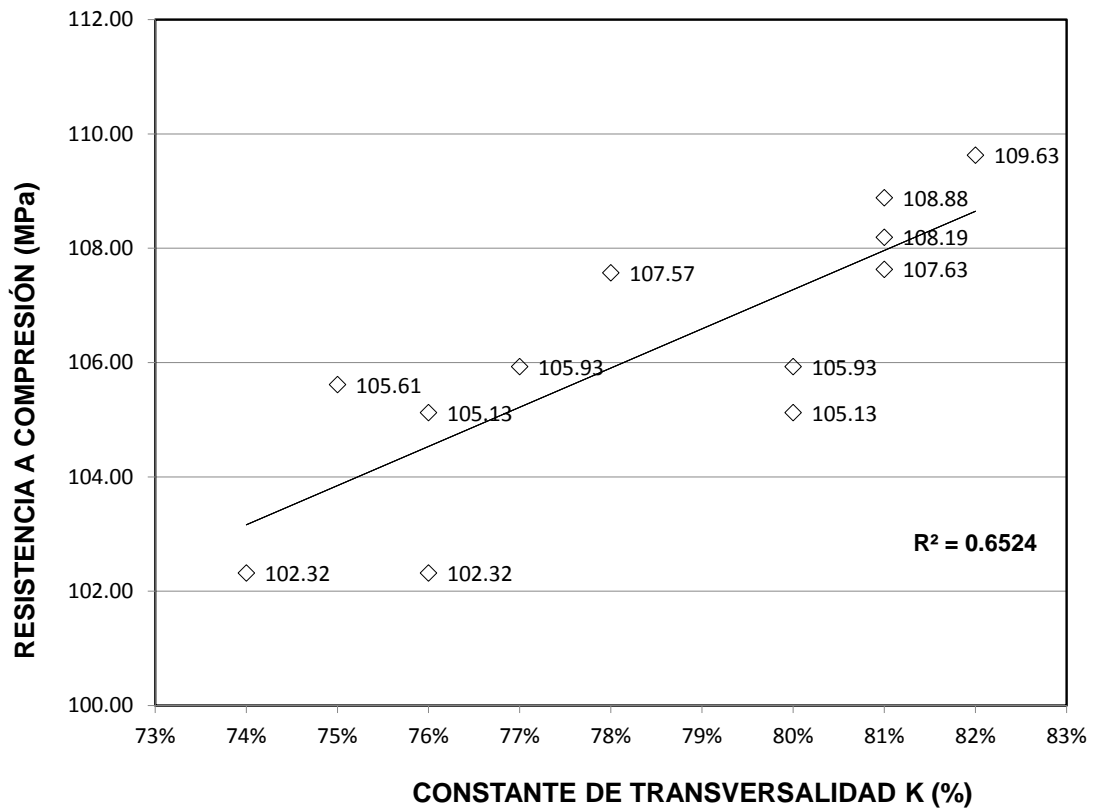


Figura 43. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PT).

En la Figura 44 se muestra la relación entre la constante K de transversalidad y la resistencia a compresión del espécimen en la zona de vaciado PC. En esta zona de vaciado el factor K está entre 50% y 70% y el comportamiento a compresión es menor que lo encontrado en la zona de vaciado PT.

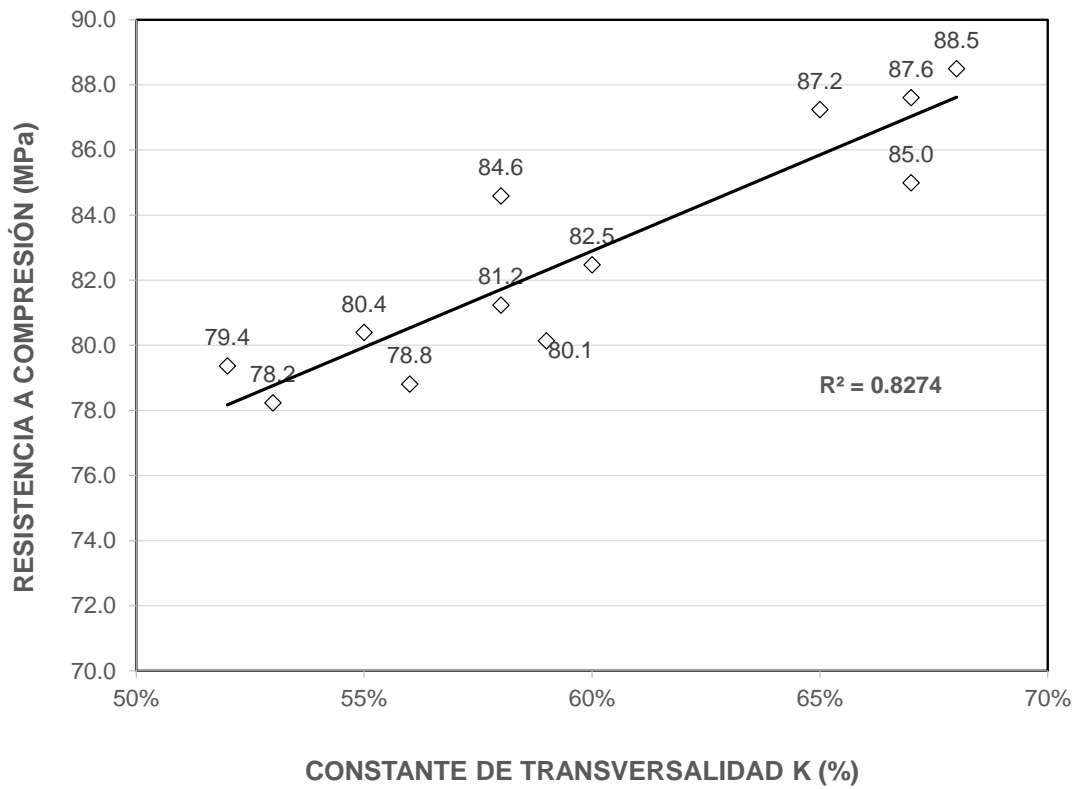


Figura 44. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PC).

En la Figura 45 se muestra la relación en la zona de vaciado PE, en esta zona de vaciado el factor K esta entre 60% y 68%, el comportamiento a compresión es menor que lo encontrado en la zona de vaciado PT con una variación menor a lo encontrado en la sección de vaciado PC.

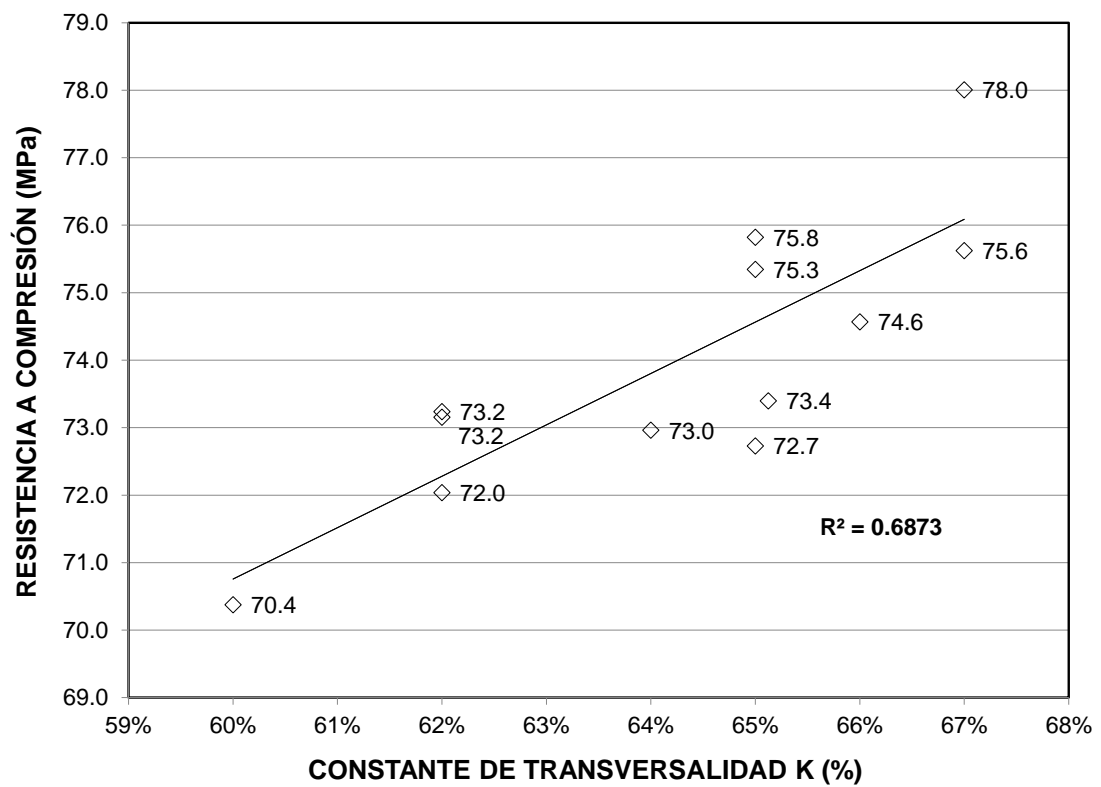


Figura 45. Curva Resistencia a compresión vs Constante de transversalidad K (PE).

Los valores de cada relación mostraron una marcada diferencia de comportamiento mecánico entre la orientación de la fibra en las zonas de vaciado PT comparado con las otras dos zonas de vaciado, así mismo se conserva una relación directa con el comportamiento mecánico evaluado en el espécimen.

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

Esta investigación tuvo como objetivo general evaluar la incidencia que tiene la orientación de la fibra metálica en el comportamiento mecánico de la zona de conexión, de un panel fabricado con concreto de ultra alto desempeño UHPFRC.

De los resultados obtenidos, respecto al efecto que tuvo el flujo de vaciado en la cantidad y orientación de la fibra, se puede concluir:

1. La zona para el vaciado del UHPFRC en un panel incide directamente en la cantidad y la posición de la fibra en la conexión. Cuando se vació en la zona PT la cantidad de fibra fue mayor que la encontrada en las otras dos zonas de vaciado.
2. La orientación de la fibra también depende de la zona donde se vacía el material. Cuando el proceso se realizó en la zona PT, se obtuvo una mejor orientación de la fibra, aunque se distribuye de manera homogénea conservando el flujo, en zonas más alejadas respecto a la conexión, su dispersión tiende a ser mayor.

Con relación al comportamiento mecánico, específicamente la resistencia a compresión y el módulo de aplastamiento de los distintos paneles, se puede concluir:

3. Se encontró que existe una relación directa entre el comportamiento a compresión y la cantidad y orientación de la fibra en la zona de conexión del panel. La capacidad de los paneles a los esfuerzos a compresión es hasta un 30% mayor en las zonas de vaciado PT comparado con las otras zonas.
4. La resistencia a compresión en la zona de conexión varía cuando el panel es vaciado en una zona alejada, pues existe una mejor orientación de la fibra si esta no tiene desplazamientos en el panel.
5. El módulo de aplastamiento es alto en la zona de conexión y se conserva al compararse con el material en una probeta convencional para los paneles vaciados desde la zona PT.

6. El material conserva su comportamiento dúctil, pues después de la primera fisura continúa soportando carga y se evidencia el desarrollo de deformación en presencia de la fibra.
7. Aunque se conoce que la geometría es determinante para el comportamiento de la conexión, el material juega un papel importante en la caracterización mecánica de la misma. En los materiales fibro-reforzados es fundamental seleccionar la zona de vaciado para tener una mejor conexión y maximizar el comportamiento de la misma frente a la carga.
8. La cantidad de fibra en la zona de conexión no es determinante en la resistencia a compresión sin embargo, el factor K de orientación de fibra si influye en este parámetro.

8.2 Recomendaciones

1. En esta investigación se lograron identificar algunos parámetros que ayudan a seleccionar cuál es la mejor zona para vaciar un panel cuando existen conexiones atornilladas, sin embargo existen todavía incógnitas frente al comportamiento del material cuando se varia el flujo del UHPRFC, pues de este depende la cantidad y la posición de la fibra en cada sección de panel.
2. Así mismo existen oportunidades de investigación en el comportamiento a tracción directa del panel en la zona de conexión, este esfuerzo es muy determinante y no existen resultados en el estado del arte que puedan definir el fenómeno de manera clara.
3. El parámetro de módulo de aplastamiento debe evaluarse con mayor detalle para diferentes geometrías del espécimen, pues de estas depende el comportamiento en la conexión atornillada. En esta investigación sólo se muestran resultados de una geometría específica, tener más resultados en este sentido ayudaría a entender el comportamiento mecánico completo de una conexión fabricada en UHPRFC.
4. Existen innumerables caminos para recorrer en el análisis del comportamiento de la conexión atornillada en un panel vaciado con UHPRFC, compararlo con materiales como la madera, el acero o materiales poliméricos, podría ser interesante para tener resultados útiles en la construcción de sistemas constructivos como el de fachadas.

9 BIBLIOGRAFÍA.

- Abrishambaf, a., Cunha, V. M. C. F., & Barros, J. a. O. (2015). The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Frattura Ed Integrità Strutturale (Fracture and Structural Integrity)*, 31, 38–53. <http://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.31.04>
- Camacho E. (2013). Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties.
- Camacho T. Esteban. (2013). Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties - [Thesis]. *Tesis Universidad Politecnica de Valencia*, 1–276.
- Cristina Bayo P. (2011). Projecte O Tesina D ' Especialitat. *Universidad Politecnica de Cataluñade Cataluña*, 1–59.
- Echavarria A. (2015). Conexiones con múltiples perforaciones en materiales ortotrópicos. *Universidad Nacional de Colombia*, 1, 1–62.
- Ferrara L. (2008). High Mechanical performance of fiber cementitious composites. High Performance Fiber reinforced Cement Composites 7 Internactional RILEM.
- Graybeal B. (2014). State of art report on Ultra High Performance Concrete (UHPC). *Constructii*, (1), 63–70.
- Instituto Español Del Cemento. (2008). Montaje de fachadas de hormigón arquitectónico. *Montaje de Fachadas de Hormigon*, 1, 22.
- Japan Society of Civil Engineers. (2008). Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). *Concrete Engineeering Series*, 82, Testing Method 6-10. Retrieved from <http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/index.html>

- Kang, S. T., Lee, B. Y., Kim, J.-K., & Kim, Y. Y. (2011). The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2450–2457. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.057>
- Kim, S. W., Kang, S. T., Park, J. J., Ryu, G. S., & Fehling, E. (2008). Effect of Filling Method on Fibre Orientation & Dispersion and Mechanical Properties of UHPC. *2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
- Lohaus, L., Range, P., & Fehling, E. (2008). Robustness of UHPC - A New Approach for Mixture Proportioning. *2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
- Makita, T., & Brühwiler, E. (2014). Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC). *International Journal of Fatigue*, 59, 145–152. <http://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.09.004>
- Maya, L. F., & Graybeal, B. (2016). Fiber Orientation distribution and tensile mechanical response in UHPFRC. FHWA.
- Maya, L., & Graybeal, B. A. (2016). Fiber Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC. *First International Interactive Symposium on UHPC – 2016 Fiber Reinforcement Influence on the Tensile Response of UHPFRC Fiber*, 1–10.
- Naaman, A. (2009). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites: Classification and Applications. *CBM-CI International Workshop, Karachi, Pakistan*, 1(1), 389–401. <http://doi.org/978-969-8620-06-6>
- Park, J. J., Kang, S. T., Koh, K. T., Kim, S. W., & Fehling, E. (2008). Influence of the Ingredients on the Compressive Strength of UHPC as a Fundamental Study to Optimize the Mixing Proportion. *2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.
- Perry, A. V. H. V., & Eng, P. (2016a). “ An Innovative Technology for Accelerated Bridge Construction – The Owner Designer Dilemma .” *First International*

- Interactive Symposium on UHPC – 2016*, (Vic), 1–8.
- Perry, A. V. H. V., & Eng, P. (2016b). The First North American Broad Based Structural Design Guide on UHPC – ACI 239C. *ACI Structural Journal*, (Vic), 1–8.
- Russel, G. H., & Graybeal, B. a. (2013). Ultra-High Performance Concrete : A State-of-the-Art Report for the Bridge Community. *FHWTA-HRT*, (June), 171.
- Sigrist, V., & Rauch, M. (2008). Deformation behavior of reinforced UHPFRC elements in tension. *Tailor Made Concrete Structures: New Solutions for Our Society*, 1196.
- Springer J. (2008). Shear strength of. High Performance Fiber reinforced Cement Composites 7 Internactional RILEM.
- Yoo, D.-Y., Kang, S.-T., & Yoon, Y.-S. (2014). Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC. *Construction and Building Materials*, 64, 67–81. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.007>

10 ANEXO.

Algoritmo para análisis de imágenes en MatLab.

```
%Leer multiples archivos y analizarlos
myFolder = 'C:\Motic\Motic Images Plus 2.0\Capture Folder'; %nombre de la
carpeta
If ~isdir(myFolder) %comprueba que lo que le puse es una carpeta y existe
  errorMessage = sprintf('Error: The following folder does not exist:\n%s',
myFolder);
  uiwait(warndlg(errorMessage));
  Return;
end
filePattern = fullfile(myFolder, '*.jpg'); % Patron de nombre de las imagenes.
theFiles = dir(filePattern); %Listar los archivos
theFiles = nestedSortStruct(theFiles, 'date'); %con la funcion nestedSortStruct,
organiza los archivos por fecha
result = cell(0,2);
%Lectura de cada archivo
for k = 1 : length(theFiles)
  baseFileName = theFiles(k).name;
  fullFileName = fullfile(myFolder, baseFileName);

  %Análisis de cada imagen
  I=imread(fullFileName); %Binarización de la imagen: lee la imagen
  I=I(:,:,3); %saca las componentes RGB de la imagen
  I=imfill(I); %borra los poros
  NO_POROS=imcomplement(I);

  T=70; %la binarizamos: se saca el thr apartir del histograma
  BW=im2bw(NO_POROS,(T/255)); %se binariza la imagen usando
método heurístico
  BW=~BW;

  px=170;%quitamos el ruido (puntos muy pequeñitos)
  BW=bwareaopen(BW,px,4);

  CC=bwconncomp(BW,4); %detectamos objetos, conectando pixeles con
conectividad 4
```



```

s=regionprops(CC,'Eccentricity','Area','Centroid','Orientation','MajorAxisLength','
MinorAxisLength'); %Propiedades de la imagen
objetos=length(s); %numero de objetos en cada imagen
% % Recreación de las elipses en la imagen
% figure;
% imshow(BW);
% phi = linspace(0,2*pi,50);
% cosphi = cos(phi);
% sinphi = sin(phi);
% hold on
% for i = 1:length(s)
%     xbar = s(i).Centroid(1);
%     ybar = s(i).Centroid(2);
%
%     a = s(i).MajorAxisLength/2;
%     b = s(i).MinorAxisLength/2;
%
%     theta = pi*s(i).Orientation/180;
%     R = [ cos(theta) sin(theta)
%          -sin(theta) cos(theta)];
%
%     xy = [a*cosphi; b*sinphi];
%     xy = R*xy;
%
%     x = xy(1,:) + xbar;
%     y = xy(2,:) + ybar;
%
%     plot(x,y,'g','LineWidth',1);
% end
% hold off
% par=S(2:2:length(S));
% impar=S(1:2:length(S));
% Clasificación de los objetos
h=0;
v=0;
u=2.5;
% hold on
for i = 1:length(s);
    R=s(i).MajorAxisLength/s(i).MinorAxisLength;
    if R > u ;
        h=h+1;
    else
        v=v+1;
    end
end
% hold off

```

```
S(k)=struct('file',fullFileName,'objetos',objetos,'Horizontales',h,'Verticales',v);  
%convertir resultados en estructura  
    t = struct2table(S);  
    writetable(t, 'Resultados.xlsx');  
end
```