

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO
DE VIGAS USANDO ULTRA-HIGH PERFORMANCE
REINFORCED CONCRETE (UHPFRC)

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO
DE VIGAS USANDO CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO REFORÇADO COM FIBRAS (CUADRF)

Rosangel Rojas Agüero

Porto Alegre
2019

ROSANGEL ROJAS AGUERO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO
DE VIGAS USANDO ULTRA HIGH PERFORMANCE
FIBER REINFORCED CONCRETE (UHPFRC)**

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO
DE VIGAS USANDO CONCRETO DE ULTRA-ALTO
DESEMPENHO REFORZADO COM FIBRAS (CUADRF)**

Teses de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Américo Campos Filho
Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre
2019

ROSANGEL ROJAS AGUERO

**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO
DE VIGAS USANDO ULTRA HIGH PERFORMANCE
FIBER REINFORCED CONCRETE (UHPFRC)**

Esta tese de doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA, na área de ESTRUTURAS, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2019

Américo Campos Filho

Dr. pela Universidade de São Paulo
Orientador

Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Ph.D. pela Leeds University, UK
Orientador

Nilo Cesar Consoli

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Eduardo Bittencourt (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Julio Florez López (UNILA)

Dr. pela Universidade de Paris VI Pierre et Marie Curie, France

Mauro de Vasconcellos Real (FURG)

Dr. pela Universidade Federal do
Rio Grande do Sul

RESUMEN

ROJAS, R. **Estudio experimental y numérico de vigas usando Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**. 2019. 251 p. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área Estruturas, PPGEC-UFRGS, Porto Alegre.

El Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) es una clase de material cementicio con alta resistencia y durabilidad. Presenta comportamiento dúctil bajo esfuerzos de tracción debido a la presencia de fibras, las cuales pueden proveer o no comportamiento de endurecimiento por deformación en la curva esfuerzo-deformación. El comportamiento constitutivo del UHPFRC en compresión y tracción uniaxial fue definido considerando directamente la data experimental. Valores superiores a 150 MPa y 48 GPa fueron obtenidos para la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad respectivamente. En tracción uniaxial, los valores promedio de resistencia estuvieron en el rango de (8-9) MPa y el módulo de elasticidad en el rango de (36 a 48) GPa. Curvas de esfuerzo vs abertura de la muesca en flexión fueron definidas usando análisis inverso, los valores de la abertura de la muesca se transformaron en deformación unitaria usando relaciones en función de la longitud característica. Las curvas de esfuerzo vs abertura de la muesca fueron validadas utilizando la energía de fractura y las curvas constitutivas del comportamiento fueron validadas usando el Método de los Elementos Finitos. Buenas aproximaciones del problema real fueron obtenidas en el modelaje computacional usando el programa ANSYS. El elemento SOLID65 permitió simular las fibras en forma distribuida dentro de la matriz de concreto. El elemento SOLID185 junto al material CAST, permitieron simular el UHPFRC como un material homogéneo, incluyendo las leyes constitutivas del material en la entrada de datos. Finalmente podemos concluir que el UHPFRC desarrollado en esta pesquisa es diferenciado de otros productos porque presenta un proceso simple de fabricación, sin necesidad de utilizar elaborados y demorados procesos de molienda para el empaquetamiento de partículas. Además, incluye en su composición residuos industriales, que clasifican al material como una mezcla sustentable. Las propiedades mecánicas de concretos con ultra alto desempeño son atingidas con una mezcla que posee tixotropía, característica que abre una gama de posibilidades de aplicación en situaciones extremas, donde la flexibilidad arquitectónica, el tiempo y tipo de colocación rigen la factibilidad de la obra.

Palabras-clave: UHPFRC, experimental, compresión, tracción, elementos finitos, ANSYS.

RESUMO

ROJAS, R. **Estudo experimental e numérico de vigas usando Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras (CUADRF)**. 2019. 251 p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área Estruturas, PPGEC-UFRGS, Porto Alegre.

O Concreto com Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibra (CUADRF) é um tipo de material cementício com alta resistência e durabilidade. Possui comportamento dúctil sobre tensão de tração devido à presença de fibras, que podem ou não fornecer comportamento de endurecimento por deformação na curva tensão-deformação. O comportamento constitutivo do CUADRF na compressão e tração uniaxial foi definido diretamente considerando os dados experimentais. Valores superiores a 150 MPa e 48 GPa foram obtidos para resistência à compressão e módulo de elasticidade, respectivamente. Na tração uniaxial, os valores médios de resistência estavam na faixa de (8-9) MPa e o módulo de elasticidade na faixa de (36 a 48) GPa. As curvas de tensão versus a abertura da trinca foram definidas usando análise inversa, os valores da abertura da trinca foram transformados em deformação unitária usando relações baseadas no comprimento característico. As curvas tensão versus abertura da trinca foram validadas usando a energia de fratura e as curvas de comportamento foram validadas pelo Método dos Elementos Finitos. Boas aproximações do problema real foram obtidas na modelagem computacional usando o programa ANSYS. O elemento SOLID65 permitiu simular as fibras na forma distribuída dentro da matriz de concreto. O elemento SOLID185, juntamente com o material CAST, permitiu a simulação do CUADRF como um material homogêneo, incluindo as leis constitutivas do material na entrada de dados. Finalmente, podemos concluir que o CUADRF desenvolvido nesta pesquisa se diferencia de outros produtos, pois apresenta um processo de fabricação simples, sem o uso de demorados processos de moagem para o empacotamento de partículas. Também, inclui na sua composição, resíduos industriais, que classificam o material como uma mistura sustentável. As propriedades mecânicas do concreto com ultra-alto desempenho são obtidas com uma mistura que possui tixotropia, um recurso que abre uma gama de possibilidades de aplicação em situações extremas, onde a flexibilidade arquitetônica, o tempo e o tipo de colocação governam a viabilidade do trabalho.

Palavras-chave: CUADRF, experimental, compressão, tração, elementos finitos, ANSYS.

ABSTRACT

ROJAS, R. **Experimental and numerical study of beams using Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**. 2019. 251 p. PhD Thesis in Civil Engineering. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Estruturas, PPGEC-UFRGS, Porto Alegre.

Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) is a type of cementitious material with high strength and durability. It has ductile behavior under tensile stress due to the presence of fibers, in which it is possible to find deformation hardening behavior in the stress-strain curve. The constitutive behavior of UHPFRC in compression and uniaxial traction was defined directly considering the experimental data. Values greater than 150 MPa and 48 GPa were obtained for compressive strength and elastic modulus respectively. In uniaxial traction, the average resistance values were in the range of (8-9) MPa and the modulus of elasticity in the range of (36 to 48) GPa. Stress vs notch width curves were defined using inverse analysis, notch width values were transformed into strain using relationships based on characteristic length. The stress vs. notch width curves were validated using fracture energy and the behavioral curves were validated using the Finite Element Method. Models and experiments showed good agreement, using the ANSYS program. The SOLID65 element allowed simulating the fibers in distributed form within the concrete matrix. The SOLID185 element, together with the CAST material, allowed the simulation of the UHPFRC as a homogeneous material, including the constituent laws of the material in the INPUT. Finally, we can conclude that the UHPFRC developed in this research is differentiated from other products because it presents a simple manufacturing process, without using elaborate and delayed grinding processes for particle packaging. It also includes in its composition industrial waste, which classifies the material as a sustainable mixture. The mechanical properties of concrete with ultra-high performance are achieved with a mixture that is thixotropic, a feature that opens a range of application possibilities in extreme situations, where architectural flexibility, time and type of placement govern the feasibility of the work.

Keywords: UHPFRC, experimental, compression, tensile, bending, bond, finite elements, ANSYS.

LISTA DE NOTACIONES Y SIMBOLOS

CUADRF:	Concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras.
UHPRFC:	Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete.
FRC:	Fiber Reinforced Concrete.
w/c:	Relación water/cement o agua/cemento.
GGBS:	Ground Granulate Blast-furnace Slag o scoria de alto horno.
FCM:	Fictitious Crack Model o Modelo de la Grieta Ficticia.
MDF:	Macro Defect Free.
DSP:	Densified Systems Particles.
SIFCON:	Slurry Infiltrated Fibered Concrete.
RPC:	Reactive Powder Concrete.
SCC:	Self Compacting Concrete.
HPC:	High Performance Concrete.
HPFRCC:	High Performance Fiber Reinforced Cement Composite.
AFGC:	Association Française de Génie Civil.
TSH:	Tensile Strain Hardening.
TSS:	Tensile Strain Softening.
w/b:	Relación water/binder o agua/aglomerante.
CMOD:	Crack Mouth Opening Displacement.
f _{cm} :	Resistencia a la compresión promedio.
f _{ck} :	Resistencia a la compresión característica.
f _c :	Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.
f _{cmáx} :	Resistencia a la compresión máxima a los 28 días de curado.
E:	Módulo de elasticidad.
f _{ct,e} :	Resistencia a la tracción elástica según la AFGC.
σ _f :	Esfuerzo a tracción según la AFGC.
ω:	Ancho o abertura de la muesca.
ε:	Deformación unitaria.
F:	Fuerza aplicada.
δ:	Deflexión
GF:	Energía de fractura.
SF:	Silica Fume o humo de sílice.
SS:	Silica Sand o arena de sílice.
CTT:	Con Tratamiento Térmico.
STT:	Sin Tratamiento Térmico.
CP:	Cuerpo de prueba
CP-5:	Cuerpo de prueba cilíndrico con 5 cm de diámetro y 10 cm de altura.
CP-7,5:	Cuerpo de prueba cilíndrico con 7,5 cm de diámetro y 15 cm de altura.
POT:	Pull Out Test o teste de arrancamiento.
τ _b :	Resistencia a la adherencia de la barra dentro de la matriz de UHPRC
F _{tb} :	Fuerza máxima de tracción aplicada a la barra empotrada en la matriz
r:	Radio de la barra (db/2)
l:	Trecho adherente de la barra (5db)
db:	Diámetro de la barra
F _{tub} :	Fuerza máxima a tracción uniaxial soportada por la barra.
f _{tub} :	Esfuerzo máximo de tracción uniaxial soportada por la barra.
ld:	Longitud de desarrollo
AI:	Análisis Inverso.

lc:	Longitud característica.
fst:	Resistencia a la tracción directa de la matriz.
a, h:	Altura de la muesca y altura de la viga.
INPUT:	Entrada de datos.
OUTPUT:	Salida de datos.
ω_0 :	Ancho de la muesca cuando la primera grieta aparece.
Xm:	Curvatura de la zona sin grietas.
α_n , h:	Altura relativa del eje neutro.
α , h:	Altura relativa de la grieta.
Nb:	Fuerza axial en la zona sin agrietamientos.
Nbc:	Fuerza axial de compresión elástica.
Nbt:	Fuerza axial de tracción elástica.
Nf:	Fuerza axial en la zona agrietada.
Nf1:	Fuerza axial elástica en la zona agrietada.
Nf2:	Fuerza axial inelástica en la zona agrietada.
b, h:	Ancho y alto de la sección transversal de la viga.
I:	Inercia de la sección rectangular.
σ :	Esfuerzo.
σ_t :	Esfuerzo de tracción en el límite elástico.
σ_b :	Esfuerzo en la fibra más comprimida.
M:	Momento externo.
Mb:	Momento en la zona sin agrietamientos.
Mf:	Momento en la zona agrietada.
Wo:	Área bajo la curva en el diagrama (F vs δ).
τ_f :	Resistencia a la adherencia de fibra dentro de la matriz de UHPFRC.
Δ_{cr} :	Deformación en compresión cuando ocurre la primera grieta.
ycr:	Altura crítica medida desde el eje neutro cuando ocurre la primera grieta.
$\omega_{cr,a}$:	Abertura de la muesca cuando ocurre la primera grieta.
y:	Altura de la viga en cualquier punto.
dc:	Profundidad del eje neutro medida desde la fibra más comprimida.
ϵ_{co} :	Deformación correspondiente a f_c .
f_{cr} :	Resistencia de la matriz de concreto al agrietamiento.
ϵ_{cr} :	(f_{cr}/E) Deformación correspondiente a f_{cr} .
Δ_c :	Deformación en compresión.
$\epsilon_{c,top}$:	Deformación unitaria de la fibra más comprimida.
$\omega_{cr,bot}$:	Abertura en la parte inferior de la muesca.
θ_b :	Ángulo de rotación de la viga agrietada.
σ_{t2} :	Esfuerzo de tracción inelástico, incluye los efectos del concreto y de las fibras.
σ_{t2c} :	Esfuerzo de tracción inelástico que incluye los efectos del concreto.
σ_{t2f} :	Esfuerzo de tracción inelástico que incluye los efectos de las fibras.
α_f :	Factor de orientación de las fibras.
V_f :	Porcentaje volumétrico de fibras.
K_{st} :	Factor que representa el esfuerzo de adherencia promedio de las fibras considerando una distribución aleatoria de las mismas dentro de la matriz de concreto
lf:	Longitud de la fibra.
df:	Diámetro de la fibra.
s_f :	Deslizamiento de la fibra correspondiente a la resistencia de adherencia de una fibra recta de acero, el cual puede tomar el valor de 0,01 mm.
β_f :	Coefficiente para considerar efectos del deslizamiento de la fibra, es igual a 0,67.
fte:	Resistencia de tracción en el límite elástico.
ftcr:	Resistencia de tracción máxima en el rango inelástico.
Fte:	Carga máxima soportada por el elemento en el rango elástico.
Ftcr:	Carga máxima soportada por el elemento en el rango inelástico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases dependientes del tiempo, RC y UHPRC. Fuente: Wang et al. [35]	29
Figura 2: Matriz del UHPRC endurecida usando SEM. Fuente: Wang et al. [35].....	30
Figura 3: Clasificación del UHPFRC. Fuente: Camacho E. [43].....	33
Figura 4: Clasificación propuesta por Wille et al. Fuente: Wille, et al. [49].....	36
Figura 5: Puente de Mars Hill, USA. Fuente: Tadros et al. [83].....	45
Figura 6: Aeropuerto de Tokio, Japón. Fuente: Ductal [85].	45
Figura 7: Museo de las Civilizaciones, Francia. Fuente: Tadros et al. [83].....	46
Figura 8: a) Pasarela de la Paz, Corea del sur; b) Puente peatonal, Canada.....	46
Figura 9: a) Puente peatonal, Australia; b) 1er puente con UHPFRC en China.	46
Figura 10: Ley constitutiva del UHPFRC. Fuente: AFGC [77] modificado.....	53
Figura 11: Comportamiento a la compresión. Fuente: Ductal [85] modificado.....	53
Figura 12: Comportamiento en tracción del UHPFRC. Fuente: AFGC [77] modificado.....	58
Figura 13: Comportamiento en la flexión. Fuente: Thanh Le [54] modificado.	61
Figura 14: Geometría de la mini-viga (en mm).....	63
Figura 15: GF a partir de la curva F vs δ	64
Figura 16: GF a partir de la curva σ vs ω	65
Figura 17: Esquema para caracterizar experimentalmente el UHPFRC.	66
Figura 18: Objetivos del trabajo experimental.	68
Figura 19: Fabricación de la mezcla UHPRC.	71
Figura 20: Esquema de trabajo. UHPFRC en compresión uniaxial.	72
Figura 21: a) Rectificación; y b) teste de compresión uniaxial.	73
Figura 22: a) Macrofibras y b) Microfibras de acero.	76
Figura 23: Curvas granulométricas usando EMMA.....	76
Figura 24: Adición de las fibras de acero a la mezcla.....	77
Figura 25: a) Desmoldado con aire a presión, b) Tipo de falla.	78
Figura 26: Leyenda para los especímenes en la etapa III.....	80
Figura 27: Medición post- agrietamiento en ensayo de compresión uniaxial.	81
Figura 28: Fallas satisfactorias en UHPFRC. Fuente EN12390-3 [130] adaptado.	82
Figura 29: Dimensiones del Dog-Bone (en cm).....	83
Figura 30: Programa experimental para ensayo de tracción.	83
Figura 31: a) Formas para Dog-Bone; b) Vaciado de la mezcla.	84
Figura 32: a) Ensayo de tracción directa, b) Tipo de falla.	84
Figura 33: Dimensiones de las mini-vigas.	86
Figura 34: Vaciado de las mini-vigas.....	87
Figura 35: Programa experimental para ensayo de flexión.	87
Figura 36: Esquema del ensayo de flexión en tres puntos (cm).	88

Figura 37: a) Ensayo de tracción en tres puntos, b) Tipo de falla.	88
Figura 38: Falla en mini viga con 1% de fibras largas de acero.....	89
Figura 39: Geometría de la Viga “T” en cm.....	89
Figura 40: Viga “T”: a) encofrado, b) acero de refuerzo convencional.	90
Figura 41: a) y b) Vaciado de la Macro-viga o viga “T” usando UHPRC.....	90
Figura 42: Viga I construida con UHPFRC.	91
Figura 43: Viga I. Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos.....	91
Figura 44: Viga I. Ejecución del ensayo de flexión.	92
Figura 45: Tipo de falla. Viga I con refuerzo convencional.....	92
Figura 46: Tipo de falla. Viga I con microfibras.....	92
Figura 47: Colapso de Viga I con UHPFRC y microfibras de acero.	93
Figura 48: Medición de la abertura de la muesca (ω).	94
Figura 49: a) y b) Barras poliméricas.....	95
Figura 50: a) Ensayo de tracción; b) Tipo de falla, en barras poliméricas.....	96
Figura 51: a) y b) Tipo de falla en las barras poliméricas.	96
Figura 52: Formas para ensayo POT usado en la USP. Fuente: Andrade, I. [106].....	97
Figura 53: Formas para el ensayo de Pull-Out.....	97
Figura 54: a) y b) Vaciado del UHPRC en formas para Pull-Out test.	98
Figura 55: (a) Estructura de apoyo y (b) Pull-Out Test.....	98
Figura 56: a) y b) Ensayo Pull-Out Test.....	99
Figura 57: a) Instante de la falla y b) Espécimen post-falla.	99
Figura 58: Cuerpos de prueba para el Pull-Out Test.	99
Figura 59: Procedimiento numérico para caracterizar el UHPFRC.	101
Figura 60: Procedimiento para obtener la curva de comportamiento en flexión.....	102
Figura 61: Procedimiento para transformar la curva (σ vs ω) en (σ vs ϵ).	104
Figura 62: Procedimiento general de validación.....	105
Figura 63: Curva experimental F vs ω . Viga CP-5. 2% de microfibras.....	106
Figura 64: Curva experimental F vs ω . Viga CP-5. Origen en ω_0	106
Figura 65: Equilibrio mecánico en el límite elástico.....	107
Figura 66: Equilibrio mecánico de la sección agrietada. Fuente AFGC [77] modificado	107
Figura 67: Validación del AI usando GF.	110
Figura 68: Esquema para validar el AI usando MEF.	111
Figura 69: Condiciones de contorno de las mini-vigas.	112
Figura 70: Esquema del modelaje computacional usando SOLID185.....	113
Figura 71: Elemento SOLID185. Fuente: ayuda ANSYS.....	114
Figura 72: Condiciones de contorno de la viga I.....	115
Figura 73: Elemento REINF264. Fuente: ayuda ANSYS.....	115

Figura 74: Esquema del modelaje computacional usando SOLID65.....	116
Figura 75: Elemento SOLID65. Fuente: ayuda ANSYS.....	117
Figura 76: Cantidad de fibras por cm ² , a) 2%, b) 1%.....	118
Figura 77: Deslizamiento de las fibras dentro de la matriz.	118
Figura 78: Algoritmo. Resistencia de adherencia de la fibra. Fuente Lee et al. [7] modificado.	119
Figura 79: Distribución de esfuerzos y deformaciones de la sección agrietada.....	120
Figura 80: Mecanismo de falla de la viga idealizado. Fuente Lee et al. [126] modificado.....	121
Figura 81: Caracterización experimental del UHPFRC.	125
Figura 82: Leyenda para los especímenes en la etapa I.	126
Figura 83: Contribución de los factores controlables Etapa I.	128
Figura 84: Resistencia a la Compresión para mezcla C3 o UHPRC-3.....	129
Figura 85: Resistencia a la Compresión UHPRC-3 versus GGBS.....	130
Figura 86: Resistencia a la Compresión para GGBS-1.	130
Figura 87: Resistencia a la Compresión para GGBS-2.	131
Figura 88: Resistencia a la Compresión para GGBS-3.	131
Figura 89: Resistencia a la compresión para cada tipo de curado.....	132
Figura 90: Leyenda para los especímenes en la etapa II.	133
Figura 91: Contribución de los factores controlables Etapa II.	135
Figura 92: Resistencia a la compresión Etapa II (sin fibras).....	136
Figura 93: Evolución de la resistencia Etapa II (sin fibras).	136
Figura 94: Resistencia a la compresión con fibras C2 Etapa II.....	137
Figura 95: Evolución de la resistencia a la compresión, fibras C2 Etapa II.....	137
Figura 96: Resistencia a la compresión con fibras C3 Etapa II.....	138
Figura 97: Evolución de la resistencia a la compresión, fibras C3 Etapa II.....	138
Figura 98: Valores comparativos de resistencia a la compresión.....	139
Figura 99: Leyenda para los especímenes en la Etapa III.	141
Figura 100: Contribución de los factores controlables Etapa III.....	143
Figura 101: Resistencia a la compresión para UHPFRC Etapa III.	143
Figura 102: Evolución de la resistencia a la compresión Etapa III.	143
Figura 103: Densidad de frecuencia para UHPFRC.	145
Figura 104: Ley constitutiva del UHPFRC.....	145
Figura 105: Ley constitutiva del UHPFRC post-pico en compresión.....	146
Figura 106: Comparación del comportamiento del UHPFRC en compresión.	147
Figura 107: Ley constitutiva del UHPFRC en compresión usando macrofibras.	148
Figura 108: Ley constitutiva en tracción directa. 0%, 1% y 2% de microfibras.....	149
Figura 109: Comparación del comportamiento en tracción. Fuente: ACI adaptado [41].	150
Figura 110: Relaciones constitutivas en tracción uniaxial. 1% de microfibras.....	150

Figura 111: Relaciones constitutivas en tracción uniaxial. 2% de microfibras.....	151
Figura 112: <i>Tensile Strain Softening</i> en tracción uniaxial con 1% de microfibras.	151
Figura 113: <i>Tensile Strain Hardening</i> en tracción uniaxial con 2% de microfibras.....	152
Figura 114: Ley constitutiva en tracción directa. 0% y 1% de macrofibras.....	153
Figura 115: Ley constitutiva promedio y repeticiones. 1% de macrofibras.....	153
Figura 116: Cantidad de a) microfibras y b) macrofibras atravesando la grieta.	154
Figura 117: Curvas promedio de F vs δ con 0%, 1% y 2% de microfibras.	156
Figura 118: Curvas F vs δ para mini-vigas sin fibras.....	156
Figura 119: Curvas F vs δ para mini-vigas con 1% de microfibras.	157
Figura 120: Curvas F vs δ para mini-vigas con 2% de microfibras.	157
Figura 121: Curvas promedio de F vs δ . 0%, 1% y 2% de macrofibras.....	158
Figura 122: Curvas F vs δ para mini-vigas con 1% de macrofibras.....	159
Figura 123: Curvas F vs δ para mini-vigas con 2% de macrofibras.....	159
Figura 124: Curvas F vs δ para vigas I con UHPFRC usando microfibras.....	160
Figura 125: Curvas F vs δ para vigas I con UHPFRC usando macrofibras.	161
Figura 126: Curvas F vs δ para vigas I con UHPRC y acero convencional.....	162
Figura 127: Curvas F vs δ para calcular GF.....	163
Figura 128: Curvas F vs δ para calcular GF.....	164
Figura 129: Curvas F vs δ para calcular GF.....	165
Figura 130: Curvas F vs δ para calcular GF.....	165
Figura 131: Resultados POT usando barras poliméricas con $d_b=10$ mm.	166
Figura 132: Resultados POT usando barras poliméricas con $d_b=15$ mm.	167
Figura 133: Adherencia en UHPRC usando barras de acero con $d_b=10$ mm.	168
Figura 134: Adherencia en UHPRC usando barras de acero con $d_b=15$ mm.	169
Figura 135: Esquema de las variables (α_h , α_{nh}) en la viga fracturada.....	170
Figura 136: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 1% de microfibras.	171
Figura 137: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 1% de microfibras.....	172
Figura 138: Comportamiento promedio en compresión. 1% de microfibras.	172
Figura 139: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 1% de microfibras.....	173
Figura 140: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 1% de microfibras.....	174
Figura 141: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 1% de microfibras.....	175
Figura 142: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-4. 1% de microfibras.....	176
Figura 143: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 2% de microfibras.	177
Figura 144: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 2% de microfibras.....	178
Figura 145: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 2% de microfibras.....	179
Figura 146: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 2% de microfibras.....	180
Figura 147: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 2% de microfibras.....	181

Figura 148: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-4. 2% de microfibras.....	182
Figura 149: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-5. 2% de microfibras.....	183
Figura 150: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-6. 2% de microfibras.....	184
Figura 151: Diagrama de deformaciones. Mini-viga CP-2. 1% de microfibras.....	185
Figura 152: Diagrama de deformaciones. Mini-viga CP-3. 2% de microfibras.....	186
Figura 153: Curvas (σ vs ω) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.	187
Figura 154: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.	187
Figura 155: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 1% de macrofibras.	188
Figura 156: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 1% de macrofibras.	189
Figura 157: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 1% de macrofibras.	190
Figura 158: Curvas (σ vs ω) obtenidas por AI para 2% de macrofibras.	191
Figura 159: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.	192
Figura 160: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 2% de macrofibras.	193
Figura 161: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 2% de macrofibras.	194
Figura 162: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 2% de macrofibras.	195
Figura 163: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-1.....	197
Figura 164: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-2.....	197
Figura 165: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-3.....	198
Figura 166: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-4.....	198
Figura 167: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-5.....	199
Figura 168: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-6.....	199
Figura 169: Comparación de curvas promedio con SOLID65 1% microfibras.	203
Figura 170: Comparación de curvas promedio con SOLID65 2% microfibras.	203
Figura 171: Comparación de curvas promedio con SOLID65 1% macrofibras.	204
Figura 172: Comparación de curvas promedio con SOLID65 2% macrofibras.	204
Figura 173: Viga I usada para el análisis.	205
Figura 174: Comparación de las curvas (F vs δ) de la Viga I con acero de refuerzo.....	206

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Diseños de mezcla de varios autores.	37
Tabla 2: Diseño de Tratamientos. Etapa I.	74
Tabla 3: Diseños de Mezclas para UHPFRC (kg/m^3). Etapa I.	74
Tabla 4: Diseño de Tratamientos. Etapa II.	75
Tabla 5: Diseño de Mezclas. Etapa II.	76
Tabla 6: Diseño de Tratamientos.	79
Tabla 7: Diseño de Mezcla UHPFRC. Etapa III.	80
Tabla 8: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa I.	126
Tabla 9: Análisis de variancia ANOVA. Etapa I.	127
Tabla 10: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa II.	133
Tabla 11: Análisis de variancia ANOVA. Etapa II.	134
Tabla 12: Resistencia a la compresión (MPa) CP-5 y CP-7,5.	139
Tabla 13: Resistencia a la compresión (MPa). Diferencia porcentual.	139
Tabla 14: Ganancia de resistencia a la compresión (MPa).	140
Tabla 15: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa III.	141
Tabla 16: Análisis de variancia ANOVA. Etapa III.	142
Tabla 17: Resistencia a la compresión usando microfibras Etapa IV.	144
Tabla 18: Valores de la resistencia a la compresión, comparación.	146
Tabla 19: Comparación de los resultados para E.	147
Tabla 20: Resistencia a la tracción uniaxial.	149
Tabla 21: Resistencia a la tracción uniaxial.	152
Tabla 22: Carga, esfuerzo y deflexión elástica en flexión para UHPFRC.	155
Tabla 23: Carga máxima y deflexión inelástica en flexión para UHPFRC.	155
Tabla 24: Carga, esfuerzo y deflexión elástica en flexión para UHPFRC.	158
Tabla 25: Carga máxima y deflexión post- agrietamiento en flexión para UHPFRC.	158
Tabla 26: Resultados experimentales ensayo de flexión UHPFRC.	160
Tabla 27: Energía de Fractura GF en kJ/m^2 . 1% microfibras.	163
Tabla 28: Energía de Fractura GF en kJ/m^2 . 2% microfibras.	163
Tabla 29: Energía de Fractura usando 1% de macrofibras.	164
Tabla 30: Energía de Fractura usando 2% de macrofibras.	164
Tabla 31: Resistencia a la adherencia con barras poliméricas $\text{db}=10$ mm.	166
Tabla 32: Resistencia a la adherencia con barras poliméricas $\text{db}=15$ mm.	166
Tabla 33: Resistencia a la tracción en las barras poliméricas.	167
Tabla 34: Resistencia a la adherencia con barras de acero $\text{db}=10$ mm.	168
Tabla 35: Resistencia a la adherencia con barras de acero $\text{db}=15$ mm.	168
Tabla 36: Energía de Fractura GF en kJ/m^2 en vigas con 1% de microfibras.	171

Tabla 37: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 1% de microfibras.	174
Tabla 38: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 1% de microfibras.	175
Tabla 39: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 1% de microfibras.	176
Tabla 40: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-4 con 1% de microfibras.	177
Tabla 41: Energía de Fractura GF en kJ/m ² en vigas con 2% de microfibras.	178
Tabla 42: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 2% de microfibras.	180
Tabla 43: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 2% de microfibras.	181
Tabla 44: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 2% de microfibras.	182
Tabla 45: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-4 con 2% de microfibras.	183
Tabla 46: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-5 con 2% de microfibras.	184
Tabla 47: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-6 con 2% de microfibras.	185
Tabla 48: Energía de Fractura GF en kJ/m ² en vigas con 1% de macrofibras.	186
Tabla 49: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 1% de macrofibra.	189
Tabla 50: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 1% de macrofibras.	190
Tabla 51: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 1% de macrofibras.	191
Tabla 52: Energía de Fractura GF en kJ/m ² en vigas con 2% de microfibras.	192
Tabla 53: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 2% de macrofibra.	193
Tabla 54: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 2% de macrofibra.	194
Tabla 55: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 2% de macrofibra.	195
Tabla 56: Valores equivalentes para el esfuerzo de fluencia.	200
Tabla 57: Cálculo de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ por AI. Mini-vigas con 1% de microfibras.	201
Tabla 58: Cálculo de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ por AI. Mini-vigas con 2% de microfibras.	202

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	20
1.1	OBJETIVOS DA PESQUISA.....	22
1.1.1	Objetivo General	22
1.1.2	Objetivos específicos.....	22
1.2	ALCANCES DEL TRABAJO	23
2	MARCO TEÓRICO	24
2.1	ANTECEDENTES.....	24
2.2	HIDRATACION Y MICROESTRUCTURA.....	29
2.3	DEFINICIÓN	30
2.4	ALCANZAR LA ULTRA ALTA RESISTENCIA	32
2.5	CLASIFICACIÓN	33
2.6	PRODUCCIÓN.....	37
2.7	MATERIALES	38
2.8	FIBRAS.....	40
2.9	MEZCLADO.....	42
2.10	CURADO.....	42
2.11	SUSTENTABILIDAD, APLICACIONES Y LIMITACIONES	43
3	NORMAS.....	47
3.1	RILEM TC162-TDF: TEST AND DESIGN METHODS FOR FRC	47
3.2	MODEL CODE (fib).....	48
3.3	JSCE.....	49
3.4	ACI.....	49
3.5	AFGC-SETRA	50
4	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL UHPFRC	52
4.1	COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN COMPRESIÓN UNIAXIAL	52
4.2	MODULO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON DEL UHPFRC	55
4.3	COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN TRACCIÓN	57
4.4	COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN FLEXIÓN	61
4.5	FRACTURA DEL UHPFRC	63
4.5.1	Usando RILEM 50-FMC	63
4.5.2	Usando AFGC.....	64
5	PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	66
5.1	ANALISIS ESTADISTICO	68
5.2	MATERIALES A UTILIZAR, FABRICACION Y TIPO DE CURA	69
5.3	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	72

5.3.1	Etapa I: Conociendo el UHPRC	73
5.3.2	Etapa II: Desarrollando UHPFRC con macrofibras	75
5.3.3	Etapa III: Desarrollando UHPFRC con microfibras	78
5.3.4	Etapa IV: Relaciones constitutivas del UHPFRC	81
5.4	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.....	83
5.5	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	85
5.5.1	Flexión en tres puntos sobre mini-vigas prismáticas.....	86
5.5.2	Flexión en cuatro puntos sobre meso-viga o viga I.....	89
5.6	FRACTURA DEL UHPFRC	93
5.7	RESISTENCIA A LA ADHERENCIA	94
5.7.1	Resistencia a la tracción uniaxial en barras poliméricas	95
5.7.2	Resistencia a la adherencia de barras empotradas en UHPRC.....	96
6	PROCEDIMIENTO NUMÉRICO	101
6.1	CARACTERIZACIÓN DEL UHPFRC EN FLEXIÓN	102
6.2	ANÁLISIS INVERSO (AI)	105
6.2.1	Ancho inicial de la muesca (ω_0)	105
6.2.2	Equilibrio mecánico de la sección.....	107
6.2.3	Proceso iterativo.....	109
6.2.4	Inicio del proceso y estabilización de la convergencia	110
6.3	VALIDACIÓN DEL ANALISIS INVERSO.....	110
6.3.1	Validación del AI usando la energía de fractura (GF)	111
6.3.2	Validación del AI usando el método de los elementos finitos (MEF).....	112
6.3.3	Validación de las leyes constitutiva obtenidas por AI.....	114
6.4	MODELAJE COMPUTACIONAL VIGA I CON ACERO DE REFUERZO	115
6.5	COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC USANDO EL MEF CON SOLID65	116
6.5.1	Simulación numérica.....	117
6.5.2	Determinación del esfuerzo de fluencia equivalente para el análisis	119
6.5.3	Análisis inverso para determinar $\tau_{f,máx}$	120
6.5.4	Descripción del mecanismo de falla.....	121
7	RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	125
7.1	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	125
7.1.1	Etapa I: Conociendo el UHPRC	125
7.1.2	Etapa II: Desarrollando UHPFRC con macrofibras	133
7.1.3	Etapa III: Desarrollando UHPFRC con microfibras	140
7.1.4	Etapa IV: Relaciones constitutivas del UHPFRC	144
7.2	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN UNIAXIAL.....	149

7.2.1	Usando microfibras de acero.....	149
7.2.2	Usando macrofibras de acero	152
7.3	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN TRES PUNTOS.....	154
7.3.1	Usando mini-vigas con microfibras	154
7.3.2	Usando mini-vigas con macrofibras.....	157
7.4	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS	160
7.5	ENERGÍA DE FRACTURA.....	162
7.5.1	Usando microfibras	162
7.5.2	Usando macrofibras.....	164
7.6	ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA CON UHPFRC.....	165
7.6.1	Resultados de resistencia a la adherencia usando barras poliméricas	166
7.6.2	Resultados de resistencia a la adherencia usando barras de acero	167
8	RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO NUMÉRICO	170
8.1	CARACTERIZACIÓN DEL UHPFRC EN TRACCIÓN	171
8.1.1	Usando 1% de microfibras de acero.....	171
8.1.2	Usando 2% de microfibras de acero.....	177
8.1.3	Diagrama de deformaciones.....	185
8.1.4	Usando 1% de macrofibras de acero	186
8.1.5	Usando 2% de macrofibras de acero	191
8.2	VALIDACIÓN DE LAS RELACIONES CONSTITUTIVAS EN TRACCION.....	196
8.3	RESULTADOS DEL ANALISIS USANDO EL MEF CON SOLID65	200
8.4	SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA VIGA I CON BARRAS DE REFUERZO	205
9	CONCLUSIONES	207
10	RECOMENDACIONES	210
	REFERENCIAS.....	212
	APÉNDICES.....	223

1 INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado de ultra-alto desempeño o Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (conocido por sus siglas en inglés como UHPFRC) es un material innovador que puede alcanzar resistencias superiores a los 150 MPa en compresión y 10 MPa en tracción, con 28 días de curado, lo que permite la construcción de elementos estructurales que soportan grandes vanos con una sección transversal menor a las construidas con concreto tradicional.

Su composición no incluye agregado grueso, está compuesta principalmente por cemento, aditivos minerales (humo de sílice, escoria granular de alto horno, polvo de cuarzo), arena de sílice, superplastificante y agua. Otro elemento importante en la mezcla lo constituyen las fibras, las cuales permiten mejoras en la ductilidad y favorecen al comportamiento de endurecimiento por deformación en elementos sometidos a esfuerzos de tracción. Todos estos materiales se unen formando una densa matriz, que además de resistente posee baja porosidad, proporcionando un material con alta durabilidad.

El aumento en el costo de reparos de estructuras y el énfasis creciente en el costo del ciclo de vida en lugar del costo inicial están obligando a los ingenieros a tomar conciencia del concepto de durabilidad. Minimizar los costos de ejecución y mantenimiento es un factor que promueve cualquier presupuesto de obra, adicionalmente, nuevos parámetros como evolución tecnológica y procesos constructivos alternativos son conceptos que pueden influir en la viabilidad de los proyectos.

En Brasil, hay una gran cantidad de obras de arte especiales estructuralmente deficientes u obsoletas, sin mencionar las que se unen año tras año. La búsqueda de nuevas formas de construir mejores estructuras, reducir el tiempo de viaje y mejorar las técnicas de reparación debería ser una de las actuaciones principales de instituciones públicas y privadas. La reducción en los costos de mantenimiento de estructuras existente puede evitar o disminuir el desvío de los presupuestos de capital requeridos para la construcción de nuevas obras. En este escenario, el UHPFRC se constituye como un material alternativo para solucionar uno de los mayores desafíos que enfrentan las autoridades, durabilidad a largo plazo de las vigas de viaducto que reciben cargas de impacto continuo de los camiones, creando problemas de deterioro y mantenimiento.

A priori puede afirmarse que attingir esa alta durabilidad y resistencia demanda el uso de una gran cantidad de cemento en la mezcla, convirtiéndolo además de costoso en un material que impacta al ambiente. El costo de UHPFRC por m^3 ha sido reportado de cuatro a cinco veces mayor que el concreto tradicional, usando como aglomerante sólo al cemento, Fehling, et al. [1]. Sin embargo, usando UHPFRC se puede reducir entre un tercio o la mitad el peso de la estructura bajo las mismas cargas, Yoo and Yoon [2], permitiendo diseñar fundaciones con geometrías menores y en general logrando que el costo final de la obra pueda ser disminuido, Tanaka et al. [3]. Por otro lado, el uso de aglomerantes provenientes de residuos industriales, como sustituyentes parciales del cemento, ayudan a disminuir los efectos contaminantes en el ambiente. La industria de la construcción emite un tercio del CO_2 a la atmósfera, donde el cemento es responsable del 7%, UNSTAT [4].

Diseño verde o sustentable puede ser producido usando UHPFRC, adicionando humo de sílice o *Silica Fume* (SF) y escoria de alto horno o *Ground Granulated Blast-furnace Slag* (GGBS) como materiales aglomerantes sustituyentes parciales del cemento. La SF y la GGBS son materiales provenientes de residuos industriales que aportan, además de economías, menores emisiones de CO_2 al ambiente por cada m^3 de concreto ultra resistente fabricado. Varias pesquisas han sido desarrolladas usando UHPFRC con diseño verde y se ha demostrado que el uso de materiales sustentables sustituyentes parciales del cemento no disminuyen significativamente la resistencia a la compresión del UHPFRC, además de hacerla económicamente factible. Las pesquisas de Hassan et al. [5], Yu et al. [6], Habel et al. [7] y Yang et al. [8], son un ejemplo de ello, en todos esos casos residuos industriales (SF, GGBS) fueron considerados como materiales sustituyentes del cemento, con los cuales se obtuvieron mezclas económicas con ultra alta resistencia.

Los criterios de sustentabilidad anteriormente mencionados se unen a los de resistencia y durabilidad, para proponer en el presente trabajo la fabricación experimental y la simulación numérica de vigas usando UHPFRC. Vigas construidas con este material tienen la capacidad de continuar soportando carga una vez agrietadas, su resistencia a la tracción no es despreciable. En el comportamiento post-agrietamiento las fibras tienen una participación fundamental, cuando adecuadamente orientadas y distribuidas evitan la falla frágil del elemento, por el efecto de puente que se origina entre ambas caras de la grieta. Por lo tanto, la pesquisa, tanto experimental

como numérica, se enfoca en el estudio del desempeño de la mezcla y en la participación de las fibras, usando prototipos fabricados con ese tipo de material.

La investigación se inicia presentando en el Capítulo 2 el marco teórico proveniente de la revisión de la literatura, explicando cuales aspectos serán considerados en el desarrollo de la investigación. En el Capítulo 3 se describen brevemente las principales normas que existen relacionadas al UHPFRC, indicando la que será usada en esta pesquisa. En el Capítulo 4 se describen las propiedades mecánicas del UHPFRC para entender el comportamiento del material. En el Capítulo 5 se explica el procedimiento experimental a seguir y en el Capítulo 7 se muestran los resultados. En el Capítulo 6 se explica el procedimiento numérico a seguir y en el Capítulo 8 se muestran los resultados. En los Capítulos 9 y 10 se incluyen las conclusiones y recomendaciones. Al final se anexan las referencias bibliográficas y los apéndices.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

1.1.1 Objetivo General

Estudiar experimental e numéricamente vigas a partir de la producción del Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) considerando criterios de resistencia, durabilidad y sustentabilidad especificados en códigos internacionales.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Producir el diseño de mezcla para el UHPFRC con una resistencia a la compresión promedio superior a 150 MPa.
2. Determinar las propiedades mecánicas del UHPFRC a partir de la fabricación y ensayos experimentales de prototipos sometidos a compresión uniaxial, tracción uniaxial, flexión y adherencia.
3. Establecer las relaciones constitutivas (curvas σ vs ϵ) en compresión y tracción uniaxial, basados en resultados experimentales.
4. Establecer las relaciones constitutivas (curvas σ vs ϵ) en flexión o tracción en la flexión, basados en resultados experimentales y análisis numérico.
5. Definir longitudes de desarrollo para barras embutidas en la mezcla de UHPFRC establecida en esta pesquisa.

6. Estudiar el comportamiento del UHPFRC usando simulación numérica por elementos finitos.

1.2 ALCANCES DEL TRABAJO

Vigas a mayor escala no pudieron ser fabricadas por limitaciones en los equipos disponibles en el Laboratorio de Ensayos y Modelos Estructurales (LEME) de la UFRGS, las mayores vigas no superaron 1,35 metros.

Para visualizar los fenómenos de microfisuración en ensayos de tracción y flexión la bibliografía recomienda imponer la carga por desplazamiento con velocidades entre 0,1 y 0,2 mm/min, en nuestro caso se trabajó con una velocidad de 0,5 mm/min que es el valor mínimo de la prensa disponible.

El baño térmico disponible en LEME tiene una capacidad para elementos de hasta 70 cm de longitud, por tanto, vigas con mayor tamaño no recibieron tratamiento térmico en el curado. En las etapas I y II del ítem 5.3 desarrollado en esta pesquisa, el tratamiento térmico en el curado de los cuerpos de prueba debió ser interrumpido en horario nocturno por normas de seguridad del laboratorio, por tanto, los rangos de 24 horas fueron interrumpidos desde las 7:30 pm hasta las 7:30 am, en los cuales la temperatura disminuyó aprox. un 20%.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Después de que Aspdin y Parker patentaran el Cemento Portland en el año 1824 su uso como material cementante en el concreto se incrementó rápidamente. Cuando Joseph Lambot en 1849 construyó y patentó su barco usando concreto y acero detonó el espíritu visionario de Joseph Monier, quien comprando esa patente resolvió el problema de fragilidad de los maceteros que construía y en las siguientes tres décadas fue tal el avance de su técnica que logró construir vigas y puentes en concreto armado. Desde allí el progreso de la ingeniería civil fue acelerado alrededor del mundo, ilustrado por la construcción de rascacielos, puentes con grandes luces, estructuras para control del agua, etc. En cada una de esas obras nuevos retos para la mecánica estructural y para el conocimiento en materiales de construcción fueron asumidos. En la actualidad nuevos desafíos son enfocados principalmente en el uso eficiente de los recursos, incluyendo la sustentabilidad en los ya conocidos criterios de resistencia, durabilidad y seguridad al diseñar y construir obras estructurales en concreto armado.

Basados en la bibliografía consultada, se describe a continuación una cronología resumida del desarrollo y pesquisa científica asociada al concreto, desde los primeros diseños de mezcla propuestos, pasando por el concreto reforzado con fibras o FRC (Fiber Reinforced Concrete), hasta la obtención del Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) mejor conocido en la bibliografía por nombre en inglés Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC).

Entre las primeras patentes de mezcla de concreto podemos citar a Berard Ahoille, quien en el año 1874 ganó los derechos exclusivos para producir un bloque de piedra de granito artificial para pavimentos, usando una mezcla formada por dos partes de grava, dos partes de arena, dos partes de cal hidráulica, una parte de residuos de hierro parecidos a fibras y agua. Ahoille fue seguido por René Féret [10] que estableció en el año 1898 los principios de composición óptima para obtener concretos con resistencias específicas, estableciendo relaciones entre la resistencia a la compresión del concreto con los volúmenes de cemento, agua y vacíos. En año 1927 Otto Graf, pionero en el campo de carreteras, estableció los criterios generales que deben cumplirse para construir estradas con concreto de alta resistencia a la compresión, impacto, tracción y a los ataques químicos, alcanzando valores de hasta 70 MPa, Reinhardt [11]. También investigó

y publicó la influencia de agregados finos en las propiedades del cemento, la relación agua/cemento o *water/cement* (w/c) sobre la resistencia y el uso de la escoria de alto horno o GGBS, para disminuir la retracción del concreto. Para el año 1930 Eugene Freyssinet [12] ya diseñaba y construía vigas para puentes con alta resistencia inicial e incluía tratamiento térmico en el curado. Usaba vapor alrededor de moldes de concreto para acortar significativamente el tiempo de curado del concreto, aspectos que en la actualidad se mantienen vigentes para acelerar el desarrollo de la resistencia.

En la década del 60 Walz K. [13] duplicó la resistencia a la compresión del concreto alcanzada por Graf, usando métodos especiales de producción. Hughes et al. [14] fueron pioneros en la determinación de la resistencia a la tracción de pequeños especímenes de concreto convencional que incluían fibras y obtuvieron la curva esfuerzo deformación (σ - ϵ) del material, observando en todo el proceso de carga un estado elástico inicial, luego uno de múltiples micro-fisuras con máxima carga y por último el estado de fractura. También registraron que el material del cuerpo de prueba fuera de la zona de fractura no presentó ninguna alteración, es decir, consiguieron medir y registrar el comportamiento del FRC antes y después del agrietamiento, aspectos base para la formulación de los modelos de fractura del concreto. Al final de la década, Heilmann et al. [15] estudiaron la zona de fractura, determinando que en la sección transversal próxima a la zona en proceso de fractura las deformaciones no son afectadas por las grietas y permanecen elásticas, corroborando los hallazgos de sus antecesores.

En la década del 70 la investigación fue focalizada en obtener alta resistencia a la compresión en pastas de cemento, usando diferentes tipos de Clinker con una finura bastante alta y aplicando en el proceso de cura tratamiento térmico y presión. Ejemplo de ello podemos encontrar en Yudenfreund et al. [16] quienes alcanzaron 240 MPa a los 180 días de curado a 25°C, en probetas construidas con pasta de cemento Portland, con relaciones de w/c de 0,2 y 0,3. Los especímenes ensayados fueron cubos comprimidos lateralmente, para evitar los efectos de una posible sedimentación antes de endurecer. Roy et al. [17] alcanzaron 509,52 MPa usando mini cilindros de ½” de diámetro por ½” de altura, también Roy y Gouda [18] experimentaron altas resistencias, entre 175,40 MPa y 652,24 MPa verificando que la alta resistencia era debida principalmente a la baja porosidad de la mezcla y no solamente a la cantidad de Clinker.

Respecto al comportamiento en tracción del FRC es importante referenciar primeramente el trabajo de Hillerborg Arne. [19] quien describió el comportamiento discreto de la zona de fractura visualizándolo como grieta ficticia que es capaz de transferir esfuerzos. Esos esfuerzos que la grieta puede transferir van de acuerdo a su propio ancho. Ese concepto es la base del Modelo de la Grieta Ficticia o FCM por sus siglas en inglés (*Fictitious Crack Model*) desarrollado años más tarde.

A pesar de la pesquisa científica en FRC que fue desarrollada en esa época, los ingenieros calculistas concibieron a las fibras, dentro de la matriz de concreto, como un material de reforzamiento impreciso, principalmente por su naturaleza aleatoria y por la ausencia de métodos de análisis confiables, situación que no ha mudado mucho en la actualidad.

En la década del 80 y en las subsecuentes, la pesquisa se direcciona en: (i) establecer nuevas tecnologías del concreto para alcanzar alta resistencia a la compresión, principalmente por la optimización de los métodos de fabricación para densificar la matriz; y (ii) obtener métodos cuantitativos para relacionar los principales parámetros que influyen en el desempeño de las fibras y en predecir la respuesta en tracción del FRC.

Birchall et al. [20] diseñan una pasta de cemento con polímeros seleccionados tipificada como *Macro Defect Free* (MDF). Los autores demostraron que la remoción de fallas macroscópicas durante la preparación de la pasta permite obtener resistencias a la flexión entre 60 a 70 MPa y resistencias a la compresión mayores a 200 MPa, sin necesidad de aplicar una alta presión de compactación. La remoción de esas fallas se hizo combinando el control de las propiedades reológicas del material y una eficiente mistura, usando relaciones w/c entre 0,08-0,20. La mezcla MDF no tuvo mucho éxito comercial debido a la pérdida de resistencia del material cuando es expuesto al agua o a la humedad.

En el mismo año que se presenta el MDF, Bache H. [21] presenta un nuevo tipo de material denominado *Densified Systems Particles* (DSP) con una alta durabilidad y con tres a cinco veces la resistencia del concreto tradicional de aquella época. Tales propiedades fueron posibles de alcanzar gracias al uso de una gran cantidad de humo de sílice y superplastificante, que permitieron un embalaje denso de la matriz de concreto pudiendo alcanzar resistencias entre 120 a 270 MPa. En ese trabajo también se discutieron los principios geométricos, cinemáticos y dinámicos para disponer las partículas finas en una estructura densa, así como también se

planteó el desarrollo de nuevas propiedades del material, como ductilidad y alta resistencia a la tracción. Poco tiempo después Lankard y Lease [22] propusieron la técnica de *Slurry Infiltrated Fibered Concrete* (SIFCON) técnica que consiste en rellenar el encofrado con fibras a granel e inyectar una suspensión fluida de mortero. Los autores comprobaron que la adición de fibras de acero en una proporción del 2% en volumen, dan lugar a mejoras significativas en las propiedades de estos materiales. Hjorth et al. [23] patentaron y comercializaron una mezcla de concreto con pequeñas partículas densificadas, usando como aditivo mineral al humo de sílice y como aditivo químico el superplastificante, con ambos alcanzaron resistencias a la compresión entre 120 y 250 MPa.

Respecto al FRC, en Europa, Norte América y Japón se publicaron varios trabajos en los cuales proponen el uso de ensayos de flexión en tres puntos para caracterizar la tenacidad del material, determinar la capacidad de absorción de energía, la resistencia a la flexión equivalente y otros parámetros que describen la respuesta post-agrietamiento del FRC.

Podemos citar por ejemplo el trabajo de Petersson [24] quien propuso una forma bilineal para describir la respuesta σ - ϵ , localizando el cambio en la pendiente de la gráfica cuando se alcanza el 30% de la resistencia a la tracción. Wittmann et al. [25] localiza ese cambio de pendiente cuando se alcanza el 15% y Rokugo et al. [26] cuando se alcanza el 25% de la resistencia a la tracción. Gopalaratman, Vellore [27] comparó el desempeño de diferentes tipos de fibras sobre la resistencia a la tracción, variando el volumen, longitud y tratamiento de la superficie de las fibras.

Basados en la pesquisa desarrollada hasta la época, RILEM 49TFR [28] publica un método para determinar las propiedades de tenacidad del FRC, justo antes que Hillerborg [29] publicara el método para la determinación de la fractura en el concreto plano, en otras palabras, la comunidad del FRC da un paso adelante de la comunidad a cargo de la pesquisa en fractura.

En la década del 90 aparecen dos nuevas tecnologías del concreto: (i) Larrard y Sedran [30] proponen el Ultra-High Performance Concrete (UHPC); y (ii) Richard y Cheyrezy [31] proponen el *Reactive Powder Concrete* (RPC). Ambos produjeron versiones diferentes de un mortero fluido, con una óptima densidad obtenida por empaquetamiento de partículas, al cual aplicaron criterios básicos de diseño referentes a la composición, mezcla y posterior curado térmico para obtener un material dúctil con ultra alto desempeño, cuya ductilidad fue obtenida por la adición

de fibras de acero a la mezcla. Larrard y Sedran [30] alcanzaron 237,90 MPa de resistencia a la compresión, usando un sistema de curado que inicialmente contempla sumergir los especímenes en agua por 4 días a 90 °C y posteriormente a temperatura ambiente. Richard y Cheyrezy [31] emprendieron un programa experimental para desarrollar concretos con resistencias entre 200 y 800 MPa mejorando la densidad compactada por optimización de la mezcla granular y la aplicación de presión antes y durante el ajuste.

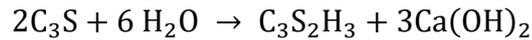
En esa misma década, ensayos de flexión en tres puntos, sobre elementos de viga fabricadas con FRC incluyendo muesca en la mitad del vano fueron realizados, para determinar la localización de la deformación, obteniendo que la misma siempre fue delimitada en el plano de la muesca mientras que en el resto del elemento se presentaron deformaciones inelásticas despreciables. Esto minimiza la energía disipada sobre el volumen del espécimen y toda la energía absorbida puede ser directamente atribuida a la fractura a lo largo de la muesca, pudiéndose correlacionar a la respuesta del material.

Al comparar con los resultados de los ensayos usando tracción directa, se observa que la variabilidad en la determinación de la resistencia a la tracción fue reducida y el ensayo usando vigas fue más adecuado para caracterizar el comportamiento post agrietamiento del material, midiendo bien sea la carga versus la abertura de la muesca o la carga versus la deflexión. Esos mismos ensayos fueron extrapolados y usados en épocas recientes para caracterizar el comportamiento en la tracción del UHPFRC, ejemplo de ello puede ser encontrado en Gopalaratman y Gettu [32], Barnett et al. [33] y Richard P. [34], quienes obtuvieron resistencia a la flexión en rangos que varían de 25 a 50 MPa.

Desde el año 2000 hasta el presente la pesquisa académica profundiza el conocimiento en el Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete como una versión mejorada del FRC y del RPC, ubicando estas dos últimas tecnologías del concreto como antecesoras de este nuevo material. Las extraordinarias propiedades mecánicas del UHPFRC superaron la antigua desconfianza que los ingenieros calculistas tenían sobre el FRC y su método de diseño. En la actualidad la comunidad científica internacional invierte gran cantidad de recursos en pesquisa para la continua optimización del UHPFRC proyectándolo como el concreto del presente y del futuro. Países con las mayores economías del mundo han establecido normas para el diseño estructural y grandes obras de ingeniería han sido construidas, ubicando al UHPFRC en la punta del iceberg en tecnología del concreto.

2.2 HIDRATACION Y MICROESTRUCTURA

Wang et al. [35] describen la hidratación de materiales cementosos del UHPFRC similar a la del concreto convencional. Primero, el cemento Portland se hidrata para formar hidrato de silicato de calcio e hidróxido de calcio, luego las mezclas minerales (como el humo de sílice) reaccionan con hidróxido de calcio para formar hidrato de silicato de calcio (C-S-H).



La Figura 1 muestra el desarrollo de las fases dependientes del tiempo en el concreto convencional (RC) y en el UHPRC a temperatura ambiente. La cantidad de portlandita es mucho más baja en el UHPRC, lo que indica que las reacciones puzolánicas aún están incompletas. Los rayos X no detectaron calcita en el UHPRC lo que puede indicar que no hay una fase de carbonatación considerable.

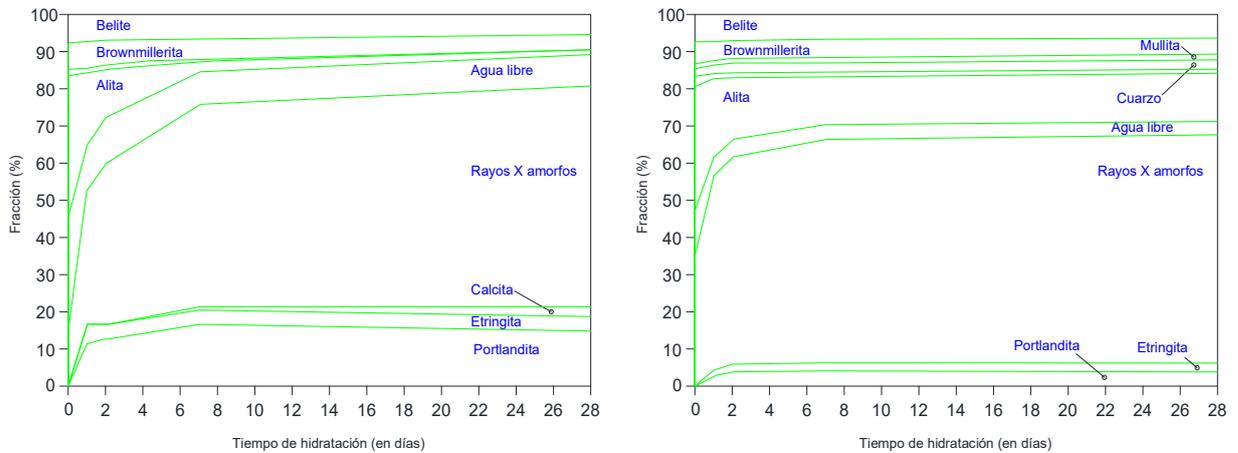


Figura 1: Fases dependientes del tiempo, RC y UHPRC. Fuente: Wang et al. [35]

Wang et al. [35] muestran en la Figura 2 la imagen tomada por un microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope), se visualiza la alta densidad del UHPRC endurecido, con una zona de transición intersticial muy compacta sin poros obvios, originada por la baja relación w/c, la hidratación del cemento y por el efecto puzolánico de SF y GGBS.

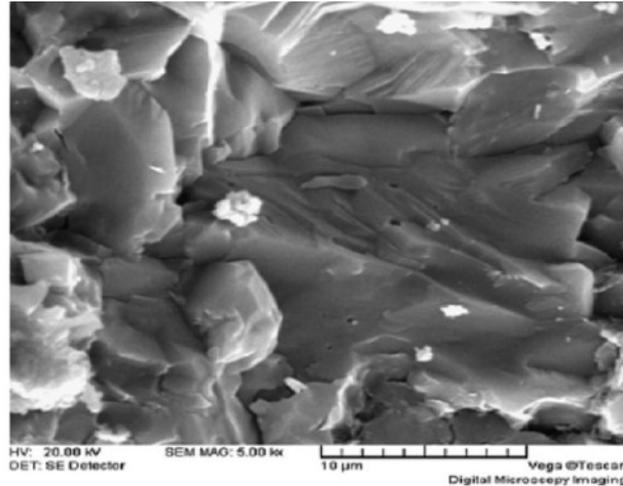


Figura 2: Matriz del UHPRC endurecida usando SEM. Fuente: Wang et al. [35]

2.3 DEFINICIÓN

Hunger M. [36] define al UHPFRC como un material de construcción nuevo, con una matriz de concreto que incluye fibras y partículas extremadamente finas a las que llama polvos.

Los polvos son clasificados de dos maneras: (i) en función del tamaño de las partículas, esto es, son granulares con tamaño inferior a 0,125 mm y agregados si es superior a 0,125 mm; (ii) en función del tipo de polvo, esto es, reactivos y no reactivos. El autor indica que el uso de polvos no reactivos consume menos energía y son más baratos, adicionalmente Taylor [37] señala que usar polvos no reactivos puede proporcionar un efecto de relleno físico a la mezcla de concreto, ya que las partículas finas llenan los huecos entre las partículas más gruesas.

En general la literatura en este campo muestra que la fracción vacía en concreto puede minimizarse significativamente incluyendo polvos finos no reactivos con tamaños de partícula apropiados, lo que conduce a densificar la mezcla y mejorar la trabajabilidad del concreto en estado fresco, así como también incrementar la durabilidad y propiedades mecánicas en el estado endurecido.

Recientemente Hela et al. [38] realizan una comparación del diseño de mezcla y proceso de fabricación del UHPFRC y RPC, las principales diferencias encontradas fueron, en primer lugar, que la resistencia a la compresión a los 28 días de curado tuvo una diferencia del 5% incorporando 27,5% más cemento en el RPC y, en segundo lugar, que los pesos de las mezclas en estado fresco o endurecido presentaron una diferencia del 3%, siendo mayor en el RPC.

Tal vez lo indicado en el párrafo anterior sea uno de los motivos por el cual el uso y la industrialización del RPC como material estructural quedó rezagado en comparación al UHPFRC desde su invención casi en paralelo en los años 90. No en vano el UHPFRC ha ganado un protagonismo significativo dentro de la comunidad científica, reflejado en congresos, pesquisa y códigos de diseño establecidos, así como también en la construcción de grandes obras de ingeniería.

Ángel López [39] define al UHPFRC como un material compuesto hidráulico a base de cemento, el cual combina tres tecnologías del concreto:

- (i) Alta resistencia característica a la compresión superior a 130 MPa.
- (ii) Comportamiento dúctil bajo tracción por la presencia de fibras, las cuales pueden proveer o no un pseudo endurecimiento por deformación en la curva esfuerzo-deformación acompañada de múltiples microfisuras, dependiendo del volumen, relación de aspecto y distribución de la fibra.
- (iii) Una selección especial de agregados finos y ultra finos que proporcionan empaquetamiento de partículas densas, alta durabilidad y cierto grado de fluidez dentro del elemento estructural.

Walraven J. [40] al igual que el autor citado anteriormente, propone un valor mínimo de 130 MPa para la resistencia a la compresión, garantizando una mistura que equilibre la relación costo-beneficio.

La AFGC [41] indica que una mezcla puede ser definida como UHPFRC si cumple con las siguientes características:

- (i) 150 MPa en su resistencia a la compresión característica a los 28 días de curado.
- (ii) 7 MPa de resistencia a la tracción uniaxial a los 28 días de curado.
- (iii) Alta resistencia a la tracción después del agrietamiento, obtenida principalmente por la adición de una cantidad de fibras de acero superior al 2% en volumen, logrando incrementar la ductilidad a tal punto que puede prescindirse del acero pasivo.

- (iv) Diseño de mezclas con alto contenido de aglomerantes, para minimizar la porosidad capilar y proteger las fibras dentro de la matriz, garantizando mayor durabilidad.

El ACI 239R-18 [42] define al concreto de ultra alto desempeño como aquel que alcanza como mínimo 150 MPa de resistencia a la compresión, 6 MPa de resistencia a la tracción uniaxial y 40 GPa de módulo de elasticidad.

En este trabajo definiremos al UHPFRC como un material compuesto que alcanza valores de resistencia promedio superiores a: (i) 150 MPa en compresión uniaxial, (ii) 8 MPa en tracción uniaxial, y (iii) 20 MPa en la flexión, a los 28 días de curado, presentando endurecimiento por deformación cuando sometido a esfuerzos de tracción, usando en la mezcla 2% de fibra de acero y partículas con 0,6 mm de tamaño máximo.

2.4 ALCANZAR LA ULTRA ALTA RESISTENCIA

Camacho E. [43] señala que el principio básico para obtener ultra alta resistencia a la compresión radica en que el agua no usada por el cemento en el proceso de hidratación tiene que ser lo menos posible, entonces la porosidad capilar y sus conexiones serán mínimas, incrementando resistencia y durabilidad. Schmidt y Fehling [44] señalan cuatro principios que deben ser cumplidos para alcanzar ultra-alta resistencia y durabilidad en el concreto:

- (i) Relación de agua-cemento baja, de aproximadamente 0.20 a 0.25, que da como resultado una estructura muy densa y fuerte, minimizando la capilaridad de los poros y evitando el transporte de gases y líquidos nocivos hacia y a través del concreto.
- (ii) Alto empaquetamiento de partículas, especialmente para el agregado fino, reduciendo la demanda de agua para el concreto fresco, incrementando la resistencia a la compresión y la fragilidad del concreto.
- (iii) Uso de una gran cantidad de superplastificante, para ajustar la trabajabilidad.
- (iv) Uso de fibras para incrementar la resistencia a la tracción, flexión, corte y hacer el concreto suficientemente dúctil.

En este trabajo se considerarán los principios mencionados en el párrafo anterior a excepción del ítem (ii), la idea es obtener una mezcla de concreto con un práctico proceso de fabricación,

característica que no es compatible con la enorme inversión de horas hombre que demanda el proceso de molienda del material hasta atingir la granulometría adecuada para el empaquetamiento de partículas.

2.5 CLASIFICACIÓN

Según el tipo de material Camacho E. [43] clasifica al UHPFRC como la combinación de tres tecnologías del concreto: (i) concreto autocompactante o *Self Compacting Concrete* (SCC); (ii) concreto armado con fibras o *Fibre Reinforced Concrete* (FRC); y (iii) concreto de alto rendimiento o *High Performance Concrete* (HPC); ver Figura 3:

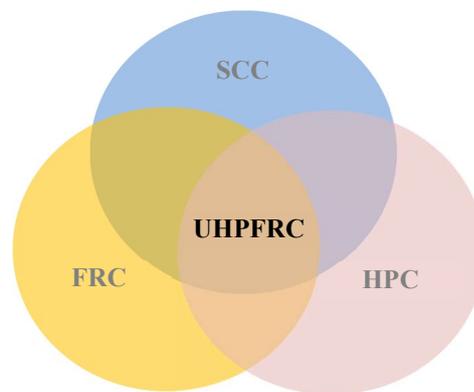


Figura 3: Clasificación del UHPFRC. Fuente: Camacho E. [43]

Reinhardt et al. [45], Parra-Montesinos et al. [46] y la JSCE [47] clasifican al UHPFRC dentro de los compuestos cementicios reforzados con fibras de alto desempeño o *High Performance Fiber Reinforced Cement Composite* (HPFRCC), los cuales abarcan todos los hormigones que exhiben una respuesta de endurecimiento por deformación en el diagrama esfuerzo-deformación en tracción, acompañados de múltiples grietas y una capacidad de absorción de energía relativamente grande.

Los criterios de clasificación del FRC en función de su comportamiento a tracción son también aplicables al UHPFRC. El trabajo de Naaman y Reinhardt [48] debe ser primeramente citado, los autores realizan una tipificación en función de la respuesta del material, pudiendo presentar alguno de los dos comportamientos siguientes:

- (i) Endurecimiento por deformación o *Tensile Strain Hardening* (TSH), en ese caso la resistencia a la tracción cuando la primera grieta ocurre es menor que la resistencia

máxima en la sección agrietada. La diferencia con el UHPFRC radica en las dos condiciones que deben ser cumplidas en el FRC, en primer lugar, el módulo de elasticidad debe ser superior a 10500 MPa cuando en el UHPFRC debe ser aproximadamente cuatro veces mayor y en segundo lugar la deformación característica pico debe igualar o ser más alta que 5‰ cuando en el UHPFRC está entre 3-4‰.

- (ii) Ablandamiento por deformación o *Tensile Strain Softening* (TSS), en ese caso la resistencia de tracción en la flexión cuando la primera grieta ocurre es mayor que la resistencia máxima en la sección agrietada.

Basándose en la referencia anterior, Wille et al. [49] establecen una clasificación en cuatro niveles, ver Figura 4, las cuales varían en función de la respuesta (σ vs ε) en tracción uniaxial y del esfuerzo vs deflexión (σ vs δ) en flexión, como se describe a continuación:

- (i) Nivel 0: corresponde a elementos sin fibras, presenta comportamiento elástico lineal hasta que ocurre la primera grieta, el tipo de falla es frágil.
- (ii) Nivel 1: corresponde a elementos con comportamiento elástico lineal hasta que la primera grieta ocurre y luego presenta una curva suavizada. Sobre sollicitaciones de tracción directa el esfuerzo de agrietamiento en la primera grieta (σ_{cc}) es mayor que la resistencia a la tracción o resistencia post-agrietamiento (σ_{pc}). Sobre sollicitaciones de flexión simple el módulo de ruptura en la primera grieta (σ_{f1}) es mayor que la resistencia a la flexión equivalente (σ_{f2}).
- (iii) Nivel 2: corresponde a elementos con comportamiento elástico lineal hasta que la primera grieta ocurre. Sobre sollicitaciones de tracción directa presenta una curva suavizada, el esfuerzo de agrietamiento en la primera grieta (σ_{cc}) es mayor que la resistencia a la tracción o resistencia post-agrietamiento (σ_{pc}). Sobre sollicitaciones de flexión simple presenta una deflexión endurecida, el módulo de ruptura en la primera grieta (σ_{f1}) es menor o igual a la resistencia a la flexión equivalente (σ_{f2}), luego presenta un comportamiento suavizado.
- (iv) Nivel 3: corresponde a elementos con comportamiento elástico lineal hasta que la primera grieta ocurre. Sobre sollicitaciones de tracción directa presenta una curva suavizada, el esfuerzo de agrietamiento en la primera grieta (σ_{cc}) es mayor que la

resistencia a la tracción o resistencia post-agrietamiento (σ_{pc}). Sobre solicitaciones de flexión simple presenta una deflexión endurecida, el módulo de ruptura en la primera grieta (σ_{f1}) es menor o igual a la resistencia a la flexión equivalente (σ_{f2}), luego presenta un comportamiento suavizado.

- (v) Nivel 4: corresponde a elementos con comportamiento elástico lineal hasta que la primera grieta ocurre. Sobre solicitaciones de tracción directa presenta endurecimiento por deformación, el esfuerzo de agrietamiento en la primera grieta (σ_{cc}) es menor que la resistencia a la tracción o resistencia post-agrietamiento (σ_{pc}). Sobre solicitaciones de flexión simple presenta una deflexión endurecida, el módulo de ruptura en la primera grieta (σ_{f1}) es menor a la resistencia a la flexión equivalente (σ_{f2}), luego presenta un comportamiento suavizado. La energía de fractura es mayor o igual a 50 kJ/m³.

La norma Suiza [50] clasifica el desempeño del UHPFRC en tres tipos:

- (i) UO, que corresponde al material con deformación suavizada y resistencia al agrietamiento mínima de 7 MPa sin incluir endurecimiento.
- (ii) UA, que corresponde al material con bajo endurecimiento por deformación y resistencia al agrietamiento mínima de 7 MPa, establecen una tasa de endurecimiento (γ) de 1,1 y una deformación de 1,5 ‰ en la fase final del endurecimiento.
- (iii) UB, corresponde al material con endurecimiento por deformación, con mejoras en resistencia y ductilidad, valores mínimos de 8,5 MPa para la resistencia al agrietamiento, así como valores mínimos de $\gamma=1,2$ y deformación de 2,5 ‰ en la fase final del endurecimiento.

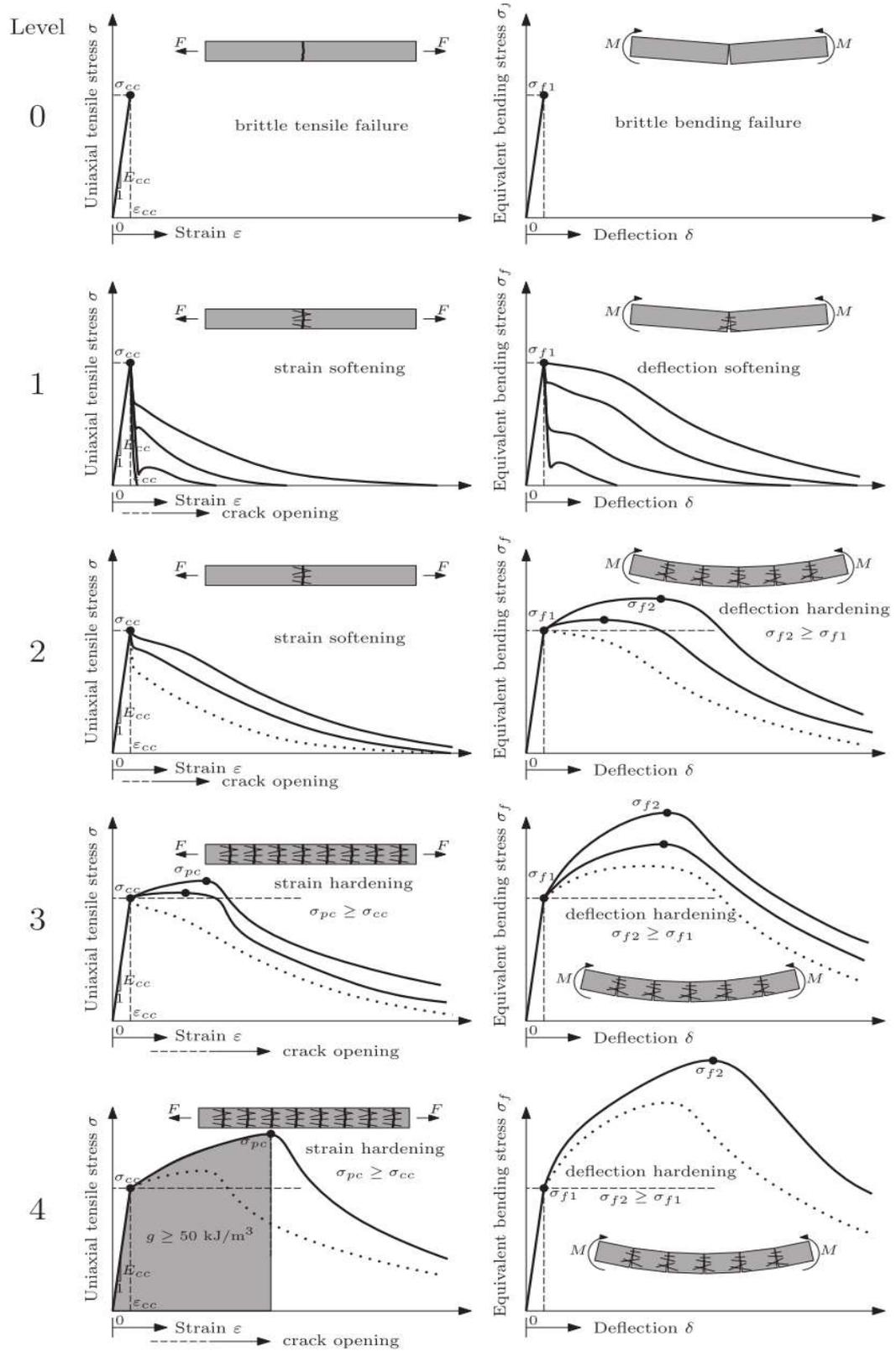


Figura 4: Clasificación propuesta por Wille et al. Fuente: Wille, et al. [49].

2.6 PRODUCCIÓN

El diseño de mezclas del UHPFRC se diferencia del concreto tradicional por excluir el agregado grueso y usar arena fina. Incluye aditivos minerales que actúan como microfiller rellenando los pequeños vacíos entre partículas, mejorando así la zona intersticial y también reaccionando con el hidróxido de calcio para incrementar la resistencia final. El superplastificante es usado como aditivo químico para mejorar la trabajabilidad y disminuir la relación agua/aglomerante o water/binder (w/b) que generalmente es menor o igual a 0,20.

En la Tabla 1 podemos observar varios diseños de mezcla de distintos autores y comparar los valores de la resistencia a la compresión obtenida con y sin el uso de fibras en la mistura.

Tabla 1: Diseños de mezcla de varios autores. .

Referencia	(kg/m ³)						w/b	w/c	%	MPa	
	Ce-mento	GGBS	SF	W	Cuarzo	Arena				Fi-bras	fck
Hassan [5]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	2	150,56	121,32
Yu [6]	874,9	0	43,7	0	0	1273,4	0,22	0,23	2,5	148,6	94,2
Habel [7]	1050	0	275,0	0	0	730	0,14	0,18	6	168	-
Yang [8]	657	429,8	119,4	0	0	1050	0,15	0,28	2	190	-
Bache [21]	300	0	100,0	0	0	0	0,19	0,25	0	0	130
Larrad [30]	1080,6	0	334,2	0	0	813,2	0,14	0,18	0	237,9	164,9
Rossi [51]	1050,1	0	268,1	0	0	514,3	0,16	0,20	5	205	-
Lim [52]	543,41	0	80,05	0	0	1241,71	0,21	0,24	1,5	121	-
Graybeal [53]	710	0	230	0	210	1020	0,14	0,15	2	193,0	126,0
Thanh [54]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	2,5	185,9	143,9
Toledo [55]	1011	0	58	76	0	962	0,17	0,16	2	162,1	-
Wu [56]	863	315	216	0	0	1079	0,18	0,21	2	-	118
Lampropoulos [57]	657	418	119	0	0	1051	0,15	0,28	3	164,0	-
Hoang [58]	795,40	0	168,60	0	198,40	971	0,16	0,24	1,5	211,69	216,66
Kahanji [59]	967	0	251	0	0	675	0,20	0,25	1	154,60	-
Wu [60]	472	315	262	0	0	1049	0,17	0,38	2	143,6	98,3

f'ck *: Resistencia a la compresión sin usar fibras en la mezcla (UHPRC).

W: microfibras de Wollastonita

Como se conoce comúnmente, las propiedades del concreto están estrechamente relacionadas con las composiciones y características de los materiales utilizados, por lo tanto, para diseñar y producir de forma adecuada un concreto con propiedades superiores es esencial una comprensión de las características básicas de las materias primas, Yu et al. [61].

Es necesario saber el grado de importancia de cada componente dentro de la mezcla, por tal motivo el trabajo experimental de nuestra pesquisa, explicado más adelante, se inicia con estudios estadísticos que reflejan la influencia o contribución que tienen los principales elementos constituyentes del UHPFRC en el desempeño del material.

2.7 MATERIALES

- (i) Cemento: mezclas de UHPFRC contienen un alto contenido de cemento y una relación reducida de w/c, lo cual puede originar serios problemas de retracción térmica debido al excesivo calor de hidratación del cemento, principalmente originado por la reacción exotérmica entre el CaO del cemento y el agua, ese es el motivo por el cual se recomienda la sustitución parcial de cantidades de cemento por aditivos minerales sustentables.
- (ii) Escoria de alto horno (GGBS): es un producto de desecho de la fabricación de hierro y se puede utilizar como un reemplazo parcial para el cemento Portland. Su fabricación requiere menos de una quinta parte de la energía y produce 1/50 parte de las emisiones de dióxido de carbono, adicionalmente la escoria no requiere de la extracción de materiales vírgenes y la escoria utilizada en su producción no entrará en el flujo de residuos, GGBS and Sustainability [62]. El uso de GGBS generalmente mejora el rendimiento a largo plazo y la durabilidad del concreto y ahorra en costos de materiales, Naaman y Wille [63].
- (iii) Humo de Sílice (SF): es un material altamente reactivo, es un residuo de la producción de ciertos metales en hornos eléctricos. Su contribución en el desarrollo de UHPFRC puede ser descrita de la siguiente manera:
 - a. Crea en el concreto más contenido del durable C-S-H (hidrato silicato de calcio) al reaccionar con el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
 - b. Al ser usado como reemplazo parcial del cemento puede controlar la velocidad y la cantidad de calor de hidratación en el concreto y así reducir el estrés térmico, es decir, puede prevenir el agrietamiento térmico del concreto.
 - c. Incrementa la cohesión del concreto fresco, reduciendo la segregación y el sangrado.
 - d. Al ser partículas muy finas pueden entrar en los espacios vacíos del cemento y mejorar la densidad de relleno del concreto.

El humo de sílice está compuesto por partículas muy finas que pueden ocupar la zona intersticial y junto a la GGBS aumentar la densidad de la mezcla. El concreto que la usa requiere mucha más agua que el concreto sin humo de sílice, por lo tanto, la relación w/b no puede reducirse a valores muy bajos para aumentar la resistencia del concreto, ya que puede conducir a una compactación muy pobre del concreto y disminuir su resistencia. Es

necesario un constituyente especial que ayude a obtener una trabajabilidad razonable en el proceso de fabricación y vaciado de la mezcla, ese material especial es un aditivo reductor de agua, un superplastificante.

- (iv) Superplastificante: los aditivos usados en la fabricación del UHPFRC pertenecen a la llamada 3ra generación, los cuales pueden reducir el contenido de agua hasta en un 40%, también son llamados plastificantes basados en policarboxilatos, Camacho E. [43]. El superplastificante ayuda a las partículas de los aglomerantes a dispersarse dentro de la mistura, que tiene un bajo contenido de agua, hasta alcanzar una adecuada trabajabilidad. Soutsos et al. [64] probaron tres tipos de superplastificante para producir concreto de alto desempeño, usaron un polímero a base de naftaleno sulfonato, un polímero a base de policarboxilato en polvo y un polímero a base de policarboxilato líquido, demostrando que éste último fue el más eficiente, de allí la decisión de usar ese tipo de aditivo en la presente pesquisa.
- (v) Arena de sílice: el UHPFRC usa agregados finos como por ejemplo la arena de sílice, la cual contiene una alta proporción de sílice (más del 99% de SiO₂) en la forma de cuarzo. A diferencia de la arena ordinaria, la arena de sílice tiene propiedades químicas adicionales a las físicas, con bajos niveles de impurezas nocivas. El estudio de Zanni et al. [65] indica que la actividad puzolana del concreto fue 40% más alta al usar arena de sílice después de 48 horas en tratamiento térmico a 90°C. Thanh Le [54] demostró que, usando partículas de arena de sílice con tamaño máximo en el rango de 0,05 mm a 1 mm, la heterogeneidad del concreto fue disminuida y un alto volumen de fibras pueden ser adicionadas a la mezcla para aumentar la ductilidad.
- (vi) Agua: La calidad del agua usada para fabricar UHPFRC no tiene requerimientos específicos, generalmente se usa agua corriente en cantidades bien pequeñas. Su función principal es la hidratación de los materiales cementicios en la pasta para crear la trabajabilidad inicial del concreto fresco. Con mayor contenido de agua la trabajabilidad es alta y reduce el contenido de aire atrapado en la mezcla aumentando la resistencia, por tanto, la reducción de agua debe ser limitada a obtener fluidez y a permitir la salida del aire atrapado. Una dosis apropiada de agua debe ser seleccionada para impedir una posible sedimentación de las fibras, garantizar mínima capilaridad y mínimo contenido de aire atrapado.

2.8 FIBRAS

Las fibras son responsables de mitigar la falla frágil y permitir el soporte de cargas aun después del agrietamiento del elemento estructural, por lo tanto, la cantidad, distribución, orientación y tipo de fibra es de vital importancia en el estudio del UHPFRC. Su presencia en la mezcla causa reducción de la trabajabilidad e incrementa la formación de bolas de aire cuando se está mezclando, para evitar esos problemas Markovic Ivan [66] recomienda que la mezcla sea autocompactante, de allí la necesidad de usar superplastificante, arena fina y un tamaño de fibra pequeño. Por otro lado, si la idea es producir UHPFRC para actividades de refuerzo en elementos estructurales una mezcla tixotrópica sería más adecuada.

Las fibras tienen el papel protagonista en el comportamiento post-agrietamiento del UHPFRC cuando es sometido a esfuerzos de tracción, su función principal en la mezcla es aumentar la ductilidad, que puede ser calculada mediante la determinación de la energía de fractura. Para alcanzar una alta energía de fractura es necesario que la resistencia a la tracción y al corte de las fibras sea más alta que la resistencia a la adherencia fibra-matriz. Si la matriz de concreto alrededor de la fibra es lo suficientemente fuerte y densa para garantizar adecuada adherencia y permitir la transferencia de cargas entre fibra-matriz las fibras pueden aumentar la capacidad de carga a tracción. Cuando la matriz de concreto se agrieta, la resistencia a la adherencia de matriz-fibras tienen un rol importante porque impide que las fibras se despeguen y sean haladas de la matriz.

La efectividad del comportamiento descrito en el párrafo anterior depende de la adecuada distribución y orientación aleatoria de las fibras, lo que afecta significativamente el comportamiento constitutivo en tracción y flexión del UHPFRC, pudiendo generar mucha variabilidad en los resultados experimentales.

Varios estudios han sido enfocados en la determinación del más adecuado tipo, orientación y cantidad de fibras en la matriz para producir el mejor desempeño, Doo et al. [67] demostraron que los mayores valores de resistencia a la adherencia son proporcionados por fibras deformadas (retorcidas, con gancho en ambos o un extremo) con ángulos de inclinación de 30° y 45° respecto a la horizontal, y que la mayor resistencia a la tracción se obtiene usando las fibras rectas. Kang et al. [68] estudiaron los efectos sobre la resistencia a la flexión, demostraron que la distribución de las fibras tuvo influencia significativa en la resistencia última a la flexión y

leve influencia en la resistencia cuando la primera grieta aparece. También verificaron, usando una técnica de análisis por rayos-x, que vaciar el concreto por capas, distribuyendo la mezcla desde un extremo al otro, arrojó la mejor distribución de las fibras dentro de la matriz. Ejemplos del uso eficiente de ese sistema de vaciado pueden ser encontrados en Doo et al. [67], Stiel et al. [69] y Graybeal B. [70].

Los efectos de la distribución y orientación de las fibras dentro de la matriz de concreto han sido investigados ensayando cuerpos de prueba tipo Dog-Bone a tracción uniaxial. Kang et al. [71] demostraron que estos efectos fueron pequeños en el comportamiento previo a la fisuración, pero significativos en el comportamiento post-pico.

Park et al. [72] trabajaron con cuatro clases de macrofibras híbridas (de diferentes longitudes y geometría) y un tipo de microfibras de acero. Los especímenes producidos con macrofibras con geometría torsionada junto a microfibras de acero proporcionaron los mejores resultados en el comportamiento post-pico. Hassan et al. [5] y Tran et al. [73] investigaron los efectos de las fibras de acero sobre la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y el comportamiento post-pico a diferentes edades. Obtuvieron una curva de esfuerzo-deformación completa para UHPFRC que puede ser usada en modelos numéricos avanzados.

Kang et al. [74] investigaron experimentalmente el efecto de cuatro tipos de mezcla reforzadas con fibra híbrida (usando fibras rectas de acero de 0,2 mm de diámetro y varias microfibras de basalto, polialcohol vinílico y de polietileno) sobre las propiedades mecánicas del material. Los resultados mostraron que la combinación de una fibra sintética con alta resistencia como la fibra de polietileno y la fibra de acero, pueden mejorar el comportamiento de tracción de UHPFRC.

Es importante también mencionar las desventajas que implica usar fibras de acero en la mezcla. En primer lugar, incrementa el costo de producción, Camacho E. [43] señala que un contenido de fibras en un rango entre 1,5% y 2,5% puede representar entre un 60% a 80% del costo total del material, y en segundo lugar si el contenido de fibras es excedido la reología es afectada por la aglomeración de fibras en la mezcla con la consecuente disminución de la resistencia. De allí la selección de los dos tipos de fibras de acero consideradas en esta pesquisa: (i) fibra corta importada, comúnmente usada en la pesquisa internacional, con longitud (l_f) de 13 mm y diámetro (d_f) de 0,2 mm; y (ii) fibra larga de producción nacional, con $l_f = 35$ mm y $d_f = 0,55$ mm.

2.9 MEZCLADO

El proceso más utilizado en la bibliografía consiste primeramente en mezclar los materiales secos por cinco minutos, colocándolos en la mezcladora en el siguiente orden: humo de sílice, cemento, escoria de alto horno y arena. Luego se debe colocar en la mezcla el superplastificante previamente mezclado con el agua, todos los materiales deben mezclarse por aprox. 10 minutos más, hasta que la mezcla se convierta en una húmeda pasta de concreto, en ese estado se añaden las fibras y se mezcla todo por dos minutos más. Ese método es rápido y simple de aplicar, por tanto, será el usado en este trabajo.

Existen otros métodos de mezclado, por ejemplo, Markovic [66] adiciona el humo de sílice con el agua y el superplastificante al final de la mezcla, demorando entre 6 a 10 minutos todo el proceso. Bonneau O. [75] y Graybeal B. [76] primeramente diluyen la mitad de la dosis de superplastificante con el agua y lo adicionan a la mezcla seca, el resto de la dosis la añaden entre 2 a 3 minutos después, el tiempo de mezclado es de 18 minutos con Bonneau y 15 minutos con Graybeal, con tiempos adicionales de 9 y 2 minutos respectivamente después de adicionar las fibras.

2.10 CURADO

Las recomendaciones de la AFGC [77] define criterios para la aplicación de tratamiento térmico en el curado del UHPFRC, el cual debe ser aplicado después del fraguado de la mezcla a una temperatura próxima a los 90°C. También indica los principales efectos del tratamiento térmico como:

- (i) Resistencias más rápidas del concreto (en compresión y tracción).
- (ii) Los efectos demorados de retracción y fluencia disminuyen sustancialmente una vez que el tratamiento térmico es finalizado.
- (iii) La durabilidad se incrementa considerablemente.

Thanh Le [54] propone el curado térmico inmediatamente después del vaciado de la mezcla en los moldes, propone almacenar los especímenes entre 24 a 48 horas con una cobertura de plástico para prevenir pérdida de humedad y también para permitir el fraguado de la mezcla, evitando el riesgo de formación retardada de etringita que pueda causar efectos de agrietamiento

indeseables en el concreto endurecido. Después de ese primer paso los especímenes deben ser separados entre los que van o no recibir el tratamiento térmico. El tratamiento de curado con calor mejora la microestructura de la mezcla, lo cual resulta en una aceleración de la resistencia y de la energía de fractura en un tiempo más corto. En el UHPFRC, la reacción puzolánica entre el humo de sílice y el hidróxido de calcio que nace de la hidratación del cemento es bastante rápida, porque está respaldada por el tratamiento térmico. Ella se forma en la zona intersticial, ocupando vacíos e incrementando la adherencia entre la pasta cementicia y las partículas de agregado, mejorando la resistencia. Información de los efectos del tipo de cura en el UHPFRC puede ser profundizada en Kahanji et al. [59].

2.11 SUSTENTABILIDAD, APLICACIONES Y LIMITACIONES

Debe existir un equilibrio en las prácticas de la ingeniería civil que permitan el desarrollo actual de la infraestructura sin extinguir su continuidad en el futuro. Eso demanda el uso responsable de los recursos en corto, mediano y largo plazo, para que sean mínimamente invasivos del ambiente.

Ultra alta resistencia en el concreto implica el uso de mayores cantidades de cemento, por tanto, su disminución o sustitución parcial por residuos industriales sin afectar el desempeño del material es una acción que considera criterios de sustentabilidad aplicables en corto plazo.

La escoria de alto horno o GGBS es uno de los materiales sustituyentes del cemento de uso más común, residuos industriales diferentes del GGBS como vidrio roto reciclado o Recycled Glass Cullet (RGC) Yang et al. [8] y ceniza molidas de cáscara de arroz o Rice Husk Ash (RHA) Tuan et al. [78]. También se han incluido aditivos minerales a la mezcla para mejorar el desempeño, Toledo et al. [55] usaron Wollastonita, Liu et al. [79] emplearon basalto triturado y Kang et al. [80] utilizaron humo de sílice de zirconio.

El uso de UHPFRC en obras de ingeniería demanda menos cantidad de material y las hace significativamente más duraderas. Con menores cantidades de material tendremos también menos afectaciones sobre el ambiente, aspectos que, a nivel de conservación, repercutirán positivamente a mediano y largo plazo. Esto ocurre porque el alto desempeño del UHPFRC permite la construcción de elementos estructurales con menor geometría comparado con el concreto tradicional bajo las mismas cargas de servicio.

Criterios de sustentabilidad, resistencia, seguridad y durabilidad en el diseño estructural son cumplidos al usar de esta nueva tecnología del concreto. Su uso en obras de ingeniería civil es diverso, la gran capacidad de absorción de energía que posee lo hace adecuado para aplicaciones donde existen altas tasas de liberación de energía. Este es el caso de las cargas dinámicas y de impacto que actúan sobre los miembros estructurales, de allí lo apropiado de usarlo para la construcción o reparación de puentes. También se puede utilizar para fortalecer y proteger edificios ya existentes o para diseñar nuevos miembros estructurales. De hecho, el uso de UHPFRC ya mostró buenos resultados para minimizar los efectos dañinos causados por eventos intencionales, como ataques terroristas, Bindiganavile et al. [81] y Parant et al. [82].

Una amplia gama de mezclas patentadas de UHPC están disponibles en el mercado estadounidense e internacional. Ejemplos de mezclas patentadas son: (i) el concreto Beton Special Industrial (BSI) desarrollado por Eiffage; (ii) Cemtec desarrollado por LCPC; y (iii) concreto Ductal® resultante de una investigación conjunta de Bouygues, LaFarge y Rhodia. El concreto Ductal®, comercializado por LaFarge y Bouygues es el único producto UHPC patentado en el mercado estadounidense, Tadros y Morcous [83].

En Estados Unidos en el año 1993, la administración federal de carreteras o Federal Highway Administration (FHWA) inició un programa nacional para introducir concreto de alto desempeño en la construcción de puentes y mostrar las ventajas de usar UHPFRC. La primera obra se inició dos años después, en el estado de Nebraska, un puente de 69 m fue montado, se usaron siete vigas por vano construidas con HPC. En el año 2004, en Virginia, se construyó un puente vehicular de una vía, con 21 m de largo y con vigas Pi-Girders de 0,84 m de altura desarrolladas por el Massachusetts Institute of Technology (MIT).

En el año 2006 el puente de Mars Hill de la Figura 5 fue construido en Iowa usando UHPC con fibras para eliminar el acero pasivo. Una parte integral del proyecto fueron los ensayos de laboratorio de las vigas a gran escala para evaluar las capacidades de corte y flexión del nuevo diseño. Los resultados indicaron que la fuerza de cizallamiento y flexión de UHPC superaron los cálculos, Moore et al [84].

El uso de UHPFRC en Japón, siguiendo las recomendaciones de la JSCE [47], permite la construcción de estructuras con características innovadoras y sin precedentes, tales como estructuras ligeras y delgadas, puentes largos y vigas de baja altura. Varias obras de ingeniería han sido

construidas con este material, en la Figura 6 podemos observar aplicaciones del material en ambiente marino, obra ejecutada por Ductal [85].



Figura 5: Puente de Mars Hill, USA. Fuente: Tadros et al. [83]



Figura 6: Aeropuerto de Tokio, Japón. Fuente: Ductal [85].

En Francia, a mediados de los 90, se desarrolló el concreto de polvo reactivo o Reactive Powder Concrete (RPC) que más tarde se transformó en el concreto con ultra alto desempeño (UHPRC). En la Figuras 7, 8 y 9 se muestran varias obras construidas con UHPFRC, otras aplicaciones pueden ser consultadas en Naaman A. [86], Foster et al. [87], ACI-239R-18 [42] y Toutlemonde et al. [88].

Ángel López [39] señala que a pesar del uso del UHPFRC en diferentes estructuras y arquitecturas en todo el mundo, es justo reconocer que su uso es todavía limitado. Esto puede deberse a la falta de entusiasmo de la industria de la construcción, que siempre es reacia a utilizar ma-

teriales más costosos. Adicionalmente tanto compradores públicos como privados están preocupados principalmente por los costos iniciales de construcción y no están preparados para reconocer y cuantificar los beneficios a largo plazo de materiales más duraderos.

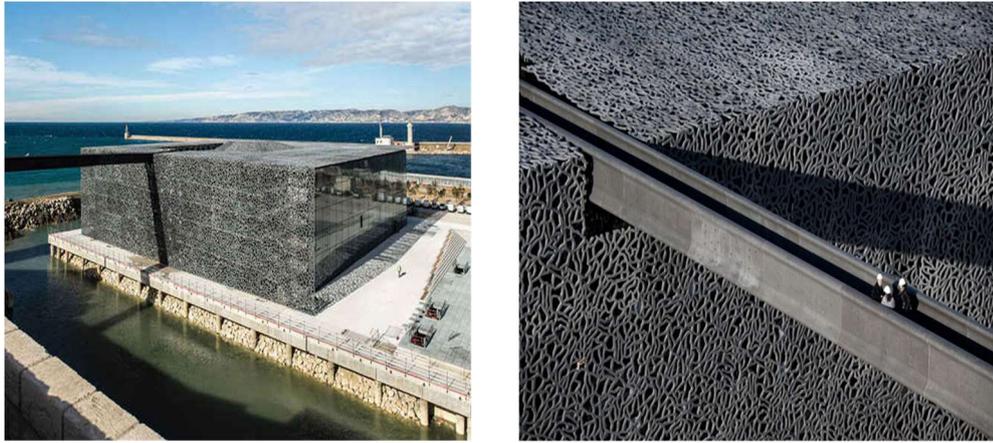


Figura 7: Museo de las Civilizaciones, Francia. Fuente: Tadros et al. [83]



Figura 8: a) Pasarela de la Paz, Corea del sur; b) Puente peatonal, Canada.

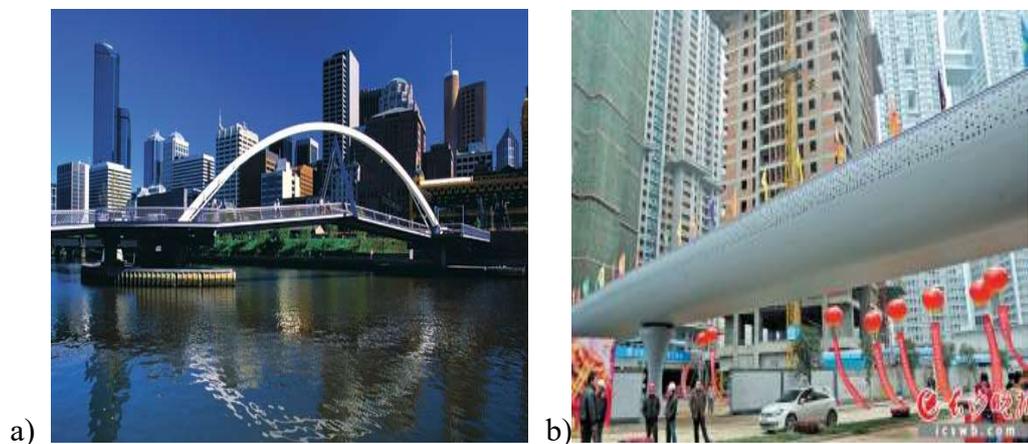


Figura 9: a) Puente peatonal, Australia; b) 1er puente con UHPFRC en China.

3 NORMAS

A continuación, se presenta una breve descripción de algunas normas internacionales para el uso y diseño del UHPFRC como material estructural. También son incluidas las referidas al FRC por ser el material antecesor y por contener recomendaciones aplicables al UHPFRC.

3.1 RILEM TC162-TDF: TEST AND DESIGN METHODS FOR FRC

Contempla los principios de diseño para el concreto reforzado con fibras de acero o Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC), basado en el enfoque de la mecánica de la fractura conocido como Modelo de la Grieta Ficticia o FCM siempre que exhiban comportamiento constitutivo suavizado en la tracción, contempla:

- (i) “ σ - ϵ Design Method” [89] publicado en el año 2000: contiene las recomendaciones para el diseño basadas en las relaciones esfuerzo y deformación unitaria (σ - ϵ), con los mismos fundamentos de diseño del concreto convencional y aplicable sólo en elementos que presenten resistencia a la compresión en el rango de 50-60 MPa.
- (ii) “Uni-axial tension test for steel fibre reinforced concrete” [90] publicado en el año 2001: contiene las recomendaciones para determinar las relaciones entre esfuerzos y abertura de la muesca (σ - ω) del SFRC a partir de un ensayo de tracción uniaxial. Se usa como probeta un cilindro con muesca perimetral ubicada en la mitad de su altura. El ensayo propuesto no está destinado a la determinación de la resistencia a la tracción y recomienda que la misma sea determinada a partir de los valores de resistencia a la compresión, utilizando relaciones empíricas derivadas del concreto armado. Sugiere tener cuidado en el trabajo experimental para evitar que las fibras de acero rompan antes de ser sacado de la matriz de concreto.
- (iii) “Design of steel fibre reinforced concrete using the σ - ω method: principles and applications” [91] publicado en junio del año 2002: contiene las recomendaciones para el diseño estructural de elementos SFRC sujetos a la combinación de fuerza axial, momento flector y fuerza cortante, así como también losas sujetas a retracción. El documento consta de nueve capítulos en los cuales se describen los principios de mecánica de la fractura, las relaciones σ - ω para el diseño, el análisis de la sección transversal para flexión y fuerzas

axiales, el comportamiento carga vs deflexión en vigas, capacidad de corte y ancho de grietas en losas con retracción restringida y cambios de temperatura.

- (iv) “Bending test” [92] publicado en noviembre del año 2002: contiene las recomendaciones para desarrollar el ensayo de flexión y evaluar el comportamiento a tracción del SFRC, ya sea en función de las áreas bajo la curva carga vs deflexión, o por la capacidad de soporte de cargas para un cierto valor de la deflexión, o por la abertura de muesca mejor conocida como Crack Mouth Opening Displacement (CMOD). En cada alternativa la data se obtiene a partir del ensayo de una viga simplemente apoyada que posee una muesca central inferior y es sometida a solicitaciones de flexión en tres puntos. Este ensayo sirve para conocer el límite de proporcionalidad o Limit of Proportionality (LOP), la resistencia de tracción en la flexión elástica equivalente y la resistencia de tracción en la flexión residual equivalente para varios valores de ω .

3.2 MODEL CODE (FIB)

La Fédération Internationale du Béton o Federação Internacional de Concreto Estrutural (fib) publica en el Model Code [93] nuevos desarrollos e ideas sobre estructuras de concreto y materiales estructurales. La publicación del año 2010 se enfoca en la vida útil e incluyen al FRC como un nuevo material estructural.

Esta norma se constituye como un aporte para futuras aplicaciones estructurales del FRC, sobre todo ante la falta de códigos de construcción internacionales sirvan de apoyo para masificar su uso hasta esa fecha. En el código, se realiza una clasificación de materiales para estandarizar la producción basada en el rendimiento y estimular un mercado abierto para todo tipo de fibra. A partir de la clasificación estándar, los simples modelos constitutivos introducidos permiten al diseñador identificar leyes constitutivas efectivas para el diseño, tratando de tener en cuenta la mayor contribución en términos de rendimiento y proporcionando una buena orientación para usos estructurales. Se tienen en cuenta nuevos conceptos básicos, como la longitud característica estructural, los nuevos factores relacionados con la distribución de la fibra y los beneficios de la redistribución estructural.

El FRC es considerado como un concreto especial, caracterizado por una cierta resistencia después del agrietamiento, por esta razón, la ley constitutiva más importante introducida es la respuesta de esfuerzo vs la abertura de la muesca (σ - ω) en tracción uniaxial, Prisco et al. [94].

3.3 JSCE

El Comité de Concreto de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón (JSCE) publicó en el año 2004 un borrador de las "Recomendaciones para el diseño y construcción de estructuras de concreto reforzado con fibra de ultra alta resistencia", JSCE [47].

El concreto reforzado con fibra de ultra alta resistencia es definido como aquel que tiene una resistencia a la compresión y a la tracción mucho mayor que el concreto convencional. Las recomendaciones prescriben un procedimiento para examinar el desempeño en cuanto a seguridad y servicialidad, que difieren del sistema de diseño convencional para hormigón armado, considerando la resistencia del UHPFRC ante solicitaciones de tracción sin colocar ninguna barra de refuerzo. Como el material tiene una microestructura muy densa, se espera que las estructuras que lo usan demuestren una alta durabilidad, las recomendaciones determinaron que la vida útil estándar es de 100 años en condiciones normales.

El documento fue dividido en catorce capítulos abordando los principios de diseño, cargas, análisis y seguridad estructural, desempeño en condiciones de servicio, durabilidad y fatiga, pretensado, construcción y concretado bajo condiciones climáticas de frío y calor.

En el año 2008 publican las "Recommendations for Design and Construction of Ultra-High Strength Fiber-Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (UHPFRCC)" [95], ese documento fue realizado para proyectar el uso del material en la industria, por tanto, contiene recomendaciones tanto para el diseño como para la construcción. Se proponen métodos de ensayos para determinar la tracción uniaxial y medir el ancho de grietas a partir de los cuales pueden ser establecidos valores de diseño para la resistencia a la tracción, deformación y ancho de grieta. También cubren aspectos relacionados a la verificación del desempeño estructural tomando en cuenta la resistencia a la tracción y la resistencia a las cargas de servicio tomando en cuenta el ancho de grietas.

3.4 ACI

Con la intención de fomentar el desarrollo y uso apropiado de nuevas y emergentes tecnologías del concreto el American Concrete Institute (ACI) publica a finales del año 2018 "Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report" presentado por el "ACI Committee 239" [42]. El documento es dividido en ocho capítulos en los cuales se establecen definiciones

para el UHPFRC y elementos asociados, se describe el proceso de producción, las propiedades mecánicas del material, el diseño estructural y aplicaciones en la industria. También identifican las áreas en las cuales la información del UHPFRC es menos desarrollada y describe las necesidades de pesquisa.

3.5 AFGC-SETRA

La asociación francesa de ingeniería civil o “Association Française de Génie Civil” (AFGC) y el “Service d'études techniques des routes et autoroutes” (SETRA) publicaron en el año 2002 las “Interim Recommendations for Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes” [41], documento científico y técnico de referencia que contiene las bases para el uso y diseño del UHPFRC como un material nuevo en aplicaciones de ingeniería civil. En el año 2013 se publica una nueva versión del documento “Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes” [77], que comprende los principales criterios de diseño y aplicaciones en Francia, convirtiéndose en las recomendaciones más populares hasta esa fecha en Europa.

El principal objetivo del documento es dar las directrices para fabricar una mezcla de UHPFRC que logre alcanzar alta resistencia a la tracción por la participación de las fibras después que la matriz de concreto se agriete. Dependiendo de la forma en que la estructura trabaja y de las solicitaciones actuantes es posible prescindir de refuerzos convencionales siempre que la resistencia a la tracción sea suficientemente alta.

Las recomendaciones son divididas en cuatro partes: (i) la primera parte proporciona las propiedades mecánicas y constitutivas del UHPFRC, incluyendo mejoras en la caracterización y métodos de diseño, también incluye los controles de calidad que deben ser seguidos en el proceso de producción; (ii) la segunda parte trata del análisis y diseño estructural consistente con las estipulaciones del Eurocode 2; (iii) la tercera parte se refiere a la durabilidad, tomando en cuenta los últimos desarrollos en términos de la resistencia al fuego y abrasión; y (iv) la cuarta parte se refiere al desarrollo sostenible del UHPFRC.

La AFGC caracteriza al UHPFRC de acuerdo con su comportamiento constitutivo en compresión y en tracción, que depende de la presencia de fibras. Dos aspectos principales son considerados: (i) la necesidad de una caracterización precisa de su resistencia a la tracción, y (ii) calidad de los procesos, que dependen de la forma en que el concreto es vaciado y de la geometría de la estructura a ser construida.

Respecto al trabajo experimental las recomendaciones expresan que la selección del tamaño de los especímenes de prueba debe realizarse en función de la dimensión de la fibra y del tipo de elemento estructural a ser caracterizado.

Para ensayos de compresión el diámetro del cilindro debe ser al menos cinco veces la longitud de la fibra y seis veces el diámetro de la mayor partícula de agregado. Para ensayos de tracción uniaxial no recomienda especímenes con muesca y para ensayos de flexión recomienda que el prisma deba medir de longitud 4 veces el valor de “a” y de sección transversal a^2 . La distancia entre apoyos debe ser 3 veces el valor de “a”. Donde “a” puede variar desde 7, 10, 14 y 20 cm. La altura de la muesca debe ser al menos 10% de “a”, con un grosor de 2 mm. En este trabajo se trató de cumplir con todas las recomendaciones de la norma, sin embargo, las limitaciones en equipos y materiales del laboratorio impidieron acatarlas en su totalidad.

Para la preparación de los especímenes y para la realización de los ensayos recomienda las especificaciones de RILEM TC 162-TDF para FRC [90,92]. Señala que la máquina de prueba debe ser preferiblemente hidráulica y controlada por desplazamiento del gato o aún mejor con un sensor externo. Para el caso de flexión en tres puntos un sensor tipo LVDT debe ser adjuntado al espécimen para medir su deflexión durante la prueba. Para flexión en punto central se debe fijar un sensor que puentee la muesca, en la parte inferior del elemento, usando un LVDT u otro tipo de sensor especial.

4 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL UHPFRC

A diferencia del concreto convencional el UHPFRC no atinge el valor de cero después de alcanzar su resistencia máxima debido al efecto de las fibras. Ambos materiales presentan un comportamiento linealmente elástico hasta alcanzar el valor límite, definido cuando la primera grieta aparece, a partir de allí la cantidad, orientación, tipo y distribución de las fibras va a definir el comportamiento, dicho de otra manera, las grietas toman el control de la matriz de concreto.

4.1 COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN COMPRESIÓN UNIAXIAL

Reflejar el comportamiento del concreto mediante diagramas de esfuerzo-deformación (σ - ϵ) es muy usado, principalmente para relacionar la resistencia a la compresión con el módulo de elasticidad. Desafortunadamente las respuestas σ - ϵ por compresión en diferentes concretos exhiben una variación significativa porque, entre otras cosas, el concreto es un material heterogéneo sin diseños de mezcla estandarizados. Varios investigadores han presentado aproximaciones numéricas, con base empírica, para la rama ascendente o las ramas ascendente y descendente del comportamiento a compresión del concreto, por una lado existe un consenso mínimo sobre la formulación o aplicabilidad de cualquier ecuación para el concreto Neville [96], Popovics [97], Carreira y Chu [98] y por otro lado relaciones prevalentes derivadas o consideradas relevantes para el comportamiento de σ - ϵ por compresión uniaxial para el UHPFRC son escasas, Graybeal [99].

La AFGC [77] caracteriza el comportamiento a compresión del UHPFRC por la resistencia a la compresión característica (f_{ck}) y por el módulo de elasticidad (E_c). Para los cálculos reglamentarios en estado límite último a flexión, una convencional ley constitutiva lineal con una meseta de cedencia es usada. El inicio de la meseta de cedencia corresponde al máximo esfuerzo de $0,85 f_{ck} / \phi$. El valor de f_{ck} será obtenido usando el mismo método que para el concreto tradicional y el ensayo experimental será realizado por control de carga.

La norma también describe el comportamiento constitutivo en compresión del UHPFRC como aquel que exhibe un comportamiento elástico inicial, en un amplio rango de deformación, hasta alcanzar un valor máximo. Luego del pico el esfuerzo ya no es uniforme dentro del espécimen de prueba y la rama descendente corresponde a un efecto estructural, si el contenido de fibra es

menor al 2% el descenso es extremadamente rápido y disperso, la Figura 10 muestra la ley constitutiva en compresión para el UHPFRC según la AFGC.

En la Figura 11 se observa el comportamiento constitutivo del UHPFRC comparado al concreto convencional, observamos una diferencia en el valor de la resistencia pico de 1:8 aproximadamente. Inicialmente el comportamiento es casi lineal hasta alcanzar el máximo esfuerzo, mostrando que no hay daño en esa etapa, la deformación correspondiente a ese máximo esfuerzo es de 0,4% mientras que para el concreto tradicional es 0,2% y el módulo de elasticidad ha sido citado entre 50 a 60 MPa. Después de alcanzar el pico se presenta una pérdida de rigidez, la descarga ocurre a los 50 MPa aprox. y se vuelve a cargar, permaneciendo constante en 60 MPa aproximadamente.

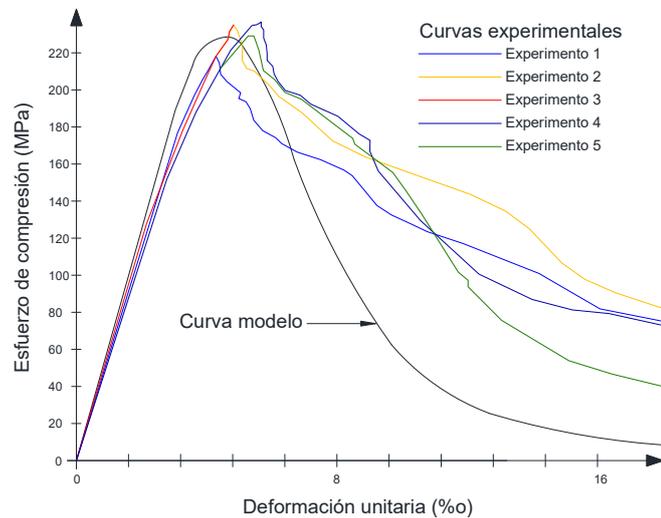


Figura 10: Ley constitutiva del UHPFRC. Fuente: AFGC [77] modificado.

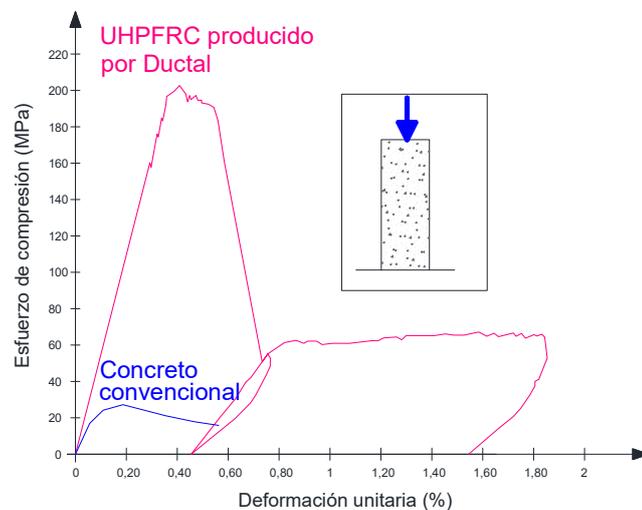


Figura 11: Comportamiento a la compresión. Fuente: Ductal [85] modificado.

El valor de la resistencia del concreto estructural es determinado por medio del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial, efectuado comúnmente en cilindros. A partir de ese parámetro otras propiedades del concreto, como resistencia a la tracción, a la adherencia, etc., son definidas con criterios meramente empíricos.

Desde un punto de vista experimental la recopilación de datos consistentes y precisos de esfuerzo vs deformación (σ - ϵ) es difícil. Este hecho se debe principalmente a los comportamientos cada vez más no lineales que el concreto tiende a exhibir a medida que se alcanza y supera el valor máximo de resistencia. Incluso si se ignora la rama descendente del comportamiento, a medida que la resistencia a la compresión es alcanzada, el comportamiento de esfuerzo observado del concreto depende mucho de las técnicas experimentales de carga y medición de tensión empleadas.

Durante la ejecución del ensayo a compresión, cuando la primera grieta se forma, la deformación lateral excede su capacidad de tracción y los especímenes UHPRC (sin fibras) pierden su resistencia total y fallan de una manera abrupta y explosiva. Por el contrario, las muestras UHPFRC se comportan elásticamente hasta aproximadamente 90-95% de su resistencia a la compresión. Después alcanzar la resistencia máxima, se produce un progresivo ablandamiento por deformación en el que la presencia de fibras regula la etapa de ablandamiento o suavizamiento de forma similar a como acontece en tracción, para posteriormente producirse la falla de compresión dúctil.

En las normas NBR 5739 [100] y NBR 7215 [101] se especifican los lineamientos para realizar el ensayo de compresión en cuerpos de prueba cilíndricos. En las normas BS 1881-121 [102] y ASTM C469-94 [103] se especifica el procedimiento para obtener el módulo de elasticidad y el comportamiento σ - ϵ en compresión.

Hassan et al. [5] encontraron que los dos últimos métodos no son apropiados para medir el comportamiento post agrietamiento del UHPFRC. En el primer caso, según la BS, es posible determinar el módulo estático de elasticidad, pero el ensayo no es capaz de capturar el comportamiento posterior a la fisuración, ya que al iniciar el agrietamiento los medidores se desprenden del cuerpo de prueba y dan resultados errados. En el segundo caso, según ASTM, se utilizan dos anillos circulares rígidos que se aseguran a aproximadamente dos tercios de la altura de la

muestra usando tornillos de sujeción y se usan dos LVDT que se introducen entre los anillos, a pesar de eso, cuando la falla de corte aparece los tornillos de sujeción giran y miden errado.

Por lo explicado anteriormente el autor propone un tercer método de medición, el cual consiste en colocar en el cuerpo de prueba los anillos circulares con los LVDT sólo para medir el estado elástico de la prueba y adicionalmente dos LDVT son colocados paralelos al espécimen para medir el movimiento del cabezal de la máquina de prueba, permitiendo registrar la etapa posterior a la fisuración. En la parte linealmente elástica el autor calcula el valor de la deformación dividiendo los desplazamientos promedio de los LVDT por la longitud inicial de medida mantenida por los anillos circulares. Posteriormente, con la aparición de la primera grieta, se presenta una fase de múltiples agrietamientos, en la cual la deformación es obtenida dividiendo el desplazamiento promedio de los LVDT externos (los que miden el desplazamiento del cabezal de la prensa) por la altura total del espécimen. El esfuerzo en esa etapa se obtuvo dividiendo la carga de la máquina por el área de la sección transversal del cilindro.

El método explicado en el párrafo anterior será usado en esta pesquisa, con el propósito de registrar el comportamiento post-pico del UHPFRC sometido a compresión uniaxial.

4.2 MODULO DE ELASTICIDAD Y MODULO DE POISSON DEL UHPFRC

La AFGC [77] señala tres aspectos importantes para la determinación del módulo de elasticidad estático:

- (i) No hay una formula simple que pueda usarse.
- (ii) El modelo teórico de homogenización “LCPC’s three-sphere” puede ser usado, dando buenos resultados.
- (iii) Pruebas deben realizarse para medir directamente el módulo de elasticidad.

Si ninguna de las tres opciones es conocida el valor de 55 GPa puede ser usado como guía y recomienda usar el valor de 0,2 para el módulo de Poisson.

Una característica importante para considerar en las relaciones σ - ϵ del UHPFRC es la linealidad del comportamiento en la rama ascendente, esto es porque permite calcular el valor del módulo de elasticidad del concreto (E) en un rango de esfuerzos fuera de la no linealidad significativa. Esa no linealidad ocurre porque el concreto comienza a desarrollar microgrietas internas y por

tanto a exhibir una reducción asociada en la rigidez a medida que aumentan los esfuerzos de compresión.

Graybeal [104] recomienda determinar E entre el rango del 5% al 80% de la resistencia a la compresión pico o máxima o f'_{cmax} para especímenes con tratamiento térmico en el curado y del 5% al 70% de f'_{cmax} para especímenes si tratamiento térmico en el curado a las ocho semanas del vaciado y usando 2% de fibras de acero. Tres años después el mismo autor publica en Graybeal B. [105] un nuevo rango de valores para calcular E , recomienda usar una aproximación lineal con mejor ajuste en los resultados del diagrama σ - ε entre 10% al 30% de la resistencia a la compresión pico y registra 52 GPa como valor del módulo de elasticidad para el UHPFRC.

Shafieifar et al. [106] calcularon E usando una aproximación lineal entre el 10% al 30% de la resistencia a la compresión pico, en espécimen con 2% de fibras de acero, alcanzando 60 GPa. Kralh et al. [107] calcularon el módulo de elasticidad al 40% de la carga última, usando cuerpos de prueba con 1% de fibras de acero, obteniendo 38,69 GPa para el valor de E .

Otra forma de calcular el módulo de elasticidad es por medio de ecuaciones numéricas que relacionan E con f'_c . En el ACI 318R [108] podemos encontrar una de las relaciones más simples y más usadas entre la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad para el concreto, donde esas dos variables están relacionadas a través de un multiplicador lineal, ver Ecuación 1. Otras relaciones más sofisticadas pueden incluir un término para la densidad del concreto, la fuerza de compresión elevada a diferentes potencias fraccionarias o la inclusión de un término constante, Neville [96] y Popovics [97].

$$E = 4730 \sqrt{f'_c} \quad (\text{en MPa}) \quad (1)$$

Graybeal [104] señala dos ecuaciones que predicen más de cerca los resultados observados en sus estudios sobre UHPFRC, la Ecuación (2) provenientes del ACI 363R [109] propuesta para hormigones de hasta 83 MPa y la Ecuación (3) de Ma et al. [110] derivada de los resultados experimentales del UHPFRC sin agregados gruesos.

$$E = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \quad (\text{en MPa}) \quad (2)$$

$$E = 19000 \sqrt[3]{\frac{f'_c}{10}} \quad (\text{en MPa}) \quad (3)$$

Yoo et al. [111] utilizan la norma ASTM C469 para calcular el módulo de elasticidad (E). Cada ensayo de compresión es descrito por una curva σ - ε y el E puede ser calculado a partir de allí por la siguiente expresión:

$$E = \frac{0,4 \cdot f'_c \cdot f_1}{\varepsilon_2 - 0,00005} \quad (4)$$

Dónde:

f'_c = Resistencia a la compresión última

f_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de 0,05 veces ε

ε_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo en 40% de f'_c

Alsalmán et al. [112] realiza una extensa pesquisa de la data experimental publicada en la literatura para proponer una expresión que predice el valor del módulo de elasticidad en función de la f'_c del UHPFRC, ver Ecuación 5, para valores en MPa.

$$E = 8,010 (f'_c)^{0,36} \quad (5)$$

En este trabajo se pretende calcular el valor de E midiendo directamente sobre la rama lineal ascendente de la curva constitutiva del UHPFRC, registrada a partir de ensayos experimentales de compresión uniaxial, como será explicado en detalle más adelante.

4.3 COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN TRACCIÓN

Después que la primera grieta aparece, el comportamiento a tracción, bien sea tracción directa o tracción en la flexión, es dominado por las fibras. Cuando esa primera grieta comienza a aumentar su abertura, que denominaremos ω , la tensión sobre las fibras también se incrementa hasta alcanzar su resistencia máxima a la adherencia, momento a partir del cual las fibras comienzan a deslizar dentro de la matriz de concreto.

El deslizamiento puede ocurrir porque la longitud de la fibra no es suficiente para garantizar el anclaje dentro de la matriz, se requiere de una mayor longitud de desarrollo, entonces la fuerza máxima es alcanzada por la falta de unión o adherencia y no porque las fibras se rompan. Adicionalmente las fibras son fabricadas con un tipo de acero de grado muy alto, su esfuerzo de fluencia se encuentra dentro del rango de 2500 MPa hasta 2700 MPa.

Con la abertura de la muesca o ω en progresivo aumento, debido a la aplicación de la carga, comienza también una degradación de la rigidez de la matriz, ese comportamiento post-agrietamiento va a depender de la cantidad, longitud y factor de forma de las fibras, y por lo tanto va a definir la ley de comportamiento en tracción del UHPFRC.

La definición de la ley constitutiva en tracción es importante para diseñar o verificar estructuras fabricadas con UHPFRC, la AFGC [77] identifica dos fases principales en el comportamiento:

- (i) Fase linealmente elástica, hasta alcanzar el valor de la resistencia a la tracción elástica ($f_{ct,el}$), que ocurre cuando la primera grieta aparece.
- (ii) Fase post-agrietamiento, caracterizada por las relaciones entre el esfuerzo a tracción (σ_f) y el ancho de la muesca (ω) o por las relaciones entre el esfuerzo a tracción (σ_f) y la deformación unitaria (ϵ).

En la Figura 12 observamos la clasificación que la AFGC [77] realiza del UHPFRC sometido a solicitaciones de tracción, lineamientos que se constituyen como la principal orientación en el desarrollo del presente trabajo. La tipificación indicada consiste en tres diferentes comportamientos:

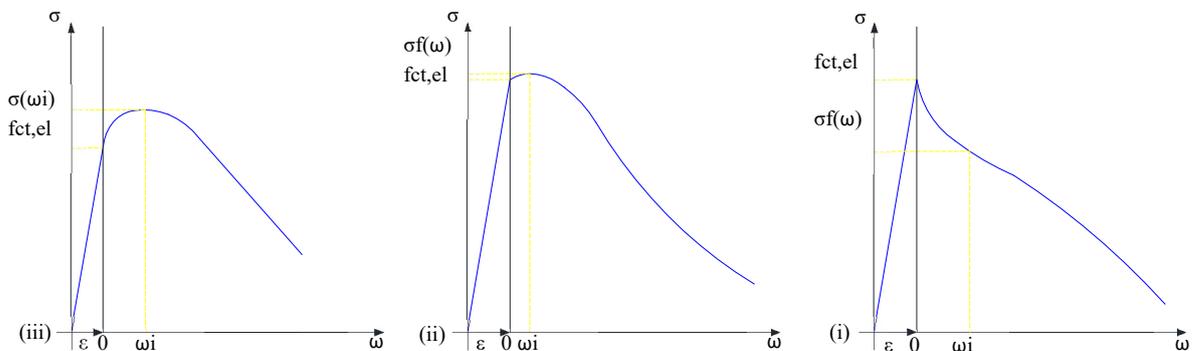


Figura 12: Comportamiento en tracción del UHPFRC. Fuente: AFGC [77] modificado.

- (i) Tipo I: con ablandamiento por deformación, cuyo comportamiento constitutivo promedio en tracción presenta ablandamiento por deformación, la resistencia a la tracción en la primera grieta ($f_{ct,el}$) es mayor que la resistencia en la zona agrietada $\sigma_f(\omega)$.

- (ii) Tipo II: con bajo endurecimiento por deformación, los cuales presentan en promedio endurecimiento por deformación pero su ley constitutiva presenta ablandamiento por deformación, la resistencia a la tracción en la primera grieta ($f_{ct,el}$) es menor o igual a la resistencia en la zona agrietada $\sigma_f(\omega)$.
- (iii) Tipo III: con alto endurecimiento por deformación, cuyo comportamiento constitutivo promedio en tracción presenta endurecimiento por deformación, la resistencia a la tracción en la primera grieta ($f_{ct,el}$) es menor a la resistencia en la zona agrietada $\sigma_f(\omega)$.

Hassan et al [5] identifican tres etapas en la curva de comportamiento σ - ε para el UHPFRC a la tracción uniaxial:

- (i) Fase I: linealmente elástica, en la cual el módulo de elasticidad inicial sin deformación permanente tiene lugar, la máxima resistencia a la tracción obtenida en esta parte es la resistencia máxima de la matriz, el contenido de fibra no afecta significativamente el comportamiento general del material.
- (ii) Fase II: de desarrollo de las grietas, en esta etapa se desarrollan las primeras micro grietas, al comienzo las muestras fallan rápidamente en el punto más débil debido a la localización de la deformación máxima en una sola grieta que es mayor que la deformación límite de la matriz y el esfuerzo se mantiene en los especímenes por la acción compuesta de las fibras de acero atravesando las grietas en el concreto, también la resistencia a la tracción aumenta a un ritmo muy pequeño en comparación con la fase elástica y se produce una gran deformación con un módulo de elasticidad reducido, esta fase se conoce como "pseudo endurecimiento por deformación" o la fase "pseudo plástica", lo que significa que no hay verdaderos cambios plásticos micro estructurales.

El comportamiento de endurecimiento por deformación distingue al UHPFRC de todos los demás tipos de concreto. En esta fase, se desarrolla una gran cantidad de micro grietas a lo largo de toda la longitud de la sección prismática de la muestra.

El ancho y la abertura de la grieta están influenciados por la presencia de fibras de acero y la tensión es transferida por las fibras que se unen a través de las caras de cada grieta. Suficiente adherencia entre la matriz y las fibras es esencial en esta fase, así como también una distribución uniforme de las fibras. Esta fase finaliza cuando las fibras que sostienen

ambos lados de las micro grietas ya no son capaces de soportar el máximo esfuerzo que causa la deformación o la extracción de la fibra.

- (iii) Fase III: de falla, que acontece cuando micro fisuras se combinan para formar una macro grieta perpendicular a la dirección de la fuerza. Se produce un deslizamiento entre las fibras y la matriz y el esfuerzo comienza a disminuir, sin embargo, a partir de este punto, la curva de esfuerzo-deformación ya no puede expresarse como una función de la deformación media, sino como una deformación localizada. La medición tomada en esta fase se conoce como abertura de boca de grieta en la que la tracción ya no se distribuye uniformemente a lo largo de la muestra.

Las cantidades y propiedades de las fibras de acero gobiernan la forma y la longitud de la curva de σ - ϵ y también gobiernan el comportamiento de ductilidad. El comportamiento de extracción progresiva de la fibra depende en gran medida de la resistencia y la longitud de la matriz de las fibras. El valor límite de la apertura de la boca de la grieta se relaciona típicamente con la mitad de la longitud de la fibra más larga en el compuesto.

Con el comportamiento constitutivo en tracción podemos determinar la ductilidad del material, más ese valor puede ser afectado por el tamaño del elemento. Nguyen et al. [113] investigaron los efectos del tamaño y geometría de especímenes prismáticos sometidos a tracción directa. Investigaron cuatro parámetros de tamaño de la muestra, que incluyen la longitud gauge, el área de la sección, el volumen y grosor del elemento. En general, la capacidad de deformación, la capacidad de absorción de energía y el espaciado entre grietas del UHPFRC fueron altamente sensibles a los parámetros de tamaño, mientras que la resistencia a la fisuración post-pico no lo fue. A medida que aumentaba el grosor de la muestra, hubo una ligera mejora en la resistencia posterior a la fisuración, pero originó aumentos distintos tanto en la capacidad de deformación como en la capacidad de absorción de energía, además de una reducción notable en el espaciado entre grietas.

El uso de agregado grueso en mezclas de UHPFRC puede influir negativamente en su desempeño a la tracción, principalmente porque disminuye la adherencia entre fibra y matriz. Liu et al. [114] investigaron el comportamiento a la tracción de UHPC que incorpora agregados gruesos con tres tipos de microfibras de acero, incluidas las lisas, en espiral y con gancho en los

extremos, y un tipo de macro fibra de acero con gancho en los extremos. Los resultados demostraron que con la inclusión de agregado grueso la mezcla de UHPC no se comporta bien debido a la disminución del contenido de aglutinante, también, trae deterioro de la resistencia de unión de la fibra de acero en la matriz. Sin embargo, a un nivel de reemplazo favorable ($\leq 25\%$) el agregado grueso puede introducirse con éxito en el sistema de UHPC para reducir aún más su costo sin afectar por completo sus propiedades de tracción.

4.4 COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC EN FLEXIÓN

Thanh Le [54] muestra en la Figura 13 un típico comportamiento de flexión en tres puntos obtenido por Ductal [85] para el UHPFRC. En ese caso especímenes de 40x40x160 mm fueron ensayados. El comportamiento es entonces dividido en tres estados:

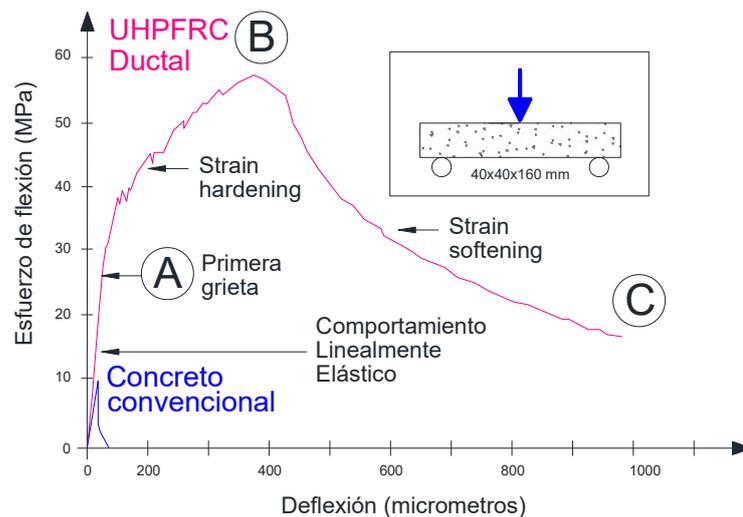


Figura 13: Comportamiento en la flexión. Fuente: Thanh Le [54] modificado.

- (i) Estado 1 (O-A): estado elástico, con la curva mostrando linealidad, la carga correspondiente al punto A es llamada carga de la primera grieta.
- (ii) Estado 2 (A-B): estado elastoplástico, con endurecimiento por deformación, mostrando que a medida que las cargas se incrementan las deformaciones en tracción en la parte inferior de la viga se desarrollan más rápidamente que las deformaciones en compresión en la parte superior de la viga. En este estado los esfuerzos a tracción son llevados principalmente por las fibras y el UHPFRC trabaja de manera elastoplástica hasta que la deformación en tracción alcanza la deformación de tracción última, la máxima resistencia a la flexión del ma-

terial ha sido alcanzada. La carga correspondiente al punto B es llamada carga pico, después de este punto cualquier incremento en la carga puede inducir a la extracción de las fibras, lo cual resultará en un pequeño decrecimiento del esfuerzo a tracción en la parte inferior de la sección.

- (iii) Estado 3 (B-C): estado de ablandamiento, las fibras son extraídas porque la resistencia a la adherencia entre fibra y matriz alcanza su valor último, la capacidad a flexión del concreto decrece, una mayor grieta se desarrolla a través de toda la sección transversal y el espécimen de viga falla.

Gesoglu et al. [115] señalan que la resistencia a la flexión depende del tipo y cantidad de fibras utilizadas en la mezcla, así como también de la orientación y distribución de las mismas dentro de la matriz y de la forma de los especímenes usados.

El comportamiento a flexión en cuatro puntos, sobre elementos prismáticos con diferentes tipos y porcentajes de fibras, también ha sido utilizado para estudiar la tracción. Los valores reportados en la literatura oscilan en el rango de 12 a 26 MPa. Ejemplos de ello puede ser consultado en Chanvillard et al. [116], Orgass et al. [117], Fehling et al. [118], Reineck et al. [119], Kim et al. [120] y Kang et al. [68]. Los mejores resultados fueron obtenidos en los especímenes con fibras mixtas, bien sea combinando fibras de diferentes formas y tamaños o de diferentes materiales. También se demostró que la distribución de las fibras afecta la resistencia última a la flexión y dependen de la dirección del vaciado.

Para caracterizar el comportamiento en flexión del UHPFRC la AFGC [77] describe dos procedimientos experimentales que pueden ser aplicados usando pruebas de flexión:

- (i) Determinar la resistencia a la tracción a partir del ensayo de flexión en cuatro puntos después de aplicar una corrección por factor de escala. Se usa en elementos que presenten alto *strain hardening* cuando no se dispone de ensayos de tracción uniaxial o directa.
- (ii) Determinar la contribución de las fibras para reforzar la sección agrietada a partir del ensayo de flexión en tres puntos sobre prismas con muesca después de aplicar el método de análisis inverso (AI). Se usa en elementos que presenten bajo *strain hardening* o *strain softening*.

En esta pesquisa el valor de la resistencia a la tracción es definido experimentalmente usando pruebas de tracción uniaxial. El comportamiento a tracción post-agrietamiento será determinado aplicando análisis inverso (AI) considerando la data experimental proveniente de los ensayos de flexión en tres puntos ($F-\omega$) o ($M-\omega$), para finalmente definir la ley de comportamiento a tracción del UHPFRC.

4.5 FRACTURA DEL UHPFRC

La energía de fractura de un espécimen de viga bajo solicitaciones de flexión fue inicialmente propuesta por Hillerborg et al. [121], quienes señalan que la energía de fractura o trabajo de fractura es una medida de la energía requerida para abrir un área unitaria de grieta. Esta energía se mide por el área bajo la curva esfuerzo de tracción versus abertura de la muesca. Richard y Cheyrezy [122] calcularon la energía de fractura del UHPFRC como el área bajo la curva esfuerzo de flexión versus la deflexión de la viga, con dimensiones $40 \times 40 \times 160$ mm, hasta alcanzar una deflexión de 1,25 mm. Esta energía es considerada como el trabajo liberado cuando la carga se aplica sobre la viga para mover un área de grieta unitaria a una cierta distancia (deflexión en la mitad del vano).

4.5.1 Usando RILEM 50-FMC

RILEM 50-FMC [123] propone calcular la energía de fractura (GF) a partir de la curva experimental de carga versus deflexión (F vs δ), obtenida ensayando vigas con muesca en la mitad del vano sometidas a ensayo de flexión en tres puntos. GF es equivalente al área bajo la curva F vs δ (W_o) más el trabajo realizado por el peso propio del elemento, que es igual a la carga por peso propio multiplicada por la deflexión. En la Figura 14 se anexa la geometría de la sección.

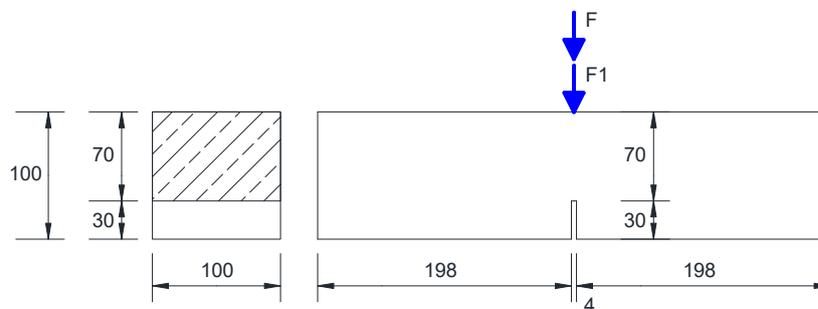


Figura 14: Geometría de la mini-viga (en mm).

De acuerdo a lo indicado anteriormente tenemos:

$$G_F = \frac{W_o + 2 \cdot F1 \cdot \delta}{b(d - a)} \quad (6)$$

Dónde:

G_F = Energía de fractura

W_o = Área bajo la curva carga-deflexión

$F1$ = Carga situada en el centro de la viga debido al peso propio del elemento

F = Carga de la prensa

δ = Deflexión en la mitad del vano

b = Ancho de la viga

d = Altura de la viga y de la muesca

La componente de la energía originada por el peso propio es un valor muy pequeño, en el mejor de los casos alcanza 0,0058 Joule, por lo tanto, no será considerado en nuestros cálculos, ver Figura 15. Los valores de G_F serán calculados por:

$$G_F = \frac{W_o}{b(d - a)} \quad (7)$$

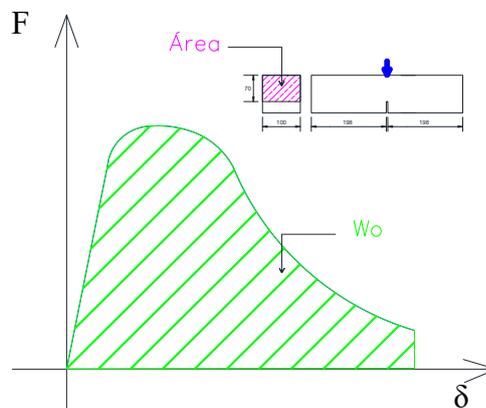


Figura 15: G_F a partir de la curva F vs δ .

4.5.2 Usando AFGC

La energía de fractura (G_F) puede ser obtenida a partir de la ley de comportamiento del material, siendo equivalente al área bajo la curva que relaciona esfuerzos versus abertura de la grieta (σ vs ω), ver Figura 16.

Esa ley de comportamiento puede ser fácilmente determinado en el rango elástico, usando los valores de la carga aplicada (F) se calcula el momento (M) originado por F para obtener el valor del esfuerzo (σ). En el rango inelástico, que se inicia cuando la primera grieta aparece, implica el análisis de la sección agrietada para calcular el valor del esfuerzo y establecer la ley constitutiva post-agrietamiento.

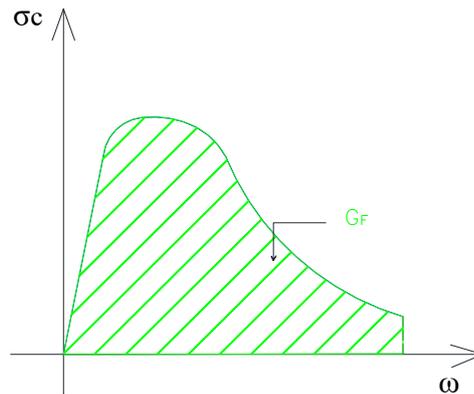


Figura 16: GF a partir de la curva σ vs ω .

La AFGC [77] recomienda la determinación de la curva (σ - ω) en el rango inelástico a partir del ensayo a flexión en tres puntos sobre una viga con muesca centrada en el vano inferior. Con los valores experimentales de F vs ω podemos obtener la curva σ vs ω aplicando análisis inverso (AI). Este procedimiento se explica ampliamente más adelante.

5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental consiste en determinar las principales propiedades mecánicas del UHPFRC y obtener las relaciones constitutivas que caractericen el material. En el caso de compresión y tracción uniaxial las leyes de comportamiento pueden ser obtenidas directamente a partir de la data experimental. El esfuerzo se calcula como el cociente entre la fuerza aplicada y el área de la sección transversal del elemento, la deformación unitaria se calcula como el cociente entre el alargamiento o la contracción de un segmento de línea ocurrido por acción de la fuerza y la longitud inicial de ese segmento del elemento.

Las recomendaciones de la AFGC [77] para el UHPFRC invitan a no caracterizar el material a partir de los ensayos de tracción uniaxial, ya que los mismos presentan alta variabilidad en los resultados, originadas por complejidades propias del ensayo experimental para medir correctamente el alargamiento del elemento.

Se decide entonces realizar la caracterización del UHPFRC en tracción a partir de los ensayos de tracción en la flexión. La AFGC [77] recomienda la realización de ensayos de flexión en tres puntos, a partir de los cuales, la data experimental registrada servirá de base para definir la ley de comportamiento usando métodos analíticos. En la Figura 17 podemos observar un esquema general del trabajo experimental.

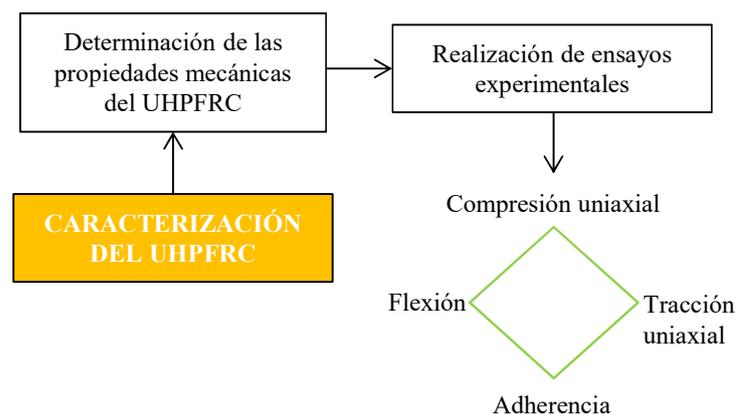


Figura 17: Esquema para caracterizar experimentalmente el UHPFRC.

La ausencia de normativa y de suficientes datos experimentales del UHPFRC fabricado con tecnología y materiales brasileros, nos empuja a efectuar un extenso trabajo experimental. El

procedimiento se desarrolla por etapas, comparando los resultados con la bibliografía internacional, así el avance y desarrollo de la pesquisa va encaminándose con efectividad hacia el alcance de los objetivos, manteniendo criterios razonables de economía y sustentabilidad.

Los experimentos se desarrollan de la siguiente manera:

- (i) Ensayos de compresión uniaxial: diferentes trazos son estudiados para determinar la resistencia a la compresión y atinjar los máximos valores posibles, teniendo presente el uso parcial de aglomerantes sostenibles en sustitución del cemento y utilizando materiales de origen nacional. Se usan herramientas estadísticas para validar la importancia de cada material en la mezcla, conocer la interrelación entre ellos y finalmente conseguir un diseño de mezcla que atinja la resistencia a la compresión objetivo, en este caso mayor o igual a 150 MPa. El comportamiento constitutivo es definido a través de las curvas σ - ϵ , registrando el comportamiento post-agrietamiento del material.
- (ii) Ensayos de tracción uniaxial: la resistencia a la tracción uniaxial o directa es determinada sobre especímenes tipo Dog-Bone, comúnmente usados en este tipo de experimentos. El comportamiento constitutivo es definido a través de las curvas σ - ϵ , registrando el comportamiento post-agrietamiento del material.
- (iii) Ensayos de flexión en tres puntos: La resistencia a la flexión o de tracción en la flexión es determinada sobre especímenes prismáticos rectangulares con sección transversal cuadrada (mini-vigas). Las curvas que relacionan carga versus deflexión (F - δ) y carga versus abertura de la trinca (F - ω) son registradas para definir el comportamiento post-agrietamiento del material. Esos resultados serán utilizados para definir de forma analítica las relaciones constitutivas del material sometido a esfuerzos de tracción.
- (iv) Ensayos de flexión en cuatro puntos: Serán realizados sobre vigas prismáticas de mayor escala, llamadas meso-vigas o vigas I, debido a su sección transversal en formato "I", típica en perfiles de acero. Los resultados de esos experimentos servirán para validar el procedimiento analítico y para evaluar el comportamiento del UHPFRC usando acero de refuerzo convencional (con barras de acero).
- (v) Ensayos de adherencia: la resistencia a la adherencia de barras de acero embutidas en UHPFRC es determinada a través de ensayos de arrancamiento o Pull-Out, los cuales son

efectuados partiendo de la metodología desarrollada en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Sao Paulo (USP) para concreto convencional. Usar concreto de ultra alta resistencia permite disminuir la sección transversal del elemento estructural, acción que puede ser optimizada usando barras poliméricas. Por lo tanto, el trabajo experimental de adherencia se repite usando barras poliméricas de fibra de vidrio, producidas con eco materiales, para comparar el comportamiento del material con ambos tipos de barras y determinar la longitud de desarrollo que puede ser usada en el diseño estructural.

En la Figura 18 observamos esquemáticamente los objetivos del trabajo experimental.

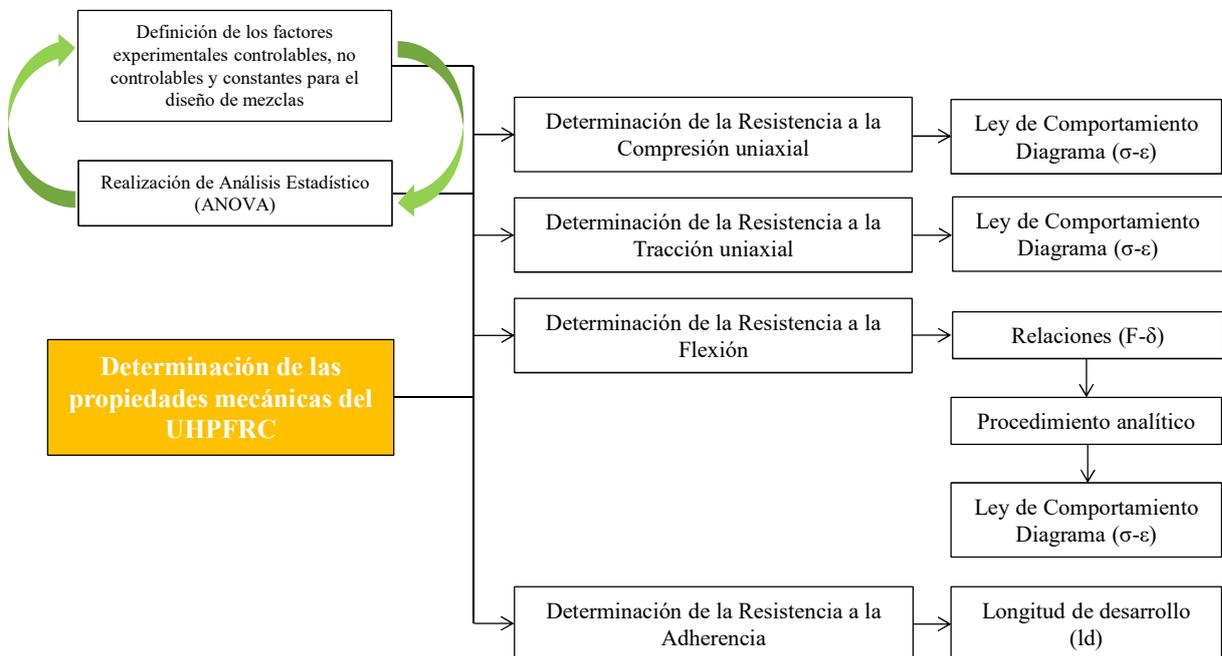


Figura 18: Objetivos del trabajo experimental.

5.1 ANALISIS ESTADISTICO

Uno de los objetivos específicos de esta pesquisa es producir una mezcla de UHPFRC económicamente sustentable, que cumpla con los patrones de resistencia establecidos por las normas internacionales. En la ausencia de estudios previos detallados, sobre el material, se necesita entonces disponer de herramientas estadísticas para analizar el extenso trabajo experimental que se tiene en frente, principalmente en el diseño de mezclas.

Es indispensable evaluar el nivel de importancia que cada componente de la mezcla tiene sobre la resistencia de la matriz y conocer las interacciones que ocurren entre ellos. El estudio de las

proporciones de residuos industriales, aglomerantes, agregados y fibras debe ser realizado. Variables cualitativas como el tipo de curado y de fibras deben ser estudiadas e incluidas en el análisis, sobre todo para conocer la evolución de la resistencia que el material presenta en el tiempo, incluyendo o no tratamientos de curado, es decir, determinar la ganancia en resistencia que produce el tratamiento térmico en edades tempranas para compararlo con procesos económico de curado a temperatura ambiente.

Llevar acabo las actividades descritas en el párrafo anterior implica necesariamente trabajo estadístico. Una estrategia práctica ampliamente usada para analizar los resultados de ensayos de resistencia del concreto es el arreglo factorial, en el cual se definen diferentes tratamientos que se quieren comparar.

En el diseño de tratamientos se seleccionan los factores controlables, sus niveles y la combinación entre ellos. En el diseño experimental se indica la manera en que los tratamientos se aleatorizan y la forma de controlar la variabilidad natural de las mismas.

Este estudio contempla la definición de varios arreglos factoriales. Cada etapa del proceso incluye el desarrollo de un diseño experimental y un análisis de varianza usando ANOVA, implementado como herramienta de apoyo para la toma de decisiones en etapas subsiguientes.

ANOVA es el tratamiento estadístico más comúnmente aplicado a los resultados experimentales para determinar, si algún factor controlable o alguna interacción entre factores, tiene influencia significativa en la variable de respuesta, conocimientos al respecto pueden ser profundizados en Ayan et al. [124], Mucteba U. [125], Yoon et al. [126] y Mukharjee et al. [127].

5.2 MATERIALES A UTILIZAR, FABRICACION Y TIPO DE CURA

Los materiales a utilizar en esta pesquisa están constituidos por:

- (i) Cemento nacional tipo Portland, CP V ARI con alta resistencia inicial.
- (ii) Escoria de alto horno o GGBS, donada por la empresa ArcelorMittal Tubarão do Estado do Espírito Santo, a partir de la cual se obtiene el lote de material para los ensayos siguiendo las estipulaciones de la norma NBR NM 26 [128].
- (iii) Humo de sílice o SF, es del tipo ND SILMIX fabricado por Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda.
- (iv) Polvo de cuarzo comercial.

- (v) Arena de sílice o SS, tamizada con tamaño máximo de malla de 0,30 mm.
- (vi) Superplastificante, se usa una solución de policarboxilatos en medio acuoso (ViscoCrete 3535) suministrado por la empresa SIKA, el cual ajusta la trabajabilidad del concreto y se une con agua corriente para ser colocados en la mezcla.
- (vii) Fibras de acero cortas con forma recta (microfibras) y fibras largas con gancho en los extremos (macrofibras).

El proceso de fabricación de las mezclas de UHPFRC se especifica a continuación y puede ser visualizado en la Figura 19, desde la imagen a) hasta la f):

- (i) Los materiales son pesados y colocados en una mezcladora (ver paso a) siguiendo el siguiente orden: humo de sílice, cemento, escoria de alto horno y arena de sílice.
- (ii) Los materiales secos son mezclados por aprox. 5 minutos antes de colocar en la mezcla el superplastificante previamente mezclado con el agua (ver paso b).
- (iii) Los materiales húmedos se mezclan por aprox. 10 minutos más, inicialmente se observa una mezcla seca (ver paso c) hasta que pequeñas esferas de material se forman, de aproximadamente 1 mm de diámetro (ver paso d), esas esferas se unen y progresivamente incrementan de diámetro (ver paso e), hasta convertirse en una húmeda pasta de concreto (ver paso f). Se observa como el material se despegó del fondo de la mezcladora, adquiriendo la forma y consistencia de una densa masa plástica.
- (iv) En ese estado la mezcla para el UHPFRC está lista y es entonces cuando se procede a colocar las fibras (opcional). Luego de 2 minutos la mezcla es vaciada en los moldes.
- (v) Los cuerpos de prueba son compactados en mesa vibratoria por 1 minuto.

Después de llenadas, las molduras son almacenadas a temperatura ambiente y cubiertas con una manta plástica por 24 horas, luego de ese tiempo se desmoldan y dividen en función del tipo de tratamiento de curado a aplicar.

Se considerarán tres tipos de curado, cuya aplicación puede ser conjunta o individual:

- (i) Curado tipo 1: consiste en colocar los especímenes en baño térmico por 24 horas a una temperatura de 90 °C. Se dejan enfriar hasta atingir la temperatura ambiente, se retiran del baño térmico y son colocados en agua a temperatura ambiente o en cámara húmeda a 20 °C ± 3 °C, hasta el día de la prueba.

- (ii) Curado tipo 2: consiste en colocar los especímenes en baño térmico por 24 horas a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y luego a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas adicionales. Se dejan enfriar hasta atingir la temperatura ambiente, se retiran del baño térmico y son colocados en agua a temperatura ambiente o en cámara húmeda a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta el día de la prueba.
- (iii) Curado tipo 3: Sin tratamiento térmico, los especímenes son colocados en agua a temperatura ambiente o en cámara húmeda a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, hasta el día de prueba.

La nomenclatura a usar para indicar el tipo de cura es: CTT que significa “Con Tratamiento Térmico” y STT que significa “Sin Tratamiento Térmico” de curado.

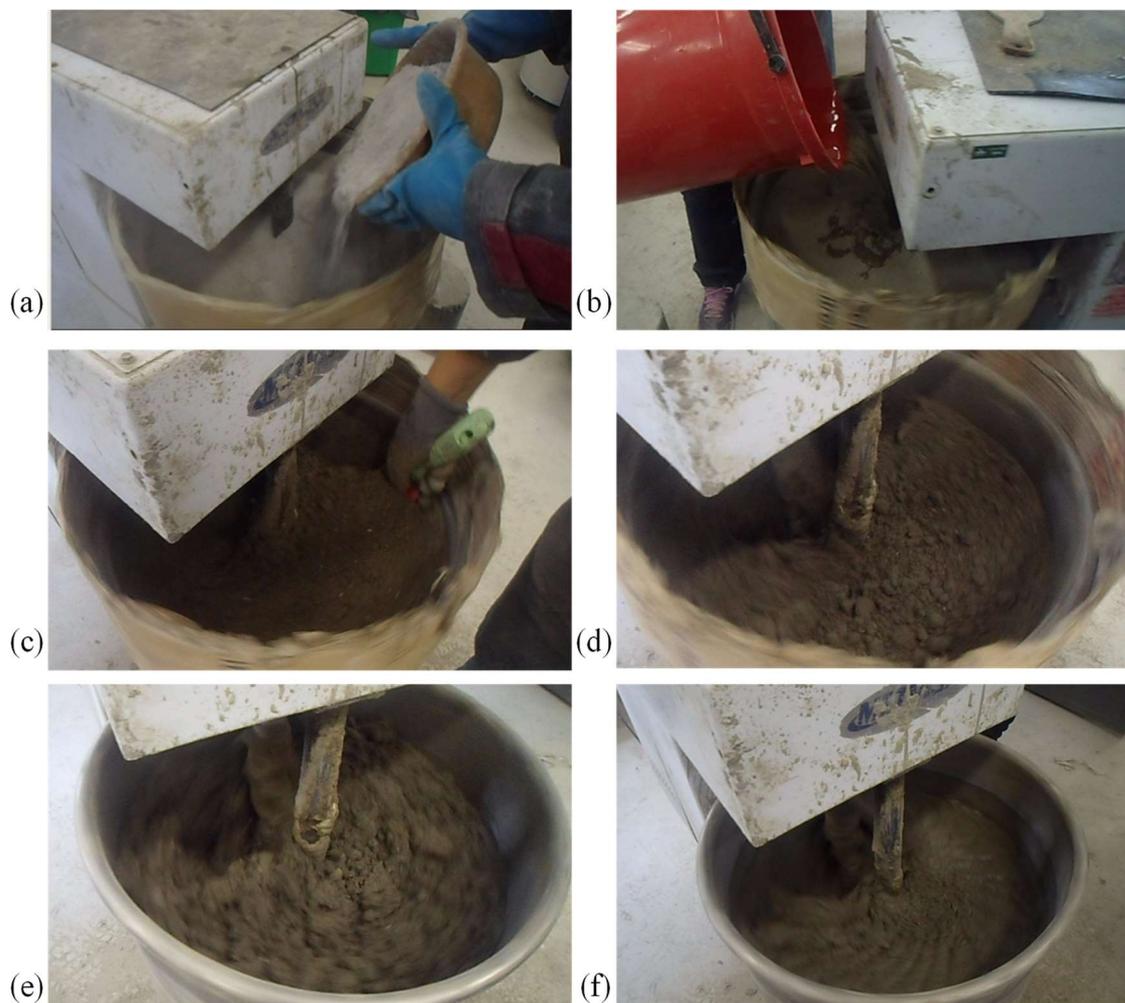


Figura 19: Fabricación de la mezcla UHPRC.

5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El trabajo experimental se inicia con el estudio de diferentes diseños de mezclas de UHPFRC sometidos a ensayos de compresión uniaxial. El procedimiento es dividido en cuatro etapas consecutivas, las cuales comprenden el registro de la data experimental para realizar el análisis estadístico, definir el diseño de mezcla más conveniente y finalmente establecer las relaciones constitutivas de comportamiento compresión uniaxial.

En la primera etapa se estudian diseños de mezcla sin fibras, en la segunda etapa se usan macrofibras de acero y de polipropileno, en la tercera etapa se usan microfibras y en la cuarta etapa se establece tanto el diseño de mezcla definitivo del UHPFRC como su comportamiento constitutivo incluyendo la fase post-agrietamiento del material, ver Figura 20.

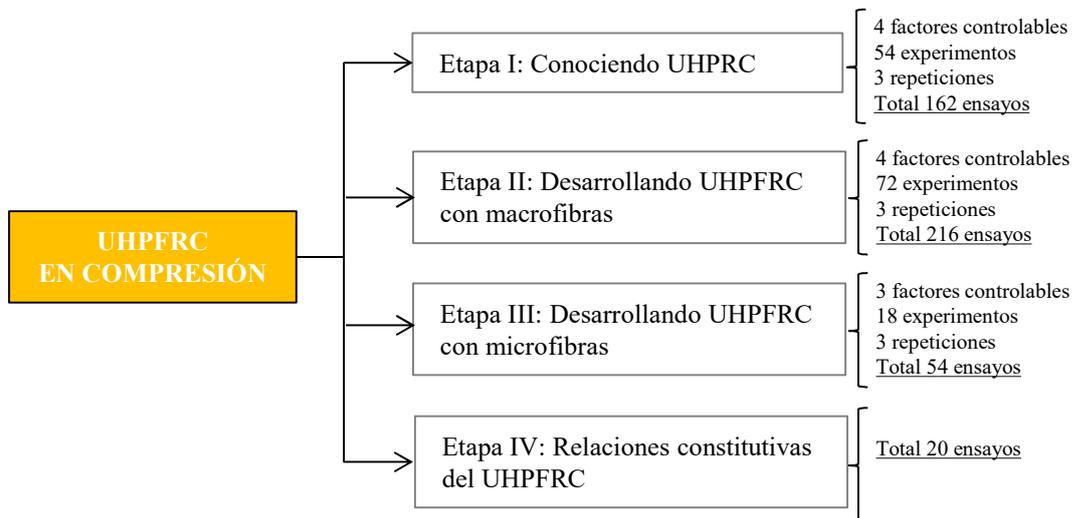


Figura 20: Esquema de trabajo. UHPFRC en compresión uniaxial.

En cada una de las etapas descritas anteriormente se realizan ensayos de compresión uniaxial sobre cuerpos de prueba cilíndricos. Previo a cada ensayo las caras superior e inferior de los cilindros son niveladas por medios mecánicos usando una rectificadora, como se observa en la Figura 21-a. También se toma la altura y peso de cada cuerpo de prueba para verificar la necesidad de aplicar algún factor de corrección en la resistencia, según lo estipulado en el ítem 6.1.2 Tabla 2 de la norma NBR5739 [100].

Una prensa hidráulica con capacidad de 2000 kN es usada para realizar el ensayo de compresión, ver Figura 21-b, siguiendo los criterios especificados en la norma NBR7215 [101]. En las

primeras dos etapas la carga se aplica por fuerza a una tasa de 1 MPa/seg y en las últimas dos etapas la carga se aplica por desplazamiento a una tasa de 0,5 mm/min. Para disminuir la varianza experimental son usados materiales de un mismo lote y también se emplean los mismos equipos para la fabricación y ensayo de las probetas. Los resultados son registrados para posteriormente proceder a la realización del análisis estadístico.

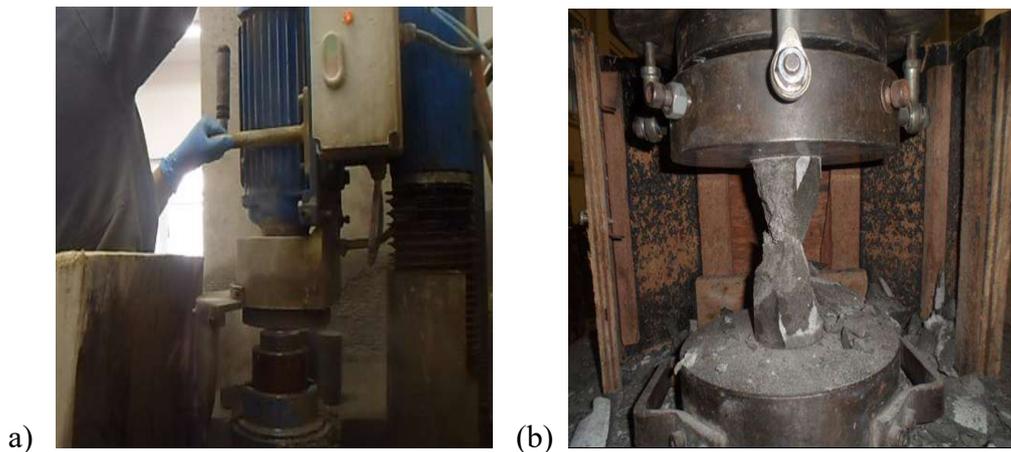


Figura 21: a) Rectificación; y b) teste de compresión uniaxial.

5.3.1 Etapa I: Conociendo el UHPRC

Cuatro factores controlables son establecidos para el diseño de los tratamientos:

- (i) A: edad de la muestra, con tres niveles de control;
- (ii) B: tamaño máximo de la GGBS, con tres niveles de control;
- (iii) C: tipo de mezcla (UHPRC-1, UHPRC-2, UHPRC-3) con tres niveles de control; y
- (iv) D: tipo de curado.

Lo anterior conduce a 54 experimentos que incluyen todas las posibles combinaciones que deberían ser introducidas en el diseño, ver Tabla 2. Se realizan tres repeticiones en cada caso para conformar un total de 162 experimentos con 52 grados de libertad que pueden ser revisados en los apéndices.

La relación w/b se mantiene fija en 0,15 y la relación w/c fue de 0,31 para UHPRC-1; de 0,28 para UHPRC-2 y de 0,24 para UHPRC-3. La cantidad de arena de sílice, superplastificante y agua se mantienen constantes. El tipo de escoria GGBS-1 corresponde a un tamaño máximo

del material de 0,850 mm y se produce al moler 1 kg de escoria de planta por 1 hora; la GGBS-2 posee un tamaño máximo 1,7 mm y se produce al moler 6 kg de escoria de planta por 2 hora y la GGBS-3 posee un tamaño máximo de 1,18 mm producida al moler 1 kg de escoria de planta por 1 hora. Se usa curado Tipo 1.

Los tres tipos de mezclas se diferencian en los porcentajes de aglomerantes en cada caso, como se observa en las Tablas 2 y 3. Las mezclas a investigar en esta etapa son mostradas en la Tabla 3. Se aplica la cura Tipo 1 y Tipo 3, según lo especificado en el ítem 5.2.

Tabla 2: Diseño de Tratamientos. Etapa I.

Designación	Factor control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Edad de la muestra	7 días	14 días	28 días
B	Tamaño máximo del GGBS	850 μm	1700 μm	1180 μm
C	Tipo de mezcla de concreto	UHPFRC-1	UHPFRC-2	UHPFRC-3
	Cemento:	50%	55%	65%
	GGBS:	45%	35%	15%
	SF:	5%	10%	20%
D	Tipo de curado	Tipo 1	Tipo 3	

Tabla 3: Diseños de Mezclas para UHPFRC (kg/m^3). Etapa I.

Material	UHPFRC-1	UHPFRC-2	UHPFRC-3
Cemento	597	657	776
GGBS	537	418	179
SF	60	119	239
SS	1051	1051	1051
Superplastificante	40	40	40
Agua	185	185	185

Para el diseño se toma como mezcla base la desarrollada por Thanh Le [54], identificada en este trabajo como UHPFRC-2, a partir de la cual se varían las cantidades individuales de aglomerantes, manteniendo w/b constante y se usa el superplastificante a 3,35% del total del peso de los aglomerantes.

El ensayo de resistencia a la compresión uniaxial se realiza a las 162 probetas cilíndricas, con tandas de 54 unidades a los 7, 14 y 28 días de curado, hasta alcanzar la carga última. Los resultados son registrados para proceder posteriormente a la realización del análisis de varianza.

5.3.2 Etapa II: Desarrollando UHPFRC con macrofibras

En esta etapa de la pesquisa se usan dos tipos de macrofibras, de acero con gancho en los extremos y de polipropileno. Cuatro factores controlables son definidos para el diseño de los tratamientos:

- (i) A: de la muestra, con tres niveles de control;
- (ii) B: tipo de mezcla con cuatro niveles de control;
- (iii) C: tipo de fibras con tres niveles de control; y
- (iv) D: tipo de curado con dos niveles de control.

Los factores constantes fueron la cantidad de agregado, SF, superplastificante, agua y porcentaje de fibras (1%). El total de grados de libertad resultantes fueron 72, los cuales pueden ser revisados en los apéndices. En la Tabla 4 se pueden observar los diferentes tratamientos, conformando 72 experimentos con las posibles combinaciones que deben ser introducidas en el diseño, se realizan tres repeticiones en cada caso para conformar un total de 216 ensayos.

Tabla 4: Diseño de Tratamientos. Etapa II.

Designación	Factor Control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
A	Edad de la muestra	7 días	28 días	90 días	
B	Tipo de mezcla	UHPFRC-1	UHPFRC-2	UHPFRC-3	UHPFRC-4
	Cemento:	65%	70%	75%	75%
	GGBS:	15%	10%	5%	5%
	SF:	20%	20%	20%	20%
C	Tipo de fibras	Sin fibras	Polipropileno	Acero	
			(Sika)	(Belgo)	
D	Tipo de curado	Tipo 1	Tipo 3		

Los materiales aglomerantes usados en la mezcla son los mismos de la etapa anterior, la diferencia radica en la inclusión de macrofibras de acero de origen nacional, las cuales poseen gancho en los extremos, son de 35 mm de longitud y 0,55 mm de diámetro, con factor de forma igual a 65, de la marca Dramix donadas por la empresa Belgo, ver Figura 22-a.

Adicionalmente se experimenta con una fibra de polipropileno del tipo MFPP de 12,5 mm de largo y 2 mm de ancho, donada por la empresa Sika. La idea es estudiar el desempeño de cada tipo de fibra dentro de la matriz de concreto y su influencia sobre la resistencia, todo esto con la finalidad de evaluar una alternativa del UHPFRC económica, usando solamente materiales producidos en Brasil.

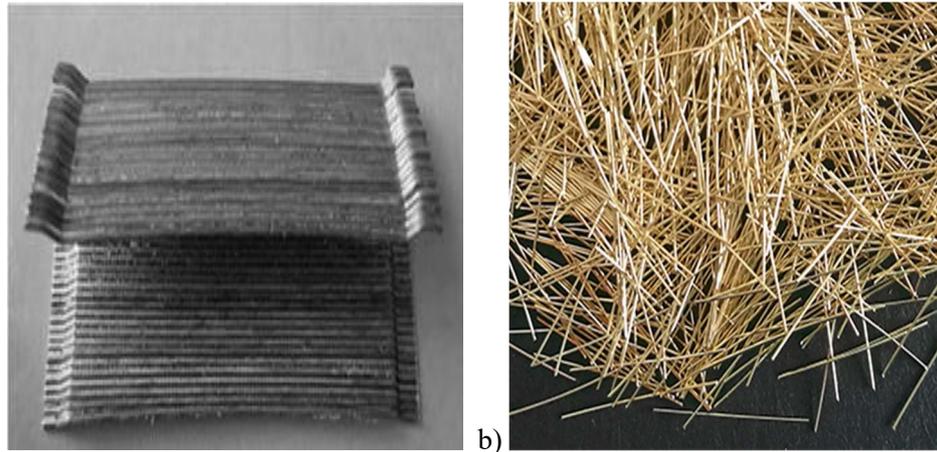


Figura 22: a) Macrofibras y b) Microfibras de acero.

Los diseños de mezcla a investigar en esta etapa del estudio se muestran en la Tabla 5. El diseño de mezcla UHPFRC-1 corresponde al mejor diseño de mezcla obtenido en la etapa anterior, cuya granulometría fue verificada usando el programa EMMA [129] para empaquetamiento de partículas. Las granulometrías de los diferentes materiales fueron introducidas en el programa para obtener la curva granulométrica del diseño de mezcla (línea en color azul) que es comparada con la curva teórica ideal (línea en color rojo) ver Figura 23.

Tabla 5: Diseño de Mezclas. Etapa II.

Material (kg/m ³)	UHPFRC-1	UHPFRC-2	UHPFRC-3	UHPFRC-4
Cemento	776	854	895	895
GGBS	179	119	60	60
Humo de sílice	239	239	239	239
SS	1051	1051	1051	1051
Superplastificante	40	40	40	40
Agua	185	185	185	185
Fibra Belgo 1%	79	79	79	79
Fibra Sika 1%	9	9	9	9

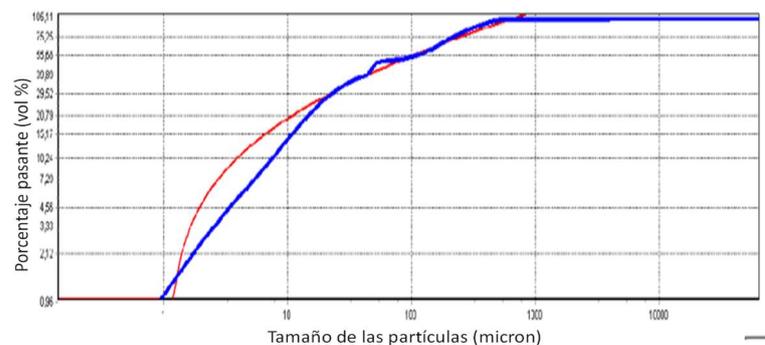


Figura 23: Curvas granulométricas usando EMMA.

Notamos que existe déficit de partículas con tamaños menores a 0,10 mm, los cuales pueden ser obtenidos moliendo y distribuyendo el material, actividad que se aparta de los criterios de diseño práctico que se desean alcanzar en nuestro trabajo. Se disminuye el tamaño máximo de las partículas en el programa para obtener un mejor ajuste de las curvas.

A partir del diseño de mezcla UHPFRC-1, en el cual un 35% del cemento se sustituye por los materiales sustentables GGBS y SF, se desprenden tres diseños de mezcla adicionales:

- (i) UHPFRC-2 con sustitución parcial del cemento del 30%;
- (ii) UHPFRC-3 con 25%; y
- (iii) UHPFRC-4 con 25% y una granulometría de escoria diferente.

La relación w/b se mantuvo fija en 0,15 y la relación w/c fue de 0,24 para UHPFRC-1, de 0,22 para UHPFRC-2 y de 0,21 para UHPFRC-3 y UHPFRC-4. La cantidad de SF, SS, superplastificante y agua se mantienen constantes y el superplastificante se usa en una proporción entre 3,30% y 3,35% del total del peso de los aglomerantes.

Los cuatro diseños de mezcla son concretados siguiendo el mismo procedimiento explicado en etapas anteriores, incluyendo en este caso las fibras a la mezcla. El momento oportuno para colocarlas es cuando el superplastificante ha reaccionado y la mezcla tiene el aspecto de densa masa plástica, lo que debe ocurrir al transcurrir 10 minutos de mezclado aproximadamente, entonces se añaden las fibras y se mezcla todo por dos minutos más, ver Figura 24.



Figura 24: Adición de las fibras de acero a la mezcla.

En ese estado la mezcla para el UHPFRC se considera lista y es entonces cuando se procede a vaciarla en los moldes cilíndricos de PVC con 7,5 cm de diámetro y 15 cm de altura, que llamaremos CP-7,5 para diferenciarlos de los más pequeños, los CP-5. Luego son compactados en mesa vibratoria por 1 minuto y almacenados como se explica en el proceso de fabricación a inicios del capítulo. Se aplica la cura Tipo 1 y Tipo 3.

El desmoldado de los cilindros de PVC se efectúa con aire a presión como puede verse en la Figura 25-a). El tamaño de las formas usadas es mayor debido al mayor tamaño de las fibras, no fue posible usar formas cilíndricas más grandes por limitaciones en la capacidad de la prensa disponible en el laboratorio. Los 216 cilindros son ensayados a compresión uniaxial, con tandas de 72 unidades a los 7, 28 y 90 días de curado, hasta alcanzar la carga última. La Figura 25-b) muestra el patrón de falla, los resultados son registrados para proceder posteriormente a la realización del análisis de varianza.

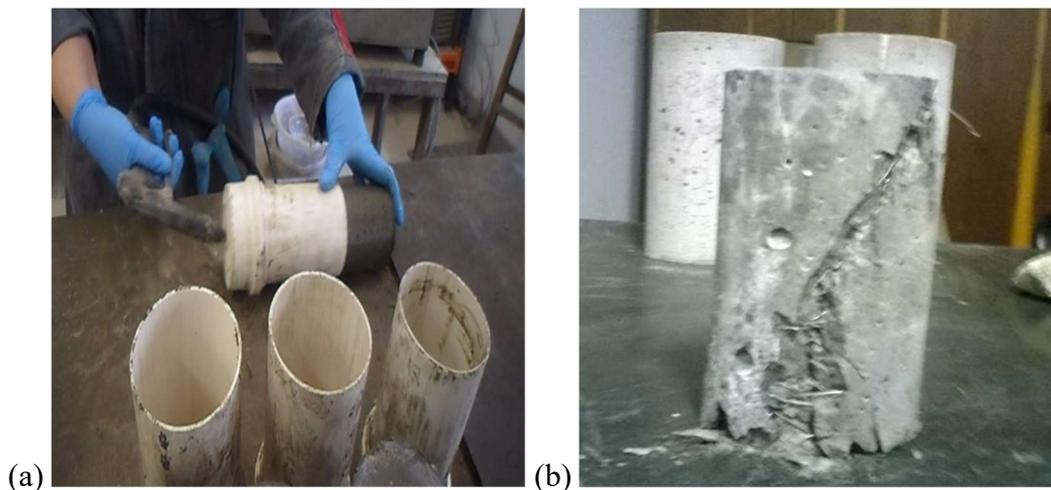


Figura 25: a) Desmoldado con aire a presión, b) Tipo de falla.

5.3.3 Etapa III: Desarrollando UHPFRC con microfibras

Las macrofibras usadas en la etapa anterior poseen una longitud casi igual a la mitad del diámetro de la moldura cilíndrica CP-7,5. En la consulta bibliografía realizada la mayoría de los autores alcanzan el ultra alto desempeño utilizando fibras cuya longitud sea como máximo $1/3,8$ veces el diámetro de la forma. Tal vez ese fue el motivo para no alcanzar una mayor resistencia en la etapa II. Adicionalmente se observó que el uso de polvo de cuarzo como aglomerante

ayuda a densificar la matriz y mejora la resistencia, sobre todo puede rellenar el déficit de ultra-finos detectados en etapas anteriores.

El análisis estadístico aplicado en la etapa II permitió tomar algunas decisiones para la etapa III, en primer lugar, considerar el tratamiento térmico en el curado como un factor constante y en segundo lugar considerar el tamaño de los cuerpos de prueba como un factor controlable, debido a diferencias de hasta un 30% entre los resultados de resistencia de CP-5 sobre CP-7,5.

Las fibras importadas a usar en esta etapa son también llamadas microfibras o fibras cortas de acero, los factores constantes quedan definidos por:

- (i) Único diseño de mezcla.
- (ii) Relación w/b establecida en 0,13.
- (iii) Relación w/c establecida en 0,19.
- (iv) Curado con tratamiento térmico.

Los factores controlables para el diseño de los tratamientos quedan definidos como:

- (i) A: edad de la muestra, con tres niveles de control;
- (ii) B: tamaño de la forma, con dos niveles de control CP-5 y CP-7,5; y
- (iii) C: contenido de fibras, con tres niveles de control (0%; 1%; 1,5%).

En la Tabla 6 se pueden observar los tratamientos, se realizan tres repeticiones en cada caso para conformar un total de 54 ensayos, con 18 grados de libertad que pueden ser revisados en los apéndices. En la Figura 26 se anexa la leyenda a seguir en esta etapa de la pesquisa.

Tabla 6: Diseño de Tratamientos.

Designación	Factor Control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Edad de la muestra	7 días	28 días	90 días
B	Tamaño del cilindro	CP-5	CP-7,5	
C	Contenido de fibras	0%	1%	1,50%

Los materiales a usar en la mezcla están constituidos por los mismos señalados en las etapas anteriores, con la adición del polvo de cuarzo y las microfibras, ver Figura 22-b). Las microfibras no son producidas en Brasil, tienen características específicas para ser usadas en la fabricación del UHPFRC y son referencia en la mayoría de los artículos científicos y en los productos patentados a nivel internacional. Poseen una longitud de 13 mm y diámetro de 0,2 mm lo

que equivale a un factor de forma de 65, son lisas y rectas, con una resistencia a la fluencia entre 2400 MPa a 2700 MPa.

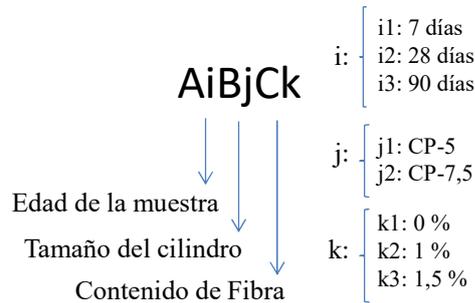


Figura 26: Leyenda para los especímenes en la etapa III.

El diseño de mezcla utilizado en esta etapa del estudio es mostrado en la Tabla 7, en el cual se usa una granulometría de escoria denominada GGBS-6, que corresponde a una fracción de la escoria GGBS-4 y GGBS-5 usadas anteriormente.

Tabla 7: Diseño de Mezcla UHPFRC. Etapa III.

Materiales (kg/m ³)	UHPFRC
Cemento	955
GGBS	263
Humo de sílice	119
Polvo de Cuarzo	119
SS	788
Superplastificante	40
Agua	185
1% de microfibras	79

Una fracción del cemento (26%) fue substituida por materiales sustentables como la GGBS y SF, adicionalmente el 8% de cemento fue substituido por polvo de cuarzo. La relación w/b se mantuvo fija en 0,13 y la relación w/c fue de 0,19. Adicionalmente, en esta etapa se realizaron las siguientes variaciones:

- (i) Se cambia de 24 a 48 horas el tiempo que los especímenes deben permanecer cubiertos con una manta plástica después del vaciado.
- (ii) El tipo de tratamiento térmico de cura aplicado es el Tipo 2. Pasadas las 48 horas de reposo dentro de la manta plástica los especímenes son desmoldados y colocados en baño térmico a temperatura ambiente, la temperatura sube progresivamente hasta

alcanzar los 60°C, permanecen así por 24 horas, la temperatura sube progresivamente hasta alcanzar los 90 °C y permanecen 24 horas más. El baño es desligado y comienza un proceso lento de enfriamiento, luego, son colocados en cámara húmeda, con temperatura de 20 °C ± 3 °C hasta el día de la prueba.

Los 54 especímenes se ensayaron en tandas de 18 unidades a los 7, 28 y 90 días de curado, observando el mismo patrón de falla de la Figura 25 b). Los resultados son registrados para proceder posteriormente a la realización del análisis de varianza.

5.3.4 Etapa IV: Relaciones constitutivas del UHPFRC

La definición del diseño de mezcla en la etapa anterior permite alcanzar valores de resistencia a la compresión promedio (f_{cm}) que supera los 150 MPa. En esta etapa se fabrican y ensayan a compresión uniaxial 20 cilindros CP-5 con el diseño de mezcla de la Tabla 7, para determinar el comportamiento constitutivo del material incluyendo las fases elástica e inelástica, usando 1% de microfibras de acero. Se sigue el mismo procedimiento de fabricación explicado a inicios del capítulo y se aplica la cura Tipo 2. Los valores de la resistencia a la compresión promedio, la resistencia característica y el módulo de elasticidad del UHPFRC pueden ser definidos basados en una muestra experimental más representativa.

Para capturar el comportamiento post-agrietamiento se usó la metodología propuesta por Hassan et al [5] explicada anteriormente, ver Figura 27, aplicando la carga por desplazamiento a 0,5 mm/min.



Figura 27: Medición post- agrietamiento en ensayo de compresión uniaxial.

Los valores de la carga vs desplazamiento vertical de cada espécimen son registrados, para posteriormente calcular los valores de la resistencia obtenida por dividir la carga aplicada por la prensa por el área de la sección transversal del cilindro.

El módulo de elasticidad fue calculado usando una aproximación lineal con mejor ajuste en los resultados de σ - ϵ entre 10% a 30% de la resistencia a la compresión pico, siguiendo las recomendaciones de Graybeal B. [105].

El desplazamiento vertical elástico fue medido por LDVT sobre el cilindro hasta la aparición de la primera grieta y el inelástico fue medido por LDVT localizados entre la cara inferior y superior del cabezal de la prensa en contacto con el cuerpo de prueba, siguiendo las recomendaciones de Hassan et al. [5].

Para determinar la resistencia a la compresión característica (f_{ck}) del UHPFRC usaremos las recomendaciones AFGC [77] que indican el procedimiento a seguir:

- (i) Aplicar la carga con control de desplazamiento.
- (ii) La superficie de fractura debe ser consistente con la Figura 28, especificada en la norma EN12390-3 [130], la cual señala los tipos de falla satisfactorios que pueden ocurrir.
- (iii) La resistencia promedio debe ser calculada en al menos tres especímenes.
- (iv) El valor característico de la resistencia a la compresión se calcula restando al valor promedio de la resistencia el coeficiente de Student multiplicado por la desviación Standard.

$$f_{ck} = f_{cm} - \text{coeficiente Student} \cdot \text{desviación Standard} \quad (8)$$

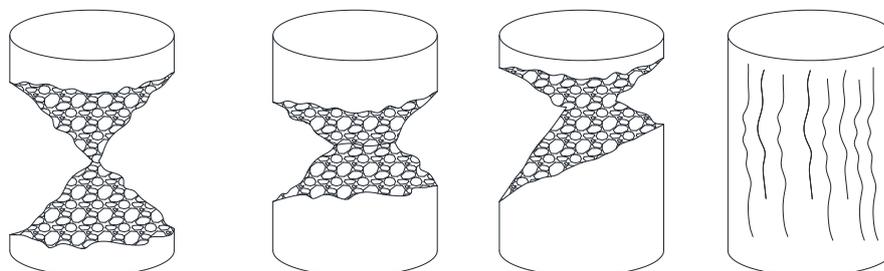


Figura 28: Fallas satisfactorias en UHPFRC. Fuente EN12390-3 [130] adaptado.

5.4 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN

La norma AFGC [77] define como extremadamente desfavorable al teste de tracción directa usando especímenes con muesca e indica que no es necesariamente representativo del comportamiento del material en la estructura. El programa experimental se realizará fabricando especímenes sin muesca, con geometría en forma de hueso de perro, mejor conocido como Dog-Bone por su nombre en inglés, el cual es recomendado por la norma JSCE [95] y cuyas dimensiones pueden ser observadas en la Figura 29.

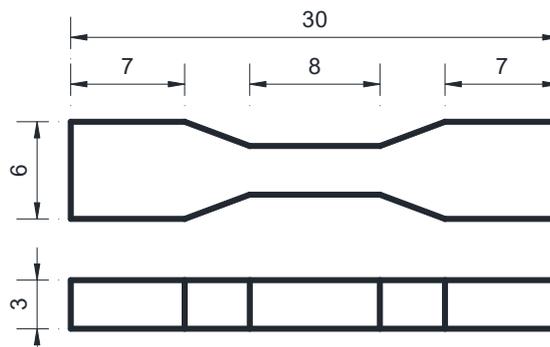


Figura 29: Dimensiones del Dog-Bone (en cm).

El trabajo experimental se desarrolla considerando dos factores controlables, ver Figura 30:

- (i) A: tipo de fibra, con dos niveles; y
- (ii) B: contenido de fibras, con tres niveles (0%, 1%, 2%)

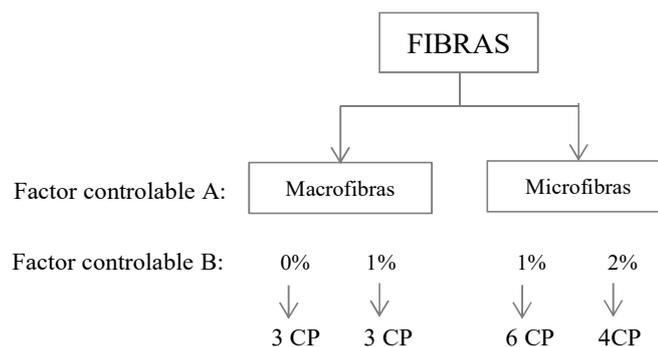


Figura 30: Programa experimental para ensayo de tracción.

Se utilizan formas de madera, como las indicadas en la Figura 31-a), para fabricar 16 cuerpos de prueba (CP) tipo Dog-Bone. Se seguirá el mismo procedimiento de fabricación de la mezcla explicado a inicios del capítulo. El tratamiento térmico a aplicar es el mismo descrito en la Etapa III para CP-5 sometidos a compresión. El proceso de vaciado del concreto en las formas

se realiza por capas, desde un extremo a otro de la forma, como se muestra en la Figura 31-b). Después del desmoldado los CP son colocados dentro del baño térmico para recibir el tratamiento de cura y luego se almacenan en la cámara húmeda hasta el día de la prueba.

El ensayo de tracción directa se desarrolla para las todas las probetas a los 28 días de curado. Los especímenes fueron colocados y nivelados entre dos garras metálicas como se muestra en la Figura 32-a) y 32-b), para ser ensayados en una prensa hidráulica con capacidad de 2000 kN a una tasa de desplazamiento de 0,5 mm/min hasta un desplazamiento igual a la mitad de la longitud de la microfibra, es decir, hasta 65 mm. Dos LVDT fueron colocados en ambas caras del Dog-Bone para promediar el desplazamiento medido en una longitud de 8 cm. La varianza experimental fue disminuida al utilizar materiales de un mismo lote y los mismos equipos para la fabricación y ensayo de las probetas. Los resultados son registrados para proceder posteriormente a graficar las curvas de comportamiento del material.

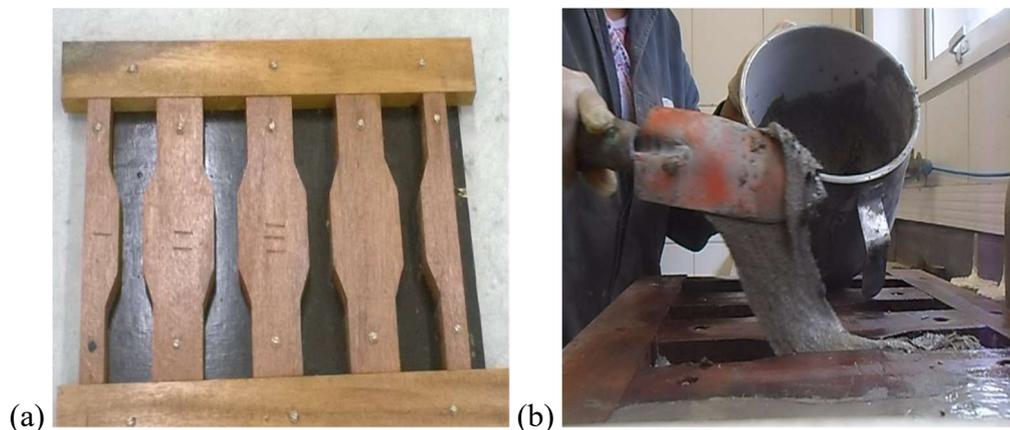


Figura 31: a) Formas para Dog-Bone; b) Vaciado de la mezcla.

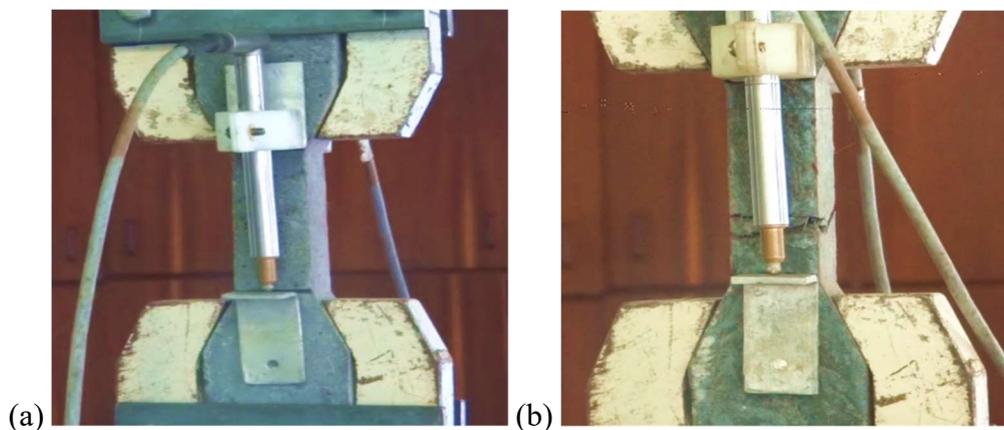


Figura 32: a) Ensayo de tracción directa, b) Tipo de falla.

La realización del ensayo no es tarea fácil, inicialmente se contemplaron 35 ejemplares, 7 unidades para cada porcentaje de fibra, sólo se consiguió medir el comportamiento en el 45% de los especímenes. La manipulación y nivelación de los Dog-Bone dentro de las garras de la prensa debe ser extremadamente cuidadosa, para evitar la formación de fisuras previas y fallas de torsión anticipadas.

5.5 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

El procedimiento a seguir para la determinación de las propiedades mecánicas del UHPFRC en flexión es descrito en la AFGC [77] y puede ser resumido en los siguientes pasos:

- (i) Ubicar el espécimen sobre los dispositivos para el ensayo en la prensa y fijar los sensores.
- (ii) Precargar el espécimen al menor grado posible, chequear que cuando esta carga es aplicada la deflexión en los sensores para flecha y en el sensor para medir la abertura de la trinca funcionan.
- (iii) Aplicar una carga de 0,25 mm/min para control de gato, para control de la deflexión 0,1 mm/min y 0,025 mm/min para control desde el sensor de punteo en la abertura de la trinca.
- (iv) Continuar el ensayo hasta que la deflexión medida directamente sobre el espécimen alcance 0,015 veces el valor de “a” (en mm), que en nuestro caso es 1,5 mm.

La prensa mecánica usada para el desarrollo de las pruebas experimentales de esta pesquisa tiene como mínima velocidad de aplicación de carga el valor de 0,5 mm/min, por tanto, el ítem (iii) no puede ser cumplido.

Las recomendaciones también señalan que la data experimental debe ser registrada durante la prueba a una frecuencia de 5 Hertz para proveer una curva con al menos 1200 puntos. Debe ser registrado el tiempo, abertura de la muesca, deflexión y la fuerza, como fue registrado en esta pesquisa. Seis pruebas de cada tipo de ensayo deben ser realizadas para obtener una respuesta estadísticamente confiable. Por motivos económicos se realizaron tres repeticiones para cada tipo de espécimen.

Por último, la AFGC [77] recomienda el ensayo de tracción directa sobre un espécimen sin muesca para determinar la resistencia a la tracción y el ensayo de flexión en tres puntos sobre vigas con muesca para estudiar el desempeño de las fibras dentro de la matriz de UHPFRC.

5.5.1 Flexión en tres puntos sobre mini-vigas prismáticas

El programa experimental consiste en la fabricación de mini-vigas prismáticas cuyas dimensiones pueden ser observadas en la Figura 33. En la parte central inferior de la viga posee una muesca de 3 cm de alto y 0,4 cm de ancho.

El trabajo experimental se desarrolla considerando dos factores controlables:

- (i) A: tipo de fibra, con dos niveles; y
- (ii) B: contenido de fibras, con tres niveles (0%, 1%, 2%)

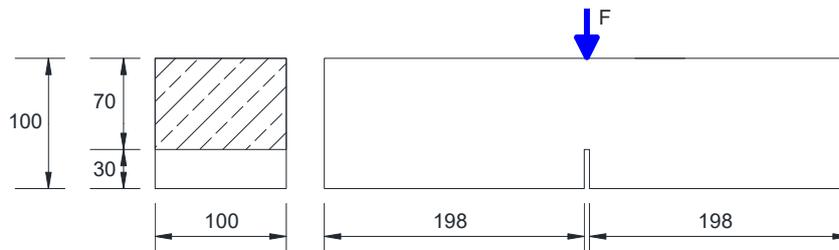


Figura 33: Dimensiones de las mini-vigas.

El diseño de mezcla de la Tabla 7 es usado para fabricar la mezcla de concreto. El proceso de vaciado se efectúa de una manera artesanal, por la ausencia de equipamientos que garanticen la colocación de la mezcla por capas, desde un extremo a otro de la forma, como lo especifican las normas.

El molde de madera es colocado sobre un rodillo de concreto que permite su desplazamiento horizontal, manualmente se desplaza el elemento desde un extremo al otro, como se muestra en las Figuras 34-a) y 34-b). La mezcla es vertida longitudinalmente, permitiendo que las fibras se orienten en ese mismo sentido, es decir, perpendicular a la carga, como es esperado. Luego del vaciado, las mini-vigas permanecen las primeras 48 horas sin desmoldar, cubiertas por un manto plástico.



Figura 34: Vaciado de las mini-vigas.

Después del desmoldado las mini-vigas son colocadas dentro del baño térmico para recibir el tratamiento de cura y luego ser almacenadas en la cámara húmeda ($20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$) hasta el día de la prueba. Previo al ensayo la muesca inferior es construida con una sierra eléctrica.

De esa forma se construyen las 19 mini-vigas, siguiendo el programa experimental de la Figura 35 y el procedimiento de fabricación explicado a inicios del capítulo. Después de ensayar las vigas se selecciona un ejemplar de cada tipo, para ser cortado transversalmente con la sierra eléctrica, tener una imagen del verdadero porcentaje de fibras que atraviesa el elemento y calcular el porcentaje efectivo de fibras para la simulación numérica.

Se desarrolla el ensayo de flexión de tres puntos para todas las probetas a los 28 días de curado. Cada mini-viga es colocada sobre dos apoyos simples y es nivelada sobre la mesa de la prensa para garantizar la aplicación de la carga en medio del vano superior, como se muestra en la Figura 36.

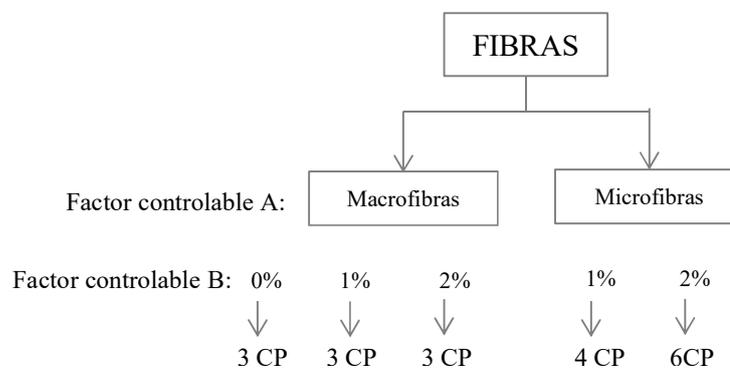


Figura 35: Programa experimental para ensayo de flexión.

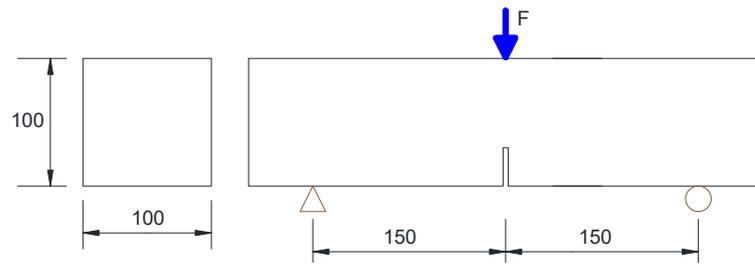


Figura 36: Esquema del ensayo de flexión en tres puntos (cm).

Dos LVDT se colocan en ambos lados de la viga para promediar el desplazamiento vertical y un LDVT horizontal, fijo a la viga, registra la abertura de la trinca a medida que se aplica la carga, como puede verse en la Figura 37-a) y 37-b). Usando una prensa hidráulica con capacidad de 2000 kN y aplicando la carga a una tasa de desplazamiento de 0,5 mm/min (mínima velocidad de la máquina) cada elemento es ensayado hasta alcanzar una deflexión igual a 1,5 mm, según las estipulaciones de la AFGC [77], ver tipo de falla en la Figura 38.

La varianza experimental fue disminuida al utilizar materiales de un mismo lote y los mismos equipos para la fabricación y ensayo de las probetas. Los resultados son registrados para proceder posteriormente a graficar las curvas de carga versus deflexión (F vs δ) o versus abertura de la grieta (F vs ω). Esa data será usada para validar el análisis inverso, descrito en el siguiente capítulo, y finalmente determinar la ley de comportamiento de tracción en la flexión del UHPFRC incluyendo la fase de post-agrietamiento.

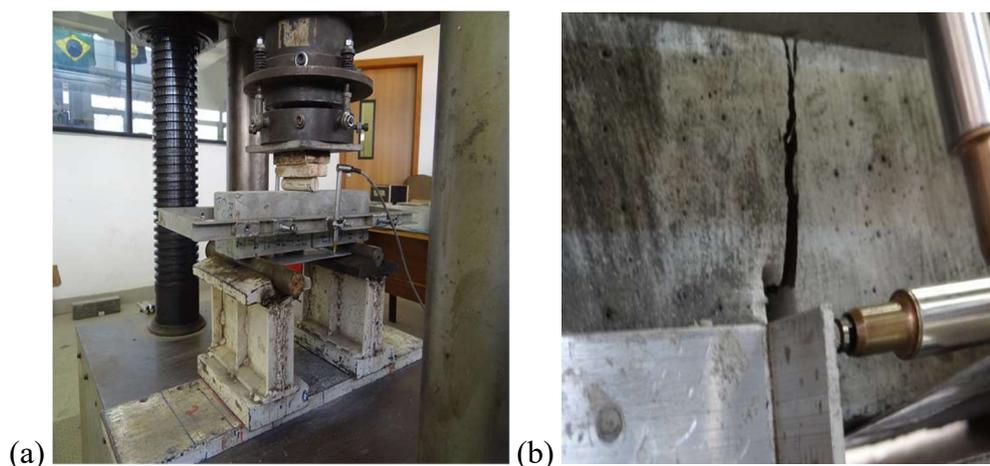


Figura 37: a) Ensayo de tracción en tres puntos, b) Tipo de falla.



Figura 38: Falla en mini viga con 1% de fibras largas de acero.

5.5.2 Flexión en cuatro puntos sobre meso-viga o viga I

Con el propósito de validar las leyes de comportamiento que serán obtenidas por análisis inverso usando las mini-vigas, se construyen elementos de viga a una mayor escala, a las que denominaremos meso-viga o viga “I”, usando UHPFRC. Adicionalmente se construirán las mismas vigas I sin fibras y con acero de refuerzo convencional (usando barras) para evaluar el comportamiento del elemento fabricado con UHPFRC sometido a esfuerzos de flexión en cuatro puntos. Las dimensiones geométricas en centímetros se observan en la Figura 39.

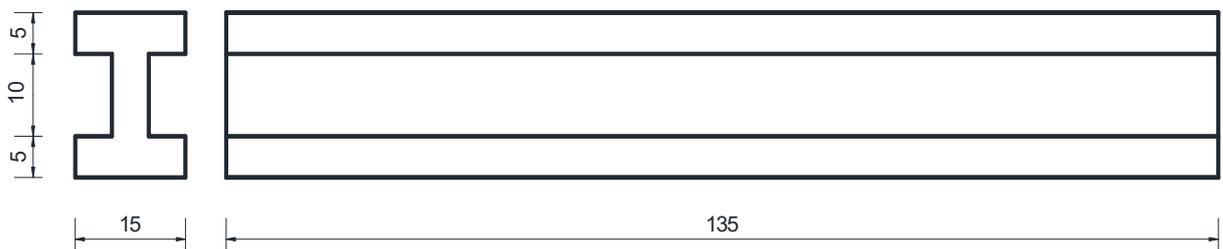


Figura 39: Geometría de la Viga “I” en cm.

El elemento es fabricado usando encofrado de madera como se muestra en la Figura 40-a), el reforzamiento usado consistió en tres tipos:

- (i) Usando acero convencional (2 CP), ver Figura 40-b) y detalles en los apéndices.
- (ii) Usando microfibras de acero (1 CP).
- (iii) Usando macrofibras de acero (1 CP).

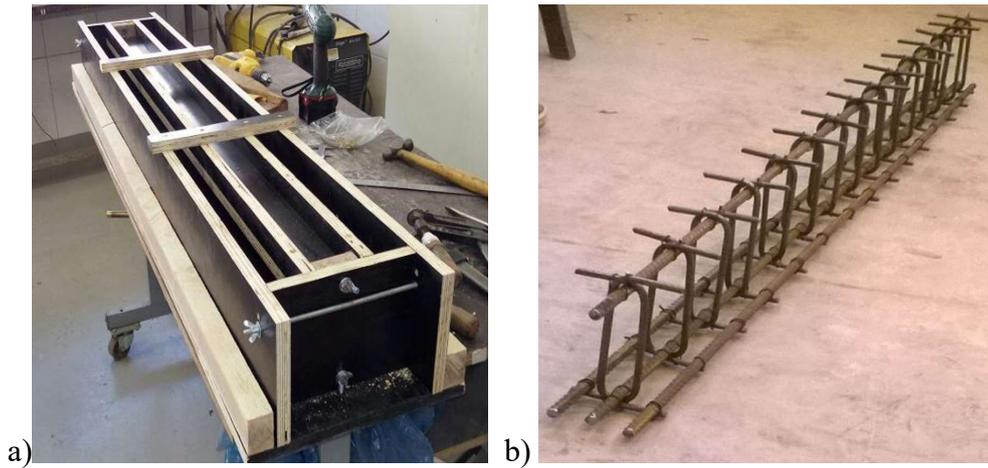


Figura 40: Viga “I”: a) encofrado, b) acero de refuerzo convencional.

El vaciado de la mezcla de UHPFRC se observa en las Figuras 41-a) y 41-b), el elemento terminado puede observarse en la Figura 42, cuatro ejemplares (4 CP) fueron construidos.

Es importante detallar en la Figura 41-a) como la mezcla de UHPFRC es vertida dentro del encofrado de madera, la colocación es de forma manual, la masa de concreto presenta características de tixotropía, convirtiéndola en un material factible y fácil de usar en miembros estructurales que requieren reforzamiento o donde el proceso de encofrado y vaciado es arquitectónicamente limitado.

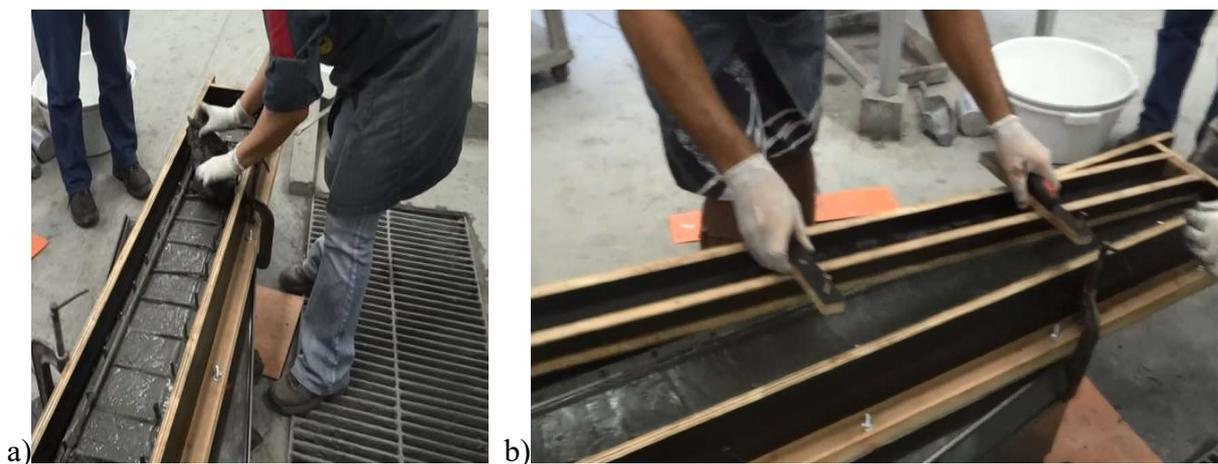


Figura 41: a) y b) Vaciado de la Macro-viga o viga “I” usando UHPFRC.



Figura 42: Viga I construida con UHPFRC.

Debido al tamaño del elemento no fue posible realizar el tratamiento térmico y sólo se aplicó el curado Tipo 3. El ensayo de flexión en cuatro puntos se realiza para todas las vigas a los 28 días de curado. Cada viga es colocada sobre dos apoyos simples y es nivelada sobre la mesa de la prensa para garantizar la aplicación de la carga como se muestra en las Figuras 43 y 44.

La Figura 44 muestra el desarrollo del ensayo, en el cual la deflexión de la viga fue medida usando un deformímetro, la carga fue aplicada usando una prensa hidráulica con capacidad de 2000 kN, aplicando la carga a una tasa de desplazamiento de 0,5 mm/min (mínima velocidad de la máquina) cada elemento es ensayado hasta alcanzar una deflexión igual a 6 mm.

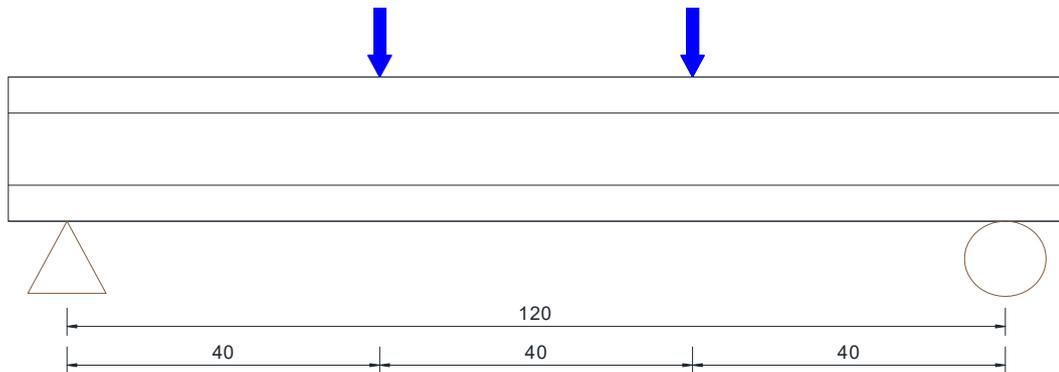


Figura 43: Viga I. Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos.



Figura 44: Viga I. Ejecución del ensayo de flexión.

En la Figura 45 se visualiza el tipo de falla presentado usando acero de refuerzo convencional. El tipo de falla observado en los ensayos realizados sobre las vigas, incluyendo solamente micro y macro fibras de acero, puede ser observado en las Figuras 46 y 47.

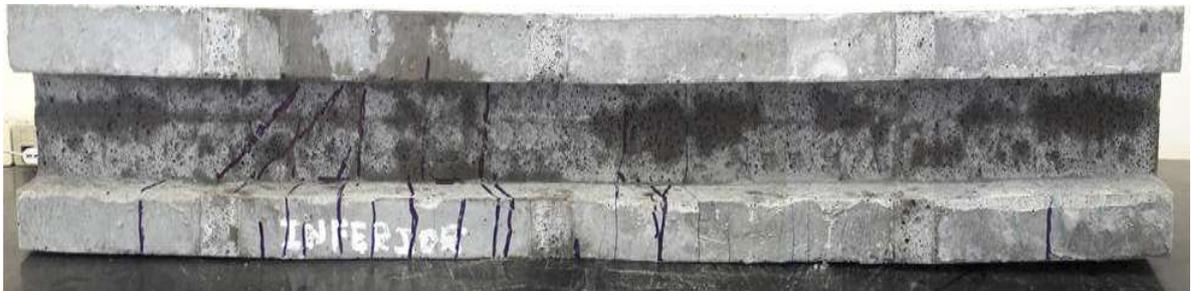


Figura 45: Tipo de falla. Viga I con refuerzo convencional.



Figura 46: Tipo de falla. Viga I con microfibras.



Figura 47: Colapso de Viga I con UHPFRC y microfibras de acero.

No se visualizaron grandes agrietamientos, la sección permaneció prácticamente intacta. Luego de aparecer la primera grieta la viga demoró mucho tiempo en fallar. Dos bloques de arcilla son colocados en la parte inferior, sin contacto con la viga, para evitar que la viga I al fallar golpee la mesa de la prensa.

Los resultados son registrados para proceder posteriormente a graficar las curvas de carga versus deflexión (F vs δ) en cada uno de los casos. Esa data será usada para validar la ley de comportamiento obtenida ensayando vigas prismáticas.

5.6 FRACTURA DEL UHPFRC

La AFGC [77] recomienda que al realizar la fabricación del prisma se intente que las fibras se orienten en el sentido perpendicular a la carga durante el proceso de vaciado. También indica que el elemento debe ser girado 90 grados antes de colocarlo en la prensa, de modo que la aplicación de la carga y la abertura de la muesca (ω) coincidan con las caras lisas.

El ensayo se desarrolla junto al de flexión, para ello un LDVT es adicionalmente colocado en la cara inferior del espécimen para medir las aberturas ω , en las imágenes de la Figura 48-a) y 48-b), se visualiza, además del tipo de falla, la medición de la abertura de la muesca (ω) con el LVDT horizontal, al final del ensayo de flexión en tres puntos.

Con el registro de la data experimental las curvas (F vs ω) son graficadas para las mini-vigas, usando micro y macro fibras de acero, con porcentajes de fibras de 1% y 2%, la energía de fractura es calculada según las especificaciones de RILEM 50-FMC [123].

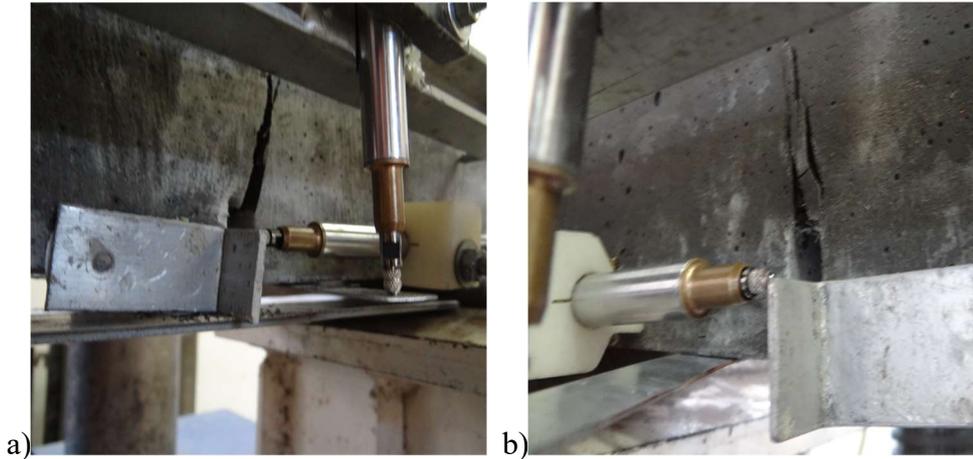


Figura 48: Medición de la abertura de la muesca (ω).

5.7 RESISTENCIA A LA ADHERENCIA

Con el propósito de caracterizar el UHPFRC en función de la resistencia a la adherencia de barras embebidas dentro del material, se realiza una serie de ensayos para conocer valores de la longitud de desarrollo necesaria en el diseño estructural usando UHPRC.

Se realizan ensayos de arrancamiento del tipo Pull Out Test (POT) usando dos tipos de barra (acero y poliméricas) con dos tipos de diámetro (10 mm y 15 mm). No se dispone de códigos nacionales que regulen esta prueba usando barras poliméricas, por tanto, el planeamiento experimental sigue las orientaciones de trabajos desarrollados en la Universidad de São Paulo (USP).

Las barras de acero incluidas en los ensayos son de uso comercial común, con acero tipo A50.

Las barras poliméricas también son de uso comercial, fabricadas por una empresa nacional, ver Figuras 49-a) y 49b). Ambos ensayos se realizan con fines de comparación, determinando la longitud de desarrollo que cada tipo de barras necesita al ser embebidas en elementos estructurales de UHPRC.

Usar barras poliméricas promete varios beneficios: (i) no son corrosivas, por tanto, se requiere menor recubrimiento; (ii) alta resistencia a la tracción, informada por el fabricante; (iii) menor peso; y (iv) aislante térmico e eléctrico. Las barras usadas en la pesquisa fueron donadas por la empresa brasilera JBL Eco Reciclagens [131], esas barras son fabricadas con fibras de vidrio siguiendo un diseño sustentable.

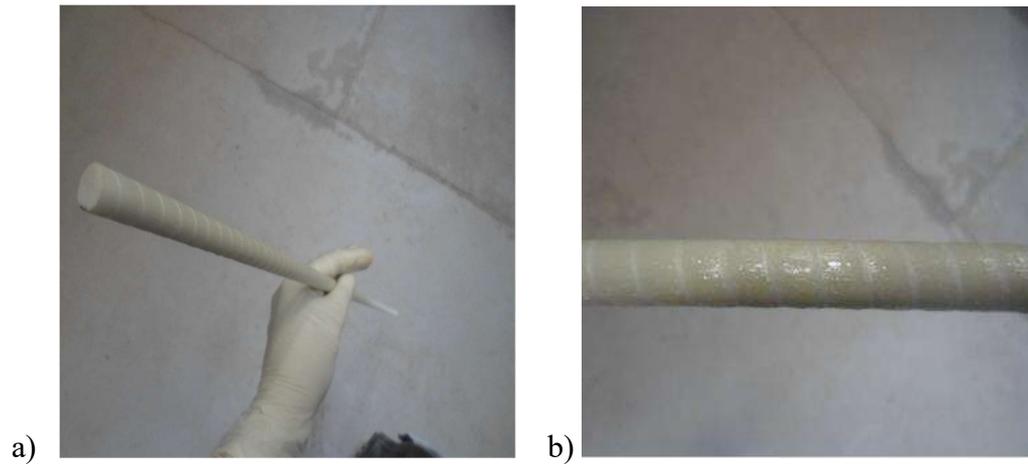


Figura 49: a) y b) Barras poliméricas.

El ensayo de tracción uniaxial sobre cada barra polimérica es realizado para verificar la información técnica suministrada por la empresa fabricante. El laboratorio no dispone de dispositivo para medir la deformación de la barra polimérica sometida a tracción, por tanto, sólo se registra el valor de la fuerza.

El ensayo de arrancamiento o Pull-Out Test es realizado para determinar la fuerza que resiste la barra dentro de la matriz y luego calcular la resistencia a la adherencia. Es elaborado en especímenes fabricados con UHPRC para cada tipo de barra, usando cinco repeticiones para cada diámetro.

5.7.1 Resistencia a la tracción uniaxial en barras poliméricas

El ensayo a tracción se desarrolla en una prensa hidráulica con capacidad de 2000 kN, a una tasa de desplazamiento de 0,5 mm/min hasta la carga última. Cinco especímenes de cada diámetro son ensayados.

Las Figuras 50-a) y 50-b) muestran el ensayo de tracción directa y el instante de falla, las Figuras 51-a) y 51-b) muestran el tipo de falla sobre la barra polimérica.

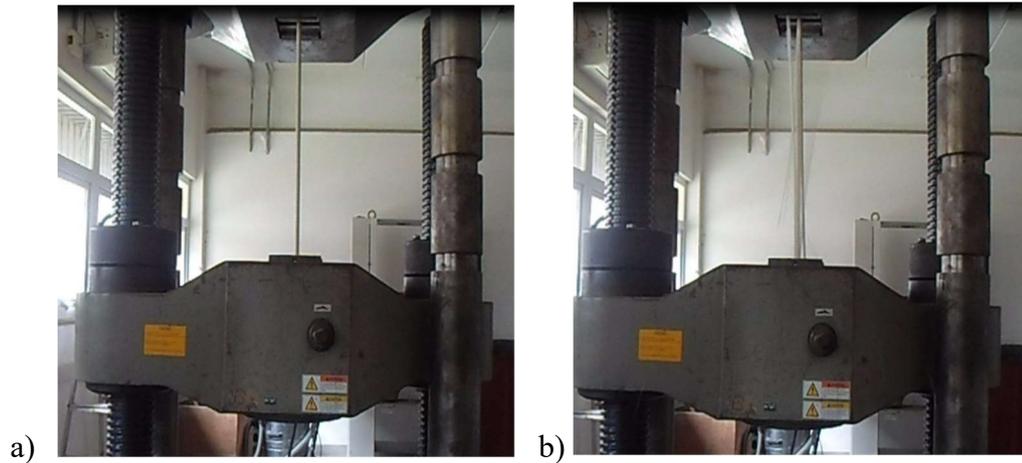


Figura 50: a) Ensayo de tracción; b) Tipo de falla, en barras poliméricas.

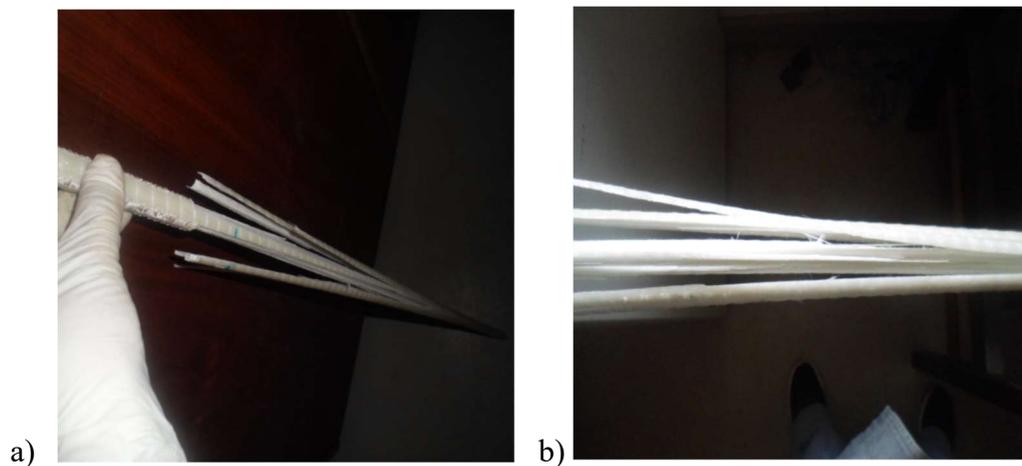


Figura 51: a) y b) Tipo de falla en las barras poliméricas.

5.7.2 Resistencia a la adherencia de barras empotradas en UHPRC

Se fabrican cinco ejemplares para cada barra (en total 20 especímenes) usando formas cilíndricas con diámetro y altura igual a diez veces el diámetro de la barra, en la Figura 52 podemos observar el diseño de las formas empleadas en la Universidade de São Paulo, Andrade I. [132]. Esas formas sirvieron de base para construir las utilizadas en este trabajo, construidas con tubos PVC y soportes de madera, garantizando el tramo no adherente del cilindro por medio de una manguera plástica, colocada hasta la mitad de la altura de la forma cilíndrica. En la Figura 53 se observan las formas fabricadas para esta pesquisa.

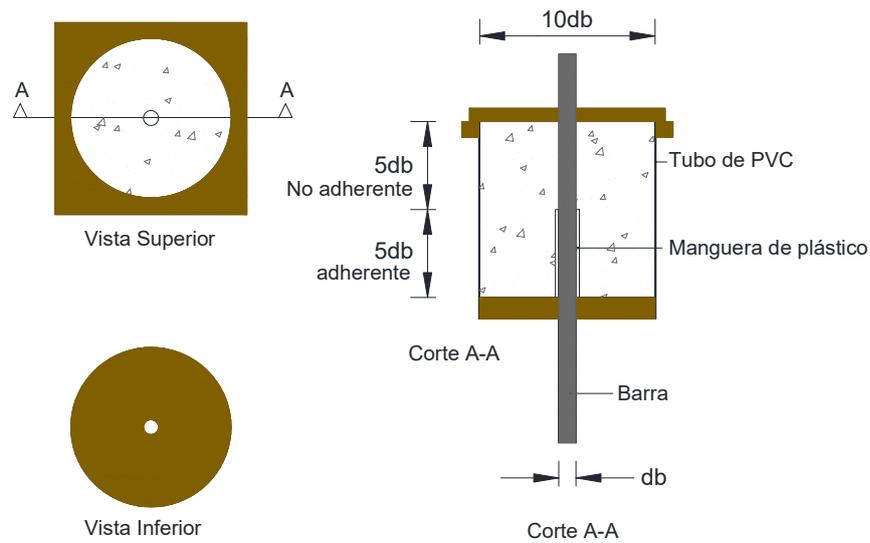


Figura 52: Formas para ensayo POT usado en la USP. Fuente: Andrade, I. [106].



Figura 53: Formas para el ensayo de Pull-Out.

La mezcla es fabricada siguiendo el mismo procedimiento de etapas anteriores y es vertida sobre las formas, en las Figuras 54-a) y 54-b) se observa el vaciado manual de la mezcla, nuevamente las imágenes muestran la consistencia del UHPRC desarrollado en este trabajo, con características tixotrópicas, como si fuese una pasta moldeadora.

Después de vaciados, los especímenes reposan por 48 horas cubiertos por una manta de plástico, pasado ese tiempo son almacenados en cámara húmeda hasta el día de la prueba.

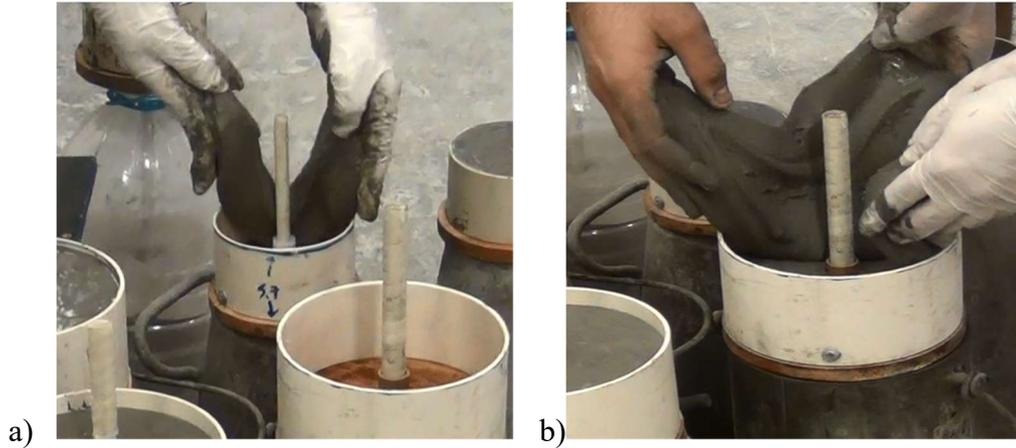


Figura 54: a) y b) Vaciado del UHPRC en formas para Pull-Out test.

Para la realización del ensayo una estructura especial de soporte es requerida, sobre la cual los cuerpos de prueba se colocan durante el ensayo, ver Figura 55-a), luego del montaje del sistema metálico, los cilindros se nivelan sobre la mesa de apoyo y la barra es sujeta por la garra inferior de la prensa, que aplica la carga descendiendo a una velocidad de 0,5 mm/min. Un LVDT es colocado en la parte superior del cilindro para medir el deslizamiento de la barra dentro del cilindro de UHPFRC, ver Figura 55-b). En total son ensayados 20 especímenes, la data es registrada para posteriormente calcular el valor de la resistencia a la adherencia.

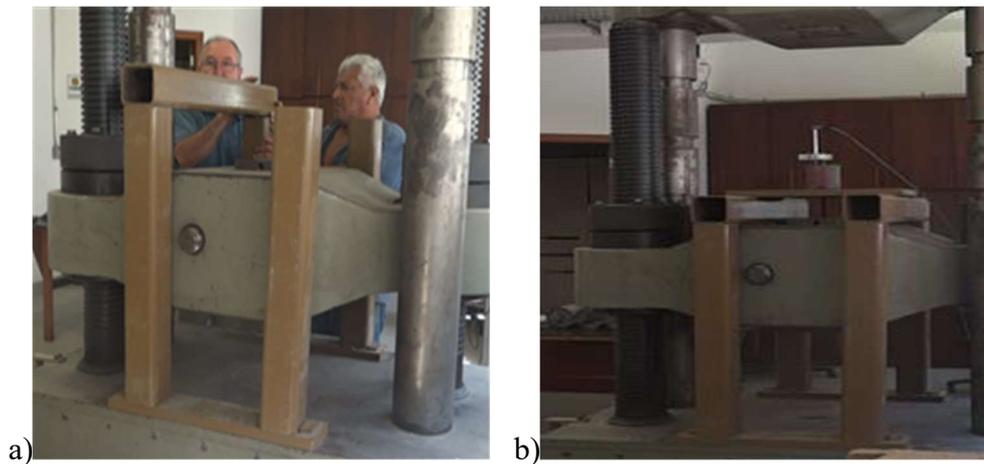


Figura 55: (a) Estructura de apoyo y (b) Pull-Out Test.

En las Figuras 56-a) y 56-b) se observan los especímenes durante el ensayo. En la Figura 57-a) observamos el instante de falla con estallido del concreto, y en la 57-b) el espécimen post-falla. El proceso es repetido usando barras de acero con los mismos diámetros de las barras poliméricas, para posteriormente comparar resultados.

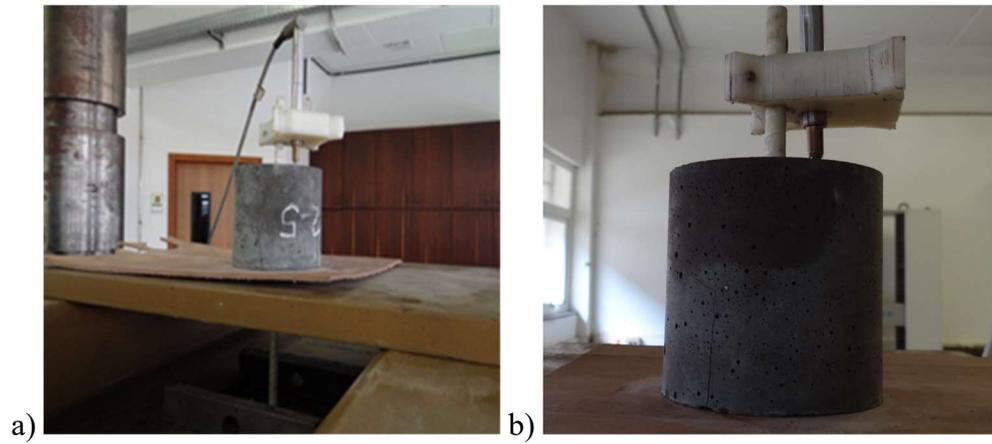


Figura 56: a) y b) Ensayo Pull-Out Test.

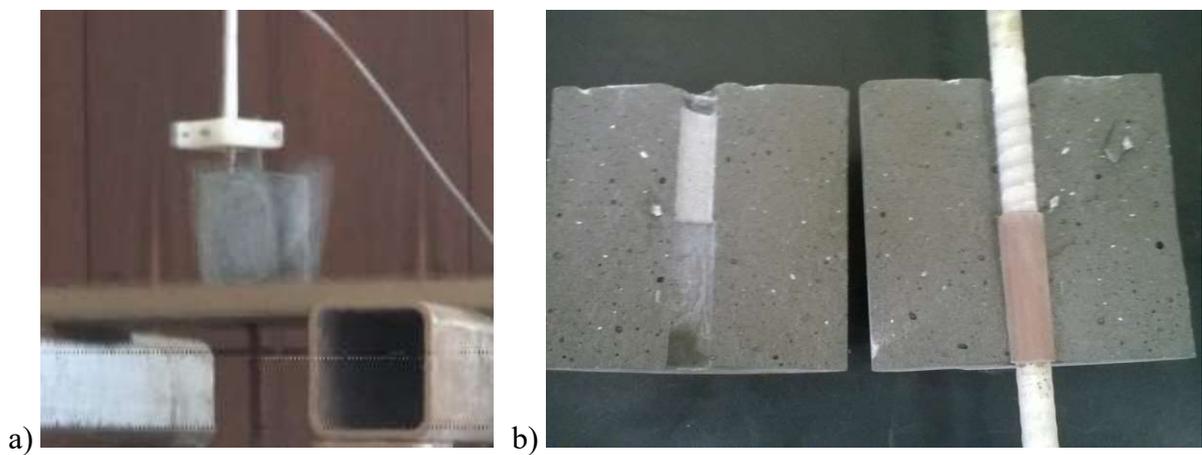


Figura 57: a) Instante de la falla y b) Espécimen post-falla.

En la Figura 58 observamos el conjunto de especímenes con barras de acero, antes de ser ensayados.



Figura 58: Cuerpos de prueba para el Pull-Out Test.

La resistencia a la adherencia se calcula con la Ecuación 9:

$$\tau b = \frac{Ftb}{2. \pi. r. l} \quad (9)$$

Dónde:

τb = Resistencia a la adherencia de la barra dentro de la matriz de UHPRC

Ftb = Fuerza máxima de tracción aplicada a la barra empotrada en la matriz

r = Radio de la barra ($db/2$)

l = Trecho adherente de la barra ($5db$)

db = Diámetro de la barra

Luego, con el valor de la resistencia a la adherencia y de la fuerza máxima a tracción uniaxial soportada por la barra ($Ftub$) calculamos la longitud de desarrollo (ld) con la Ecuación 10:

$$ld = \frac{Ftub}{2. \pi. r. \tau b} \quad (10)$$

Las barras de acero no fueron ensayadas individualmente el valor de la resistencia a la tracción de la barra es calculado en función del esfuerzo de fluencia del acero y del diámetro de la barra. Los valores registrados por el LVDT presentaron variabilidad, posiblemente por inestabilidad del tipo de fijación del dispositivo de medición sobre la barra.

6 PROCEDIMIENTO NUMÉRICO

El procedimiento numérico desarrollado en este trabajo se realiza, primeramente, con el propósito de caracterizar el UHPFRC según su comportamiento en flexión o tracción en la flexión, ya que el mismo no puede ser determinado directamente desde la data experimental. El desarrollo analítico es validado usando MEF, considerando a las fibras como refuerzo incorporado en la simulación del concreto. En segundo lugar, se evalúa el comportamiento del UHPFRC por el MEF considerando a las fibras como refuerzo distribuido en la simulación del concreto, ver el esquema de trabajo mostrado en la Figura 59.

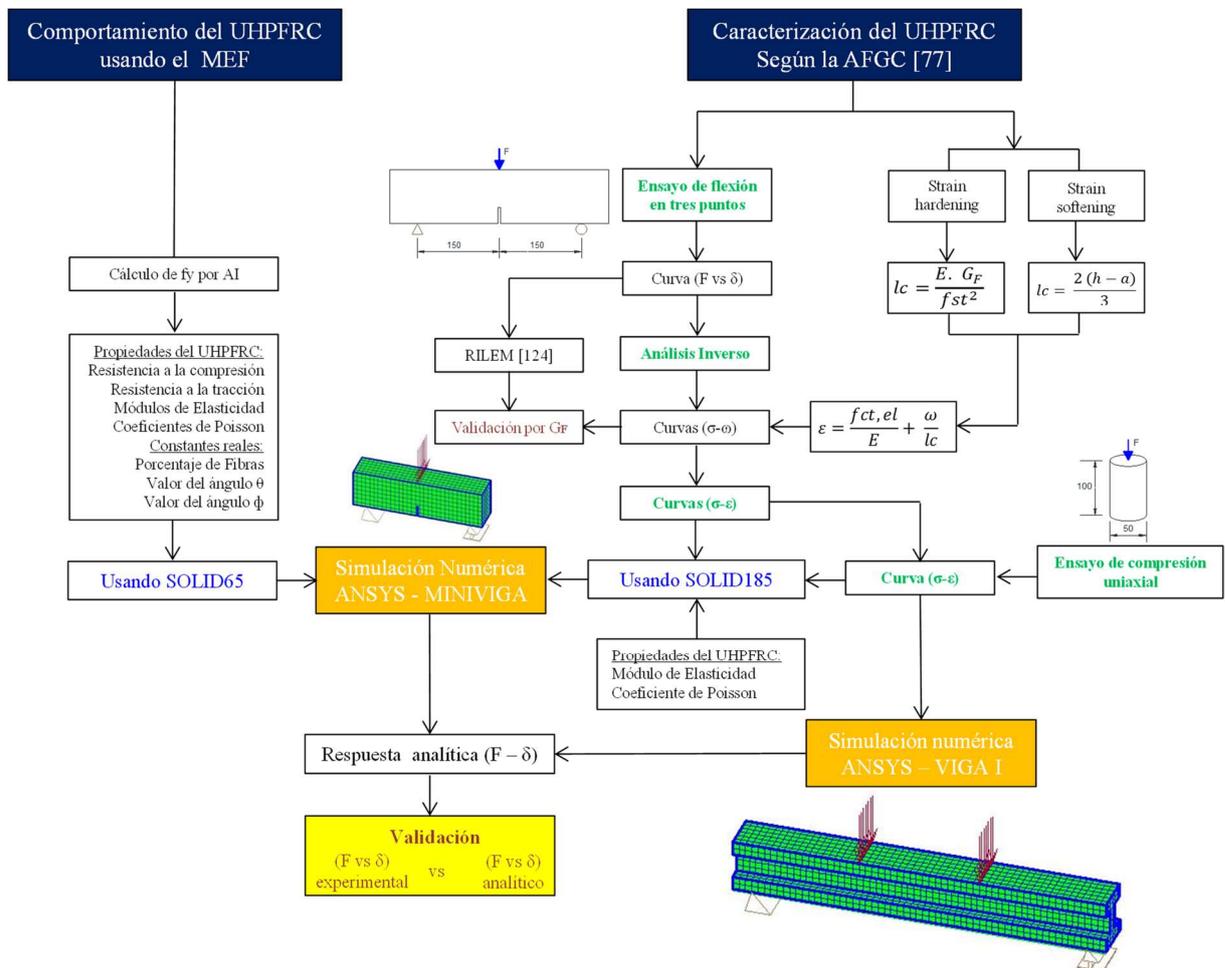


Figura 59: Procedimiento numérico para caracterizar el UHPFRC.

Para la caracterización del UHPFRC en flexión, incluyendo el trecho inelástico del comportamiento, es necesario recurrir a procedimientos analíticos alternativos. Las recomendaciones de la AFGC [77] indican un procedimiento para caracterizar ese tipo de material a partir de la data

(F vs ω) registrada en ensayos de flexión en tres puntos. Usando esa data, un análisis inverso es aplicado para obtener las relaciones constitutivas del material. Luego, el Método de los Elementos Finitos (MEF) es usado para validar los resultados. El elemento SOLID185 junto al material CAST de ANSYS [133] es usado para modelar vigas fabricadas con UHPFRC y al final realizar comparaciones con la data experimental.

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL UHPFRC EN FLEXIÓN

El procedimiento para caracterizar el UHPFRC según su comportamiento de flexión o tracción en la flexión consiste en la determinación de la ley de comportamiento del material, incluyendo la fase de post-agrietamiento. Para lograrlo se requiere aplicar la metodología de la AFGC [77] para el UHPFRC, que recomienda análisis inverso para obtener la curva (σ vs ω) a partir de la curva experimental (F vs ω), luego, utilizando una relación entre ω y ε , se consigue la ley de comportamiento (σ vs ε) del material, ver Figura 60.

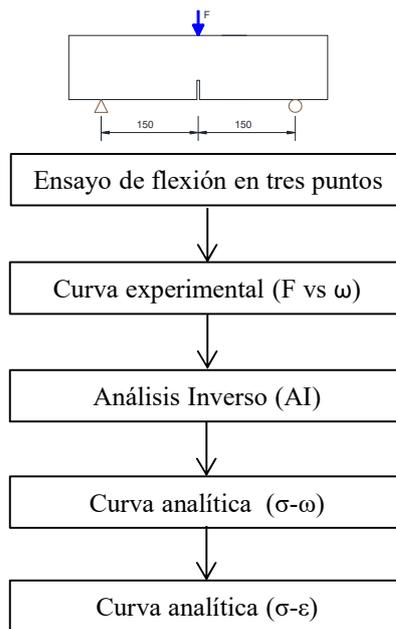


Figura 60: Procedimiento para obtener la curva de comportamiento en flexión.

El proceso se inicia con la definición de un nuevo sistema de coordenadas, partiendo del punto donde acontece la primera grieta, el valor de la abertura de la muesca en ese punto se convierte en el nuevo origen. Ese primer punto coincide con el límite elástico y el equilibrio mecánico se resuelve sin dificultad para calcular el valor del esfuerzo.

A partir de ese primer punto (paso i), se calculan los siguientes puntos (paso $i+1$), mediante la resolución del equilibrio mecánico de la sección agrietada. Un sistema de ecuaciones no lineales complejo es generado en cada paso, se usa el programa Máxima [134] como herramienta de solución matemática al sistema de ecuaciones.

A partir de la solución del sistema de ecuaciones se calcula el valor de esfuerzo en ese punto, en este caso el esfuerzo cohesivo. El proceso se repite en cada punto ($i+1$) hasta que la curva de esfuerzo cohesivo (σ_c) versus abertura de la muesca (ω) es construida. Luego a la curva $\sigma_c - \omega$ se incluye la parte elástica para obtener el comportamiento completo de ($\sigma - \omega$).

En esta parte del proceso, una validación para la curva ($\sigma - \omega$) es realizado mediante la determinación de la energía de fractura (GF) del material. GF es calculada a partir de la curva ($\sigma - \omega$) obtenida analíticamente y comparada con la GF calculada a partir de la curva (F vs δ) obtenida experimentalmente, según lo explicado en el capítulo 4 ítem 4.5.

La AFGC [77] define una relación entre ω y ε basada principalmente en la determinación de la longitud característica (l_c) ver Ecuación 11. A partir de esas relaciones la curva ($\sigma - \omega$) se transforma en la curva (σ vs ε).

$$\varepsilon = \frac{f_{ct,el}}{E} + \frac{\omega}{l_c} \quad (11)$$

Dónde:

$f_{ct,el}$ = Resistencia a la tracción de la matriz en el límite elástico

E = Módulo de elasticidad de la matriz de concreto

La longitud característica (l_c) es aquella grandeza donde el agrietamiento del elemento acontece, medido en la misma dirección de abertura de la muesca inferior de la viga. En el caso de vigas sometidas a flexión en tres puntos la AFGC [77] define el valor de l_c dependiendo del tipo de comportamiento experimental presentado por el elemento, es decir, va a depender si el comportamiento presenta *Tensile Strain Softening (TSS)* o *Tensile Strain Hardening (TSH)*.

Si la viga presenta comportamiento de TSS la longitud característica es calculada con la Ecuación 12 y si presenta comportamiento TSH se usa la Ecuación 13. Ver esquema de la Figura 61.

$$l_c = \frac{2(h-a)}{3} \quad (12)$$

$$lc = \frac{E \cdot G_F}{fst^2} \quad (13)$$

Dónde:

fst = Resistencia a la tracción directa de la matriz

a, h = Altura de la muesca y altura de la viga

G_F = Energía de fractura

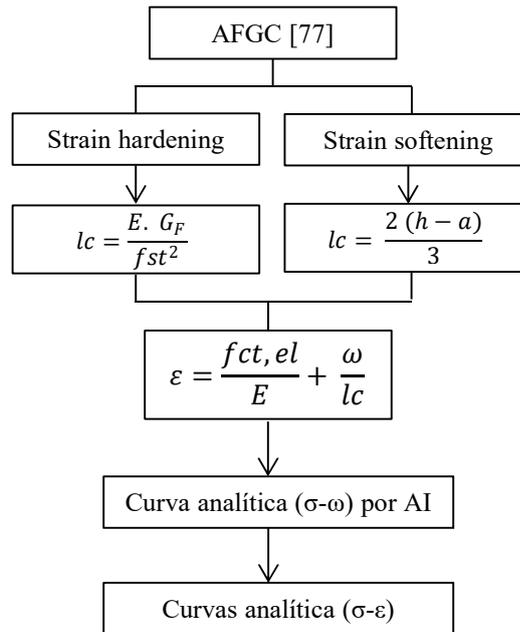


Figura 61: Procedimiento para transformar la curva (σ vs ω) en (σ vs ε).

La curva constitutiva (σ vs ε) de tracción en la flexión, establecida según lo indicado anteriormente, es definida para cada espécimen de viga fabricado. Cada par de puntos (σ_i ; ε_i) en tracción y en compresión son usados en la entrada de datos del modelaje computacional.

El modelaje computacional se realiza por dos motivos, en primer lugar, para validar el procedimiento analítico aplicado, en este sentido, se simula el ensayo de flexión en tres puntos sobre las mini-vigas, introduciendo en el INPUT (entrada de datos) las relaciones constitutivas (σ vs ε) y obteniendo como resultados en el OUTPUT (salida de datos) la relación (F vs δ).

En segundo lugar, para validar las relaciones constitutivas obtenidas analíticamente, en este sentido, se simula el ensayo de flexión en cuatro puntos sobre viga I, introduciendo en el INPUT las relaciones constitutivas (σ vs ε) y obteniendo como resultados en el OUTPUT la relación (F vs δ), ver esquema de la Figura 62.

Los resultados del análisis son comparados con los resultados experimentales. A continuación, se explica cada procedimiento detalladamente.

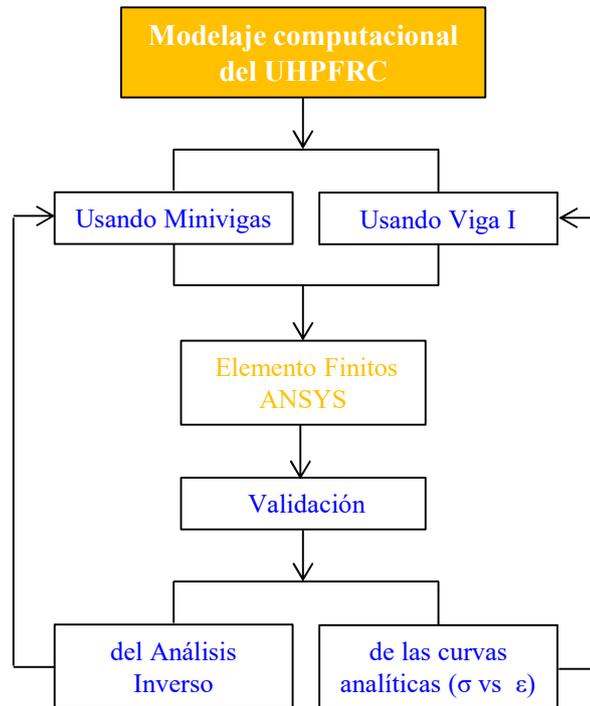


Figura 62: Procedimiento general de validación.

6.2 ANÁLISIS INVERSO (AI)

6.2.1 Ancho inicial de la muesca (ω_0)

Consiste en el cambio de coordenadas de referencia, para colocar el nuevo origen de la curva en el instante cuando ocurre la primera grieta. Denominaremos como ω_0 al valor de ω registrado en ese instante, ω_0 es el ancho inicial de la muesca. A partir de allí ω_0 es restado a todos los registros de abertura de muesca registrados durante el ensayo. Para un mejor entendimiento a continuación se explica el procedimiento para uno de los cuerpos de prueba.

En la Figura 63 se muestra la curva experimental que relaciona la fuerza aplicada en el medio de la viga con la abertura de la muesca (F vs ω) para el espécimen de viga CP-5.

El nuevo origen de coordenadas es ubicado en el límite elástico, ese punto es definido con las coordenadas (F_i ; ω_i) iguales a (0,01728 mm; 10,1599 kN) el cual, a partir de ahora, va a corresponder al punto ω_0 de coordenadas (0 mm; 10,1599 kN) ver Figura 64.

El valor de la abertura de la muesca en el límite elástico (0,01728 mm) es restado a todos los valores de la abertura de la muesca posterior a él. La AFGC [77] recomienda considerar cada punto de iteración con valores incrementales de 0,02 mm a partir de ω_0 , en este trabajo se consideraron al menos 10 puntos con valores de ω iguales a 0 mm; 0,2 mm; 0,5 mm; 1 mm; 2 mm; 3 mm; 4 mm; 5 mm; 6 mm y 6,5 mm.

El último valor corresponde a la mitad de la longitud de la fibra, valores superiores a 6,5 mm fueron considerados en los casos donde la data experimental lo permitió. Los valores de la fuerza (F) para cada valor de la abertura indicada anteriormente, se toman de la curva experimental. El valor del módulo de elasticidad a considerar es el valor promedio obtenido según el procedimiento indicado en el ítem 5.1.4.

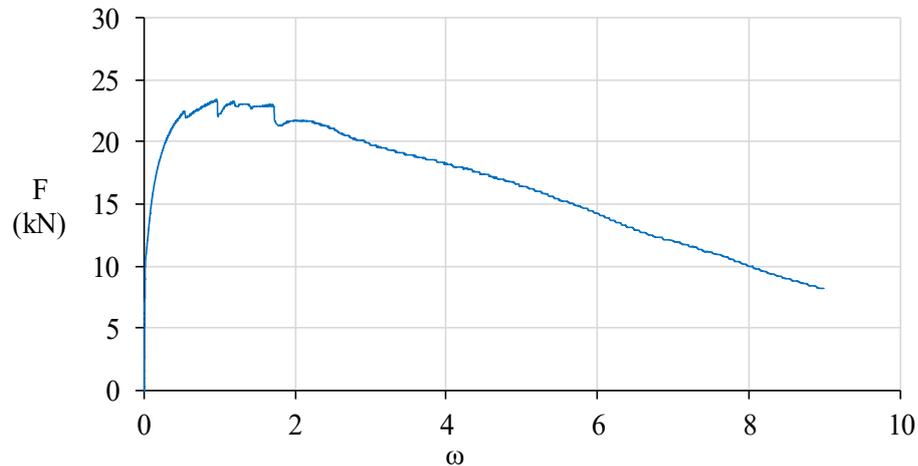


Figura 63: Curva experimental F vs ω . Viga CP-5. 2% de microfibras.

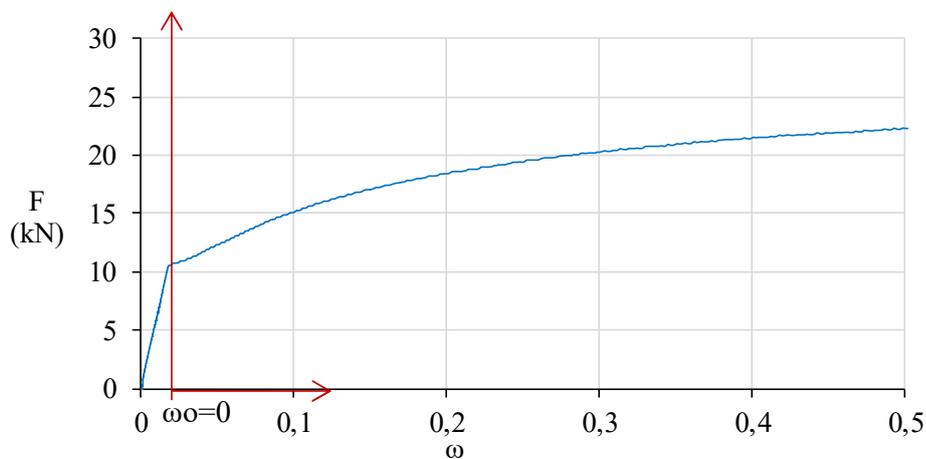


Figura 64: Curva experimental F vs ω . Viga CP-5. Origen en ω_0 .

6.2.2 Equilibrio mecánico de la sección

Después de definir el origen en el nuevo sistema de coordenadas, se continúa con la definición de los demás puntos de la curva, según los valores de ω definidos previamente. Siguiendo como ejemplo el mismo espécimen de viga del ítem anterior, tenemos entonces que el primer punto de la curva tiene coordenadas (0 mm; 10159,94 N) localizado en el límite elástico.

En el límite elástico aún no ocurre el agrietamiento, el equilibrio mecánico de la sección es definido por la Figura 65. En ese punto la abertura de la muesca (ω), la altura relativa de la grieta (αh) y la sumatoria de fuerzas axiales (N) son iguales a cero. La altura relativa del eje neutro es igual a la mitad de la viga ($\alpha h = h/2$).

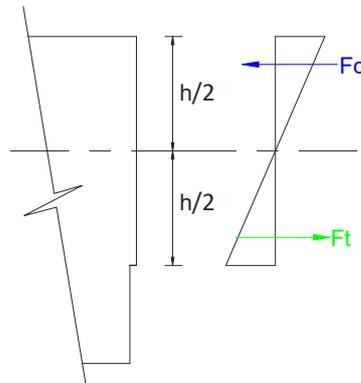


Figura 65: Equilibrio mecánico en el límite elástico.

En la Figura 66 se muestra el equilibrio mecánico de la sección agrietada, en ella distinguimos dos zonas o regiones bien diferenciadas, con y sin agrietamientos.

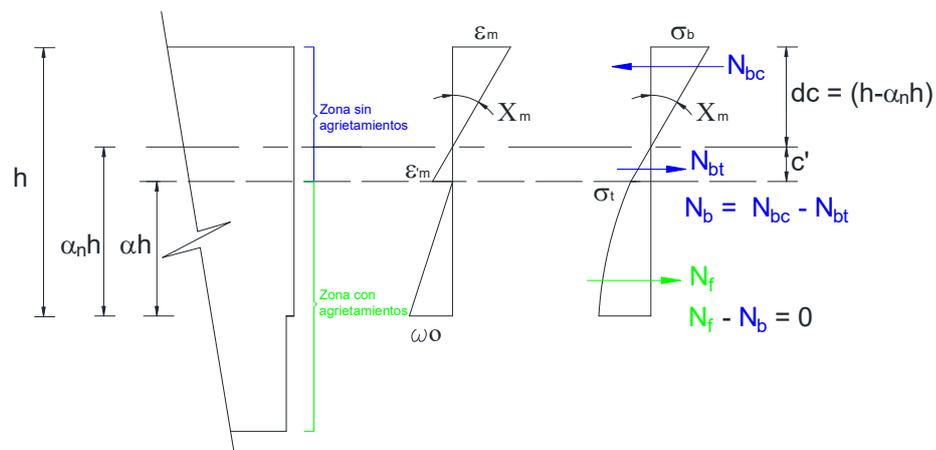


Figura 66: Equilibrio mecánico de la sección agrietada. Fuente AFGC [77] modificado

La zona sin agrietamientos es la parte de la sección donde la distribución de los esfuerzos corresponde al comportamiento linealmente elástico. La zona con agrietamientos es la parte de la sección donde la distribución de los esfuerzos depende directamente de la efectividad de las fibras dentro de la matriz de concreto y puede ser determinada por análisis inverso.

En las solicitaciones, la letra “b” identifica la contribución de la zona sin grietas y la letra “f” la zona con grietas.

De la Figura 66 tenemos que:

X_m = Curvatura de la zona sin grietas

$\alpha_n \cdot h$ = Altura relativa del eje neutro

$\alpha \cdot h$ = Altura relativa de la grieta

N_b = Fuerza axial en la zona sin agrietamientos

N_{bc} = Fuerza axial de compresión elástica

N_{bt} = Fuerza axial de tracción elástica

N_f = Fuerza axial en la zona agrietada

b, h = Ancho y alto de la sección transversal de la viga

I = Inercia de la sección rectangular

σ_t = Esfuerzo de tracción en el límite elástico

σ_b = Esfuerzo en la fibra más comprimida

Las Ecuaciones 14 a la 18 corresponden al equilibrio mecánico de la sección de la viga sometida a esfuerzos de flexión en tres puntos.

$$M = M_b +$$

$$M_f \quad (14)$$

$$N = N_b + N_f \quad (15)$$

$$N_{bc} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_b \cdot d_c \cdot b \quad (16)$$

$$N_{bt} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_t \cdot c' \cdot b \quad (17)$$

$$N_b = N_{bc} + N_{bt} \quad (18)$$

Dónde:

M = Momento externo

M_b = Momento en la zona sin agrietamientos

M_f = Momento en la zona agrietada

Después que acontece el agrietamiento, el equilibrio mecánico se resuelve con las Ecuaciones del 19 al 26. El sistema conformado por esas ocho ecuaciones con ocho incógnitas ($Xm, \alpha n, \alpha, \sigma f, Nf, Mf, Nb, Mb$) se soluciona utilizando el método de Newton Raphson a través del programa Máxima [125].

$$Nb = \frac{1}{2} \cdot E \cdot Xm \cdot b \cdot h^2 \cdot [(1 - \alpha n)^2 - (\alpha - \alpha n)^2] \quad (19)$$

$$Nf_{i+1} = Nf_i \cdot \frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} + \alpha_{i+1} \cdot b \cdot h \cdot \left(\frac{\sigma f_i + \sigma f_{i+1}}{2} \right) \cdot \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} \right) \quad (20)$$

$$Mb = \frac{1}{3} \cdot E \cdot Xm \cdot b \cdot h^3 \cdot [(1 - \alpha n)^3 - (\alpha - \alpha n)^3] + h \cdot \alpha n \cdot Nb \quad (21)$$

$$Mf_{i+1} = Mf_i \cdot \left(\frac{\alpha_{i+1}}{\alpha_i} \cdot \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} \right)^2 + \alpha_{i+1} \cdot h \cdot Nf_{i+1} \cdot \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} \right) - \frac{(\alpha_{i+1} \cdot h)^2 \cdot b}{2} \cdot \left(1 - \frac{\omega_i}{\omega_{i+1}} \right)^2 \cdot \sigma f_{i+1} \quad (22)$$

$$N = Next = Nb + Nf \quad (23)$$

$$M = Mext = Mb + Mf \quad (24)$$

$$\sigma t = E \cdot Xm \cdot h \cdot (\alpha n - \alpha) \quad (25)$$

$$\omega = \left[Xm + 2 \cdot \frac{M}{E \cdot I} \right] \cdot \frac{2 (\alpha \cdot h)^2}{3} \quad (26)$$

6.2.3 Proceso iterativo

Un proceso iterativo debe ser desarrollado en cada punto ($\omega_{i+1}; F_{i+1}$) usando la información obtenida en el punto anterior ($\omega_i; F_i$). Los valores iniciales tomados para comenzar el proceso incremental corresponden al punto definido como punto de fisuración (final del rango elástico) y un ancho de grieta igual a cero, entonces:

$$M_b^0 = M_{ext} = \frac{-b \cdot h^2 \cdot \sigma_f^0}{6} \quad (27)$$

Dónde:

$$M_f^0 = 0; N_b^0 = 0 \text{ y } N_f^0 = 0$$

En la Ecuación 27 la única incógnita es el valor del esfuerzo, ese valor es usado como dato conocido (σf) para el cálculo del siguiente punto.

La segunda iteración se resuelve considerando la información obtenida en ω_0 , la tercera iteración se resuelve considerando la información obtenida en el paso anterior y así sucesivamente.

El resultado arrojará pares de valores (ω_i, σ_{fi}) con los cuales la curva inelástica que relaciona el esfuerzo cohesivo con la abertura de la muesca (σ vs ω) puede ser construida.

Luego, el origen inicialmente planteado en $\omega=0$ será revertido, es decir, lo que restamos inicialmente en el ítem 6.2.1 ahora será sumado para cada valor de ω . Los valores del esfuerzo correspondiente a los puntos con abertura de la muesca menores a ω_0 serán calculados con la Ecuación 28, incluyendo de esta forma la parte elástica y obteniendo la curva $(\sigma-\omega)$ completa.

$$\sigma = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2} \quad (28)$$

6.2.4 Inicio del proceso y estabilización de la convergencia

Ya que la descripción de los resultados experimentales es discreta y el método de análisis inverso utiliza un tipo de derivada de la curva de momento, oscilación de σ/ω a menudo ocurre. Se ha demostrado que esto puede ser estabilizado corrigiendo la iteración, en la práctica, es suficiente reposicionar el esfuerzo de la iteración determinando una media móvil según la Ecuación 29:

$$\sigma_i = \frac{(2 \cdot \sigma_i + \sigma_{i+1})}{3} \quad (29)$$

Si el esfuerzo no varía rápidamente, y esto es lo que suele pasar, resultados satisfactorios son obtenidos a partir de esta corrección. La operación de estabilización debe llevarse a cabo al final de cada iteración para ser tomado en cuenta al calcular las siguientes iteraciones.

6.3 VALIDACIÓN DEL ANALISIS INVERSO

Se realiza una doble validación del proceso de análisis inverso (AI) indicado anteriormente, que consiste en:

- (i) Por GF: después de obtener la curva $(\sigma$ vs $\omega)$ se calcula la energía de fractura como el área bajo esa curva y se compara con la GF obtenida a partir de la curva experimental $(F$ vs $\delta)$ aplicando la metodología de RILEM [123]. Ver Figura 67.

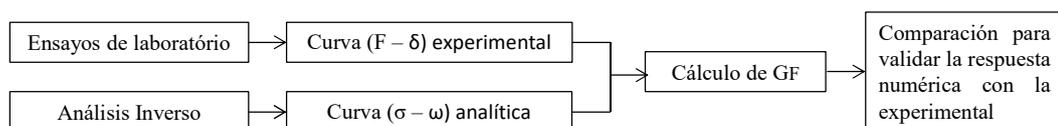


Figura 67: Validación del AI usando GF.

- (ii) Por el MEF: comparación de la respuesta experimental con la numérica usando análisis por elementos finitos a través del programa ANSYS, ver Figura 68. El análisis será realizado con dos densidades de malla diferentes, usando elementos cúbicos de 1 cm de lado en el primer caso y de 0,5 cm de lado en el segundo caso, densificando la zona de fractura con elementos de 0,2 cm de ancho en ambos casos. La respuesta F vs. δ será comparada para analizar la dependencia de malla.

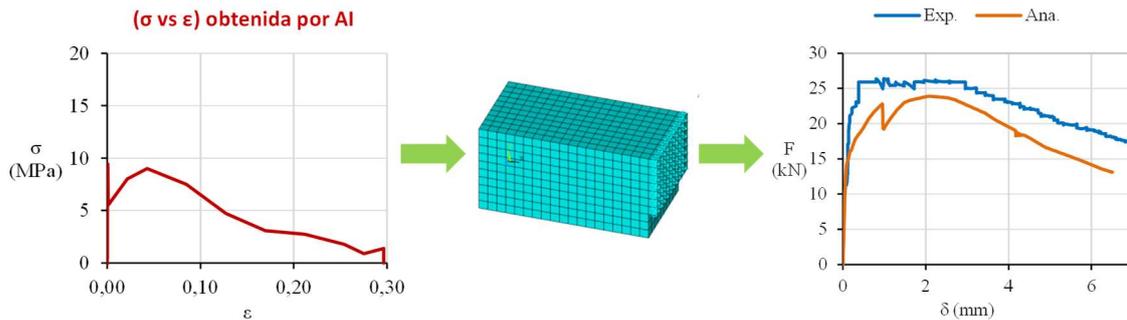


Figura 68: Esquema para validar el AI usando MEF.

6.3.1 Validación del AI usando la energía de fractura (GF)

6.3.1.1 Usando RILEM 50-FMC [123]

A partir del ensayo de flexión en tres puntos se registran los valores de la carga aplicada por la prensa (F) y de la deflexión medida en la mitad de la viga (δ) para posteriormente obtener las curvas de F vs δ . La data generada posee una cantidad de registros que en el menor de los casos posee 2600 puntos y algunos pasan los 10000 puntos, por lo tanto, el área bajo la curva o W_o es obtenida por la sumatoria de las áreas de los trapecios generados entre dos registros consecutivos. La energía de fractura o GF se calcula dividiendo W_o entre el área transversal de la viga encima de la muesca, como fue explicado en el capítulo 4 ítem 4.5.1.

6.3.1.2 Usando AFGC [77]

A partir de los resultados obtenidos por análisis inverso se grafican los valores del esfuerzo (σ) versus la abertura de la muesca (ω), el área bajo la curva (σ vs ω) es una medida de la energía de fractura del material (GF), la cual es obtenida por la sumatoria de las áreas individuales de los trapecios generados entre dos registros consecutivos, como fue explicado en el capítulo 4 ítem 4.5.2. El proceso es realizado para todos los especímenes usando micro y macro fibras de acero, con porcentajes de fibras de 1% y 2%.

6.3.2 Validación del AI usando el método de los elementos finitos (MEF)

Una vez definidas las relaciones constitutivas del UHPFRC se usa el modelaje computacional para obtener las curvas analíticas (F vs δ) de cada espécimen de prueba ensayado y compararlas con las curvas experimentales.

Simular numéricamente de forma fidedigna las fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la matriz de concreto es un procedimiento complejo, además demanda un esfuerzo computacional que escapa del alcance de esta pesquisa. Sin embargo, buenas aproximaciones pueden ser realizadas para modelar analíticamente el problema real. El programa de elementos finitos ANSYS es usado en su modo clásico Mechanic APDL utilizando lenguaje paramétrico de diseño, para simular el ensayo a flexión en tres puntos sobre las vigas fabricadas con UHPFRC con muesca central en el vano inferior, ver las condiciones de contorno en la Figura 69. La simulación numérica se realiza usando el elemento SOLID185, en el cual la entrada de datos corresponde a la ley de comportamiento del material obtenida por análisis inverso para la tracción en la flexión y la ley obtenida en forma directa a partir de la data experimental para la compresión.

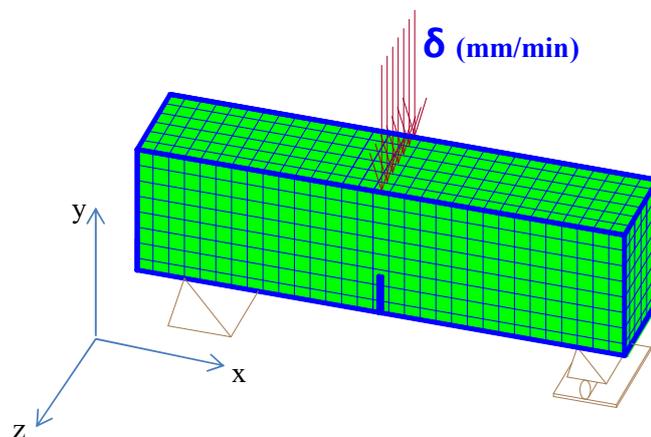


Figura 69: Condiciones de contorno de las mini-vigas.

6.3.2.1 Simulación numérica usando SOLID185

El UHPFRC se simula como un único material, un material compuesto, cuya ley de comportamiento en compresión es obtenida de la data experimental y cuya ley de comportamiento de tracción en la flexión proviene del análisis inverso. Ambas respuestas incluyen la fase post-agrietamiento del material, ver esquema en la Figura 70.

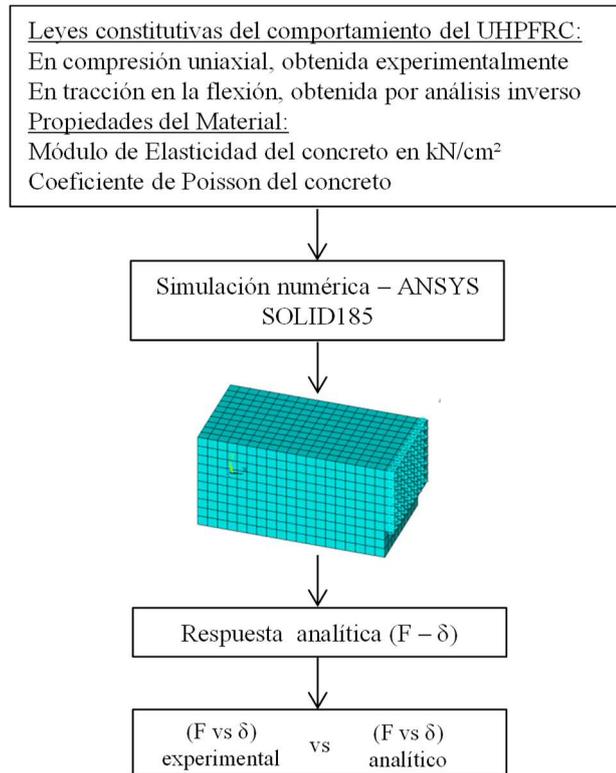


Figura 70: Esquema del modelaje computacional usando SOLID185.

La mini-viga es discretizada por elementos finitos, es modelada hasta la mitad de su longitud aplicando criterios de simetría. La malla contempla 17360 elementos y 19593 nodos, en la zona de la muesca la malla fue densificada.

La simulación 3D del concreto se realiza usando el elemento SOLID185, que es un sólido estructural homogéneo, con capacidad de representar plasticidad, hiperelasticidad, grandes deflexiones y capacidades de deformación. También tiene la capacidad de formulación mixta para simular deformaciones de materiales elastoplásticos casi incompresibles y materiales hiperelásticos incompresibles. El elemento está definido por ocho nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodal x, y, z, ver Figura 71.

Después de agrietado el concreto los esfuerzos de la viga son transmitidos a las fibras, las cuales gobiernan el comportamiento del material, para ello se usa el modelo de material multilíneal CAST, caracterizado por ser elástico e isotrópico, con el mismo comportamiento elástico en tracción y compresión. El límite elástico y el comportamiento de endurecimiento isotrópico pueden ser diferentes en tracción y en compresión. El comportamiento en tracción depende de

la presión y se utiliza el criterio de tensión máxima de Rankine, en compresión se utiliza el criterio de esfuerzos de Von Mises independiente de la presión.

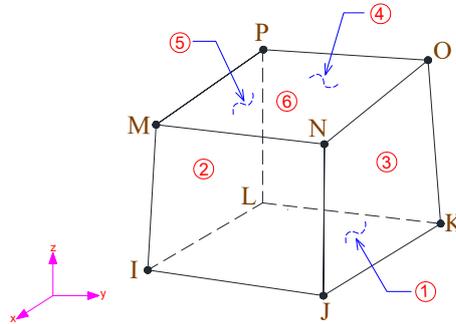


Figura 71: Elemento SOLID185. Fuente: ayuda ANSYS

Las propiedades del UHPFRC como el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson son incluidas en la simulación, la cual se realiza para todos los especímenes usando micro y macro fibras de acero, con porcentajes de fibras de 1% y 2%. Al final del proceso las curvas analíticas de F vs δ son comparadas con las curvas experimentales en cada uno de los casos.

6.3.3 Validación de las leyes constitutiva obtenidas por AI

El comportamiento constitutivo de tracción en la flexión del UHPFRC obtenido por análisis inverso usando mini-vigas es aplicado sobre una viga con sección transversal en formato “I”. La meso-viga o viga I, fue construida con el mismo diseño de mezcla y el mismo porcentaje de acero que las mini-vigas, según lo descrito anteriormente en el capítulo 5, ítem 5.3.2, y fue ensayada a flexión en cuatro puntos.

El modelaje computacional de la viga se realiza por elementos finitos, utilizando el elemento SOLID185 explicado en el ítem anterior. La discretización contempla 1728 elementos y 2805 nodos. Las condiciones de contorno se muestran en la Figura 72.

Las leyes de comportamiento en compresión y flexión son las mismas utilizadas en las mini-vigas con 2% de microfibras de acero. La cantidad de análisis de la viga I dependerá de la cantidad de leyes constitutivas a flexión definidas para las mini-vigas rectangulares.

Al final se comparan los resultados analíticos y experimental por medio de las curvas carga versus deflexión (F vs δ).

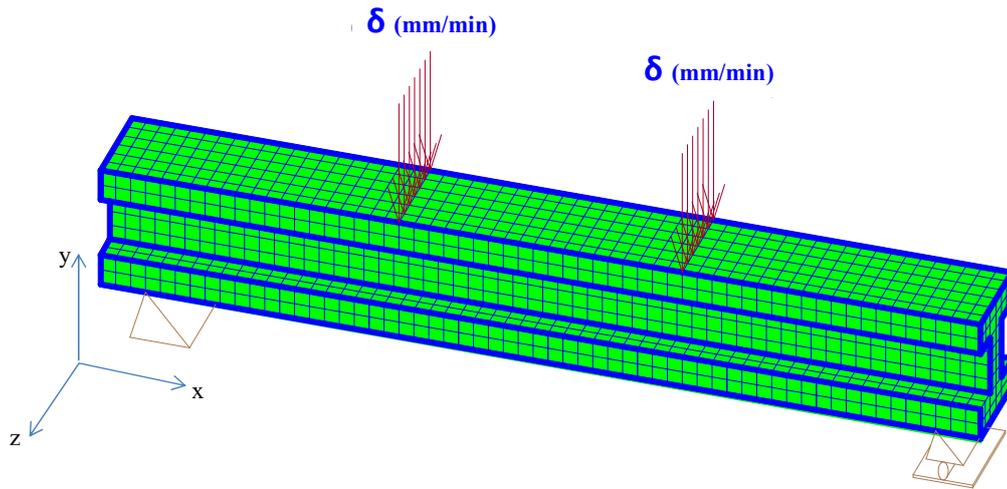


Figura 72: Condiciones de contorno de la viga I.

6.4 MODELAJE COMPUTACIONAL VIGA I CON ACERO DE REFUERZO

El modelaje computacional de la meso-viga o viga I con barras de refuerzo fue realizado con las mismas características consideradas en el caso de la viga I sólo con fibras. En este caso la diferencia es la incorporación del elemento REINF264, ver Figura 73. La discretización contempla 2114 elementos y 2805 nodos, un esquema del acero de refuerzo de la viga se encuentra en los apéndices.

REINF264 es usado para modelar barras que sólo tienen rigidez uniaxial. Las ubicaciones nodales, los grados de libertad y la conectividad del elemento son idénticos a los del elemento base. En este trabajo, REINF264 es utilizado para modelar las barras de acero longitudinales y las transversales de la viga I.

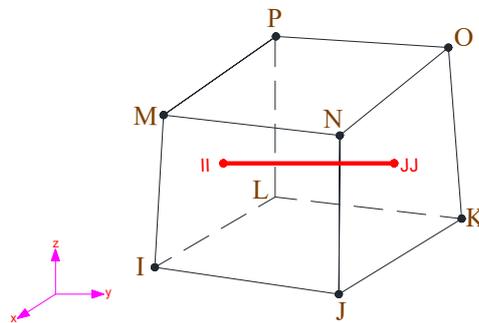


Figura 73: Elemento REINF264. Fuente: ayuda ANSYS

Este modelaje es realizado para determinar la cantidad de acero de refuerzo convencional que puede ser sustituido por la adición de fibras, manteniendo la misma capacidad de carga.

6.5 COMPORTAMIENTO DEL UHPFRC USANDO EL MEF CON SOLID65

En el capítulo anterior se realiza el modelaje numérico de vigas fabricadas con UHPFRC usando el MEF. El propósito es validar el procedimiento de análisis inverso realizado según la metodología propuesta por la AFGC [77], el elemento SOLID185 y el material CAST del ANSYS son usados para el modelaje 3D del concreto.

En este apartado, un procedimiento diferente es aplicado para simular el UHPFRC usando el MEF y el programa ANSYS, el elemento SOLID65 es seleccionado para el modelado 3D del concreto. El propósito es comparar ambas metodologías como alternativas de análisis para el UHPFRC, a sabiendas que la consideración de las fibras dentro de la matriz de concreto tiene enfoques diferentes en cada caso.

El elemento SOLID65 permite considerar el acero de forma distribuida a lo largo de todo el elemento estructural, a diferencia del elemento SOLID185 que lo considera incorporado dentro del elemento. Con SOLID65 la cantidad de acero representa el porcentaje de fibras dentro de la matriz del UHPFRC, la cual es incluida en el INPUT como una variable real, ver esquema del análisis en la Figura 74.

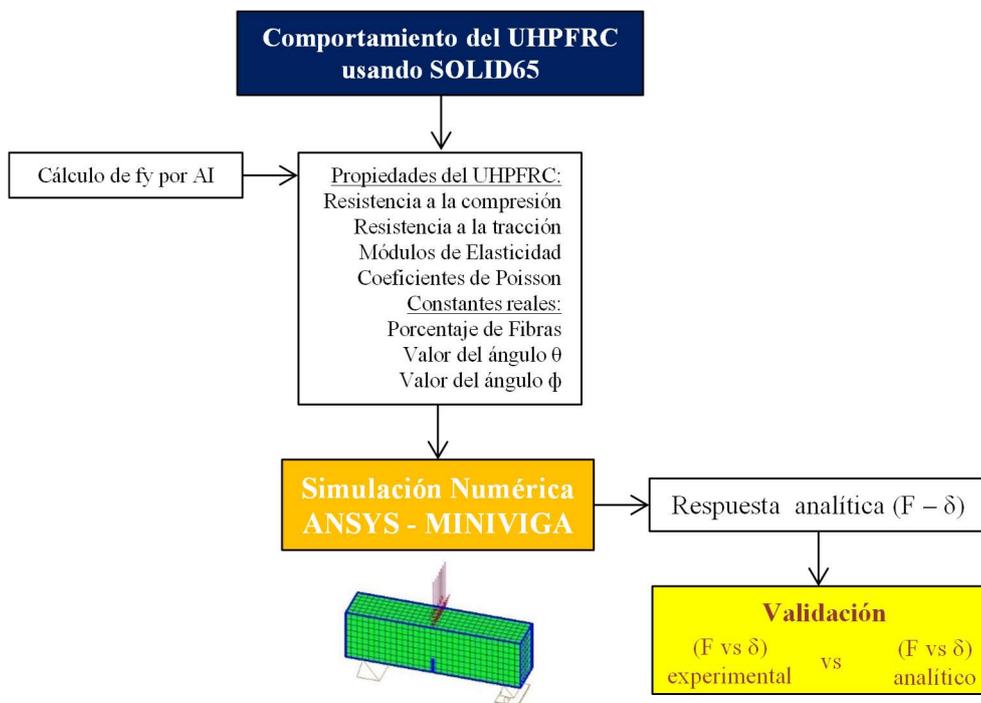


Figura 74: Esquema del modelaje computacional usando SOLID65.

6.5.1 Simulación numérica

El elemento SOLID65 usado en la simulación tiene la capacidad de agrietarse en tracción, aplastarse en compresión y puede desarrollar un comportamiento no-lineal, también es aplicable para modelar compuestos reforzados. El elemento está definido por ocho nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodal x, y, z. La geometría, las ubicaciones de los nodos y el sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la Figura 75.

El concreto es considerado isotrópico y las fibras son consideradas distribuidas dentro del concreto. Se introducen los valores experimentales obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión, tracción y módulo de elasticidad del UHPFRC. También se incluye el módulo de elasticidad del acero y los valores del módulo del Poisson para el concreto y acero.

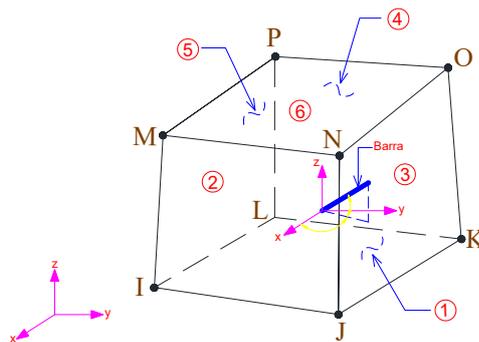


Figura 75: Elemento SOLID65. Fuente: ayuda ANSYS.

El comportamiento de los materiales fue definido usando CONCR para el concreto y BKIN para el acero de las fibras. Las especificaciones del acero de refuerzo, en nuestro caso las fibras, se introducen como constantes reales, que incluye además del número de material, la relación de volumen (porcentaje de fibras) y los ángulos de orientación de las fibras.

Tanto el porcentaje como la orientación de las fibras son variables que tienen grande influencia en el comportamiento del material una vez que ocurre el agrietamiento. En el trabajo experimental fue aplicada una técnica de vaciado del concreto que consistió en llenar las formas de la viga desde un extremo hacia el otro, de modo que las fibras permanezcan orientadas en el sentido de mayor eficiencia, en nuestro caso, perpendiculares a la dirección de la carga.

La determinación del porcentaje de fibras considerado en la entrada de datos fue obtenida midiendo la cantidad de fibras con participación efectiva dentro de la sección agrietada, por lo tanto, después de ensayadas, las vigas fueron cortadas y el área de acero de las fibras fue calculado como la sumatoria de todas las fibras reflejadas en la imagen multiplicada por el área de su sección transversal, ver Figura 76.

La determinación del esfuerzo de fluencia (f_y) de las fibras a considerar en el modelaje numérico demandó un desarrollo analítico. En el trabajo experimental fue observado que las fibras fallaron por deslizamiento, por lo que fue posible suponer que el acero de las fibras no llegó a fluir. En la Figura 77 se usa un estereomicroscopio para observar señales de deslizamiento de las fibras dentro de la matriz de UHPFRC. Se decide entonces calcular un valor del esfuerzo de fluencia equivalente para ser incluido en la simulación numérica.

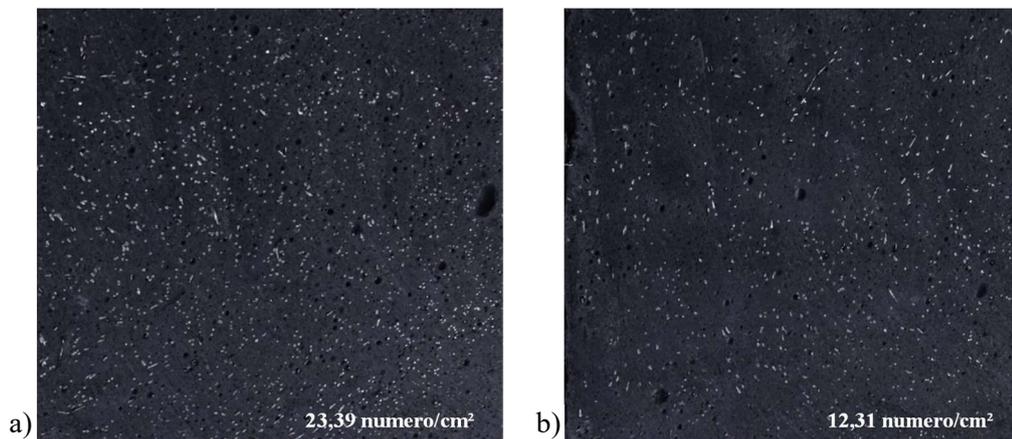


Figura 76: Cantidad de fibras por cm^2 , a) 2%, b) 1%.

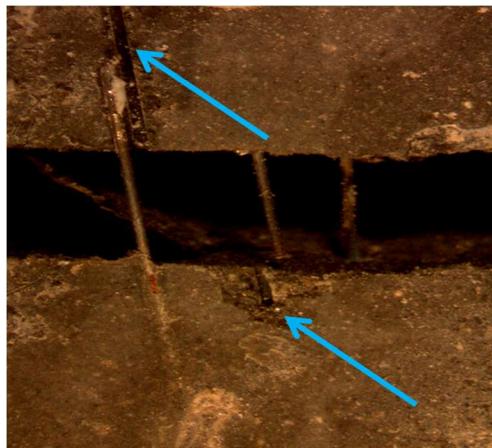


Figura 77: Deslizamiento de las fibras dentro de la matriz.

6.5.2 Determinación del esfuerzo de fluencia equivalente para el análisis

El esfuerzo de fluencia equivalente se determina usando la metodología propuesta por Lee et al. [135]. El procedimiento consiste primeramente en la determinación del valor máximo de la resistencia a la adherencia ($\tau_{f,m\acute{a}x}$) de una fibra de acero dentro de la matriz de UHPFRC, usando la data experimental, aplicando relaciones constitutivas y de equilibrio mecánico. Ese cálculo corresponde a un proceso iterativo que cierra cuando la fuerza externa máxima F aplicada sobre la viga es igual a la fuerza interna F máxima calculada usando análisis inverso (AI), ver el algoritmo de la Figura 78.

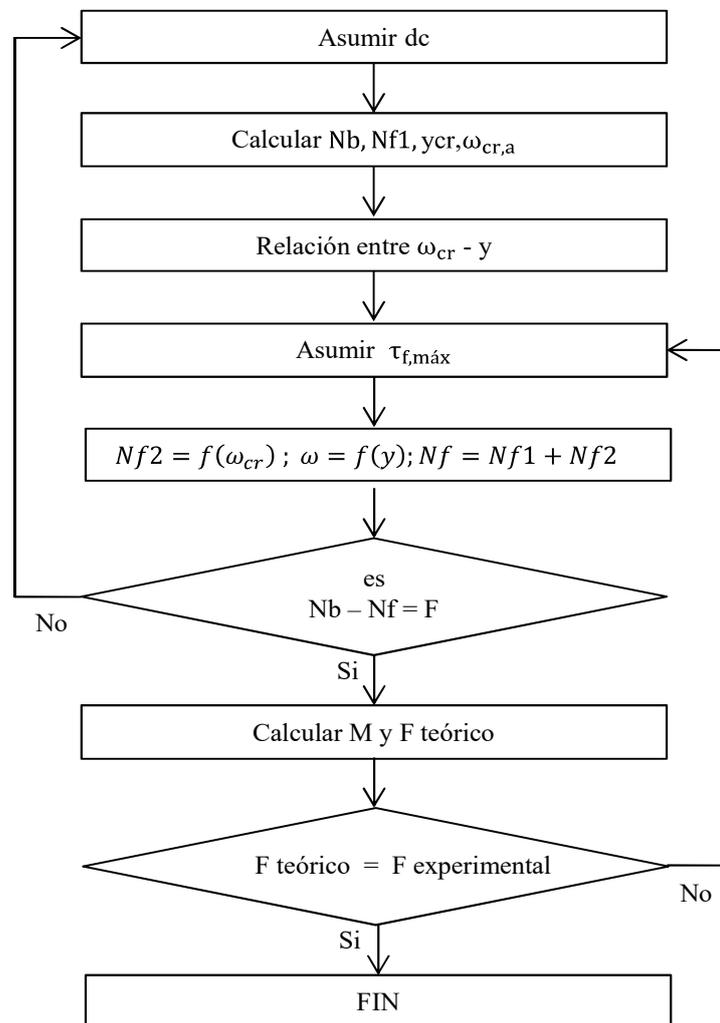


Figura 78: Algoritmo. Resistencia de adherencia de la fibra. Fuente Lee et al. [7] modificado.

Luego, con el valor de $\tau_{f,m\acute{a}x}$, se calcula primeramente la fuerza de tracción y luego el esfuerzo de tracción sobre la fibra. Éste último se convierte en un valor equivalente del esfuerzo de

fluencia del acero, surgiendo como un límite superior que puede ser variado dentro del Script del modelo numérico, para evaluar la respuesta del elemento estructural simulado en ANSYS y así ajustar la curva a la respuesta experimental.

6.5.3 Análisis inverso para determinar $\tau_{f,máx}$

El análisis inverso, aplicado en esta etapa, consiste en un procedimiento iterativo para, a partir del conocimiento de ciertos parámetros obtenidos en ensayos experimentales, determinar el valor de la fuerza a tracción que permita el equilibrio mecánico en la sección transversal de la viga. En el inicio algunos valores desconocidos, como la profundidad del eje neutro medida a partir de la fibra más comprimida (d_c) y la resistencia a la adherencia de una fibra recta de acero ($\tau_{f,máx}$), son asumidos.

Con esos valores iniciales se calcula la fuerza de compresión (N_b) y la de tracción elástica (N_{f1}), en cada caso son iguales al área de esfuerzo triangular multiplicada por el ancho de la viga. Luego, a partir del diagrama de la Figura 79, se calculan los valores de Δ_{cr} , y_{cr} y $\omega_{cr,a}$, que corresponden a la deformación en compresión, altura crítica medida desde el eje neutro y la abertura de la muesca cuando ocurre la primera grieta, respectivamente.

La abertura de la grieta varía con la altura de la viga, por tanto, una relación lineal ($\omega_{cr} - y$) debe ser definida, donde “y” es la altura de la viga en cualquier punto, medida desde la fibra más comprimida. La fuerza a tracción inelástica (N_{f2}) es equivalente a la sumatoria de esa fuerza calculada en cada uno de los segmentos en los que se divide el área bajo la curva encerrada entre y_{cr} hasta $(h-d_c-a)$, ambas longitudes medidas a partir del eje neutro.

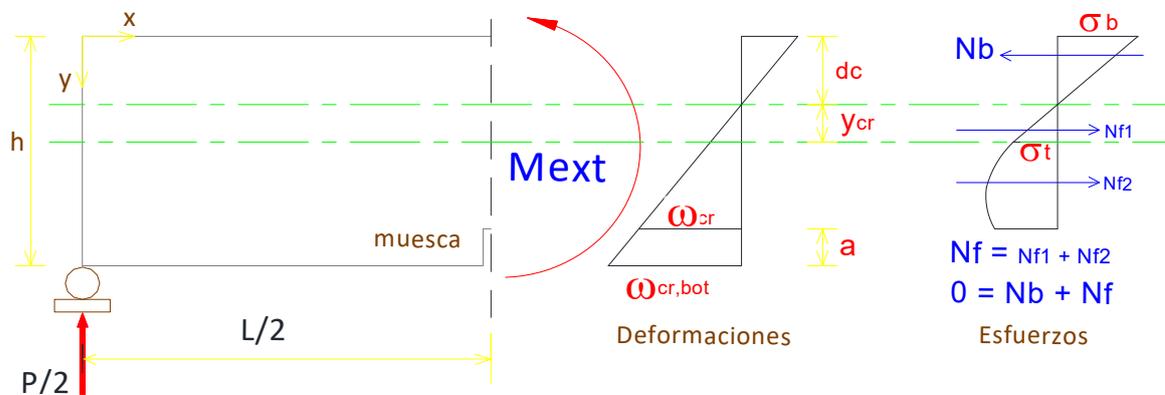


Figura 79: Distribución de esfuerzos y deformaciones de la sección agrietada.

Luego, el equilibrio de las fuerzas axiales es verificado, si no cumple se varían nuevamente los valores asumidos en el inicio. Cuando el equilibrio es verificado el momento interno (M) es calculado, para a su vez determinar un valor teórico de la carga aplicada. El valor teórico de la carga aplicada F se compara con el valor experimental, la diferencia entre ambas debe ser próxima de cero, consideraremos una tolerancia menor al 1%.

6.5.4 Descripción del mecanismo de falla

En la configuración del mecanismo de falla de la viga de la Figura 80 se considera una distribución, ángulo de inclinación y longitud de anclaje aleatorio para las fibras dentro de la matriz de concreto. También se considera una distribución uniforme del esfuerzo de adherencia a lo largo de las fibras.

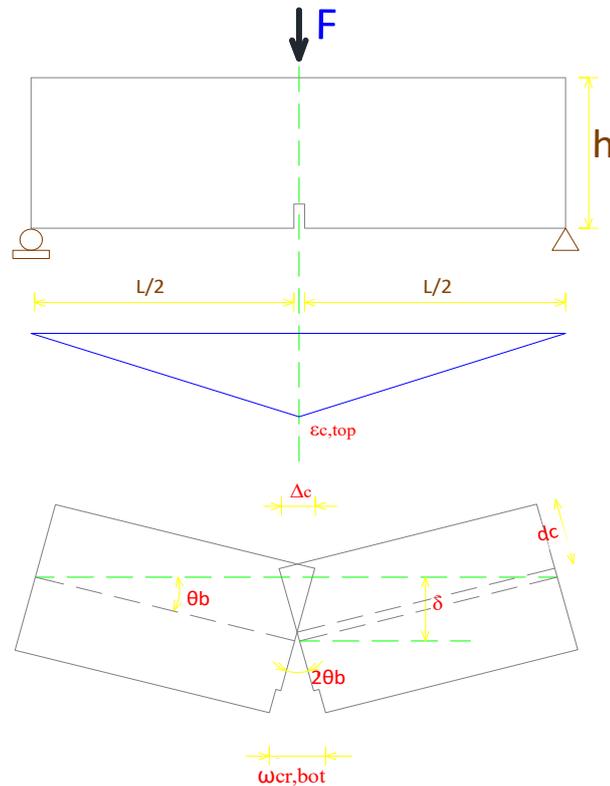


Figura 80: Mecanismo de falla de la viga idealizado. Fuente Lee et al. [126] modificado.

El UHPFRC presenta una relación esfuerzo vs deformación (σ - ϵ) lineal antes de alcanzar la resistencia a la compresión pico, por lo tanto, las Ecuaciones 30 y 31 pueden ser usadas:

$$f_c = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} f'_c = \epsilon_c E \quad \text{para } \epsilon_{c0} \leq \epsilon_c < 0 \quad (30)$$

$$f_c = \epsilon_c E \quad \text{para } 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_{cr} \quad (31)$$

En este caso la compresión se considera negativa y la tracción positiva. A partir de la Figura 80 se establecen las Ecuaciones 32 a la 34, para finalmente establecer la relación entre deformaciones y aberturas de la grieta en la Ecuación 35.

$$\Delta c = \int_0^L \varepsilon_{x,top} dx = \frac{1}{2} \varepsilon_{c,top} L \quad (32)$$

$$\tan \theta_b = \theta_b = \frac{\Delta_b}{2\alpha n} \quad (33)$$

$$\omega_{cr,bot} = 2\theta_b (h - \alpha n) \quad (34)$$

$$\varepsilon_{c,top} = \frac{2}{L} \frac{\alpha n}{h - \alpha n} \omega_{cr,bot} \quad (35)$$

Dónde:

- ω = Abertura de la muesca
- $f'c$ = Resistencia a la compresión del UHPFRC
- E = Módulo de elasticidad del UHPFRC
- ε_{co} = Deformación correspondiente a $f'c$
- f_{cr} = Resistencia de la matriz de concreto al agrietamiento
- ε_{cr} = f_{cr}/E_c = Deformación correspondiente a f_{cr}
- Δc = Deformación en compresión
- $\varepsilon_{c,top}$ = Deformación unitaria de la fibra más comprimida
- $\omega_{cr,bot}$ = Abertura en la parte inferior de la grieta
- θ_b = Ángulo de rotación de la viga agrietada

Del equilibrio de las fuerzas axiales en la Figura 79 tenemos que $N_b + N_f = 0$, donde N_b es la fuerza de compresión y N_f la fuerza de tracción que a su vez se subdivide en la tracción elástica de la matriz de concreto con fibras o N_{f1} y la fuerza de tracción inelástica N_{f2} atribuida al concreto con fibras agrietado.

En la zona elástica el cálculo de las fuerzas (N_b y N_{f1}) es directo e igual al valor de cada área triangular multiplicada por el ancho de la viga. En la zona inelástica el cálculo de N_{f2} no es tan simple, es necesario calcular el área bajo la curva que varía en función de la altura del eje neutro y de la abertura de la trinca.

El esfuerzo de tracción inelástico (σ_{t2}) incluye los efectos tanto del concreto (σ_{t2c}) como de las fibras rectas de acero (σ_{t2f}) como se indica en la Ecuación 36.

$$\sigma_{t2} = \sigma_{t2c} + \sigma_{t2f} \quad (36)$$

Los efectos tanto del concreto como de las fibras en la zona inelástica son definidos por las Ecuaciones 37 y 38. El esfuerzo de tracción inelástico queda entonces definido por la Ecuación 39.

$$\sigma_{t2c} = f_{cr} e^{-30\omega_{cr}} \quad (37)$$

$$\sigma_{t2f} = \alpha_f V_f K_{st} \tau_{f,m\acute{a}x} \frac{l_f}{df} \left(1 - \frac{2\omega_{cr}}{l_f}\right)^2 \quad (38)$$

$$\sigma_{t2} = f_{cr} e^{-30\omega_{cr}} + \alpha_f V_f K_{st} \tau_{f,m\acute{a}x} \frac{l_f}{df} \left(1 - \frac{2\omega_{cr}}{l_f}\right)^2 \quad (39)$$

El valor del factor que representa el esfuerzo de adherencia promedio de las fibras o K_{st} es determinado en funci3n de la abertura de la grieta como se indica a continuaci3n en las Ecuaciones 40 y 41.

Para $\omega_{cr} < s_f$ tenemos:

$$K_{st} = \frac{\beta_f \omega_{cr}}{3 s_f} \quad (40)$$

Para $\omega_{cr} \geq s_f$ tenemos:

$$K_{st} = 1 - \sqrt{\frac{s_f}{\omega_{cr}}} + \frac{\beta_f}{3} \sqrt{\frac{s_f}{\omega_{cr}}} \quad (41)$$

D3nde:

α_f = Factor de orientaci3n de las fibras

V_f = Porcentaje volum3trico de fibras

K_{st} = Factor que representa el esfuerzo de adherencia promedio de las fibras considerando una distribuci3n aleatoria de las mismas dentro de la matriz de concreto

l_f = Longitud de la fibra

df = Diámetro de la fibra

s_f = Deslizamiento de la fibra correspondiente a la resistencia de adherencia de una fibra recta de acero, el cual puede tomar el valor de 0,01 mm

β_f = Coeficiente para considerar efectos del deslizamiento de la fibra, es igual a 0,67

Usaremos el valor de 1 para el factor de orientación de las fibras (α_f) ya que el mismo será considerado la entrada de datos usando ANSYS. Además del esfuerzo de fluencia (determinado según lo indicado en el ítem 6.4.2) y del porcentaje de acero (calculado por medición directa sobre la sección transversal de la viga) tenemos otros parámetros de origen experimental necesarios para la simulación numérica usando ANSYS: (i) resistencia a la compresión, (ii) resistencia a la tracción, (iii) módulo de elasticidad tanto del concreto como de las fibras de acero, y (iv) coeficiente de Poisson tanto del concreto como de las fibras de acero.

La simulación es realizada para todos los especímenes usando micro y macro fibras de acero, con porcentajes de fibras de 1% y 2%. Las curvas experimentales promedio de F vs δ son comparadas con las curvas analíticas o numéricas usando ANSYS, para cada uno de los casos antes mencionados.

7 RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En el Capítulo 5 se explicó detalladamente el procedimiento experimental a seguir para la caracterización del UHPFRC. En este capítulo son mostrados los resultados que consisten en la definición de las relaciones constitutivas o leyes de comportamiento del UHPFRC en compresión y tracción uniaxial, así como la determinación de las relaciones (F vs δ) en flexión o tracción en la flexión. También se incluye el cálculo de la resistencia a la adherencia y longitudes de desarrollo obtenidas para barras de acero y poliméricas, ver esquema de la Figura 81.

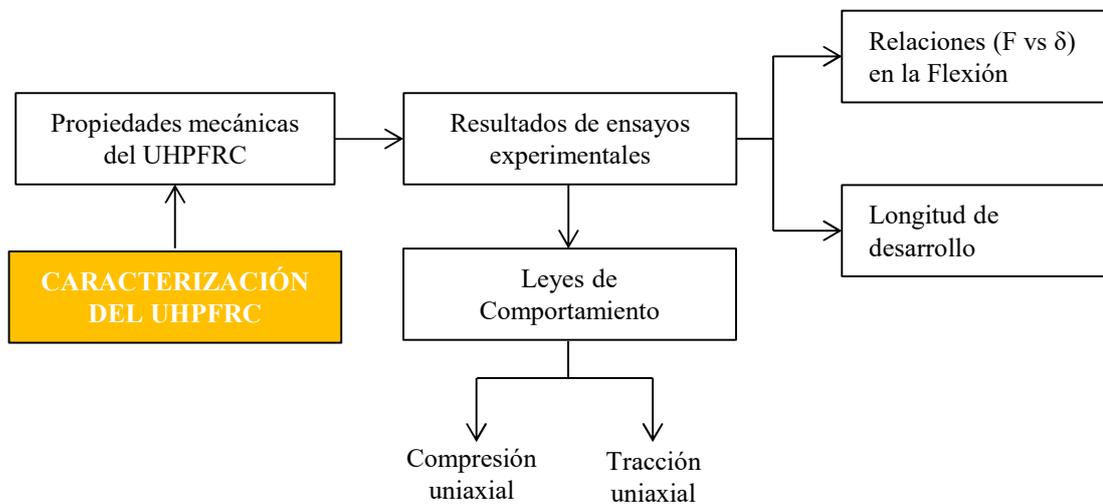


Figura 81: Caracterización experimental del UHPFRC.

7.1 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

7.1.1 Etapa I: Conociendo el UHPRC

Para cada ensayo de compresión uniaxial a los 7, 14 y 28 días de curado al menos tres especímenes fueron testados, sus valores promedio a los 28 días de curado son mostrados en la Tabla 8. Los valores individuales de cada ensayo en cada una de las edades pueden visualizarse en los apéndices. La leyenda para esta etapa se indica en la Figura 82.

Los especímenes A3B1C1D1, A3B1C2D1, A3B2C1D1, A3B2C2D1 y A3B3C1D1 mostraron resistencias menores con tratamiento térmico en el curado, lo que es opuesto a la respuesta esperada. Esas mezclas corresponden a los tipos C1 y C2 que contienen los mayores porcentajes de GGBS (45% y 35% respectivamente).

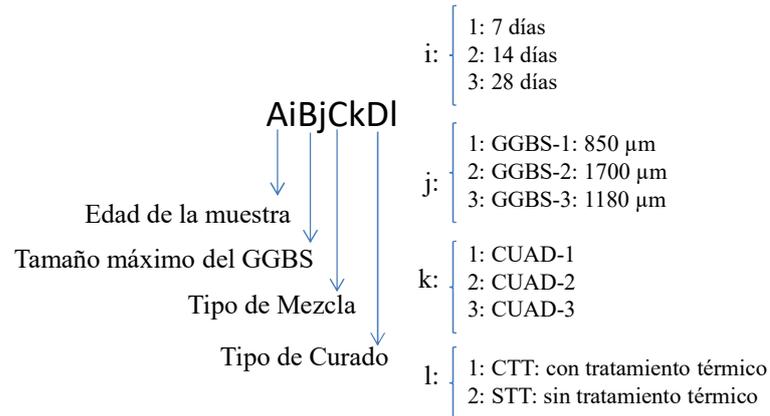


Figura 82: Leyenda para los especímenes en la etapa I.

Tabla 8: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa I.

A1: 7 Dias									
A	B1: (850 μm)			B2: (1700 μm)			B3 (1180 μm)		
C	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	51,37	83,61	105,64	62,88	80,67	89,22	55,57	73,90	118,90
D2	60,00	94,69	92,80	70,12	68,39	86,37	78,01	77,08	95,33
A2: 14 Dias									
A	B1: (850 μm)			B2: (1700 μm)			B3 (1180 μm)		
C	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	57,62	103,55	119,57	64,31	64,62	94,54	60,75	62,55	125,17
D2	66,62	96,68	96,36	82,36	84,71	91,88	84,49	98,71	111,75
A3: 28 Dias									
A	B1: (850 μm)			B2: (1700 μm)			B3 (1180 μm)		
C	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	71,76	112,82	138,12	46,05	98,48	121,74	89,98	101,55	134,98
D2	80,63	116,37	121,51	94,07	105,91	114,90	110,13	99,97	117,37

El ACI 233R-95 [136] indica que el GGBS, usado como sustituyente parcial del cemento en mezclas de concreto sometido a altas temperaturas de curado, mejora la resistencia, por otro lado, también indica que la proporción de escoria usada es de gran importancia para lograrlo.

Por lo tanto, contenidos de GGBS superiores al 30%, respecto al contenido total de aglomerantes, no serán usados en los diseños de mezcla de las etapas subsecuentes.

Los especímenes A3B1C3D1 y A3B3C3D1 arrojaron los mayores resultados, en base a ello, el tipo de mezcla UHPFRC-3 o C3 se selecciona como la más adecuada en esta etapa de la pesquisa. El mayor valor promedio de resistencia a la compresión fue de 138,12 MPa, CTT de curado

para la mezcla A3B1C3D1. Los resultados que se reflejan a continuación se enfocan principalmente en la mezcla C3 y en los factores que se interrelacionan con ella.

El desvío relativo máximo fue calculado dividiendo el valor absoluto de la diferencia entre la resistencia media y la resistencia individual que más se aparte de la media, entre la resistencia media y multiplicando este valor por 100, NBR7215 [101]. Fue graficada la variabilidad de la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días respecto a la media, para cada tipo de mezcla, los resultados se encuentran en los apéndices.

En los casos que el desvío relativo máximo superó el 6% se procedió a repetir el ensayo para todas las edades. Las mezclas C2 y C3 presentaron menos dispersión a los siete días, la mezcla C2 a los catorce y la mezcla C1 a los veintiocho días de curado. Algunos valores se alejan más de la media, sin embargo, en todos los casos, los desvíos se encuentran dentro del rango permitido por la norma NBR7215 [101].

Los resultados del análisis de variancia usando ANOVA son mostrados en la Tabla 9, en la cual cuatro factores controlables fueron analizados y once interacciones fueron generadas. Cálculos adicionales para ANOVA pueden ser consultados en los apéndices.

Tabla 9: Análisis de variancia ANOVA. Etapa I.

FACTORES CONTROLABLES	FUENTE	SQ	GDL	MQ	TESTE F	PROBABILIDAD	CONTRIBUCIÓN (%)
Edad de la Muestra	A	16.520,83	2	8.260,41	1.481,14	3,14E-79	20,36
Granulometria de la GGBS	B	2.964,79	2	1.482,40	265,80	1,93E-42	3,65
Tipo de Mezcla	C	39.614,43	2	19.807,22	3.551,56	2,97E-99	48,83
Tipo de Curado	D	639,37	1	639,37	114,64	1,14E-18	0,79
	AB	185,37	4	46,34	8,31	6,99E-06	0,23
	AC	444,46	4	111,12	19,92	2,61E-12	0,55
	AD	321,77	2	160,89	28,85	9,16E-11	0,40
	BC	5.414,05	4	1.353,51	242,69	5,27E-53	6,67
	BD	792,85	2	396,43	71,08	2,00E-20	0,98
	CD	6.960,87	2	3.480,43	624,06	4,58E-60	8,58
	ABC	2.502,00	8	312,75	56,08	5,44E-35	3,08
	BCD	657,59	4	164,40	29,48	1,44E-16	0,81
	CDA	720,56	4	180,14	32,30	1,08E-17	0,89
	DAB	1.425,63	4	356,41	63,91	1,32E-27	1,76
	ABCD	1.368,45	8	171,06	30,67	1,59E-24	1,69
	Erro	602,32	108	5,58			0,74
	TOTAL=	81.135,36	161				100,00

Para todos los casos el valor de la probabilidad indicado por la distribución F es menor que 1%, esto quiere decir que los factores controlables tienen influencia significativa sobre la variable de respuesta, en nuestro caso la resistencia a la compresión, con un nivel de confianza superior

al 99%. Dicho de otra forma, las diferencias en la variable de respuesta se deben a la influencia de los factores controlables y no al error experimental.

El porcentaje de contribución de cada factor controlable sobre la resistencia a la compresión puede ser visualizado en la Figura 83. Esos valores fueron calculados dividiendo cada suma cuadrada entre el total de sumas cuadradas y luego multiplicando por 100.

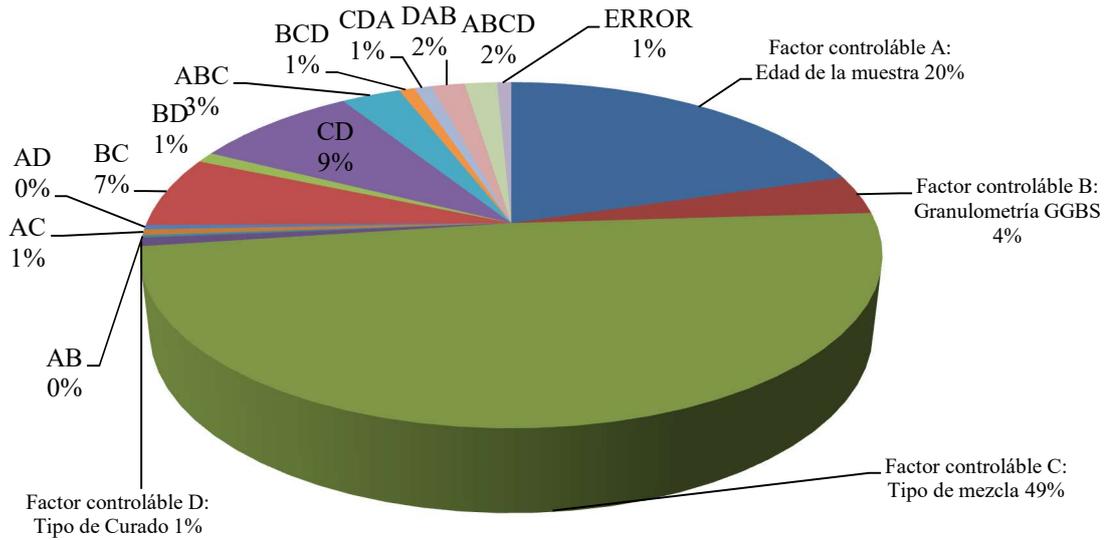


Figura 83: Contribución de los factores controlables Etapa I.

Como todos los factores controlables tienen influencia significativa en la resistencia a la compresión del UHPRC, es recomendable realizar un análisis de medias, en el apéndice se anexa un resumen explicativo de ese tipo de análisis estadístico.

Existen diferencias significativas entre las medias de cada nivel, como es observado en la Tabla 8, entonces al ordenarlas en orden creciente logramos verificar si el intervalo entre ellas supera el Límite de Decisión (LD), donde LD es igual a tres veces el desvío padrón de las medias de las muestras. Este procedimiento se llama comparación múltiple de medias, el cual será desarrollado a continuación, enfocándonos principalmente en los resultados obtenidos para el diseño de mezcla C3 que arrojó los mayores resultados.

Para comparar las medias del factor controlable A (edad de la muestra) y de sus interacciones (AB, AC, AD) fijaremos los niveles de B, C y D. Así en la Figura 84 podemos observar cómo

varía la resistencia a la compresión con la edad de la muestra, para los tres tamaños de escoria, con y sin tratamiento térmico en el curado.

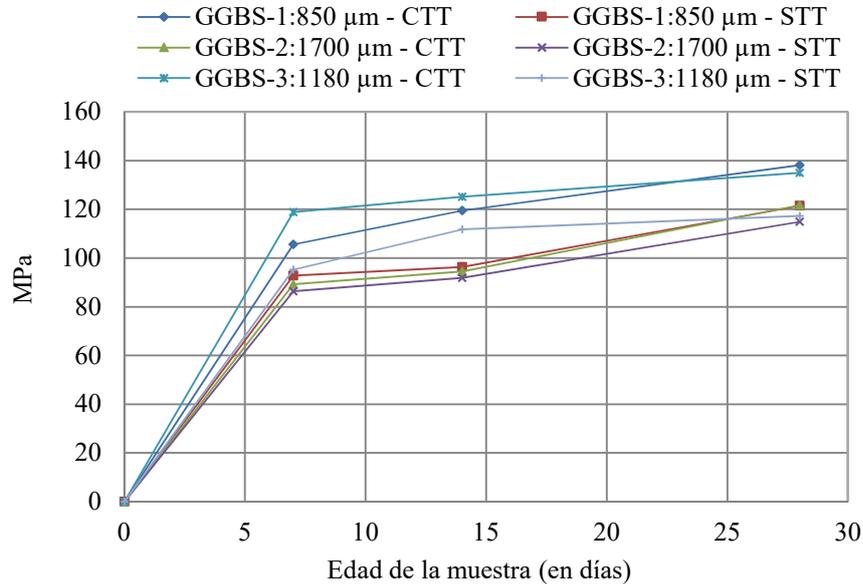


Figura 84: Resistencia a la Compresión para mezcla C3 o UHPRC-3.

Los mayores valores de la resistencia a la compresión se obtuvieron a los 28 días de curado CTT, los resultados fueron de 138,12 MPa; 121,74 MPa y 134,98 MPa para GGBS con tamaño máximo de 850 μm, 1700 μm y 1180 μm respectivamente. Los resultados de resistencia STT fueron de 121,51 MPa; 114,90 MPa y 117,37 MPa para GGBS con tamaño máximo de 850 μm, 1700 μm y 1180 μm respectivamente.

Para comparar las medias del factor controlable B (granulometría de la GGBS) y de sus interacciones (BA, BC, BD) fijaremos los niveles de A, C y D. Así en la Figura 85 podemos observar cómo varía la resistencia a la compresión con la granulometría de la GGBS, para las tres edades de la muestra, con y sin tratamiento térmico en el curado. Los mayores valores de resistencia fueron de 138,12 MPa; 121,74 MPa y de 134,98 MPa para las GGBS-850 μm, GGBS-1700 y GGBS-1180 μm respectivamente, a los 28 días de curado CTT. STT los resultados fueron 121,51 MPa; 114,90 MPa y de 117,37 MPa. Para comparar las medias del factor controlable C (tipo de mezcla) y de sus interacciones (CA, CB, CD) fijaremos los niveles de A, B y D.

Así en las Figuras 86 a 88 podemos observar cómo varía la resistencia a la compresión con el tipo de GGBS, para cada mezcla, en diferentes edades, CTT y STT en el curado. Para las mezclas UHPRC-1 y UHPRC-2, los mayores valores de resistencia a la compresión fueron de 80,63 MPa y 116,37 MPa respectivamente, a los 28 días de curado STT. Para la mezcla UHPRC-3 el mayor valor alcanzado fue de 138,12 MPa a los 28 días CTT en el curado.

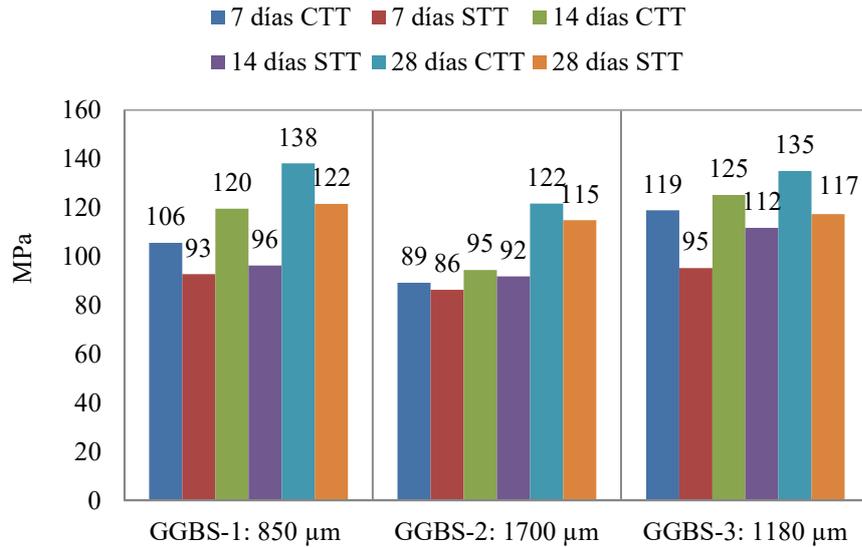


Figura 85: Resistencia a la Compresión UHPRC-3 versus GGBS.

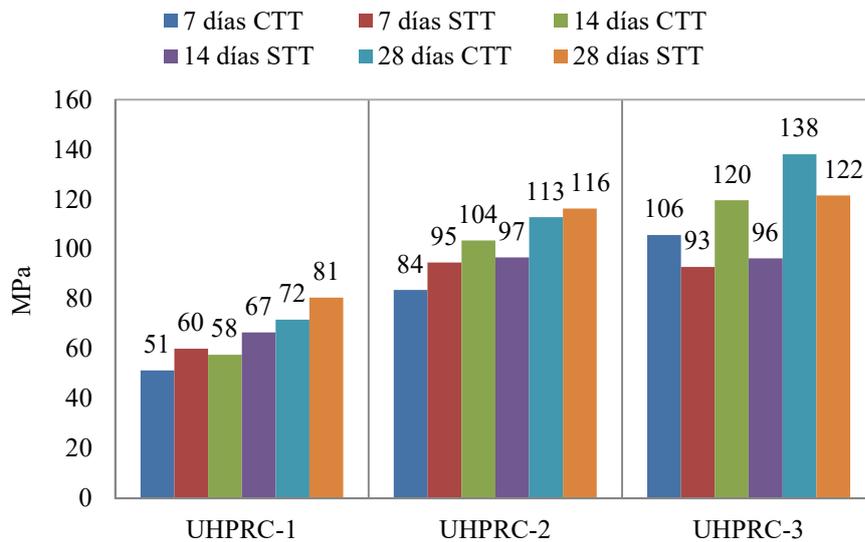


Figura 86: Resistencia a la Compresión para GGBS-1.

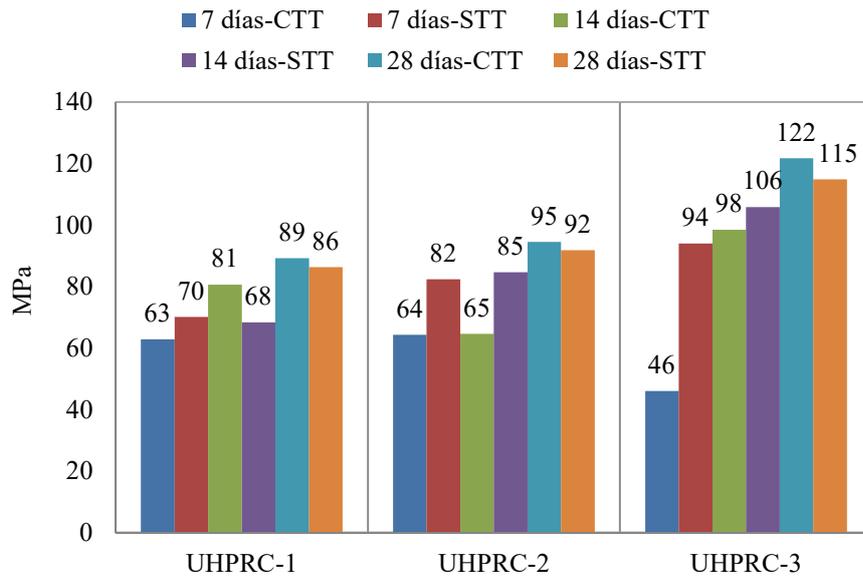


Figura 87: Resistencia a la Compresión para GGBS-2.

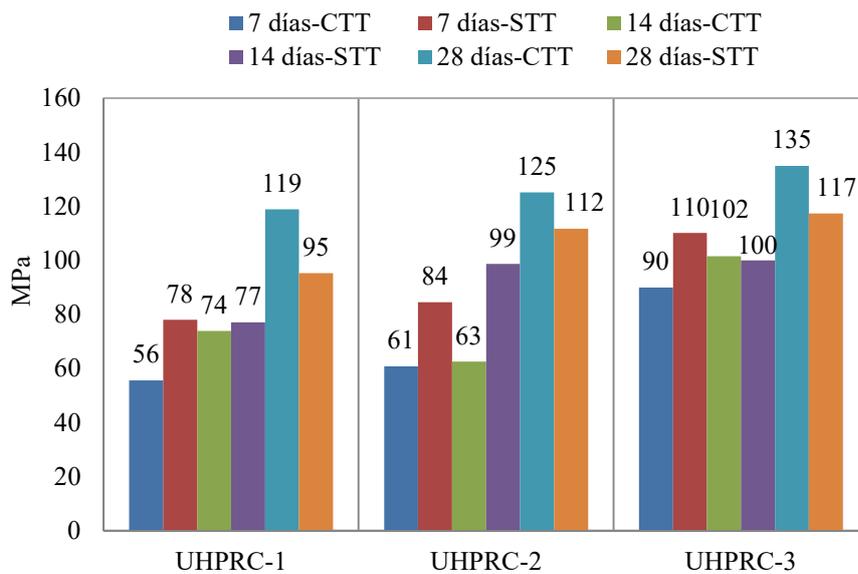


Figura 88: Resistencia a la Compresión para GGBS-3.

Para comparar las medias del factor controlable D (tipo de curado) y de sus interacciones DA, DB, DC fijaremos los niveles de A, B y C.

Así en la Figura 89 podemos observar cómo varía la resistencia a la compresión con el tipo de curado, para las tres edades de la muestra y los tres tipos de mezcla. En este caso reflejaremos

los resultados para la granulometría de la escoria GGBS-850 μm con la que se obtuvo la mayor resistencia.

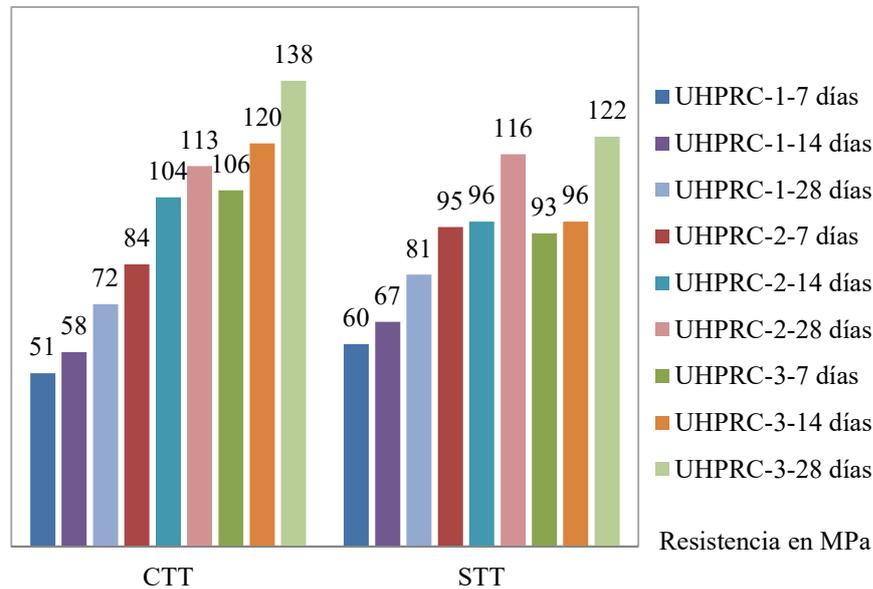


Figura 89: Resistencia a la compresión para cada tipo de curado.

A los 7 días de curado CTT las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 alcanzaron respectivamente el 72%, 74% y 76% de la resistencia a los 28 días; STT alcanzaron el 74%, 81% y 76%. A los 14 días de curado con tratamiento térmico las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 incrementaron respectivamente en 12%, 24% y 13% la resistencia de los 7 días; sin tratamiento térmico incrementaron en 11%, 2% y 4%. A los 28 días de curado con tratamiento térmico las mezclas UHPRC-1, 2 y 3 incrementaron respectivamente en 40, 35% y 31% la resistencia de los 7 días; sin tratamiento térmico incrementaron en 34%, 23% y 31%.

En esta primera etapa se alcanzaron resultados fuera de lo esperado. En varias mezclas la resistencia a la compresión disminuyó en el tiempo. Esos diseños de mezcla contienen altas cantidades de escoria y humo de sílice. En la bibliografía consultada, específicamente en ACI 233R-95 [136] se indica, que para conseguir los beneficios del GGBS en mezclas de concreto, debe tomarse especial cuidado en los porcentajes a usar, ya que el exceso de ese material puede tener efectos adversos para la resistencia. Aspecto que será considerado en las siguientes etapas de la pesquisa.

Lo señalado en el párrafo anterior consecuentemente afectó el análisis de varianza y la contribución de la variable D1 (con tratamiento térmico en el curado) en los resultados.

7.1.2 Etapa II: Desarrollando UHPFRC con macrofibras

Para cada ensayo de compresión uniaxial a los 7, 28 y 90 días de curado al menos tres especímenes fueron testados, los valores promedio son mostrados en la Tabla 10. Los demás valores están en los apéndices. La leyenda para esta etapa se indica en la Figura 90.

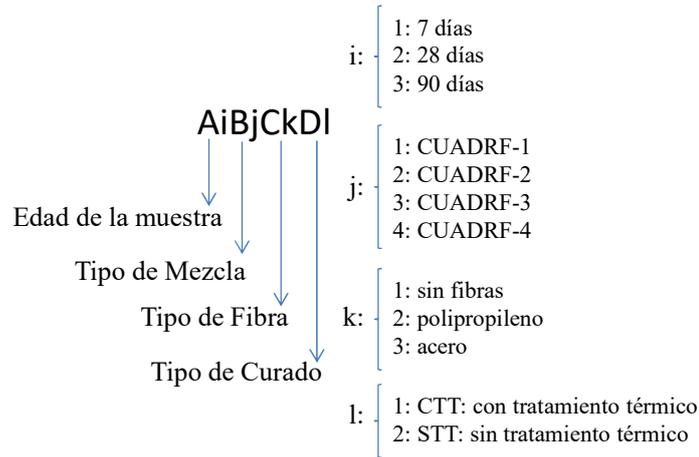


Figura 90: Leyenda para los especímenes en la etapa II.

Tabla 10: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa II.

A1 7 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	
D1	104,88	89,48	121,83	96,97	93,08	102,80	120,44	99,17	130,77	117,11	103,51	121,94
D2	85,94	65,26	88,07	70,91	81,00	77,70	91,98	71,45	98,85	84,54	76,67	81,53
A2 28 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	
D1	108,81	99,19	118,90	106,16	85,17	124,83	104,73	90,61	132,17	121,69	106,31	126,80
D2	92,46	88,02	107,46	91,29	58,08	104,83	74,27	70,67	113,29	84,54	83,95	92,52
A3 90 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	
D1	127,17	106,43	140,01	120,12	102,45	126,63	131,28	121,18	132,04	105,27	101,32	128,12
D2	113,11	115,55	121,72	111,54	120,90	109,58	104,89	77,74	124,71	96,36	96,43	106,86

B1 corresponde a la mezcla de la etapa anterior que arrojó los mejores resultados y la mezcla B4 se desarrolló luego de testar B3 a los 28 días, diferenciándose de ésta última sólo en la granulometría de la escoria, intentando aumentar la resistencia mediante la densificación de la

matriz. Los factores controlables C1, C2 y C3 corresponden a la mezcla sin fibras, con fibras de polipropileno y con fibras de acero respectivamente.

La mezcla B3C3 arrojó los mayores valores de resistencia a los 28 días de curado, con un valor promedio de resistencia de 132,17 MPa, la siguen la mezcla B4C1 que alcanzó 121,69 MPa y la mezcla B4C2 que alcanzó 106,31 MPa, todas CTT de curado.

Se observa que a los 90 días de curado el máximo valor de la resistencia fue de 140,01 MPa para la mezcla tipo B1 y también notamos que dos especímenes que incluyen fibras de polipropileno disminuyeron su resistencia. Los dos especímenes con resistencia disminuida equivalen a un 0,03% de la muestra específica para ese tipo de elemento y equivale al 0,01% de la muestra global, por tanto ese resultado no se considera representativo.

El desvío relativo máximo fue calculado siguiendo la misma metodología de la primera etapa, los resultados se encuentran en los apéndices. En los casos que el desvío relativo máximo superó el 6% se procedió a repetir el ensayo para todas las edades, con esto se garantiza que los desvíos se ubiquen en el rango permitido por la norma NBR7215 [101].

Los resultados del análisis de variancia usando ANOVA son mostrados en la Tabla 11, en la cual cuatro factores controlables fueron analizados y once interacciones fueron generadas.

Tabla 11: Análisis de variancia ANOVA. Etapa II.

FACTORES CONTROLABLES	FUENTE	SQ	GDL	MQ	TESTE F	PROBABILIDAD	CONTRIBUCION
Edad de lá muestra	A	14782,43	2	7391,21	894,57	6,18284E-82	19,34
Tipo de Mezcla	B	1356,42	3	452,14	54,72	1,14412E-23	1,77
Tipo de Fibras	C	17578,10	2	8789,05	1063,75	5,59199E-87	23,00
Tipo de Curado	D	22490,70	1	22490,70	2722,08	2,0436E-95	29,43
	AB	3743,44	6	623,91	75,51	5,29276E-42	4,90
	AC	1280,81	4	320,20	38,75	5,43769E-22	1,68
	AD	2217,85	2	1108,93	134,21	1,25004E-33	2,90
	BC	1827,77	6	304,63	36,87	7,98394E-27	2,39
	BD	1538,03	3	512,68	62,05	8,24477E-26	2,01
	CD	539,03	2	269,52	32,62	2,06856E-12	0,71
	ABC	3647,54	12	303,96	36,79	6,83059E-38	4,77
	BCD	1016,78	6	169,46	20,51	2,87391E-17	1,33
	CDA	251,69	4	62,92	7,62	1,35556E-05	0,33
	DAB	937,28	6	156,21	18,91	3,69978E-16	1,23
	ABCD	2025,95	12	168,83	20,43	1,65766E-25	2,65
	Erro	1189,77	144	8,26			1,56
	TOTAL=	76423,59	215				100,00

Para todos los casos el valor de la probabilidad indicado por la distribución F es menor que 1%, esto quiere decir que los factores controlables tienen influencia significativa sobre la variable de respuesta, en nuestro caso la resistencia a la compresión, con un nivel de confianza superior al 99%. Dicho de otra forma, las diferencias en la variable de respuesta se deben a la influencia de los factores controlables y no al error experimental.

El porcentaje de contribución de cada factor controlable sobre la resistencia a la compresión puede ser visualizado en la Figura 91. Esos valores fueron calculados dividiendo cada suma cuadrada entre el total de sumas cuadradas y luego multiplicando por 100.

Respecto a especímenes STT en el curado los mayores resultados de resistencia fueron de 113,19 MPa para la mezcla B3C3; 92,46 MPa y 88,02 MPa para las mezclas B1C1 y B1C2 respectivamente.

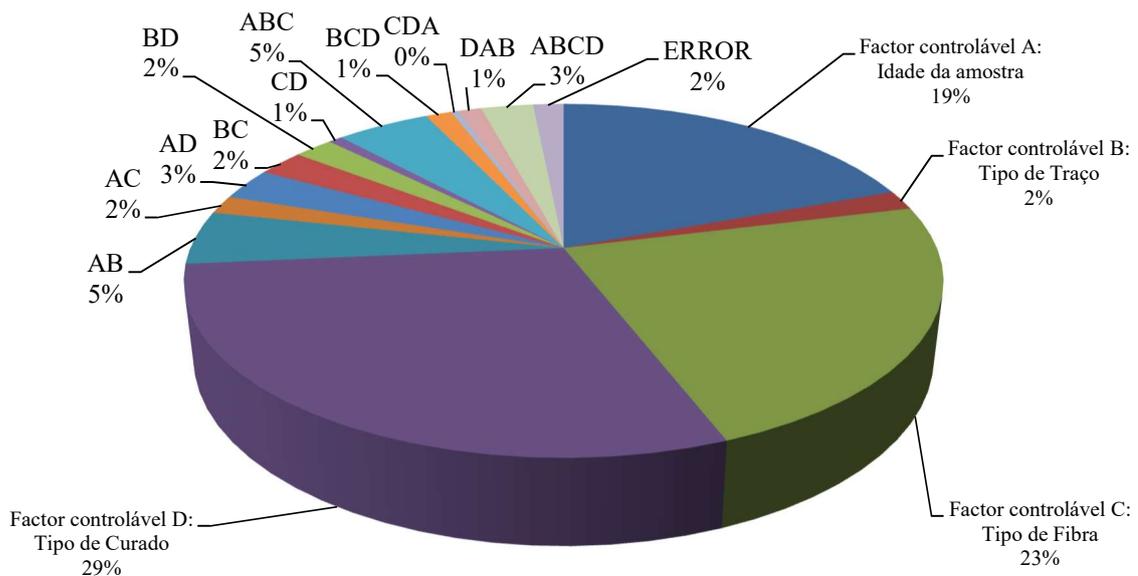


Figura 91: Contribución de los factores controlables Etapa II.

7.1.2.1 Especímenes sin fibras en la matriz

En las Figuras 92 y 93 podemos observar la variación de la resistencia a la compresión con la edad de la muestra para los cuatro tipos de mezcla CTT y STT en el curado sin la inclusión de fibras. Los mayores valores de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado fueron obtenidos en mezclas CTT en el curado, en este caso el mayor valor lo obtuvo la mezcla B4 que alcanzó 121,69 MPa, seguida por la mezcla B1 con 108,81 MPa y B3 con 106,16 MPa.

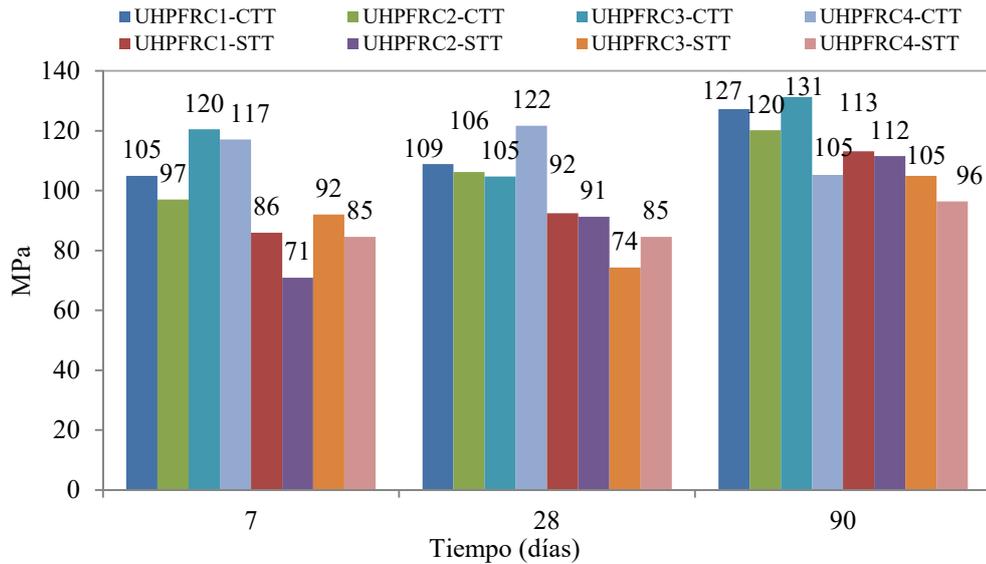


Figura 92: Resistencia a la compresión Etapa II (sin fibras).

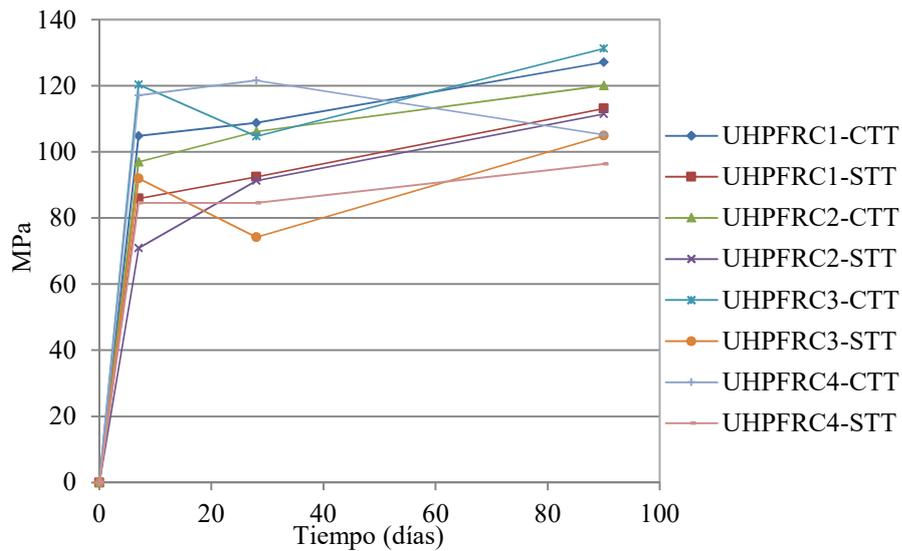


Figura 93: Evolución de la resistencia Etapa II (sin fibras).

Al comparar los máximos resultados de resistencia con los CP-5 obtenidos en la etapa anterior notamos que al usar CP-7,5 la resistencia a la compresión disminuye un 12%. También observamos diferencias en los efectos de la cura tipo 1 sobre los especímenes, en los CP-5 varios valores de la resistencia fueron menores CTT que STT, específicamente en los tipos de mezcla B1 y B2, situación que no se presentó en los CP-7,5. Podemos suponer que la velocidad de la aplicación del calor de cura afecta el desarrollo de la resistencia en mezclas de UHPRC de pequeño tamaño y con alto contenido de finos en su composición.

7.1.2.2 Especímenes con macrofibras de polipropileno

En las Figuras 94 y 95 podemos observar cómo varía la resistencia a la compresión con la edad de la muestra, para los cuatro tipos de mezcla CTT y STT en el curado.

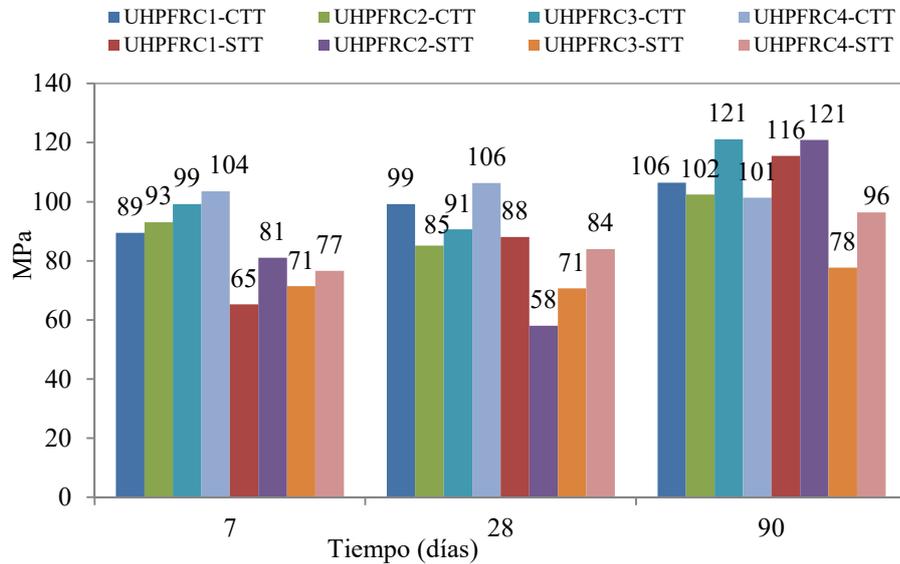


Figura 94: Resistencia a la compresión con fibras C2 Etapa II.

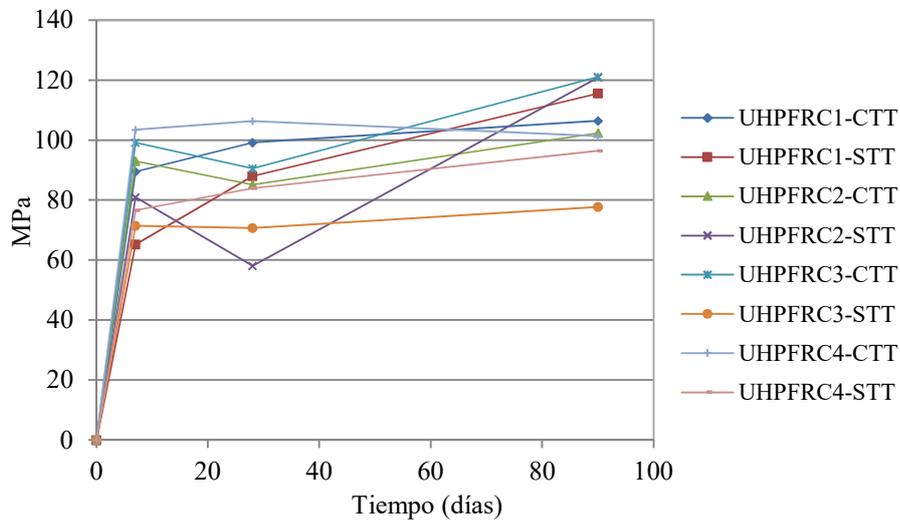


Figura 95: Evolución de la resistencia a la compresión, fibras C2 Etapa II.

Los mayores valores de la resistencia a la compresión a los 28 días de cura fueron obtenidos en mezclas que tuvieron tratamiento térmico. El mayor valor lo obtuvo la mezcla B4 la cual alcanzó 106,31 MPa. La siguen la mezcla B3 con 90,61 MPa y la mezcla B2 con 85,17 MPa.

7.1.2.3 Especímenes con macrofibras de acero

En las Figuras 96 y 97 podemos observar cómo varía la resistencia a la compresión con la edad de la muestra, para los cuatro tipos de mezcla CTT y STT en el curado. Los mayores valores de la resistencia a la compresión a los 28 días de curado fueron obtenidos en mezclas que tuvieron tratamiento térmico. El mayor valor lo obtuvo la mezcla B3 la cual alcanzó 132,17 MPa. La siguen la mezcla B4 con 126,80 MPa y la mezcla B2 con 124,83 MPa.

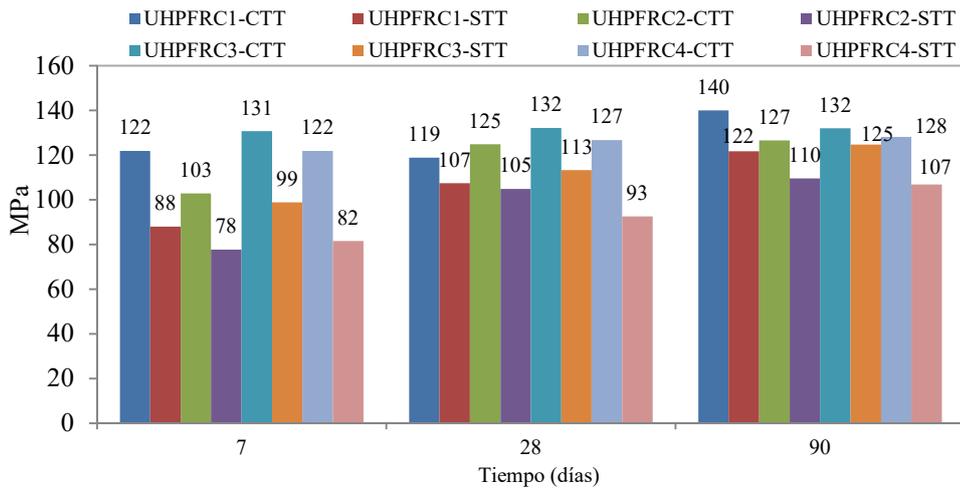


Figura 96: Resistencia a la compresión con fibras C3 Etapa II.

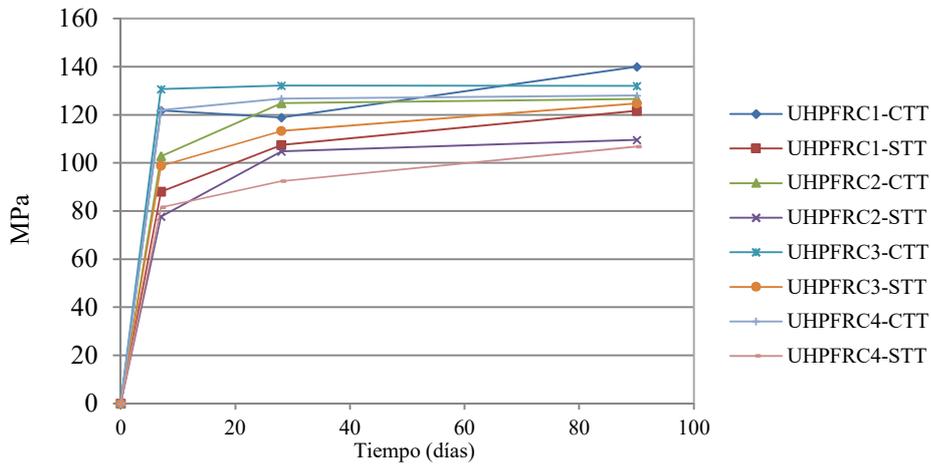


Figura 97: Evolución de la resistencia a la compresión, fibras C3 Etapa II.

Los resultados de resistencia a la compresión de los CP-5 ensayados en la etapa anterior y los de CP-7,5 ensayados en esta etapa se comparan en la Tabla 12 y en la Figura 98. Esos especímenes corresponden a cuerpos de prueba sin fibras, ensayados a los 7, 28 y 90 días de curado

con tratamiento térmico. En la Tabla 13 podemos observar la variación porcentual de los resultados obtenidos entre los CP-5 y CP-7,5.

Tabla 12: Resistencia a la compresión (MPa) CP-5 y CP-7,5.

		07 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		108,49	105,60	115,23	108,81
CP-7,5		104,88	96,97	120,44	117,11
		28 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		123,74	133,41	138,12	118,61
CP-7,5		108,81	106,16	104,73	121,69
		90 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		125,59	120,45	133,89	103,34
CP-7,5		127,17	120,12	131,28	105,27

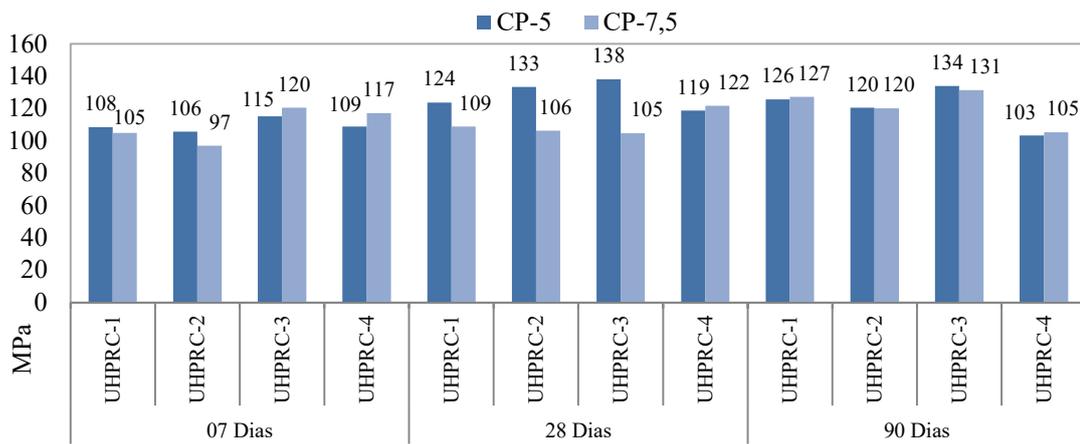


Figura 98: Valores comparativos de resistencia a la compresión.

Tabla 13: Resistencia a la compresión (MPa). Diferencia porcentual.

		07 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5	CP-5				
CP-7,5	CP-7,5	3% mayor	9% mayor	5% mayor	8% mayor
		28 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5	CP-5				
CP-7,5	CP-7,5	14% mayor	26% mayor	33% mayor	3% mayor
		90 Dias			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5	CP-7,5				
CP-7,5	CP-7,5	1% mayor	Igual	2% mayor	2% mayor

Nótese que la mayor diferencia se presenta en el diseño de mezcla UHPFRC-3 a los 28 días de curado. La Tabla 14 muestra esa variación en función del tiempo.

Tabla 14: Ganancia de resistencia a la compresión (MPa).

		desde los 0 a los 7 días			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		88% de la resistencia	79% de la resistencia	83% de la resistencia	92% de la resistencia
CP-7,5		96% de la resistencia	91% de la resistencia	superó la resistencia	96% de la resistencia
		desde los 7 a los 28 días			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		aumenta 14%	aumenta 26%	aumenta 21%	aumenta 9%
CP-7,5		aumenta 4%	aumenta 9%	disminuye 13%	aumenta 4%
		desde los 28 a los 90 días			
		UHPRC-1	UHPRC-2	UHPRC-3	UHPRC-4
CP-5		aumenta 1%	disminuye 10%	disminuye 4%	disminuye 13%
CP-7,5		aumenta 17%	aumenta 13%	aumenta 25%	disminuye 13%

En esta etapa de la pesquisa se pudo verificar la influencia que tiene la relación (longitud de la fibra/diámetro del cilindro) sobre la resistencia a la compresión. Las fibras dentro de la forma deben garantizar una adecuada distribución, para evitar aglomeraciones y la generación de vacíos que disminuyan la resistencia.

Los especímenes usando las fibras de polipropileno arrojaron resultados de resistencia inferiores a 130 MPa, escapando de los criterios usados en esta pesquisa para mezclas con UHPFRC. Aglomeración indeseada de fibras y falta de adherencia con la matriz se presumen como posibles causas, por ese motivo su uso como alternativa de fibras para UHPFRC es descartado.

También, ganancias de resistencia a edades tempranas fueron alcanzadas en especímenes sin fibras, lo que hace factible el uso del material para la industria de premezclado. Resultados no deseados fueron obtenidos usando el tratamiento térmico tipo 1. En las próximas etapas el calor en el curado será aplicado de forma más lenta, con aumento progresivo de la temperatura, aplicando el curado Tipo 2.

7.1.3 Etapa III: Desarrollando UHPFRC con microfibras

Hasta ahora los mejores resultados de resistencia a la compresión han sido:

- (i) 138,12 MPa a los 28 días en la etapa I usando formas CP-5 sin fibras y CTT;

- (ii) 132,17 MPa a los 28 días en la etapa II usando formas CP-7,5 con macrofibras y CTT;
- (iii) 140,01 MPa a los 90 días en la etapa II usando formas CP-7,5 con macrofibras y CTT.

En esta etapa se realizaron ensayos de compresión uniaxial a los 7, 28 y 90 días de curado, al menos tres especímenes fueron testados, los valores promedio se encuentran en la Tabla 15 y la data completa en los apéndices. La leyenda para esta etapa se indica en la Figura 99.

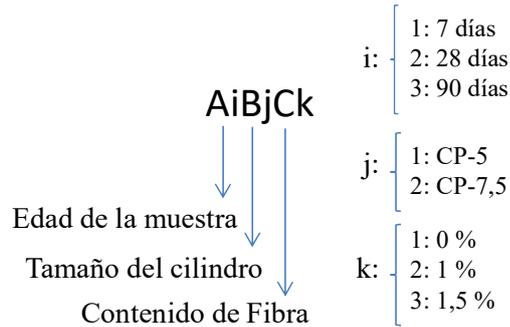


Figura 99: Leyenda para los especímenes en la Etapa III.

Tabla 15: Resistencia a la Compresión promedio (MPa). Etapa III.

A1 7 Dias					
B1 (CP-5)			B2 (CP-7,5)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
130,36	148,56	145,47	128,70	122,87	132,44
A2 28 Dias					
B1 (CP-5)			B2 (CP-7,5)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
130,42	155,29	135,99	118,76	148,47	152,72
A3 90 Dias					
B1 (CP-5)			B2 (CP-7,5)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
123,48	139,36	142,90	132,66	146,83	132,16

Observamos incrementos significativos en los resultados de resistencia a la compresión. El desvío relativo máximo fue calculado siguiendo la misma metodología de las etapas anteriores, en todos los casos los resultados entran dentro del rango permitido por la norma NBR7215 [101], el cálculo de los mismos puede consultarse en los apéndices.

La meta de alcanzar 150 MPa a los 28 días fue superada en los CP-5 conteniendo 1% de fibras y en los CP-7,5 conteniendo 1,5% de fibras. El mayor valor de la resistencia a la compresión fue de 155,29 MPa obtenido con el espécimen A2B1C2 y 152,72 MPa para el espécimen

A2B2C3, la diferencia de resistencia al usar tamaños de cilindro CP-5 y CP-7,5 fue menor del 2%. A partir de los resultados reflejados en la Tabla 15 podemos decir que:

- (i) En la mayoría de los especímenes a los 7 días de cura CTT se alcanza casi el 100% de la resistencia de los 28 días de curado, un resultado favorable para la producción de elementos prefabricados. Incluso en algunos casos el valor de resistencia fue superior al 100%.
- (ii) El incremento de la resistencia en el rango de 7-28 días de curado fue de 1% a 7%, en los CP-5 y de 1% a 21% en los CP-7,5.
- (iii) La mayoría de los especímenes disminuyeron la resistencia entre 1% a 13% en el rango de 28-90 días de curado. Se presume que esto aconteció por posibles problemas de fatiga térmica en los elementos, originados por el desligamiento del baño térmico en el periodo nocturno y ligamiento en periodos diurnos, acciones difíciles de controlar en la pesquisa.

Los resultados del análisis de variancia usando ANOVA son mostrados en la Tabla 16, en la cual tres factores controlables fueron analizados y cinco interacciones fueron generadas.

Tabla 16: Análisis de variancia ANOVA. Etapa III.

FACTORES CONTROLABLES	FUENTE	SQ	GDL	MQ	TESTE F	PROBABILIDAD	CONTRIBUCION
Edad de la Muestra	A	295,94	2	147,97	4,11	0,024671656	4,56
Tamaño del Espécimen	B	218,71	1	218,71	6,08	0,018614348	3,37
Contenido de Fibra	C	2628,29	2	1314,15	36,50	2,18367E-09	40,46
	AB	615,60	2	307,80	8,55	0,000915637	9,48
	AC	723,15	4	180,79	5,02	0,002545816	11,13
	BC	127,97	2	63,98	1,78	0,183602593	1,97
	ABC	1363,10	4	340,78	9,47	2,46267E-05	20,98
	Erro	522,97	36	14,53			8,05
	TOTAL=	6495,73	53				100,00

Para todos los casos el valor de la probabilidad indicado por la distribución F es menor que 1%, esto quiere decir que los factores controlables tienen influencia significativa sobre la variable de respuesta, en nuestro caso la resistencia a la compresión, con un nivel de confianza superior al 99%. Dicho de otra forma, las diferencias en la variable de respuesta se deben a la influencia de los factores controlables y no al error experimental. El porcentaje de contribución de cada factor controlable sobre la resistencia a la compresión puede ser visualizado en la Figura 100. Esos valores fueron calculados dividiendo cada suma cuadrada entre el total de sumas cuadradas y luego multiplicando por 100.

En las Figuras 101 y 102 se reflejan los valores de resistencia en función del porcentaje de fibra.

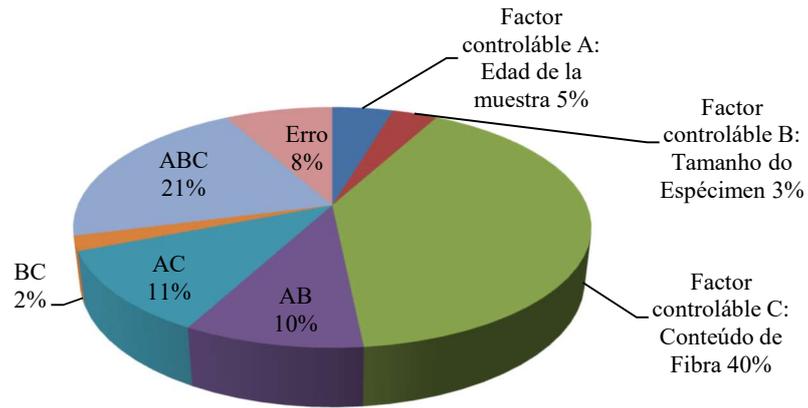


Figura 100: Contribución de los factores controlables Etapa III.

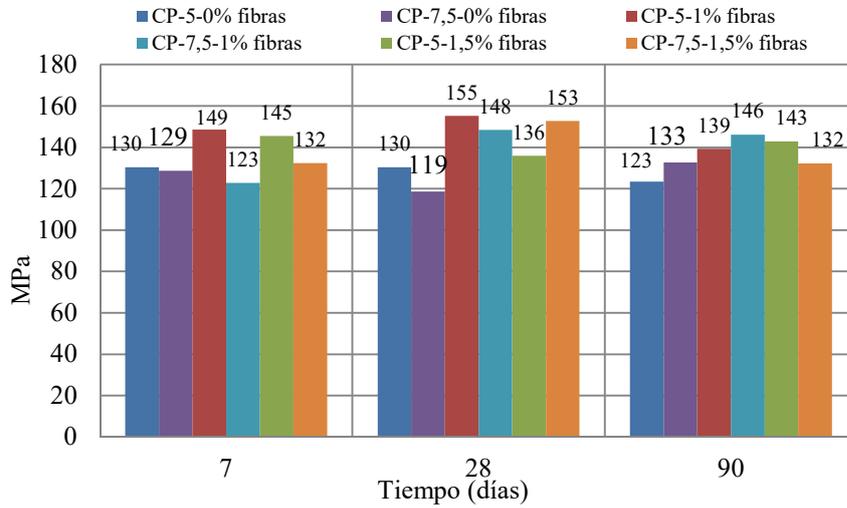


Figura 101: Resistencia a la compresión para UHPFRC Etapa III.

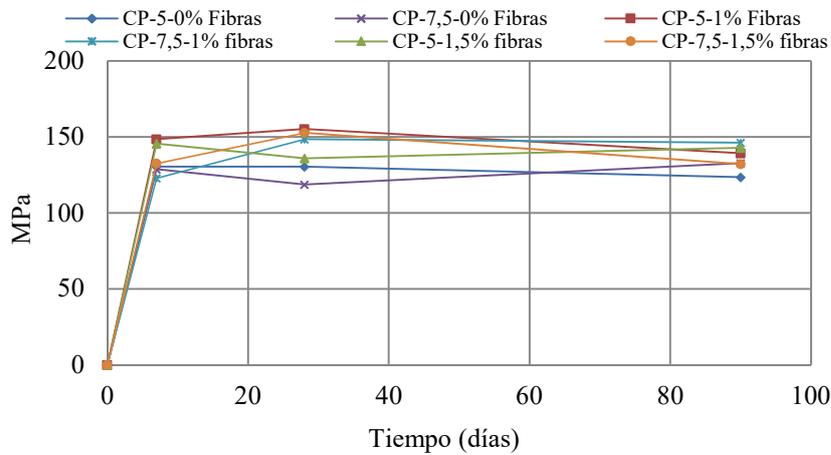


Figura 102: Evolución de la resistencia a la compresión Etapa III.

En esta etapa de la pesquisa se alcanzan resistencias superiores a 150 MPa, lo que hace posible establecer la mezcla usada en esta etapa como el diseño definitivo para el UHPFRC desarrollado en este trabajo, ver Tabla 7 en el Capítulo 5, ítem 5.3.3. Un caso puntual de disminución en resistencia fue observado en el espécimen A2B2C1, el cual disminuyó en 13% a los 28 días de curado y luego aumentó en 25% a los 90 días de curado. Se recomienda para futuras pesquisas incrementar las edades de los ensayos para estudiar la evolución de la resistencia en periodos de tiempo superiores.

7.1.4 Etapa IV: Relaciones constitutivas del UHPFRC

7.1.4.1 Especímenes con microfibras de acero

En la Tabla 17 se anexan los valores resistencia a la compresión (f_c), la deformación unitaria (ϵ) y el módulo de elasticidad (E), calculados a partir de la data registrada en los ensayos de compresión uniaxial para veinte cuerpos de prueba (CP) conteniendo 1% de microfibras.

Tabla 17: Resistencia a la compresión usando microfibras Etapa IV.

CP	f_c (MPa)	ϵ	E (MPa)
1	153,83	0,00362	50709,08
2	146,50	0,00325	44504,42
3	145,64	0,00328	46104,34
4	157,77	0,00333	49550,52
5	150,35	0,00328	48208,94
6	150,42	0,00324	46779,80
7	146,42	0,00344	47503,18
8	152,40	0,00481	45801,97
9	152,62	0,00382	44547,82
10	155,21	0,00333	46556,12
11	144,38	0,00379	43768,45
12	159,23	0,00326	50798,62
13	146,92	0,00371	47035,08
14	150,41	0,00328	49183,89
15	149,86	0,00332	49129,41
16	149,86	0,00321	48192,94
17	145,98	0,00327	45522,25
18	150,03	0,00306	49293,08
19	151,92	0,00304	49595,20
20	158,01	0,00311	51374,18
Média=	150,89		47707,96

Los valores obtenidos de los ensayos resultaron en 150,89 MPa para la resistencia a la compresión promedio (f_{cm}) y 47707,96 MPa para el módulo de elasticidad, datos que serán utilizados

en el análisis numérico y en las simulaciones por elementos finitos usando ANSYS realizadas más adelante.

El valor característico obtenido para la resistencia a la compresión fue de 143,43 MPa con un desvío padrón de 4,32 y una probabilidad de excedencia del 95%, obtenido usando la ley de Student-fisher sobre 20 especímenes de prueba siguiendo las recomendaciones de la AFGC [77]. En la Figura 103 observamos el grafico de densidad de frecuencias para la data en registrada y en la Figura 104 se observan las curvas constitutivas, incluyendo el promedio. Los resultados individuales pueden ser consultados en los apéndices.

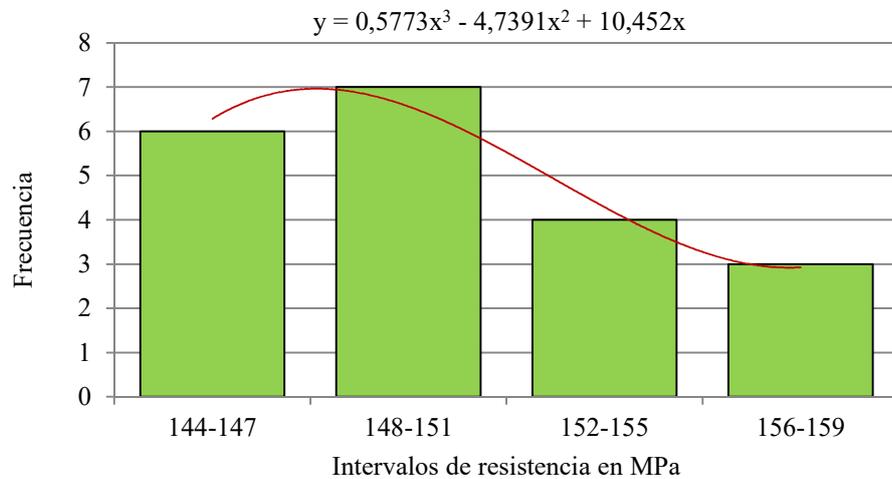


Figura 103: Densidad de frecuencia para UHPFRC.

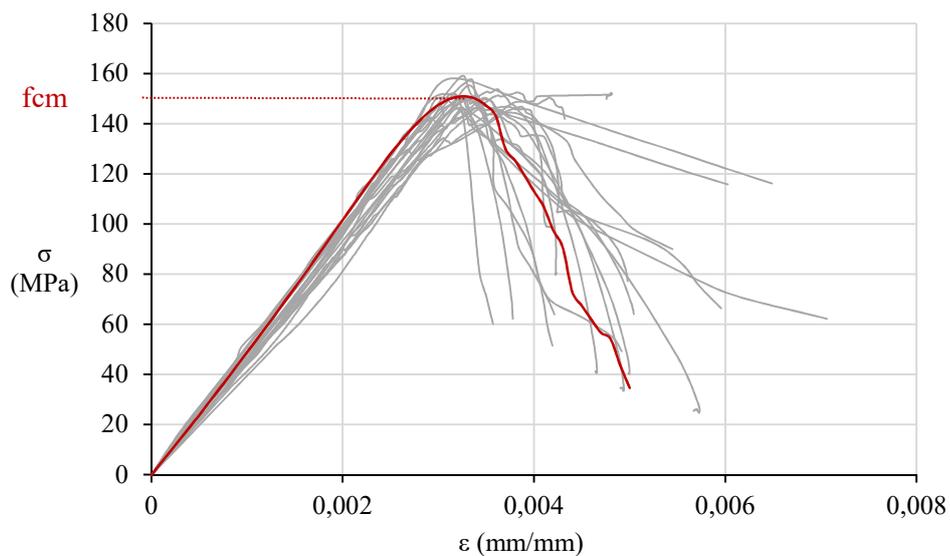


Figura 104: Ley constitutiva del UHPFRC.

El comportamiento post-agrietamiento se logró capturar correctamente en once de los veinte ensayos, aplicando el procedimiento descrito en el capítulo anterior. Es la primera vez que ese procedimiento es aplicado en el laboratorio y no se dispuso de suficiente cantidad de LDVT para realizar mediciones simultáneas tanto en el cilindro como en el cabezal de la prensa.

El comportamiento del UHPFRC incluyendo la parte post- agrietamiento se observa en la Figura 105 para los 11 especímenes, en ambos gráficos se incluye la curva promedio. El valor de la deformación unitaria para f_{cm} registrado en el gráfico fue de 0,0033.

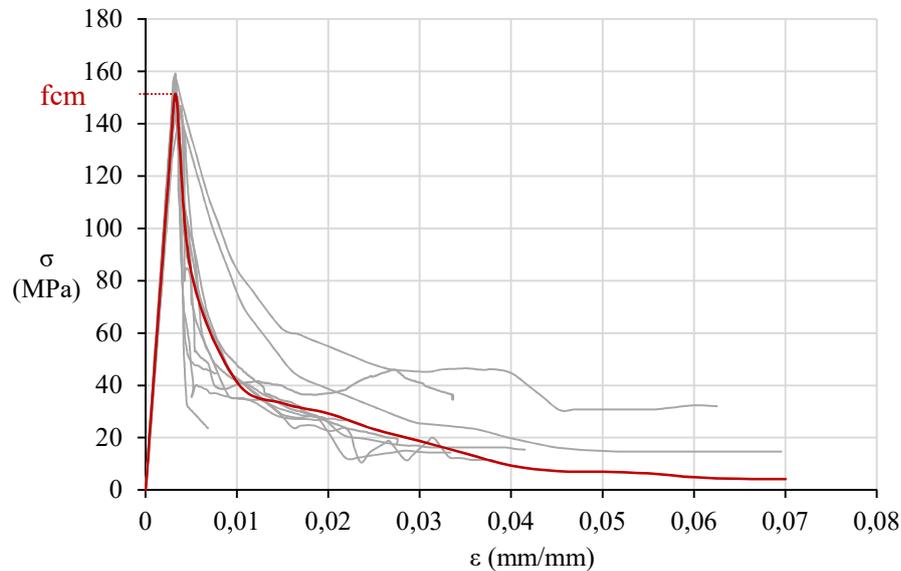


Figura 105: Ley constitutiva del UHPFRC post-pico en compresión.

En la Tabla 18 y en la Figura 106 se anexa una comparación de los resultados obtenidos con respecto a otros autores consultados en la bibliografía, observando semejanzas tanto en los resultados como en el comportamiento.

Tabla 18: Valores de la resistencia a la compresión, comparación.

Autor	f_c (MPa)
Graybeal, B. [99]	180
Shafieifar, et al. [106]	138
Kralh, et al. [107]	142
Mahmud, et al. [137]	151
Singh, et al. [138]	143
Osta, et al. [139]	128
Rojas R.	151

Valores para el módulo de elasticidad también fueron calculados según las ecuaciones propuestas por varios autores citados en el Capítulo 4, ver Tabla 19.

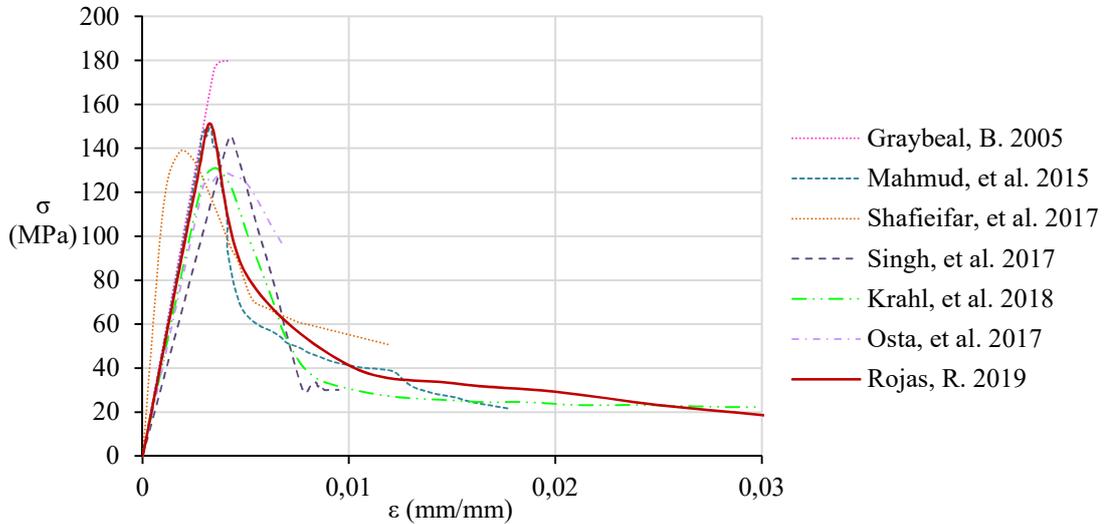


Figura 106: Comparación del comportamiento del UHPFRC en compresión.

Tabla 19: Comparación de los resultados para E.

Autor	E (MPa)	Diferencia (%)
AFGC [77]	50575,82	6,01
Graybeal, B. [99]	47169,39	1,13
Shafieifar, et al. [106]	60000,00	25,77
Kralh, et al. [107]	39000,00	18,25
Als Salman et al. [112]	48747,17	2,18
Mahmud, et al. [137]	45000,00	5,68
Singh, et al. [138]	38000,00	20,35
Osta, et al. [139]	46000,00	3,58
ACI-363R [140]	47681,87	0,05
ACI-318R [141]	58101,88	21,79
Ma et al. [142]	46950,43	1,59
Rojas R.	47707,96	

Notamos que el valor promedio obtenido a partir de las referencias es de 47929,69 MPa; con una diferencia menor al 1% comparada al resultado promedio del módulo de elasticidad obtenido en esta pesquisa.

7.1.4.2 Especímenes con macrofibras de acero

La relación constitutiva (σ vs ϵ) usando macrofibras de acero es mostrada en la Figura 107. La resistencia a la compresión promedio obtenida fue de 135,52 MPa lo que equivale a una diferencia del 11% en comparación al mismo diseño de mezcla usando microfibras.

La mezcla de UHPFRC usando macrofibras fue ensayada usando cilindros CP-7,5 en los cuales la longitud de la fibra ocupa un 50% del diámetro del cuerpo de prueba. Es probable suponer que aglomeraciones y vacíos pudieron formarse en las fibras entrelazadas, disminuyendo la resistencia del material.

El valor obtenido para f_{cm} , obtenido del gráfico, será usado en el análisis numérico del UHPFRC usando macrofibras, también el módulo de elasticidad, calculado en 38328,03 MPa.

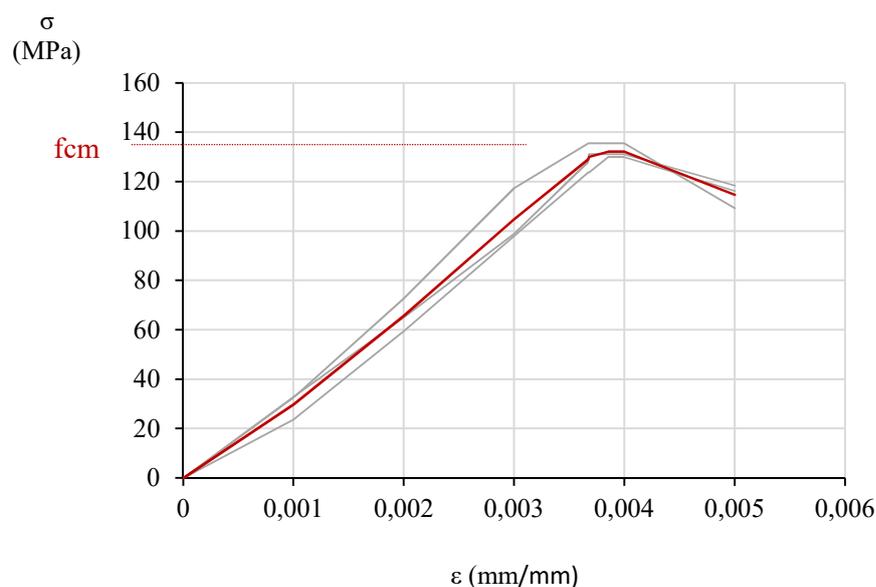


Figura 107: Ley constitutiva del UHPFRC en compresión usando macrofibras.

En el proceso de evaluación de los resultados, provenientes de todos los ensayos a compresión desarrollados hasta ahora, se pudo comprobar que ANOVA es un método estadístico eficiente para el análisis de varianza de la data experimental. Permitted establecer el porcentaje de contribución que cada factor controlable tiene sobre la variable de respuesta, que en nuestro caso fue la resistencia a la compresión. Esa información orientó la toma de decisiones en cada etapa experimental del estudio, permitiendo la exclusión, modificación o inclusión de nuevas variables en los experimentos.

El trabajo experimental que sigue a continuación considera un único diseño de mezcla del UHPFRC, que corresponde al diseño de mezcla definitivo mostrado en la Tabla 7 del Capítulo 5, utilizando microfibras y macrofibras de acero, con porcentajes de 0%, 1% y 2%.

7.2 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN UNIAXIAL

7.2.1 Usando microfibras de acero

Los resultados del ensayo a tracción uniaxial o directa para elementos tipo Dog-Bone con 0%, 1% y 2% de microfibras se anexan en la Tabla 20. Los valores de resistencia a la tracción uniaxial (f_t), resistencia cuando la primera grieta aparece (f_{te}) y la resistencia máxima en la zona agrietada (f_{tcr}) son incluidos.

Las gráficas constitutivas del comportamiento del material en función del contenido de fibra en la matriz pueden ser observadas en la Figura 108. Los valores de E se obtuvieron por aproximación lineal en el tramo elástico del comportamiento, con valores de 38899,93 MPa; 35679,66 MPa y 48540,77 MPa y un contenido de fibras de 0%, 1% y 2% respectivamente.

Tabla 20: Resistencia a la tracción uniaxial.

	f_t (MPa)			f_{te} (MPa)		f_{tcr} (MPa)	
	0%	1%	2%	1%	2%	1%	2%
CP-1	8,70	6,96	9,69	6,96	8,81	6,96	9,69
CP-2	9,22	7,70	10,24	7,70	9,39	7,70	10,24
CP-3	8,71	9,51	8,84	9,51	7,68	9,51	8,84
CP-4		7,73	8,27	6,49	6,48	7,73	8,27
CP-5		7,56		6,62		7,56	
CP-6		7,24		6,80		7,24	
Promedio=	8,88	7,78	9,26	7,35	8,09	7,78	9,26

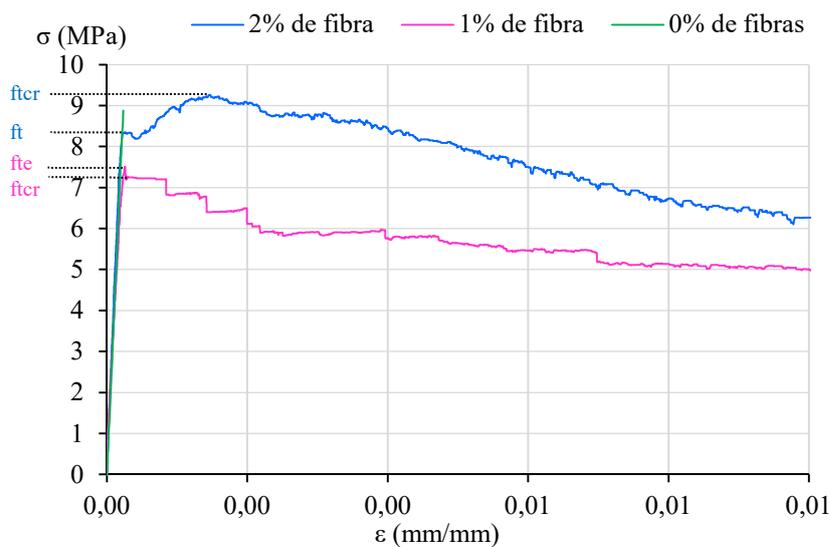


Figura 108: Ley constitutiva en tracción directa. 0%, 1% y 2% de microfibras.

Las deformaciones unitarias correspondientes a la resistencia máxima promedio fueron de 0,00023; 0,00026 y 0,00146 para un contenido de fibras de 0%, 1% y 2% respectivamente. En la Figura 109 observamos la ley de comportamiento en tracción directa obtenida en este trabajo comparada con los resultados obtenidos por otros autores usando 2% de microfibras de acero. Ese grafico fue publicado en ACI 239R-18 [42], usando elementos con una sección transversal mayor, sin embargo, se puede visualizar claramente similitudes en todos los comportamientos. En esa misma grafica podemos comparar los resultados del UHPFRC con el concreto convencional (*Simulated Conventional Concrete*) y con el FRC.

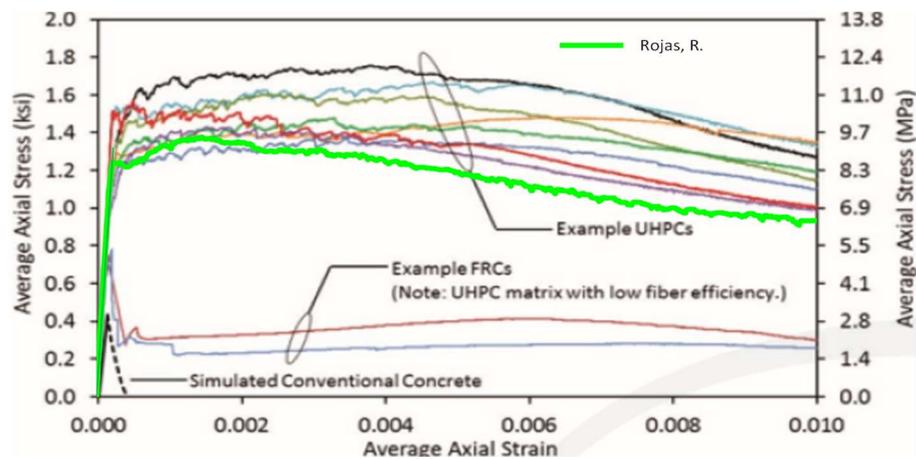


Figura 109: Comparación del comportamiento en tracción. Fuente: ACI adaptado [41].

En las Figuras 110 y 111 se muestra la respuesta del material para cada ensayo individual y para la curva promedio usando 1% y 2% de microfibras.

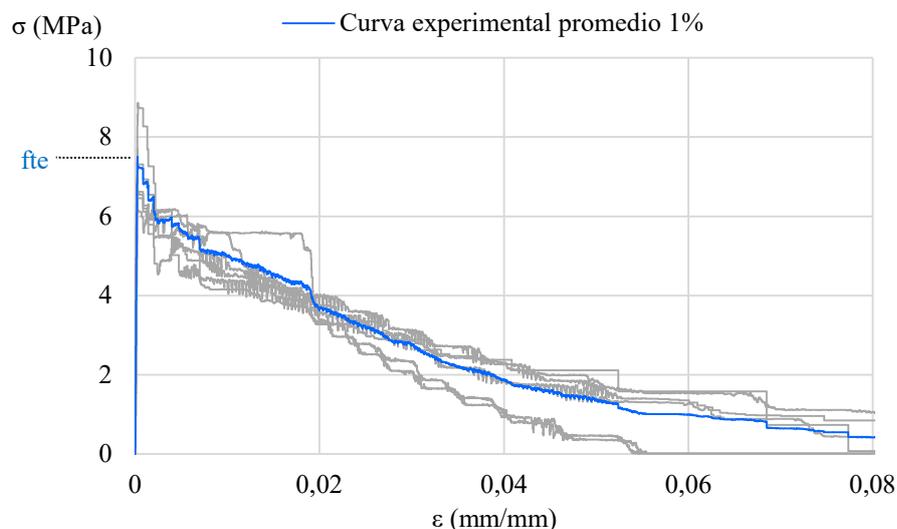


Figura 110: Relaciones constitutivas en tracción uniaxial. 1% de microfibras.

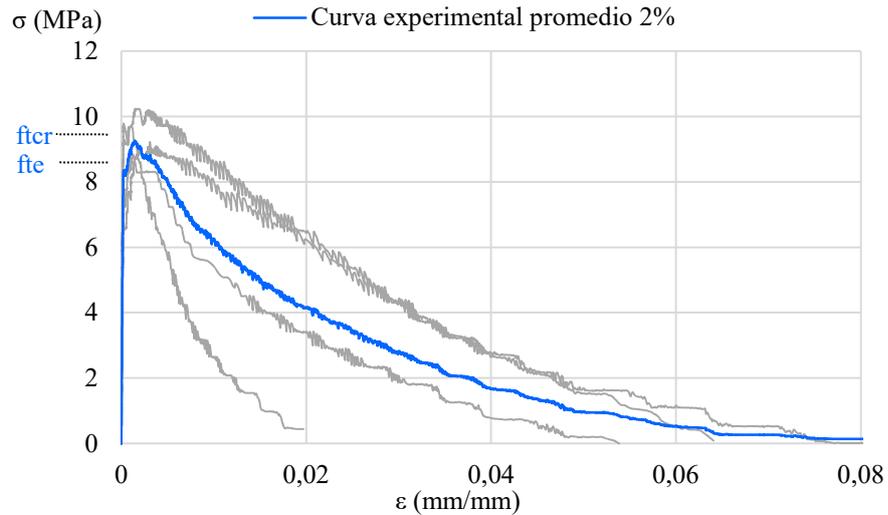


Figura 111: Relaciones constitutivas en tracción uniaxial. 2% de microfibras.

Las curvas se grafican hasta la deformación equivalente a 6,5 mm de alargamiento del elemento (valor igual a la mitad de la longitud de la fibra). Los resultados del ensayo a tracción directa sobre especímenes Dog-Bone muestran que usando 1% de microfibras la respuesta del UHPFRC es semejante a la del FRC, presentando comportamiento de *Tensile Strain Softening*. Al usar 2% de microfibras la respuesta del material presenta *Tensile Strain Hardening*. Para una mejor visualización del comportamiento, bien sea de TSS o de TSH, las gráficas se presentan entre los valores máximos elásticos e inelásticos, como se recomienda en la bibliografía consultada, ver Figuras 112 y 113.

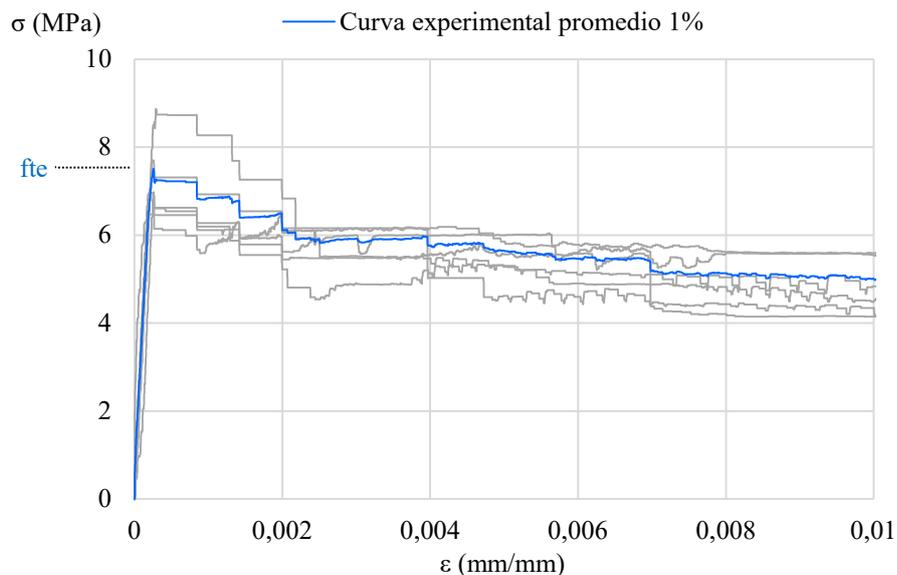


Figura 112: *Tensile Strain Softening* en tracción uniaxial con 1% de microfibras.

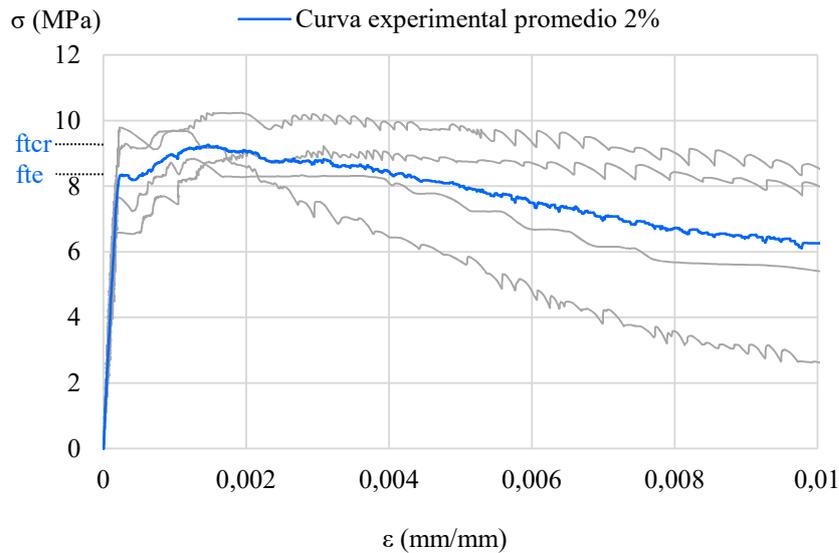


Figura 113: *Tensile Strain Hardening* en tracción uniaxial con 2% de microfibras.

7.2.2 Usando macrofibras de acero

Los resultados del ensayo a tracción uniaxial o directa para elementos tipo Dog-Bone con 0% y 1% de macrofibras de acero se anexan en la Tabla 21, incluyendo los resultados de la resistencia cuando la primera grieta aparece (fte) y la resistencia máxima en la zona agrietada (ftcr), los gráficos pueden ser visualizados en la Figura 114. Usando 2% de macrofibras atingimos resistencias muy bajas y los resultados fueron descartados. Suponemos que es por la relación entre la longitud de la fibra y la geometría de la forma, que impidió una adecuada distribución de las fibras dentro de la matriz de concreto, generando vacíos entre ellas.

Tabla 21: Resistencia a la tracción uniaxial.

	ft (MPa)		fte (MPa)		ftcr (MPa)	
	0%	1%	1%	1%	1%	1%
CP-1	8,7	7,52	5,50		7,52	
CP-2	9,22	6,42	5,88		6,42	
CP-3	8,71	7,17	5,14		7,17	
Promedio=	8,88	7,04	5,51		7,04	

Las gráficas constitutivas del comportamiento del material para la curva promedio y sus repeticiones pueden ser observadas en la Figura 115. Los valores del módulo de elasticidad se obtuvieron por aproximación lineal sobre la curva promedio el rango elástico, cuyos valores fueron de 38899,93 MPa y 39966,91MPa para un contenido de fibras largas de acero de 0% y 1%

respectivamente. Las deformaciones unitarias correspondientes a la resistencia máxima promedio fueron de 0,00023 y 0,02066 para un contenido de fibras de 0% y 1%.

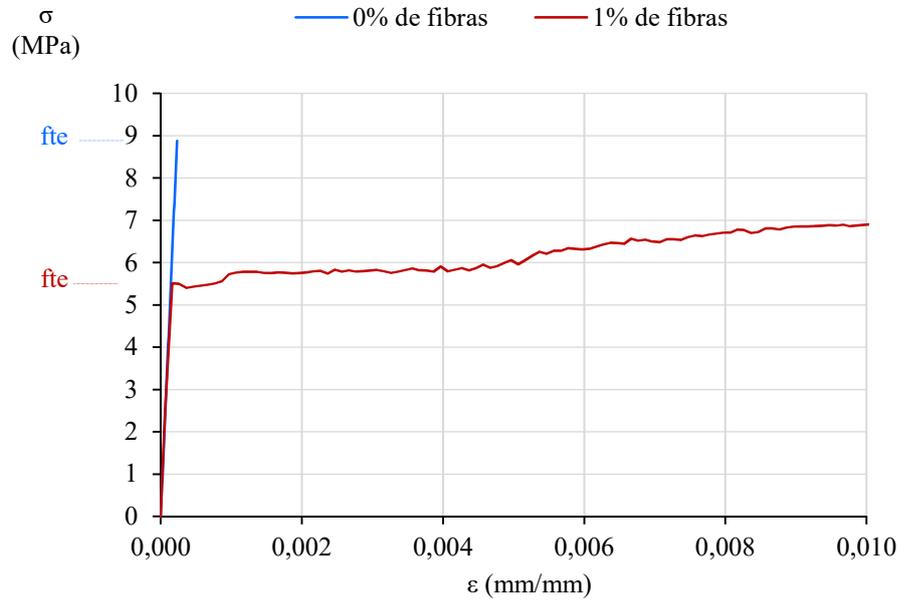


Figura 114: Ley constitutiva en tracción directa. 0% y 1% de macrofibras.

Después de atingir el límite elástico las curvas reflejan el proceso de microfisuración, aspecto que no fue percibido a simple vista durante el desarrollo del ensayo, luego el valor máximo de resistencia en la zona agrietada es alcanzado.

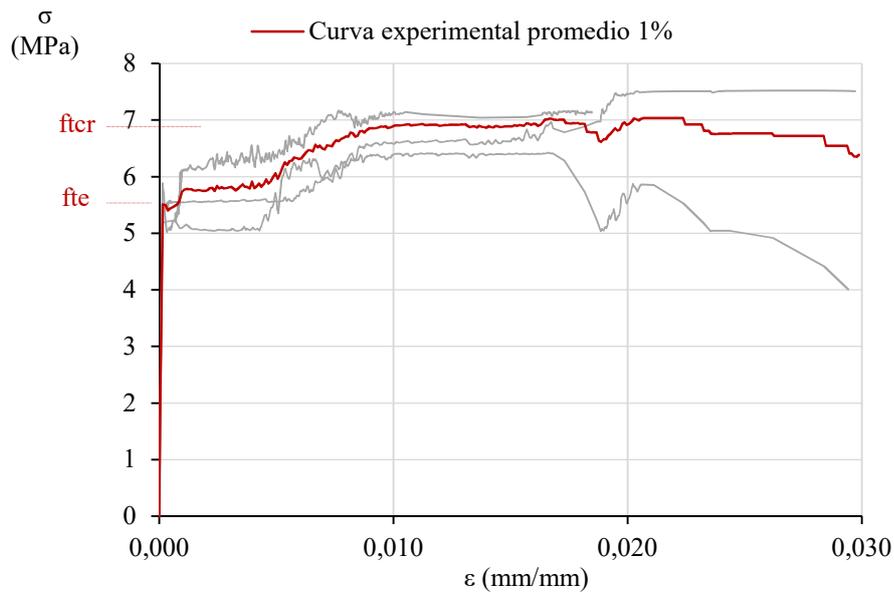


Figura 115: Ley constitutiva promedio y repeticiones. 1% de macrofibras.

Realizando una comparación fotográfica, de la contribución efectiva de las fibras en la sección transversal de fractura, podemos encontrar una justificación para esos resultados. En las Figuras 116-a) y 116-b) notamos la cantidad de microfibras que atraviesan la grieta y en las Figuras 116-c) y 116-d) notamos las macrofibras. Las diferencias tanto en cantidad como en orientación de las fibras son evidentes. Posiblemente la longitud de la macro-fibra impidió su adecuada orientación y distribución en la pequeña sección transversal del Dog-Bone.



Figura 116: Cantidad de a) microfibras y b) macrofibras atravesando la grieta.

7.3 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

7.3.1 Usando mini-vigas con microfibras

Los resultados del ensayo a flexión o tracción en la flexión referentes a la carga versus la deflexión ($F-\delta$) en elementos prismáticos con 0%, 1% y 2% de microfibras de acero se anexan en la Tabla 22. Los valores de la carga elástica o F_{te} , resistencia a la tracción elástica o f_{te} y

deflexión δ_{te} , también se anexan. En la Tabla 23 se reflejan los resultados obtenidos en la rama post-agrietamiento, la carga máxima F_{tcr} y su respectiva deflexión δ_{tcr} son anexadas.

Las curvas promedio de F vs δ para mini-vigas con 0%, 1% y 2% de microfibras en la matriz son graficadas en la Figura 117. Las curvas se grafican hasta una deflexión igual a 1,5 mm según las recomendaciones de la AFGC [77].

Tabla 22: Carga, esfuerzo y deflexión elástica en flexión para UHPFRC.

	Fte (kN)			δ_{te} (mm)			fte (MPa)		
	0%	1%	2%	0%	1%	2%	0%	1%	2%
CP-1	10,00	9,88	20,03	0,0392	0,0320	0,0295	9,18	9,07	18,39
CP-2	9,16	10,02	15,13	0,0120	0,0388	0,0235	8,41	9,20	18,45
CP-3	8,61	10,10	15,07	0,0376	0,0386	0,0297	7,91	9,28	13,84
CP-4		10,56	10,34		0,0370	0,0198		9,70	9,50
CP-5			10,16			0,0179			9,33
CP-6			10,27			0,0210			9,43
Promedio=	9,26	10,14	13,50	0,0296	0,0366	0,0236	8,50	9,31	13,16

Tabla 23: Carga máxima y deflexión inelástica en flexión para UHPFRC.

	Ftcr (kN)		δ_{tcr} (mm)	
	1%	2%	1%	2%
CP-1	9,20	21,00	0,8252	0,8138
CP-2	11,38	20,77	1,2947	1,0342
CP-3	13,75	22,50	1,0407	1,0749
CP-4	14,34	22,00	1,2818	1,0346
CP-5		23,43		0,9109
CP-6		26,39		1,0913
Promedio=	12,17	22,68	1,1106	0,9933

El UHPFRC fue caracterizado por su comportamiento en flexión o tracción en la flexión. Usando microfibras, la curva que relaciona la carga aplicada versus la deflexión en el medio de la viga fue prácticamente duplicada al duplicar el porcentaje de fibras. Usando macrofibras la diferencia máxima fue 18%.

En la Figura 117 notamos que al duplicar el contenido de microfibras dentro de la matriz de UHPFRC se incrementó en 29% la resistencia a la flexión elástica máxima. La fuerza máxima inelástica soportada por la mini-viga fue 46% superior, con una deflexión 11% menor. Los valores de la resistencia máxima a la tracción elástica sin y con 1% de fibras fueron muy próximos, con ambas curvas prácticamente superpuestas. La curva que relaciona la carga aplicada

versus la deflexión en el medio de la viga fue prácticamente duplicada al duplicar el porcentaje de fibras.

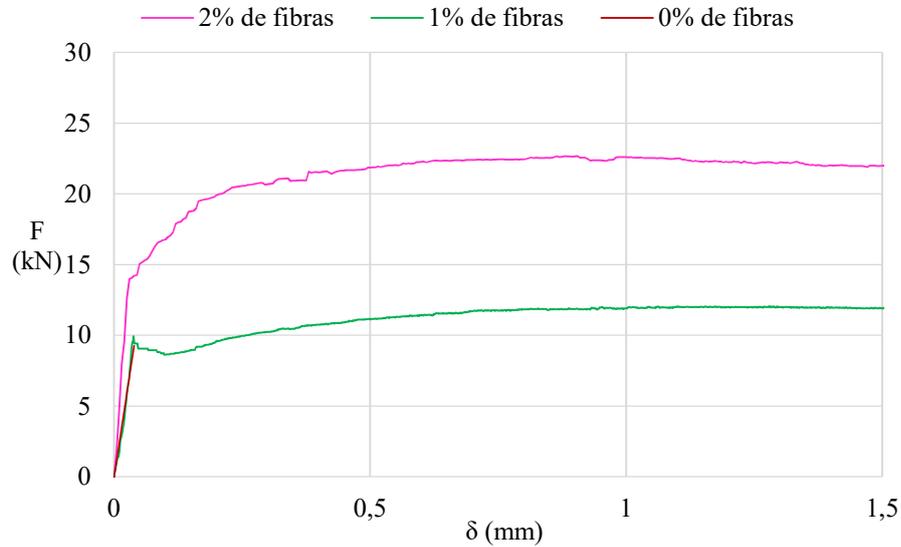


Figura 117: Curvas promedio de F vs δ con 0%, 1% y 2% de microfibras.

En las Figuras 118 a 120, se grafican las curvas promedio y sus respectivas repeticiones.

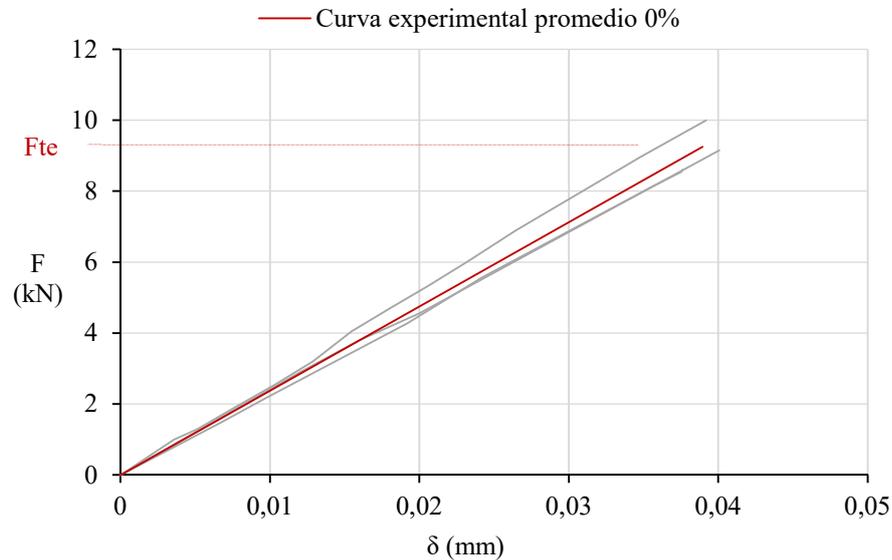


Figura 118: Curvas F vs δ para mini-vigas sin fibras.

Notamos tres comportamientos diferentes: (i) sin fibras, linealmente elástico; (ii) con 1% de fibras, linealmente elástico hasta atingir el valor límite, después ocurre una caída de la resistencia para posteriormente presentar un leve endurecimiento por deformación; y (iii) con 2% de

fibras, linealmente elástico hasta atingir el valor límite, se continúa ganando resistencia hasta alcanzar la resistencia máxima inelástica.

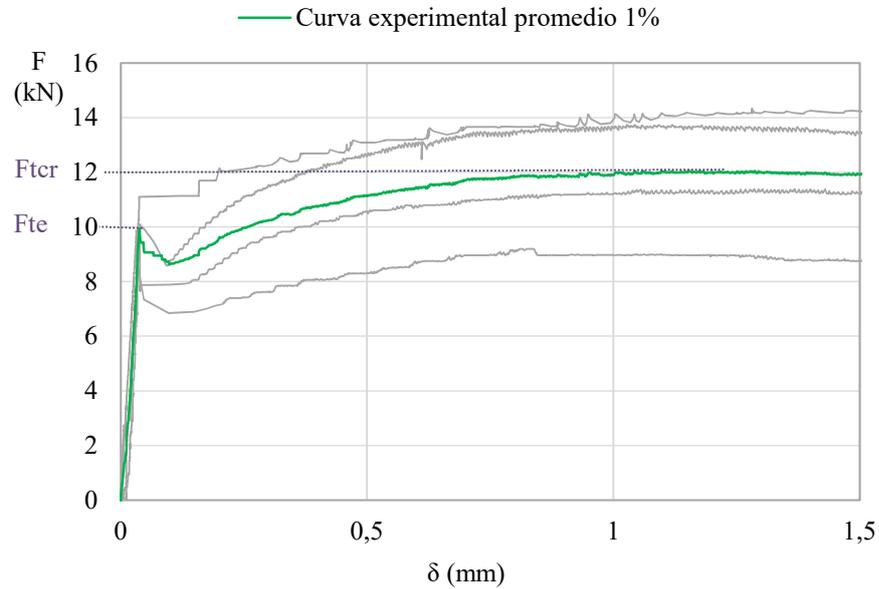


Figura 119: Curvas F vs δ para mini-vigas con 1% de microfibras.

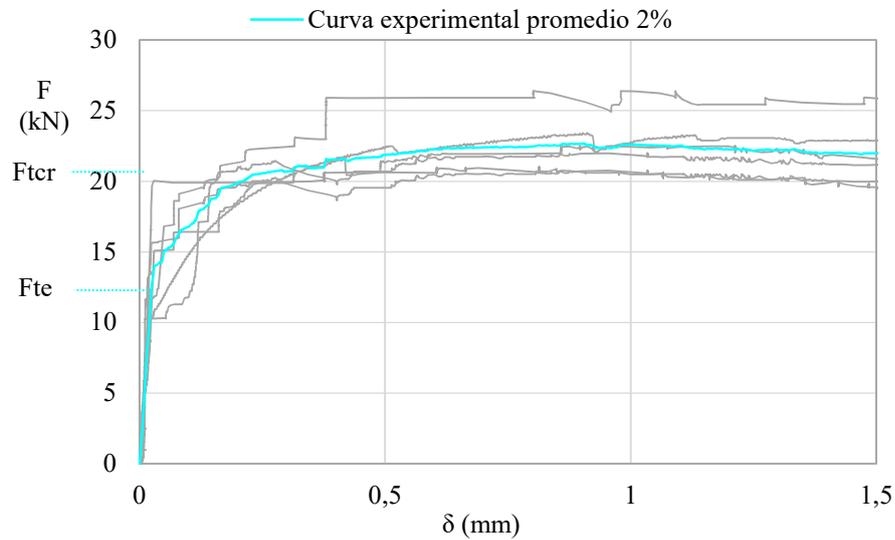


Figura 120: Curvas F vs δ para mini-vigas con 2% de microfibras.

7.3.2 Usando mini-vigas con macrofibras

Los resultados del ensayo a flexión o tracción en la flexión referentes a la carga versus la deflexión ($Ft-\delta$) en elementos prismáticos con 0%, 1% y 2% de fibras cortas de acero se anexan

en la Tabla 24. Los valores de la carga elástica o F_{te} , resistencia a la tracción elástica o f_{te} y deflexión δ_{te} , también se anexan. Las gráficas de F vs δ para mini-vigas con 0%, 1% y 2% de macrofibras pueden ser observadas en la Figura 121.

Tabla 24: Carga, esfuerzo y deflexión elástica en flexión para UHPFRC.

	Fte (kN)			δ_{te} (mm)			f _{te} (MPa)		
	0%	1%	2%	0%	1%	2%	0%	1%	2%
CP-1	10,00	10,21	20,19	0,0392	0,0415	0,1129	9,18	9,38	18,54
CP-2	9,16	10,09	37,00	0,0120	0,0546	0,2024	8,41	9,26	33,98
CP-3	8,61	10,68	22,75	0,0376	0,0170	0,1274	7,91	9,81	20,89
Promedio=	9,26	10,33	26,65	0,0296	0,0366	0,1476	8,5	9,48	24,47

En la Tabla 25 se reflejan los resultados obtenidos en la rama post- agrietamiento, la carga máxima F_{tcr} y su respectiva deflexión δ_{tcr} son anexadas.

Tabla 25: Carga máxima y deflexión post- agrietamiento en flexión para UHPFRC.

	F _{tcr} (kN)		δ_{tcr} (mm)	
	1%	2%	1%	2%
CP-1	19,51	26,03	0,6807	0,7727
CP-2	17,03	41,81	0,6536	0,6763
CP-3	15,55	33,02	0,8040	0,8263
Promedio=	17,36	33,62	0,7128	0,7584

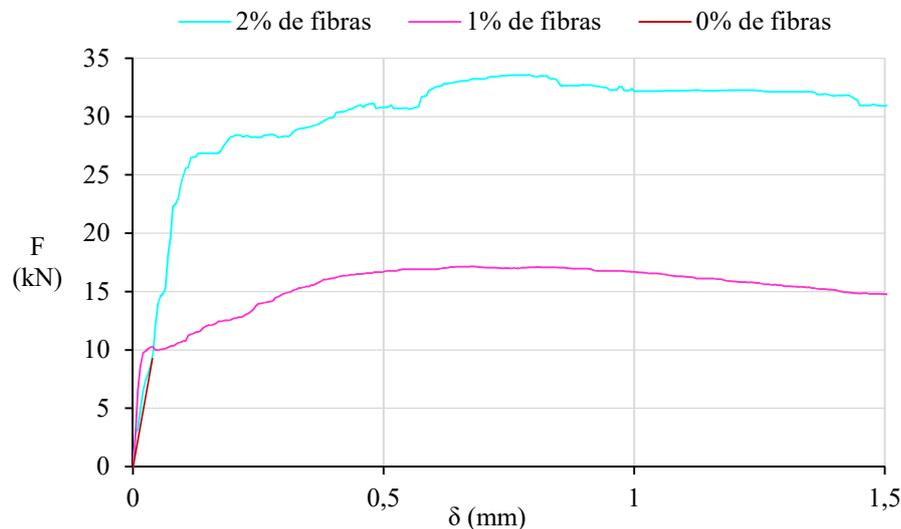


Figura 121: Curvas promedio de F vs δ . 0%, 1% y 2% de macrofibras.

Las curvas se grafican hasta una deflexión igual a 1,5 mm según las recomendaciones de la AFGC [77]. En la Figura 122 y la Figura 123 se muestran las curvas F vs δ para 1% y 2% de macrofibras, incluyendo las repeticiones y la curva promedio.

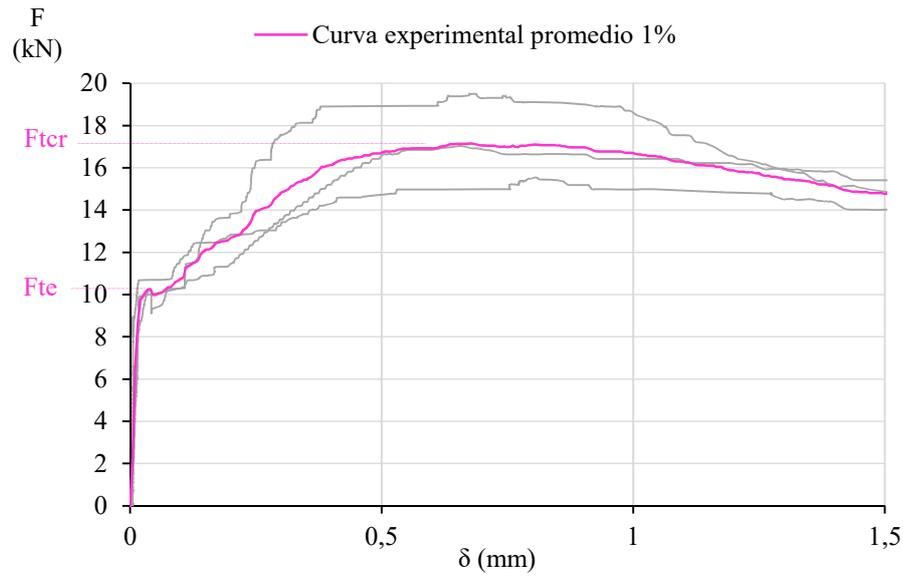


Figura 122: Curvas F vs δ para mini-vigas con 1% de macrofibras.

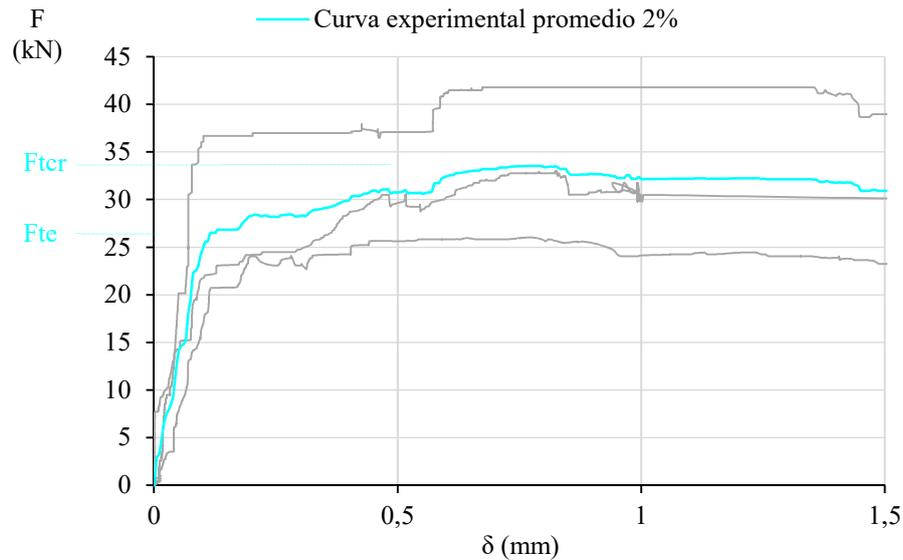


Figura 123: Curvas F vs δ para mini-vigas con 2% de macrofibras.

La curva que relaciona la carga aplicada versus la deflexión en el medio de la viga se incrementó en hasta un 18% al duplicar el porcentaje de fibras.

Duplicar el contenido de macrofibras dentro de la matriz de UHPFRC incrementa en 2,6 veces la resistencia a la flexión elástica máxima. La fuerza máxima inelástica soportada por la mini-viga fue 17% superior, con una deflexión 11% menor. Los valores de la resistencia máxima a

la tracción elástica sin y con 1% de fibras fueron muy próximos, con ambas curvas prácticamente superpuestas.

7.4 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN CUATRO PUNTOS

Los resultados del ensayo a flexión en cuatro puntos de la viga I referentes a la carga versus la deflexión (F vs δ) se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26: Resultados experimentales ensayo de flexión UHPFRC.

Tipo de refuerzo	Fte (kN)	δ_e (mm)	Ftcr (kN)	δ_{cr} (mm)
Microfibras de acero	52,31	0,4782	65,38	1,2797
Macrofibras de acero	60,75	0,8238	49,55	1,4287

Se usaron tanto microfibras como macrofibras de acero, los valores de la carga elástica o Fte y su respectiva deflexión δ_e así como también la carga máxima post-agrietamiento o Ftcr y su respectiva deflexión δ_{cr} son incluidos en la tabla. Los gráficos respectivos pueden visualizarse en las Figuras 124 y 125.

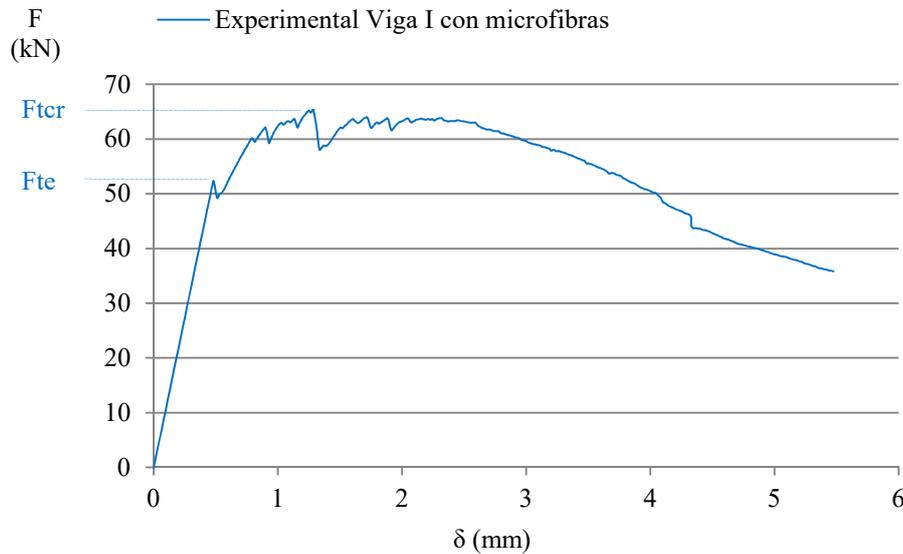


Figura 124: Curvas F vs δ para vigas I con UHPFRC usando microfibras.

Usando microfibras de acero notamos en el gráfico de la Figura 124 que después de atngir el límite elástico el elemento gana rigidez, presentando comportamiento de endurecimiento por deformación o *strain hardening*. Después de atngir la máxima carga en la zona agrietada presenta una pérdida en la resistencia, que luego recupera, casi hasta alcanzar el máximo soporte

de carga anterior. Luego el comportamiento es suavizado hasta atingir 35,82 MPa con una deflexión de 5,4744 mm, valor en el cual se detiene el ensayo.

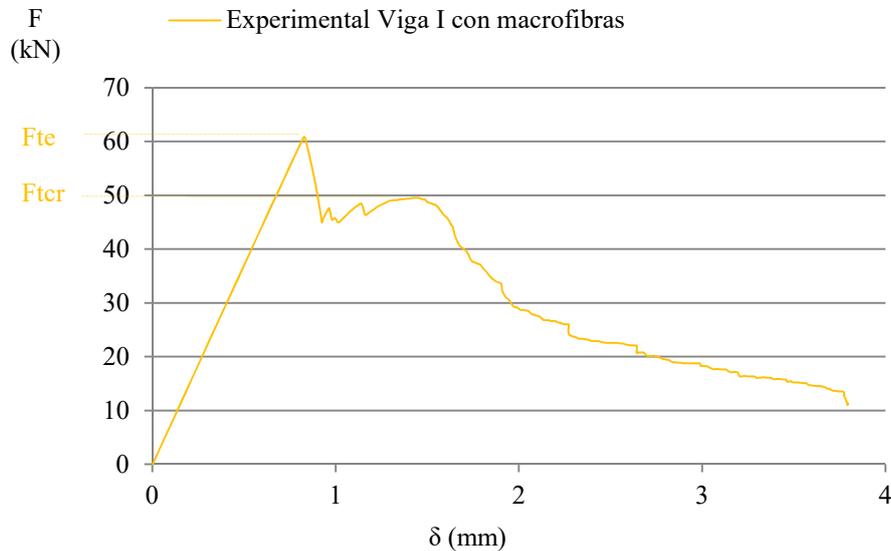


Figura 125: Curvas F vs δ para vigas I con UHPFRC usando macrofibras.

Usando macrofibras de acero notamos en el gráfico de la Figura 125 que después de atingir el límite elástico el elemento pierde el 23% de su rigidez, luego la resistencia se mantiene con pocas variaciones, formando gráficamente una meseta en la curva. Después de atingir la máxima carga en la zona agrietada presenta una pérdida en la resistencia y demuestra un comportamiento con ablandamiento por deformación o *strain softening*, hasta atingir 11,02 MPa con una deflexión de 3,7923 mm, valor en el cual se detiene el ensayo.

La viga también fue ensayada usando acero de refuerzo convencional, los resultados de las curvas F vs δ se muestran en la Figura 126, dos prototipos fueron fabricados.

En la primera viga ensayada el comportamiento en la fase elástica fue lineal hasta alcanzar el máximo valor de la carga, luego la resistencia se mantiene con pocas variaciones, forma gráficamente una meseta. El ensayo se continúa hasta alcanzar la capacidad máxima del LVDT (10 mm). La viga presentó múltiples fisuras, verticales y sobre todo inclinadas (45° aprox.), ninguna con abertura significativa.

En la segunda viga ensayada el comportamiento en la fase elástica fue lineal hasta alcanzar el máximo valor de la carga, inmediatamente después presenta una pérdida brusca en la rigidez, luego la resistencia se mantiene con pocas variaciones, forma gráficamente una meseta. En este

caso la deflexión de la viga fue medida con un deformímetro, los LVDT no estaban disponibles en el laboratorio para el día del ensayo. La viga presentó múltiples fisuras, verticales y sobre todo inclinadas (45° aprox.), varias de ellas con aberturas significativas y en algunos casos con pérdida del recubrimiento.

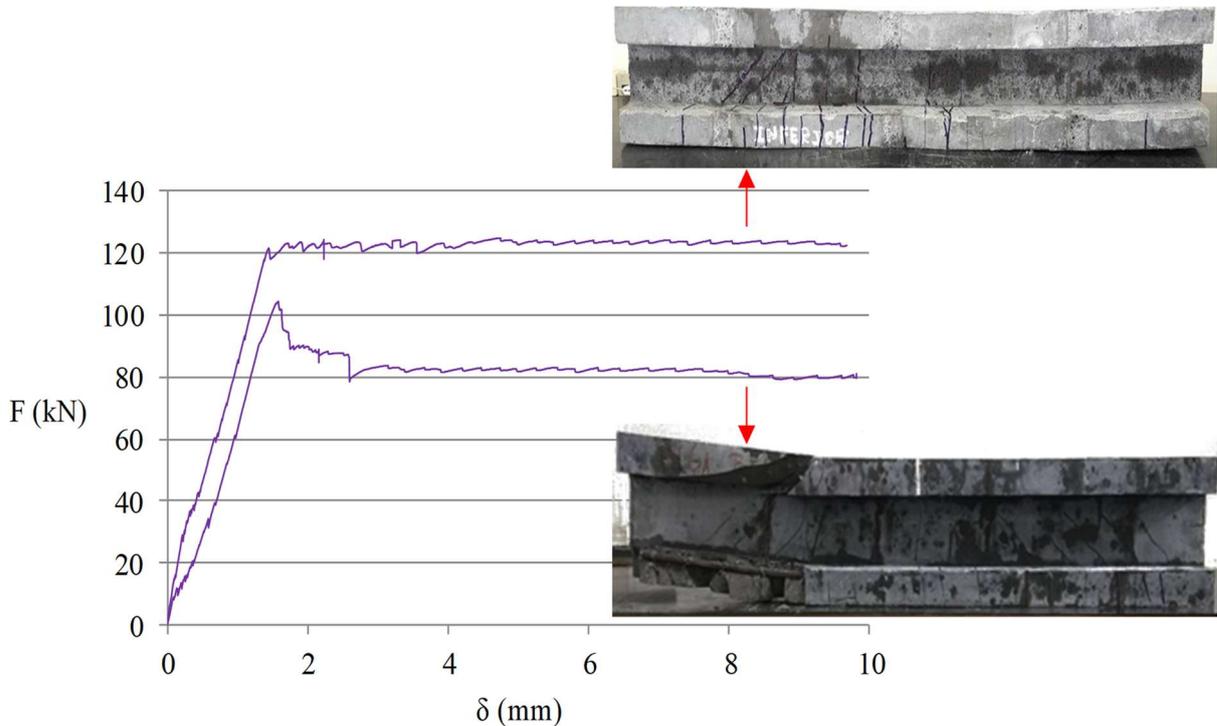


Figura 126: Curvas F vs δ para vigas I con UHPRC y acero convencional.

Se seleccionan los resultados del primer elemento ensayado, es decir, el que no presentó pérdida de resistencia post-agrietamiento. Esos resultados experimentales serán usados para el trabajo numérico a desarrollar más adelante, el cual contempla la simulación del ensayo de flexión y la comparación con la data experimental.

7.5 ENERGÍA DE FRACTURA

7.5.1 Usando microfibras

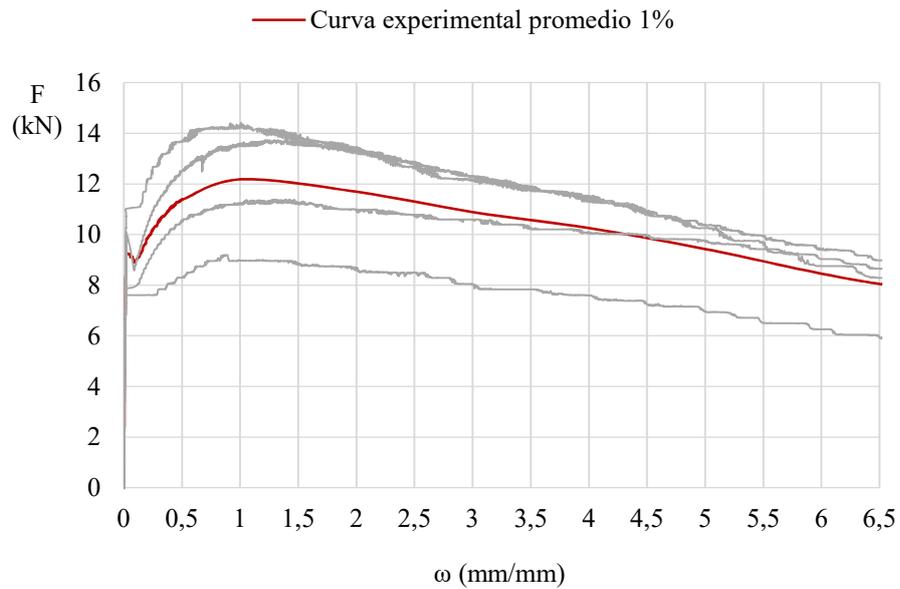
En las Tablas 27 y 28 se muestran los valores de la energía de fractura (G_F) calculados para cada curva F vs δ de especímenes conteniendo 1% y 2% de microfibras de acero, las Figuras 127 y 128 muestran las curvas usadas para calcular G_F .

Tabla 27: Energía de Fractura GF en kJ/m². 1% microfibras.

GF (kJ/m ²)	
CP-1	11,66
CP-2	18,75
CP-3	15,42
CP-4	19,22
Promedio=	16,26

Tabla 28: Energía de Fractura GF en kJ/m². 2% microfibras.

GF (kJ/m ²)	
CP-1	23,76
CP-2	18,64
CP-3	22,35
CP-4	19,38
CP-5	28,89
CP-6	52,83
Promedio=	27,64

Figura 127: Curvas F vs δ para calcular GF.

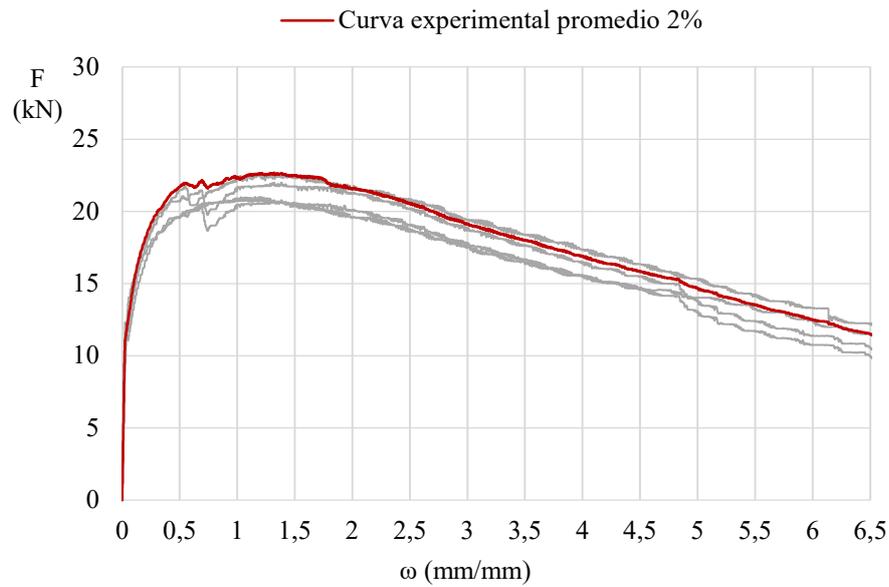


Figura 128: Curvas F vs δ para calcular GF.

7.5.2 Usando macrofibras

En las Tablas 29 y 30 se muestran los valores de la energía de fractura (G_F) calculados para cada curva F vs δ de especímenes conteniendo 1% y 2% de microfibras de acero, las Figuras 129 y 130 muestran las curvas usadas para calcular G_F .

Tabla 29: Energía de Fractura usando 1% de macrofibras.

G_F (kJ/m ²)	
CP-1	17,32
CP-2	9,72
CP-3	10,01
Promedio=	12,35

Tabla 30: Energía de Fractura usando 2% de macrofibras.

G_F (kJ/m ²)	
CP-1	22,42
CP-2	21,29
CP-3	27,95
Promedio=	23,89

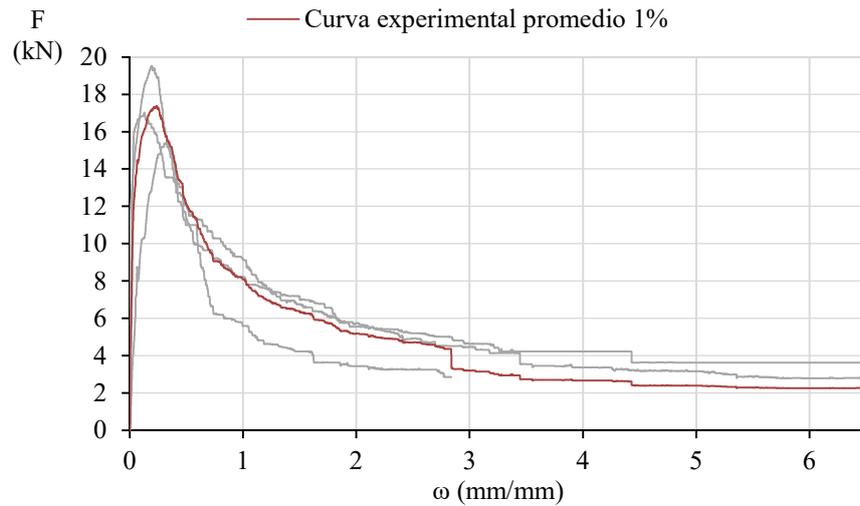


Figura 129: Curvas F vs δ para calcular GF.

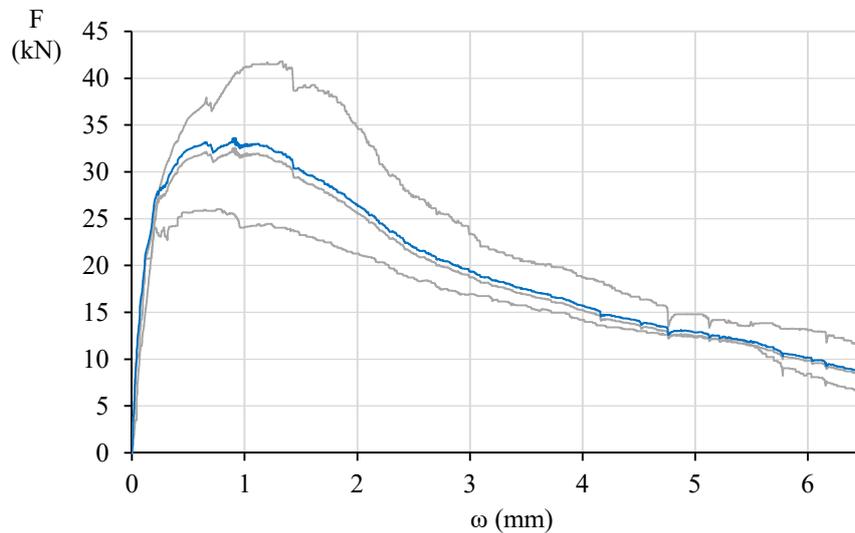


Figura 130: Curvas F vs δ para calcular GF.

Los resultados de GF señalados anteriormente serán comparados con los obtenidos usando AI, de esa manera el procedimiento analítico puede ser validado.

7.6 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA ADHERENCIA CON UHPFRC

La resistencia a la adherencia o t_b fue calculada como el cociente entre la resistencia de tracción aplicada al espécimen y el área perimetral de la barra embutida en la matriz de UHPFRC. Se utilizan barras poliméricas y barras de acero para calcular, en cada caso, la longitud de desarrollo a considerar en el diseño estructural.

7.6.1 Resultados de resistencia a la adherencia usando barras poliméricas

El valor promedio para 5 especímenes con diámetro de barra (db) igual a 10 mm fue de 9,49 MPa con una fuerza de tracción máxima de 14,44 kN ver Tabla 31. Usando db de 15 mm la resistencia fue de 9,42 MPa con una fuerza de tracción de 31,91 kN ver Tabla 32. Las Figuras 131 y 132 muestran las curvas de resistencia a la adherencia versus deslizamiento o Δ (τ_b vs Δ) para el valor promedio y para cada repetición.

Tabla 31: Resistencia a la adherencia con barras poliméricas $db=10$ mm.

$db=10$ mm	F_{tb} (kN)	τ_b (MPa)
CP-1	16,81	10,97
CP-2	13,16	8,58
CP-3	13,20	8,60
CP-4	14,16	9,23
CP-5	14,85	9,72
Promedio=	14,44	9,42

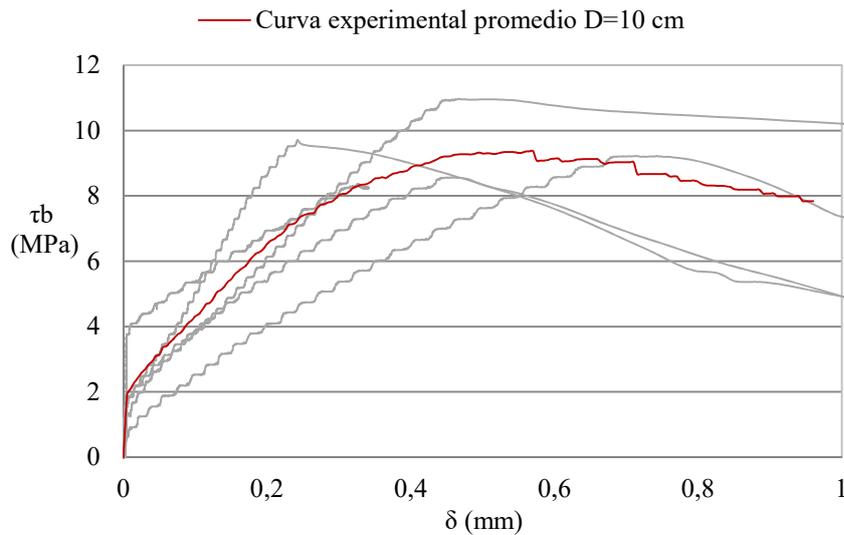


Figura 131: Resultados POT usando barras poliméricas con $db=10$ mm.

Tabla 32: Resistencia a la adherencia con barras poliméricas $db=15$ mm.

$db=15$ mm	F_{tb} (kN)	τ_b (MPa)
CP-1	39,06	11,63
CP-2	27,81	8,27
CP-3	28,80	8,58
CP-4	29,73	8,82
CP-5	34,15	10,17
Promedio=	31,91	9,49

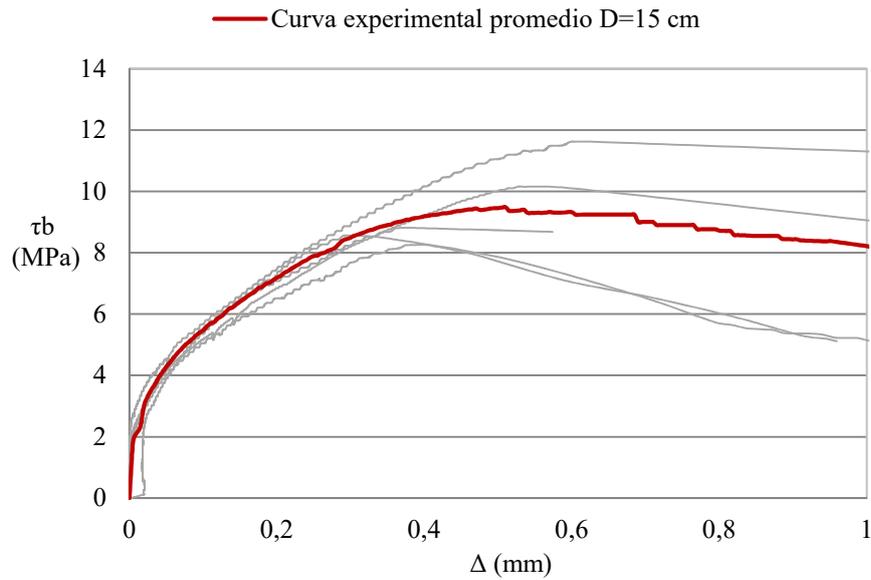


Figura 132: Resultados POT usando barras poliméricas con $db=15$ mm.

Los resultados del ensayo de tracción uniaxial sobre las barras poliméricas y los valores promedio se anexan en la Tabla 33.

Tabla 33: Resistencia a la tracción en las barras poliméricas.

db=10 mm			db=15 mm			
F _{tub} (kN)	db (mm)	f _{tub} (MPa)	F _{tub} (kN)	db (mm)	f _{tub} (MPa)	
50,65	9,91	657,33	84,95	15,47	480,72	
46,75	10,00	595,24	85,60	15,35	484,40	
48,30	10,13	614,97	82,80	15,47	468,55	
49,75	9,75	633,44	79,00	15,30	447,05	
51,75	10,00	658,90	80,90	15,70	457,80	
Promedio=	49,44	9,96	631,98	82,65	15,46	467,70

El valor para la longitud de desarrollo con $db = 10$ mm fue de 167,85 mm o 17db. El valor para la longitud de desarrollo con $db = 15$ mm fue de 180,74 mm o 12db.

7.6.2 Resultados de resistencia a la adherencia usando barras de acero

El valor promedio para 5 especímenes con diámetro de barra (db) igual a 10 mm fue de 20,20 MPa con una fuerza de tracción máxima de 47,60 kN. Usando db de 15 mm la resistencia fue de 28,78 MPa con una fuerza de tracción de 101,70 kN. Ver Tablas 34 y 35.

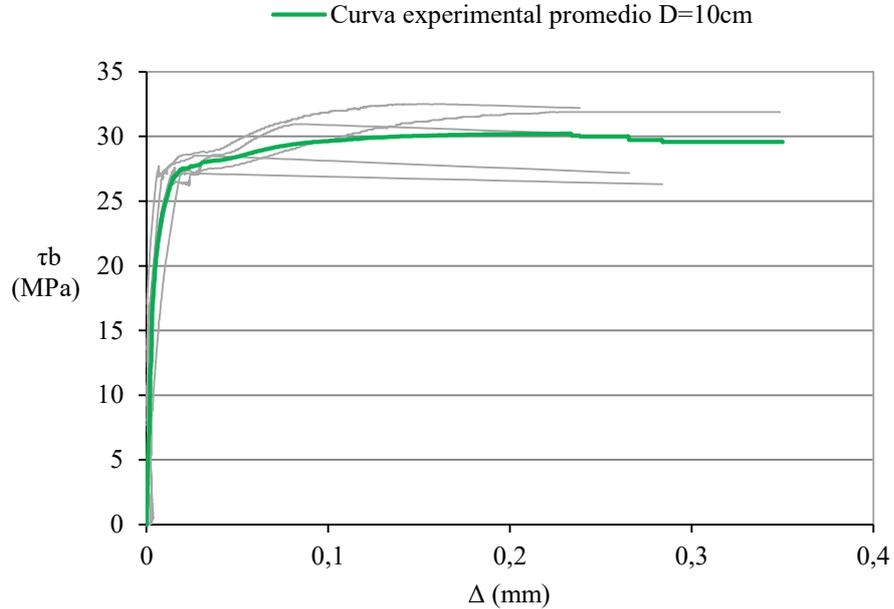
Tabla 34: Resistencia a la adherencia con barras de acero $d_b = 10$ mm.

$d_b = 10$ mm	F_{tb} (kN)	τ_b (MPa)
CP-1	51,08	32,52
CP-2	43,38	27,61
CP-3	44,79	28,51
CP-4	50,11	31,90
CP-5	48,65	30,97
Promedio=	47,60	30,31

Tabla 35: Resistencia a la adherencia con barras de acero $d_b = 15$ mm.

$d_b = 15$ mm	F_{tb} (kN)	τ_b (MPa)
CP-1	77,19	21,84
CP-2	107,27	30,35
CP-3	109,10	30,87
CP-4	103,92	29,40
CP-5	111,03	31,41
Promedio=	101,70	28,78

Las Figuras 133 y 134 muestran las curvas de resistencia a la adherencia versus deslizamiento o Δ (τ_b vs Δ) para el valor promedio y para cada repetición.

Figura 133: Adherencia en UHPRC usando barras de acero con $d_b = 10$ mm.

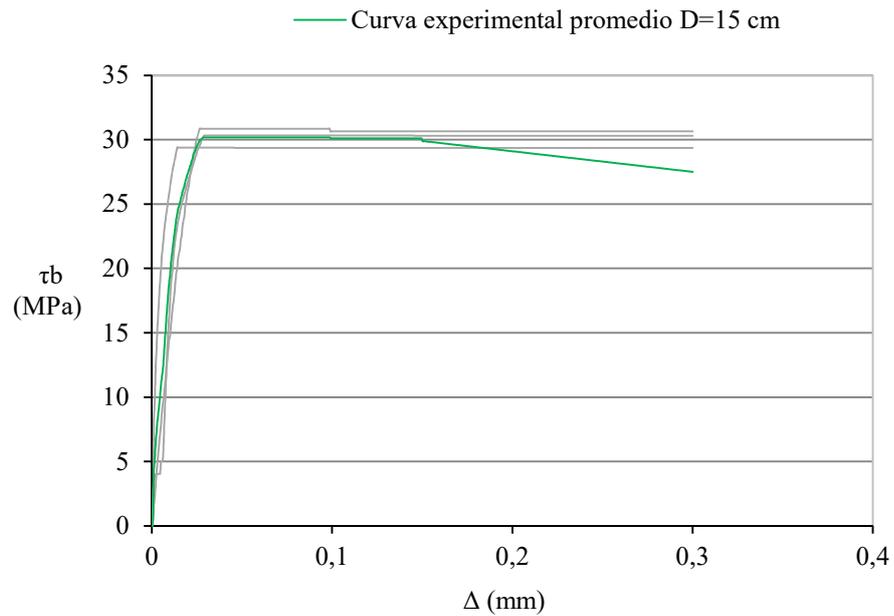


Figura 134: Adherencia en UHPRC usando barras de acero con $d_b=15$ mm.

El valor para la longitud de desarrollo con $d_b = 10$ mm fue de 41,25 mm o 5 d_b . El valor para la longitud de desarrollo con $d_b = 15$ mm fue de 69,50 mm o 5 d_b .

En resumen, el UHPRC fue caracterizado por su resistencia a la adherencia, realizando ensayos de arrancamiento o Pull-Out con barras de 10 mm y 15 mm. Los resultados indicaron que las barras de acero, usadas en esta pesquisa, necesitan una longitud de anclaje de al menos 5 veces el diámetro de la barra. Usando barras poliméricas la longitud de desarrollo se triplica para diámetros de 10 mm y se duplica para diámetros de 15 mm, en comparación a las barras de acero.

8 RESULTADOS DEL PROCEDIMIENTO NUMÉRICO

En el Capítulo 6 fue descrito el procedimiento analítico desarrollado en este trabajo según las recomendaciones de la AFGC [77]. A partir de la data experimental registrada en los ensayos de laboratorio, fue establecida la curva de comportamiento del UHPFRC en compresión y en tracción en la flexión, incluyendo la fase de post-agrietamiento, como se mostró en el Capítulo 7, ítem 7.1.4.

Las curvas de comportamiento de tracción en la flexión del UHPFRC fueron determinadas según el procedimiento indicado en el Capítulo 6, ítems 6.1 al 6.3, cuyos resultados mostraremos a continuación. Además de los resultados analíticos se incluyen las validaciones realizadas por elementos finitos, los Script se incluyen en los apéndices.

El análisis inverso para cada una de las mini-vigas conteniendo 1% y 2% de micro y macro fibras fue realizado y los resultados son mostrados a continuación.

Para cada par de valores conformado por la abertura de la muesca y la fuerza actuante (ω_i, F_i), se calcularon los valores del esfuerzo cohesivo (σ_c), altura del eje neutro ($\alpha_n \cdot h$) y la altura de la grieta ($\alpha \cdot h$). Esa serie de valores provienen de la resolución del sistema de ocho ecuaciones con ocho incógnitas ($X_m, \alpha_n h, \alpha h, \sigma_f, N_f, M_f, N_b, M_b$) deducidas a partir del equilibrio mecánico de la sección transversal de la viga, como se mostró en el Capítulo 6, ítem 6.2.2. En la Figura 135 se observa un esquema de las variables $\alpha_n h$ y αh en la mini-viga fracturada.

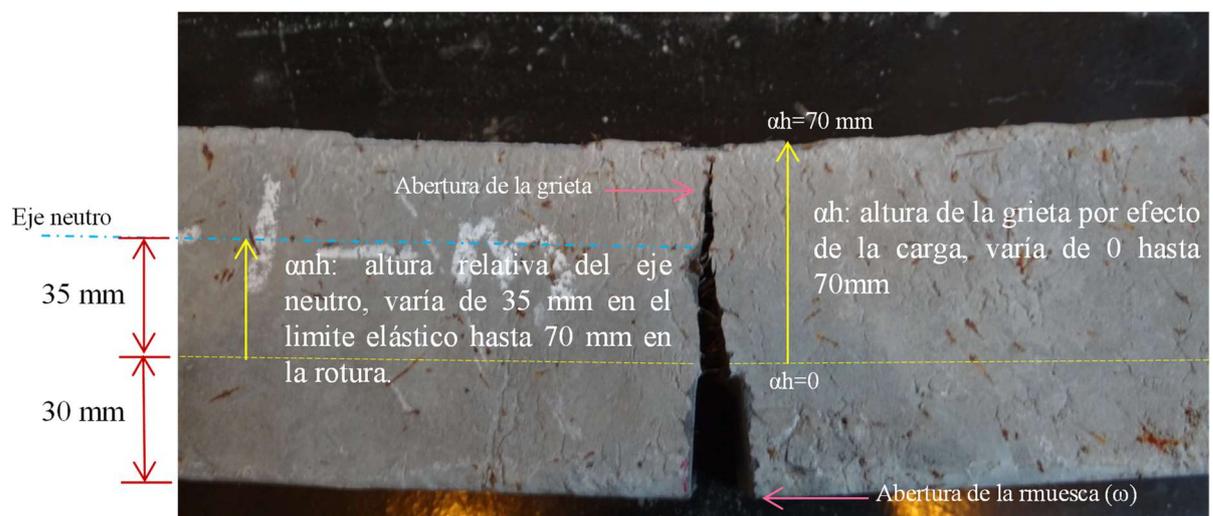


Figura 135: Esquema de las variables ($\alpha h, \alpha_n h$) en la viga fracturada.

8.1 CARACTERIZACIÓN DEL UHPFRC EN TRACCIÓN

8.1.1 Usando 1% de microfibras de acero

En la Figura 136 se muestran las curvas del esfuerzo cohesivo versus la abertura de la grieta (σ_c vs ω) obtenidas por AI para los cuatro especímenes de viga, incluyendo la curva promedio. Cada curva fue utilizada para calcular el valor de GF y comparar el resultado con el cálculo de GF utilizando la curva experimental (F vs δ) respectiva, como se explicó en el Capítulo 4 ítem 4.5 y Capítulo 5 ítem 5.6. Los resultados se muestran en la Tabla 36.

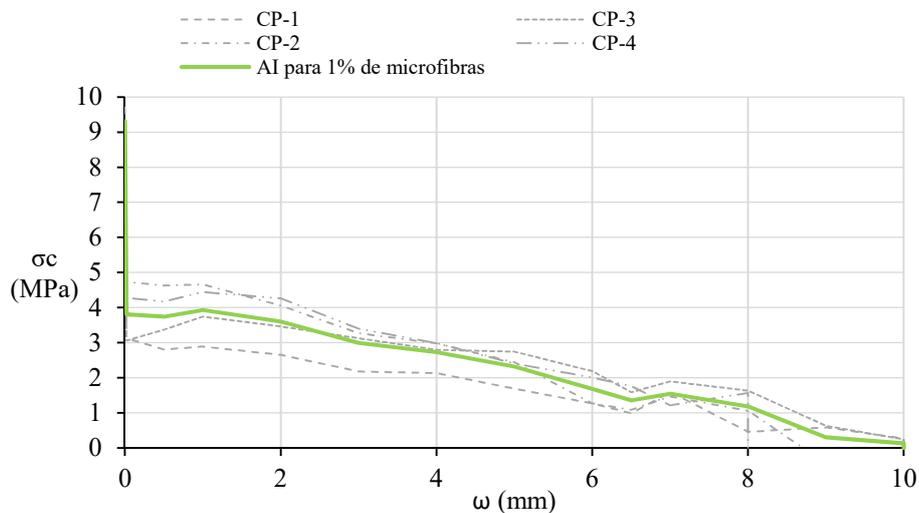


Figura 136: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 1% de microfibras.

Tabla 36: Energía de Fractura GF en kJ/m² en vigas con 1% de microfibras.

	Energía de Fractura (kJ/m ²)	
	Análisis Inverso AFGC	RILEM 50-FMC
CP-1	16,91	11,66
CP-2	23,71	18,75
CP-3	23,70	15,42
CP-4	23,32	19,22
Promedio=	21,91	16,26

Los resultados de la GF para vigas de UHPFRC con 1% de microfibras se mostraron más conservadores cuando calculados con las curvas experimentales, la diferencia fue de 35%.

En la Figura 137 se muestran las curvas (σ vs ϵ) para los cuatro especímenes de mini-viga, obtenidas por la transformación de la abertura de la muesca en deformación unitaria, según el procedimiento explicado en el Capítulo 6, ítem 6.1.

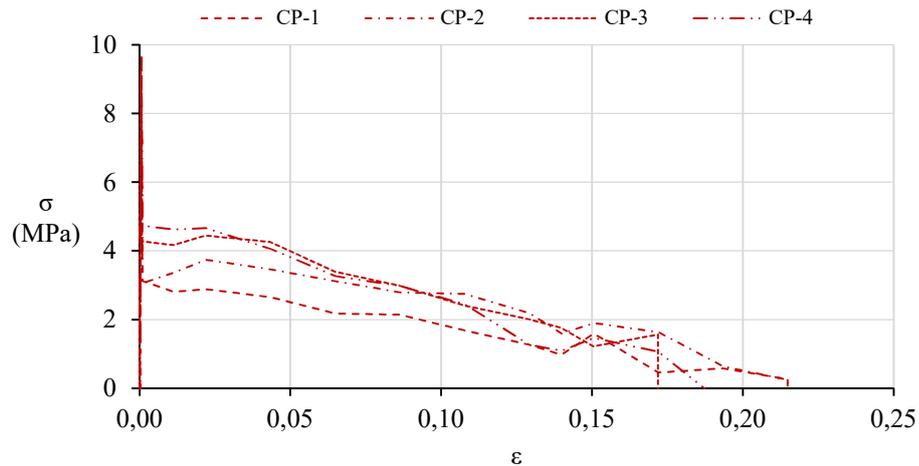


Figura 137: Curvas (σ vs ϵ) obtidas por AI para 1% de microfibras.

Cada uma de esas curvas fue usada como INPUT para el modelaje por el MEF usando ANSYS [133], incluyendo la curva promedio del comportamiento a compresión, con la fase post-pico, la cual es mostrada en la Figura 138. Cada curva individual de la Figura 137 junto a la curva de la Figura 138 se incluye en la entrada de datos (INPUT) para la simulación numérica usando ANSYS, con los elementos SOLID185 y el material CAST. Las propiedades mecánicas usadas en el análisis fueron el módulo de elasticidad del concreto (47707,96 MPa) y el módulo de Poisson (0,22).

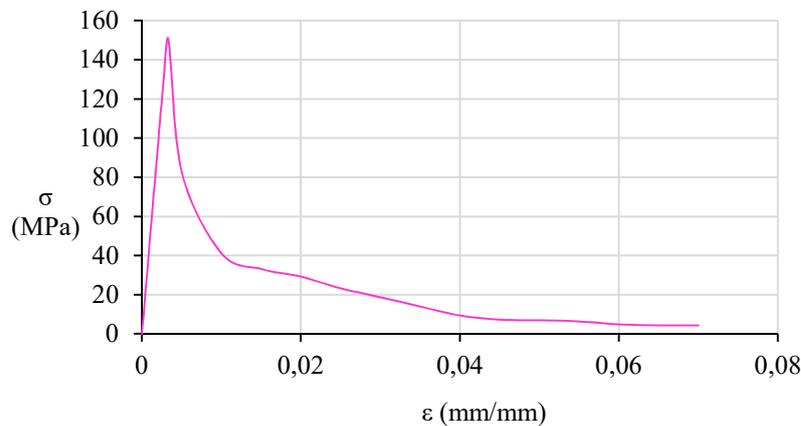


Figura 138: Comportamiento promedio en compresión. 1% de microfibras.

La salida de datos (OUTPUT) consiste en la curva analítica que relaciona (F vs δ) en el medio de la viga, la cual será comparada con la respuesta experimental. En las Figuras 139 a la 142 se muestra, de forma esquemática, los resultados del análisis computacional para cada espécimen. La curva (F vs δ) analítica resultante es comparada con la curva (F vs δ) experimental, presentando buenas aproximaciones entre ambas curvas, sin diferencias significativas entre las dos densidades de malla usadas en el análisis, según lo descrito en el ítem 6.3 (ii).

Las Tablas 37 a la 40 reflejan parte de los resultados obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones provenientes del equilibrio mecánico de la sección agrietada, explicado en el Capítulo 6, ítem 6.2.2, para cada una de las cuatro relaciones constitutivas definidas por AI. La altura relativa de la grieta (αh) calculada por AI que corresponde al último registro experimental de la abertura (ω), arrojó valores de 68,70 mm; 68,17 mm; 68,11 mm y 68,14 mm para las mini-vigas CP-1, CP-2, CP-3 y CP-4 respectivamente. En todos los casos la grieta casi alcanzó la altura de 70 mm disponible en el elemento. Ese comportamiento coincide con el registro fotográfico del tipo de falla mostrado durante el experimento.

Las curvas resultantes se presentan en dos escalas, primeramente, para captar el comportamiento completo y en segundo lugar para visualizar claramente los picos elástico e inelástico. En cada caso la curva azul representa la respuesta experimental, la roja contempla la utilización de l_c según la norma AFGC y la verde la utilización de l_c adaptada a nuestro caso particular, es una l_c modificada ajustada a la curva experimental.

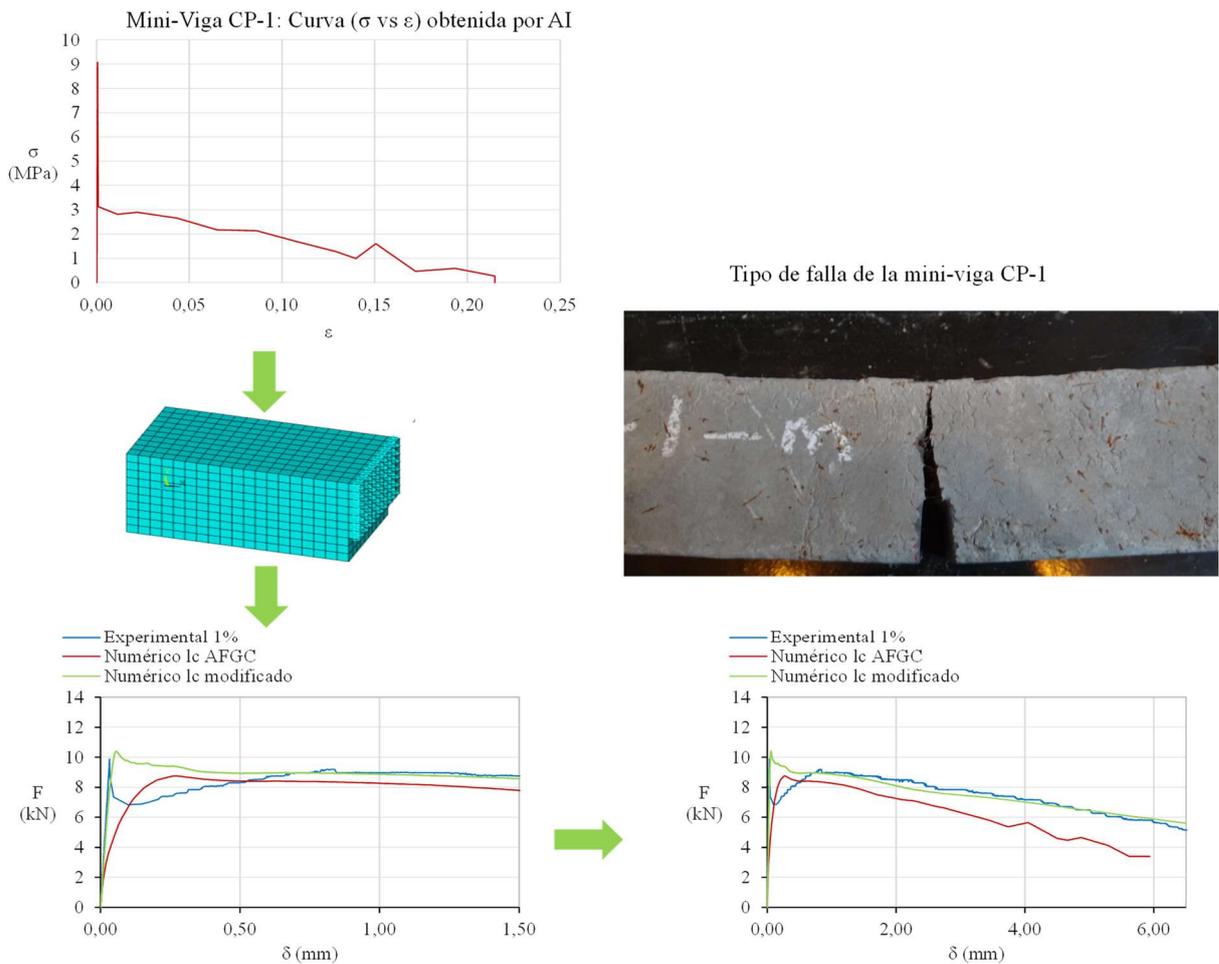
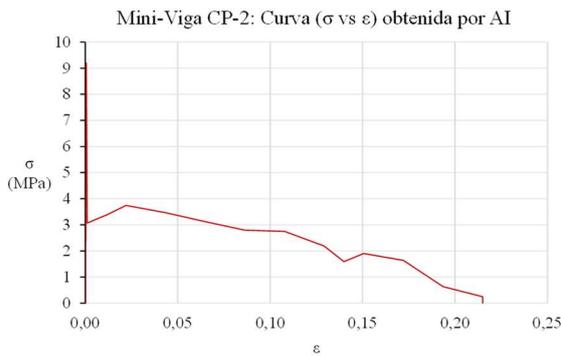


Figura 139: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 1% de microfibras.

Tabla 37: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 1% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,07	9876,73	35,00	0,00
0,02	3,13	7610,31	46,64	35,10
0,50	2,81	8313,59	63,38	62,35
1,00	2,89	8977,84	65,17	64,62
2,00	2,66	8576,79	66,57	66,28
3,00	2,18	7877,46	67,24	67,05
4,00	2,14	7598,36	67,64	67,49
5,00	1,69	6936,42	67,94	67,82
6,00	1,27	6265,90	68,17	68,07
6,50	0,99	5944,62	68,27	68,18
7,00	1,60	5810,68	68,26	68,26
8,00	0,46	4934,95	68,52	68,44
9,00	0,59	4471,35	68,64	68,57
10,00	0,27	3822,51	68,76	68,70



Tipo de falla de la mini-viga CP-2

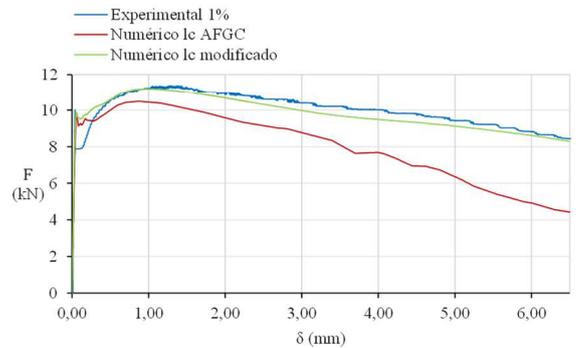
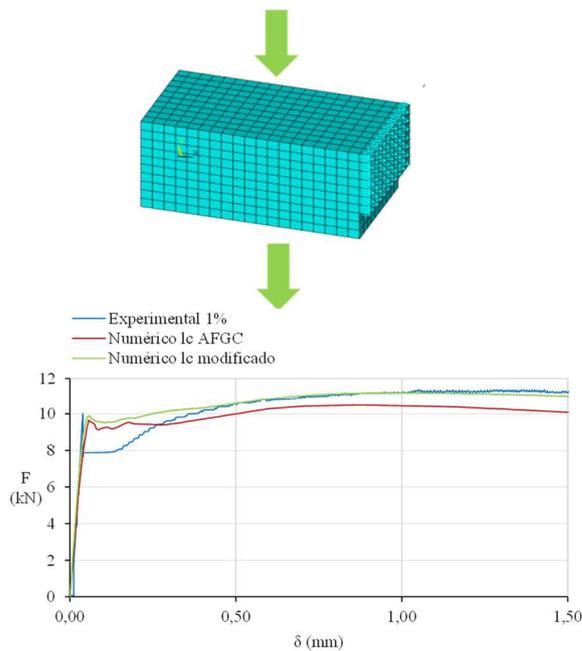
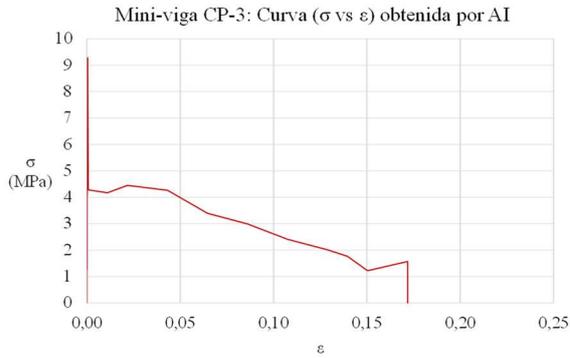


Figura 140: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 1% de microfibras.

Tabla 38: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 1% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,20	10015,35	35,00	0,00
0,02	3,07	7886,58	45,50	32,30
0,50	3,37	10609,76	63,02	61,98
1,00	3,74	11248,91	64,81	64,26
2,00	3,46	10971,38	66,22	65,94
3,00	3,12	10584,26	66,90	66,71
4,00	2,80	10057,07	67,34	67,19
5,00	2,75	9716,45	67,64	67,52
6,00	2,19	9032,65	67,88	67,79
6,50	1,59	8657,78	67,99	67,90
7,00	1,90	8352,21	68,08	68,00
8,00	1,64	7662,38	68,25	68,17



Tipo de falla de la mini-viga CP-3

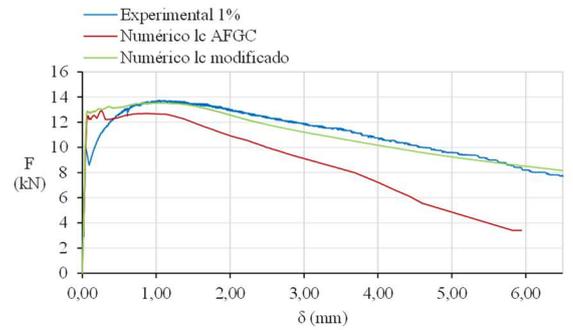
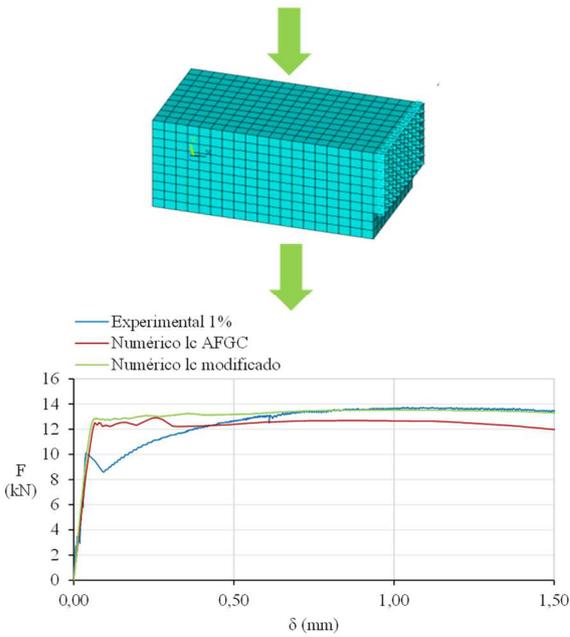


Figura 141: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 1% de microfibras.

Tabla 39: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 1% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,28	10104,24	35,00	0,00
0,02	4,28	10104,24	45,25	33,39
0,50	4,17	12547,62	62,48	61,50
1,00	4,45	13491,30	64,26	63,71
2,00	4,26	13405,99	65,83	65,55
3,00	3,40	12239,05	66,63	66,44
4,00	2,99	11441,49	67,12	66,98
5,00	2,41	10362,33	67,49	67,37
6,00	2,01	9406,09	67,77	67,67
6,50	1,76	8986,74	67,89	67,79
7,00	1,22	8389,08	68,00	67,92
8,00	1,57	7624,41	68,18	68,11

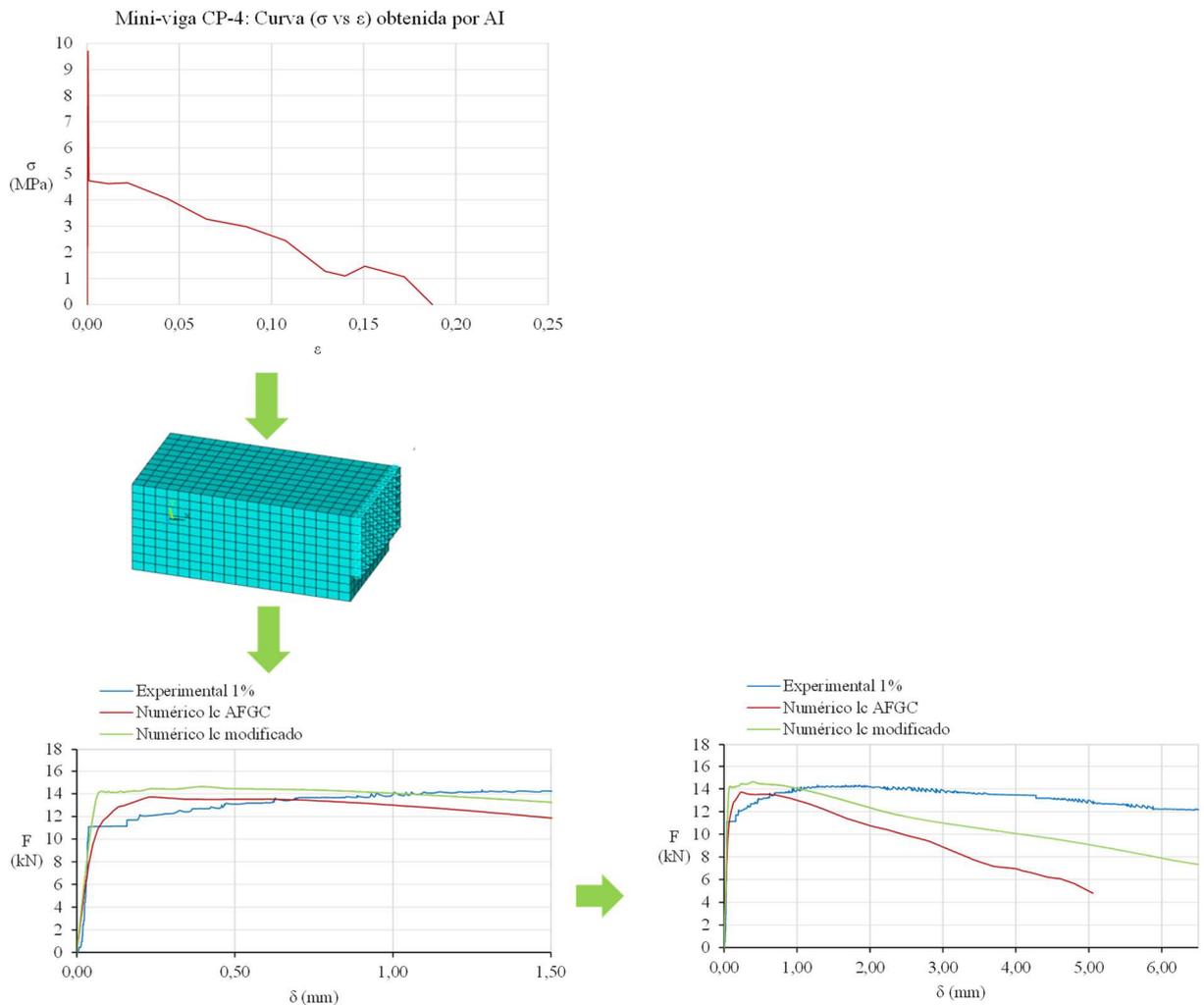


Figura 142: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-4. 1% de microfibras.

Tabla 40: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-4 con 1% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,70	10562,53	35,00	0,00
0,02	4,74	11097,34	44,76	32,59
0,50	4,63	13841,88	61,91	60,84
1,00	4,66	14334,32	64,05	63,48
2,00	4,06	13230,91	65,77	65,47
3,00	3,27	12072,23	66,60	66,40
4,00	2,99	11292,86	67,11	66,95
5,00	2,45	10268,80	67,48	67,35
6,00	1,28	8763,16	67,79	67,69
6,50	1,09	8291,95	67,91	67,82
7,00	1,47	7799,66	68,02	67,93
8,00	1,06	6829,10	68,22	68,14

8.1.2 Usando 2% de microfibras de acero

En la Figura 143 se muestran las curvas del esfuerzo cohesivo versus la abertura de la muesca (σ_c vs ω) obtenidas por AI para los seis especímenes de viga, incluyendo la curva promedio. Cada curva fue utilizada para calcular el valor de GF y comparar el resultado con el cálculo de GF utilizando la curva experimental (F vs δ) respectiva, como se explicó en el Capítulo 4 ítem 4.5 y Capítulo 5 ítem 5.6. Los resultados se muestran en la Tabla 41. Los resultados de la GF para vigas de UHPFRC con 2% de microfibras fueron bastante cercanos, con una diferencia promedio de 11%.

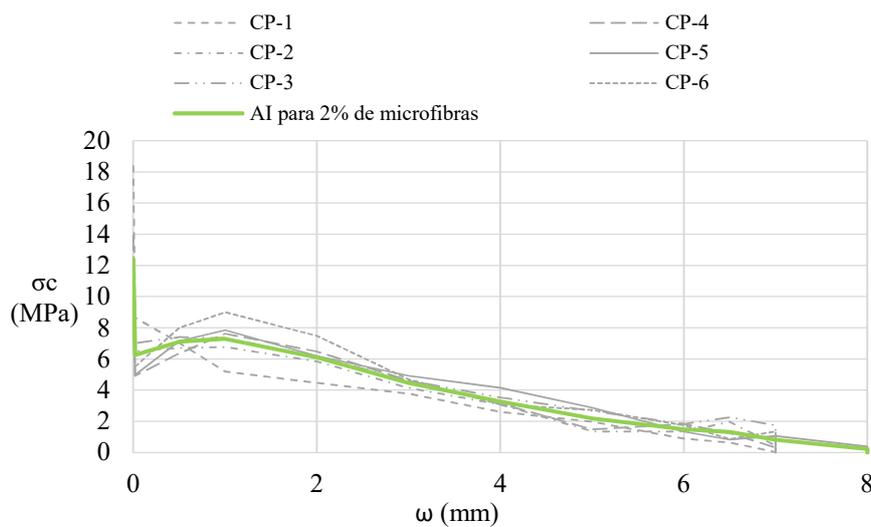
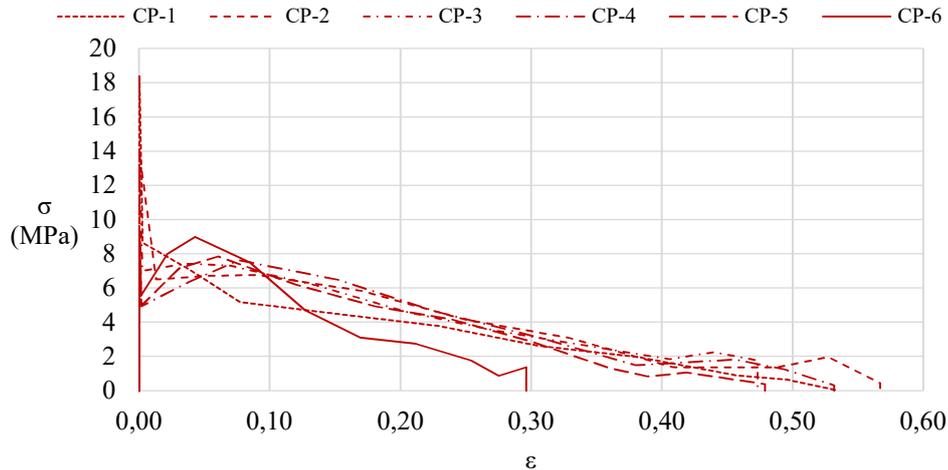
Figura 143: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 2% de microfibras.

Tabla 41: Energía de Fractura GF en kJ/m² en vigas con 2% de microfibras.

	Energía de Fractura (kJ/m ²)	
	Análisis Inverso AFGC	RILEM 50-FMC
CP-1	26,53	23,76
CP-2	29,29	19,17
CP-3	29,19	23,10
CP-4	18,87	21,76
CP-5	32,49	32,40
CP-6	32,48	57,96
Promedio=	26,67	24,04

En la Figura 144 se muestran las curvas (σ vs ϵ) para los seis especímenes de mini-viga, obtenidas por la transformación de la abertura de la muesca en deformación unitaria, según el procedimiento explicado en el Capítulo 6, ítem 6.1.

Figura 144: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 2% de microfibras.

Cada una de esas curvas, usada individualmente junto a la curva de comportamiento en compresión de la Figura 138, fueron incluidas en la entrada de datos o INPUT para el modelaje por el MEF usando ANSYS [133]. En las Figuras 145 a la 150 se muestra el resultado del análisis computacional para cada espécimen, en cada caso el INPUT está formado por las relaciones constitutivas y el OUTPUT por la curva analítica carga versus deflexión (F vs δ) que se compara con la experimental. No se presentaron diferencias significativas entre las dos densidades de malla usadas en el análisis, según lo descrito en el ítem 6.3 (ii).

Las Tablas 42 a la 47 reflejan parte de los resultados obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones provenientes del equilibrio mecánico de la sección agrietada, explicado en el Capítulo 6, ítem 6.2.2, para cada una de las seis relaciones constitutivas definidas por AI.

La altura relativa de la grieta (αh) calculada por AI que corresponde al último registro experimental de la abertura (ω), arrojó valores de 67,78 mm; 67,63 mm; 67,75 mm; 67,78 mm; 67,82 mm y 67,50 mm para las mini-vigas CP-1, CP-2, CP-3, CP-4, CP-5 y CP-6 respectivamente. En todos los casos la grieta no alcanzó la altura de 70 mm disponible en el elemento y el tipo de falla coincide con el registrado fotográficamente durante el experimento.

Las curvas resultantes se presentan en dos escalas, primeramente, para captar el comportamiento completo y en segundo lugar para visualizar claramente los picos elástico e inelástico. En cada caso la curva azul representa la respuesta experimental, la roja contempla la utilización de l_c según la norma AFGC y la verde la utilización de l_c adaptada a nuestro caso particular, es una l_c modificada ajustada a la curva experimental.

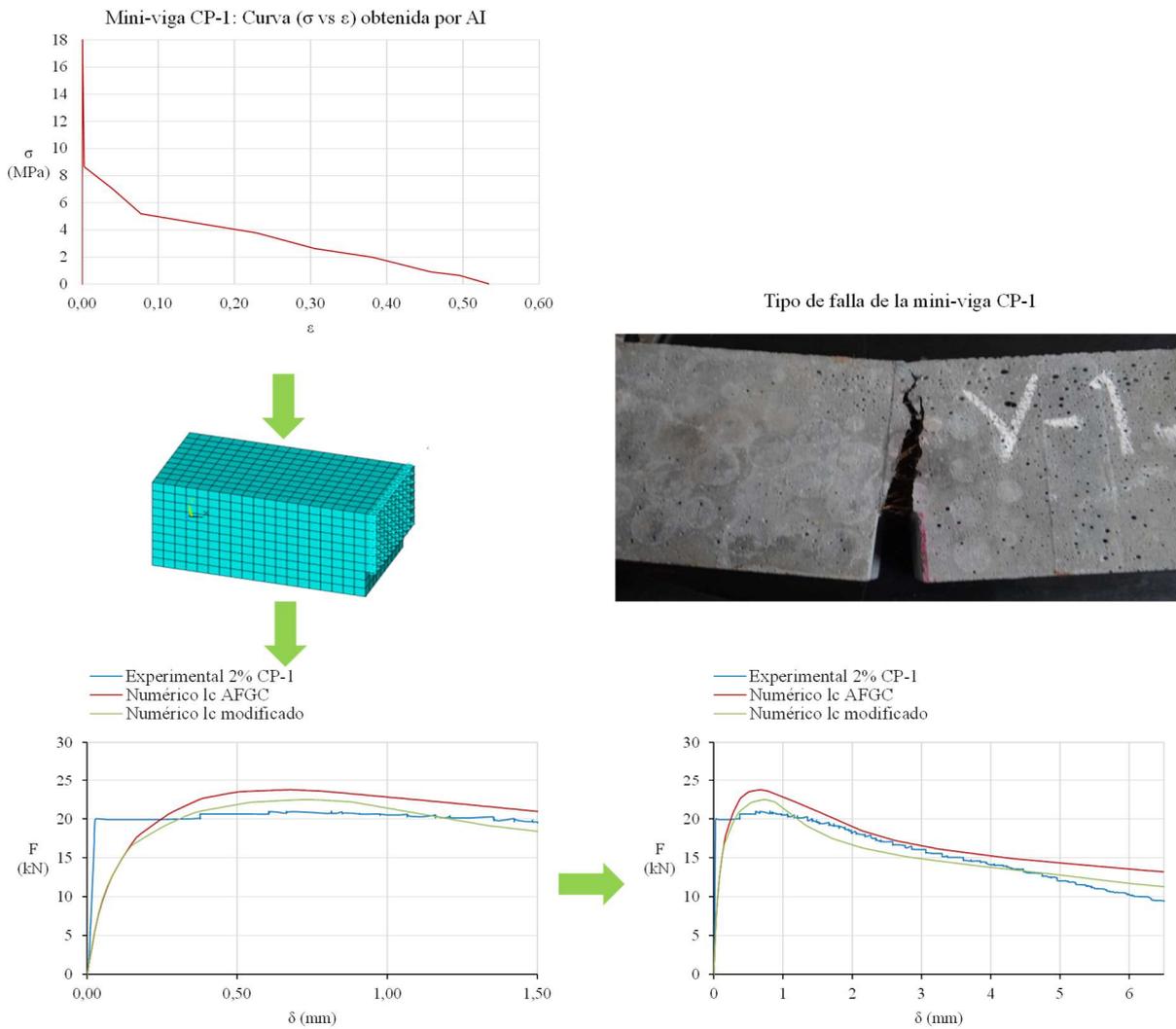
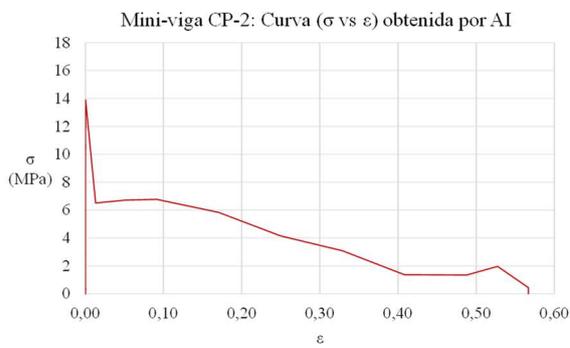


Figura 145: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 2% de microfibras.

Tabla 42: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	18,39	20026,71	35,00	0,00
0,02	8,65	20909,99	42,10	25,68
0,50	7,04	19573,50	60,16	58,25
1,00	5,19	17806,71	63,01	61,98
2,00	4,47	15538,00	65,21	64,66
3,00	3,77	14034,59	66,21	65,83
4,00	2,62	12090,83	66,85	66,56
5,00	1,97	10503,66	67,30	67,06
6,00	0,90	8580,42	67,66	67,46
6,50	0,65	7916,23	67,80	67,62
7,00	0,03	6958,09	67,95	67,78



Tipo de falla de la mini-viga CP-2

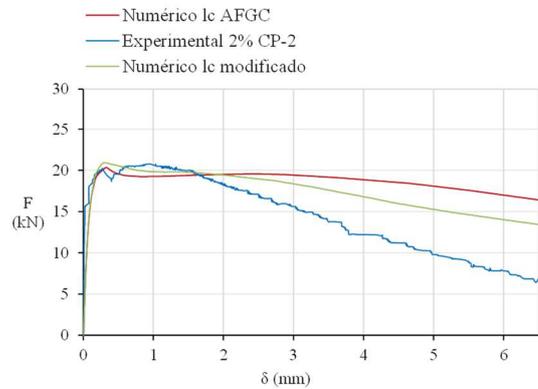
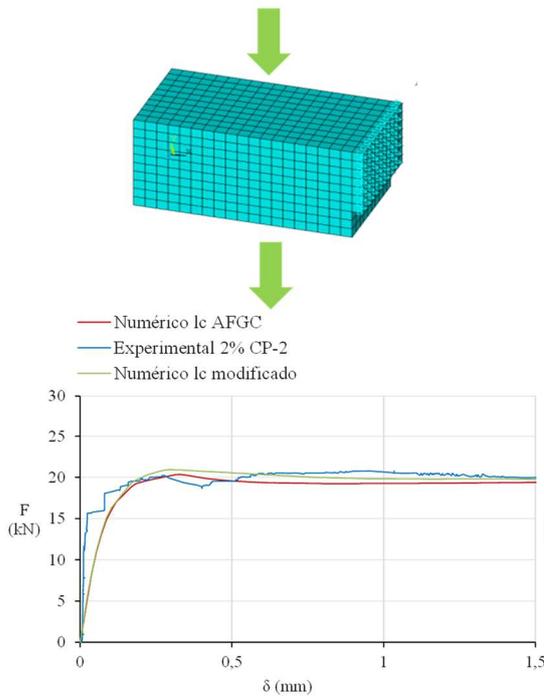


Figura 146: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 2% de microfibras.

Tabla 43: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	13,89	15129,55	35,00	0,00
0,02	6,51	16087,19	43,27	28,72
0,50	6,71	20080,61	60,54	59,05
1,00	6,77	20517,97	63,03	62,23
2,00	5,84	18953,31	64,94	64,53
3,00	4,16	16504,34	65,95	65,67
4,00	3,09	14409,65	66,61	66,39
5,00	1,37	11529,66	67,11	66,94
6,00	1,35	9779,56	67,47	67,32
6,50	1,97	9232,55	67,63	67,49
7,00	0,44	8272,11	67,76	67,63



Tipo de falla de la mini-viga CP-3

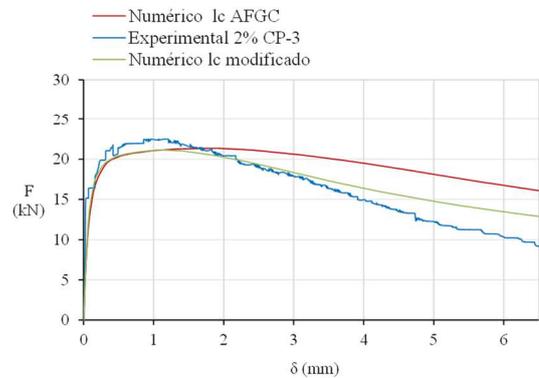
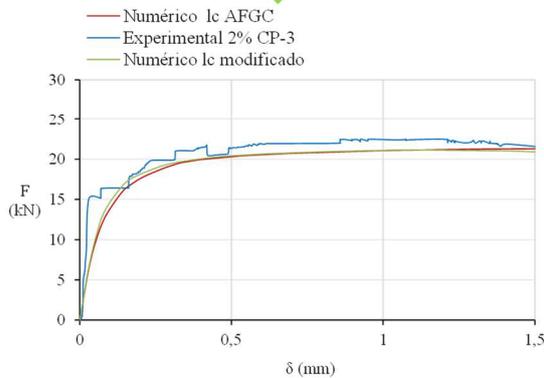
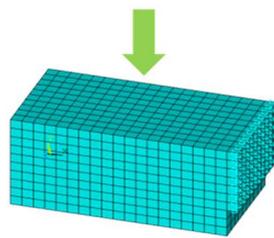


Figura 147: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 2% de microfibras.

Tabla 44: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	13,84	15072,03	35,00	0,00
0,02	7,01	16417,06	41,24	26,72
0,50	7,41	22221,00	59,60	58,15
1,00	7,34	22269,85	62,55	61,77
2,00	6,16	20172,28	64,87	64,45
3,00	4,61	17903,18	65,96	65,67
4,00	3,54	15784,97	66,64	66,42
5,00	2,68	13717,85	67,13	66,95
6,00	1,83	11745,18	67,46	67,32
6,50	2,26	11250,24	67,61	67,47
7,00	1,76	10512,32	67,75	67,62
7,00	1,01	9696,17	67,87	67,75

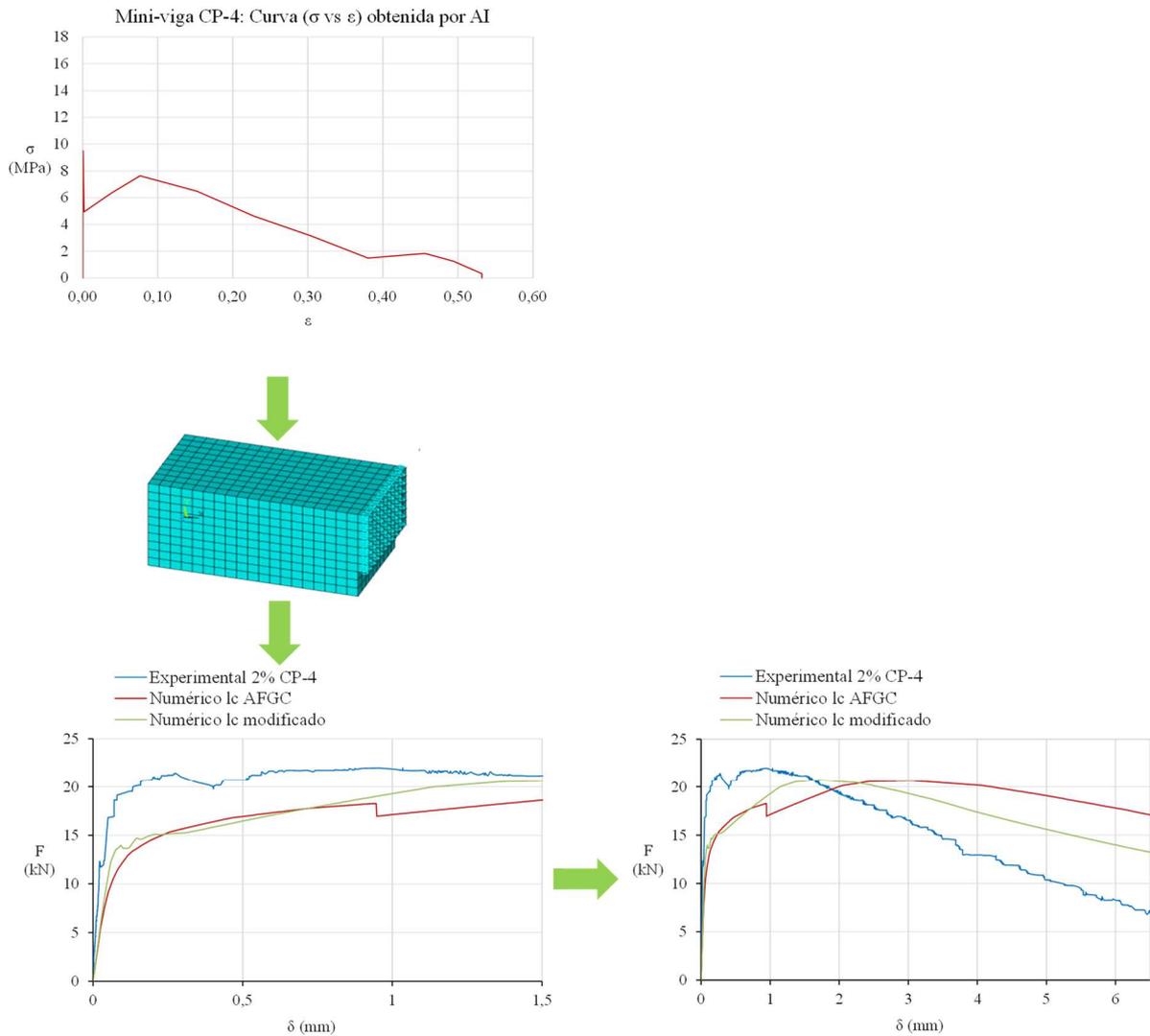


Figura 148: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-4. 2% de microfibras.

Tabla 45: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-4 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,50	10341,48	35,00	0,00
0,02	4,93	11451,65	39,89	27,83
0,50	6,35	20165,59	59,82	58,82
1,00	7,63	21857,09	62,90	62,36
2,00	6,48	20490,66	65,33	65,05
3,00	4,61	17975,41	66,41	66,22
4,00	3,15	15534,85	67,05	66,91
5,00	1,48	12474,44	67,51	67,39
6,00	1,83	10829,55	67,89	67,78

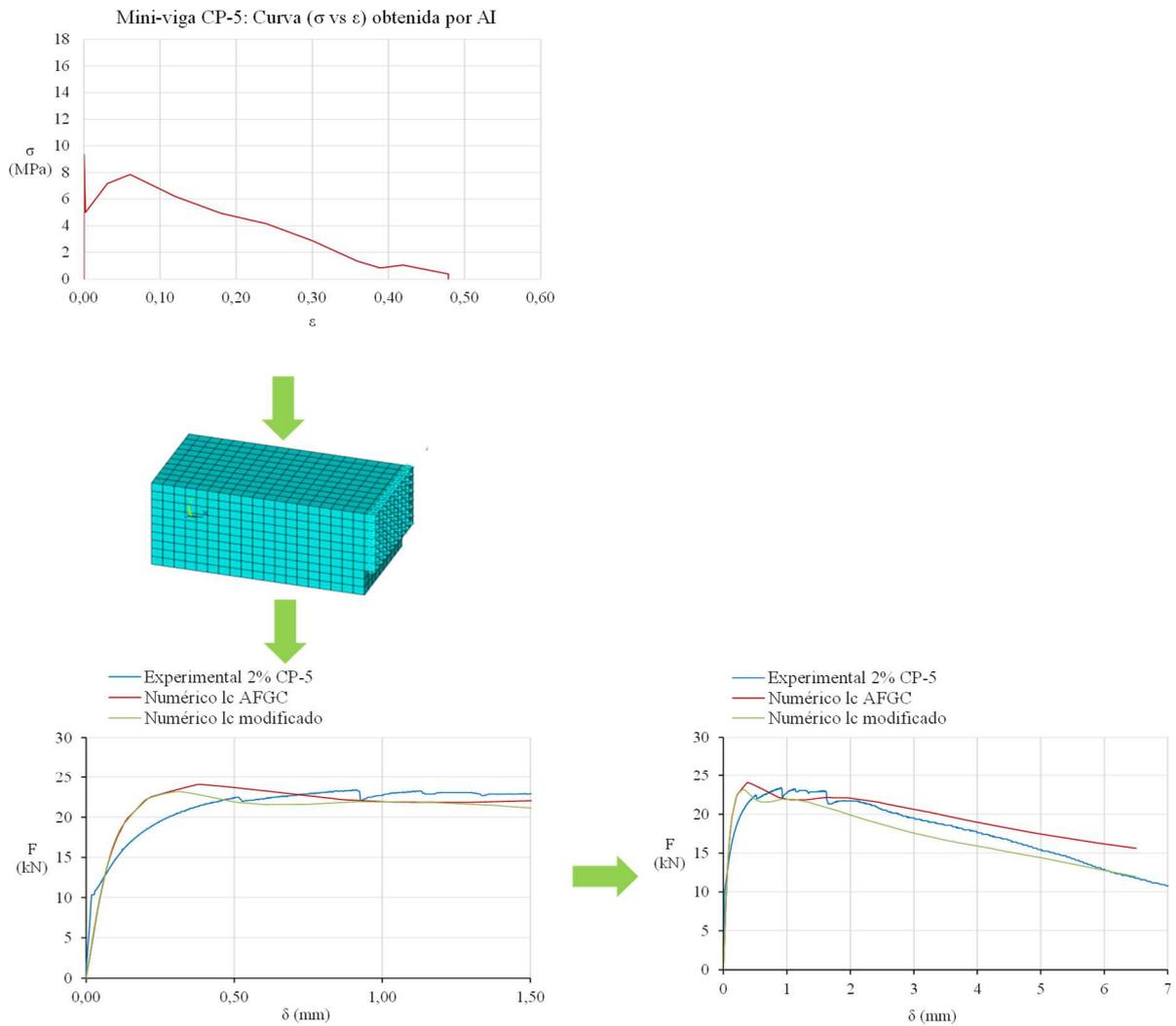


Figura 149: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-5. 2% de microfibras.

Tabla 46: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-5 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,33	10159,94	35,00	0,00
0,02	5,00	11496,85	40,77	28,76
0,50	7,16	23068,54	59,52	58,53
1,00	7,85	22893,19	62,38	61,85
2,00	6,19	20260,19	64,68	64,40
3,00	4,93	18576,52	65,75	65,56
4,00	4,15	16842,49	66,42	66,27
5,00	2,89	14663,71	66,91	66,79
6,00	1,34	12133,04	67,31	67,22
6,50	0,84	11181,76	67,48	67,39
7,00	1,05	10175,35	67,63	67,54
8,00	0,38	8219,71	67,90	67,82

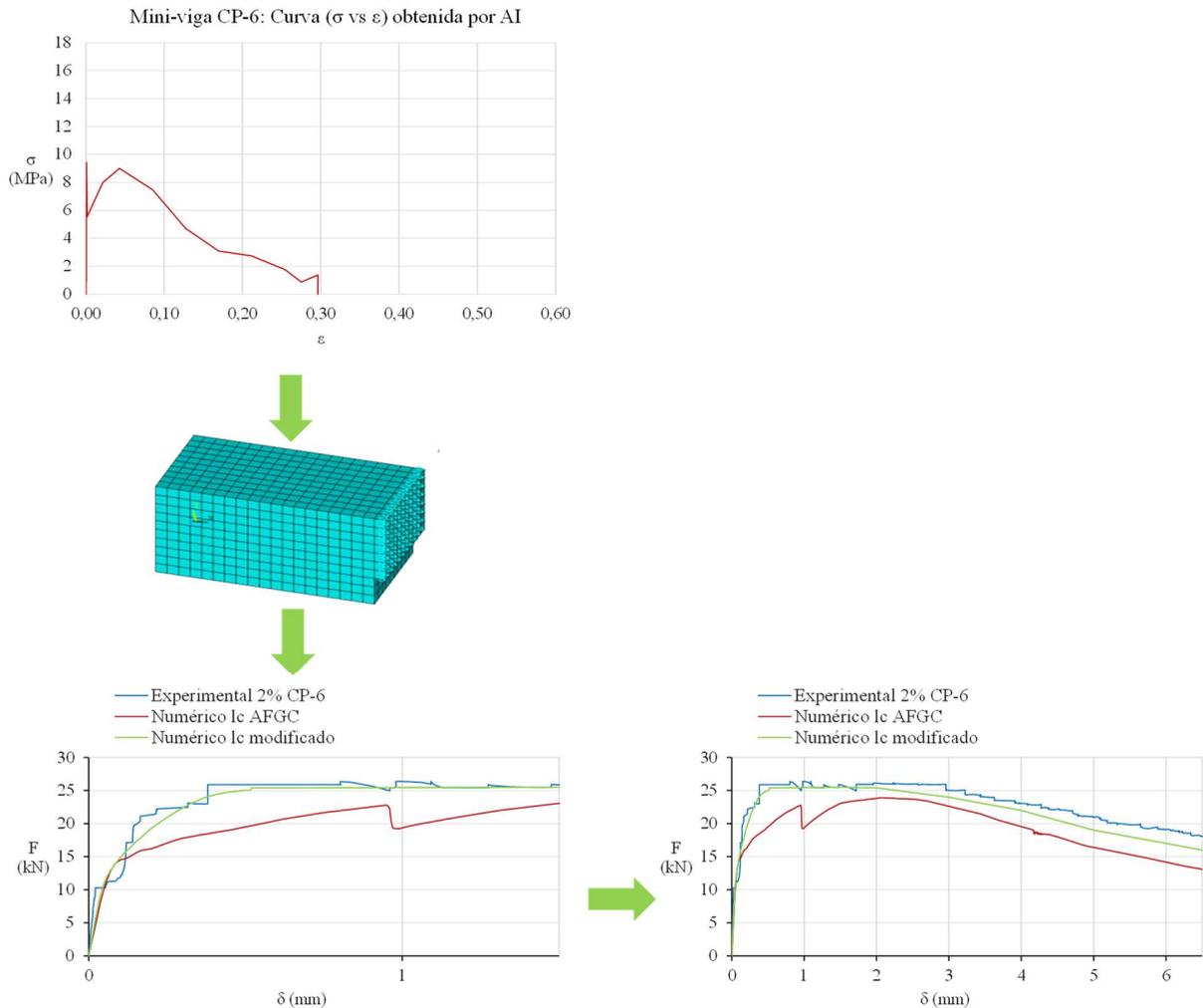


Figura 150: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-6. 2% de microfibras.

Tabla 47: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-6 con 2% de microfibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,43	10271,04	35,00	0,00
0,02	5,53	12500,39	39,48	27,49
0,50	8,00	25619,41	58,79	57,79
1,00	9,00	25914,82	61,96	61,43
2,00	7,49	23908,65	64,54	64,26
3,00	4,71	20129,43	65,75	65,56
4,00	3,09	16937,85	66,49	66,35
5,00	2,74	14575,80	67,03	66,91
6,00	1,76	12194,23	67,42	67,32
6,50	0,87	11162,57	67,60	67,50

8.1.3 Diagrama de deformaciones

En las Figuras 151 y 152 se grafican los diagramas de deformaciones de la sección transversal en el medio de la viga, es decir en el plano de fractura, para mostrar la evolución de las deformaciones con la aplicación de la carga. Los gráficos se realizan para tres puntos de la curva (F vs. δ) considerando el punto con el valor de la carga máxima elástica, carga máxima inelástica y carga última. Se consideran solamente las vigas con microfibras por ser las que mostraron los mejores resultados en los especímenes de viga CP-2 con 1% y CP-3 con 2% de fibras.

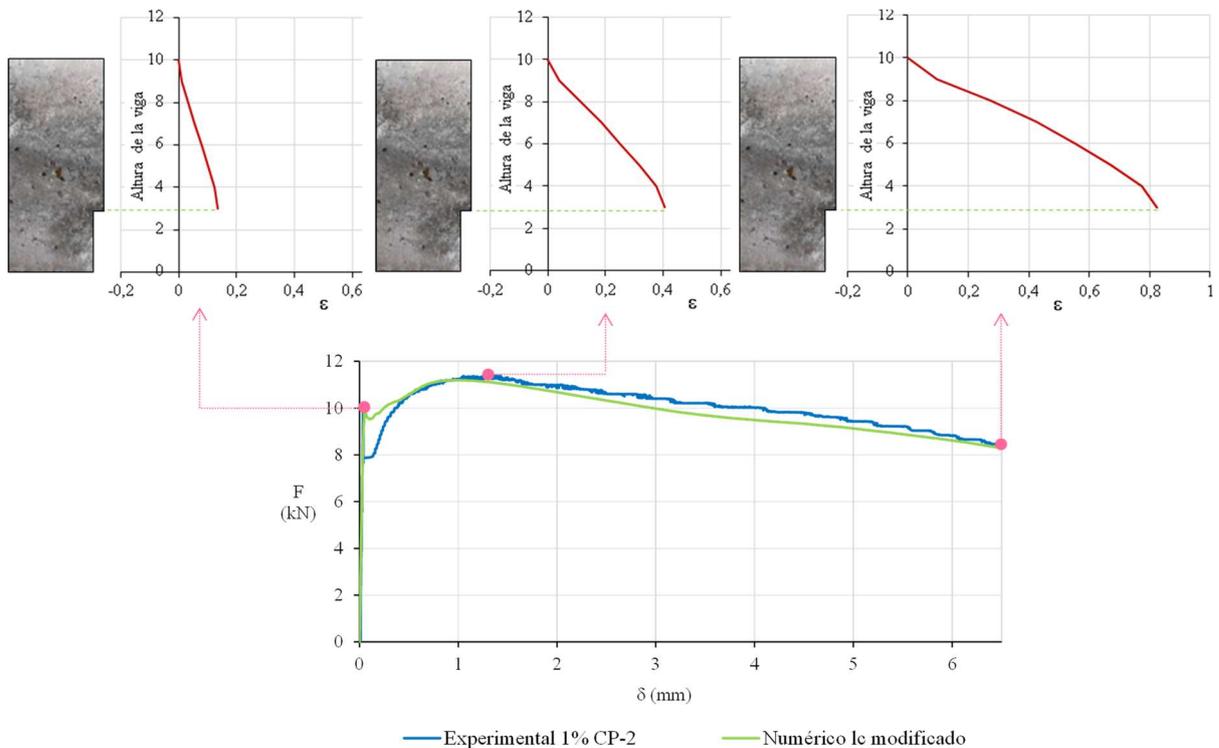


Figura 151: Diagrama de deformaciones. Mini-viga CP-2. 1% de microfibras.

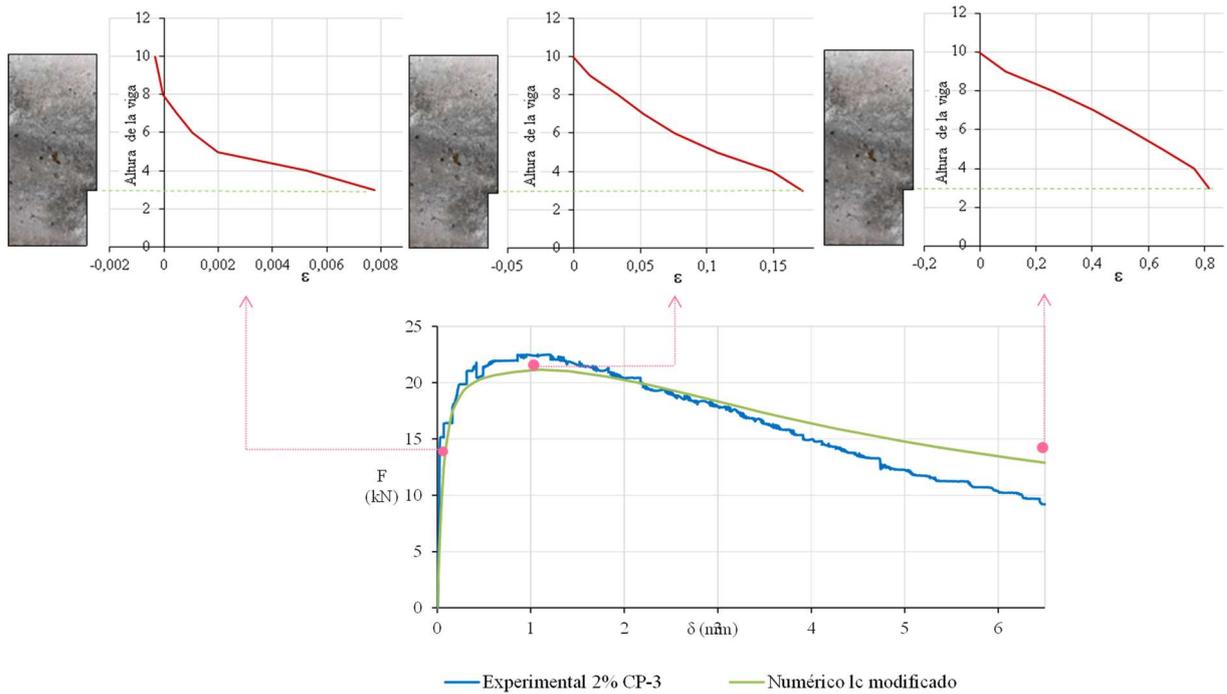


Figura 152: Diagrama de deformaciones. Mini-viga CP-3. 2% de microfibras.

8.1.4 Usando 1% de macrofibras de acero

En la Figura 153 se muestran las curvas del esfuerzo cohesivo versus la abertura de la muesca (σ_c vs ω) obtenidas por AI para los tres especímenes de viga, incluyendo la curva promedio.

Con cada curva se calculó el valor de GF para comparar los resultados con los obtenidos utilizando la curva experimental (F vs δ) respectiva, como se explicó anteriormente en los Capítulos 4 y 5.

Los resultados de GF se muestran en la Tabla 48, las vigas conteniendo 1% de macrofibras se mostraron más conservadores cuando calculadas con las curvas analíticas obtenidas por AI, con una diferencia promedio de 33%.

Tabla 48: Energía de Fractura GF en kJ/m² en vigas con 1% de macrofibras.

	Energía de Fractura (kJ/m ²)	
	Análisis Inverso AFGC	RILEM 50-FMC
CP-1	12,25	17,32
CP-2	8,57	9,72
CP-3	7,09	10,01
Promedio=	9,30	12,35

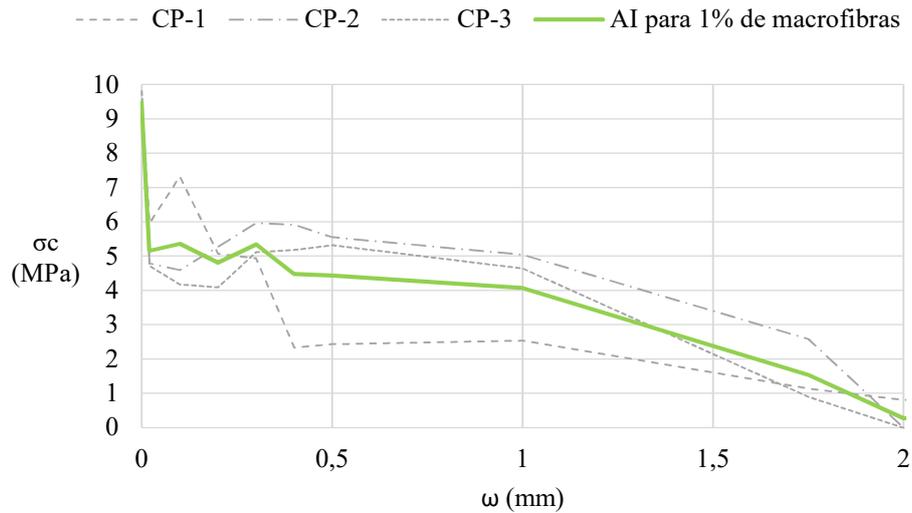


Figura 153: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.

En la Figura 154 se muestran las curvas (σ vs ϵ) para los tres especímenes de mini-viga, obtenidas transformando la abertura de la muesca en deformación unitaria, según el procedimiento explicado en el Capítulo 6, ítem 6.1.

Cada una de esas curvas fue usada como INPUT para el modelaje por el MEF usando ANSYS [133], incluyendo la curva promedio de comportamiento a compresión definida anteriormente en el Capítulo 7, ítem 7.1.4.2 y en la Figura 107.

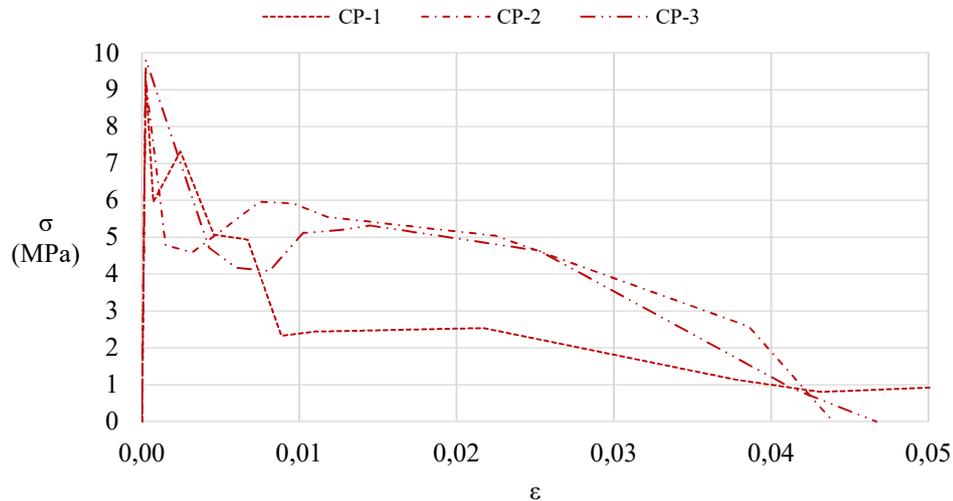


Figura 154: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.

En las Figuras 155 a la 157 se muestra el resultado del análisis computacional para cada espécimen, en cada caso el INPUT está formado por las relaciones constitutivas y el OUTPUT por la curva analítica carga versus deflexión (F vs δ) que se compara con la experimental.

Las Tablas 49 a la 51 reflejan parte de los resultados obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones provenientes del equilibrio mecánico de la sección agrietada, explicado en el Capítulo 6, ítem 6.2.2, para cada una de las tres relaciones constitutivas definidas por AI.

Las curvas resultantes se presentan en dos escalas, primeramente, para captar el comportamiento completo y en segundo lugar para visualizar claramente los picos elástico e inelástico. Las curvas con l_c modificada no se grafican para las macrofibras.

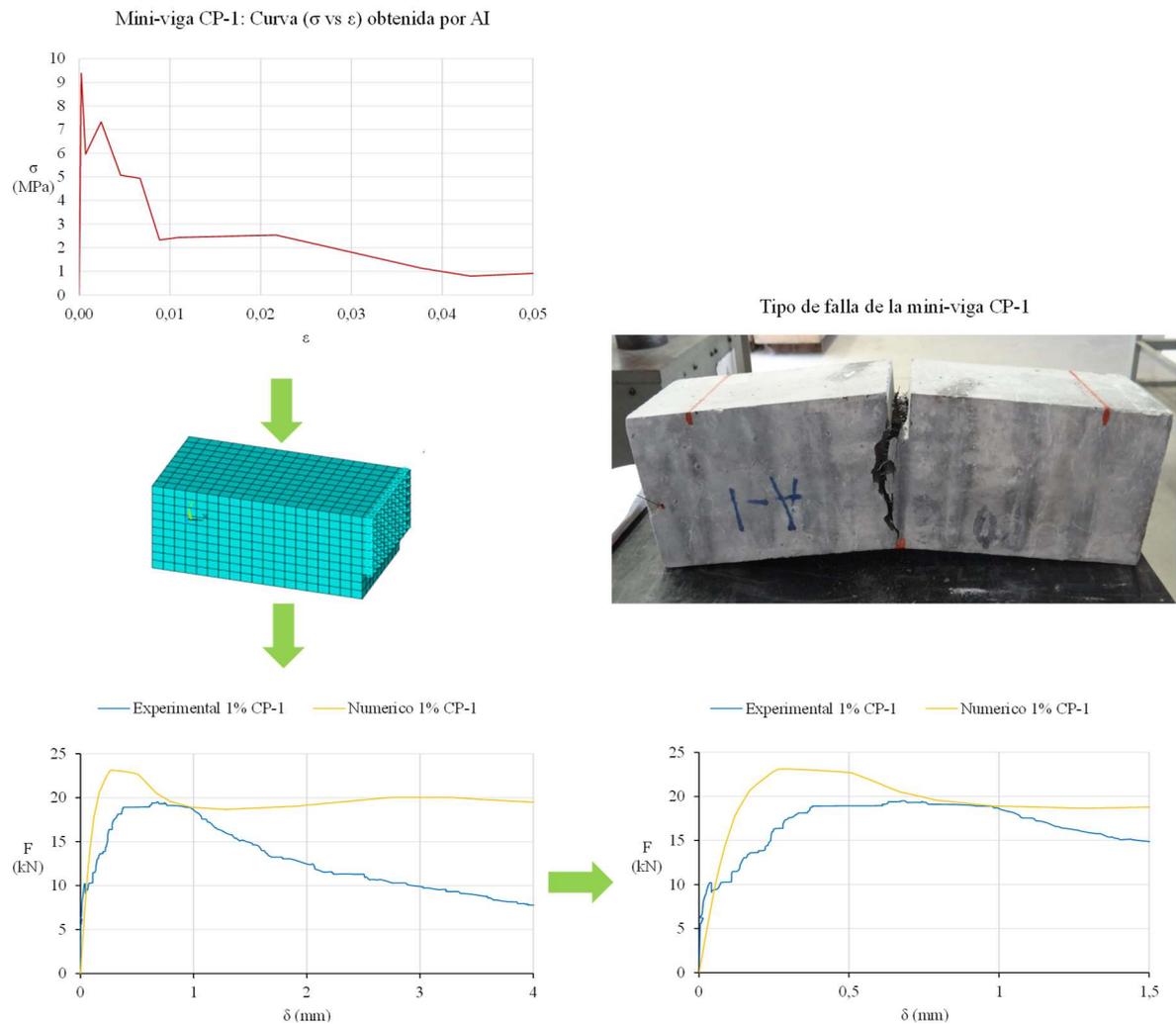
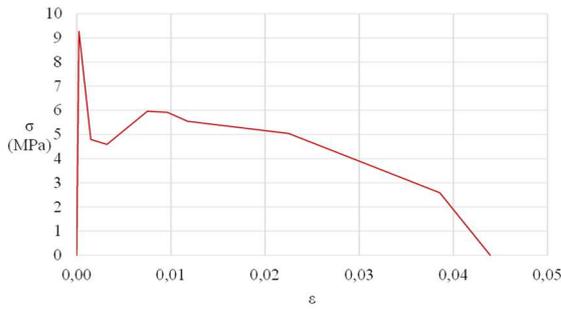


Figura 155: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 1% de macrofibras.

Tabla 49: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 1% de macrofibra.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,38	10213,87	35,00	0,00
0,02	5,96	13249,15	43,60	31,55
0,10	7,32	17569,89	51,96	47,72
0,20	5,07	19294,95	56,82	54,50
0,30	4,94	16210,80	58,95	57,32
0,40	2,33	13241,78	60,76	59,50
0,50	2,44	11981,89	61,90	60,87
1,00	2,54	9128,12	64,71	64,15
1,75	1,14	6149,23	66,42	66,09
2,00	0,80	5760,18	66,70	66,40
3,00	1,17	4647,80	67,53	67,33
4,00	1,23	4237,57	67,97	67,82
5,00	0,71	3640,73	68,28	68,16
6,00	1,07	3641,54	68,47	68,37
7,00	1,24	3642,85	68,61	68,52
8,00	1,15	3646,39	68,71	68,64
9,00	0,00	112,08	69,06	68,99

Mini-viga CP-2: Curva (σ vs ϵ) obtenida por AI



Tipo de falla de la mini-viga CP-2

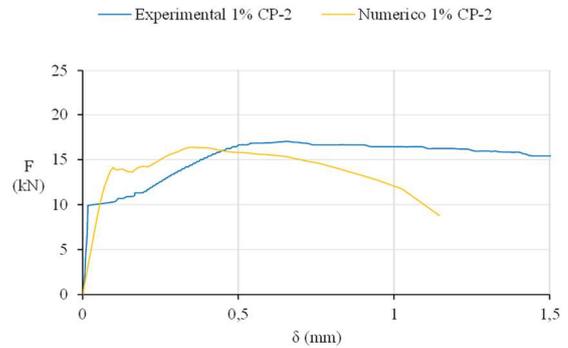
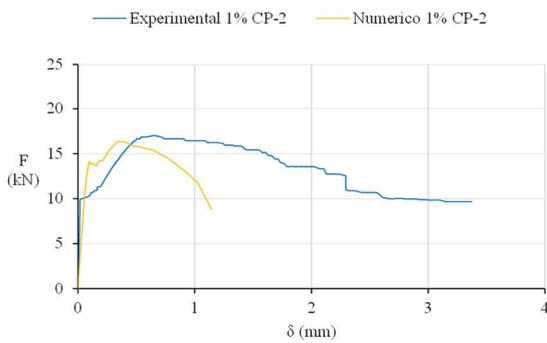
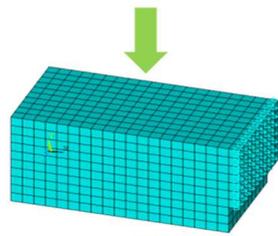
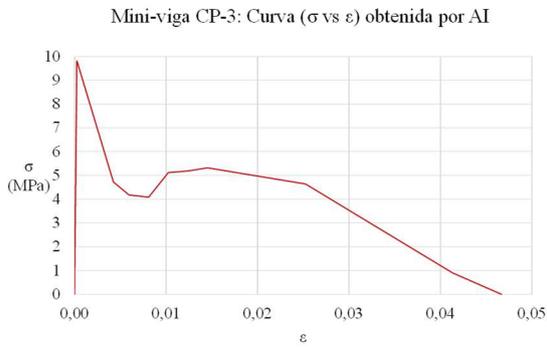


Figura 156: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 1% de macrofibras.

Tabla 50: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 1% de macrofibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,27	10095,65	35,00	0,00
0,02	4,79	16103,34	43,60	32,81
0,10	4,59	16931,49	51,96	50,10
0,20	5,27	15957,97	56,82	55,45
0,30	5,96	13565,14	58,95	57,84
0,40	5,92	12733,99	60,76	59,32
0,50	5,55	10922,64	61,90	60,37
1,00	5,04	7836,77	64,71	63,18
1,75	2,58	6565,00	66,42	65,19
2,00	0,00	6834,77	66,70	65,66



Tipo de falla de la mini-viga CP-3

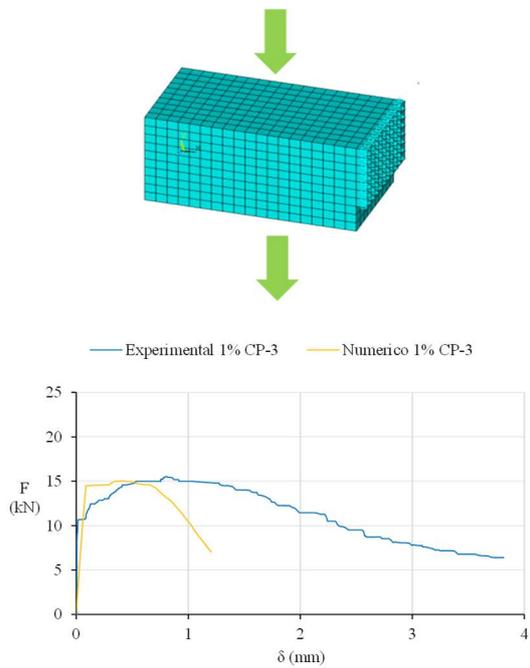


Figura 157: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 1% de macrofibras.

Tabla 51: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 1% de macrofibras.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	9,81	10682,70	35,00	0,00
0,02	4,72	11082,72	43,60	32,54
0,10	4,18	12021,80	51,96	50,25
0,20	4,09	12250,59	56,82	55,96
0,30	5,11	13628,19	58,95	58,32
0,40	5,18	14167,09	60,76	59,79
0,50	5,32	14793,21	61,90	60,75
1,00	4,64	14518,63	64,71	63,42
1,75	0,90	7604,04	66,42	65,60
2,00	0,00	6405,97	66,70	66,04

8.1.5 Usando 2% de macrofibras de acero

En la Figura 158 se muestran las curvas del esfuerzo cohesivo versus la abertura de la muesca (σ_c vs ω) obtenidas por AI para los tres especímenes de viga, incluyendo la curva promedio.

Cada curva fue utilizada para calcular el valor de GF y comparar el resultado con el cálculo de GF utilizando la curva experimental (F vs δ) respectiva, como se explicó en el Capítulo 4 ítem 4.5 y Capítulo 5 ítem 5.6.

Los resultados se muestran en la Tabla 52 Los resultados de la GF para vigas de UHPFRC con 2% de macrofibras fueron bastante cercanos, con una diferencia promedio de 5%.

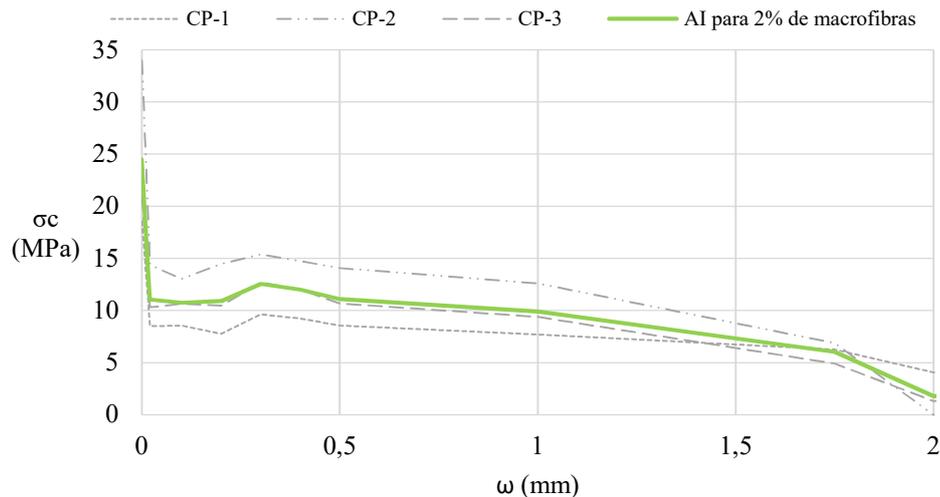
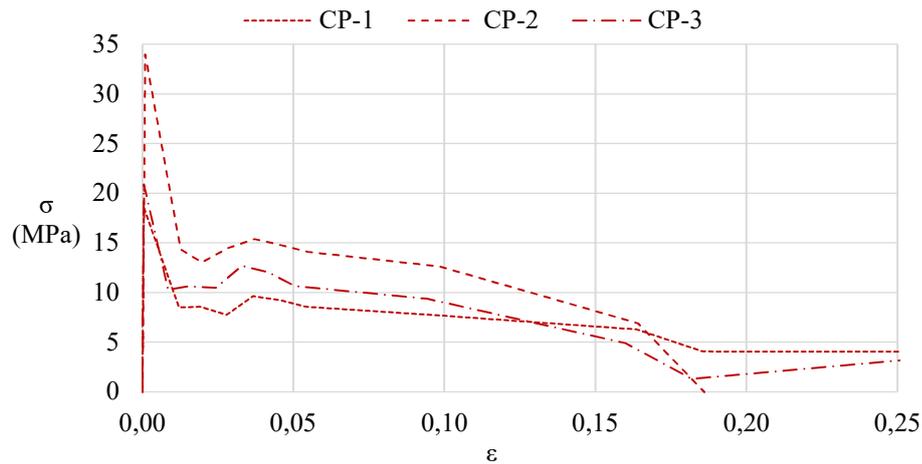
Figura 158: Curvas (σ_c vs ω) obtenidas por AI para 2% de macrofibras.

Tabla 52: Energía de Fractura GF en kJ/m² en vigas con 2% de microfibras.

	Energía de Fractura (kJ/m ²)	
	Análisis Inverso AFGC	RILEM 50-FMC
CP-1	26,53	22,42
CP-2	22,26	21,29
CP-3	26,57	27,95
Promedio=	25,12	23,89

En la Figura 159 se muestran las curvas (σ vs ϵ) para los tres especímenes de mini-viga, obtenidas por la transformación de la abertura de la muesca en deformación unitaria, según el procedimiento explicado en el Capítulo 6, ítem 6.1.

Cada una de esas curvas fue usada como INPUT para el modelaje por el MEF usando ANSYS [133], incluyendo la curva promedio de comportamiento a compresión definida anteriormente en el Capítulo 7, ítem 7.1.4.2 y en la Figura 107.

Figura 159: Curvas (σ vs ϵ) obtenidas por AI para 1% de macrofibras.

En las Figuras 160 a la 162 se muestra el resultado del análisis computacional para cada espécimen, en cada caso el INPUT está formado por las relaciones constitutivas y el OUTPUT por la curva analítica carga versus deflexión (F vs δ) que se compara con la experimental.

Las Tablas 53 a la 55 reflejan parte de los resultados obtenidos al resolver el sistema de ecuaciones provenientes del equilibrio mecánico de la sección agrietada, explicado en el Capítulo 6, ítem 6.2.2, para cada una de las tres relaciones constitutivas definidas por AI.

Las curvas resultantes se presentan en dos escalas, primeramente, para captar el comportamiento completo y en segundo lugar para visualizar claramente los picos elástico e inelástico.

Tabla 53: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-1 con 2% de macrofibra.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	18,54	20186,06	35,00	0,00
0,02	8,50	20766,72	41,45	25,69
0,10	8,57	23519,07	49,57	43,66
0,20	7,79	22858,24	53,84	50,97
0,30	9,62	25206,07	55,74	54,06
0,40	9,25	25652,27	57,24	56,11
0,50	8,56	25843,39	58,35	57,54
1,00	7,72	24398,92	61,54	61,29
1,75	6,28	21742,05	63,93	63,61
2,00	4,07	20802,80	64,39	64,10
3,00	4,03	16765,14	65,79	65,49
4,00	2,69	13626,59	66,60	66,32
5,00	2,68	12221,94	67,08	66,85
6,00	0,00	8044,00	67,54	67,36

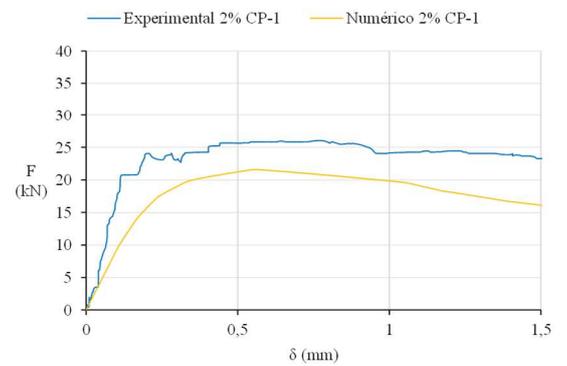
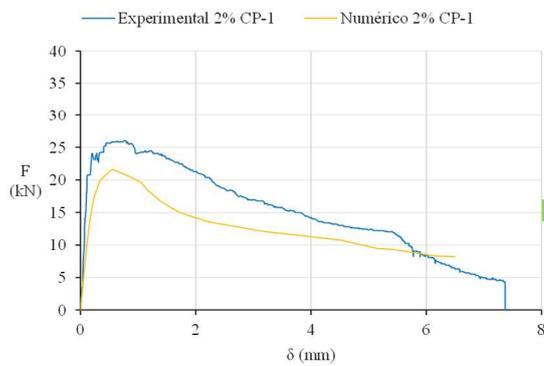
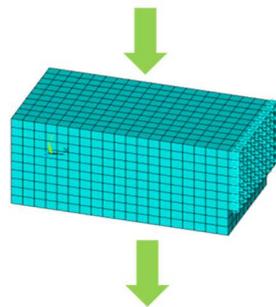


Figura 160: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-1. 2% de macrofibras.

Tabla 54: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-2 con 2% de macrofibra.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha.n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	33,98	37004,25	35,00	0,00
0,02	14,37	36792,54	40,39	20,05
0,10	13,04	41512,06	48,23	37,70
0,20	14,48	39303,17	52,23	45,47
0,30	15,41	32788,67	54,47	49,48
0,40	14,77	26469,35	56,01	52,05
0,50	14,09	22048,57	57,17	53,88
1,00	12,62	13852,66	60,53	58,73
1,75	6,89	5418,33	63,12	62,03
2,00	0,00	26469,35	63,69	62,73



Tipo de falla de la mini-viga CP-2

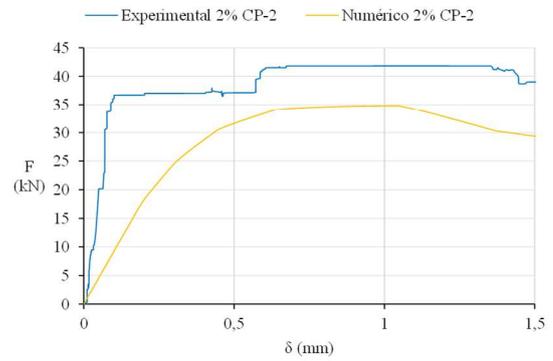
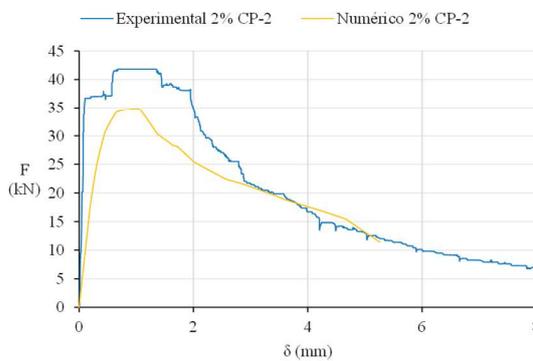
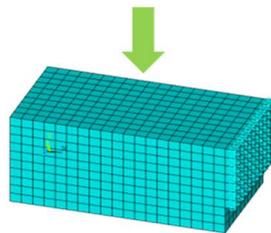


Figura 161: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-2. 2% de macrofibras.

Tabla 55: Resultados del Análisis Inverso Viga CP-3 con 2% de macrofibra.

ω (mm)	σ (MPa)	F(N)	$\alpha_n.h$ (mm)	$\alpha.h$ (mm)
0,00	20,89	22750,89	35,00	0,00
0,02	10,31	24462,73	41,45	24,20
0,10	10,64	28296,13	49,57	41,85
0,20	10,46	28945,95	53,84	49,21
0,30	12,69	31974,63	55,74	52,75
0,40	12,03	32778,87	57,24	54,64
0,50	10,67	32779,65	58,35	56,21
1,00	9,38	30018,19	61,54	60,39
1,75	4,92	21648,27	63,93	63,24
2,00	1,31	20504,70	64,39	63,78
3,00	3,69	15758,10	65,79	65,36
4,00	2,67	12253,21	66,60	66,28
5,00	2,67	10251,78	67,08	66,85
6,00	0,00	7747,50	67,54	67,32

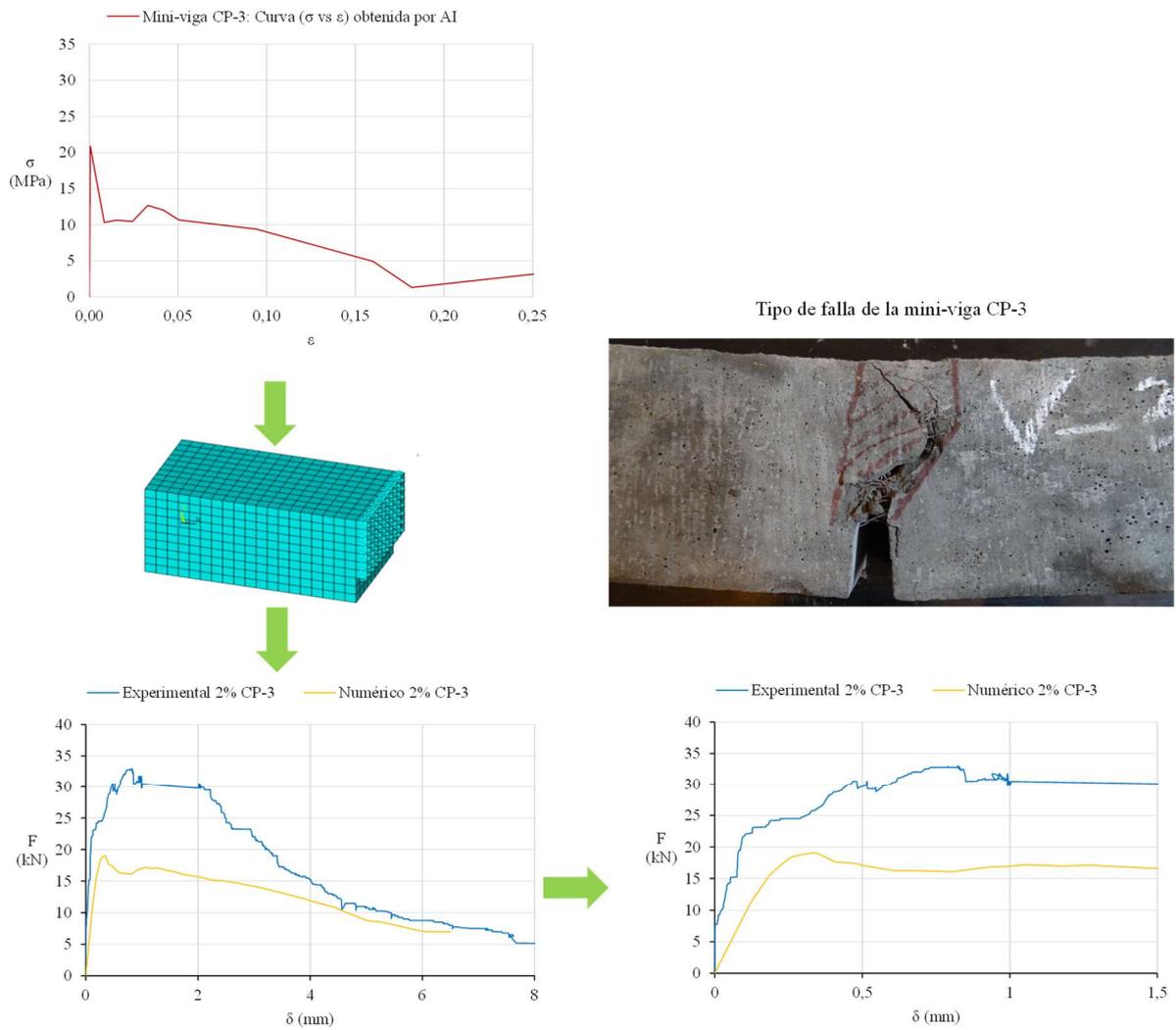


Figura 162: Validación del AI por el MEF. Mini-viga CP-3. 2% de macrofibras.

8.2 VALIDACIÓN DE LAS RELACIONES CONSTITUTIVAS EN TRACCION

En el ítem anterior fueron establecidas las relaciones constitutivas (σ vs ϵ) para el UHPFRC sometido a esfuerzos de tracción en la flexión. La caracterización fue realizada usando la data experimental de mini-vigas ensayadas a flexión en tres puntos y aplicando la metodología de análisis inverso especificada en la AFGC [77]. Las mini-vigas de UHPFRC fabricadas con 2% de microfibras de acero proporcionaron los mejores resultados y describieron expresamente el comportamiento esperado de endurecimiento por deformación o *strain hardening* que caracteriza el material. Esas mini-vigas proporcionaron seis curvas de comportamiento mostradas anteriormente en la Figura 144 del ítem 8.1.2, las cuales serán usadas para presente la validación.

Es racional suponer que las relaciones constitutivas obtenidas para el UHPFRC pueden ser aplicadas en cualquier elemento de viga fabricado con el mismo diseño de mezcla y el mismo porcentaje de fibras. En base a esa suposición, se fabrica la meso-viga I y es ensayada a flexión en cuatro puntos, según lo explicado en el Capítulo 5 ítem 5.5.2 y Capítulo 7 ítem 7.4. La viga I es modelada por el MEF usando ANSYS [133], siguiendo el procedimiento del Capítulo 6. El modelaje computacional fue realizado seis veces, esto es, fue realizado para cada una de las curvas de comportamiento obtenidas con las mini-vigas. Los resultados reflejan la respuesta analítica (F vs δ) que es comparada con la respuesta experimental obtenida al testar la viga I, siguiendo el esquema de trabajo definido anteriormente en la Figura 59 del Capítulo 6.

Con respecto a las mini-vigas fabricadas con 2% de macrofibras, los resultados fueron menos satisfactorios, posiblemente originados por una orientación y distribución no conveniente de las fibras dentro del encofrado de la forma en I. Las macrofibras poseen una longitud de 35 mm y el encofrado de la viga I posee un espesor de alma y ala de 50 mm, aspecto que influyó en la adecuada colocación de la fibra dentro de la matriz durante el proceso de vaciado. Además, no es posible ensayar vigas con una mayor geometría debido a limitaciones de equipos en el laboratorio. Por tal motivo, la validación usando macrofibras no fue realizada.

Los resultados usando microfibras se visualizan en las Figuras 163 a 168, mostrando como INPUT la curva de comportamiento y como OUTPUT la respuesta numérica (F vs δ) obtenida. Esa curva resultante es comparada con la curva experimental, ambos comportamientos se grafican en la escala recomendada por la AFGC [77], explicado en el Capítulo 5 ítem 5.5, para visualizar los picos elásticos e inelásticos del comportamiento. En la mayoría de los casos se observa que las curvas, analítica y experimental, presentan aproximaciones hasta el valor pico del rango inelástico, es decir en los estados OA y AB del comportamiento establecido según Thanh Le [54].

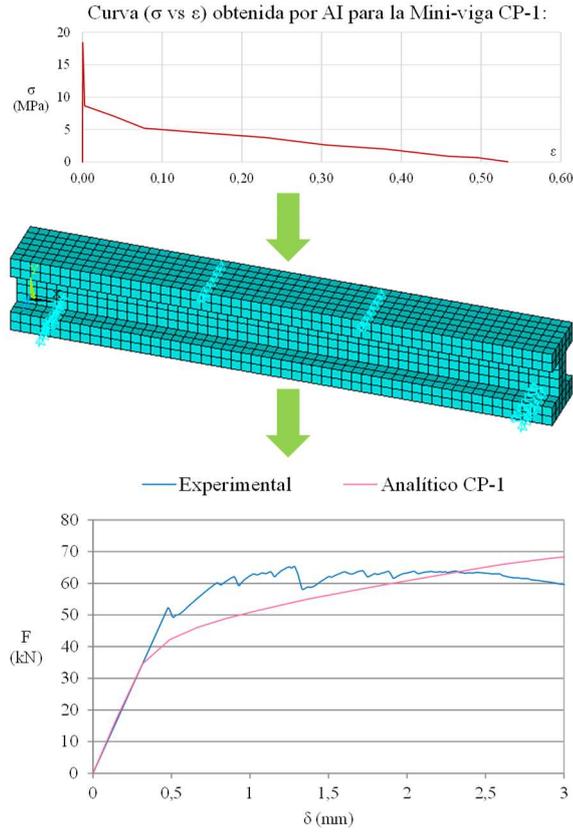


Figura 163: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-1.

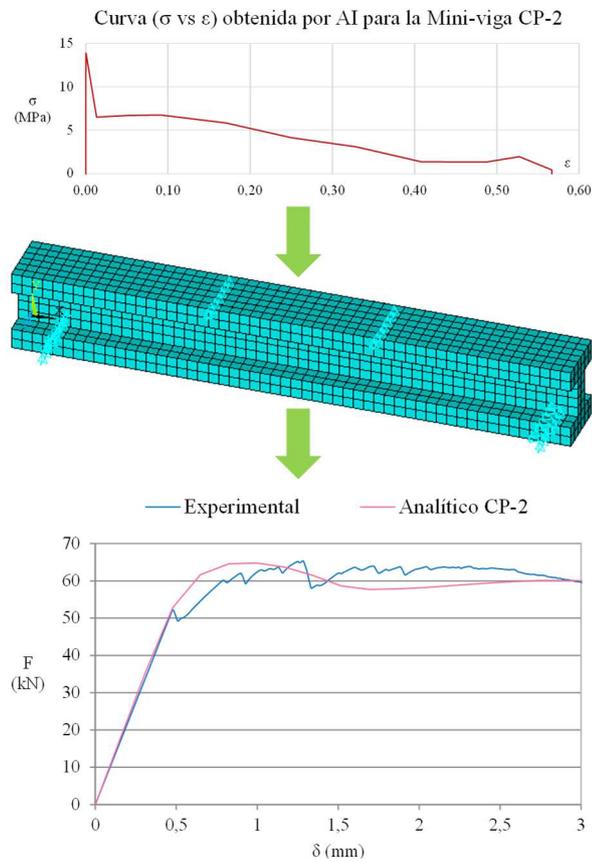


Figura 164: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-2.

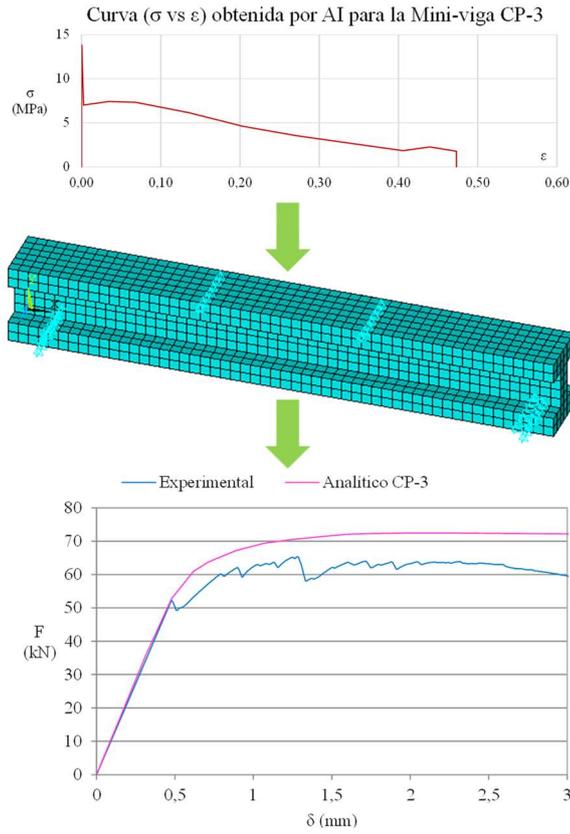


Figura 165: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-3.

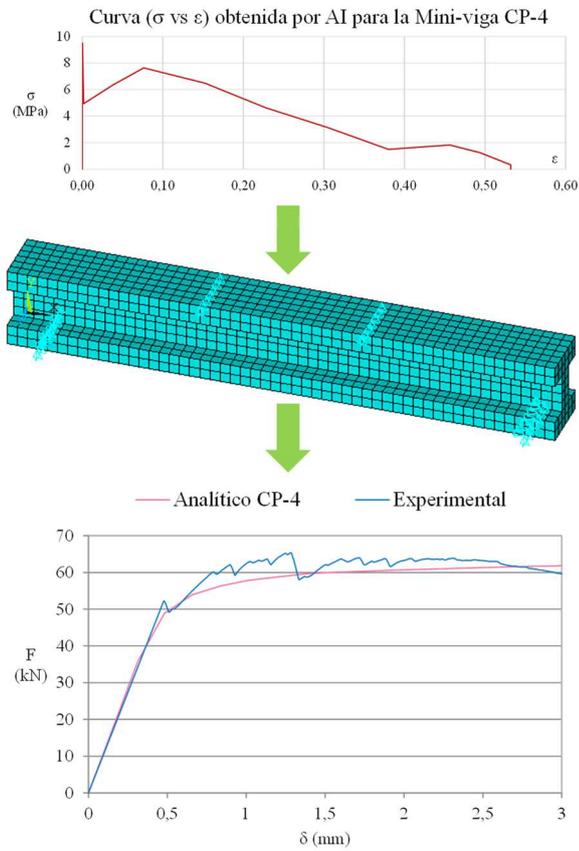


Figura 166: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-4.

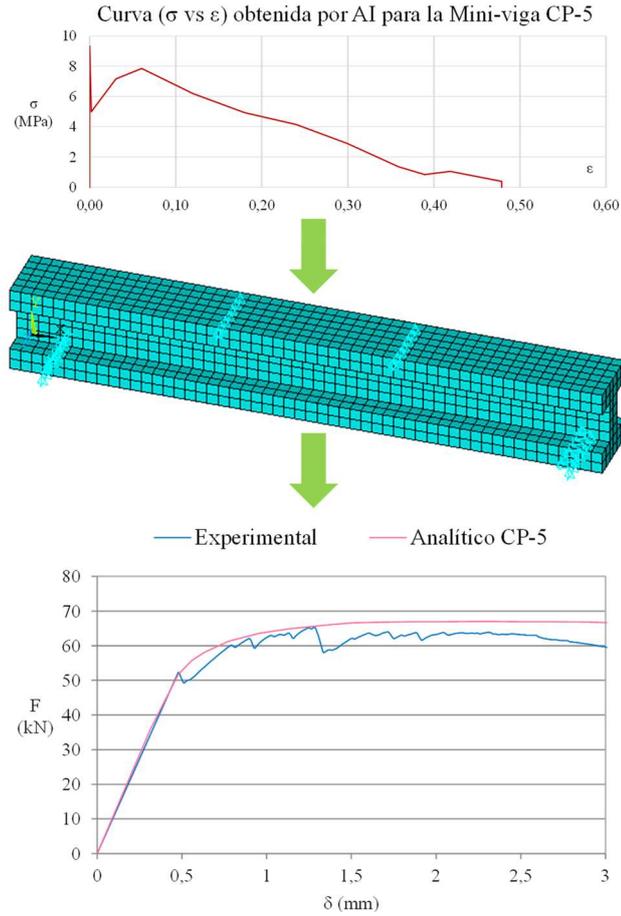


Figura 167: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-5.

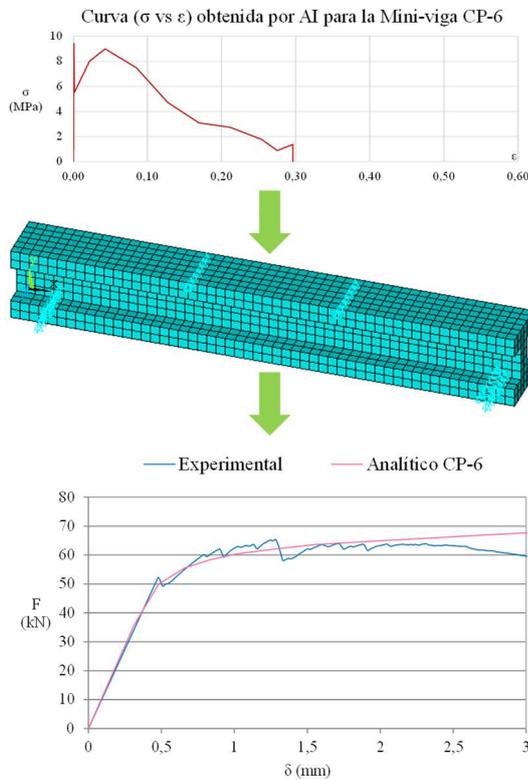


Figura 168: Validación de la ley constitutiva en tracción usando CP-6.

8.3 RESULTADOS DEL ANALISIS USANDO EL MEF CON SOLID65

En el Capítulo 6 ítem 6.4 se explicó el procedimiento a seguir para evaluar el comportamiento del UHPFRC usando el elemento SOLID65 del ANSYS [133]. El análisis fue realizado considerando las mini-vigas fabricadas con porcentajes de fibra del 1% y 2%, así como también usando micro y macro fibras de acero, siguiendo el esquema presentado en la Figura 74 del Capítulo 6, ítem 6.4. Esas vigas son las mismas utilizadas anteriormente en el ítem 8.1.

La simulación numérica realizada demandó, en el INPUT, la inclusión del porcentaje efectivo de fibras en la sección transversal del elemento localizada en el plano de carga, es decir, en la mitad de la viga. El disco usado por la sierra eléctrica para cortar el elemento es costoso y tiene alto deterioro debido a la resistencia del UHPFRC, consecuentemente, motivos económicos impidieron cortar transversalmente cada mini-viga ensayada. Se seleccionó por grupo el espécimen que soportó la mayor carga y para él fue medido el porcentaje de fibras.

Con ese porcentaje de acero fue realizado en modelaje computacional, considerando la curva experimental promedio. Las propiedades mecánicas incluidas en la data fueron la resistencia a la compresión del UHPFRC (15,1 kN/cm²), resistencia a la tracción de la matriz (0,751 kN/cm² para 1% de microfibras y 0,926 kN/cm² para 2% de microfibras), módulo de elasticidad del concreto (4770,796 kN/cm²), módulo de elasticidad de las fibras (2,1E4 kN/cm²), coeficiente de Poisson del concreto (0,22) y coeficiente de Poisson de las fibras de acero (0,3).

El esfuerzo de fluencia equivalente de las fibras de acero fue calculado por análisis inverso como se explicó en el Capítulo 6, los resultados son mostrados en la Tabla 56. La curva experimental promedio se compara con los resultados analíticos usando SOLID65 y SOLID185.

Tabla 56: Valores equivalentes para el esfuerzo de fluencia.

Valores máximos de f_y (kN/cm ²)	
Con microfibras	
1%	2%
173,81	166,79

En las Tablas 57 y 58 se observa el cálculo iterativo realizado por análisis inverso. En cada caso la resistencia a la adherencia de la fibra es calculada para luego determinar el valor de la fuerza y del esfuerzo de tracción equivalente en la fibra.

En mini-vigas con 1% de microfibras, el resultado obtenido para el esfuerzo de adherencia en la fibra cuando la primera grieta aparece es de 13,37 MPa. Ese valor es multiplicado por el área de la fibra en contacto con la matriz, considerando la mitad de la longitud de la fibra, para calcular la fuerza de tracción en la fibra, arrojando el valor de 54,60 N. Luego, al dividir la fuerza entre el área transversal de la fibra, tenemos que el esfuerzo de tracción en la fibra dentro de la matriz es 1738,10 MPa; el cual será considerado como el límite superior del esfuerzo de fluencia, parámetro necesario en la entrada de datos para la simulación numérica.

Tabla 57: Cálculo de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ por AI. Mini-vigas con 1% de microfibras.

Valores asumidos: d_c (mm)= 3,5115 $\tau_{f,m\acute{a}x}$ (MPa) = 13,37			
Primeros cálculos:			
F_c (kN)=	26,49		
y_{cr} (mm)=	0,2143		
F_{t1} (kN)=	0,10		
$\omega_{cr,a}$ (mm)=	1,0735		
ω_{cr} (mm)=	0,01109y		
y (mm)	ω_{cr} (mm)	$F_{t2,c}$ (kN)	$M_{Ft2,c}$ (kN.mm)
2,7614	0,0306	3,36	21,82
8,2843	0,0919	2,11	25,31
13,8071	0,1531	1,97	34,62
19,3300	0,2144	2,00	46,21
24,8528	0,2756	2,04	58,42
30,3757	0,3369	2,08	70,80
35,8985	0,3981	2,10	83,23
41,4214	0,4594	2,12	95,69
46,9442	0,5206	2,13	108,16
52,4671	0,5819	2,15	120,64
57,9900	0,6431	2,16	133,11
63,5128	0,7044	2,16	145,57
Sub-total=		26,39	943,58
$F_c = F_{t1} + F_{t2}$			
26,49 = 0,10 + 26,39			
26,49 = 26,49			
$M_c = M_{t1} + M_{t2}$			
31,01 = 0,36 + 943,58			
M (kN.mm) = $M_{t1} + M_{t2} - M_c$			
M (kN.mm) = 912,93			
P (kN) = 12,17			
P experimental (kN) = P analítico (kN)			
12,16729 = 12,17243			
Diferencia del 5%			

El procedimiento es repetido para los especímenes que contienen 2% de microfibras. El resultado para el esfuerzo de adherencia obtenido por análisis inverso fue de 12,83 MPa. La fuerza de tracción en la fibra fue de 52,40 N y el esfuerzo de tracción de 1667,9 MPa.

El esfuerzo de fluencia de ese tipo de fibras oscila en el rango de (2500 a 2700) MPa. En ambos casos se verifica que las fibras no llegan a fluir, como fue observado en los experimentos.

Luego, son anexados los resultados del modelaje computacional, en los gráficos de las Figuras 169 a la 172 se compara la respuesta numérica con la experimental para los diferentes casos estudiados.

Tabla 58: Cálculo de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ por AI. Mini-vigas con 2% de microfibras.

Valores asumidos: d_c (mm)= 6,2970 $\tau_{f,m\acute{a}x}$ (MPa) = 12,83			
Primeros cálculos:			
F_c (kN)=	47,51		
y_{cr} (mm)=	0,5491		
F_{t1} (kN)=	0,36		
$\omega_{cr,a}$ (mm)=	1,1824		
ω_{cr} (mm)=	0,01251y		
y (mm)	ω_{cr} (mm)	$F_{t2,c}$ (kN)	$MF_{t2,c}$ (kN.mm)
2,6314	0,0329	5,09	48,24
7,8942	0,0988	3,66	53,97
13,1571	0,1646	3,60	71,96
18,4199	0,2304	3,68	93,06
23,6827	0,2963	3,76	114,78
28,9455	0,3621	3,82	136,60
34,2084	0,4279	3,86	158,45
39,4712	0,4938	3,89	180,29
44,7340	0,5596	3,92	202,13
49,9968	0,6255	3,94	223,94
55,2597	0,6913	3,96	245,72
60,5225	0,7571	3,97	267,46
Sub-total=		47,15	1796,60
$F_c = F_{t1} + F_{t2}$			
47,51 = 0,10 + 47,15			
47,51 = 47,51			
$M_c = M_{t1} + M_{t2}$			
99,72 = 2,41 + 1796,60			
M (kN.mm) = $M_{t1} + M_{t2} - M_c$			
M (kN.mm) = 1699,29			
P (kN) = 22,66			
P experimental (kN) = P analítico (kN)			
22,6833 = 22,6572			
Diferencia del 1%			

Las curvas teóricas obtenidas de la simulación numérica usando el elemento SOLID65 resultaron próximas a las curvas experimentales promedio en la fase elástica y de post-agrietamiento, hasta una deflexión aproximada de 0,26% de la longitud entre apoyos.

El cálculo del módulo de elasticidad (E) para la curva analítica, en función de la deflexión y la carga aplicada, es igual a 54307,03 MPa. Ese valor es cercano al módulo de elasticidad calculado para el UHPFRC por compresión uniaxial (ver Tabla 17 del Capítulo 7), presentando una diferencia de 14%.

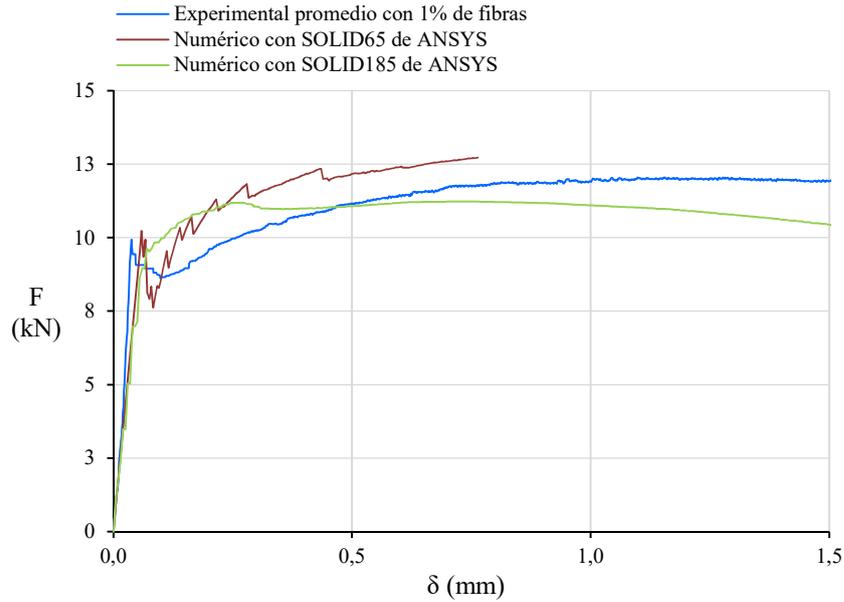


Figura 169: Comparación de curvas promedio con SOLID65 1% microfibras.

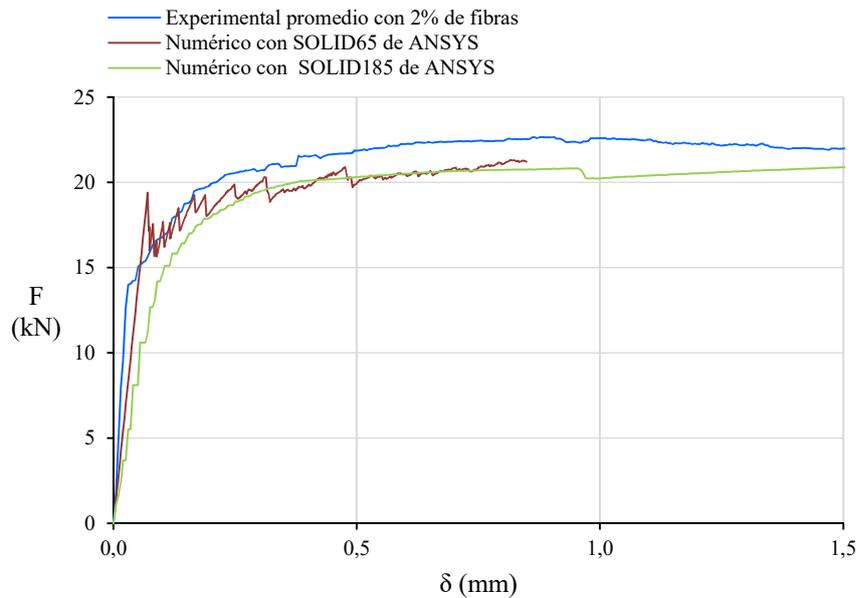


Figura 170: Comparación de curvas promedio con SOLID65 2% microfibras.

Los resultados del análisis en la Figura 169 mostraron mayor similitud entre curvas en la etapa inelástica cuando comparadas a las que contienen 2% de fibras. Incluso la curva analítica usando SOLID65 simuló la caída de rigidez que presentó el elemento luego de atingir el límite elástico. En la Figura 170 se observa mayores aproximaciones entre la curva analítica usando SOLID185 y la respuesta experimental.

La curva teórica obtenida de la simulación numérica usando el elemento SOLID65 presentó diferencias con el comportamiento experimental para las mini-vigas construidas con macrofibras de acero, como se observa en las Figuras 171 y 172. La respuesta analítica post-agrietamiento usando SOLID65 fue sobre estimada en los especímenes conteniendo 1% de macrofibras y subestimada en los especímenes conteniendo 2% de macrofibras. El análisis con SOLID185 no arrojó buenas aproximaciones con la curva experimental.

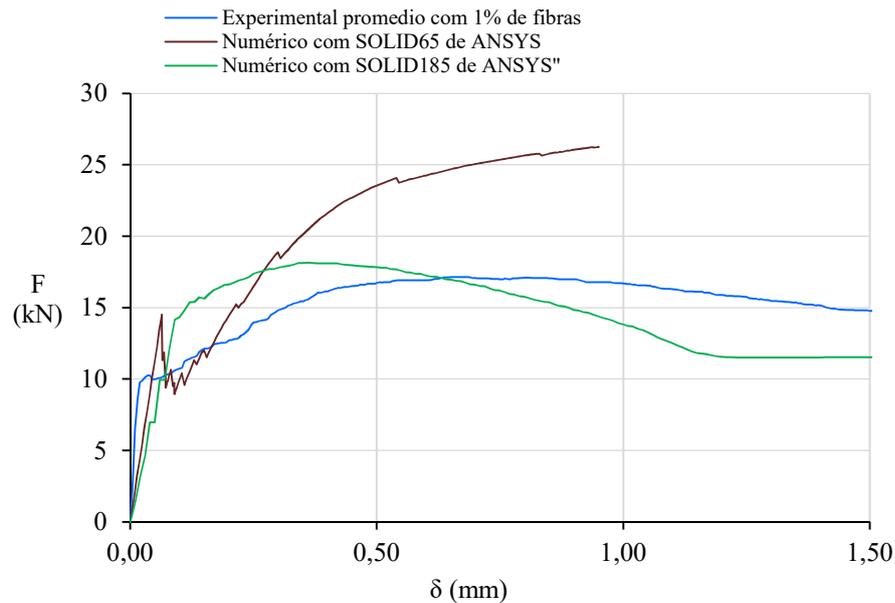


Figura 171: Comparación de curvas promedio con SOLID65 1% macrofibras.

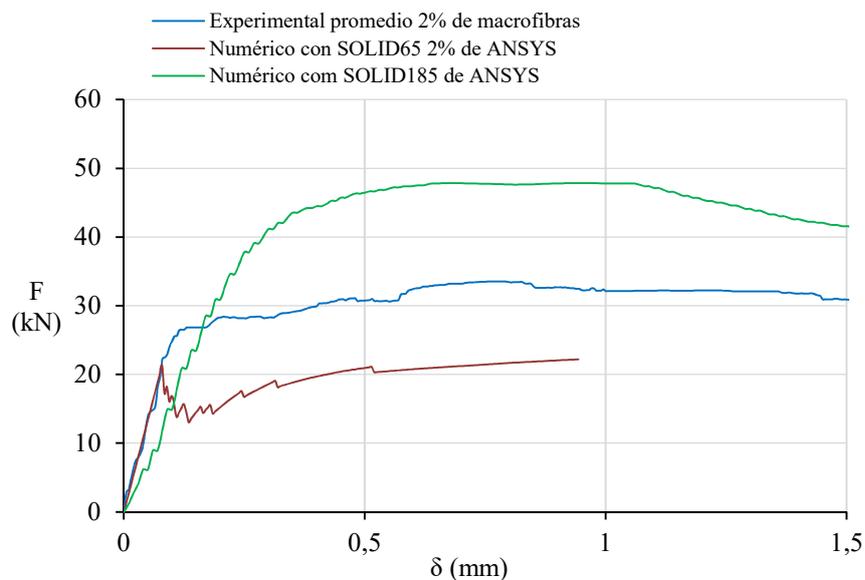


Figura 172: Comparación de curvas promedio con SOLID65 2% macrofibras.

Los resultados del análisis en la Figura 171 mostraron diferencias entre ambas curvas analíticas y la experimental, ambas respuestas analíticas reflejaron menor rigidez inicial que la curva experimental.

En la Figura 172 se observa la misma respuesta elástica entre la curva usando SOLID65 y la experimental. La respuesta en la fase inelástica fue subestimada usando SOLID65 y sobrestimada usando SOLID185.

8.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA VIGA I CON BARRAS DE REFUERZO

La viga I fue modelada según lo especificado en el Capítulo 6, ítem 6.3.4. La Figura 173 muestra una imagen de la viga usada para el análisis.

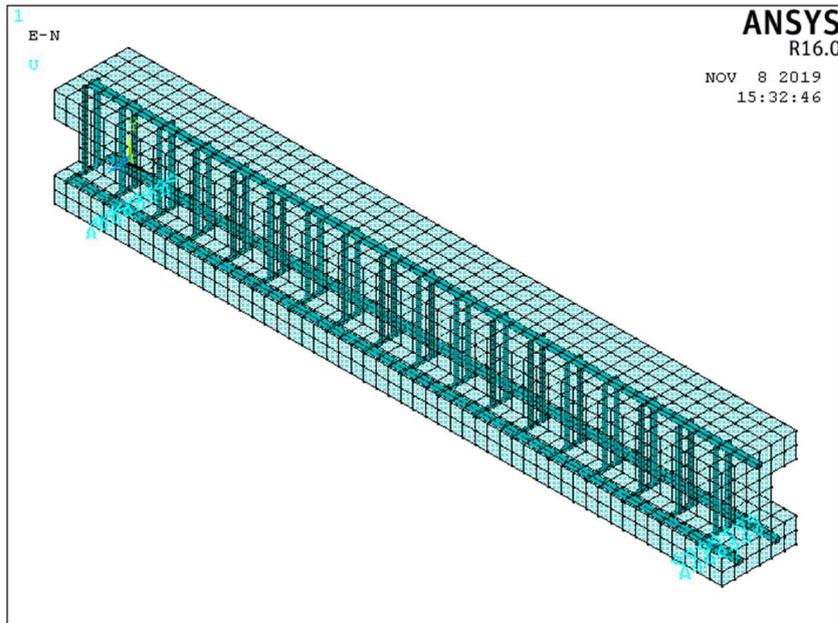


Figura 173: Viga I usada para el análisis.

Experimentalmente la viga I fue construida con acero de refuerzo convencional (barras) y con UHPRC (sin fibras). Para la simulación numérica se consideró el acero de refuerzo convencional y fue incluido el material con fibras por medio de las relaciones constitutivas del UHPRC en la entrada de datos, ver Script en los apéndices y detalles de la armadura en el Capítulo 5, ítem 5.5.2.

La curva (σ - ϵ) de tracción en la flexión incluida en el INPUT, para modelar la viga I, fue la correspondiente al espécimen de mini-viga CP-2 con 1% de fibras, por ser la que presentó curvas analíticas versus experimentales más compatibles.

El resultado del análisis de la viga I se muestra en la Figura 174 por medio de la curva que relaciona la carga con la deflexión (F vs δ).

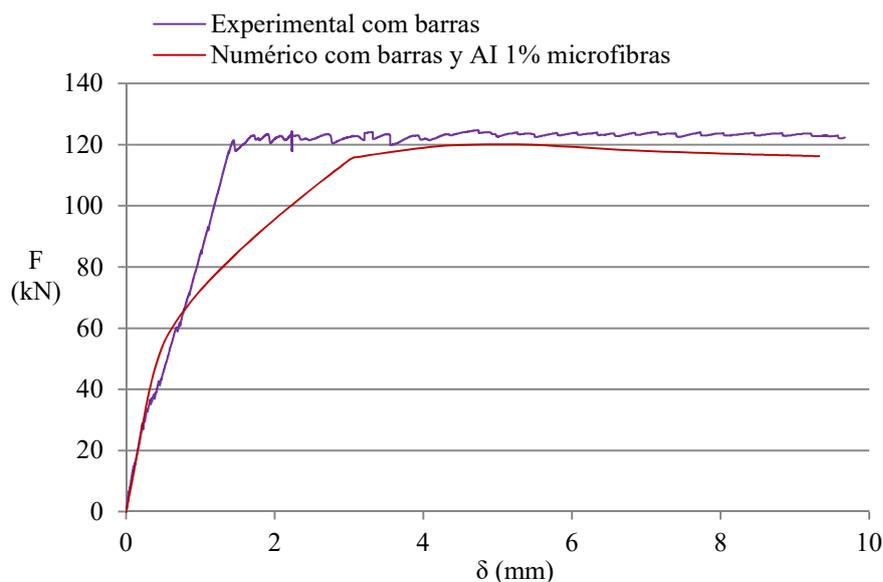


Figura 174: Comparación de las curvas (F vs δ) de la Viga I con acero de refuerzo.

La curva analítica fue ajustada a la curva experimental disminuyendo el área de acero longitudinal, en otras palabras, el efecto de las fibras en el elemento produjo una reducción del acero a flexión de la viga en un 33%, para una misma capacidad de carga.

9 CONCLUSIONES

El trabajo experimental desarrollado en esta pesquisa permitió definir diferentes diseños de mezcla, seleccionando el material que presentó propiedades mecánicas superiores. El proceso de fabricación y composición del UHPFRC estudiado y definido en esta pesquisa se encuentra en proceso de registro, según depósito de patente BR102019022362-6 efectuado ante el Instituto Nacional de Propiedad Industrial (INPI) por medio de la UFRGS.

La mezcla de UHPFRC desarrollada en esta pesquisa se diferencia de otras existentes en el mercado porque presenta un proceso simple de fabricación, sin necesidad de utilizar elaborados y demorados procesos de molienda para el empaquetamiento de partículas. Además, incluye en su composición residuos industriales, que clasifican al material como una mezcla sustentable. Las propiedades mecánicas de concretos con ultra alto desempeño son atingidas con una mezcla que posee tixotropía, característica que abre una gama de posibilidades de aplicación en situaciones extremas, donde la flexibilidad arquitectónica, el tiempo y tipo de colocación rigen la factibilidad de la obra.

El UHPFRC fue caracterizado por su comportamiento en compresión uniaxial, relacionando, elástica e inelásticamente, esfuerzos y deformaciones. A partir de esas relaciones se obtuvieron valores superiores a 150 MPa y 48 GPa para la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad respectivamente. El diseño de mezcla propuesto en esta pesquisa para alcanzar esos valores atiende a las siguientes características: (i) relación agua/cemento de 0,19; (ii) relación agua/aglomerante de 0,13; (iii) inclusión del 1 % de fibras cortas de acero; (iv) uso de 26% de residuos industriales en sustitución parcial del cemento.

El UHPFRC fue caracterizado por su comportamiento en tracción uniaxial, los valores promedio de resistencia estuvieron en el rango de (8-9) MPa y el módulo de elasticidad en el rango de (36 a 48) GPa para elementos con microfibras. Fue observado que la resistencia a la tracción en el límite elástico fue mayor en los especímenes sin fibras. Es posible suponer que en el estado elástico las fibras obstaculizan la ganancia de resistencia, disminuyendo el área de concreto y originando vacíos. Luego de la primera grieta, cuando las fibras dominan el comportamiento, se observa una diferencia importante en función del porcentaje de fibras y claramente dos tipos

de comportamiento son diferenciados, *strain softening* y *strain hardening* para 1% y 2% de fibras respectivamente.

Para los elementos con macrofibras, la diferencia de resistencias a la tracción uniaxial en el límite elástico fue más significativa, siendo un 60% mayor en los elementos sin fibras, aspecto que refuerza la suposición de que las fibras, antes del agrietamiento, obstaculizaron la ganancia de resistencia en los elementos Dog-Bone usados en esta pesquisa.

El UHPFRC fue caracterizado por su comportamiento en flexión o tracción en la flexión. El comportamiento constitutivo fue determinado incluyendo la fase de post-agrietamiento del material. Los lineamientos recomendados por la AFGC para el UHPFRC, fueron considerados y una curva de esfuerzo vs deformación fue definida para cada tipo de elemento ensayado a flexión en tres puntos. Esa curva de comportamiento fue obtenida a partir de los registros experimentales de carga y abertura de la muesca, para ello, los valores de la abertura de la muesca se transformaron en deformación unitaria usando una relación en función de la longitud característica. Buenas aproximaciones fueron obtenidas para los elementos conteniendo microfibras. Para elementos fabricados con 2% macrofibras se obtuvieron algunas aproximaciones, sin embargo, en la mayoría de los casos la respuesta analítica subestimó la respuesta experimental.

El proceso de comparación usando la energía de fractura, calculada con data analítica y experimental, demostró ser un método eficiente para validar el análisis inverso, dando excelentes aproximaciones en mini-vigas con 2% de micro y macro fibras. La energía de fractura fue prácticamente duplicada al duplicar el contenido de fibras.

Meso-vigas con sección transversal en forma de I fueron construidas con UHPFRC usando 2% de fibras y ensayos a flexión en cuatro puntos fueron realizados. La meso-viga se modeló usando elementos finitos, incluyendo, en la entrada de datos, las relaciones constitutivas establecidas para las mini-vigas. Buenas aproximaciones fueron obtenidas al comparar las curvas (F vs δ) obtenidas analíticamente con la respuesta experimental. Ese procedimiento resultó ser adecuado para validar las leyes constitutivas obtenidas por análisis inverso para elementos conteniendo 2% de microfibras.

La meso-vigas con sección transversal en forma de I fue construida y ensayada a flexión en cuatro puntos usando acero de refuerzo convencional. La respectiva simulación numérica fue

realizada usando elementos finitos. La curva analítica fue ajustada a la curva experimental disminuyendo el área de acero a flexión de la viga en un 33%. Si bien esa economía obtenida no es significativamente competitiva al compararla al porcentaje de fibras usado, existen otros beneficios que bien vale la pena considerar. Costos en transporte, equipos y mano de obra también pueden ser reducidos. La continuidad en el soporte de cargas después que el elemento se agrieta puede disminuir los factores de seguridad, además de ser favorable en estructuras construidas en zonas sísmicas. También menores deflexiones son alcanzadas usando fibras, mejorando el estado límite de servicio de la estructura.

La resistencia a la adherencia de barras embebidas en UHPRC fue determinada para estimar la longitud de desarrollo necesaria a considerar en el diseño estructural, considerando barras de acero y barras poliméricas. Los resultados mostraron que las barras poliméricas pueden triplicar la longitud de desarrollo al compararlas con las barras de acero.

El UHPFRC es un material compuesto, formado principalmente por las fibras y la matriz de concreto. Simular de forma fidedigna las fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la matriz de concreto es un procedimiento complejo, además demanda un esfuerzo computacional que escapa del alcance de esta pesquisa. Sin embargo, buenas aproximaciones pueden ser realizadas para modelar analíticamente el problema real, basados en esa premisa, un análisis por elementos finitos usando el elemento SOLID65 del ANSYS fue realizado. Los resultados demostraron buenas aproximaciones entre curvas analíticas y experimentales usando microfibras. En el caso de macrofibras la respuesta analítica fue sobrestimada con 1% y subestimada con 2% de fibras respectivamente. El tipo, tamaño, orientación y distribución de las fibras tiene influencia significativa en el comportamiento de elementos fabricados con UHPFRC sometidos a esfuerzos flexión.

Buenas aproximaciones del problema real fueron obtenidas en el modelaje computacional usando el programa ANSYS. El elemento SOLID65 permitió simular las fibras en forma distribuida dentro de la matriz de concreto. El elemento SOLID185 junto al material CAST, permitieron simular el UHPFRC como un material homogéneo, incluyendo las leyes constitutivas del material en la entrada de datos.

10 RECOMENDACIONES

Actualmente el UHPFRC se ubica en la punta del iceberg de la tecnología del concreto. Pesquisa del material es y será aún más cuantiosa, consecuentemente métodos de análisis del concreto con fibras deberán ser perfeccionados. Se recomienda sistematizar la metodología desarrollada en esta pesquisa, para evaluar la respuesta del análisis inverso con incrementos menores en las iteraciones y disponer de una curva de comportamiento más refinada. Con eso, un programa para analizar vigas con fibras puede ser creado, colocando una herramienta de análisis a la disposición de futuras pesquisas.

El UHPFRC se encaja como una alternativa para extender la vida útil de las estructuras, además de permitir la construcción de elementos más pequeños y, por lo tanto, reducir el costo total de construcción. Desde el punto de vista de las edificaciones, proyectos de refuerzo a menudo son difíciles de realizar porque requieren demoliciones significativas en elementos vecinos que facilitan el vaciado del concreto, debilitando el sistema estructural. También pueden requerir sistemas de encofrados complejos y costosos, originados por restricciones arquitectónicas existentes. La tixotropía de la mezcla de UHPFRC desarrollada en esta pesquisa permite la fácil colocación como elemento de refuerzo, su mínima porosidad y alta resistencia reduce el espesor de la capa de hormigón, ahorrando material, equipo y mano de obra. Por lo tanto, se recomienda profundizar en el conocimiento experimental y numérico del material para ser usado en el reforzamiento de elementos estructurales.

El UHPFRC puede surgir como una nueva tecnología que ayuda a resolver el problema del deterioro en obras de arte especiales, ya que es un material compuesto de alto desempeño que ofrece características técnicas como ductilidad, resistencia y durabilidad. El material puede ser colocado de manera rápida y manual, permitiendo reforzar elementos estructurales con menores equipos de construcción, ofreciendo un acabamiento superficial moldeable y de alta calidad. Se recomienda profundizar en el conocimiento experimental y numérico del material para ser usado en el reforzamiento de elementos estructurales pretensados y en aquellos sometidos a alto impacto.

El UHPFRC tiene flexibilidad arquitectónica y gran capacidad de absorción de energía, por lo tanto, elementos estructurales y no estructurales resistentes a explosivos pueden ser construidos, siendo una excelente alternativa de protección en fachadas de edificios vulnerables a ataques

con explosivos, como bancos, edificios gubernamentales y militares. En este sentido, se recomienda estudiar experimental y numéricamente el material para ser usado en la construcción de elementos para la industria militar y para su uso en plantas nucleares.

REFERENCIAS

- [1] Fehling, E.; Schmidt, M.; Walraven, T.; Leutbecher, T.; Frohlich, S. Ultra-High Performance Concrete UHPC Fundamentals, Design, Examples. First Edition, 2014, 188 p. <http://www.wiley.com/WileyCDA/WileyTitle/productCd-3433030871.html>
- [2] Doo-Yeol Yoo, Young-Soo Yoon. A Review on Structural Behavior, Design, and Application of Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, v.10, n.2, 2016; p.125-142. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-016-0143-x>
- [3] Tanaka, Y., Musya, H., Ootake, A. et al. Design and Construction of Sakata-Mirai Footbridge Using Reactive Powder Concrete. In: Proc. Of 1st fib Congress Concrete Structure in the 21st Century, Osaka, Japan, 2002, v.1, p.103-104. <https://structurae.net/structures/sakata-mirai-footbridge>
- [4] UNSTAT, Greenhouse gas emissions by sector (absolute values). United Nation Statistics Division. https://unstats.un.org/unsd/environment/air_greenhouse_emissions%20by%20sector.htm
- [5] Hassan, A.; Jones, S.; Mahmud, G. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). Journal Construction and Building Materials, v.37, 2012; p.874-882. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812002322>
- [6] Yu, R.; Spiesz, P.; Brouwers, H. Mix design and properties assessment of Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). Journal Cement and Concrete Research, v.56, 2014; p.29-39. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613002275>
- [7] Habel, K.; Viviani, M.; Denarié, E.; Brühwiler, E. Development of the mechanical properties of an Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). Journal Cement and Concrete Research, v.36, 2006; p.1362-1370. <https://www.researchgate.net/publication/223459609>
- [8] Yang, S.L.; Millard, S.G.; Soutsos, M.N.; Barnett, S.J.; Le, T.T. Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). Journal Construction and Building Materials, v.26, n.6, 2009; p.2291-2298. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061808003449>
- [9] Report FHWA-HRT-13-060. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/hpc/13060/006.cfm>
- [10] Feret, René. Sur la Compacité des mortiers hydrauliques. Annals des Ponts et Chaussées, 1894.
- [11] Reinhardt, H. W. Otto Graf's research on concrete roads—A retrospective view. Journal Otto Graf. Annual Journal on Research and Testing of Materials, v.14, 2003; p.9-19. <https://www.mpa.uni-stuttgart.de/publikationen/ottografjournal/ogj2003/beitragreinhardt.pdf>
- [12] Freyssinet, Eugene. <https://structurae.info/personnes/eugene-freyssinet>
- [13] Walz Kurt. Vibrate Concrete. 3rd editions, Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin 1960.

- [14] Hughes, B.; and Chapman, G. The complete stress-strain curve for concrete in direct tension. Bulletin RILEM, n. 30, 1966; pp. 95-97. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=101427>
- [15] Heilmann, H.; Hildsdorf, H.; and Finsterwalder, K. (1969). Festigkeit und Verformung von Beton unter Zugspannungen. Deutscher Ausschuss für Stahl-beton, Heft 203, W. Ernst & Sohn, Berlin.
- [16] Yudenfreund, M.; Odler, I.; Brunauer, S. Hardened Portland cement pastes of low porosity I. Materials and experimental methods. Journal Cement and Concrete Research, v.2, 1972; p.313-330. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884672900737>
- [17] Roy, D.; Gouda, G.; Bobrowsky, A. Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high-pressure techniques. Journal Cement and Concrete Research, v.2, 1972; p.349-366. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884672900750>
- [18] Roy, D. and Gouda, G. High strength generation in cement pastes. Journal Cement and Concrete Research, v.3, 1973; p.807-820. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884673900136>
- [19] Hilleborg Arne. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy GF of concrete. Rilem Technical Committees. Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.
- [20] Birchall, J.; Howard, A.; Kendall, K. Flexural strength and porosity of cements. Journal Nature Publishing Group, v.289, 1981; p.388-390. <https://www.nature.com/nature/journal/v289/n5796/pdf/289388a0.pdf>
- [21] Bache, H. H. Densified cement ultra-fine particle-based materials. In Proceedings of the 2nd international conference on superplasticizers in concrete, Ottawa, Canada, 1981, p. 33. <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/DE93500154.xhtml>
- [22] Lankard, D.; and Lease, D. Refractarios monolíticos precolados altamente reforzados. Journal of the American Ceramic Society, bulletin 61, 1982; p.728. <http://boletines.secv.es/upload/20120509120356.z19832202.pdf>
- [23] Hjorth, L.; Alford, N.; Mangabhai, R.; Hirsch, P.; Moir, G.; Jefferis, S.; Blundell, R.; Kelly, A.; Defosse, C.; Sing, K.; Massazza, F.; Bensted, J. Journal Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences, v.310, n. 1511, 1983; p.167-173.
- [24] Petersson, P. (1981). Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. PhD Lund University. Division of Building Materials Lund Institute of Technology. http://www.iaea.org/inis/collection/nclcollectionstore/_public/13/668/13668228.pdf
- [25] Wittmann, F.; Rokugo, K.; Brühwiller, E.; Mihashi, H.; Simopnin, P. Fracture energy and strain softening of concrete as determined by compact tension specimens. Journal Material and Structures, n. 21, 1988; p. 21-32. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472525>
- [26] Rokugo, K.; Iwasa, M.; Suzuki, K.; Koyanagi, W. (1989). Testing methods to determine tensile strength strain-softening curve and fracture energy of concrete. In H. Mihashi, H. Takahashi, & F. Wittmann (Eds.), Fracture toughness and fracture energy: test methods for concrete and rock (pp. 153-163). Rotterdam: Balkema. <http://www.framcos.org/FraMCoS-4/403.pdf>

- [27] Gopalaratman, Vellore and Gettu, R. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. *Journal Cement and Concrete Composites*, n. 17, 1995; p.239-254.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0958946595995060>
- [28] RILEM 49TFR. Testing methods for fibre reinforced cement-based composites. *Journal Materials and Structures*, n. 17, 1984; p.441-456. <https://www.rilem.net/groupe/049-tfr-testing-methods-for-fibre-reinforced-cement-based-composites-49>
- [29] Hillerborg, A. The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_f of concrete. *Journal Materials and Structures*, n. 18, 1985; p. 291-296.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF02472919>
- [30] Larrard, F.; Sedran, T. Optimization of Ultra-High-Performance Concrete by the use of a packing model. *Journal Cement and Concrete Research*, v.24, n.1, 1994; p.997–1009.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884694900221>
- [31] Richard, P., and Cheyrezy, M. Composition of reactive powder concretes. *Journal Cement and Concrete Research*, v.25, 1995; p.1501–1511. <https://www.researchgate.net/publication/222388936>
- [32] Gopalaratman, V.; Gettu, R. On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concretes. *Journal Cement and Concrete Composites*, v.17, 1995; p.239-254.
- [33] Barnett, S. J.; Millard, S. G.; Soutsos, M. N.; Schleyer, G.; Tyas, A.; Le, T. T. Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete for Explosion Resistant Structures. In: *Proc. Of CONCRETE PLATFORM International Conference*, Belfast, Northern Ireland, pp 565-573,2007.
- [34] Richard, P. (1996): "Reactive Powder Concrete - a new ultra-high-strength cementitious material", 4th International Symposium Utilization of High Strength/High Performance Concrete, Paris, pp. 1343-1349.
- [35] Wang, D.; Shi, C.; Wu, Z.; Xiaot, J.; Huang, Z. and Fang, Z. A review on ultra-high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. *Journal Construction and Building Materials*, n. 96, 2015; pp. 368-377.
- [36] Hunger M. AN INTEGRAL DESIGN CONCEPT FOR ECOLOGICAL SELF-COMPACTING CONCRETE [Ph.D. thesis]. Eindhoven University of Technology, The Netherlands: Eindhoven; 2010.
- [37] Taylor, 1997. H.F.W. Taylor, *Cement Chemistry* (second ed.), Thomas Telford, London (1997)
- [38] R. Hela, L. Bodnarova and L. Rundt. Development of Ultra High-Performance Concrete and Reactive Powder Concrete with Nanosilica. *Journal Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 371.
- [39] López, Angel. CHARACTERISATION OF THE TENSILE BEHAVIOUR OF UHPFRC BY MEANS OF FOUR-POINT BENDING TESTS. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. DOCTORAL THESIS. 2017.
- [40] Walraven, J. High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes. *Journal Materials and Structures*, n. 42, 2009; p. 1247-1260.
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-009-9538-3>

- [41] AFGC-SETRA. (2002). Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concretes. Interim Recommendations. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118557839.ch47>
- [42] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report - ACI 239R-18, Farmington Hills, USA, 2018; 21 pp.
- [43] Camacho, E. (2013). Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. Valencia: PhD Thesis. Universitat Politècnica de València.
- [44] Schmidt, M.; Fehling, E. Ultra-High-Performance Concrete: Research, Development and Application in Europe. Digital format document.
- [45] Reinhardt H.; Parra-Montesinos, G.; Garrecht, H. (2015). Proceedings of the 7th RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC7). RILEM Publications S.A.R.L.
- [46] Parra-Montesinos G.; Reinhardt, H.; Naaman, A. (2011). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 (HPFRCC6). RILEM Bookseries.
- [47] JSCE. (2004). Recommendations for design and construction of ultra-high-strength fiber reinforced concrete structures (draft). JSCE Guidelines for Concrete No. 9. https://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/hpfrcc_JSCE.pdf
- [48] Naaman, A.; Reinhardt, H. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. Journal Materials and Structures, n. 39, 2006; p. 547-555. <https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-006-9103-2>
- [49] Wille, K.; El-Tawil, S.; Naaman, A. Properties of strain hardening ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. Journal Cement and Concrete Composites, v. 48, 2014; p.53-66. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514000055>
- [50] SIA 2052: 2014-12.(n.d.). Béton Fibré Ultra-Performant (BFUP): Matériaus, dimensionnement et exécution. <http://www.sia.ch/fileadmin/content/download/sia-norm/korrigendasn/2052-C12017f.pdf>
- [51] Rossi, P.; Arca, a.; Parant, e.; Fakhri, P. Bending and compressive behaviors of a new cement composite. Journal Cement and Concrete Research, v.35, n.1, 2005; p.27–33. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884604002492>
- [52] Lim, D.H. and Nawy, E. G. Behavior of plain and steel-fiber-reinforced high-strength concrete under uniaxial and biaxial compression. Journal Magazine of Concrete Research, v.57, n.10, 2005; p.603-610. <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/macr.2005.57.10.603>
- [53] Graybeal, B. Compressive behavior of Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concrete. Journal ACI Materials, v.104, n.2, 2007; p.146-152. <https://www.researchgate.net/publication/259435679>
- [54] THANH, LE. ULTRA-HIGH-PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE PAVING FLAGS, Liverpool, 2008, PHD Thesis - University of Liverpool, 670 p. <http://ethos.bl.uk/OrderDetails.do?uin=uk.bl.ethos.502191>

- [55] Toledo, R.; Koenders, E.; Formagini, S.; Fairbairn, E. Performance assessment of Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability. *Journal Materials and Design*, v.36, 2012; p.880-888. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911006364>
- [56] Wu, Z.; Shi, C.; Khayat, K. Influence of silica fume content on microstructure development and bond to steel fiber in ultra-high strength cement-based materials (UHSC). *Journal Cement and Concrete Composites*, v.71, 2016; p.97-109.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946516301317>
- [57] Lampropoulos, A; Paschalis, S.; Tsioulou, O.; Dritsos, S. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high-performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Journal Engineering Structures*, v.16, 2016; p.370-384.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029615006768>
- [58] Hoang, A and Fehling, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra-high-performance concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.153, 2017; p.790-806.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817314733>
- [59] Kahanji, Ch.; Ali, F.; Nadjai, A. Structural performance of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams. *Journal Structural Concrete*, v.18, 2017; p.249-258.
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201600006/full>
- [60] Wu, Z.; Shi, C.; He, W.; Wang, D. Static and dynamic compressive properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Journal Cement and Concrete Composites*, n.79, 2017; p.148-157.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946517301622>
- [61] Yu, R.; Spiez, P.; Brouwers, H. Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Journal Cement and Concrete Research*, n.56, 2014; p. 29-39.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884613002275>
- [62] GGBS and Sustainability. 2007, Civil and Marine. p.2.
- [63] NAAMAN A.E., WILLE K.: Some correlation between high packing density, ultra-high performance, flow hability, and fiber reinforcement of a concrete matrix. bac2010, Congresso Ibérico sobre betao auto-compactavel. Guimaraes (Portugal), July 1-2, 2010
- [64] Soutsos, M. N.; Millard, S. G.; Karaliskos, K. Mix Design, Mechanical Properties and Impact Resistance of Reactive Powder Concrete (RPC), In: Proc. International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, Hawaii, 2005.
- [65] Zanni, H.; Cheyrezy, M.; Maret, V.; Philippot, S. and Nieto, P. Investigation of hydration and pozzolanic reaction in reactive powder concrete (RPC) using Si NMR. *Journal Cement and Concrete Research*, n. 26, v.1, 1996; pp. 93-100.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884695001972>
- [66] Markovic, Ivan. (2006) HIGH-PERFORMANCE HYBRID-FIBRE CONCRETE. Development and utilisation. PhD-Thesis, TU-Delft.

- [67] Doo, Y.; Soonho, K.; Jae, K. and Booki Chu. An experimental study on pullout and tensile behavior of ultra-high-performance concrete reinforced with various steel fibers. *Journal Constructions and Building Materials*. 2019, vol. 206, pp. 46-61.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819303526>
- [68] Kang, S.; Lee, B.; Kim, J.; Kim, Y. The effect of fibre distribution characteristics on the flexural strength of steel fibre-reinforced ultra-high strength concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.25, 2011; p 2450-2457.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810005878>
- [69] Stiel T.; Karihaloo. B. L.; Fehling E. Effects of Casting Direction on the Mechanical Properties of CARDIFRC in Ultra High-Performance Concrete (UHPC), 2004, Kassel, Germany. pp. 481-494.
- [70] Graybeal, Benjamin y Baby, Florent. Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Journal ACI Materials*, n. 110, 2013; p. 177-186.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/51685532>
- [71] Kang, Su-Tae; Kim, Jin-Keun. The relation between fiber orientation and tensile behavior in an Ultra High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (UHPFRC). *Journal Cement and Concrete Research*, n.41, 2011; p.1001-1014.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000888461100161X>
- [72] Park, Seung.; Kim, Dong; Ryu, Gum; Koh, Kyung. Tensile behavior of Ultra High-Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete. *Journal Cement and Concrete Composites*, n. 34, 2012; p. 172-184.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946511001661>
- [73] Tran, Ngoc; Tran, Tuan; Kim, Dong. High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension. *Journal Cement and Concrete Research*, n. 69, 2015; p. 72-87.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884614002506>
- [74] Kang, Su-Tae; Choi, Jeong Il; Koh, Kyung-Taek; Lee, Kang Seok; Lee, Bang Yeon. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high-performance concrete. *Journal Composite Structures*, n. 145, 2016; p. 37-42.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316301167>
- [75] Bonneau, O. Reactive powder concretes: from theory to practice. *Journal Concrete International*, n.18 (4), 1996; pp. 47-49.
- [76] Graybeal, B. (2006, August). Material Property Characterization of Ultra-High-Performance Concrete. Federal Highway Administration FHWA-HRT-06-103.
<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/06103/06103.pdf>
- [77] AFGC (2013). Ultra-High-Performance Fiber Reinforced Concretes. Recommendations.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118557839.ch47>
- [78] Tuan, N.; Ye, G.; Breugel, K.; Fraaij, A.; Dai, B. The study of using rice husk ash to produce ultra-high-performance concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.25, 2011; p.2030-2035.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810005763>

- [79] Liu, J.; Han, F.; Cui, G.; Zhang, Q.; Lv, Z.; Zhang, L.; Yang, Z. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high-performance concrete. *Journal Constructions and Building Materials*, v.121, 2016; p.310-318.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307620>
- [80] Kang, S.; Choi, J.; Koh, K.; Lee, K.; Lee, B. Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high-performance concrete. *Journal Composites Structures*, v.145, 2016; p.37-42. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822316301167>
- [81] Bindiganavile, V.; Banthia, N., Aarup, B. Impact response of ultra-high-strength fibre-reinforced cement composite. *ACI Materials Journal*, v. 99(6), 2002; pp. 543-548.
- [82] Parant, E.; Rossi, P.; Jacquelin, E. and Boulay, C. Strain rate effect on bending behavior of now ultra-high-performance cement-based composite. *ACI Materials Journal*, n. 104(5), 2007; pp. 458-463.
- [83] Tadros, M. and Morcous, G. *Application of Ultra-High-Performance Concrete to Bridge Girders*. Nebraska Department of Roads, University of Nebraska-Lincoln, 2009.
- [84] Moore, B. P.; D. Bierwagen; and B. Phares. 2006. "Wapello County, Iowa UHPC Bridge." ASCE Structures Conference, Ames, Iowa.
- [85] Ductal. <https://www.ductal.com/en/engineering/haneda-airport>
- [86] Naaman Antoine. *High performance fiber reinforced cement composites: Classifications and applications*. CBM ional Workshop, Karachi, Pakistan.
- [87] Foster, S. and Voo, Y. UHPFRC as a material for bridge construction: are we making the most of our opportunities? Conference Paper, August 2015. <https://www.researchgate.net/publication/288268857>
- [88] Toutlemonde F. and Resplendino, J. *Designing and Building with UHPFRC. State of the Art and Development*. Publisher with John Wiley and Sons, Inc. 2011.
- [89] RILEM TC 162-TDF: (σ - ϵ) Design Method. *Materials and Structures*. 2001, vol. 34, pp. 3-6.
- [90] RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for steel fibre reinforced concrete. Uniaxial tension test for steel FRC. *Materials and Structures*. 2001, vol. 34, pp. 3-6.
- [91] RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ - ω method: principles and applications. *Materials and Structures*. 2000, vol. 35, pp. 262-278.
- [92] RILEM TC 162-TDF: Test and Design Methods for steel fibre reinforced concrete. Bending Test. *Materials and Structures*. 2001, vol. 35, pp. 579-582.
- [93] MC2010. (2010). CEB-FIP model code. <http://www.fib-international.org/fib-model-code-2010>
- [94] Prisco, M.; Colombo, M. and Dozio, D. Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: principles, models and test validations. Technical Paper. *Journal Structural Concrete*. 2013, vol. 14, n. 4, pp. 342-361.

- [95] JSCE-SF4. Recommendations for Design and Construction of High-Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). SF4-Method-of-Test-For-Flexural-Strength-and-Flexural-Toughness.
- [96] Neville, A. Properties of Concrete. 1995. Addison Wesley Longman Limited, p.844.
- [97] Popovics, S. A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete. Journal Cement and Concrete Research, n. 3(5), 1973; p. 583-599.
- [98] Carreira, D.; Chu, K. Stress-strain relationship for plain concrete in compression. Journal ACI proceeding. Vol. 82.
- [99] Graybeal, Benjamin. Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. Journal ACI Materials, n. 104, 2007; p. 146-152.
<https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/18577>
- [100] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - NBR 5739, Rio de Janeiro, 2007.
- [101] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland Determinação da Resistência à Compressão - NBR 7215, Rio de Janeiro, 1995.
- [102] BS 1881-121 Static modulus of elasticity in compression. <http://www.c-s-h.ir/wp-content/uploads/2015/10/BS-1881-Part-121-83.pdf>
- [103] ASTM C469-94. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C469-94.htm>
- [104] Graybeal Benjamin, 2005. CHARACTERIZATION OF THE BEHAVIOUR OF ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. PhD-Thesis. University of Maryland, 377 p.
- [105] Benjamin A. Graybeal, UHPC in the US Highway Transportation System, 2008. International Symposium on Ultra High-Performance Concrete, 2nd, Kassel, Germany, March 2008, pp. 11-18.
<https://www.uni-kassel.de/upress/online/frei/978-3-89958-376-2.volltext.frei.pdf>
- [106] Shafieifar, M.; Farzad, M.; and Azizinamini, A. Experimental and numerical studies on mechanical properties of Ultra High-Performance Concrete (UHPC). Journal Construction and Building Materials, v.156, 2017; p.402–411. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>
- [107] Krahl, P.; Saleme, G.; and Carrazedo, R. Compressive behavior of UHPFRC under quasi-static and seismic strain rates considering the effect of fiber content. Journal Construction and Building Materials, v.188, 2018; p.633–644. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.121>
- [108] ACI Committee 318 2005. http://www.sinfra.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2016/02/aci_318-05_building_code_requirements_for_structural_concrete_and_commentary_aci_318r-05.pdf
- [109] ACI Committee 363R. Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete. <http://file.yizimg.com/395203/2012101711414749.pdf>

- [110] Ma, J.; Orgass, M.; Dehn, F.; Schmidt, D. Comparative investigation on ultra-high-performance concrete with and without coarse aggregate. Proceeding International Symposium on Ultra High-Performance Concrete (UHPC), Kassel, Germania.
- [111] Yoo, D.; Banthia, N.; Yoon, Y. Predicting service deflection of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete beams reinforced with GFRP bars. *Journal Composites Part B*, v. 99, 2016; p. 381-397. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135983681630909X>
- [112] Alsalman, A. ; Dang, C. ; Prinz, G. And Hale, M. Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.153, 2017; p.918-928.
- [113] Nguyen, D. ; Ryu, G.; Koh, K.; Kim, D. Size and geometry dependent tensile behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Journal Composites: Part B*, n.58, 2014; p.279-292. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836813006471>
- [114] Liu, J.; Han, F.; Cui, G.; Zhang, Q.; Lv, J.; Zhang, L. Yang; Z. Combined effect of coarse aggregate and fiber on tensile behavior of ultra-high-performance concrete. *Journal Construtions and Building Materials*, n. 121, 2016; p. 310-318. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816307620>
- [115] Gesoglu, M.; Guneyisi, E.; Muhyddin, G.; Asaad, D. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration. *Journal Composites Part B*, n.103, 2016; p.74-83. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836816304565>
- [116] Chanvillard, G.; Rigaud, S. Complete Characterisation of Tensile Properties of Ductal UHFPFC according to the French recommendations. Proceedings of the 4th International Symposium on High Performance Fiber Reinforced Concretes (HPFRCC4), 2003; p.21-34. https://www.researchgate.net/publication/284604502_Complete_characterisation_of_tensile_properties_of_DuctalR_UHFPFC_according_to_the_French_recommendations
- [117] Orgass, M.; Klug, Y. Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. 1^o International Symposium on UHPC. pp. 637-648, Kassel (Germany), September 13-15, 2004.
- [118] Fehling, E.; Schmidt, M.; Bunje, K.; Schreiber, W. (2004). Ultra-High-Performance Composite Bridge across the River Fulda in Kassel - Conceptual Design, Calculations and Invitation to Tender. Proceedings of the International Symposium on Ultra High-Performance Concrete, (pp. 69-75). Kassel University.
- [119] Reineck, K.; Frettlör, B. (2010). Test on scale effect of UHPFRC under bending and axial forces. 3rd Fib International Congress, (p. 40). Washington DC.
- [120] Kim, D.; Park, S.; Ryu, G.; K. Kyung. Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers. *Journal Construction and Building Materials*, v.25, 2011; p. 4144-4155. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061811001917>
- [121] Hillerborg, A.; Modee, M.; Petersson, P. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Journal Cement and Concrete Research*, n.6, 1976; p.773-781. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884676900077>

- [122] Richard, P.; Cheyrezy, M. Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. in *Concrete Technology Past, Present and Future*, 1994, Detroit, Michigan. American Concrete Institute. pp. 507-518.
- [123] RILEM TC50. (1985). Determination of Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18(106), 285-290.
- [124] Ayan, E.; Saatçioğlu, Ö.; Turanlı, L. Parameter optimization on compressive strength of steel fiber reinforced high strength concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.25, 2011; p.2837-2844. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061810007427>
- [125] Uysal, Mucteba. Taguchi and Anova approach for optimization of design parameters on the compressive strength of HSC. *Journal Magazine of Concrete Research*, v.64, 2012; p.727-735. <http://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/mac.11.00156>
- [126] Yoon, S.; Monteiro, P.; Macphee, D.; Glasser, F.; Salah, M. Statistical evaluation of the mechanical properties of high-volume class F fly ash concretes. *Journal Construction and Building Materials*, v.54, 2014; p.432-442. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061813012348>
- [127] Mukharjee, B. and Barai, S. Assessment of the influence of Nano-Silica on the behavior of mortar using factorial design of experiments. *Journal Construction and Building Materials*, v.68, 2014.
- [128] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados-Amostragem - NBR NM-26, Rio de Janeiro, 2009.
- [129] EMMA. [http://minhateca.com.br/clubedoconcreto/emma+elkem,674040748.rar\(archive\)](http://minhateca.com.br/clubedoconcreto/emma+elkem,674040748.rar(archive))
- [130] EUROPEAN STANDARD EN 12390-3. Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens, December 2001.
- [131] JBL Eco Reciclagens Eireli. <http://www.jbl.eco.br/>
- [132] Andrade, Iara. (2007). Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. USP.
- [133] ANSYS Inc. ANSYS Help System, version 19.2 Canonsburg, 2018.
- [134] Máxima software. wxMaxima version 17.10.1
- [135] Seong, L.; Han, K.; Changbin, J. Inverse Analysis of UHPFRC Beams with a Notch to Evaluate Tensile Behavior. *Journal Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 1, pp. 1-10, 2017.
- [136] ACI 233R-95. Ground granulate blast-furnace slag cementitious constituent in concrete. <https://pt.scribd.com/document/47529466/Granulated-blastfurnace-slag>
- [137] Mahmud, G.; Yang, Z.; and Hassan, A. Experimental and numerical studies of size effects of Ultra High Performance Steel Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) beams. *Journal Construction and Building Materials*, v.48, 2013; p.1027–1034. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.061>

- [138] Singh, M.; Sheikh, A.; Ali, M. Visintin, P. and Griffith, M. Experimental and numerical studies of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. *Journal Construction and Building Materials*, v.138, 2017; p.12–25.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.002>
- [139] Osta, M.; Isa, M.; Baluch, and Rahman, M. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Journal Construction and Building Materials*, v.134, 2017; p.279–296.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>
- [140] ACI Committee 363R. Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete.
<http://file.yizimg.com/395203/2012101711414749.pdf>
- [141] ACI Committee 318-05. Building code requirements for structural concrete.
http://www.sinfra.oaxaca.gob.mx/wp-content/uploads/2016/02/aci_318-05_building_code_requirements_for_structural_concrete_and_commentary_aci_318r-05.pdf
- [142] Ma, J.; Orgass, M. ; Dehn, F. ; Schmidt, D. Comparative investigation on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregate. *Proceeding International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC)*, Kassel, Germania. .

APÉNDICES

Viene de 5.3.1 y de 7.1.1. Etapa I: Conociendo UHPRC

Grados de libertad requeridos

Designación	Grados de libertad
A	2
B	2
C	2
D	1
A x B	4
A x C	4
A x D	2
B x C	4
B x D	2
C x D	2
A x B x C	8
B x C x D	4
C x D x A	4
D x A x B	4
A x B x C x D	8
Média general	1
Total	52

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 7 días:

A1 7 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
D1	50,28	83,00	109,07	61,95	78,83	89,73	54,46	76,52	119,66
	50,61	83,91	103,34	63,89	81,08	89,59	55,13	73,04	118,91
	53,21	83,93	104,50	62,80	82,11	88,35	57,13	72,14	118,14
D2	59,42	95,15	87,55	68,55	68,32	84,96	79,24	78,93	96,80
	60,73	93,80	96,68	69,81	69,30	87,24	79,85	76,21	96,18
	59,86	95,12	94,16	71,99	67,55	86,93	74,93	76,10	93,01

Promedio:

A1 7 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3	
D1	51,37	83,61	105,64	62,88	80,67	89,22	55,57	73,90	118,90
D2	60,00	94,69	92,80	70,12	68,39	86,37	78,01	77,08	95,33

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 14 días:

A2 14 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	57,02	105,03	118,45	68,09	64,90	94,20	60,23	63,56	121,81
	58,90	101,45	120,06	64,25	67,55	92,26	62,26	60,56	124,72
	56,94	104,16	120,20	60,60	61,40	97,16	59,75	63,54	128,98
D2	68,16	94,70	96,25	81,99	81,99	90,13	84,36	99,93	109,51
	69,89	96,26	96,69	84,03	86,47	91,52	79,59	97,79	112,68
	61,82	99,09	96,14	81,06	85,68	93,99	89,52	98,40	113,05

Promedio:

A2 14 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	57,62	103,55	119,57	64,31	64,62	94,54	60,75	62,55	125,17
D2	66,62	96,68	96,36	82,36	84,71	91,88	84,49	98,71	111,75

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 28 días:

A3 28 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	72,84	111,82	135,88	44,04	94,33	122,34	85,64	102,23	135,74
	71,94	112,90	136,66	46,41	98,63	120,47	92,03	97,47	134,62
	70,51	113,75	141,82	47,69	102,47	122,40	92,27	104,96	134,57
D2	80,87	116,97	120,33	93,85	108,51	113,10	112,09	101,28	112,63
	79,09	116,31	123,95	94,02	107,46	115,56	109,92	97,09	117,57
	81,93	115,82	120,24	94,35	101,75	116,05	108,37	101,54	121,90

Promedio:

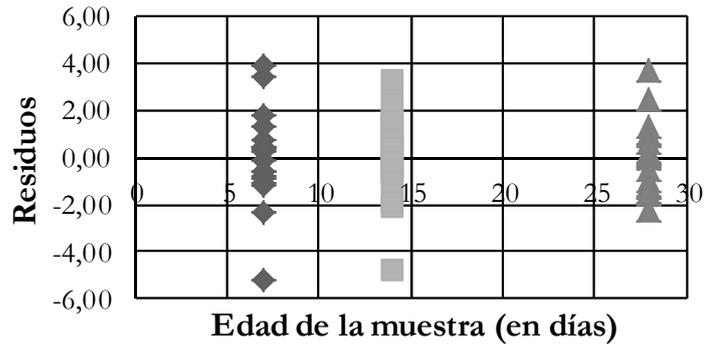
A3 28 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
D1	71,76	112,82	138,12	46,05	98,48	121,74	89,98	101,55	134,98
D2	80,63	116,37	121,51	94,07	105,91	114,90	110,13	99,97	117,37

Planilla de residuos

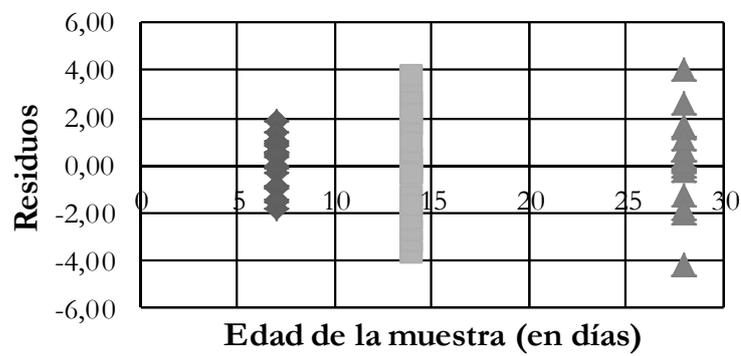
A1 7 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
	-1,09	-0,61	3,43	-0,93	-1,84	0,50	-1,11	2,62	0,76
D1	-0,76	0,30	-2,30	1,01	0,41	0,37	-0,44	-0,86	0,01
	1,84	0,32	-1,14	-0,08	1,43	-0,87	1,56	-1,76	-0,76
	-0,58	0,46	-5,25	-1,57	-0,07	-1,42	1,24	1,85	1,47
D2	0,73	-0,89	3,88	-0,31	0,91	0,86	1,84	-0,87	0,85
	-0,15	0,43	1,37	1,87	-0,84	0,56	-3,07	-0,98	-2,32

A2 14 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
	-0,60	1,48	-1,12	3,78	0,28	-0,34	-0,52	1,01	-3,36
D1	1,29	-2,10	0,49	-0,06	2,93	-2,28	1,51	-1,99	-0,45
	-0,68	0,61	0,63	-3,71	-3,22	2,62	-1,00	0,99	3,81
	1,54	-1,98	-0,11	-0,37	-2,72	-1,75	-0,13	1,22	-2,24
D2	3,27	-0,42	0,33	1,67	1,76	-0,36	-4,90	-0,92	0,93
	-4,80	2,41	-0,22	-1,30	0,97	2,11	5,03	-0,31	1,30

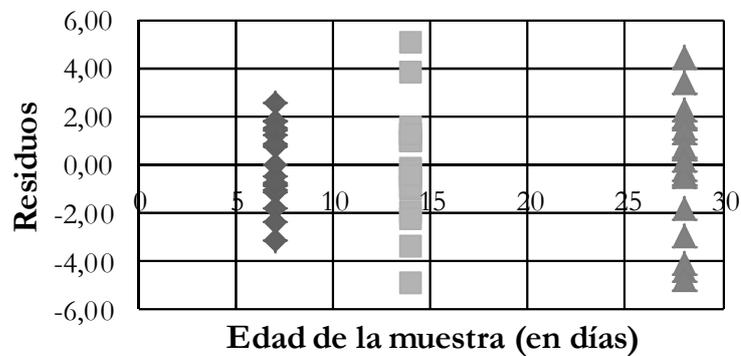
A3 28 Dias									
B1 (GGBS-1)			B2 (GGBS-2)			B3 (GGBS-3)			
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
	1,08	-1,01	-2,24	-2,01	-4,14	0,61	-4,34	0,68	0,76
D1	0,18	0,08	-1,46	0,37	0,15	-1,27	2,05	-4,08	-0,36
	-1,25	0,93	3,70	1,64	3,99	0,66	2,29	3,41	-0,40
	0,24	0,60	-1,18	-0,22	2,60	-1,80	1,96	1,31	-4,74
D2	-1,54	-0,05	2,44	-0,05	1,55	0,66	-0,21	-2,88	0,20
	1,30	-0,55	-1,27	0,27	-4,16	1,15	-1,76	1,57	4,53



Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-1



Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-2



Edad de la muestra & desvíos residuales para la mistura UHPRC-3

Viene de 5.2.1 y de 7.1.2. Etapa II: Desarrollando UHPFRC con macrofibras

Grados de libertad requeridos

Designación	GDL
A	2
B	3
C	2
D	1
AB	6
AC	4
AD	2
BC	6
BD	3
CD	2
ABC	12
BCD	6
CDA	4
DAB	6
ABCD	12
Media general	1
Total	72

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 7 días:

A1 7 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	
104,15	90,53	119,51	97,56	92,31	103,07	119,42	100,84	130,06	115,06	104,61	119,52	
D1	105,74	88,89	121,74	94,97	96,12	100,64	120,83	94,49	131,13	121,68	100,90	120,31
	104,75	89,02	124,24	98,39	90,81	104,70	121,07	102,17	131,13	114,60	105,03	125,99
	84,21	62,73	89,18	71,83	80,25	78,43	90,31	72,26	98,51	82,47	74,35	82,11
D2	86,75	65,93	88,18	70,28	80,20	78,74	93,26	70,20	96,72	89,11	74,92	83,77
	86,87	67,13	86,85	70,61	82,56	75,92	92,38	71,89	101,31	82,05	80,75	78,70

Promedio:

A1 7 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	
D1	104,88	89,48	121,83	96,97	93,08	102,80	120,44	99,17	130,77	117,11	103,51	121,94
D2	85,94	65,26	88,07	70,91	81,00	77,70	91,98	71,45	98,85	84,54	76,67	81,53

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 28 días:

		A2 28 Dias											
		B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4		
		C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A
D1		111,67	96,99	118,09	111,23	89,47	124,62	108,65	88,01	129,91	121,57	106,14	128,24
		109,67	100,92	120,23	105,95	82,93	127,70	102,78	91,32	135,52	122,41	108,02	126,40
		105,09	99,65	118,37	101,30	83,10	122,17	102,75	92,51	131,07	121,09	104,78	125,75
D2		95,10	85,20	104,60	86,05	59,70	103,88	70,07	73,03	113,90	84,57	84,64	89,35
		92,64	87,71	108,97	92,21	58,80	109,63	76,96	69,65	113,32	83,33	83,01	93,86
		89,64	91,16	108,80	95,62	55,73	100,98	75,78	69,33	112,66	85,73	84,19	94,35

Promedio:

		A2 28 Dias											
		B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4		
		C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A
D1		108,81	99,19	118,90	106,16	85,17	124,83	104,73	90,61	132,17	121,69	106,31	126,80
D2		92,46	88,02	107,46	91,29	58,08	104,83	74,27	70,67	113,29	84,54	83,95	92,52

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 90 días:

		A3 90 Dias											
		B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4		
		C1-S	C2-P	C3-A									
D1		122,87	104,51	143,03	125,09	100,46	126,46	126,49	119,42	132,95	102,56	99,04	132,95
		127,07	104,23	141,42	118,01	101,19	126,91	131,57	126,00	131,76	108,48	99,59	123,49
		131,57	110,55	135,58	117,25	105,70	126,53	135,78	118,11	131,42	104,77	105,34	127,92
D2		111,15	116,85	120,96	112,78	122,55	109,29	103,92	82,35	121,64	91,38	97,59	105,05
		113,71	113,58	124,82	114,04	118,26	112,13	101,78	76,46	124,79	100,92	93,91	110,85
		114,47	116,21	119,38	107,80	121,89	107,33	108,98	74,42	127,70	96,77	97,79	104,67

Promedio:

		A3 90 Dias											
		B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4		
		C1-S	C2-P	C3-A									
D1		127,17	106,43	140,01	120,12	102,45	126,63	131,28	121,18	132,04	105,27	101,32	128,12
D2		113,11	115,55	121,72	111,54	120,90	109,58	104,89	77,74	124,71	96,36	96,43	106,86

Planilla de residuos

A1 7 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A
	0,73	-1,05	2,32	-0,59	0,77	-0,27	1,02	-1,67	0,71	2,05	-1,10	2,42
D1	-0,86	0,59	0,09	2,00	-3,04	2,16	-0,39	4,68	-0,36	-4,57	2,61	1,63
	0,13	0,46	-2,41	-1,42	2,27	-1,90	-0,63	-3,00	-0,36	2,51	-1,52	-4,05
	1,73	2,53	-1,11	-0,92	0,75	-0,73	1,67	-0,81	0,34	2,07	2,32	-0,58
D1	-0,81	-0,66	-0,11	0,63	0,81	-1,04	-1,28	1,25	2,13	-4,57	1,75	-2,24
	-0,93	-1,87	1,22	0,30	-1,56	1,78	-0,40	-0,44	-2,46	2,49	-4,08	2,83

A2 28 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A
	-2,86	2,20	0,81	-5,07	-4,30	0,21	-3,92	2,60	2,26	0,12	0,17	-1,44
D1	-0,86	-1,73	-1,33	0,21	2,24	-2,87	1,95	-0,71	-3,35	-0,72	-1,71	0,40
	3,72	-0,46	0,53	4,86	2,07	2,66	1,98	-1,90	1,10	0,60	1,53	1,05
	-2,64	2,82	2,86	5,24	-1,62	0,95	4,20	-2,36	-0,61	-0,03	-0,70	3,17
D1	-0,18	0,31	-1,51	-0,92	-0,72	-4,80	-2,69	1,02	-0,03	1,22	0,94	-1,34
	2,82	-3,14	-1,34	-4,33	2,35	3,85	-1,51	1,34	0,63	-1,19	-0,24	-1,83

A3 90 Dias												
B1: UHPFRC-1			B2: UHPFRC-2			B3: UHPFRC-3			B4: UHPFRC-4			
	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A	C1-S	C2-P	C3-A
	4,30	1,92	-3,02	-4,97	1,99	0,17	4,79	1,76	-0,91	2,71	2,28	-4,83
D1	0,10	2,20	-1,41	2,11	1,26	-0,28	-0,29	-4,83	0,28	-3,21	1,73	4,63
	-4,40	-4,12	4,43	2,87	-3,25	0,10	-4,50	3,07	0,62	0,50	-4,02	0,20
	1,96	-1,30	0,76	-1,24	-1,65	0,30	0,97	-4,61	3,07	4,98	-1,16	1,81
D1	-0,60	1,97	-3,10	-2,50	2,64	-2,55	3,11	1,29	-0,08	-4,56	2,52	-3,99
	-1,36	-0,66	2,34	3,74	-0,99	2,25	-4,09	3,32	-2,99	-0,41	-1,36	2,19

Viene de 5.3.1 y de 7.1.3. Etapa III: Desarrollando UHPFRC con microfibras

Grados de libertad requeridos

Designación	GDL
A	2
B	1
C	2
AB	2
AC	4
BC	2
ABC	4
Media gener:	1
Total	18

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 7 días:

A1 7 Dias					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
124,92	146,45	150,30	128,91	118,38	133,29
136,16	147,90	141,30	125,62	121,97	132,43
130,00	151,32	144,82	131,58	128,25	131,59

Promedio:

A1 7 Dias					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
130,36	148,56	145,47	128,70	122,87	132,44

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 28 días:

A2 28 Dias					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
125,68	155,93	136,42	119,22	147,53	147,01
130,30	158,01	139,00	118,92	146,46	152,11
135,29	151,92	132,56	118,13	151,42	159,04

Promedio:

A2 28 Días					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
130,42	155,29	135,99	118,76	148,47	152,72

Resistencia a la Compresión (MPa) a los 90 días:

A3 90 Días					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
121,63	144,25	145,99	131,46	148,22	130,60
121,81	140,05	144,38	137,71	147,48	134,41
127,00	133,78	138,32	128,80	144,80	131,46

Promedio:

A3 90 Días					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
123,48	139,36	142,90	132,66	146,83	132,16

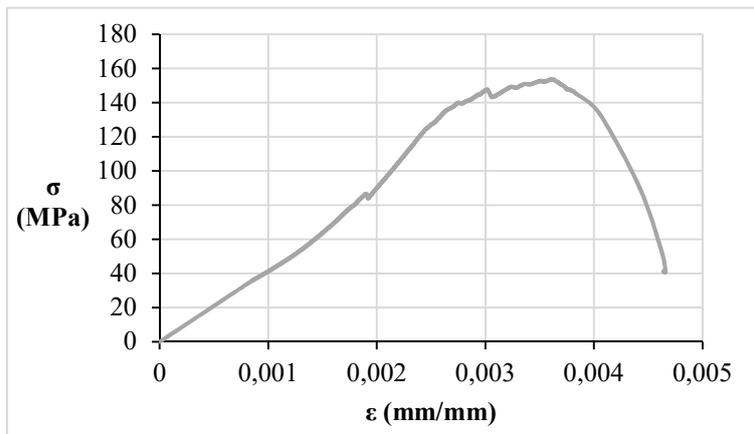
Planilla de residuos

A1 7 Días					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
descartado	-2,11	4,83	0,21	-4,49	0,85
-5,44	-0,66	-4,17	-3,08	-0,90	descartado
5,80	2,76	-0,66	2,88	5,38	-0,01
-0,36	descartado	descartado	descartado	descartado	-0,85

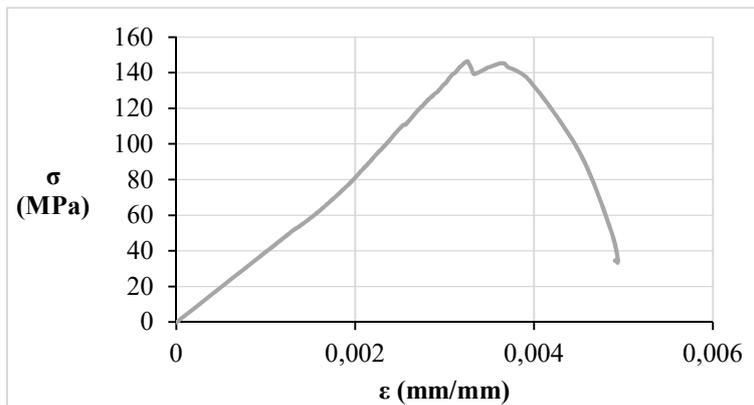
A2 28 Días					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
-4,74	descartado	0,43	-0,15	descartado	descartado
-0,13	0,64	descartado	0,51	-0,94	-5,71
descartado	2,72	3,01	0,21	-2,01	-0,61
4,87	-3,37	-3,43	-0,58	2,95	6,32

A3 90 Dias					
B1 (CP=5cm)			B2 (CP=7,5cm)		
C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)	C1 (0%)	C2 (1%)	C3 (1,5%)
-1,85	4,89	1,48	descartado	-1,94	-1,56
-1,67	0,69	-4,58	-1,20	2,03	descartado
3,52	descartado	-4,58	5,05	1,29	2,25
descartado	-5,58	descartado	-3,86	-1,39	-0,70

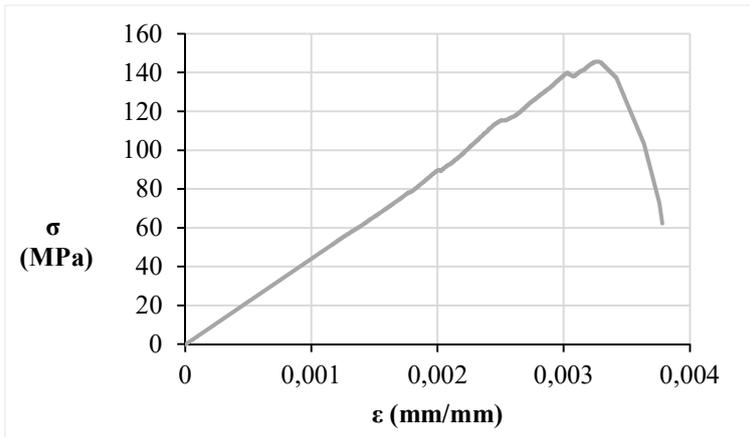
Viene de 7.1.4. Etapa IV: Relaciones constitutivas del UHPFRC



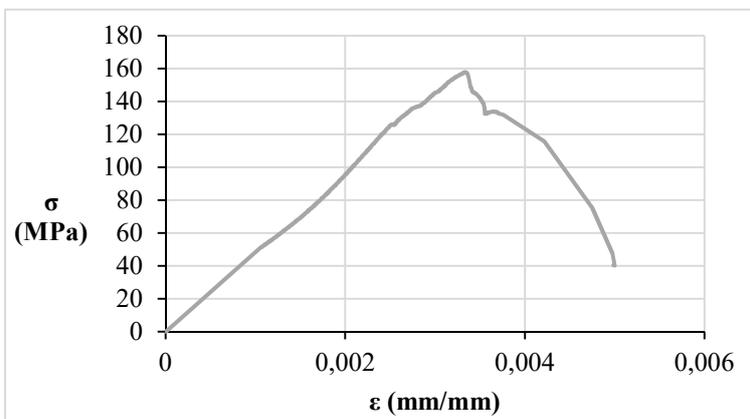
$f_c =$	153,83	MPa
$\epsilon =$	0,0036	mm/mm



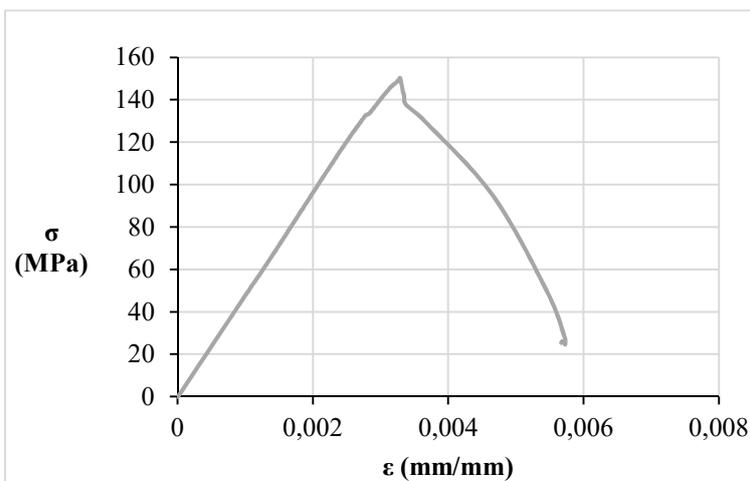
$f_c =$	146,50	MPa
$\epsilon =$	0,0032	mm/mm



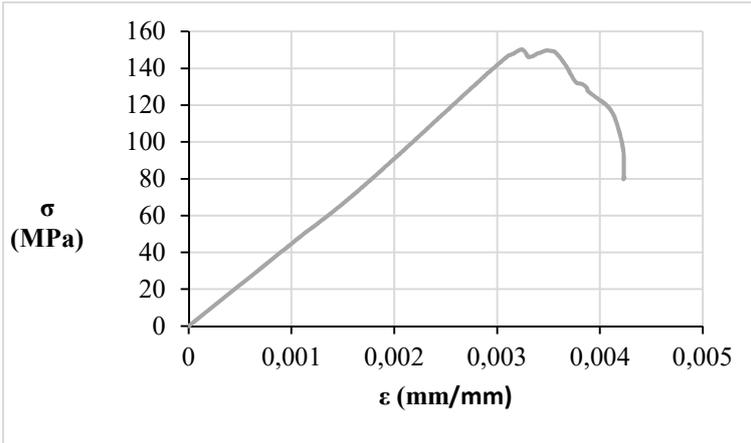
$f_c =$	145,64	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



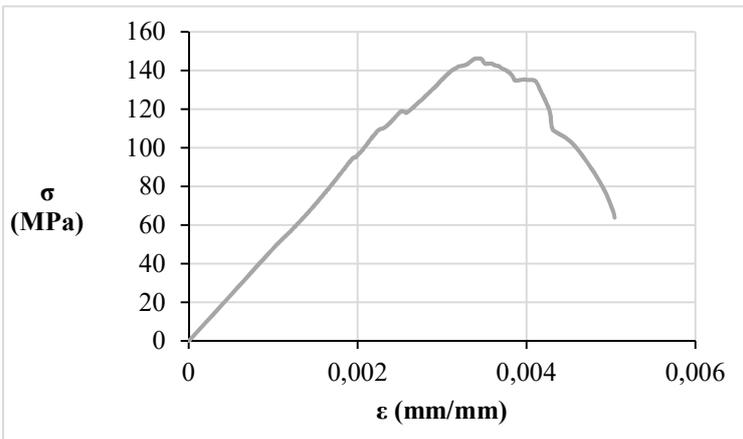
$f_c =$	157,77	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



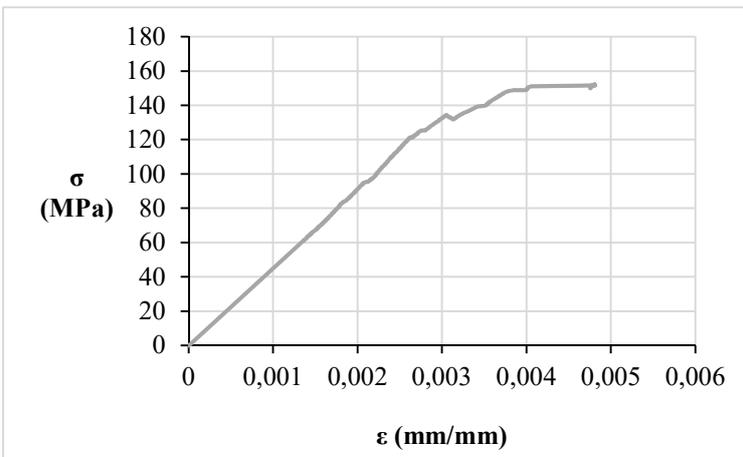
$f_c =$	150,35	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



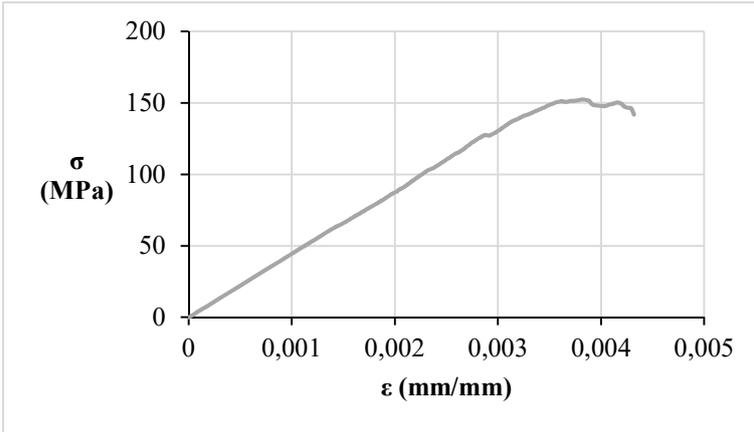
$f_c =$	150,42	MPa
$\epsilon =$	0,0032	mm/mm



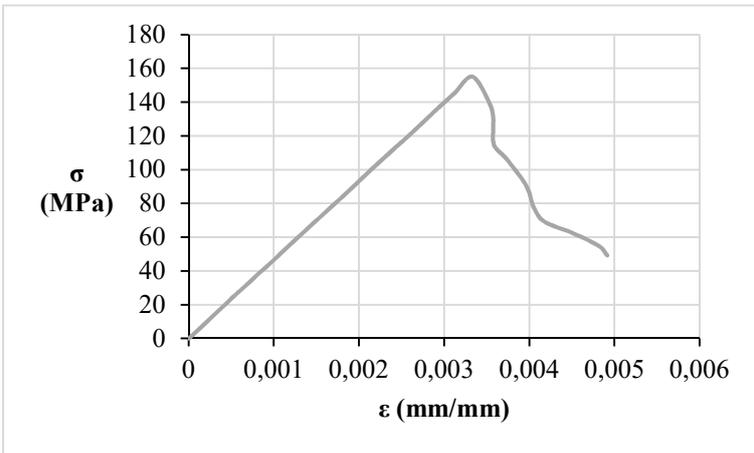
$f_c =$	146,42	MPa
$\epsilon =$	0,0034	mm/mm



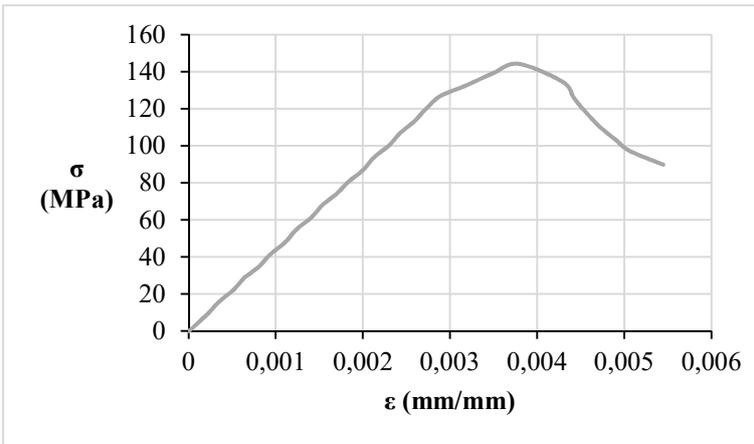
$f_c =$	152,40	MPa
$\epsilon =$	0,0048	mm/mm



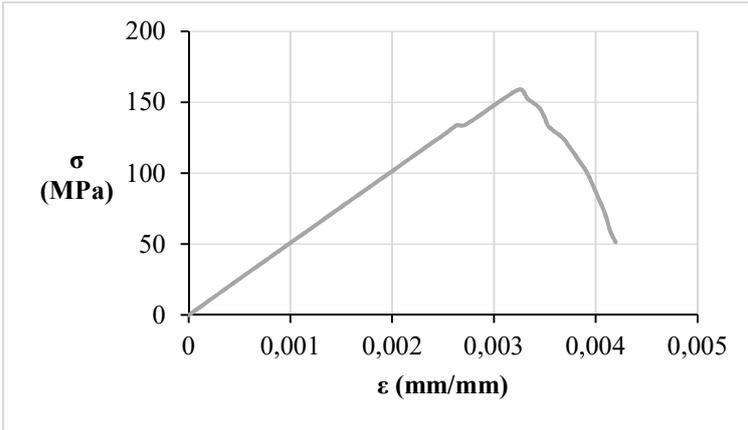
$f_c =$	152,62	MPa
$\epsilon =$	0,0038	mm/mm



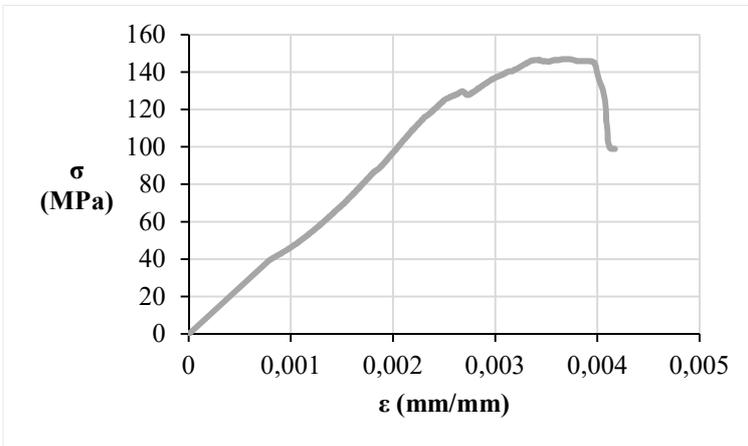
$f_c =$	155,21	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



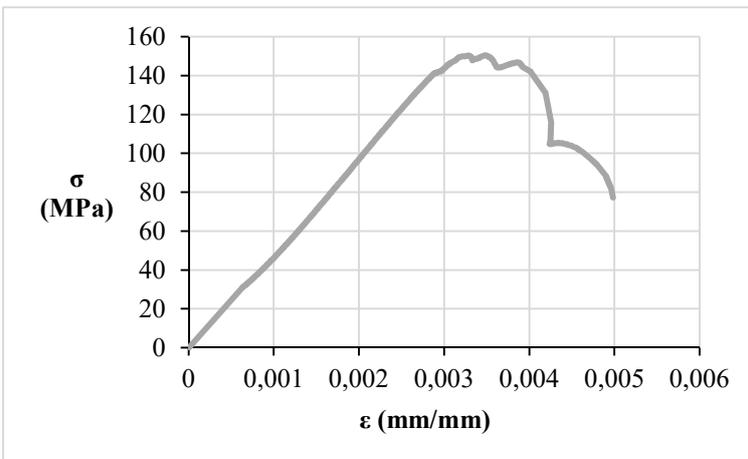
$f_c =$	144,38	MPa
$\epsilon =$	0,0038	mm/mm



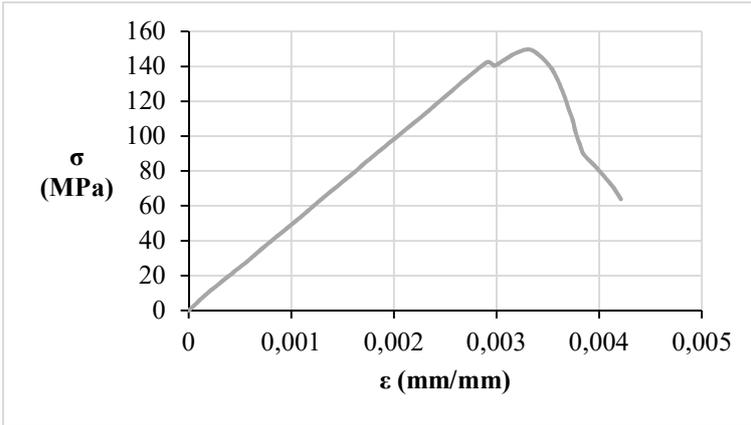
$f_c =$	159,23	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



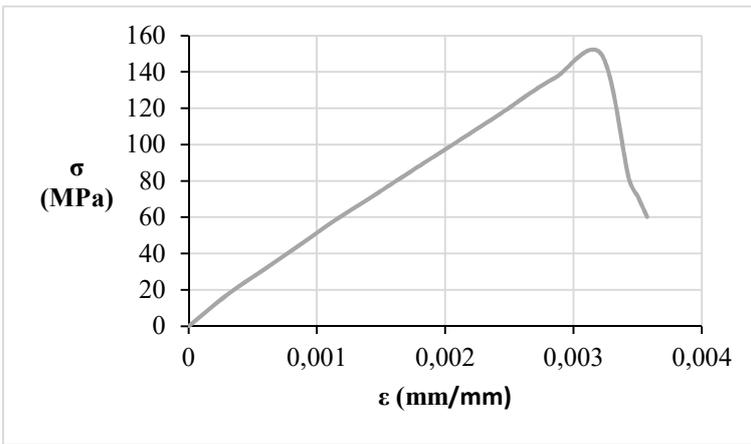
$f_c =$	146,92	MPa
$\epsilon =$	0,0037	mm/mm



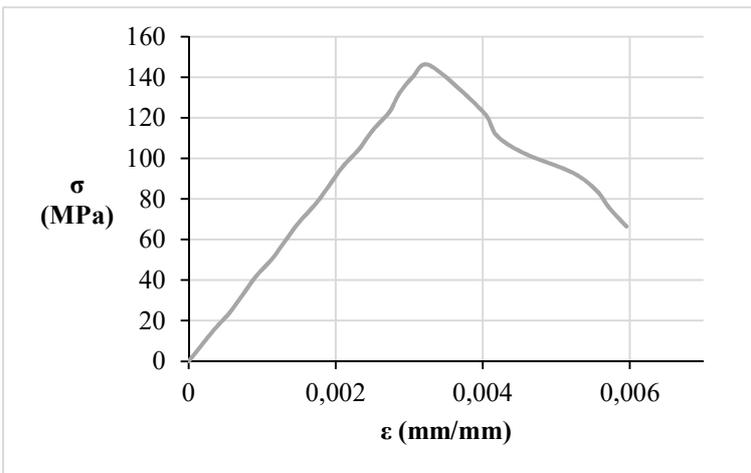
$f_c =$	150,41	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



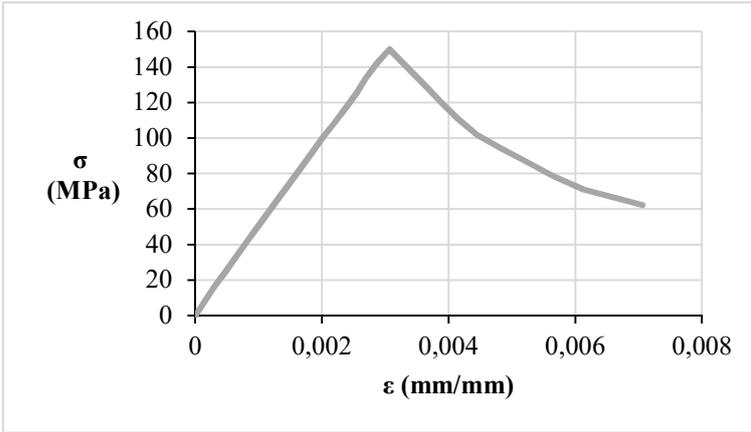
$f_c =$	149,86	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



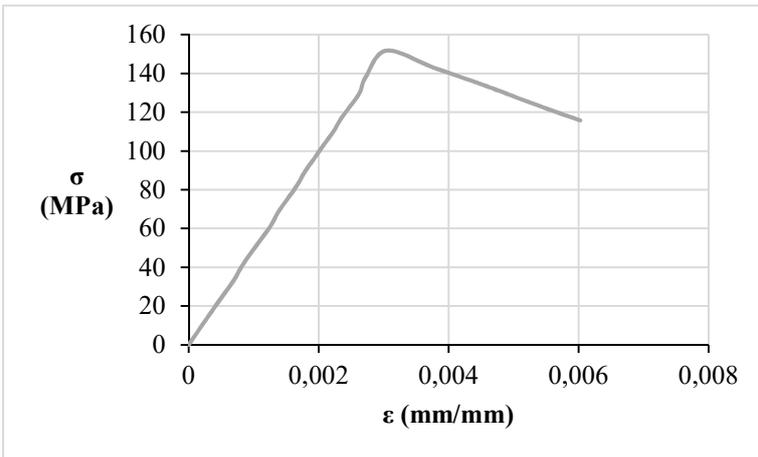
$f_c =$	149,86	MPa
$\epsilon =$	0,0032	mm/mm



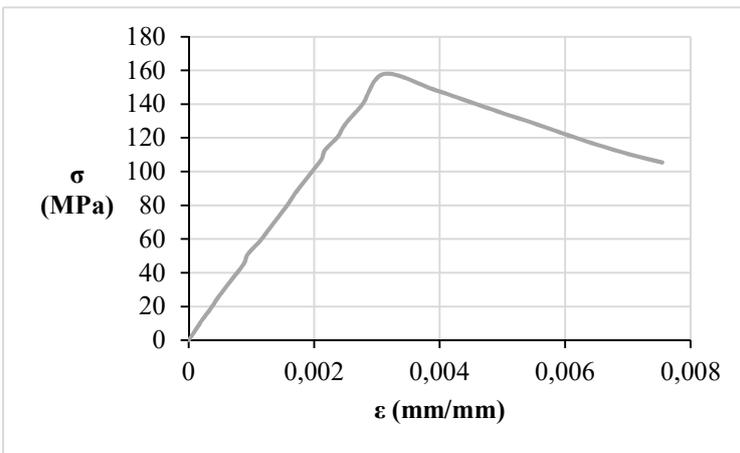
$f_c =$	145,98	MPa
$\epsilon =$	0,0033	mm/mm



fc=	150,03	MPa
ε =	0,0031	mm/mm

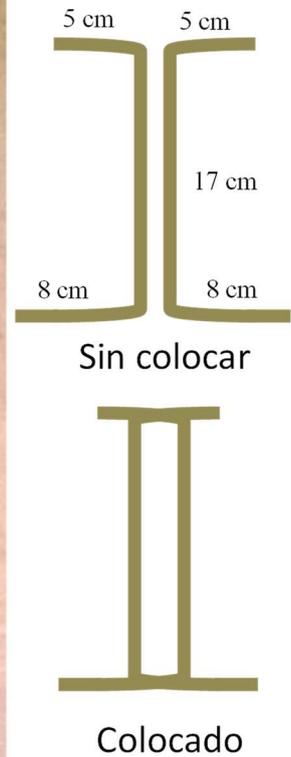
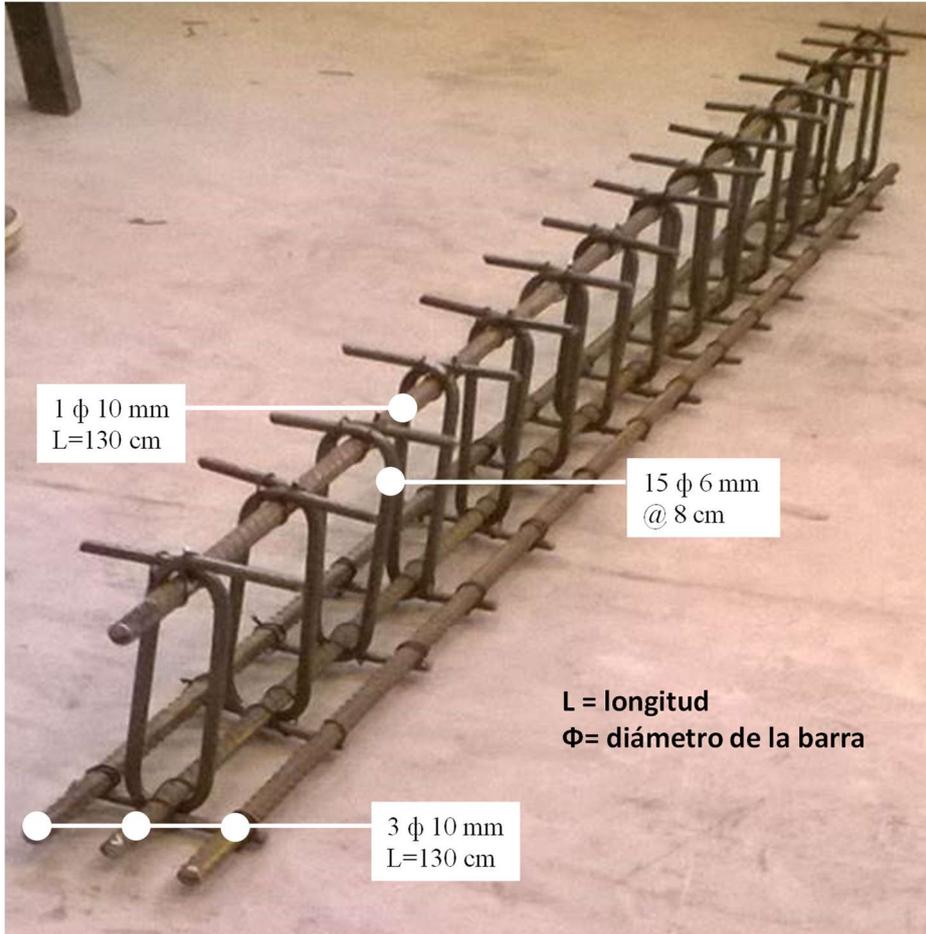


fc=	151,92	MPa
ε =	0,0030	mm/mm



fc=	158,01	MPa
ε =	0,0031	mm/mm

Viene de 5.5.2 y 6.4



Viene del Capítulo 8:

MODELAJE COMPUTACIONAL USANDO SOLID185 EN MINIVIGAS

```

*****
!TESE ROSI: VIGAS 10X10X40 CON 2% MINI FIBRAS UNIAXIAL-C-AI cp-5
!*****
!ACABAR UNA ETAPA Y COMENZAR EL NIVEL CON MEMORIA LIMPIA DESDE CERO
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!*****
!      FORMATACIÓN
!*****
!COMANDOS PARA DEJAR EL FONDO BLANCO
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/RELOT
! OPCIONES DE LA FUENTE
/dev,font,1,Courier*New,400,0,-16,0,0,,
!*****
! PREPROCESADOR-ENTRADA DEL MODELO
!*****
/PREP7
    
```

```

!*****
! PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
!*****
FC1=15.1      ! Resistencia a la compresión de la matriz (kN/cm2)
FT1=0.9331    ! Resistencia a la tracción de la matriz (kN/cm2)
EC1=4770.7964496909 ! Módulo de Elasticidad del concreto a compresión (kN/cm2)
FY1=173.81    ! Esfuerzo de fluencia de las fibras de acero (kN/cm2)
ES=2.1E4      ! Módulo de Elasticidad de las fibras de acero (kN/cm2)
vc=0.22       ! Coeficiente de Poisson del concreto
!*****
! DEFINIENDO TIPOS DE ELEMENTOS
!*****
ET,1,SOLID185
KEYOPT,1,2,1
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
!*****
! COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO
!*****
!MODELO NO LINEAL CAST
TB,CAST,1,1
MP,EX,1,EC1
MP,PRXY,1,vc
!COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN
TB,UNIACOMP,1,1,17,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0025807640,12.31230000
TBPT,,0.0033102675,15.08900000
TBPT,,0.005,9.122092406
TBPT,,0.01,5.669306118
TBPT,,0.015,4.561093348
TBPT,,0.02,4.023953814
TBPT,,0.025,3.524504285
TBPT,,0.03,3.074448669
TBPT,,0.0350,2.628683521
TBPT,,0.04,2.516148177
TBPT,,0.045,2.326961973
TBPT,,0.05,2.286325394
TBPT,,0.055,2.274812980
TBPT,,0.06,2.356337454
TBPT,,0.065,2.337447637
TBPT,,0.07,2.306627409
TB,UNIATENS,1,1,12,TENS
TBPT,,0,0
TBPT,,0.000195576477907934,0.933055566446214000
TBPT,,0.00205805298273919*2.5,0.499769058859773000
TBPT,,0.03073336588708710*2.5,0.715906626177301000
TBPT,,0.06060348349578290*2.5,0.784773997441253000
TBPT,,0.12034371871317400*2.5,0.618884312724217000
TBPT,,0.18008395393056600*2.5,0.493159368298985000
TBPT,,0.2398241891479580*2.5,0.414892395386947000
TBPT,,0.29956442436534900*2.5,0.288740085441230000
TBPT,,0.35930465958274100*2.5,0.134400625577096000
TBPT,,0.38917477719143700*2.5,0.083646991108549000
TBPT,,0.47878513001752400*2.5,0.038277836474400400
!*****
! GENERACIÓN DE NODOS
!*****

```

```

N,1,0,0,0
NGEN,21,1,1,,,0,0,0.5
NGEN,21,21,1,21,1,0,0.5,0
NGEN,40,441,1,441,1,0.5,0,0
ngen,4,441,17200,17640,1,0.1,0,0
NGEN,3,315,18649,18963,1,0.1,0,0
!*****
! GENERACIÓN DE ELEMENTOS
!*****
TYPE,1
MAT,1
E,2,1,22,23,443,442,463,464
EGEN,20,1,1
EGEN,20,21,1,20,1
EGEN,42,441,1,400,1
e,18650,18649,18670,18671,18965,18964,18985,18986
!E,2334,2333,2344,2345,2422,2421,2432,2433
EGEN,20,1,16801
EGEN,14,21,16801,16820,1
egen,2,315,16801,17080,1
!*****
! RESTRICCIÓN DE NODOS
!*****
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,5
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,X,20
D,ALL,UX,0
FINISH
!*****
! SOLUCIÓN
!*****
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,0
LNSRCH,0
NLGEOM,ON
NROPT,FULL,,ON
nsubst,100,4000,10,on
!nsubst,100000,400000,400,on
!*****
! TOLERANCIAS
!*****
!CNVTOL,F,,0.2,2,, ! Tolerancia en terminos de fuerza
CNVTOL,U,,0.91,2,, ! Tolerancia en terminos de desplazamiento
AUTOTS,on ! Propiedades de la no-linealidad
TIME,1 ! El tiempo al finalizar el paso es =1
OUTRES,ALL,all ! En cada paso guarda los datos
TUNIF,0 ! Temperatura uniforme igual a cero
!*****
!IMPOSICIÓN DE LA CARGA POR DESPLAZAMIENTO
!*****
NSEL,S,LOC,Y,10 ! NSEL,S: Selección de nodos; LOC,Y,10: localizados en Y=10
NSEL,R,LOC,X,20 ! NSEL,R: Selección de nodos dentro de la selección anterior; LOC,X,20: localizados en
X=20
D,ALL,UY,-0.65 ! D: Imposición de un desplazamiento
ALLSEL ! Seleccionar todo
SOLVE ! Resuelve todo

```

```

FINISH ! Termina
!*****
!      POST-PROCESADOR
!*****
/POST26
NUMVAR,200
/POST26
NUMVAR,200
ADD,200,,FZTOTAL,,0,
*DO,i,1,21,1
    RFORCE,i+1,i+4410,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
*ENDDO
*DO,i,1,21,1
    ADD,200,200,i+1,,FZTOTAL! suma las variables 200 e i+1 y las almacena en la variable 200
*ENDDO
NSOL,190,19583,U,Y,DY
ABS,190,190
ADD,190,190,,DY,,10
abs,200,200
ADD,103,200,,ftotal,,1
/AXLAB,X,DESPLAZ(mm)
/AXLAB,Y,FUERZA(kN)
!/SHOW,JPEG
xvar,190
plvar,103

```

MODELAJE COMPUTACIONAL USANDO SOLID185 EN VIGA-I CON FIBRAS

```

!*****
!TESE ROSI: VIGAS I CON MINI FIBRAS usando AI do CP-2 2%
!*****
!ACABAR UNA ETAPA Y COMENZAR EL NIVEL CON MEMORIA LIMPIA DESDE CERO
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!*****
!      FORMATACIÓN
!*****
!COMANDOS PARA DEJAR EL FONDO BLANCO
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,80,80,80,13
/RGB,INDEX,60,60,60,14
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT
! OPCIONES DE LA FUENTE
/dev,font,1,Courier*New,400,0,-16,0,,
!*****
! PREPROCESADOR-ENTRADA DEL MODELO
!*****
/PREP7
!*****
! PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
!*****
EC1=4770.79644 ! Módulo de Elasticidad del concreto a compresión (kN/cm2)
vc=0.22 ! Coeficiente de Poisson del concreto
!*****
! DEFINIENDO TIPOS DE ELEMENTOS
!*****
ET,1,SOLID185
KEYOPT,1,2,2

```

```

KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
!*****
! COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO
!*****
!MODELO NO LINEAL CAST
TB,CAST,1,1
MP,EX,1,EC1
MP,PRXY,1,vc
!COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN
TB,UNIACOMP,1,1,17,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00258,12.3123
TBPT,,0.00331,15.089
TBPT,,0.005,9.122
TBPT,,0.01,5.669
TBPT,,0.015,4.561
TBPT,,0.02,4.0239
TBPT,,0.025,3.524
TBPT,,0.030,3.074
TBPT,,0.035,2.628
TBPT,,0.04,2.5161
TBPT,,0.045,2.326
TBPT,,0.05,2.2863
TBPT,,0.055,2.274
TBPT,,0.06,2.3563
TBPT,,0.065,2.337
TBPT,,0.07,2.3066
TB,UNIATENS,1,1,19,TENS
TBPT,,0,0
TBPT,,0.0001023,0.488257
TBPT,,0.0001582,0.754857
TBPT,,0.0001985,0.947302
TBPT,,0.0002197,1.048379
TBPT,,0.0002340,1.116445
TBPT,,0.0002591,1.236115
TBPT,,0.0002912,1.389448
TBPT,,0.0131642,0.651054
TBPT,,0.0512405,0.670786
TBPT,,0.0909034,0.676768
TBPT,,0.1702291,0.584324
TBPT,,0.2495548,0.415521
TBPT,,0.3288805,0.308573
TBPT,,0.4082062,0.137306
TBPT,,0.4875319,0.134512
TBPT,,0.5271947,0.196836
TBPT,,0.5668576,0.043828
TBPT,,0.5668576,0
!*****
! GENERACIÓN DE NODOS
!*****
N,1,0,0,0
NGEN,7,1,1,,0,0,2.5
NGEN,3,7,1,7,1,0,2.5,0
NGEN,2,5,17,19,1,0,2.5,0
NGEN,3,3,22,24,1,0,2.5,0
NGEN,2,30,1,7,1,0,15,0
NGEN,3,7,31,37,1,0,2.5,0

```

```

NGEN,55,51,1,51,1,2.5,0,0
!*****
! GENERACIÓN DE ELEMENTOS
!*****
TYPE,1
MAT,1
E,2,1,8,9,53,52,59,60
EGEN,6,1,1
EGEN,2,7,1,6,1
E,18,17,22,23,69,68,73,74
EGEN,2,1,13
E,23,22,25,26,74,73,76,77
EGEN,2,1,15
EGEN,2,3,15,16,1
E,29,28,33,34,80,79,84,85
EGEN,2,1,19
EGEN,2,30,1,12,1
EGEN,54,51,1,32,1
!*****
! RESTRICCIÓN DE NODOS
!*****
NSEL,S,LOC,x,7.5
NSEL,R,LOC,y,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,X,127.5
NSEL,R,LOC,y,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UX,0
FINISH
!*****
! SOLUCIÓN
!*****
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,0
LNSRCH,0
NLGEOM,ON
NROPT,FULL,,ON
nsubst,100000,400000,400,on
!*****
! TOLERANCIAS
!*****
CNVTOL,U,,0.91,2,, ! Tolerancia en terminos de desplazamiento
AUTOTS,on ! Propiedades de la no-linealidad
TIME,1 ! El tiempo al finalizar el paso es =1
OUTRES,ALL,all ! En cada paso guarda los datos
TUNIF,0 ! Temperatura uniforme igual a cero
!*****
!IMPOSICIÓN DE LA CARGA POR DESPLAZAMIENTO
!*****
NSEL,S,node,,1014,1020,1
NSEL,a,node,,1830,1836,1
D,all,UY,-0.6
ALLSEL ! Seleccionar todo
SOLVE ! Resuelve todo
FINISH ! Termina
!*****
! POST-PROCESADOR

```

```

!*****
/POST26
NUMVAR,200
/POST26
NUMVAR,200
ADD,200,,,FZTOTAL,,,0,
*DO,i,1,7,1
    RFORCE,2,i+1013,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
    ADD,200,200,2,,FyTOTAL
*ENDDO
*DO,i,1,7,1
    RFORCE,2,i+1829,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
    ADD,200,200,2,,FyTOTAL
*ENDDO
NSOL,190,1381,U,Y,DY
ABS,190,190
ADD,190,190,,,DY,,,10
abs,200,200
ADD,103,200,,,ftotal,,,1
/AXLAB,X,DESPLAZ(mm)
/AXLAB,Y,fUERZA(kN)
!/SHOW,JPEG
xvar,190
plvar,103

```

MODELAJE COMPUTACIONAL USANDO SOLID65 EN MINIVIGAS

```

!*****
! TESE ROSI: VIGAS 10X10X40 CON MINI FIBRAS DE ACERO DE L=13mm AL 1%
!*****
!ACABAR UNA ETAPA Y COMENZAR EL NIVEL CON MEMORIA LIMPIA DESDE CERO
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!*****
!      FORMATACIÓN
!*****
!COMANDOS PARA DEJAR EL FONDO BLANCO
/RGB,INDEX,100,100,100, 0
/RGB,INDEX, 80, 80, 80,13
/RGB,INDEX, 60, 60, 60,14
/RGB,INDEX, 0, 0, 0,15
/REPLOT
! OPCIONES DE LA FUENTE
/dev,font,1,Courier*New,400,0,-16,0,0,,
!*****
! PREPROCESADOR-ENTRADA DEL MODELO
!*****
/PREP7
!*****
! PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
!*****
FC1=15.1      ! Resistencia a la compresión de la matriz (kN/cm2)
FT1=1.22     ! Resistencia a la tracción de la matriz (kN/cm2)
EC1=4770.796 ! Módulo de Elasticidad del concreto a compresión (kN/cm2)
FY1=70.0     ! Esfuerzo de fluencia de las fibras de acero (kN/cm2)
ES=2.1E4     ! Módulo de Elasticidad de las fibras de acero (kN/cm2)
vc=0.22      ! Coeficiente de Poisson del concreto
vca=0.3      ! Coeficiente de Poisson del concreto
!*****

```

```

! DEFINIENDO TIPOS DE ELEMENTOS
!*****
ET,1,SOLID65
KEYOPT,1,1,0
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,5,0
KEYOPT,1,6,0
KEYOPT,1,7,1
KEYOPT,1,8,0
!*****
! COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO
!*****
MP,EX,1,EC1
MP,NUXY,1,vc
TB,CONCR,1
TBDATA,3,FT1,FC1
!*****
! COMPORTAMIENTO DEL ACERO DE LAS FIBRAS
!*****
MP,EX,2,ES
MP,PRXY,2,vca
TB,BKIN,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,1,FY1,0
!*****
!   CONSTANTES REALES
!*****
R,1,2,0.007,0,1.5708
!*****
!   GENERACIÓN DE NODOS
!*****
N,1,0,0,0
NGEN,11,1,1,,0,1
NGEN,11,11,1,11,1,0,1,0
NGEN,20,121,1,121,1,1,0,0
NGEN,2,88,2333,2420,1,1,0,0
!*****
!   GENERACIÓN DE ELEMENTOS
!*****
TYPE,1
MAT,1
real,1
E,2,1,12,13,123,122,133,134
EGEN,10,1,1
EGEN,10,11,1,10,1
EGEN,19,121,1,100,1
E,2334,2333,2344,2345,2422,2421,2432,2433
EGEN,10,1,1901
EGEN,7,11,1901,1910,1
!*****
!   RESTRICCIÓN DE NODOS
!*****
NSEL,S,LOC,Y,0
NSEL,R,LOC,X,5
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,X,20
D,ALL,UX,0
FINISH

```

```

!*****
!      SOLUCIÓN
!*****
/SOLU
SOLCONTROL,ON,,on
ANTYPE,0
LNSRCH,0
NLGEOM,ON
NROPT,FULL,,ON
nsubst,10000,50000,2000,on
!*****
!      TOLERANCIAS
!*****
CNVTOL,U, ,0.1,2, , , ! Tolerancia en terminos de desplazamiento
AUTOTS,on ! Propiedades de la no-linealidad
TIME,1 ! El tiempo al finalizar el paso es =1
OUTRES,ALL,all ! En cada paso guarda los datos
TUNIF, 0 ! Temperatura uniforme igual a cero
!*****
!IMPOSICIÓN DE LA CARGA POR DESPLAZAMIENTO
!*****
NSEL,S,LOC,Y,10 ! NSEL,S: Selección de nodos; LOC,Y,10: localizados en Y=10
NSEL,R,LOC,X,20 ! NSEL,R: Selección de nodos dentro de la selección anterior; LOC,X,20: localizados en
X=20
D,ALL,UY,-0.08 ! D: Imposición de un desplazamiento
ALLSEL ! Seleccionar todo
SOLVE ! Resuelve todo
FINISH ! Termina
!*****
!      POST-PROCESADOR
!*****
/POST26
NUMVAR,200
/POST26
NUMVAR,200
ADD,200,,,FZTOTAL,,0,
*DO,i,1,11,1
    RFORCE,i+1,i+2497,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
*ENDDO
*DO,i,1,11,1
    ADD,200,200,i+1,,FZTOTAL! suma las variables 200 e i+1 y las almacena en la variable 200
*ENDDO
NSOL,190,2503,U,Y,DY
ABS,190,190
ADD,190,190,,,DY,,,10
abs,200,200
ADD,103,200,,,ftotal,,1
/AXLAB,X,DESPLAZ(mm)
/AXLAB,Y,FUERZA(kN)
!/SHOW,JPEG
xvar,190
plvar,103

```

MODELAJE COMPUTACIONAL USANDO SOLID185 EN VIGA-I CON BARRAS

```

!*****
!TESE ROSI: VIGAS I CON MINI FIBRAS usando AI do CP-2 1%
!PARA 2 BARRAS DE ACERO DE 10mm
!*****

```

```

!ACABAR UNA ETAPA Y COMENZAR EL NIVEL CON MEMORIA LIMPIA DESDE CERO
FINISH
/CLEAR,NOSTART
!*****
!      FORMATACIÓN
!*****
!COMANDOS PARA DEJAR EL FONDO BLANCO
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,80,80,80,13
/RGB,INDEX,60,60,60,14
/RGB,INDEX,0,0,0,15
/REPLOT
! OPCIONES DE LA FUENTE
/dev,font,1,Courier*New,400,0,-16,0,0,,
!*****
! PREPROCESADOR-ENTRADA DEL MODELO
!*****
/PREP7
!*****
! PROPIEDADES DE LOS MATERIALES
!*****
EC1=4770.7964  ! Módulo de Elasticidad del concreto a compresión (kN/cm2)
vc=0.22      ! Coeficiente de Poisson del concreto
!*****
! PARAMETROS DE LAS BARRAS
!*****
ASL=0.785
AST=0.265
!*****
! DEFINIENDO TIPOS DE ELEMENTOS
!*****
ET,1,SOLID185
KEYOPT,1,2,2
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
!*****
! COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO
!*****
!MODELO NO LINEAL CAST
TB,CAST,1,1
MP,EX,1,EC1
MP,PRXY,1,vc
!COMPORTAMIENTO EXPERIMENTAL A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN
TB,UNIACOMP,1,1,17,COMP
TBTEMP,0
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00258,12.3123
TBPT,,0.00331,15.089
TBPT,,0.005,9.122
TBPT,,0.01,5.669
TBPT,,0.015,4.561
TBPT,,0.02,4.0239
TBPT,,0.025,3.524
TBPT,,0.030,3.074
TBPT,,0.035,2.628
TBPT,,0.04,2.5161
TBPT,,0.045,2.326
TBPT,,0.05,2.2863
TBPT,,0.055,2.274

```

```

TBPT,,0.06,2.3563
TBPT,,0.065,2.337
TBPT,,0.07,2.3066
TB,UNIATENS,1,1,20,TENS
TBPT,,0,0
TBPT,,0.00000135,0.00648
TBPT,,0.00005830,0.27814
TBPT,,0.00009187,0.43831
TBPT,,0.00010307,0.49177
TBPT,,0.00012191,0.58162
TBPT,,0.00019279,0.91977
TBPT,,0.00103566,0.30682
TBPT,,0.01132137,0.33704
TBPT,,0.02203566,0.37424
TBPT,,0.04346423,0.34649
TBPT,,0.06489280,0.31239
TBPT,,0.08632137,0.27965
TBPT,,0.10774994,0.27476
TBPT,,0.12917851,0.21915
TBPT,,0.13989280,0.15938
TBPT,,0.15060708,0.19018
TBPT,,0.17203566,0.16360
TBPT,,0.19346423,0.06357
TBPT,,0.21489280,0.02479
!*****
!   MATERIAL 2 ACERO DE LAS BARRAS
!*****
MP,EX,2,ES
MP,PRXY,2,0.3
TB,BKIN,2,1
TBTEMP,0
TBDATA,1,FY1,0
!*****
!   GENERACIÓN DE NODOS
!*****
N,1,0,0,0
NGEN,7,1,1,,0,2.5
NGEN,3,7,1,7,1,0,2.5,0
NGEN,2,5,17,19,1,0,2.5,0
NGEN,3,3,22,24,1,0,2.5,0
NGEN,2,30,1,7,1,0,15,0
NGEN,3,7,31,37,1,0,2.5,0
NGEN,55,51,1,51,1,2.5,0,0
!*****
!   GENERACIÓN DE ELEMENTOS
!*****
TYPE,1
MAT,1
E,2,1,8,9,53,52,59,60
EGEN,6,1,1
EGEN,2,7,1,6,1
E,18,17,22,23,69,68,73,74
EGEN,2,1,13
E,23,22,25,26,74,73,76,77
EGEN,2,1,15
EGEN,2,3,15,16,1
E,29,28,33,34,80,79,84,85
EGEN,2,1,19
EGEN,2,30,1,12,1

```

```

EGEN,54,51,1,32,1
!*****
! GENERACIÓN DE BARRAS LONGITUDINALES
!*****
SECTYPE,2,REINF,DISC
SECDATA,2,ASL,EDGO,3,0.5,1
ESEL,S,ELEM,,2,1698,32
ESEL,A,ELEM,,5,1701,32
SECN,2
EREINF
SECTYPE,3,REINF,DISC
SECDATA,2,ASL,EDGO,3,0,1
ESEL,S,ELEM,,23,1719,32
SECN,3
EREINF
!*****
! GENERACIÓN DE BARRAS TRANSVERSALES
!*****
SECTYPE,4,REINF,DISC
SECDATA,2,AST,EDGO,2,0.5,0
ESEL,S,ELEM,,9,1705,96
ESEL,A,ELEM,,10,1706,96
ESEL,A,ELEM,,13,1709,96
ESEL,A,ELEM,,14,1710,96
ESEL,A,ELEM,,15,1711,96
ESEL,A,ELEM,,16,1712,96
ESEL,A,ELEM,,17,1713,96
ESEL,A,ELEM,,18,1714,96
ESEL,A,ELEM,,19,1715,96
ESEL,A,ELEM,,20,1716,96
ESEL,A,ELEM,,23,1719,96
ESEL,A,ELEM,,24,1720,96
SECN,4
EREINF
SECTYPE,5,REINF,DISC
SECDATA,2,AST,EDGO,1,1,0
ESEL,S,ELEM,,2,1698,96
ESEL,A,ELEM,,3,1699,96
ESEL,A,ELEM,,4,1700,96
SECN,5
EREINF
SECTYPE,6,REINF,DISC
SECDATA,2,AST,EDGO,1,1,0
ESEL,S,ELEM,,3,1699,96
ESEL,A,ELEM,,4,1700,96
ESEL,A,ELEM,,5,1701,96
SECN,6
EREINF
!*****
! RESTRICCIÓN DE NODOS
!*****
NSEL,S,LOC,x,7.5
NSEL,R,LOC,y,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,S,LOC,X,127.5
NSEL,R,LOC,y,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UX,0

```

```

FINISH
!*****
!          SOLUCIÓN
!*****
/SOLU
SOLCONTROL,ON
ANTYPE,0
LNSRCH,0
NLGEOM,ON
NROPT,FULL,,ON
nsubst,100000,400000,400,on
!*****
!          TOLERANCIAS
!*****
CNVTOL,U,,0.91,2,,, ! Tolerancia en terminos de desplazamiento
AUTOTS,on          ! Propiedades de la no-linealidad
TIME,1            ! El tiempo al finalizar el paso es =1
OUTRES,ALL,all    ! En cada paso guarda los datos
TUNIF,0          ! Temperatura uniforme igual a cero
!*****
!IMPOSICIÓN DE LA CARGA POR DESPLAZAMIENTO
!*****
NSEL,S,node,,1014,1020,1
NSEL,a,node,,1830,1836,1
D,all,UY,-2
ALLSEL ! Seleccionar todo
SOLVE ! Resuelve todo
FINISH ! Termina
!*****
!          POST-PROCESADOR
!*****
/POST26
NUMVAR,200
/POST26
NUMVAR,200
ADD,200,,,FZTOTAL,,0,
*DO,i,1,7,1
    RFORCE,2,i+1013,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
    ADD,200,200,2,,FyTOTAL
*ENDDO
*DO,i,1,7,1
    RFORCE,2,i+1829,F,Y! almacena en la variable i+1 la reaccion en z del nodo i
    ADD,200,200,2,,FyTOTAL
*ENDDO
NSOL,190,1381,U,Y,DY
ABS,190,190
ADD,190,190,,,DY,,,10
abs,200,200
ADD,103,200,,,ftotal,,1
/AXLAB,X,DESPLAZ(mm)
/AXLAB,Y,fUERZA(kN)
!/SHOW,JPEG
xvar,190
plvar,103

```