



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

FATIGA DE BAJO CICLAJE DE HORMIGÓN CON FIBRA PARA ALTAS DEFORMACIONES UNITARIAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JONATHAN JESÚS CORTÉS VALENZUELA

PROFESOR GUÍA:
LEONARDO MASSONE SÁNCHEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
FABIÁN ROJAS BARRALES
AUGUSTO HOLMBERG FUENZALIDA

SANTIAGO DE CHILE
2022

FATIGA DE BAJO CICLAJE DE HORMIGÓN CON FIBRA PARA ALTAS DEFORMACIONES UNITARIAS

Las estructuras presentes en Chile se ven sometidas a sismos recurrentes de gran magnitud, induciendo en los materiales que constituyen los elementos estructurales el proceso de fatiga. En este contexto, se desarrolla el fenómeno de fatiga de bajo ciclaje, comúnmente relacionado con la rotura del acero de refuerzo, y en menor medida con la degradación del hormigón. En particular, una variable que ha sido investigada en los estudios enfocados en la fatiga de hormigón es la adición de fibra de refuerzo, debido a que mejora propiedades mecánicas como ductilidad, disipación de energía y vida a fatiga del hormigón. Diversos estudios han mostrado un buen desempeño de fibras de alcohol polivinílico (PVA) en ensayos de carga monotónica y fatiga en compresión en morteros. Sin embargo, el comportamiento de fibras de PVA en matrices de hormigón con árido grueso no ha sido ampliamente estudiado.

En este contexto, el objetivo principal de la presente investigación es estudiar y comparar la respuesta experimental de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA sometidas a ensayos de fatiga de bajo ciclaje (pre y post-peak) en compresión mediante el uso de la máquina universal.

La metodología desarrollada consiste en la elaboración y ensayo de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibra de PVA (RECS 15/12 mm y RF 600/15 mm), considerando tres niveles de cuantía correspondientes a 0 %, 1 % y 2 % medidas respecto al volumen geométrico de las probetas. El programa experimental considera dos niveles de degradación de la resistencia estática a la compresión (2 % y 10 %) y niveles máximos de tensión comprendidos entre el 75 % y 95 % de dicho parámetro. A partir de los resultados obtenidos se construyen modelos S-N (o de Wöhler), modelos de tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga, y se estudia la existencia de una envolvente de deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga de bajo ciclaje en compresión pre y post-peak.

Los resultados finales muestran que la adición de fibra de PVA en la matriz de hormigón aumenta la ductilidad y la vida a fatiga de las muestras. En promedio, la resistencia a la compresión del hormigón reforzado con fibra disminuyó respecto al hormigón simple, alcanzando una disminución máxima de un 36 % para probetas con contenido de fibra de 2 % RF 600/15 mm. Además, los resultados sugieren que la relación entre la tasa de deformación secundaria y la vida a fatiga de una muestra es independiente del tipo de ensayo de fatiga al que es sometida (pre o post-peak). Finalmente, la superposición de las curvas de carga monotónica en compresión y las curvas de histéresis de los ensayos de fatiga pre y post-peak sugieren la existencia de una envolvente de deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga de bajo ciclaje, la cual coincide de buena manera con la curva de carga monotónica en compresión.

*A todos los que me apoyaron e hicieron
posible que pudiera llegar hasta aquí.*

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciendo a mi familia, a mis padres Lorena Valenzuela Sánchez y Cristian Cortés Barrios que me dieron todo. Me entregaron valores de los que he estado orgulloso toda mi vida, y un cariño incondicional que se mantiene hasta hoy mientras escribo estas palabras. Muchas gracias por todo, porque sin ustedes no sería nadie.

A mi hermana Antonia Cortés, que me ha apoyado siempre, no sólo en lo académico, sino en todo lo que me he propuesto en la vida. A mi tío, a mis abuelos y a mi abuelita que ya no está aquí con nosotros, muchas gracias por todo lo que me han dado, y lamento profundamente no tener la capacidad de expresar con palabras lo infinitamente agradecido que estoy con cada uno de ustedes.

A Julissa Espinosa Mateluna, mi pareja, muchas gracias por apoyarme constantemente, por darme ánimos y hacerme confiar más en mí y en mis capacidades. Por tu amor incondicional, alegrar mis días, y volverme cada día una mejor persona, te amo mucho y sé que serás una gran profesora.

A Jezer Moya, mi amigo de toda la vida, muchas gracias por todo lo que me has dado, te deseo el mejor de los éxitos en todo lo que te plantees en la vida. Te quiero mucho.

A mis amigos de Plan Común, que me apoyaron durante una etapa muy inestable de mi vida, Rubén, Pedrito, Agus, Nico y Mauri, por todos los recuerdos alegres que me llevo. A mis amigos de Civil, Mpac, Pipe, Sebita, Tomollolo, Maquinita, Capacho y JP, por hacer que mi paso por la especialidad se convirtiera en una estadía muy agradable. Muchas gracias por darme la oportunidad de tener buenos amigos como ustedes, por el apoyo, y los buenos momentos. Les deseo lo mejor de todo corazón.

A mi profesor guía Leonardo Massone por su calidad humana y buena disposición durante todo el tiempo que duró mi investigación, por su constante ayuda y el apoyo que me brindó. A los profesores Fabián Rojas y Augusto Holmberg por aceptar ser parte de mi comisión, por su buena voluntad y las correcciones que hicieron a este documento.

Finalmente, quiero agradecer a Mario y Omar del laboratorio MECESUP y al profesor Pedro Soto, por su ayuda y buena voluntad con lo relacionado a la parte experimental de esta investigación. Quiero terminar realizando una mención especial a Alejandro Arenas, Tomás Álvarez y Sebastián Jara por la gran ayuda que me brindaron a pesar de no tener la obligación de hacerlo. Muchas gracias.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
2. Marco teórico	3
2.1. Hormigón simple y hormigón armado	3
2.1.1. Resistencia estática a la compresión	4
2.2. Hormigón con fibra de refuerzo	4
2.3. Tipos de fibra de refuerzo	7
2.4. Fibra de PVA	7
2.4.1. Hormigón reforzado con fibra de PVA	8
2.5. Definición de fatiga	11
2.6. Diagrama S-N o de Wöhler	12
2.6.1. Tipos de fatiga	14
2.7. Principales factores que afectan la vida a fatiga	15
2.7.1. Contenido de fibra de refuerzo	15
2.7.2. Nivel máximo y mínimo de tensión	15
2.7.3. Determinación de la resistencia estática del hormigón	16
2.7.3.1. Resistencia estática a la compresión a partir de la deformación volumétrica	16
2.7.4. Frecuencia de carga cíclica	17
2.8. Evolución de la deformación cíclica	18
2.8.1. Tasa de deformación secundaria	18
2.8.2. Tasa de deformación secundaria por ciclo versus vida a fatiga	20
2.9. Curva tensión-deformación como envolvente de deformaciones de fatiga	21
2.9.1. Ensayo de fatiga pre-peak	21
2.9.2. Ensayo de fatiga post-peak	22
3. Metodología	24
3.1. Mezcla de hormigón	24
3.1.1. Dosificación de la mezcla	24
3.1.2. Detalle de los materiales	25
3.1.3. Tipo de fibra de refuerzo	25
3.1.3.1. Propiedades mecánicas de las fibras de refuerzo	25
3.1.4. Contenido de fibra de refuerzo	26

3.2.	Programa experimental	26
3.2.1.	Caracterización de las muestras	26
3.2.2.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak	27
3.2.3.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak	27
3.2.4.	Resumen	28
3.3.	Análisis granulométrico	28
3.3.1.	Cuarteo de materiales	29
3.3.2.	Secado de las muestras	29
3.3.2.1.	Contenido de humedad	29
3.3.3.	Tamizado de materiales	30
3.3.4.	Resultados	31
3.3.4.1.	Arena fina	31
3.3.4.2.	Arena gruesa	32
3.3.4.3.	Grava	33
3.4.	Elaboración de probetas cilíndricas de hormigón	34
3.4.1.	Elaboración de moldes	34
3.4.2.	Elaboración de las mezclas	35
3.5.	Detalle de las probetas elaboradas	37
3.6.	Refrentado de probetas	39
3.7.	Montaje de ensayos experimentales	40
3.7.1.	Ensayo de fatiga en compresión	40
3.7.2.	Ensayo de compresión pura	43
3.7.3.	Ensayo de tracción directa	43
4.	Resultados	45
4.1.	Ensayo de carga monotónica en compresión	45
4.2.	Ensayo de tracción directa	46
4.3.	Ensayo de fatiga en compresión post-peak	47
4.3.1.	Ensayos de fatiga post-peak, 2 % de degradación	47
4.3.2.	Ensayos de fatiga post-peak, 10 % de degradación	50
4.4.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak	53
4.5.	Diagrama de Wöhler	54
4.6.	Perfil de evolución de deformaciones irreversibles	57
4.6.1.	Tasa de deformación secundaria	59
4.6.2.	Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga post-peak	60
4.7.	Envoltorio de máximas deformaciones en la falla	62
5.	Análisis de resultados	66
5.1.	Ensayo de carga monotónica en compresión	66
5.2.	Ensayo de tracción directa	68
5.3.	Ensayos de fatiga en compresión	70
5.3.1.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak	70
5.3.2.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak	71
5.4.	Diagrama de Wöhler	72
5.4.1.	Ensayos de fatiga post-peak con 2 % de degradación	72
5.4.2.	Ensayos de fatiga post-peak con 10 % de degradación	72
5.4.3.	Ensayos de fatiga pre y post-peak	73

5.5.	Tasa de deformación secundaria	73
5.5.1.	Perfil de evolución de deformaciones irreversibles	73
5.5.2.	Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga	73
5.5.3.	Resultados respecto a la literatura	74
5.6.	Envolvente de deformaciones últimas en la falla	74
6.	Conclusiones	76
	Bibliografía	79
	Anexos	81
A.	Ensayos preliminares	81
B.	Detalle de curvas tensión-deformación	84
B.1.	Ensayos de compresión pura	84
B.2.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 85 \% f'_c$	85
B.3.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 90 \% f'_c$	86
B.4.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 95 \% f'_c$	87
B.5.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 75 \% f'_c$	88
B.6.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 80 \% f'_c$	89
B.7.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 85 \% f'_c$	90
B.8.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak	91
C.	Modos de falla	92
C.1.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación	92
C.2.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación	93
C.3.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak	94
D.	Comparación entre perfiles de evolución de deformaciones irreversibles	95

Índice de Tablas

2.1.	Propiedades típicas de fibras de refuerzo (Bentur y Mindess, 2007).	7
2.2.	Clasificación de cargas de fatiga (Hsu, 1981).	15
3.1.	Proporciones de la mezcla de hormigón por unidad de volumen.	24
3.2.	Materiales que componen la mezcla de hormigón.	25
3.3.	Propiedades de fibra de refuerzo de PVA, RECS 15/12 mm.	26
3.4.	Propiedades de fibra de refuerzo de PVA, RF 600/15 mm.	26
3.5.	Tipos y contenido de fibra de PVA.	26
3.6.	Programa experimental, caracterización del material.	27
3.7.	Programa experimental, ensayos de fatiga en compresión post-peak.	27
3.8.	Programa experimental, ensayos de fatiga en compresión pre-peak.	28
3.9.	Programa experimental, resumen.	28
3.10.	Contenido de humedad de los áridos	29
3.11.	Aberturas de la serie de tamices empleada en el análisis granulométrico.	31
3.12.	Análisis granulométrico, arena fina.	31
3.13.	Análisis granulométrico, arena gruesa.	32
3.14.	Análisis granulométrico, grava.	33
3.15.	Fechas de elaboración de probetas con fibra de refuerzo RECS 15/12 mm.	37
3.16.	Fechas de elaboración de probetas con fibra de refuerzo RF 600/15 mm.	38
3.17.	Fechas de elaboración de probetas sin fibra de refuerzo.	39
3.18.	Resistencia a la compresión, adhesivo epóxico Sikadur [®] - 31 HMG.	40
4.1.	Ensayos de carga monotónica en compresión.	45
4.2.	Ensayos de tracción directa.	46
4.3.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$	48
4.4.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.90 \cdot f'_c$	48
4.5.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$	48
4.6.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.75 \cdot f'_c$	50
4.7.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.80 \cdot f'_c$	51
4.8.	Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$	51
4.9.	Error asociado a la resistencia a compresión promedio de cada tipo de probeta.	53
4.10.	Ensayos de fatiga en compresión pre-peak, $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$	53
4.11.	Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión post-peak (2 % de degradación).	59
4.12.	Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión post-peak (10 % de degradación).	60
4.13.	Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión pre-peak.	60

Índice de Ilustraciones

2.1.	Curvas tensión-deformación típicas de hormigón sometido a ensayos de compresión (Nilson et al., 2010).	4
2.2.	Esquema del comportamiento de las tensiones en hormigón con y sin fibra de refuerzo (Medeiros, 2012).	5
2.3.	Curvas tensión-deformación para ensayos de carga monotónica en compresión, hormigón simple y con fibra de refuerzo de 30 milímetros de longitud (Cachim et al., 2002).	5
2.4.	Curvas tensión-deformación para ensayos de carga monotónica en compresión, hormigón simple y con fibra de refuerzo de 60 milímetros de longitud (Cachim et al., 2002).	6
2.5.	Fibra de alcohol polivinílico (PVA) (Son et al., 2020).	8
2.6.	Ensayos de carga monotónica en compresión, $D_{m\acute{a}x} = 9.5$ mm (Vásquez, 2019).	8
2.7.	Ensayos de carga monotónica en compresión, mezcla de árido grueso (Reveco, 2021).	9
2.8.	Ensayos de carga monotónica en compresión, mezcla de árido grueso (Arenas, 2021).	10
2.9.	Ensayos de tracción directa, mezcla de árido grueso (Arenas, 2021).	10
2.10.	Señal sinusoidal empleada en ensayos de fatiga en compresión (Medeiros et al., 2015).	11
2.11.	Curva S-N, ensayo de fatiga en flexión para hormigón con fibra de acero de refuerzo (Naaman y Hammoud, 1998).	12
2.12.	Diagrama S-N o de Wöhler para distintos valores de R (Hsu, 1981).	16
2.13.	Curvas de carga versus deformación volumétrica medidas en ensayos de compresión de probetas cilíndricas (Dyduch et al., 1994).	17
2.14.	Número de ciclos hasta la falla versus frecuencia de carga cíclica. $S_{m\acute{a}x}/f'_c = 0.75$, $R = 0.1$ (Medeiros et al., 2015).	18
2.15.	Evolución de las deformaciones con el número de ciclos, tasa de deformación secundaria (Medeiros et al., 2015).	19
2.16.	Tasa de deformación secundaria versus número de ciclos hasta la falla, frecuencia de carga cíclica variable (Medeiros et al., 2015).	19
2.17.	Tasa de deformación secundaria por ciclo versus número de ciclos hasta la falla (Poveda et al., 2017).	20
2.18.	Comportamiento de hormigón sometido a ensayos de carga monotónica y de fatiga en compresión (Kim y Kim, 1996).	21
2.19.	Máximas deformaciones en la falla de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo sobre su respectiva curva de tensión-deformación (Cachim et al., 2002).	22
2.20.	Ensayo de fatiga en flexión, máximas deformaciones en la falla y curva de carga monotónica (Germano et al., 2016).	23

2.21.	Ensayo de fatiga en compresión, carga de amplitud de deformación constante y curva de carga monotónica en compresión (Otter y Naaman, 1998).	23
3.1.	Fibras de refuerzo de PVA marca KURALON TM	25
3.2.	Horno de secado.	29
3.3.	Tamices empleados en el análisis granulométrico.	30
3.4.	Curva granulométrica, arena fina.	32
3.5.	Curva granulométrica, arena gruesa.	33
3.6.	Curva granulométrica, agregado grueso (grava).	34
3.7.	Moldes de PVC.	34
3.8.	Mezclador de pintura eléctrico.	35
3.9.	Materiales empleados en la elaboración de tres probetas cilíndricas de hormigón.	36
3.10.	Elementos empleados en el refrentado de probetas.	40
3.11.	Montaje experimental, ensayo de fatiga en compresión.	41
3.12.	Esquema ensayo de fatiga en compresión pre-peak.	42
3.13.	Esquema ensayo de fatiga en compresión post-peak.	42
3.14.	Dispositivo empleado en ensayos de tracción directa.	43
3.15.	Montaje experimental, ensayo de tracción directa.	44
4.1.	Curvas tensión-deformación en ensayos de carga monotónica en compresión.	46
4.2.	Curvas tensión-deformación, ensayos de tracción directa.	47
4.3.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 0.85 \cdot f'_c$	49
4.4.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 0.90 \cdot f'_c$	49
4.5.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{máx} = 0.95 \cdot f'_c$	50
4.6.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 0.75 \cdot f'_c$	51
4.7.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 0.80 \cdot f'_c$	52
4.8.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 0.85 \cdot f'_c$	52
4.9.	Curvas tensión-deformación, ensayos de fatiga pre-peak.	54
4.10.	Diagramas de Wöhler. Ensayos de fatiga en compresión post-peak.	55
4.11.	Diagramas de Wöhler. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y ensayos de fatiga pre-peak.	55
4.12.	Diagramas de Wöhler asociados a ensayos de fatiga en compresión pre-peak reportados por Cachim et al. (2002) y ensayos de fatiga en compresión post-peak con 2 % de degradación.	56
4.13.	Diagramas de Wöhler asociados a ensayos de fatiga en compresión pre-peak reportados por Cachim et al. (2002) y ensayos de fatiga en compresión post-peak con 10 % de degradación.	56
4.14.	Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación.	57
4.15.	Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación.	58
4.16.	Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión pre-peak.	58

4.17.	Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak.	61
4.18.	Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y resultados de la literatura pre-peak.	61
4.19.	Tasa de deformación secundaria por ciclo versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y resultados de la literatura pre-peak.	62
4.20.	Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotonica en compresión, probetas tipo F1.	62
4.21.	Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotonica en compresión, probetas tipo F2.	63
4.22.	Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotonica en compresión, probetas tipo G2.	63
4.23.	Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo F1.	64
4.24.	Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo F2.	64
4.25.	Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo G2.	65
5.1.	Modos de falla, ensayos de carga monotónica en compresión.	67
5.2.	Modos de falla, ensayos de tracción directa.	68
5.3.	Distribución de fibras de refuerzo, ensayos de tracción directa.	69
5.4.	Distribución de la fibra en probetas ensayadas en fatiga en compresión post-peak.	71
A.1.	Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (10 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90\% \cdot f'_c$).	81
A.2.	Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 98\% \cdot f'_c$).	82
A.3.	Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90\% \cdot f'_c$).	82
A.4.	Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo S (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90\% \cdot f'_c$).	83
B.1.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga de carga monotónica en compresión.	84
B.2.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$	85
B.3.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.90 \cdot f'_c$	86
B.4.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$	87
B.5.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.75 \cdot f'_c$	88
B.6.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.80 \cdot f'_c$	89
B.7.	Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$	90
B.8.	Curvas tensión-deformación, ensayos de fatiga pre-peak.	91
C.1.	Modos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 2 % de degradación.	92

C.2.	Tipos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 10 % de degradación.	93
C.3.	Tipos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión pre-peak.	94
D.1.	Perfil de evolución de deformaciones irreversibles. Ensayo de fatiga en compresión pre-peak, probeta F2 - 3.	95
D.2.	Perfil de evolución de deformaciones irreversibles. Ensayo de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 80\%f'_c$, probeta F2 - 6.	95

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Al ser Chile uno de los países más sísmicos del mundo, las estructuras presentes en él se ven sometidas a sismos recurrentes de gran magnitud. En este contexto se desarrolla el fenómeno de fatiga de bajo ciclaje, caracterizado por la presencia de elevados niveles de tensión y un reducido número de ciclos de carga ($< 10^3$) antes de alcanzar la falla del material (Germano, Tiberti, y Plizzari, 2016). A pesar de que dicho fenómeno está comúnmente relacionado con problemas de fractura del acero de refuerzo, existe poca información respecto a la capacidad a fatiga de bajo ciclaje del hormigón, estando enfocados la mayoría de los estudios existentes en fatiga de alto y ultra-alto ciclaje. Es decir, bajos niveles de tensión y un elevado número de ciclos de carga antes de la falla.

Uno de los factores que afecta la vida a fatiga, y que ha sido estudiado a lo largo de la literatura (ya sea en tracción, compresión o flexión), corresponde al contenido de fibra de refuerzo en la matriz de hormigón. Sin embargo, el estudio de la mejora del desempeño de hormigón con fibra de refuerzo en ensayos de fatiga se ha centrado principalmente en su comportamiento en flexión y tracción, debido a que los resultados obtenidos en este tipo de ensayos son más notorios respecto a ensayos de fatiga en compresión (Medeiros, 2012).

En términos generales, se espera que la adición de fibra de refuerzo a la matriz de hormigón implique una mejora en propiedades como la resistencia, ductilidad y tenacidad del material. Dicho nivel de mejora estará relacionado con las propiedades mecánicas y el contenido de fibra de refuerzo empleado (Noushini, Samali, y Vessalas, 2013). Actualmente, a pesar de la gran cantidad de tipos de fibra de refuerzo que han sido empleados en la elaboración de hormigón, las fibras de alcohol polivinílico (PVA) son las que destacan entre las de tipo sintético, debido a su alta resistencia a la tracción y bajo costo (Son et al., 2020).

En particular, el estudio del comportamiento a fatiga de hormigón reforzado con fibras de PVA ha sido estudiado principalmente en *engineered cementitious composites* o compuestos cementosos de ingeniería (ECC), correspondientes a un compuesto a base de mortero. Por lo que el comportamiento a fatiga de dicho tipo de fibras no ha sido estudiado en profundidad en hormigón con árido grueso.

Si además se tiene en cuenta que los estudios de fatiga en compresión generalmente no consideran un porcentaje de degradación de la resistencia estática de las muestras ensayadas (ya que el fenómeno de fatiga se induce generalmente en la etapa de pre-fisuración), se vuelve evidente que la cantidad de datos existentes para fatiga en compresión post-peak de hormigón simple y/o reforzado con fibra de PVA es muy reducida.

En este contexto, el propósito de la presente investigación es estudiar y comparar el comportamiento a fatiga de bajo ciclaje de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA, considerando volúmenes de 0 %, 1 % y 2 % para dos tipos distintos de fibra (12 y 15 mm de largo) y dos niveles de degradación de la resistencia en ensayos de fatiga en compresión post-peak (2 % y 10 %). Por último, los niveles máximos de tensión asociados a la carga de fatiga se ubican entre el 75 % y 95 % de la resistencia estática a la compresión de las muestras, mientras que el mínimo nivel de tensión corresponde al 20 % de dicho parámetro.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estudiar y comparar la respuesta experimental de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA, sometidas a ensayos de fatiga de bajo ciclaje en compresión pre y post-peak utilizando la máquina universal.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general del trabajo se definen los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar diagramas S-N o de Wöhler para cada tipo de probeta y ensayo de fatiga en compresión post-peak.
- Obtener los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles para las probetas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA sometidas a ensayos de fatiga en compresión.
- Determinar la tasa de deformación secundaria para cada tipo de probeta y ensayo de fatiga considerado.
- Calibrar un modelo que relacione la tasa de deformación secundaria con el número de ciclos hasta la falla para cada tipo de probeta y ensayo de fatiga en compresión post-peak, y compararlos con los existentes en la literatura de ensayos de fatiga pre-peak.
- Comparar las curvas de carga monotónica en compresión de cada tipo de probeta con las curvas de histéresis obtenidas a partir de los ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak.

Capítulo 2

Marco teórico

El presente capítulo expone los tópicos principales que conforman la base teórica del tema de estudio de esta investigación, recopilados a partir de investigaciones y documentos de carácter normativo validados por la comunidad científica. Entre los temas tratados destacan diversos estudios acerca del comportamiento de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo sometido a ensayos de fatiga. Además, se definen conceptos como la vida a fatiga, diagrama S-N (o de Wöhler) y tasa de deformación secundaria, además del estudio de factores que afectan el comportamiento a fatiga del hormigón y la existencia de una envolvente de deformaciones asociada a este tipo de ensayos.

2.1. Hormigón simple y hormigón armado

El hormigón es una mezcla de cemento, arena, grava y agua, a la cual ocasionalmente se le agregan uno o más aditivos que permiten modificar características como la trabajabilidad y tiempos de fraguado (McCormac y Brown, 2017). En la actualidad, el hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo, ya que posee una gran durabilidad y un costo relativamente bajo respecto a otros materiales (Medeiros, 2012). Otro factor que lo convierte en un material universal de construcción, es la facilidad con la cual puede ser depositado en moldes de cualquier forma mientras se encuentre en su estado plástico, además de ser resistente al fuego y a diversas condiciones climáticas (Nilson, David, y Dolan, 2010).

Las principales características del hormigón son su alta resistencia a la compresión y muy baja resistencia a la tracción, siendo este último el principal motivo del uso de acero de refuerzo como material estructural. Esto, debido a que una de sus grandes virtudes es la alta resistencia a la tracción (McCormac y Brown, 2017). La combinación de ambos materiales se conoce como *hormigón armado* o *steel reinforced concrete (SRC)*, y sus primeros usos se remontan a la segunda mitad del siglo diecinueve. Desde entonces, ha sido empleado en la construcción de edificios, puentes, presas, estanques, entre otros (Nilson et al., 2010).

La combinación de acero de refuerzo y hormigón proporciona a los elementos estructurales de hormigón armado la ductilidad y resistencia a la tracción que estos necesitan, además de mejorar su ductilidad y resistencia en compresión. Sin embargo, el uso de acero de refuerzo no es la única alternativa para lograr un mejor desempeño del hormigón. Un aumento de resistencia y ductilidad (no sólo en compresión, sino también en tracción y flexión) se puede lograr mediante la adición de fibras de refuerzo, mejorando el comportamiento post-fisuración, erosión, resistencia al impacto y fatiga, entre otros (Medeiros, 2012).

2.1.1. Resistencia estática a la compresión

La resistencia estática a la compresión del hormigón se determina comúnmente por medio de ensayos experimentales de carga monotónica hasta la falla, el cual es efectuado en probetas cilíndricas de hormigón que han sido curadas durante 28 días (McCormac y Brown, 2017). La Figura 2.1 muestra curvas tensión-deformación típicas asociadas a probetas de hormigón de densidad normal sometidas a ensayos de compresión. En ella se aprecia que todas las curvas poseen características similares, correspondientes a un primer tramo de comportamiento lineal elástico seguido de un aumento de resistencia a tasa decreciente hasta alcanzar la resistencia máxima a la compresión. Superadas las deformaciones unitarias asociadas al esfuerzo máximo, todas las curvas presentan un tramo descendente hasta alcanzar la falla (Nilson et al., 2010).

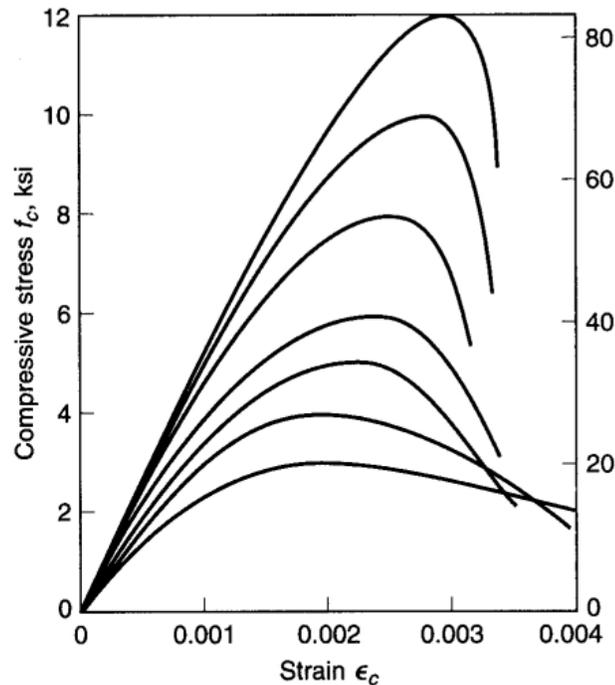


Figura 2.1: Curvas tensión-deformación típicas de hormigón sometido a ensayos de compresión (Nilson et al., 2010).

2.2. Hormigón con fibra de refuerzo

El *hormigón con fibra de refuerzo* o *fiber reinforced concrete (FRC)*, es un material compuesto en el cual fibras de acero o de otro material están orientadas y distribuidas al azar en una matriz de hormigón. Las fibras de refuerzo controlan la propagación de grietas y mejoran su comportamiento a flexión y tracción (Poveda, Ruiz, Cifuentes, Yu, y Zhang, 2017). La Figura 2.2 muestra el mecanismo de transferencia de tensiones entre la matriz de hormigón y las fibras de refuerzo.

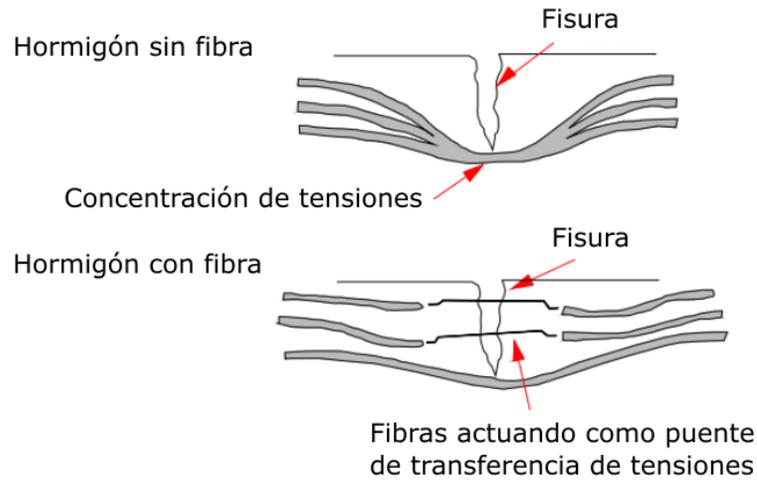


Figura 2.2: Esquema del comportamiento de las tensiones en hormigón con y sin fibra de refuerzo (Medeiros, 2012).

En el hormigón simple o sin fibra de refuerzo se desarrollan concentraciones de tensiones en los extremos de las grietas, dando como resultado la rotura del material en el caso de que dicha tensión supere la resistencia de la matriz de hormigón. Por otro lado, en el hormigón que posee fibra de refuerzo, estas últimas actúan como un puente que permite la transferencia de tensiones a través de las grietas, disminuyendo la concentración de tensiones en sus extremos y por consiguiente su propagación (Medeiros, 2012).

Ensayos experimentales realizados por Cachim, Figueiras, y Pereira (2002) mostraron que la adición de fibra de refuerzo a la matriz de hormigón aumenta su ductilidad, tenacidad y resistencia estática a la compresión. Adicionalmente, la fibra de refuerzo mejora la disipación de energía y la vida a fatiga del hormigón, siendo más efectiva al someterse a esfuerzos de flexión y tracción, y en menor medida a esfuerzos de compresión (Germano et al., 2016; Vicente, Minguez, Martínez, y Gonzalez, 2016). La Figura 2.3 muestra el comportamiento de hormigón con y sin fibra de refuerzo sometido a ensayos de carga monotónica en compresión.

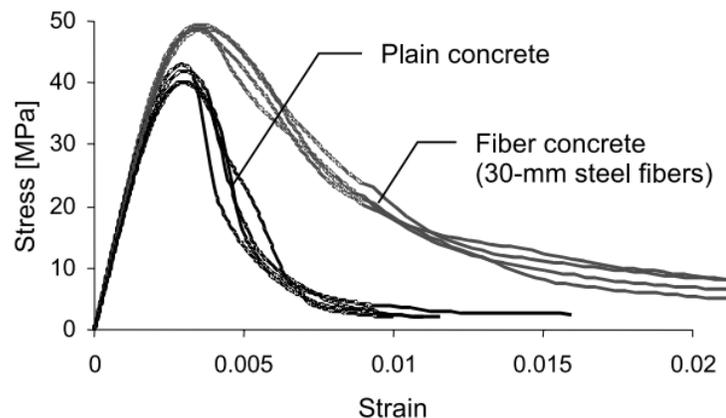


Figura 2.3: Curvas tensión-deformación para ensayos de carga monotónica en compresión, hormigón simple y con fibra de refuerzo de 30 milímetros de longitud (Cachim et al., 2002).

Sin embargo, los ensayos experimentales realizados por Cachim et al. (2002) también mostraron que a medida que se emplean fibras de refuerzo de mayores longitudes, el aumento de resistencia disminuye. La Figura 2.4 muestra las curvas tensión-deformación de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo de 60 milímetros de longitud.

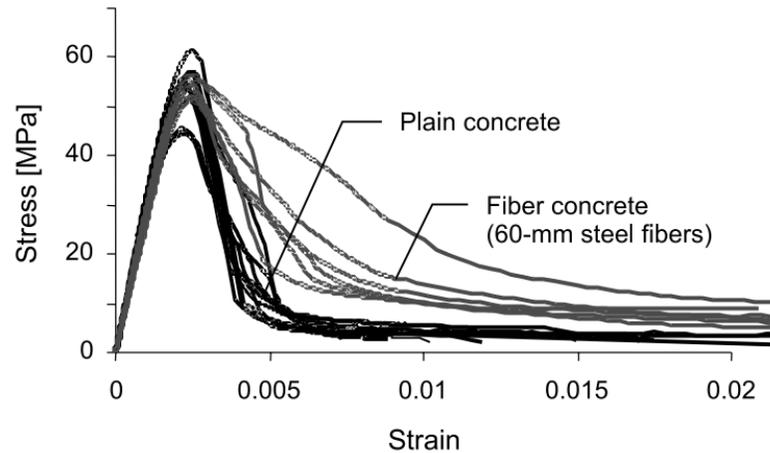


Figura 2.4: Curvas tensión-deformación para ensayos de carga monotónica en compresión, hormigón simple y con fibra de refuerzo de 60 milímetros de longitud (Cachim et al., 2002).

Un comportamiento similar fue observado en ensayos experimentales realizados por Naaman y Hammoud (1998), donde la resistencia estática a la compresión de probetas híbridas con fibras de acero de 30 y 50 milímetros de longitud fue menor a la resistencia de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo de 30 milímetros. Los autores atribuyeron dichos resultados al ingreso de aire a la mezcla de hormigón producto de la utilización de fibras más largas, las cuales dificultaron el proceso de mezclado de los materiales. El estudio realizado por Thomas (1979) mostró que el módulo de elasticidad y resistencia estática a la compresión del hormigón disminuyen a medida que aumenta el contenido de aire en la matriz. Por lo tanto, la adición de fibra de refuerzo requiere de la correcta realización del proceso de mezclado, ya que de lo contrario las muestras de hormigón pueden presentar una resistencia estática incluso menor a la de hormigón sin fibra de refuerzo.

En general, el contenido máximo de fibra de refuerzo considerado en las investigaciones presentes en la literatura no sobrepasa un valor de 2 % medido respecto al volumen geométrico de la muestra que se desea ensayar. El criterio típicamente empleado para determinar dicho parámetro corresponde a la trabajabilidad del hormigón, la cual disminuye con la adición de fibra de refuerzo a la mezcla. En la práctica, el contenido de fibra de refuerzo presente en la matriz de hormigón posee directa relación con el tipo de estructura en la que será empleada. En particular, hormigones con un contenido de fibra inferior al 1 % son utilizados generalmente en losas y pavimentos de grandes dimensiones y/o expuestos a gran desgaste, mientras que un contenido de fibra entre 1 % y 2 % es utilizado en estructuras que requieren la capacidad de absorber energía y resistir el fenómeno de fatiga (Mehta y Monteiro, 2006).

2.3. Tipos de fibra de refuerzo

De acuerdo al Éxodo 5:6, los primeros usos de fibra de refuerzo como material de construcción se remontan al antiguo Egipto, donde fibras de paja fueron empleadas para reforzar ladrillos de barro. Además, existe evidencia del uso de fibra de asbesto como refuerzo en vasijas de arcilla desde hace unos 5000 años (Mehta y Monteiro, 2006). Desde el temprano uso de asbesto como fibra de refuerzo, una amplia variedad de tipos de fibra han sido desarrollados. Entre ellos se encuentran las fibras de acero, vidrio, carbono, kevlar, de tipo natural (madera) y de tipo sintético (polipropileno, polietileno, PVA) (Bentur y Mindess, 2007).

El uso de fibras sintéticas como fibra de refuerzo es cada vez mayor, existiendo en el mercado muchos tipos de fibra que han sido formulados y producidos específicamente como fibra de refuerzo para hormigón. En particular, las propiedades mecánicas de las fibras sintéticas varían ampliamente entre sí (Bentur y Mindess, 2007). La Tabla 2.1 compara las principales propiedades mecánicas de distintas fibras de refuerzo comúnmente utilizadas.

Tabla 2.1: Propiedades típicas de fibras de refuerzo (Bentur y Mindess, 2007).

Tipo de fibra	Diámetro [μm]	Gravedad específica	Resistencia a la tracción [GPa]	Módulo de elasticidad [GPa]	Deformación última [%]
Acrílico	20 – 350	1.16 – 1.18	0.2 – 1.0	14 – 19	10 – 50
Kevlar	10 – 12	1.44	2.3 – 3.5	63 – 120	2 – 4.5
Carbón (PAN)	8 – 9	1.6 – 1.7	2.5 – 4.0	230 – 380	0.5 – 1.5
Carbón (Pich)	9 – 18	1.6 – 1.21	0.5 – 3.1	30 – 480	0.5 – 2.4
Nylon	23 – 400	1.14	0.75 – 1.0	4.1 – 5.2	16 – 20
Poliéster	10 – 200	1.34 – 1.39	0.23 – 1.2	10 – 18	10 – 50
Polietileno	25 – 1000	0.92 – 0.96	0.08 – 0.60	5	3 – 100
Polipropileno	20 – 400	0.9 – 0.95	0.45 – 0.76	3.5 – 10	15 – 25
PVA	14 – 650	1.3	0.8 – 1.5	29 – 36	5.7
Acero	100 – 1000	7.84	0.5 – 2.6	210	0.5 – 3.5

2.4. Fibra de PVA

Las fibras de PVA (*polyvinyl alcohol*) o alcohol polivinílico poseen la mayor resistencia a tracción respecto a otras fibras de refuerzo sintéticas, y poseen un costo relativamente bajo (Son et al., 2020). Entre sus principales características se destacan su alta relación de aspecto, elevada resistencia a la tracción, módulo de elasticidad relativamente alto, buena compatibilidad química con el cemento Portland, buena afinidad con el agua (hidrófilo) y nulo riesgo para la salud de las personas (Noushini et al., 2013). La Figura 2.5 muestra la apariencia de la fibra de PVA.



Figura 2.5: Fibra de alcohol polivinílico (PVA) (Son et al., 2020).

2.4.1. Hormigón reforzado con fibra de PVA

La investigación realizada por Vásquez (2019) estudió el comportamiento de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA sometidos a ensayos de carga monotónica en compresión y tracción directa. El estudio consideró tres dosificaciones distintas en las que se varió el tamaño máximo de árido (9.5 mm, 4.75 mm y 0.3 mm) y tres porcentajes de contenido de fibra de refuerzo (0 %, 1 % y 2 %). Los resultados mostraron una disminución de la resistencia estática a compresión del hormigón a medida que aumentaba el contenido de fibra de refuerzo, alcanzando una disminución máxima de un 75 % respecto al hormigón simple. Adicionalmente, los resultados mostraron que la adición de fibra de PVA aumenta la ductilidad de las muestras en ensayos de compresión y tracción pura. La Figura 2.6 muestra los resultados del ensayo de carga monotónica en compresión para probetas con tamaño máximo de árido igual a 9.5 mm y contenido de fibra de refuerzo igual a 0 %, 1 % y 2 %.

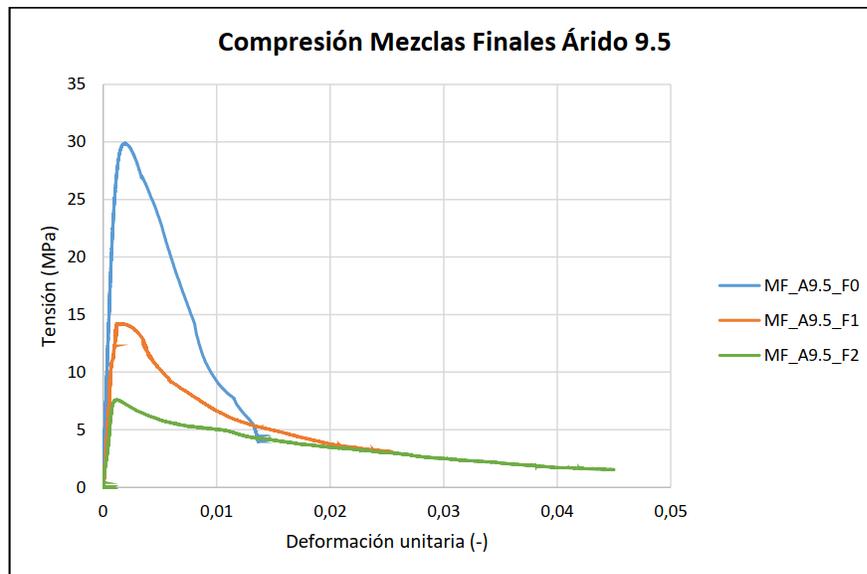


Figura 2.6: Ensayos de carga monotónica en compresión, $D_{m\acute{a}x} = 9.5$ mm (Vásquez, 2019).

Por otro lado, Reveco (2021) estudió el comportamiento de hormigón simple y hormigón reforzado considerando un total de tres tipos distintos de fibra de PVA (RECS 15/12 mm, RECS 100L/12 mm y RF 600/15 mm), tres volúmenes de fibra de refuerzo (0 %, 0.62 % y 1.23 %) y tres dosificaciones en las que se varió el tamaño máximo de árido (12.5 mm, 4.75 mm y 0.475 mm). En particular, dicho autor realizó ensayos de carga monotónica en compresión y tracción indirecta en probetas cilíndricas de hormigón, y ensayos de flexión y corte en vigas. En general, los resultados de los ensayos de carga monotónica en compresión para las muestras con agregado grueso mostraron un comportamiento similar al observado por Vásquez (2019), con la excepción de los ensayos realizados en probetas reforzadas con fibra de tipo RECS 100L/12 mm, donde la resistencia estática a la compresión de las muestras no disminuyó con el aumento del contenido de fibra de refuerzo. La Figura 2.7 muestra los resultados reportados por Reveco (2021) en dichos ensayos.

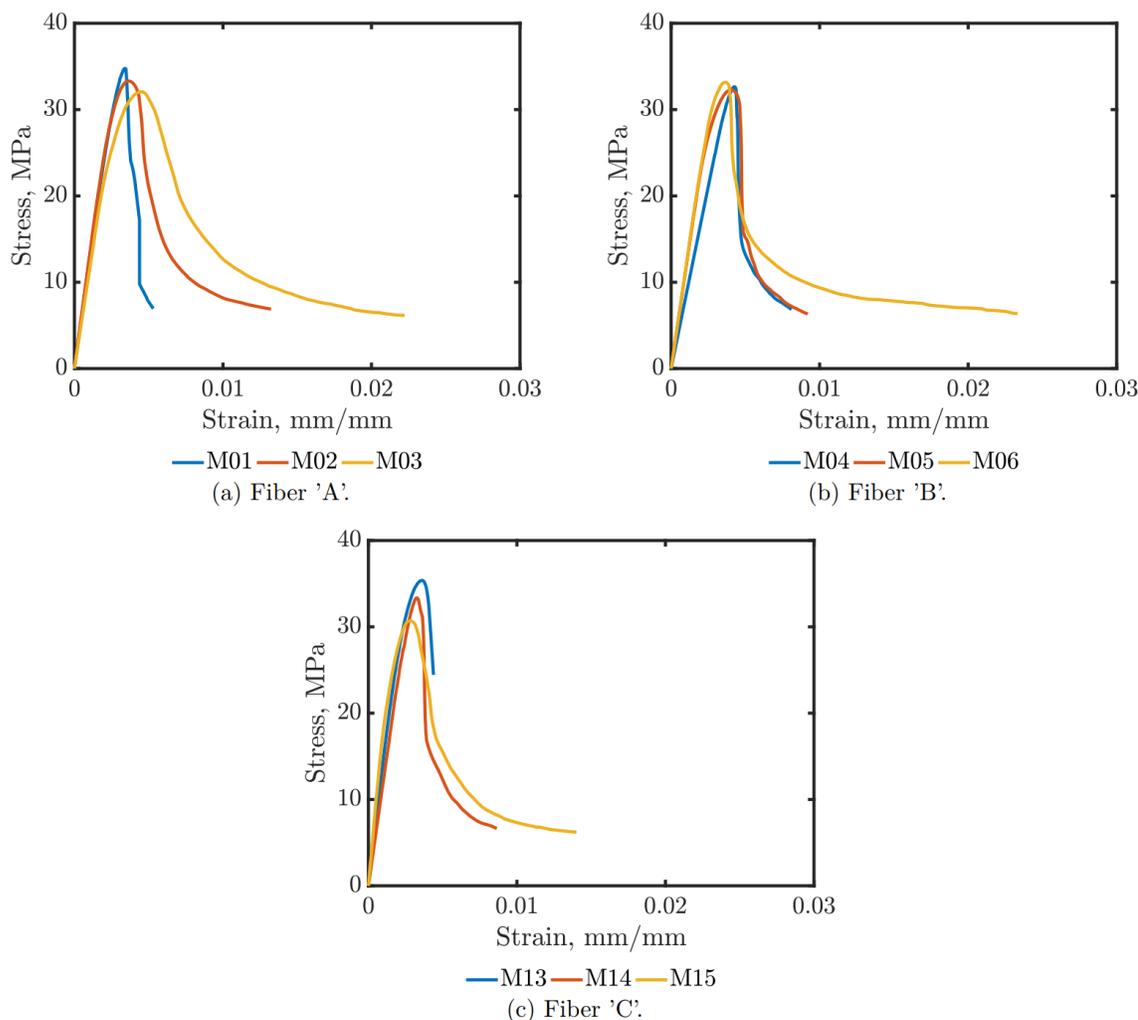


Figura 2.7: Ensayos de carga monotónica en compresión, mezcla de árido grueso (Reveco, 2021).

En la figura anterior las letras A, B y C se asignaron a las fibras de tipo RECS 15/12 mm, RECS 100L/12 mm y RF 600/15 mm respectivamente. Además, las muestras se ordenaron según su contenido de fibra en orden creciente. Por ejemplo, M01 corresponde a hormigón simple, M02 a 0.62 % y M03 a 1.23 % de contenido de fibra de refuerzo.

Arenas (2021) realizó una investigación con condiciones similares a las utilizadas por Reveco (2021), variando levemente la dosificación de las mezclas y el contenido de fibra de refuerzo (0 %, 1.23 % y 2 %) correspondiente a fibra de tipo REC 15/12 mm aceitada. Los resultados obtenidos por Arenas (2021) para los ensayos de carga monotónica en compresión para muestras con árido grueso fueron similares a los obtenidos en las investigaciones anteriores, siendo más clara la variabilidad de la resistencia estática a compresión de las muestras. La Figura 2.8 muestra las curvas tensión versus deformación obtenidas en dichos ensayos.

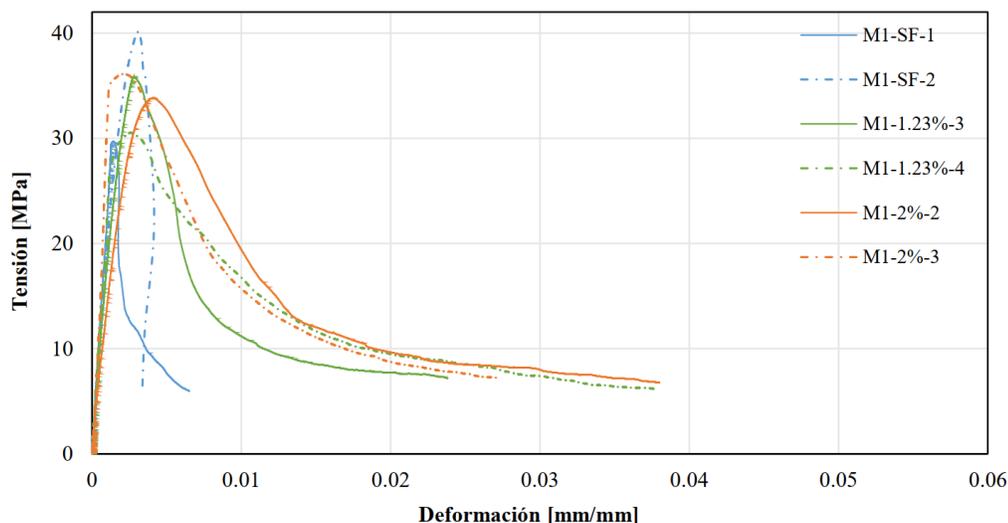


Figura 2.8: Ensayos de carga monotónica en compresión, mezcla de árido grueso (Arenas, 2021).

Adicionalmente, Arenas (2021) efectuó ensayos de tracción directa en probetas cilíndricas de hormigón considerando tres dosificaciones diferentes, variando en cada una de ellas el tamaño máximo de árido (19 mm, 9.5 mm y 0.6 mm). En particular, la Figura 2.9 muestra los resultados obtenidos en ensayos de tracción directa considerando la mezcla de árido grueso.

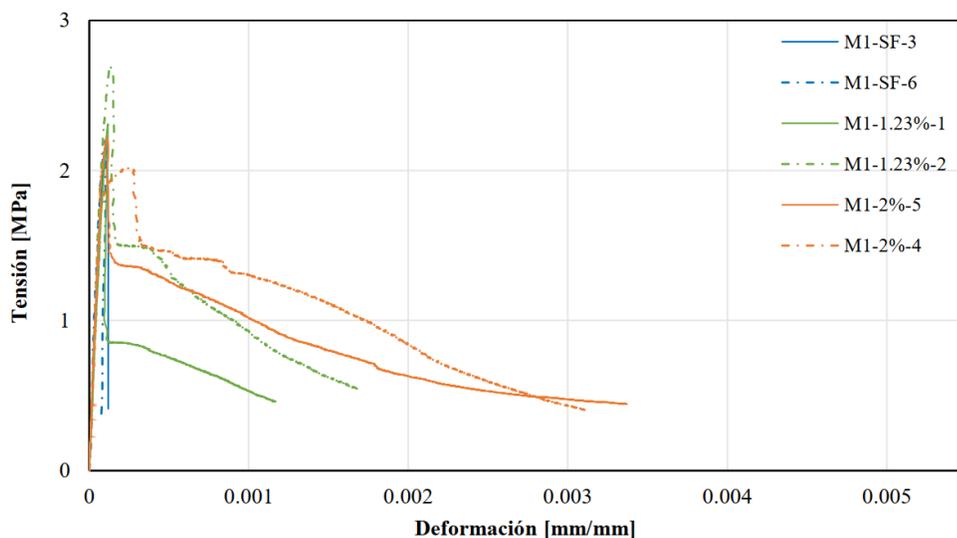


Figura 2.9: Ensayos de tracción directa, mezcla de árido grueso (Arenas, 2021).

Los resultados de la mezcla de árido grueso no permiten afirmar acerca de un aumento en la tensión máxima a tracción a medida que el porcentaje de fibra de refuerzo aumenta. Sin embargo, los resultados obtenidos en las dosificaciones con menor tamaño de áridos muestran claramente la existencia de dicha relación. Arenas (2021) asoció este comportamiento a que la presencia de partículas de mayor tamaño impiden una dispersión uniforme de las fibras, generando “nidos” y vacíos dentro de la matriz de hormigón. Por otro lado, todos los ensayos de tracción directa presentaron un comportamiento más dúctil a medida que el contenido de fibra de refuerzo aumentó.

2.5. Definición de fatiga

La fatiga, es el proceso de deterioro de las propiedades mecánicas de un material debido a la acción repetitiva de una carga cíclica, donde la máxima tensión que induce dicha carga ($S_{máx}$) corresponde a un porcentaje de la resistencia estática del material (Vicente et al., 2016). La Figura 2.10 muestra una señal del tipo sinusoidal típicamente utilizada en ensayos de fatiga en compresión.

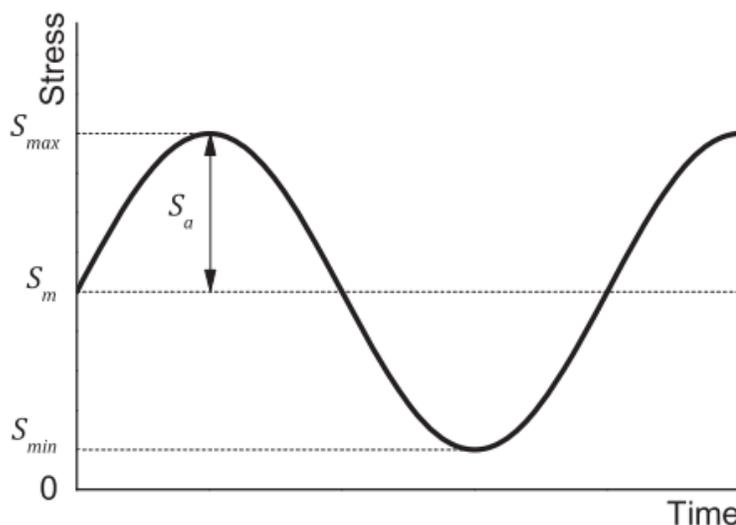


Figura 2.10: Señal sinusoidal empleada en ensayos de fatiga en compresión (Medeiros et al., 2015).

En particular, la fatiga induce en el hormigón una generación y crecimiento progresivo de microgrietas, las cuales cambian las propiedades mecánicas de la matriz de hormigón, disminuyendo su rigidez e incrementando su deformación total. La fatiga en el hormigón depende principalmente del nivel de tensión ($S_{máx}/f'c$) y no sólo del rango de tensiones empleadas como sucede con el acero (Vicente et al., 2016).

migón, N al número de ciclos hasta la falla, y β a un parámetro asociado al tipo de material, el cual es obtenido a partir de una regresión lineal de datos experimentales. A pesar de que la Ecuación 2.1 fue desarrollada para esfuerzos de tracción en flexión, también puede ser utilizada para ensayos experimentales de fatiga en compresión, sustituyendo $f_{t,f}$ por la resistencia estática a compresión del hormigón f'_c (Medeiros, 2012).

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f'_c} = 1 - \left(1 - \frac{S_{m\acute{i}n}}{S_{m\acute{a}x}}\right) \beta \log(N) \quad (2.2)$$

El valor del parámetro β dado por Aas - Jakobsen corresponde a 0.064. Además, la expresión $S_{m\acute{i}n}/S_{m\acute{a}x}$ presente en las Ecuaciones 2.1 y 2.2 comúnmente se define como un parámetro R . En particular, si $R = 1$, el ensayo corresponde a uno de tipo estático o de carga constante, mientras que si $R = -1$, el ensayo corresponderá a uno donde la amplitud de la carga cíclica será simétrica respecto al nivel nulo de carga. Finalmente, si $R = 0$, la carga de fatiga comienza desde un nivel nulo y el parámetro β corresponderá a la pendiente de la curva S-N (Hsu, 1981).

Tepfers y Kutti (1979) desarrollaron un modelo de fatiga en base a ensayos experimentales en compresión. Al evaluar la Ecuación 2.2 en ensayos propios y 475 ensayos de fatiga disponibles en la literatura, los autores determinaron el valor del parámetro β como 0.0685 para hormigón sometido a ensayos de fatiga en compresión. La Ecuación 2.3 muestra la ecuación propuesta por Tepfers y Kutti en 1979.

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f'_c} = 1 - 0.0685(1 - R) \log(N) \quad (2.3)$$

Posteriormente, Zhang, Phillips, y Wu (1996) desarrollaron un modelo de fatiga que considera la influencia de la frecuencia de la carga cíclica y cargas de fatiga cuyas amplitudes abarcan simultáneamente un rango de tensión y compresión. La Ecuación 2.4 muestra la expresión propuesta por Zhang et al. (1996).

$$\frac{S_{m\acute{a}x}}{f'_c} = C_f [1 - (1 - R') \beta \log(N)] \quad (2.4)$$

El valor del parámetro β para hormigón corriente determinado por Zhang et al. corresponde a 0.0807. Además, el parámetro f'_c es la resistencia estática de la muestra de hormigón, y C_f un coeficiente que depende de la frecuencia de la carga cíclica. La Ecuación 2.5 muestra la expresión que define al coeficiente C_f .

$$C_f = ab^{-\log f} + c \quad (2.5)$$

Donde f corresponde a la frecuencia de la carga cíclica en Hz, y los parámetros a , b , c dependen del tipo de material. Los valores determinados por Zhang et al. para dichos pará-

metros corresponden a 0.249, 0.920 y 0.796. Finalmente, los autores definieron el parámetro R' como

$$R' = R = \frac{S_{mín}}{S_{máx}} \quad si \quad R \geq 0 \quad (2.6)$$

$$R' = R = \left| \frac{f_r}{f'_c} \right| \cdot R \quad si \quad R < 0 \quad (2.7)$$

Donde f_r corresponde al módulo de rotura del hormigón.

Los autores Isojeh et al. (2017) implementaron un modelo S-N de Aas–Jakobsen modificado, el cual considera una serie de factores que afectan el comportamiento a fatiga del hormigón, entre los que destacan la frecuencia, forma de la onda de carga y relación entre los niveles de tensión.

$$\frac{\Delta f}{f'_c} = C_f [1 - \beta_2(1 - R) \log N_f - \gamma_2 \log (\zeta N_f T)] \quad (2.8)$$

El parámetro ζ se asocia a la forma de la onda de carga cíclica, y toma un valor de 0.15 para una onda de tipo sinusoidal. El coeficiente C_f depende de la frecuencia de la carga cíclica y se expresa en la Ecuación 2.5, mientras que el coeficiente γ_2 es igual a $2.47 \cdot 10^{-2}$. Finalmente, el parámetro β_2 está dado por la siguiente expresión

$$\beta_2 = 0.0661 - 0.0226 \cdot R \quad (2.9)$$

Por último, la Ecuación 2.10 muestra una forma alternativa para expresar un modelo S-N o de Wöhler.

$$\frac{S_{máx}}{f'_c} = d + e \cdot \log N \quad (2.10)$$

Donde d y e son constantes empíricas asociadas al tipo de material y se obtienen mediante una regresión lineal. Es importante destacar que la mayoría de los estudios de fatiga de hormigón en compresión existentes en la literatura presentan sus resultados a partir de las Ecuaciones 2.2 y 2.10 producto de su simplicidad y fácil aplicación.

2.6.1. Tipos de fatiga

Dependiendo del rango de carga o número de ciclos hasta la falla, la fatiga puede ser definida como fatiga de ultra alto, alto o bajo ciclaje. En particular, se define como “fatiga de bajo ciclaje” al rango comprendido aproximadamente entre 1 y 1000 ciclos hasta la falla (Hsu, 1981). La Tabla 2.2 muestra la clasificación de cargas de fatiga según el número de ciclos hasta la falla.

Tabla 2.2: Clasificación de cargas de fatiga (Hsu, 1981).

Fatiga de bajo ciclaje		Fatiga de alto ciclaje		Fatiga de ultra alto ciclaje	
0 – 10 ³		10 ³ – 10 ⁵		10 ⁵ – 10 ⁷	
10 ⁷ – 5x10 ⁷		5x10 ⁷ – 5x10 ⁸			
Estructuras sujetas a terremotos.	Aeropuertos, pavimentos y puentes.	Puentes de carreteras y ferrocarriles, pavimentos de carreteras y durmientes de hormigón.	Estructuras elevadas de metro.	Estructuras marinas.	

2.7. Principales factores que afectan la vida a fatiga

2.7.1. Contenido de fibra de refuerzo

En general, la adición de fibra de refuerzo mejora la vida a fatiga del hormigón, presentando un mejor desempeño en ensayos de fatiga en tracción y flexión, y en menor medida en ensayos cíclicos de compresión. Sin embargo, debido a que la vida a fatiga del hormigón depende de varios factores, la adición de fibra de refuerzo no siempre implica una mejora en el número de ciclos hasta la falla (Vicente et al., 2016). Según Grzybowski y Meyer (1993), existe un efecto dual en el comportamiento a fatiga en compresión del hormigón asociado a la adición de fibras de refuerzo. Por un lado, la fibra actúa como puente entre fisuras disminuyendo su propagación; mientras que por el otro lado, aumenta la cantidad de poros y microfisuras iniciales. La combinación de dichos efectos puede dar como resultado muestras de hormigón con fibra de refuerzo cuyo número de ciclos hasta la falla es mayor o menor que el de hormigón simple. Por lo tanto, la correcta realización del proceso de mezclado cumple un papel fundamental (Cachim et al., 2002).

2.7.2. Nivel máximo y mínimo de tensión

Uno de los principales factores que afecta la vida a fatiga corresponde al máximo nivel de tensión ($S_{m\acute{a}x}$) empleado en los ensayos experimentales. En particular, el incremento del máximo nivel de tensión de la carga cíclica tiene como resultado la reducción de la vida a fatiga del hormigón. Análogamente, la disminución del parámetro R , definido como el cociente entre el mínimo y el máximo nivel de tensión empleado en este tipo de ensayos ($S_{m\acute{i}n}/S_{m\acute{a}x}$) conduce al mismo tipo de resultados (Vicente et al., 2016). La Figura 2.12 muestra como varía el diagrama S-N o de Wöhler asociado a la Ecuación 2.3 propuesta por Tepfers y Kutti (1979).

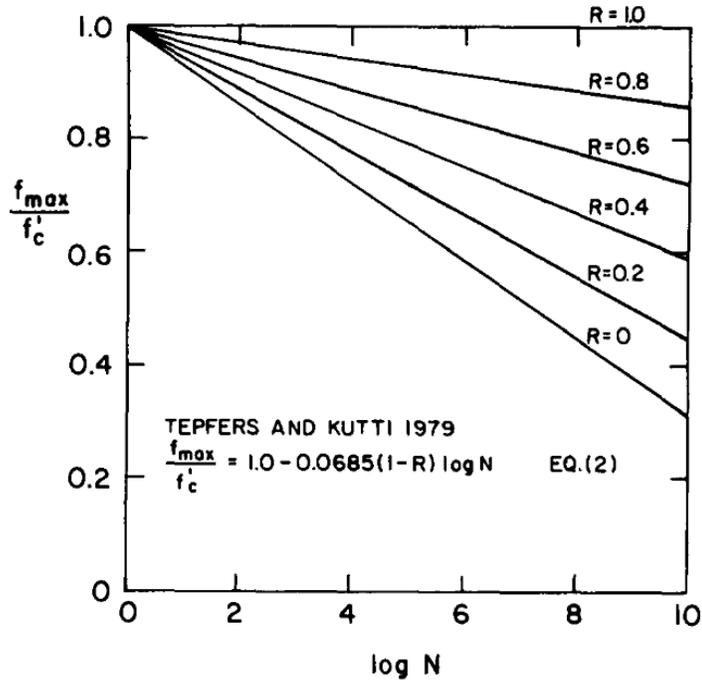


Figura 2.12: Diagrama S-N o de Wöhler para distintos valores de R (Hsu, 1981).

2.7.3. Determinación de la resistencia estática del hormigón

Debido a lo anterior, uno de los principales problemas al momento de realizar ensayos de fatiga es conocer la resistencia estática del hormigón, para de este modo poder definir un nivel de tensión máximo adecuado. El método comúnmente empleado en la literatura consiste en calcular el valor promedio de la resistencia estática a compresión de un lote de probetas y asumir que dicho valor corresponderá a la resistencia estática de muestras del mismo tipo en ensayos futuros.

El principal problema del método anteriormente descrito es la heterogeneidad natural del hormigón, existiendo la posibilidad de obtener resultados inciertos o distintos respecto a la resistencia estática a la compresión real de las muestras. Para solucionar este problema Dyduch, Szerszeń, y Destrebecq (1994) emplearon un método basado en la medición de deformaciones volumétricas, capaz de determinar la resistencia estática a la compresión de probetas de hormigón de forma individual, sin la necesidad de tener que ensayarlas hasta falla.

2.7.3.1. Resistencia estática a la compresión a partir de la deformación volumétrica

El método empleado por Dyduch et al. (1994) consiste en ensayar estáticamente a compresión un lote de probetas hasta la falla, midiendo simultáneamente la deformación volumétrica y carga aplicada. La Figura 2.13 muestra las curvas de carga versus deformación volumétrica medidas para tres lotes de probetas distintos.

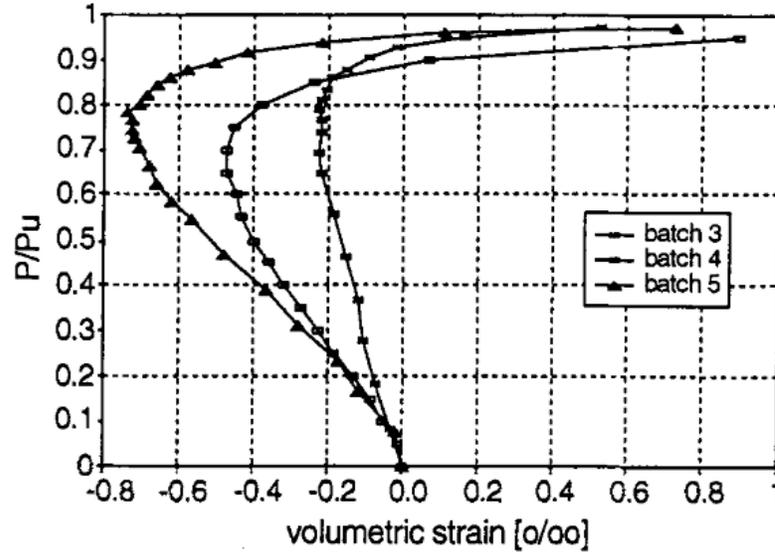


Figura 2.13: Curvas de carga versus deformación volumétrica medidas en ensayos de compresión de probetas cilíndricas (Dyduch et al., 1994).

El vértice de cada una de las curvas de la Figura 2.13 corresponde a la deformación volumétrica crítica ϵ_{vc} . La rama de la curva carga versus deformación volumétrica sobre dicho valor puede ser descrita por una función $y = f(\gamma)$, mientras que las coordenadas (γ, y) se pueden determinar a partir de las Ecuaciones 2.11 y 2.12.

$$\gamma = 1 - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_{vc}} \iff 0 \leq \gamma \leq 1 \quad \text{para} \quad \epsilon_{vc} \leq \epsilon_v \leq 0 \quad (2.11)$$

$$y = \frac{P_u - P}{P_u - P_c} \iff 1 \geq y \geq 0 \quad \text{para} \quad P_c \leq P \leq P_u \quad (2.12)$$

Donde P_u denota la carga última y la coordenada (ϵ_v, P) corresponde al punto siguiente a la coordenada crítica (ϵ_{vc}, P_c) , mientras que la función $f(\gamma)$ es calibrada para cada una de las probetas a partir de los datos experimentales. Por lo tanto, ensayando una probeta hasta el punto (ϵ_v, P) es posible determinar el valor del parámetro γ , y por consiguiente el valor de y . Finalmente, la Ecuación 2.13 permite predecir la carga última del cilindro ensayado con una buena precisión.

$$P_u = \frac{P - y \cdot P_c}{1 - y} \quad (2.13)$$

2.7.4. Frecuencia de carga cíclica

Otro factor que afecta de manera directa la vida a fatiga del hormigón corresponde a la frecuencia de la carga cíclica empleada en dichos ensayos. El estudio realizado por Zhang et al. (1996) muestra cómo el número de ciclos hasta la falla en vigas de hormigón sometidas a ensayos de fatiga en flexión disminuye al reducir la frecuencia de la carga cíclica, coincidiendo con el comportamiento reportado por otros autores. La Figura 2.14 muestra la relación entre la vida a fatiga y la frecuencia de la carga cíclica, considerando cuatro modelos S-N o de Wöhler propuestos por tres autores distintos.

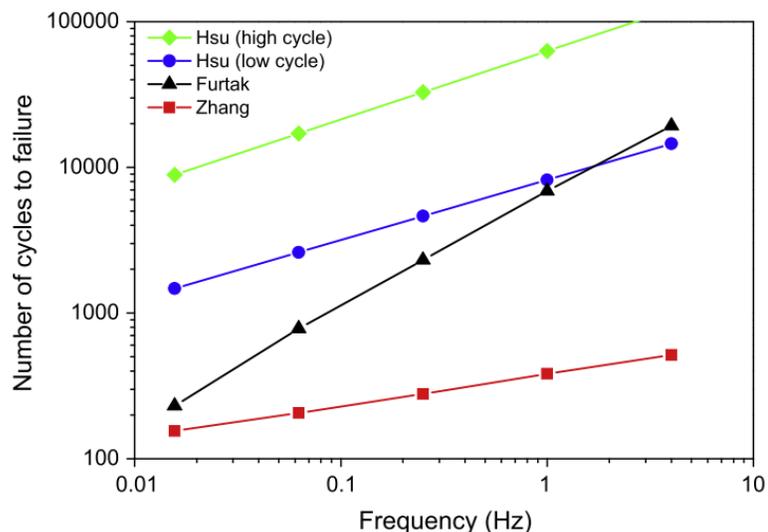


Figura 2.14: Número de ciclos hasta la falla versus frecuencia de carga cíclica. $S_{m\acute{a}x}/f'_c = 0.75$, $R = 0.1$ (Medeiros et al., 2015).

El grado en que la frecuencia de la carga cíclica afecta la vida a fatiga del hormigón depende del nivel de tensión máximo inducido por dicha carga. En particular, para niveles de tensión inferiores al 75 % de la resistencia estática del hormigón, las frecuencias de carga comprendidas entre 70 y 900 ciclos por minuto (o equivalentemente 1.17 Hz y 15 Hz) tienen un efecto reducido en la disminución de la vida a fatiga. Sin embargo, para niveles de tensión superiores, la disminución de la vida a fatiga para el mismo rango de frecuencias es considerable (ACI Committee 215, 1974).

El estudio realizado por Medeiros et al. (2015) consistió en ensayar probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo (acero y polipropileno), considerando un nivel de tensión máximo igual al 85 % de la resistencia estática del hormigón y cuatro niveles de frecuencia de carga distinta (1/16 Hz, 1/4 Hz, 4 Hz y 16 Hz). Los resultados mostraron que la variación de la frecuencia de la carga cíclica afecta considerablemente la vida a fatiga de hormigón simple, coincidiendo con los resultados expuestos por otros autores. Es decir, se observó una disminución de la vida a fatiga del hormigón a medida que la frecuencia de carga disminuía. Finalmente, el hormigón con fibra de refuerzo presentó una mejora considerable respecto al hormigón simple, presentando un mayor número de ciclos hasta la falla que este último para niveles de frecuencia bajos.

2.8. Evolución de la deformación cíclica

2.8.1. Tasa de deformación secundaria

Las deformaciones irreversibles presentes en el hormigón producto de la carga cíclica de fatiga se acumulan a lo largo de cada ciclo. Al graficarlas, se observa que la acumulación de deformaciones puede dividirse en tres etapas (Gao y Hsu, 1998). La primera etapa muestra un aumento en la deformación a tasa decreciente, debido al cierre de poros y microfisuras entre los áridos y el mortero de cemento del hormigón. La segunda etapa presenta una tasa de deformación constante a medida que aumentan las microfisuras en el hormigón. Finalmente, la tercera etapa presenta un aumento de deformación a tasa creciente, producto de la fusión

de las microfisuras (Isojeh et al., 2017).

Se define como tasa de deformación secundaria a la pendiente de la segunda etapa del perfil de evolución o acumulación de deformaciones irreversibles (Isojeh et al., 2017). La Figura 2.15 muestra la evolución de deformación típica observada en ensayos a fatiga de hormigón con y sin fibra de refuerzo y su respectiva tasa de deformación secundaria.

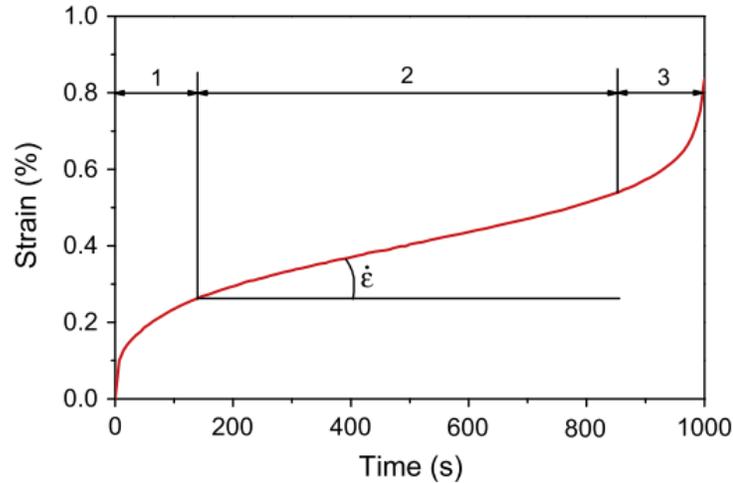


Figura 2.15: Evolución de las deformaciones con el número de ciclos, tasa de deformación secundaria (Medeiros et al., 2015).

El principal beneficio del estudio de la tasa de deformación secundaria ($\dot{\epsilon}$), es que puede ser utilizada para estimar la vida a fatiga de hormigón con y sin fibra de refuerzo sin la necesidad de ensayar la muestra hasta la falla (Vicente et al., 2016). La Figura 2.16 muestra la relación existente entre la tasa de deformación secundaria y el número de ciclos hasta la falla de hormigón sin fibra de refuerzo para un mismo nivel de tensión y distintas frecuencias de carga.

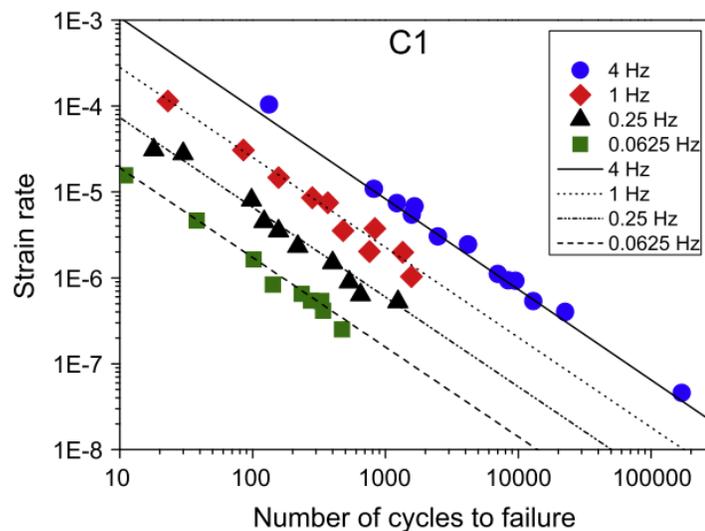


Figura 2.16: Tasa de deformación secundaria versus número de ciclos hasta la falla, frecuencia de carga cíclica variable (Medeiros et al., 2015).

2.8.2. Tasa de deformación secundaria por ciclo versus vida a fatiga

Sabiendo que la tasa de deformación secundaria corresponde a la pendiente de la segunda etapa del perfil de evolución o acumulación de deformaciones irreversibles, tal como se presentó en la Figura 2.15, es posible definir dicho parámetro a partir de la siguiente expresión.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (2.14)$$

Donde el parámetro ϵ corresponde a la deformación unitaria y t al tiempo. Luego, relacionando dichos parámetros y definiendo N como el número de ciclos hasta la falla, es posible obtener las siguientes expresiones.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial (n/N)} = N \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial n} = N \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial (tf)} = N \cdot \frac{\dot{\epsilon}}{f} \quad (2.15)$$

Donde el parámetro f corresponde a la frecuencia de la carga cíclica y n al número de ciclos efectuados. Por lo tanto, la ecuación 2.15 revela que el cociente entre la tasa de deformación secundaria y la frecuencia de la carga de fatiga corresponde a la variación de deformación irreversible por ciclo (Poveda et al., 2017).

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial n} = \frac{\dot{\epsilon}}{f} \quad (2.16)$$

La Figura 2.17 muestra la tasa de deformación secundaria por ciclo versus el número de ciclos hasta la falla para lotes de probetas de una misma matriz de hormigón con distintas cuantías de fibras de refuerzo.

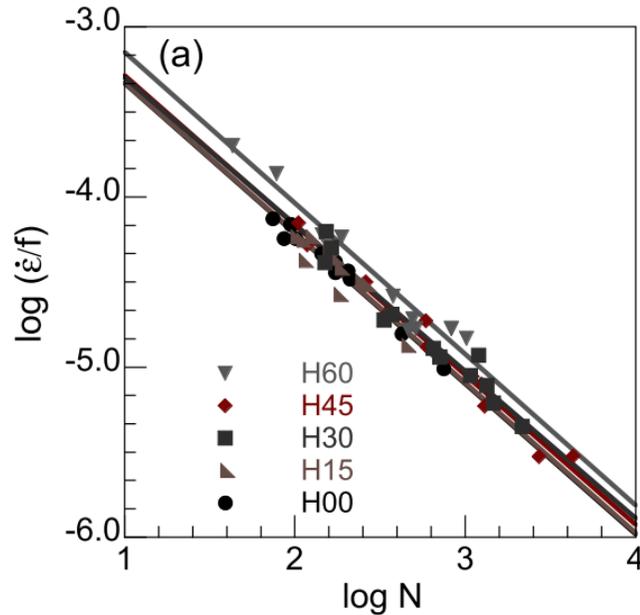


Figura 2.17: Tasa de deformación secundaria por ciclo versus número de ciclos hasta la falla (Poveda et al., 2017).

Los ajustes lineales presentes en la Figura 2.17 fueron realizados por Poveda et al. (2017)

de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\log \frac{\dot{\epsilon}}{f} = m + s \cdot \log N \quad (2.17)$$

A partir de la Figura 2.17, dichos autores notaron que el ajuste de todos los lotes de probetas de hormigón presentaron una pendiente similar, y se ubicaron muy cercanos a una misma recta. Los autores asociaron dicho comportamiento a que la relación entre la tasa de deformación secundaria por ciclo y el número de ciclos hasta la falla no depende del contenido de fibra de refuerzo en la matriz de hormigón (Poveda et al., 2017).

2.9. Curva tensión-deformación como envolvente de deformaciones de fatiga

2.9.1. Ensayo de fatiga pre-peak

Las muestras de hormigón que son sometidas a ensayos de fatiga presentan una evolución en su curva tensión-deformación con cada uno de los ciclos efectuados. En dicha evolución se observa el deterioro del módulo de elasticidad del hormigón, debido principalmente a la generación y crecimiento de grietas en cada uno de los ciclos, dando como resultado un aumento de las deformaciones permanentes (Vicente et al., 2016). En la literatura se ha estudiado la existencia de una envolvente de deformaciones para hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo, llegándose a la conclusión de que dicha envolvente se aproxima a la curva de tensión versus deformación para ensayos de carga monotónica en compresión (Karsan y Jirsa, 1969; Otter y Naaman, 1988). La Figura 2.18 muestra la superposición teórica de dicha curva con las curvas de histéresis de un ensayo de fatiga en compresión.

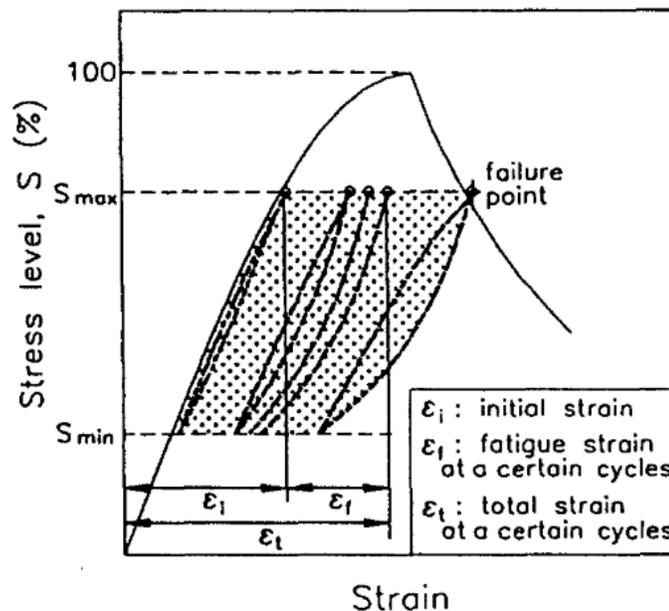


Figura 2.18: Comportamiento de hormigón sometido a ensayos de carga monotónica y de fatiga en compresión (Kim y Kim, 1996).

La investigación realizada por Cachim et al. (2002) confirmó el empleo de la curva de carga monotónica en compresión como envolvente de deformaciones de fatiga para hormigón con y sin fibra de refuerzo. En su investigación, dichos autores definieron como la máxima deformación en la falla a la deformación correspondiente a la máxima fuerza del último ciclo que soporta una probeta de hormigón sometida a un ensayo de fatiga. La Figura 2.19 muestra la superposición de las máximas deformaciones en la falla de ensayos de fatiga en compresión sobre la curva de carga monotónica de hormigón con y sin fibra de refuerzo.

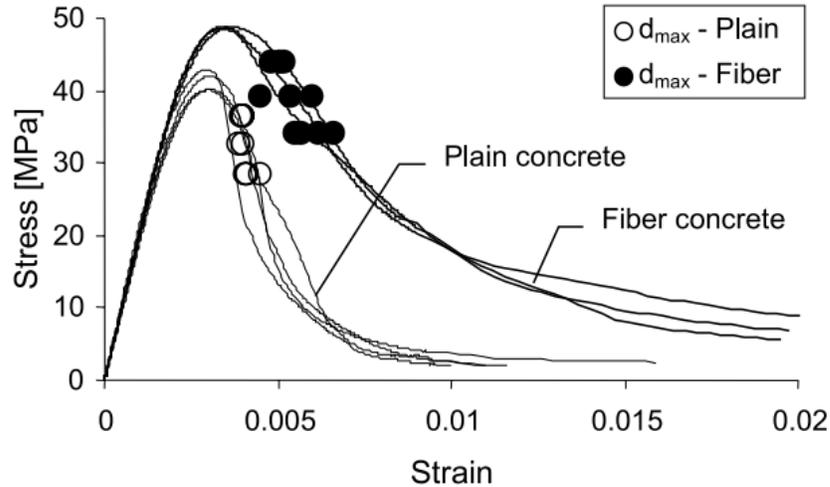


Figura 2.19: Máximas deformaciones en la falla de hormigón simple y hormigón con fibra de refuerzo sobre su respectiva curva de tensión-deformación (Cachim et al., 2002).

2.9.2. Ensayo de fatiga post-peak

Otros tipos de ensayos de fatiga donde se observa la existencia de una envolvente de deformaciones fueron los realizados por Germano et al. (2016) y Otter y Naaman (1988), estando enfocados en ensayos de fatiga post-peak. La primera de estas investigaciones estudió el comportamiento de vigas de hormigón con y sin fibra de refuerzo de acero sometidas a ensayos de fatiga en flexión, con la característica de que las muestras fueron pre-fisuradas a partir de una carga estática antes de aplicar una carga de fatiga con un nivel de tensión máximo y mínimo constante. Por otro lado, la segunda investigación estudió el comportamiento de probetas cilíndricas de hormigón sometidas a ensayos de fatiga en compresión aplicando una carga con nivel de deformación constante. Las Figuras 2.20 y 2.21 muestran la existencia de la envolvente de deformaciones en ensayos de fatiga en flexión y compresión post-peak respectivamente.

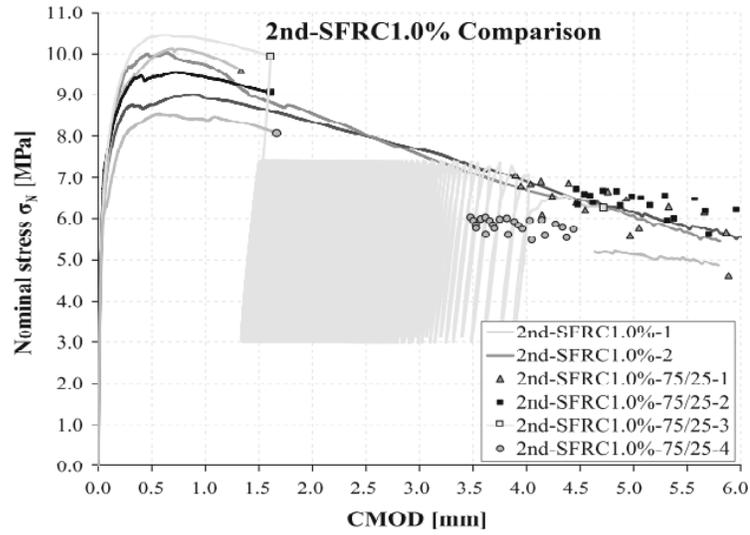


Figura 2.20: Ensayo de fatiga en flexión, máximas deformaciones en la falla y curva de carga monotónica (Germano et al., 2016).

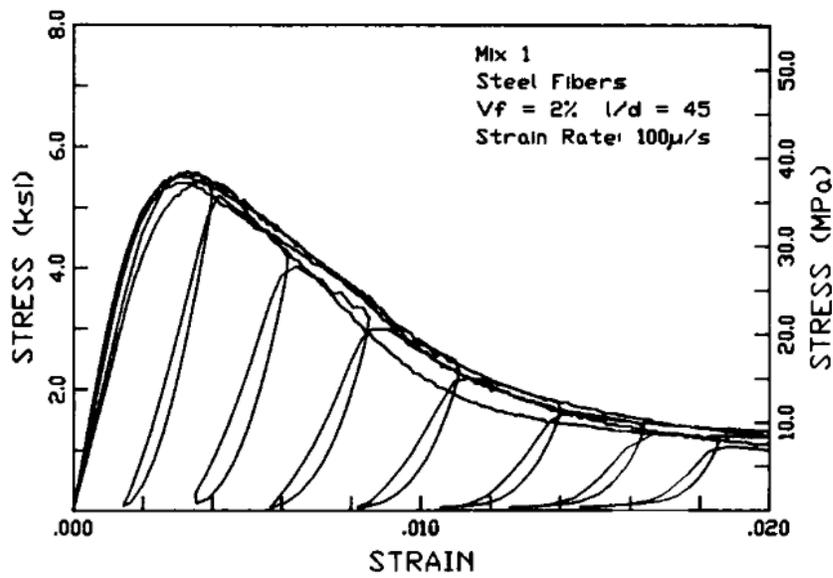


Figura 2.21: Ensayo de fatiga en compresión, carga de amplitud de deformación constante y curva de carga monotónica en compresión (Otter y Naaman, 1998).

Capítulo 3

Metodología

El presente capítulo expone la metodología y decisiones tomadas en la elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón con y sin fibra de refuerzo, y el programa experimental de la investigación. Adicionalmente, se presentan las características de los materiales que componen la mezcla y el montaje experimental asociado a cada tipo de ensayo.

3.1. Mezcla de hormigón

Se consideró sólo un tipo de mezcla de hormigón en la elaboración de las probetas cilíndricas, variando únicamente el contenido y la geometría de la fibra de alcohol polivinílico presente en su matriz. Por lo tanto, los ensayos experimentales permiten comparar la variación de las propiedades mecánicas de una misma mezcla al cambiar su contenido de fibra de refuerzo.

3.1.1. Dosificación de la mezcla

En la elaboración de todas las probetas cilíndricas de hormigón se consideró la dosificación empleada por Reveco (2021) en la mezcla de árido grueso (GA) que utilizó al estudiar la respuesta de hormigón reforzado con fibra de PVA. Dicho autor consideró un porcentaje máximo de fibra de refuerzo igual a 1,23 % del volumen geométrico de la muestra y una relación agua/cemento igual a 0.40. Adicionalmente, se consideró la modificación realizada por Arenas (2021) a la relación agua/cemento de dicha mezcla, donde se asignó un nuevo valor igual a 0.45 producto del aumento del porcentaje máximo de fibra de refuerzo empleado respecto al primer autor, pasando de 1.23 % a 2.00 %. La Tabla 3.1 muestra la dosificación por metro cúbico y relación agua/cemento de la mezcla de hormigón considerada.

Tabla 3.1: Proporciones de la mezcla de hormigón por unidad de volumen.

Material	Cantidad
Cemento [kg/m ³]	796.0
Arena fina [kg/m ³]	477.0
Arena gruesa [kg/m ³]	637.0
Grava [kg/m ³]	980.0
Agua [kg/m ³]	358.2
Superplastificante [L/m ³]	2.78
Relación agua/cemento (A/C)	0.45

3.1.2. Detalle de los materiales

La Tabla 3.2 muestra el detalle de los materiales empleados en la elaboración de la mezcla de hormigón.

Tabla 3.2: Materiales que componen la mezcla de hormigón.

Material	Características
Cemento	Cemento puzolánico, grado corriente (Polpaico Especial [®])
Arena	Tamaño nominal máximo 12.5 mm (Río Maipo [®])
Grava	Tamaño nominal máximo 19 mm (Río Maipo [®])
Agua	Agua potable
Superplastificante	Sika [®] ViscoCrete [®] - 5200 CL

3.1.3. Tipo de fibra de refuerzo

En la elaboración de las probetas cilíndricas de hormigón se consideraron dos tipos distintos de fibra de refuerzo de PVA marca KURALON[™], correspondientes al tipo RECS 15/12 mm y RF 600/15 mm. La Figura 3.1 muestra la apariencia respectiva de cada tipo de fibra de refuerzo.



(a) RECS 15/12 mm

(b) RF 600/15 mm

Figura 3.1: Fibras de refuerzo de PVA marca KURALON[™].

3.1.3.1. Propiedades mecánicas de las fibras de refuerzo

Las propiedades mecánicas de la fibra de refuerzo de alcohol polivinílico se obtienen directamente de la página web del proveedor (KURALON[™]). Las Tablas 3.3 y 3.4 muestran las principales propiedades mecánicas y geométricas de la fibra de refuerzo tipo RECS 15/12 y RF 600/15 respectivamente.

Tabla 3.3: Propiedades de fibra de refuerzo de PVA, RECS 15/12 mm.

Largo	Diámetro	Resistencia a la tracción	Deformación en la falla	Módulo de Young	Gravedad específica
[mm]	[μm]	[MPa]	[%]	[GPa]	[g/cm ³]
12	40	1560	6.5	41	1.29

Tabla 3.4: Propiedades de fibra de refuerzo de PVA, RF 600/15 mm.

Largo	Diámetro	Resistencia a la tracción	Deformación en la falla	Módulo de Young	Gravedad específica
[mm]	[μm]	[MPa]	[%]	[GPa]	[g/cm ³]
15	240	1495	7.5	42	1.29

3.1.4. Contenido de fibra de refuerzo

En la investigación se consideraron tres porcentajes de contenido de fibra de refuerzo medidos respecto al volumen geométrico de cada una de las muestras. Con el fin de brindar una mejor comprensión, se asignó una sigla a cada tipo de mezcla, correspondiendo la letra y el número al tipo y contenido de fibra de refuerzo respectivamente. La Tabla 3.5 presenta un resumen con la identificación, porcentaje y tipo de fibra de PVA empleado en la elaboración de las mezclas de hormigón.

Tabla 3.5: Tipos y contenido de fibra de PVA.

Identificación de la mezcla	Tipo de fibra (PVA)	Contenido de fibra [%]
S	-	0.00
F1	RECS 15/12 mm	1.00
F2	RECS 15/12 mm	2.00
G1	RF 600/15 mm	1.00
G2	RF 600/15 mm	2.00

3.2. Programa experimental

Una vez determinada la dosificación y contenido de fibra de refuerzo de las mezclas de hormigón, el siguiente paso consistió en planificar el programa experimental de la investigación, determinando tanto la cantidad y tipo de ensayos como el número de probetas cilíndricas de hormigón con y sin fibra de refuerzo necesarias.

3.2.1. Caracterización de las muestras

El primer lote de muestras considerado fue el necesario para determinar la curva tensión-deformación y la resistencia estática del hormigón mediante ensayos de carga monotónica en compresión. Además, con la finalidad de brindar una mejor caracterización de las propiedades mecánicas del material, se consideró la realización de ensayos de tracción directa. La Tabla 3.6 muestra el número de ensayos experimentales necesarios para la caracterización de las propiedades mecánicas de las probetas cilíndricas con y sin fibra de refuerzo.

Tabla 3.6: Programa experimental, caracterización del material.

Tipo de mezcla	Ensayos de compresión pura	Ensayos de tracción directa	Número total de probetas
S	2	1	3
F1	2	1	3
F2	2	1	3
G1	2	1	3
G2	2	1	3
Total			15

3.2.2. Ensayos de fatiga en compresión post-peak

El segundo lote de muestras se asoció a ensayos de fatiga en compresión post-peak, considerando dos niveles de degradación de la capacidad del hormigón iguales a un 2 % y un 10 % de su resistencia estática a compresión. El procedimiento anterior se realizó mediante la aplicación de una carga constante asociada a una deformación igual a 0.5 milímetros por minuto. Además, al momento de aplicar la carga de fatiga, se consideró una velocidad constante igual a 20.000 kgf/minuto y un nivel de tensión mínimo igual a un 20 % de la resistencia estática del hormigón. Finalmente, para los niveles de 2 % y 10 % de degradación se consideraron tres niveles máximos de tensión, medidos respecto a la resistencia estática del hormigón, correspondientes a 80 %, 90 % y 95 %; 70 %, 75 % y 80 % respectivamente. La Tabla 3.7 muestra la distribución de probetas contempladas en los ensayos de fatiga en compresión post-peak.

Tabla 3.7: Programa experimental, ensayos de fatiga en compresión post-peak.

Tipo de Mezcla	2 % de degradación			10 % de degradación			Número total de probetas
	$0.80 \cdot f'_c$	$0.85 \cdot f'_c$	$0.90 \cdot f'_c$	$0.75 \cdot f'_c$	$0.80 \cdot f'_c$	$0.85 \cdot f'_c$	
S	1	1	1	1	1	1	6
F1	1	1	1	1	1	1	6
F2	1	1	1	1	1	1	6
G1	1	1	1	1	1	1	6
G2	1	1	1	1	1	1	6
Total							30

3.2.3. Ensayos de fatiga en compresión pre-peak

El último lote de muestras contemplado se asoció a ensayos de fatiga en compresión con niveles de tensión máximos inferiores a la resistencia estática del hormigón. Es decir, ensayos de fatiga pre-peak controlados según el nivel de tensión. En particular, se consideraron tres niveles de tensión máximos iguales al 85 %, 90 % y 95 % de la resistencia estática del hormigón, y un nivel de tensión mínimo igual al 20 % de dicho valor. Además, al igual que en los ensayos de fatiga post-peak se consideró una carga de fatiga de velocidad constante igual a 20.000 kgf/minuto. La Tabla 3.8 muestra la distribución de probetas consideradas en los ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

Tabla 3.8: Programa experimental, ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

Tipo de mezcla	Nivel máximo de tensión			Número total de probetas
	$0.85 \cdot f'_c$	$0.90 \cdot f'_c$	$0.95 \cdot f'_c$	
S	1	1	1	3
F1	1	1	1	3
F2	1	1	1	3
G1	1	1	1	3
G2	1	1	1	3
Total				15

3.2.4. Resumen

El programa de trabajo experimental contempla un total de 60 probetas cilíndricas de hormigón y cinco muestras adicionales en caso de tener que repetir algún ensayo, dando un total de 65 probetas. Adicionalmente, se contemplaron cinco probetas extras destinadas a ensayos preliminares, cuyos resultados se muestran en el Anexo A. La Tabla 3.9 resume la cantidad total de probetas necesarias para la realización de los ensayos experimentales de la presente investigación.

Tabla 3.9: Programa experimental, resumen.

Tipo de mezcla	Número total de probetas
S	13
F1	13
F2	13
G1	13
G2	13
Total	65

Una vez determinada la cantidad y tipo de muestras que se debían elaborar, se realizó la compra de los materiales necesarios para su fabricación. Para ello se escogieron los mismos proveedores de cemento y áridos utilizados por Arenas (2021), con el fin de obtener una mezcla cuyas características fueran lo más similar posible a las obtenidas por dicho autor.

3.3. Análisis granulométrico

Con la finalidad de caracterizar el material que constituye la mezcla de hormigón se realizó un análisis granulométrico a la arena fina, arena gruesa y grava, determinando el porcentaje y tamaño de los granos que los componen. Sin embargo, previo a dicho análisis fue necesario escoger una muestra representativa de cada tipo de árido. Para lograr lo anterior se empleó el método conocido como cuarteo.

3.3.1. Cuarteo de materiales

El método de cuarteo consistió en depositar y mezclar todo el material correspondiente a un tipo de árido sobre una superficie plana y limpia, formando un cono que fue dividido en cuatro partes iguales. Dos de ellas, opuestas entre sí, se depositaron en un tambor plástico del Laboratorio de Sólidos MECESUP, mientras que las otras dos partes se volvieron a mezclar formando un nuevo cono. El procedimiento anterior se repitió hasta obtener una muestra representativa cuyo peso varió entre cuatrocientos gramos y un kilogramo del material.

3.3.2. Secado de las muestras

Una vez obtenidas las muestras representativas de cada tipo de árido (arena fina, arena gruesa y grava), estas se depositaron en el horno de secado del Laboratorio de Sólidos MECESUP durante 24 horas a una temperatura constante de 100°C. La Figura 3.2 muestra el horno de secado utilizado en la presente investigación.



Figura 3.2: Horno de secado.

3.3.2.1. Contenido de humedad

Se registró tanto el peso de los áridos antes y después de depositarlos en el horno de secado como el peso del respectivo recipiente metálico. A partir de dichos valores fue posible determinar el contenido de humedad de cada muestra. La Tabla 3.10 presenta el porcentaje de humedad de cada tipo de árido.

Tabla 3.10: Contenido de humedad de los áridos

Tipo de árido	H [%]
Arena fina	2.28
Arena gruesa	1.81
Grava	0.58

3.3.3. Tamizado de materiales

El procedimiento para realizar el análisis granulométrico consistió en:

1. Obtener una muestra representativa mediante el método de cuarteo del tipo de suelo al que se desea realizar un análisis granulométrico.
2. Secar la muestra en el horno y registrar el peso inicial con la balanza de precisión.
3. Limpiar cuidadosamente la serie de tamices que será empleada en el análisis granulométrico.
4. Disponer la serie de tamices según su abertura en orden decreciente sobre el depósito receptor y depositar cuidadosamente la muestra de suelo sobre el tamiz de mayor abertura. La Figura 3.3 muestra el juego de tamices empleado en el análisis granulométrico, el detalle de la malla y apertura de cada tamiz se presenta en la Tabla 3.11.
5. Agitar hasta que todo el material pase por la malla o hasta que la cantidad de material retenido sea constante.
6. Registrar el peso de la muestra retenida sobre la malla.
7. Limpiar el material fino adherido a la malla del tamiz, depositándolo en el tamiz siguiente o en el depósito receptor en caso de trabajar con la malla #200.
8. Repetir los pasos 4, 5 y 6 para los tamices restantes respetando el orden adquirido en el paso 4.
9. Por último, registrar el peso del material acumulado en el depósito receptor.



Figura 3.3: Tamices empleados en el análisis granulométrico.

Tabla 3.11: Aberturas de la serie de tamices empleada en el análisis granulométrico.

Malla	Abertura [mm]	Malla	Abertura [mm]
3/4"	19.00	#10	2.00
1/2"	12.50	#30	0.60
3/8"	9.50	#40	0.425
#4	4.75	#50	0.30
#8	2.36	#100	0.15
		#200	0.075

3.3.4. Resultados

3.3.4.1. Arena fina

La clasificación de la muestra de arena fina según la ASTM D2487-17 (2017) correspondió a arena pobremente graduada con contenido de finos. El detalle del análisis granulométrico y la curva granulométrica respectiva se presentan en la Tabla 3.12 y la Figura 3.4 respectivamente.

Tabla 3.12: Análisis granulométrico, arena fina.

Tamiz N°	Abertura [mm]	Masa retenida [gr]	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado retenido	Porcentaje acumulado que pasa
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50	3.7	0.9	0.9	99.1
#4	4.75	8.2	2.0	2.8	97.2
#8	2.36	10.5	2.5	5.3	94.7
#10	2.00	2.2	0.5	5.9	94.1
#30	0.60	9.2	2.2	8.0	92.0
#40	0.425	8.6	2.1	10.1	89.9
#50	0.30	24.3	5.8	15.9	84.1
#100	0.15	175.7	41.8	57.7	42.3
#200	0.075	134.3	32.0	89.7	10.3
Fondo	-	43.1	10.3	100.0	0.0
Masa total final	-	419.8			
Masa total inicial	-	419.9			

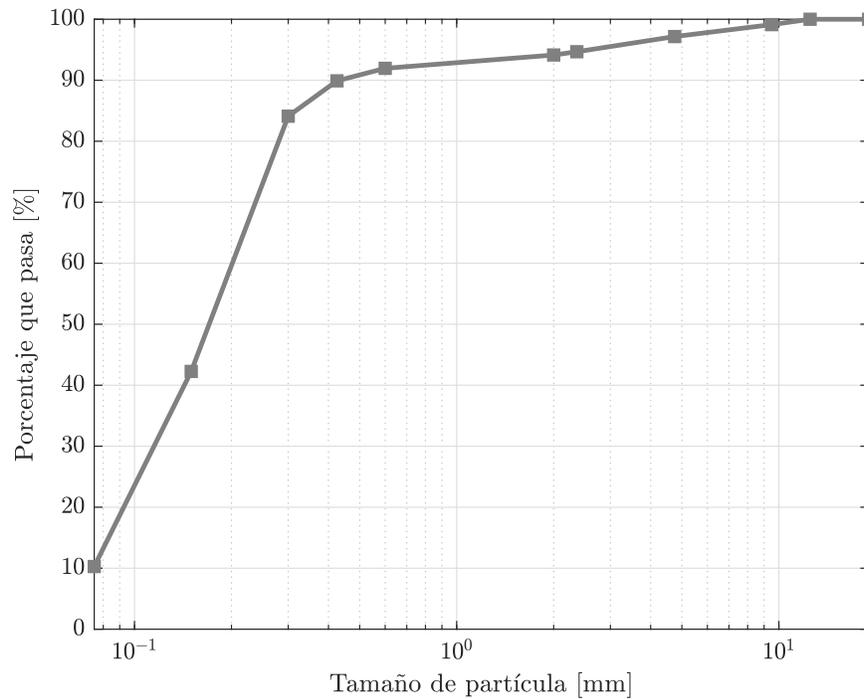


Figura 3.4: Curva granulométrica, arena fina.

3.3.4.2. Arena gruesa

La clasificación de la muestra de arena gruesa según la ASTM D2487-17 (2017) correspondió a arena pobremente graduada con grava. El detalle del análisis granulométrico y la curva granulométrica respectiva se presentan en la Tabla 3.13 y la Figura 3.5 respectivamente.

Tabla 3.13: Análisis granulométrico, arena gruesa.

Tamiz N°	Abertura [mm]	Masa retenida [gr]	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado retenido	Porcentaje acumulado que pasa
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50	0.0	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.50	8.0	1.4	1.4	98.6
#4	4.75	170.7	30.6	32.0	68.0
#8	2.36	109.8	19.7	51.7	48.3
#10	2.00	22.5	4.0	55.7	44.3
#30	0.60	103.6	18.6	74.3	25.7
#40	0.425	30.2	5.4	79.7	20.3
#50	0.30	31.7	5.7	85.4	14.6
#100	0.15	53.2	9.5	94.9	5.1
#200	0.075	20.9	3.7	98.7	1.3
Fondo	-	7.5	1.3	100.0	0.0
Masa total final	-	557.84			
Masa total inicial	-	558.23			

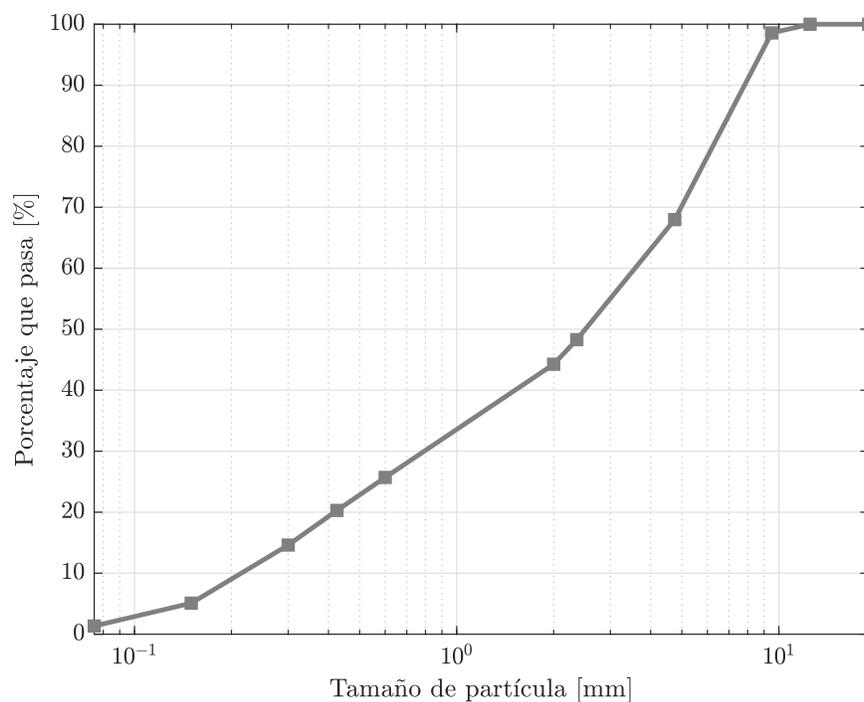


Figura 3.5: Curva granulométrica, arena gruesa.

3.3.4.3. Grava

La clasificación de la muestra de grava según la ASTM D2487-17 (2017) correspondió a grava pobremente graduada. El detalle del análisis granulométrico y la curva granulométrica respectiva se presentan en la Tabla 3.14 y la Figura 3.6 respectivamente.

Tabla 3.14: Análisis granulométrico, grava.

Tamiz N°	Abertura [mm]	Masa retenida [gr]	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado retenido	Porcentaje acumulado que pasa
3/4"	19.00	0.0	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.50	378.9	33.8	33.8	66.2
3/8"	9.50	378.4	33.7	67.5	32.5
#4	4.75	347.4	31.0	98.5	1.5
#8	2.36	10.3	0.9	99.4	0.6
#10	2.00	0.1	0.0	99.4	0.6
#30	0.60	0.3	0.0	99.5	0.5
#40	0.425	0.3	0.0	99.5	0.5
#50	0.30	0.4	0.0	99.5	0.5
#100	0.15	1.3	0.1	99.6	0.4
#200	0.075	2.3	0.2	99.8	0.2
Fondo	-	1.7	0.2	100.0	0.0
Masa total final	-	1121.5			
Masa total inicial	-	1122.0			

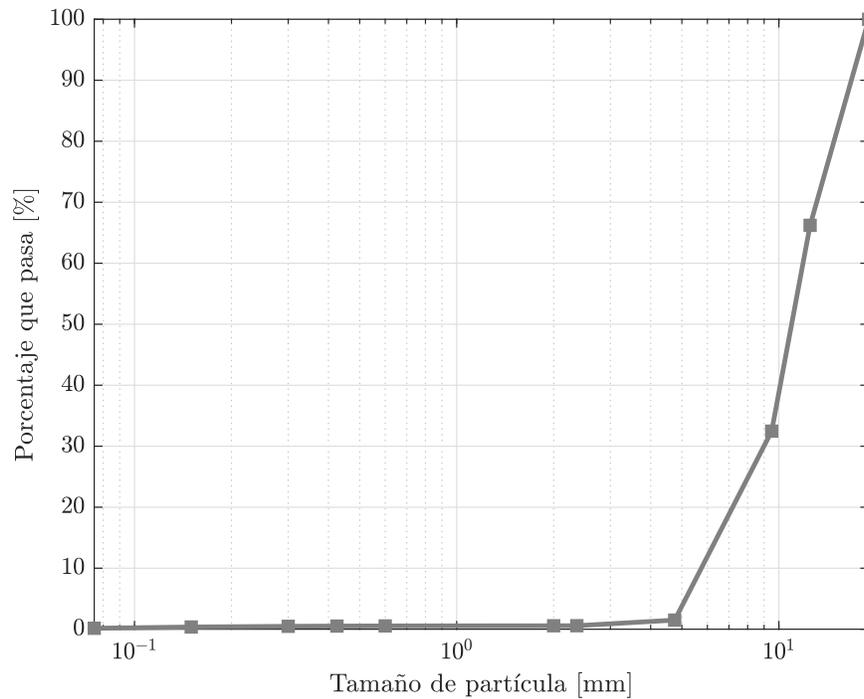


Figura 3.6: Curva granulométrica, agregado grueso (grava).

3.4. Elaboración de probetas cilíndricas de hormigón

3.4.1. Elaboración de moldes

Previo a realizar las mezclas de hormigón, fue necesario elaborar un total de 65 moldes de probeta cilíndrica a partir de tubos de PVC de 110 milímetros de diámetro exterior. La Figura 3.7 muestra los moldes de PVC empleados en la elaboración de las mezclas de hormigón.



Figura 3.7: Moldes de PVC.

El diámetro interior de los moldes fue de 105 milímetros, mientras que su altura corres-

pondió al doble de dicho parámetro, es decir, 210 milímetros. Cada uno de los moldes fueron cerrados en uno de sus extremos con una tapa de tubo sanitario de 110 milímetros de PVC y sellada con silicona Agorex[®] - 1100.

3.4.2. Elaboración de las mezclas

El primer paso al momento de elaborar las mezclas de hormigón consistió en determinar la masa en kilogramos de agua, áridos y fibra de refuerzo, y el volumen de superplastificante en mililitros necesarios para la fabricación de una probeta cilíndrica. A partir de dichos valores, las mezclas de hormigón se elaboraron en series de tres probetas utilizando un mezclador de pintura eléctrico y un contenedor plástico de 20 litros. La Figura 3.8 muestra el mezclador de pintura utilizado en la elaboración de las mezclas de hormigón.



Figura 3.8: Mezclador de pintura eléctrico.

A continuación, se presentan los pasos para elaborar una mezcla de hormigón correspondiente a tres probetas cilíndricas, en caso de que la mezcla no contenga fibra de refuerzo se deben saltar los pasos 4 y 10:

1. Pesar en recipientes metálicos y de forma separada el cemento y los áridos necesarios para elaborar tres probetas cilíndricas de hormigón (arena fina, arena gruesa y grava).
2. Pesar en un bidón plástico el agua necesaria para elaborar la mezcla.
3. Medir con una jeringa el volumen de superplastificante necesario, añadirlo al bidón de agua y agitar hasta obtener una mezcla homogénea.
4. Pesar mediante una balanza de precisión, en un recipiente plástico o metálico, la fibra de refuerzo necesaria para elaborar la mezcla.



Figura 3.9: Materiales empleados en la elaboración de tres probetas cilíndricas de hormigón.

5. Mezclar en un recipiente metálico la grava con la arena gruesa hasta obtener una mezcla homogénea. Repetir el procedimiento añadiendo la arena fina y finalmente el cemento.
6. Depositar el mezclador de pintura eléctrico dentro del contenedor plástico y añadir agua (proveniente del bidón) hasta obtener una capa de agua de aproximadamente 2 centímetros de altura.
7. Agregar aproximadamente la quinta parte de la mezcla de áridos al contenedor plástico y revolver con el mezclador de pintura eléctrico durante tres minutos hasta obtener una mezcla homogénea.
8. Sin apagar el mezclador eléctrico, añadir de forma consecutiva la quinta parte del agua del bidón, y la quinta parte de la mezcla de áridos en el contenedor plástico.
9. Una vez obtenida una mezcla homogénea, repetir el paso anterior hasta agotar los materiales.
10. Finalmente, añadir la fibra de refuerzo al contenedor plástico de la forma más uniforme posible mientras el mezclador de pintura está encendido. Revolver durante dos minutos hasta obtener una mezcla homogénea.

Una vez finalizado el proceso de mezclado, se debe depositar la mezcla de hormigón en los moldes de PVC. Los pasos para realizar dicho proceso para una probeta cilíndrica de hormigón se describen a continuación.

1. Llenar mediante una poruña metálica aproximadamente un tercio del molde cilíndrico de PVC con la mezcla de hormigón.
2. Introducir una barra de acero 25 veces en la mezcla de hormigón, describiendo círculos de radio variable.

3. Golpear 25 veces el exterior del molde con la barra de acero, alternando el sector del perímetro cada cinco golpes.
4. Repetir los pasos anteriores hasta llenar el molde.
5. Razar la cara superior de la probeta con la barra de acero y cubrir el molde con film plástico o alusa transparente.
6. Finalmente, se asigna un nombre a la probeta de hormigón y se registra su fecha de elaboración.

3.5. Detalle de las probetas elaboradas

La fecha de elaboración de los lotes de probetas F, G y S se presentan en las Tablas 3.15, 3.16 y 3.17 respectivamente. Adicionalmente, se muestra el tipo de ensayo en el que fueron utilizadas cada una de las probetas de hormigón.

Tabla 3.15: Fechas de elaboración de probetas con fibra de refuerzo RECS 15/12 mm.

Nombre de la probeta	Fecha de elaboración	Tipo de ensayo
F1 - 1	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 80 %· $f'c$)
F1 - 2	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 90 %· $f'c$)
F1 - 3	09-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 80 %· $f'c$)
F1 - 4	09-09-2021	Carga monotónica en compresión
F1 - 5	09-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 85 %· $f'c$)
F1 - 6	09-09-2021	Prueba ciclaje manual
F1 - 7	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 95 %· $f'c$)
F1 - 8	09-09-2021	Tracción directa
F1 - 9	09-09-2021	Carga monotónica en compresión
F1 - 10	09-09-2021	Fatiga pre-peak (75 %· $f'c$)
F1 - 11	09-09-2021	Fatiga pre-peak (95 %· $f'c$)
F1 - 12	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 85 %· $f'c$)
F1 - 13	09-09-2021	Fatiga pre-peak (90 %· $f'c$)
F2 - 1	01-09-2021	Carga monotónica en compresión
F2 - 2	01-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 85 %· $f'c$)
F2 - 3	01-09-2021	Fatiga pre-peak (95 %· $f'c$)
F2 - 4	02-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 85 %· $f'c$)
F2 - 5	02-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 85 %· $f'c$)
F2 - 6	02-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 80 %· $f'c$)
F2 - 7	02-09-2021	Tracción directa
F2 - 8	02-09-2021	Carga monotónica en compresión
F2 - 9	02-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 90 %· $f'c$)
F2 - 10	02-09-2021	Prueba ensayo pre-peak
F2 - 11	02-09-2021	Fatiga pre-peak (90 %· $f'c$)
F2 - 12	02-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 75 %· $f'c$)
F2 - 13	02-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 95 %· $f'c$)

Tabla 3.16: Fechas de elaboración de probetas con fibra de refuerzo RF
600/15 mm.

Nombre de la probeta	Fecha de elaboración	Tipo de ensayo
G1 - 1	03-09-2021	Fatiga pre-peak ($95\% \cdot f'c$)
G1 - 2	03-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $95\% \cdot f'c$)
G1 - 3	03-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $75\% \cdot f'c$)
G1 - 4	03-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $80\% \cdot f'c$)
G1 - 5	03-09-2021	Carga monotónica en compresión
G1 - 6	03-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $95\% \cdot f'c$)
G1 - 7	03-09-2021	Carga monotónica en compresión
G1 - 8	03-09-2021	Tracción directa
G1 - 9	03-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $85\% \cdot f'c$)
G1 - 10	03-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $85\% \cdot f'c$)
G1 - 11	03-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $90\% \cdot f'c$)
G1 - 12	03-09-2021	Carga monotónica en compresión
G1 - 13	03-09-2021	Fatiga pre-peak ($90\% \cdot f'c$)
G2 - 1	01-09-2021	Carga monotónica en compresión
G2 - 2	01-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $85\% \cdot f'c$)
G2 - 3	01-09-2021	Carga monotónica en compresión
G2 - 4	01-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $95\% \cdot f'c$)
G2 - 5	01-09-2021	Fatiga pre-peak ($95\% \cdot f'c$)
G2 - 6	01-09-2021	Fatiga pre-peak ($95\% \cdot f'c$)
G2 - 7	01-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $85\% \cdot f'c$)
G2 - 8	01-09-2021	Tracción directa
G2 - 9	01-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $80\% \cdot f'c$)
G2 - 10	02-09-2021	Prueba ensayo pre-peak
G2 - 11	02-09-2021	Fatiga post-peak ($2\% \text{deg}$, $90\% \cdot f'c$)
G2 - 12	02-09-2021	Carga monotónica en compresión
G2 - 13	02-09-2021	Fatiga post-peak ($10\% \text{deg}$, $75\% \cdot f'c$)

Tabla 3.17: Fechas de elaboración de probetas sin fibra de refuerzo.

Nombre de la probeta	Fecha de elaboración	Tipo de ensayo
S - 1	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 90 % $\cdot f'c$)
S - 2	09-09-2021	Carga monotónica en compresión
S - 3	09-09-2021	Carga monotónica en compresión
S - 4	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 85 % $\cdot f'c$)
S - 5	09-09-2021	Fatiga post-peak (2 %deg, 95 % $\cdot f'c$)
S - 6	09-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 85 % $\cdot f'c$)
S - 7	09-09-2021	Fatiga pre-peak (90 % $\cdot f'c$)
S - 8	09-09-2021	Tracción directa
S - 9	09-09-2021	Prueba ensayo pre-peak
S - 10	09-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 75 % $\cdot f'c$)
S - 11	10-09-2021	Fatiga pre-peak (95 % $\cdot f'c$)
S - 12	10-09-2021	Prueba ensayo pre-peak
S - 13	10-09-2021	Fatiga post-peak (10 %deg, 80 % $\cdot f'c$)

3.6. Refrentado de probetas

El último paso antes de comenzar con el programa de ensayos experimentales consistió en emplear la técnica de refrentado a las probetas de hormigón que no poseían la superficie superior nivelada. Para solucionar esto último, se utilizaron dos metodologías distintas que dependieron de las características de la superficie libre de cada una de las probetas a ensayar. A continuación, se detalla cada una de las distintas metodologías.

- i) Nivel de hormigón bajo la altura del molde: En los casos donde el nivel de la mezcla de hormigón fue inferior al nivel del molde de PVC, fue necesario compensar la diferencia de nivel mediante la aplicación de adhesivo epóxico Sikadur[®] - 31 HMG (ver Figura 3.10 (a)) en la superficie de las probetas. Para ello se hizo uso de una espátula curva y un anillo metálico ajustable, el cual fue previamente nivelado con la ayuda de un nivel de mano tipo torpedo.
- ii) Nivel de hormigón sobre la altura del molde: Por otro lado, en los casos donde el nivel de la mezcla de hormigón fue superior al nivel del molde de PVC fue necesario eliminar el exceso de mezcla con la ayuda de un esmeril angular y un disco diamantado de desbaste para hormigón (ver Figura 3.10 (b)). Finalmente, al igual que en el caso anterior, la superficie de la probeta fue nivelada mediante el uso de un nivel de mano tipo torpedo.



(a) Adhesivo epóxico Sikadur® - 31 HMG.

(b) Disco diamantado de desbaste para hormigón.

Figura 3.10: Elementos empleados en el refrentado de probetas.

Las probetas refrentadas mediante el uso de adhesivo epóxico Sikadur® - 31 HMG fueron ensayadas como mínimo 24 horas después de realizado dicho procedimiento. Esto último, con el fin de garantizar la correcta transferencia de tensiones a la probeta de hormigón, obteniendo como resultado la falla de la probeta ensayada y no del adhesivo epóxico. La Tabla 3.18 muestra la resistencia a la compresión de dicho adhesivo sometido a una temperatura ambiente promedio de 23°C a una edad de 1 y 7 días.

Tabla 3.18: Resistencia a la compresión, adhesivo epóxico Sikadur® - 31 HMG.

Temperatura ambiente [°C]	Edad [días]	Resistencia a la compresión [MPa]
23	1	62
	7	74

3.7. Montaje de ensayos experimentales

3.7.1. Ensayo de fatiga en compresión

Los ensayos de fatiga en compresión fueron realizados en la máquina universal INSTRON® modelo 600LX, considerando una tasa de deformación constante de 0.5 milímetros/minuto y una velocidad de carga de fatiga igual a 20.000 kgf/minuto. La deformación axial de las probetas de hormigón fueron medidas mediante el uso de dos LVDT dispuestos en una estructura soportante previamente nivelada compuesta por dos anillos metálicos. La Figura 3.11 muestra el montaje experimental empleado en los ensayos de fatiga en compresión.



Figura 3.11: Montaje experimental, ensayo de fatiga en compresión.

La estructura metálica fue nivelada antes de cada ensayo en el Laboratorio Experimental de Estructuras mediante el uso de un nivel de mano tipo torpedo. Los anillos metálicos que conforman la estructura soportante se encontraron separados entre sí al comienzo de cada ensayo a una distancia de 12.5 centímetros. Cada anillo se centró y montó en la probeta cilíndrica de hormigón mediante tres pernos que fueron ajustados cuidadosamente, evitando dañar la muestra. Finalmente, debido a que la altura de las probetas no era suficiente para la realización de los ensayos de fatiga en compresión, fue necesario disponer de dos cilindros metálicos con el fin de disminuir la distancia libre entre las placas de carga de la máquina universal.

Las Figuras 3.12 y 3.13 presentan esquemas de los ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak, en los que se muestra gráficamente la máxima deformación asociada al último ciclo de fatiga (ϵ_{uc}) y el máximo y mínimo nivel de tensión ($S_{máx}$ y $S_{mín}$).

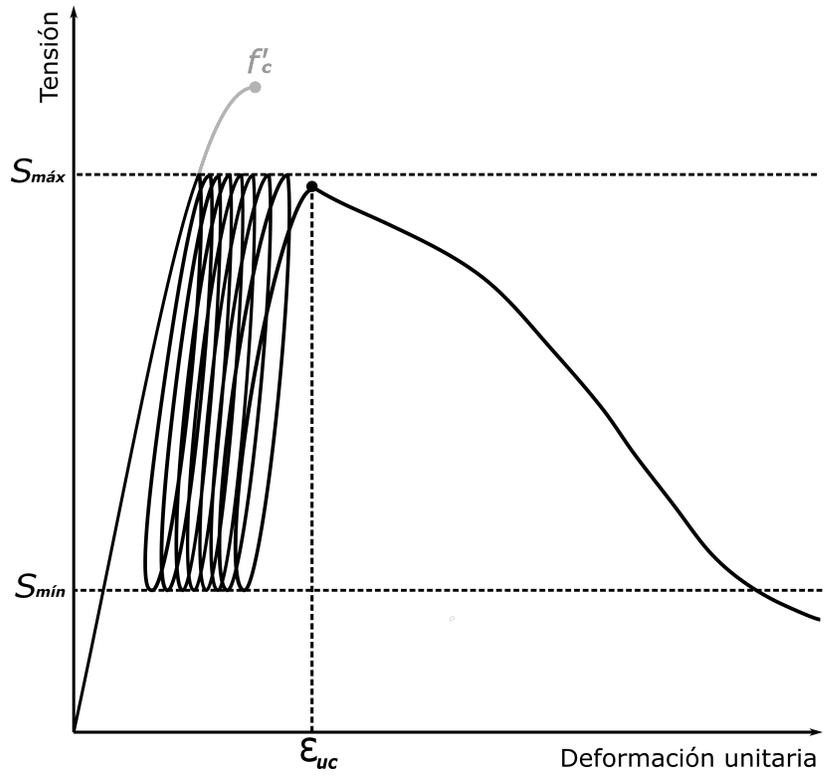


Figura 3.12: Esquema ensayo de fatiga en compresión pre-peak.

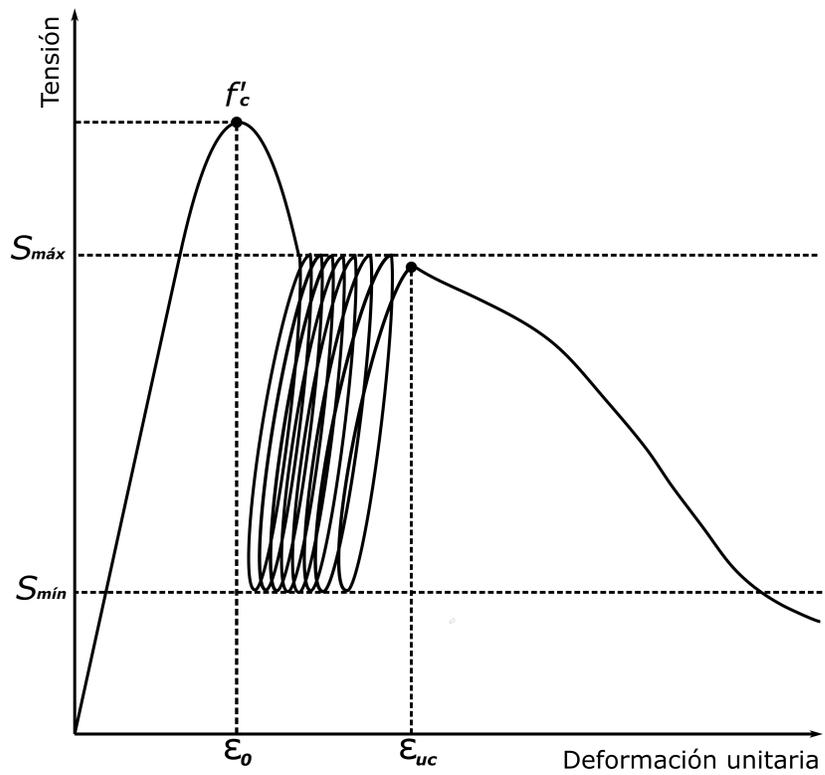


Figura 3.13: Esquema ensayo de fatiga en compresión post-peak.

3.7.2. Ensayo de compresión pura

El montaje experimental empleado en los ensayos de compresión pura fue similar al utilizado en los ensayos de fatiga en compresión, variando únicamente el algoritmo del ensayo realizado por la máquina universal INSTRON® modelo 600LX. En particular, los ensayos de carga monotónica en compresión consideraron una tasa de deformación constante igual a 0.5 milímetros por minuto hasta alcanzar una degradación igual al 80 % de la resistencia estática a la compresión de la muestra ensayada. Sin embargo, en los resultados finales no se consideran los datos ubicados en la zona post-fisuración asociados a deformaciones instantáneas elevadas producto del comportamiento rígido de las muestras.

3.7.3. Ensayo de tracción directa

Los ensayos de tracción directa se realizaron en la máquina universal INSTRON® modelo 600LX, al igual que los ensayos anteriores. Sin embargo, el montaje experimental para este tipo de ensayos es completamente diferente, debiendo ser reemplazadas las placas de carga de la máquina universal por un sistema de mordazas y dispositivos diseñados específicamente para ensayos de tracción y flexión. En particular, dicho dispositivo consiste en dos placas metálicas circulares que deben ser adheridas a ambos extremos de la probeta mediante el uso de adhesivo epóxico Sikadur® - 31 HMG. Cada placa posee un hilo que permite que sea atornillada a una nueva placa metálica, la cual posee una barra cilíndrica libre que puede ser sostenida por una de las mordazas. Este diseño evita la inducción de tensiones en el adhesivo epóxico y la probeta de hormigón al momento de realizar el montaje de la misma. La Figura 3.14 muestra cada una de las piezas que conforman el dispositivo empleado en los ensayos de tracción directa.



Figura 3.14: Dispositivo empleado en ensayos de tracción directa.

La deformación axial de las probetas se mide mediante el uso de dos LVDT. El montaje de dichos elementos es similar al utilizado por Arenas (2021), el cual consiste en disponer cada uno de los sensores en un bloque de madera que se adhiere en la parte superior de la superficie de la probeta. Adicionalmente, para cada LVDT se adhiere un nuevo bloque de madera en la parte inferior de dicha superficie, permitiendo que sobre él descansa el vástago del respectivo sensor.

Arenas (2021) reportó en sus ensayos preliminares que para esta configuración las muestras tendían a fallar en sus extremos o directamente despegarse de la placa metálica. Como solución, dicho autor agregó adhesivo epóxico en los extremos del manto de la probeta, cubriendo a lo menos dos centímetros de altura. La Figura 3.15 muestra el montaje experimental empleado en los ensayos de tracción directa.



Figura 3.15: Montaje experimental, ensayo de tracción directa.

Cada uno de los ensayos de tracción directa se realizó a una tasa de deformación constante igual a 0.5 milímetros por minuto hasta alcanzar una degradación igual al 80 % de la tensión máxima a tracción de la respectiva muestra ensayada.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los principales resultados asociados a los ensayos de carga monotónica en compresión, tracción directa y fatiga en compresión pre y post-peak.

4.1. Ensayo de carga monotónica en compresión

El primer tipo de ensayo que fue realizado correspondió a ensayos de carga monotónica en compresión, los cuales tenían como finalidad la caracterización de cada uno de los tipos de probetas considerados en la presente investigación. La Tabla 4.1 muestra los principales resultados asociados a dicho tipo de ensayo.

Tabla 4.1: Ensayos de carga monotónica en compresión.

Probeta	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_u [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 2	31.73	0.0033	0.0068	16019
S - 3	40.14	0.0042	0.0048	13174
F1 - 4	31.54	0.0040	0.0259	13801
F1 - 9	27.97	0.0013	0.0274	27447
F2 - 1	27.18	0.0044	0.0200	14694
F2 - 8	26.41	0.0035	0.0494	18937
G1 - 7	24.52	0.0022	0.0336	20597
G1 - 12	41.91	0.0036	0.0039	13156
G2 - 1	19.40	0.0049	0.0487	13140
G2 - 12	28.81	0.0029	0.0180	20107

f'_c : Tensión máxima a compresión.

ϵ_0 : Deformación en el peak de compresión.

ϵ_u : Deformación última a compresión.

E_c : Módulo de elasticidad, determinado según ACI committee 318 (2008).

Las curvas tensión versus deformación presentes en la Figura 4.1 se construyeron a partir del promedio de los datos registrados por los LVDT en la etapa previa a alcanzar la resistencia máxima de cada muestra. Posterior a dicho valor, en la etapa residual de la curva, se emplearon los datos registrados por la máquina universal.

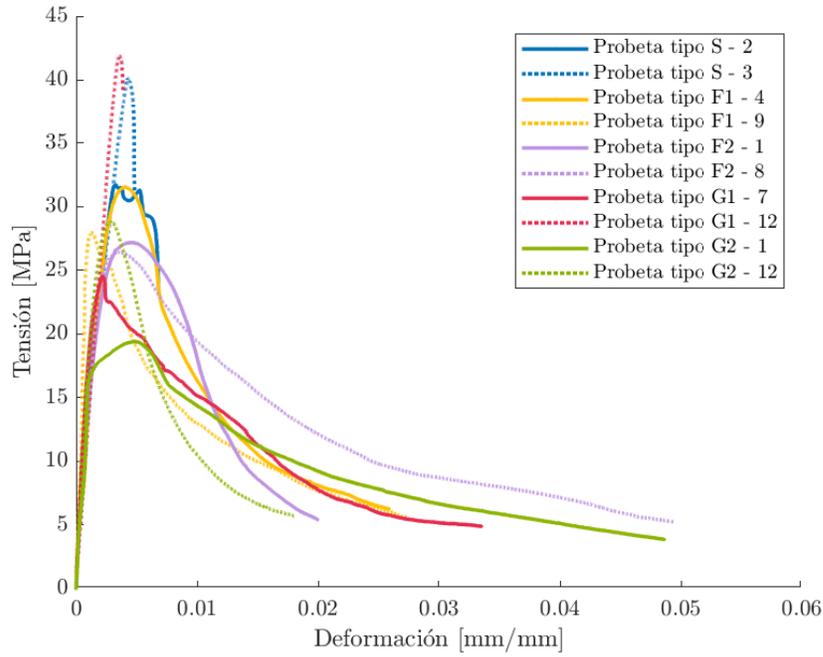


Figura 4.1: Curvas tensión-deformación en ensayos de carga monotónica en compresión.

4.2. Ensayo de tracción directa

Adicionalmente, y con la finalidad de caracterizar de mejor forma cada tipo de probeta, se realizaron ensayos de tracción directa. La Tabla 4.2 muestra los principales resultados obtenidos para dicho tipo de ensayos.

Tabla 4.2: Ensayos de tracción directa.

Probeta	f'_t [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{ut} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 8	1.91	0.00016	0.0007	21939
F1 - 8	3.28	0.00025	0.0034	16857
F2 - 7	1.81	0.00018	0.0041	17150
G1 - 8	2.65	0.00015	0.0031	19903
G2 - 8	2.24	0.00024	0.0104	17839

f'_t : Tensión máxima a tracción.

ϵ_0 : Deformación en el peak de tensión.

ϵ_{ut} : Deformación última a tracción.

Las curvas tensión-deformación presentes en la Figura 4.2 se obtuvieron empleando el mismo procedimiento utilizado en las curvas de los ensayos de carga monotónica en compresión.

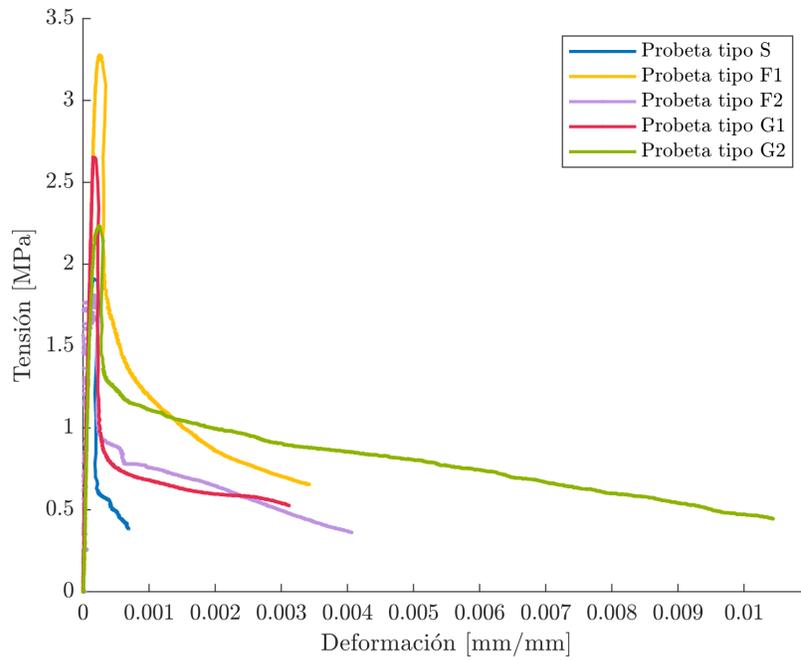


Figura 4.2: Curvas tensión-deformación, ensayos de tracción directa.

4.3. Ensayo de fatiga en compresión post-peak

El siguiente tipo de ensayo realizado correspondió a ensayos de fatiga en compresión post-peak, considerando niveles de degradación iguales a un 2% y 10% de la resistencia estática a compresión de cada muestra ensayada. A diferencia de los ensayos anteriores, en este tipo de ensayo las curvas tensión-deformación se obtienen completamente a partir del promedio de los datos registrados por los LVDT.

4.3.1. Ensayos de fatiga post-peak, 2% de degradación

Los principales resultados obtenidos en los ensayos de fatiga en compresión post-peak que consideraron un 2% de degradación respecto a la resistencia máxima de las muestras, y un nivel de tensión máximo igual a 85%, 90% y 95% de la resistencia estática a la compresión, se presentan en las Tablas 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente.

Tabla 4.3: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 4	5	36.71	0.0043	0.0057	12660
F1 - 12	24	33.36	0.0016	0.0030	24469
F2 - 2	166*	27.83	0.0038	0.0082*	15717
G1 - 10	0	39.25	0.0039	-	15640
G2 - 7	19	27.69	0.0026	0.0047	18724

ϵ_{uc} : Deformación máxima asociada al último ciclo.

N_f : Número de ciclos hasta la falla.

*El ensayo se detuvo antes de que la probeta fallara, el valor indicado es sólo una referencia.

Tabla 4.4: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.90 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 1	0	37.69	0.0035	-	16353
F1 - 2	14	26.57	0.0033	0.0055	15800
F2 - 9	14	27.69	0.0032	0.0064	16612
G1 - 11	3	36.20	0.0020	0.0029	18719
G2 - 11	10	19.06	0.0032	0.0046	15132

Tabla 4.5: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 5	2	32.17	0.0020	-	17688
F1 - 7	1	36.64	0.0026	0.0030	16420
F2 - 13	4	27.09	0.0025	0.0042	23623
G1 - 2	0	38.88	0.0026	-	17619
G2 - 4	3	23.59	0.0048	0.0077	12154

Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran las curvas de histéresis asociadas a los ensayos de fatiga en compresión que consideraron un 2% de degradación, y una tensión máxima igual a un 80%, 85% y 90% de la resistencia estática a compresión respectivamente.

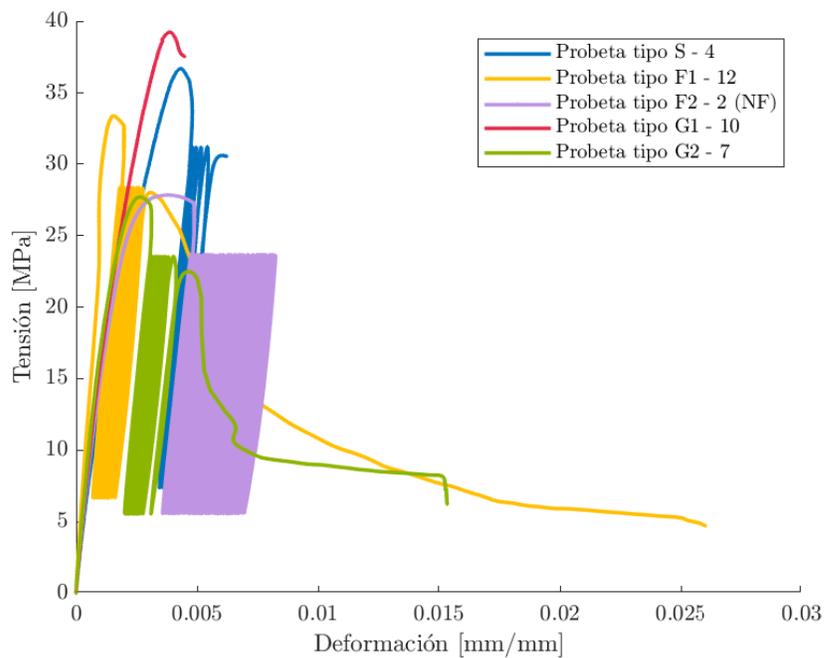


Figura 4.3: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$.

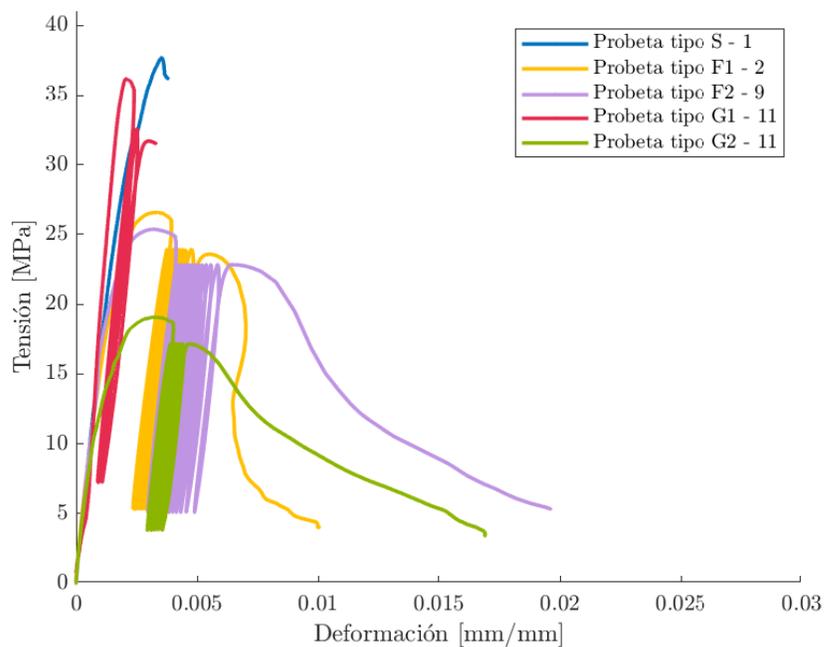


Figura 4.4: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.90 \cdot f'_c$.

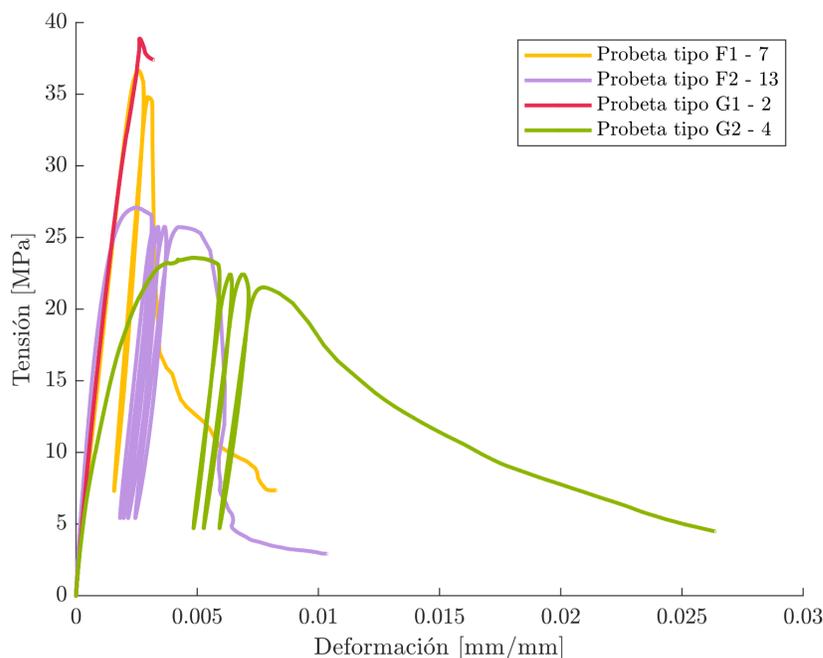


Figura 4.5: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$.

4.3.2. Ensayos de fatiga post-peak, 10 % de degradación

Los principales resultados obtenidos en los ensayos de fatiga en compresión post-peak que consideraron un 10 % de degradación respecto a la resistencia máxima de las muestras, y un nivel de tensión máximo igual a 75 %, 80 % y 85 % de la resistencia estática a la compresión, se presentan en las Tablas 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente.

Tabla 4.6: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.75 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 10	0	34.68	0.0020	-	23822
F1 - 10	57	36.60	0.0023	0.0028	23267
F2 - 12	150	33.27	0.0036	0.0069	16373
G1 - 3	163*	25.38	0.0015	0.0023*	27454
G2 - 13	150*	22.64	0.0029	0.0068*	19195

*El ensayo se detuvo antes de que la probeta fallara, el valor indicado es sólo una referencia.

Tabla 4.7: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.80 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 13	0	32.37	0.0036	-	18002
F1 - 3	0	23.99	0.0032	-	25356
F2 - 6	37	25.56	0.0019	0.0074	26092
G1 - 4	0	35.99	0.0025	-	17823
G2 - 9	20	21.15	0.0035	0.0083	18826

Tabla 4.8: Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	f'_c [MPa]	ϵ_0 [mm/mm]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 6	0	34.80	0.0019	-	-
F1 - 5	0	31.97	0.0022	-	17133
F2 - 5	4	24.65	0.0034	0.0067	21286
G1 - 9	1	27.15	0.0056	0.0098	23375
G2 - 2	7	17.14	0.0033	0.0083	16437

Las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 muestran las curvas de histéresis asociadas a los ensayos de fatiga en compresión que consideraron un 10 % de degradación, y una tensión máxima igual a un 75 %, 80 % y 85 % de la resistencia estática a compresión respectivamente.

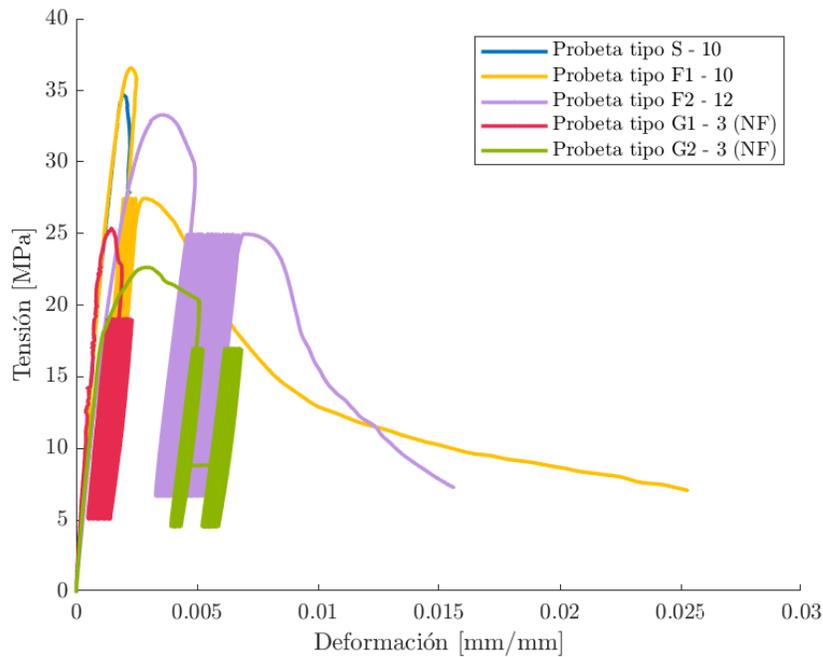


Figura 4.6: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.75 \cdot f'_c$.

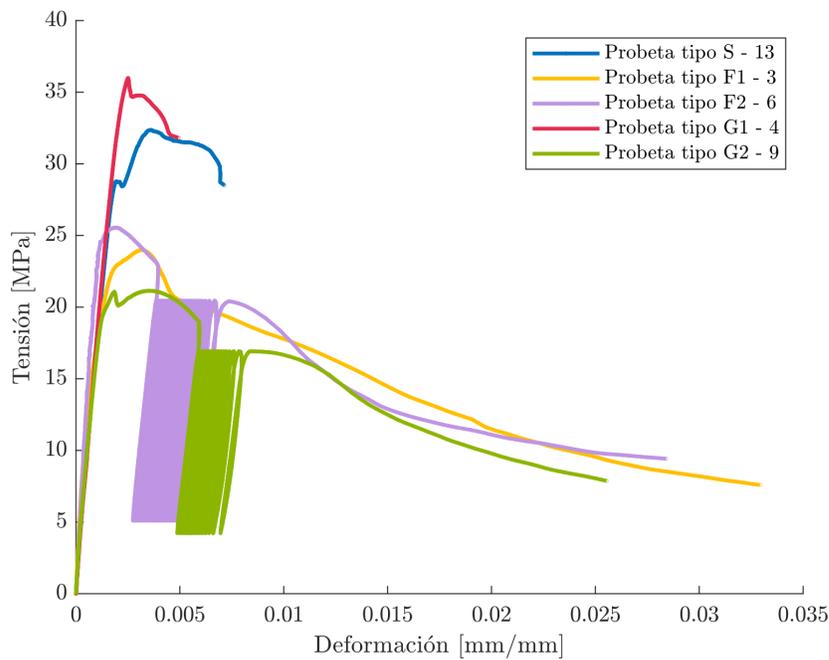


Figura 4.7: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 0.80 \cdot f'_c$.

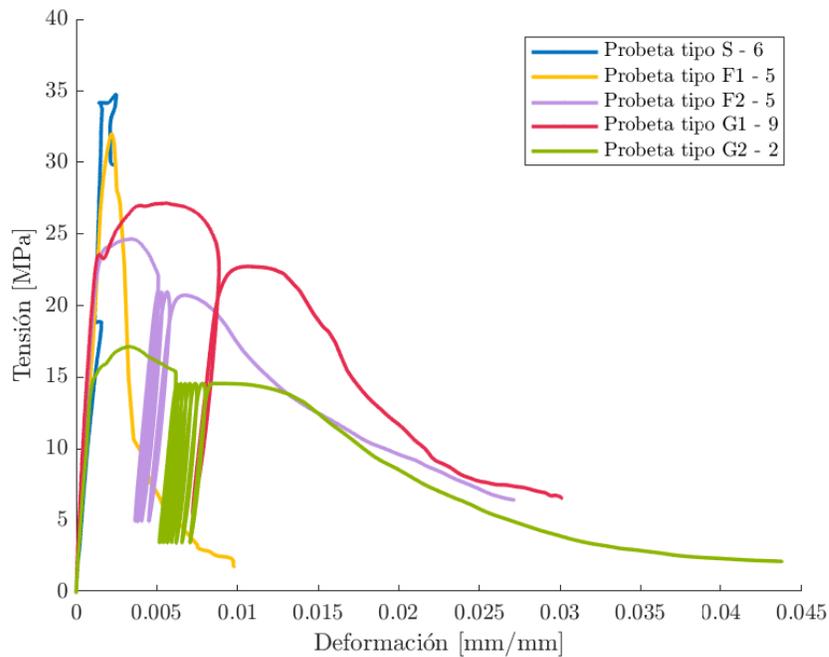


Figura 4.8: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{máx} = 0.85 \cdot f'_c$.

Los niveles máximos de tensión considerados en los ensayos de fatiga en compresión post-peak se escogieron en base a los resultados de los ensayos preliminares presentados en el Anexo A.

4.4. Ensayos de fatiga en compresión pre-peak

El último tipo de ensayo realizado correspondió a ensayos de fatiga en compresión pre-peak. A pesar de que el programa experimental consideraba originalmente un total de 15 ensayos, sólo fue posible realizar correctamente cinco, correspondientes a fatiga pre-peak con un nivel máximo de tensión igual al 95 % de la resistencia estática promedio de cada tipo de muestra. El principal problema al momento de realizar este tipo de ensayo fue la dispersión de la resistencia entre probetas de un mismo tipo, obteniendo como resultado muestras que fallaron antes de alcanzar el nivel de tensión asociado al inicio de la fatiga. La Tabla 4.9 muestra el valor de la resistencia a la compresión promedio calculada a partir de los ensayos de compresión pura y fatiga en compresión post-peak.

Tabla 4.9: Error asociado a la resistencia a compresión promedio de cada tipo de probeta.

Tipo de probeta	Promedio f'_c [MPa]	Desviación estándar [MPa]	Mediana [MPa]
S	35.04	2.98	34.74
F1	31.08	4.60	31.75
F2	27.46	2.58	27.13
G1	33.66	6.54	35.99
G2	22.43	4.14	21.89

Para solucionar el problema anterior se intentó cargar la muestra hasta un nivel cercano a su máxima resistencia a compresión, pudiendo calcular en base a dicho valor el nivel de tensión máximo del ensayo de fatiga en compresión. Sin embargo, este procedimiento requería descargar completamente la probeta al momento de realizar el ensayo, implicando una disminución de la resistencia estimada de la muestra debido al procedimiento de carga y descarga efectuado. Finalmente, para solucionar el problema se programó la posibilidad de iniciar el proceso de fatiga de forma manual, evitando la destrucción de la muestra en caso de poseer una resistencia menor al nivel de tensión máximo considerado inicialmente. La Tabla 4.10 muestra los principales resultados obtenidos para ensayos de fatiga en compresión pre-peak, considerando un nivel máximo de tensión igual a un 95 % de la resistencia estática a compresión promedio de las muestras ensayadas.

Tabla 4.10: Ensayos de fatiga en compresión pre-peak, $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$.

Probeta	N_f [-]	$S_{m\acute{a}x}$ [MPa]	ϵ_{uc} [mm/mm]	E_c [MPa]
S - 11	1	31.35	0.0022	24528
F1 - 11	2	37.46	0.0027	17994
F2 - 3	50	25.24	0.0074	17468
G1 - 1	4	37.56	0.0036	10315
G2 - 5	14	20.81	0.0064	11257

$S_{m\acute{a}x}$: Nivel máximo de tensión.

El valor del máximo nivel de tensión de los ensayos de fatiga en compresión pre-peak fue fijado como $0.95 \cdot f'_c$, debido a que dicho nivel permitía ver gráficamente el cambio de pendiente de la curva tensión-deformación generada por la máquina universal. De este modo, fue posible identificar las probetas cercanas a la falla para un nivel de tensión inferior a $S_{m\acute{a}x}$ e iniciar el proceso de fatiga de forma manual. La Figura 4.9 muestra las curvas de tensión versus deformación asociadas a los ensayos de fatiga en compresión pre-peak. Los datos empleados en su construcción, al igual que en los ensayos de fatiga en compresión post-peak, correspondieron al valor promedio registrado por los LVDT.

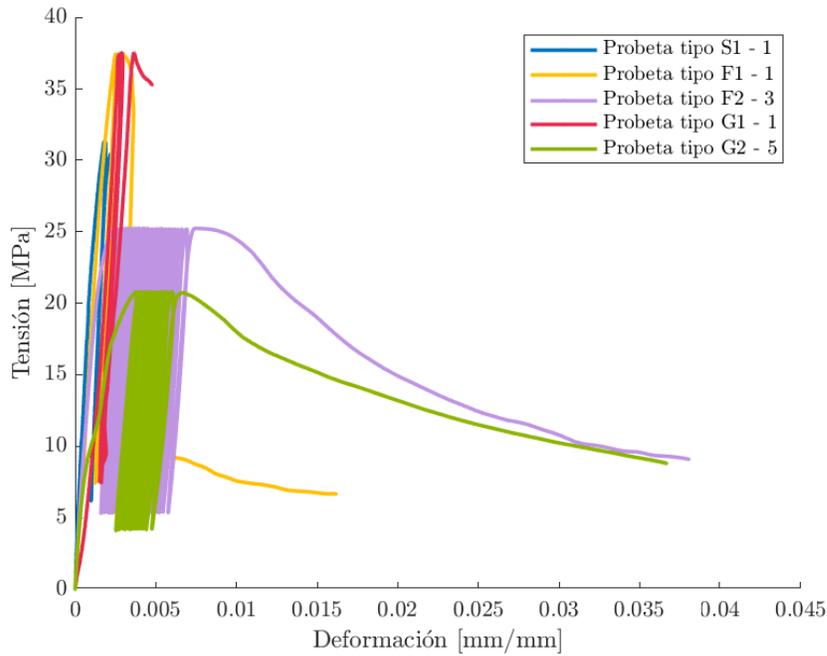
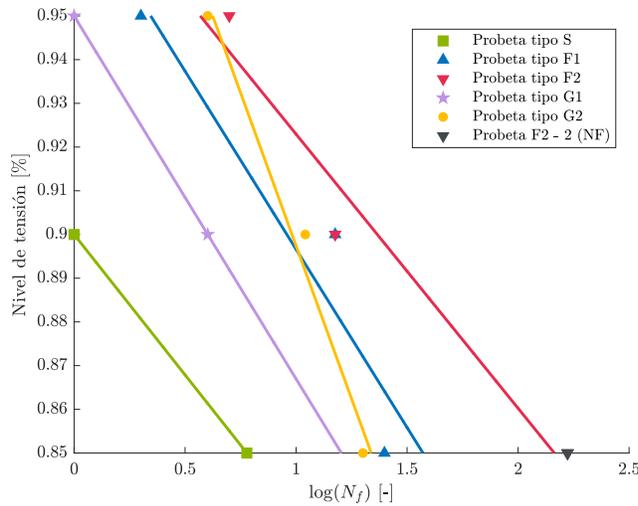


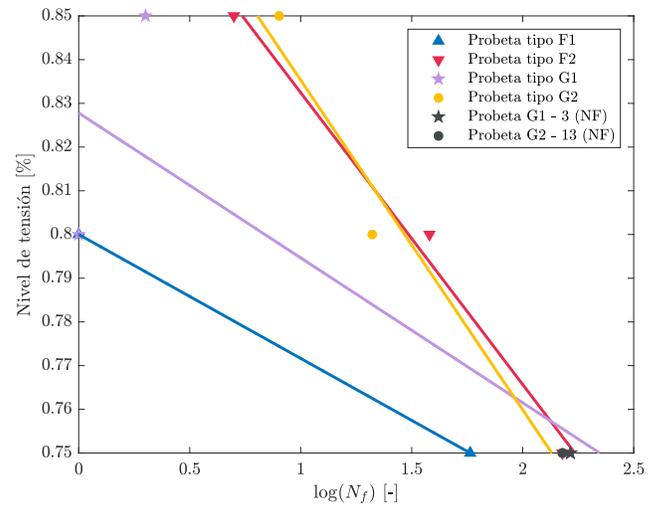
Figura 4.9: Curvas tensión-deformación, ensayos de fatiga pre-peak.

4.5. Diagrama de Wöhler

Las Figuras 4.10.a y 4.10.b muestran los diagramas de Wöhler asociados a los ensayos de fatiga en compresión post-peak considerando un 2% y 10% de degradación respectivamente, contruidos a partir de los resultados de las Tablas 4.3-4.8. En este tipo de gráficos, se aumentó en uno el número de ciclos hasta la falla de cada muestra, con el fin de poder graficar de manera satisfactoria el logaritmo de la vida a fatiga de las probetas que no fueron capaces de ciclar. En particular, en las Figuras 4.10.a y 4.11.a no se consideró el dato registrado para el nivel de tensión correspondiente al 95% de la resistencia estática a la compresión de las probetas de tipo S, debido a no ser acorde al comportamiento esperado. Finalmente, las Figuras 4.11.a y 4.11.b muestran la superposición de los diagramas de Wöhler de los ensayos de fatiga en compresión post-peak con los resultados de los ensayos de fatiga en compresión pre-peak presentados en la Tabla 4.10.

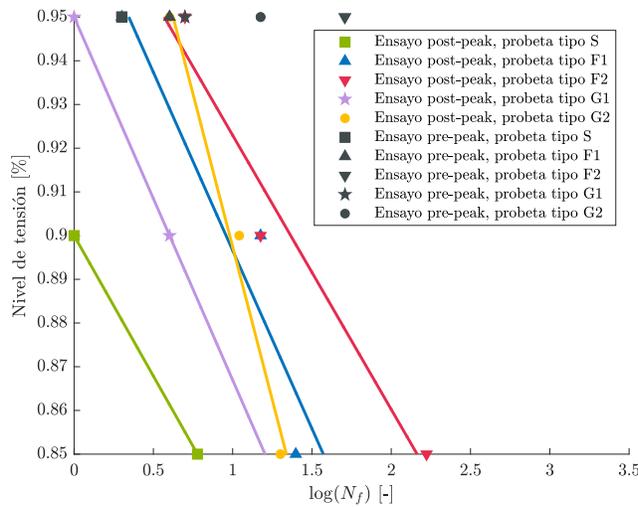


(a) 2 % de degradación.

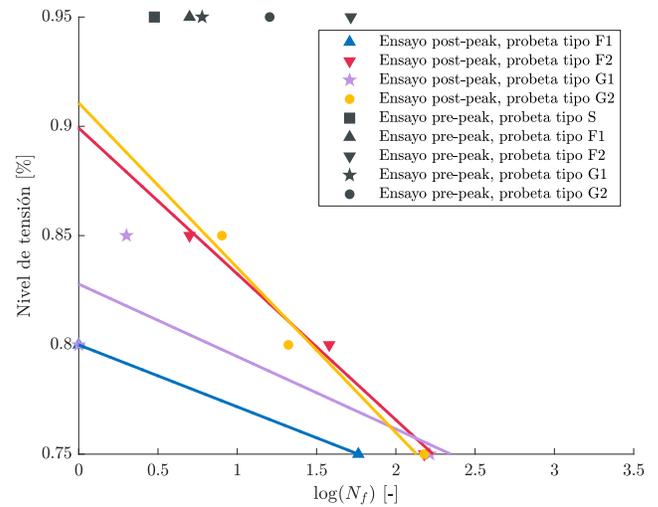


(b) 10 % de degradación.

Figura 4.10: Diagramas de Wöhler. Ensayos de fatiga en compresión post-peak.



(a) 2 % de degradación.



(b) 10 % de degradación.

Figura 4.11: Diagramas de Wöhler. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y ensayos de fatiga pre-peak.

Las Figuras 4.12 y 4.13 comparan los diagramas de Wöhler asociados a ensayos de fatiga en compresión post-peak, con 2 % y 10 % de degradación, con los diagramas obtenidos por Cachim et al. (2002) en ensayos de fatiga en compresión pre-peak para hormigón simple (SC) y hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC).

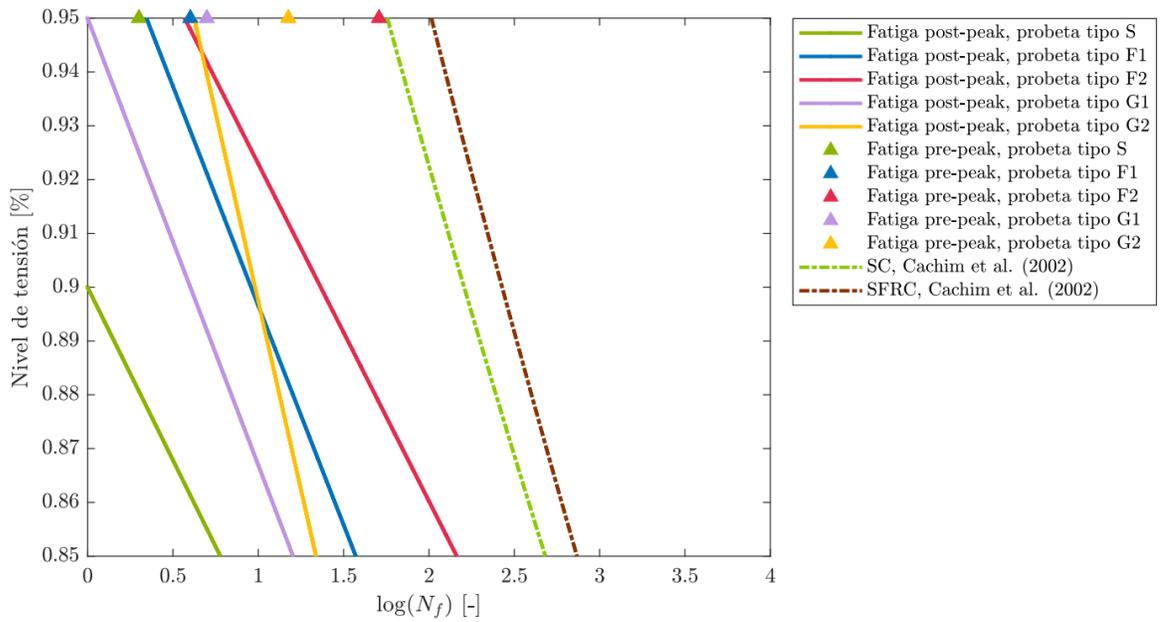


Figura 4.12: Diagramas de Wöhler asociados a ensayos de fatiga en compresión pre-peak reportados por Cachim et al. (2002) y ensayos de fatiga en compresión post-peak con 2% de degradación.

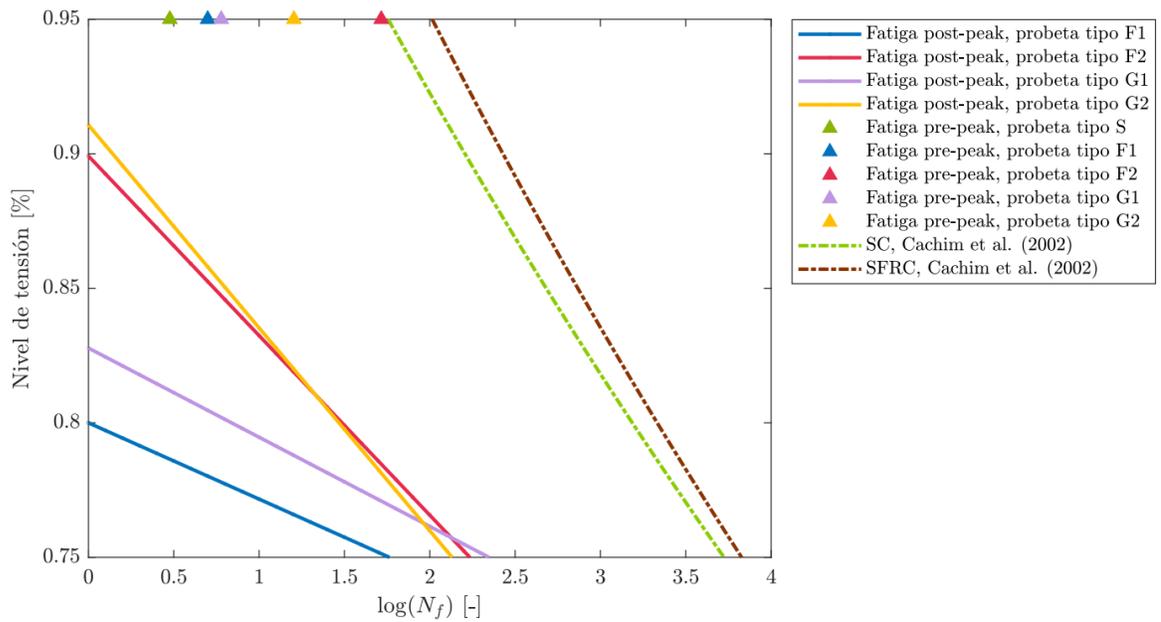


Figura 4.13: Diagramas de Wöhler asociados a ensayos de fatiga en compresión pre-peak reportados por Cachim et al. (2002) y ensayos de fatiga en compresión post-peak con 10% de degradación.

4.6. Perfil de evolución de deformaciones irreversibles

A partir de las deformaciones máximas registradas en cada ciclo de los ensayos de fatiga pre y post-peak, se generó el perfil de evolución de deformaciones irreversibles para las probetas cuya vida a fatiga fue superior a un ciclo. Cada una de las curvas fue normalizada respecto a dicho parámetro, permitiendo comparar gráficamente los resultados de los distintos tipos de probetas. Las Figuras 4.14 y 4.15 muestran los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles obtenidos en los ensayos de fatiga en compresión post-peak, considerando un 2% y 10% de degradación respectivamente.

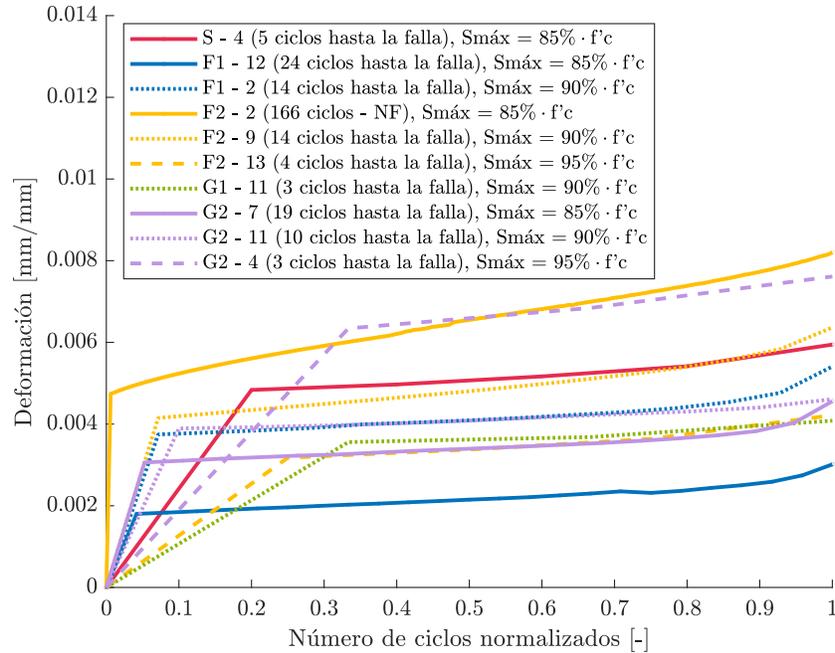


Figura 4.14: Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación.

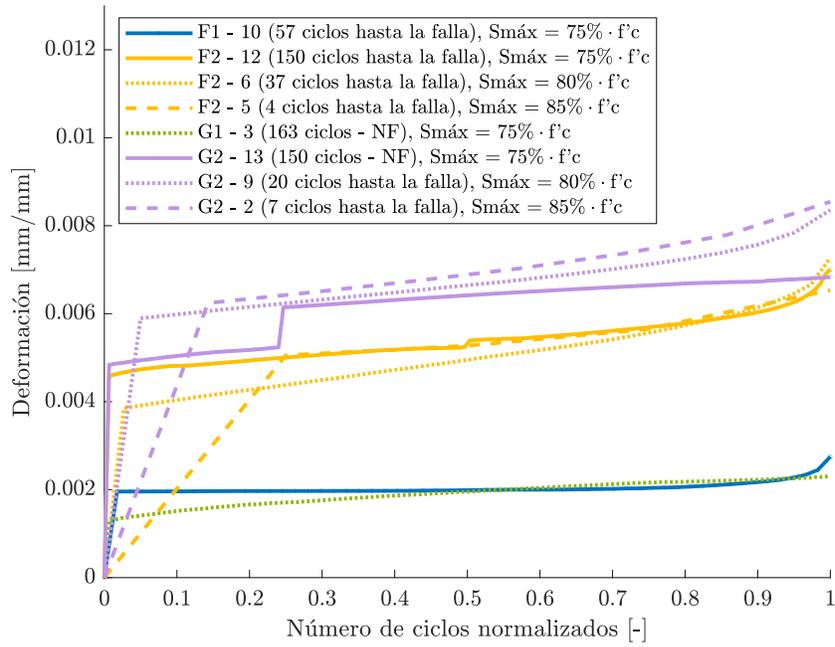


Figura 4.15: Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación.

La Figura 4.16 muestra los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles obtenidos en los ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

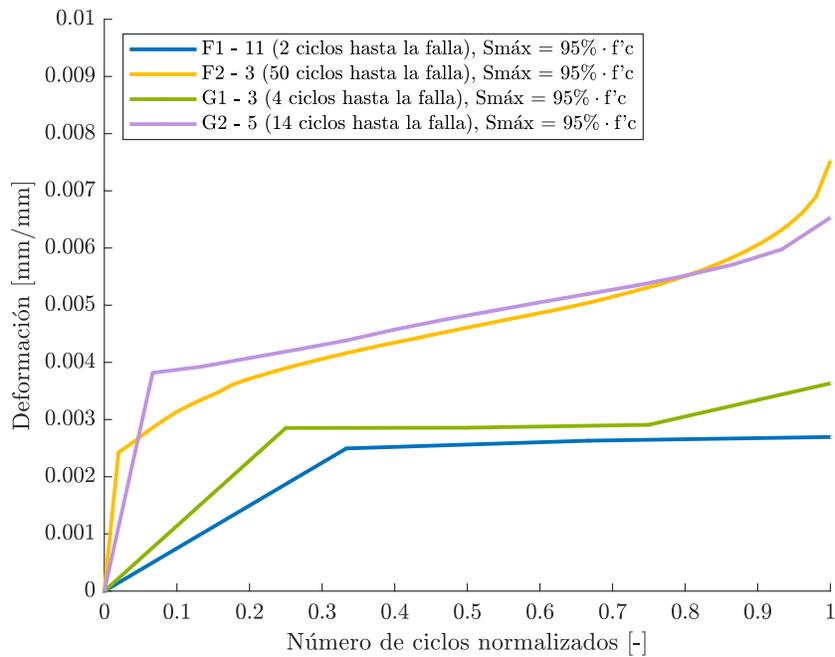


Figura 4.16: Evolución de las deformaciones máximas en ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

4.6.1. Tasa de deformación secundaria

A partir de perfiles de deformaciones irreversibles (deformación v/s tiempo), se determinó la tasa de deformación secundaria para cada una de las muestras. El criterio empleado correspondió al utilizado por Isojeh et al. (2017), en el cual dicho autor determinó la tasa de deformación secundaria como la pendiente comprendida entre el 30 % y el 60 % de la vida a fatiga del perfil de deformaciones irreversibles. Las Tablas 4.11 y 4.12 muestran las tasas de deformaciones secundarias obtenidas en los ensayos de fatiga en compresión post-peak cuyo nivel de degradación fue de 2 % y 10 % respectivamente. Finalmente, la Tabla 4.13 muestra las tasas de deformaciones secundarias obtenidas en los ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

Tabla 4.11: Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión post-peak (2 % de degradación).

Probeta	$S_{m\acute{a}x}$ [MPa]	N_f [-]	$\log(N_f)$ [-]	$\dot{\epsilon}$ [-]	$\log(\dot{\epsilon})$ [-]
S - 4	$0.85 \cdot f'_c$	5	0.70	1.7.E-06	-5.76
F1 - 12	$0.85 \cdot f'_c$	24	1.38	2.8.E-07	-6.56
F2 - 2	$0.85 \cdot f'_c$	166*	2.22	1.9.E-07	-6.71
G1 - 10	$0.85 \cdot f'_c$	0	-	-	-
G2 - 7	$0.85 \cdot f'_c$	19	1.28	4.1.E-07	-6.39
S - 1	$0.90 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F1 - 2	$0.90 \cdot f'_c$	14	1.15	5.7.E-07	-6.25
F2 - 9	$0.90 \cdot f'_c$	14	1.15	1.3.E-06	-5.90
G1 - 11	$0.90 \cdot f'_c$	3	0.48	9.0.E-07	-6.05
G2 - 11	$0.90 \cdot f'_c$	10	1.00	1.0.E-06	-5.98
S - 5	$0.95 \cdot f'_c$	2	0.30	-	-
F1 - 7	$0.95 \cdot f'_c$	1	0	-	-
F2 - 13	$0.95 \cdot f'_c$	3	0.48	2.2.E-06	-5.65
G1 - 6	$0.95 \cdot f'_c$	0	-	-	-
G1 - 2	$0.95 \cdot f'_c$	0	-	-	-
G2 - 4	$0.95 \cdot f'_c$	3	0.48	5.3.E-06	-5.28

$\dot{\epsilon}$: Tasa de deformación secundaria.

*El ensayo se detuvo antes de que la probeta fallara, N_f es mayor que el número indicado.

Tabla 4.12: Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión post-peak (10 % de degradación).

Probeta	$S_{m\acute{a}x}$ [MPa]	N_f [-]	$\log(N_f)$ [-]	$\dot{\epsilon}$ [-]	$\log(\dot{\epsilon})$ [-]
S - 10	$0.75 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F1 - 10	$0.75 \cdot f'_c$	57	1.76	2.0.E-08	-7.70
F2 - 12	$0.75 \cdot f'_c$	150	2.18	9.6.E-08	-7.02
G1 - 3	$0.75 \cdot f'_c$	163*	2.21	7.9.E-08	-7.10
G2 - 13	$0.75 \cdot f'_c$	150*	2.18	1.0.E-07	-6.98
S - 13	$0.80 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F1 - 3	$0.80 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F2 - 6	$0.80 \cdot f'_c$	37	1.57	7.4.E-07	-6.13
G1 - 4	$0.80 \cdot f'_c$	0	-	-	-
G2 - 9	$0.80 \cdot f'_c$	20	1.30	1.2.E-06	-5.91
S - 6	$0.85 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F1 - 5	$0.85 \cdot f'_c$	0	-	-	-
F2 - 5	$0.85 \cdot f'_c$	4	0.60	4.4E-06	-5.36
G1 - 9	$0.85 \cdot f'_c$	1	0	-	-
G2 - 2	$0.85 \cdot f'_c$	7	0.85	5.1E-06	-5.29

*El ensayo se detuvo antes de que la probeta fallara, N_f es mayor que el número indicado.

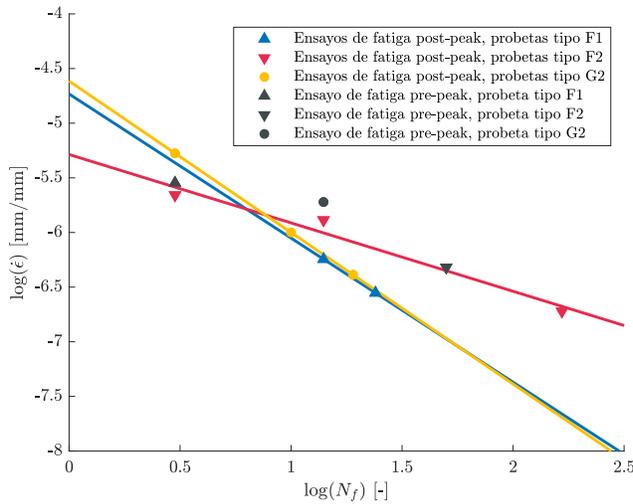
Tabla 4.13: Tasa de deformación secundaria, ensayo de fatiga en compresión pre-peak.

Probeta	$S_{m\acute{a}x}$ [MPa]	N_f [-]	$\log(N_f)$ [-]	$\dot{\epsilon}$ [-]	$\log(\dot{\epsilon})$ [-]
S - 11	$0.95 \cdot f'_c$	1	0	-	-
F1 - 11	$0.95 \cdot f'_c$	2	0.30	6.2E-07	-6.21
F2 - 3	$0.95 \cdot f'_c$	50	1.70	4.8.E-07	-6.32
G1 - 1	$0.95 \cdot f'_c$	4	0.60	3.2.E-07	-6.50
G2 - 5	$0.95 \cdot f'_c$	14	1.15	1.9.E-06	-5.73

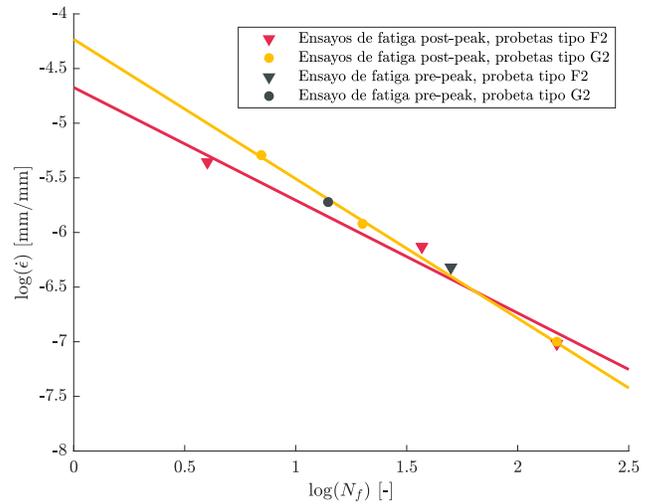
4.6.2. Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga post-peak

A partir de las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13 se graficaron las tasas de deformación secundaria versus el número de ciclos hasta la falla de los ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak. En particular, las Figuras 4.17.a y 4.17.b muestran las curvas de tendencia asociadas a los ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 2 % y 10 % de degradación respectivamente.

Las Figuras 4.18.a y 4.19.b comparan las curvas de tendencia (de tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga) asociadas a la presente investigación con las obtenidas por diversos autores en ensayos de fatiga en compresión pre-peak, en los cuales se estudió el comportamiento de hormigón de alta resistencia (*HSC*), hormigón reforzado con fibras de acero (*SRC*) y hormigón reforzado con fibras de polipropileno (*PPRC*).

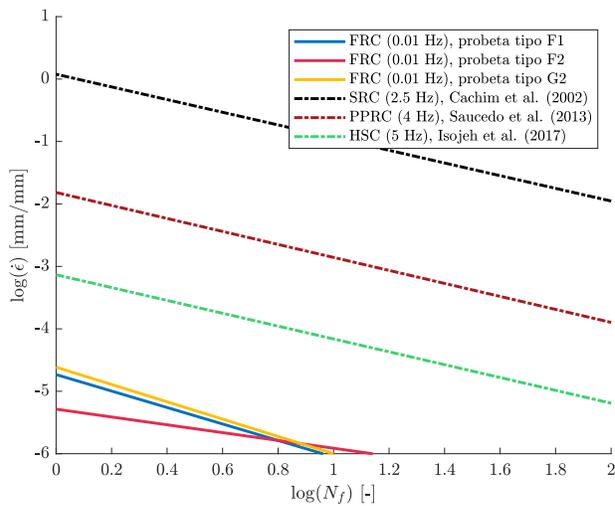


(a) 2 % de degradación.

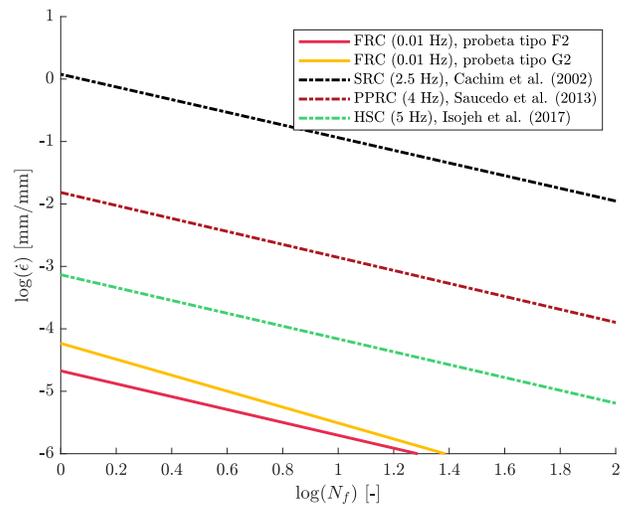


(b) 10 % de degradación.

Figura 4.17: Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak.



(a) 2 % de degradación.



(b) 10 % de degradación.

Figura 4.18: Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y resultados de la literatura pre-peak.

Finalmente, las Figuras 4.18.a y 4.19.b comparan las curvas de tendencia de la tasa de deformación secundaria por ciclo versus el número de ciclos hasta la falla de los ensayos de fatiga en compresión post-peak realizados en la presente investigación, con curvas de tendencia asociadas a los datos reportados por Saucedo, Yu, Medeiros, Zhang, y Ruiz (2013), Cachim et al. (2002) e Isojeh et al. (2017) en sus respectivas investigaciones.

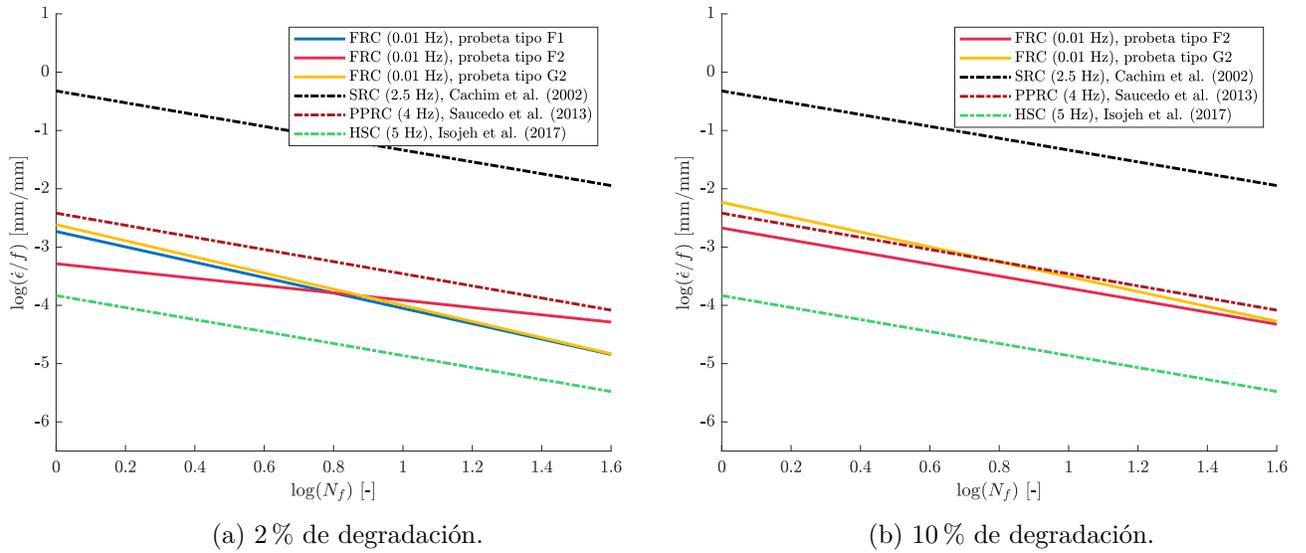


Figura 4.19: Tasa de deformación secundaria por ciclo versus vida a fatiga. Ensayos de fatiga en compresión post-peak y resultados de la literatura pre-peak.

4.7. Envoltante de máximas deformaciones en la falla

Para estudiar la existencia de una envoltante de deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga, se superpusieron las curvas obtenidas en ensayos de carga monotónica en compresión y fatiga en compresión pre y post peak. Las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 muestran la comparación entre las curvas de carga monotónica en compresión y deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga pre y post-peak para probetas de tipo F1, F2, y G2 respectivamente.

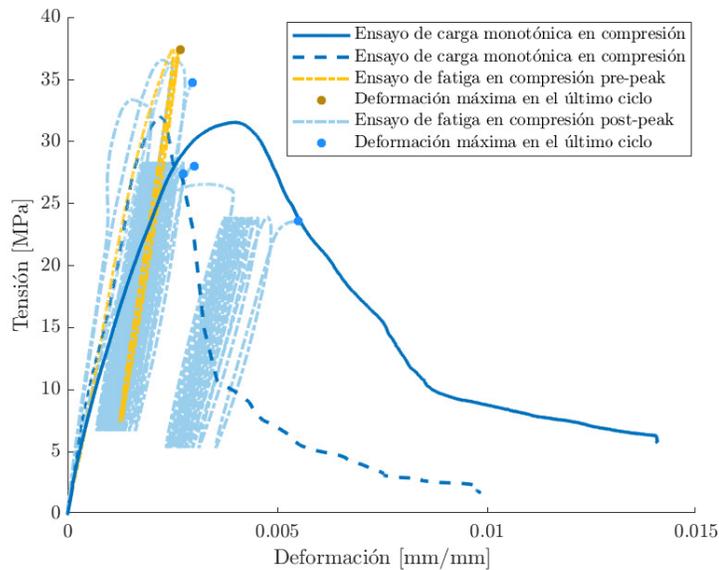


Figura 4.20: Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotónica en compresión, probetas tipo F1.

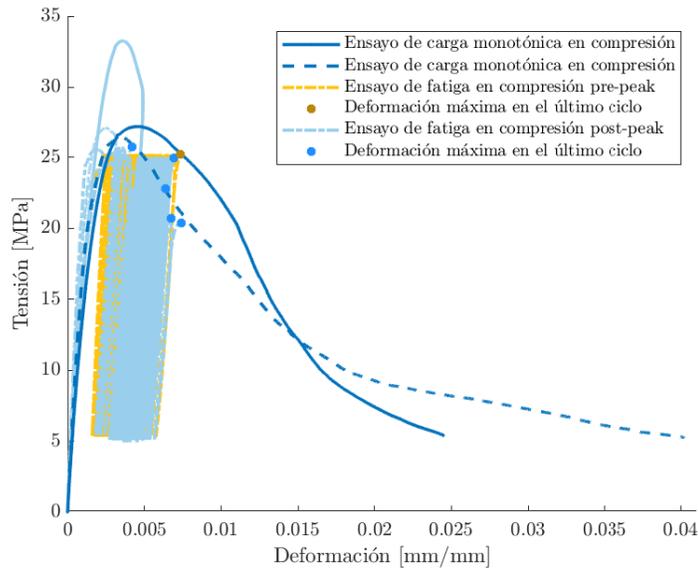


Figura 4.21: Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotónica en compresión, probetas tipo F2.

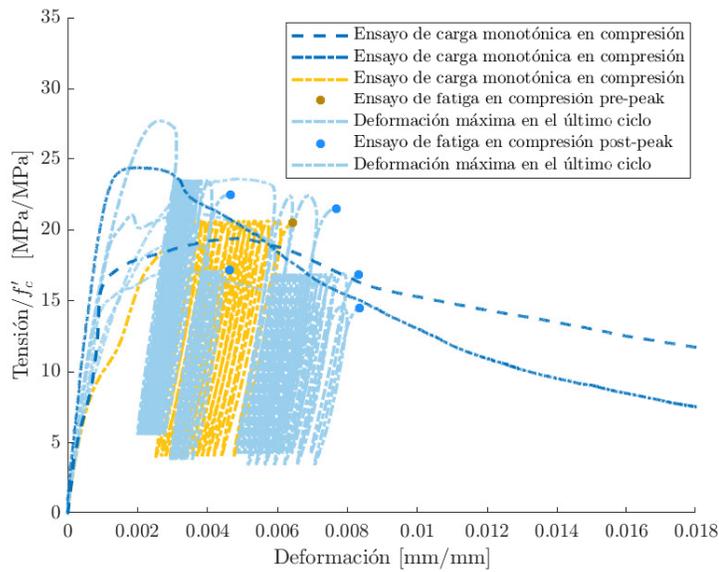


Figura 4.22: Comparación de máximas deformaciones en la falla con curvas de carga monotónica en compresión, probetas tipo G2.

Con la finalidad de comparar de mejor forma los datos presentes en las figuras anteriores, se construyeron curvas normalizadas por la resistencia estática a la compresión (f'_c) y deformación en el peak de tensión (ϵ_0), eliminando gráficamente la influencia asociada a la variabilidad de las resistencias y deformaciones de las probetas de hormigón. Las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25 muestran la superposición de las curvas normalizadas de carga monotónica en compresión y en ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak.

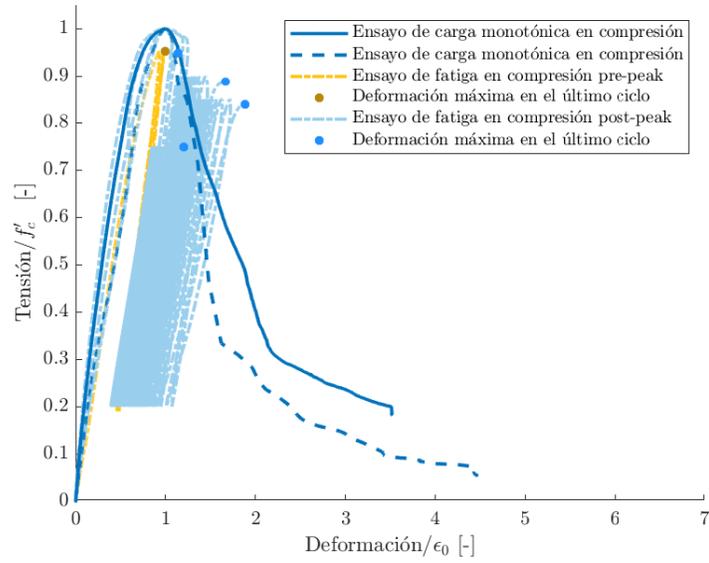


Figura 4.23: Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo F1.

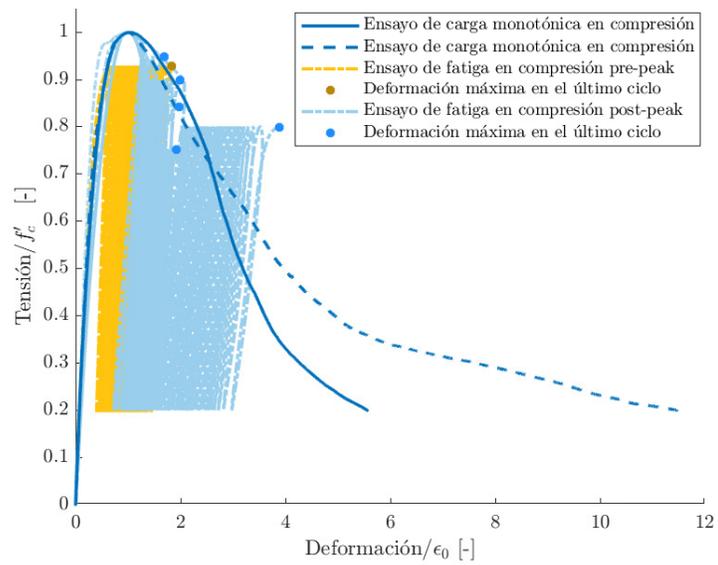


Figura 4.24: Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo F2.

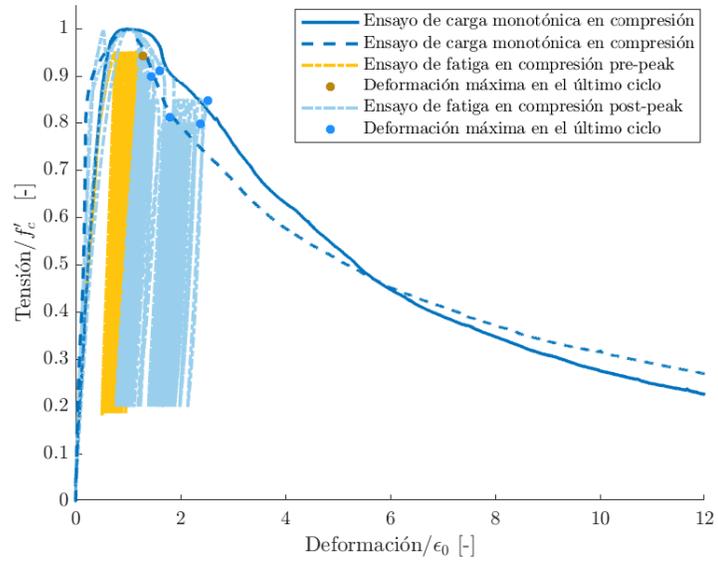


Figura 4.25: Curvas normalizadas de carga monotónica y en ensayos de fatiga en compresión, probetas tipo G2.

Capítulo 5

Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados asociados a los ensayos de carga monotónica en compresión, tracción directa y fatiga en compresión, presentados en el Capítulo 4.

5.1. Ensayo de carga monotónica en compresión

Los resultados presentes en la Tabla 4.1 muestran que la adición de fibras de refuerzo a la matriz de hormigón no genera un aumento en la resistencia estática a la compresión del material, obteniéndose, como resultado general, una disminución de la resistencia en hormigones con contenido de fibra de tipo F o G respecto al hormigón simple. En promedio, el tipo de muestra que presentó una mayor resistencia correspondió a las probetas de tipo S (35.94 MPa), seguidas por las probetas de tipo G1, F1, F2 y G2 respectivamente.

En particular, las probetas de tipo G1 mostraron una disminución promedio de resistencia de 7.6 % respecto al hormigón simple, mientras que las probetas de tipo F1 presentaron una disminución del 17.2 %. Por lo tanto, los tipos de probetas que sufrieron una mayor pérdida de resistencia correspondieron a aquellas cuyo contenido de fibra de refuerzo fue de 2 %. Es decir, de tipo F2 y G2, cuyas pérdidas respecto a las probetas de tipo S alcanzaron un 25.4 % y 32.9 % respectivamente.

La disminución de la resistencia a la compresión de las muestras a medida que aumenta el contenido de fibra de refuerzo se puede atribuir a un mayor ingreso de aire a la mezcla en el proceso de elaboración de las probetas (producto de la adición de las fibras de PVA), generándose una mayor cantidad de vacíos en la matriz de hormigón. Además, a medida que el contenido de fibra aumenta, también lo hace la posibilidad de que se generen “nidos”, implicando una disminución en la resistencia a compresión de las muestras.

A pesar de que el aumento de fibra de refuerzo generó una disminución en la resistencia a compresión promedio de las probetas de hormigón, los resultados de la Tabla 4.1 muestran que las probetas con mayor contenido de fibra presentaron las mayores deformaciones máximas. Al comparar dichos valores con la deformación máxima promedio asociada a las probetas de tipo S, se observa que las probetas de tipo F2 y G2 alcanzaron una deformación máxima 6 y 5.8 veces mayor respectivamente. En términos generales, las probetas ensayadas que contenían fibra de refuerzo (de tipo F o G), presentaron una deformación máxima superior a la del hormigón simple. La única excepción fue la probeta G1 - 12, cuyo comportamiento fue

similar al de una probeta de tipo S, debiéndose posiblemente a problemas en la elaboración de la mezcla asociados a la distribución de la fibra en la matriz de hormigón.

Finalmente, en la Figura 4.1 se aprecia gráficamente como la adición de fibra de refuerzo aumenta la ductilidad de las muestras respecto al hormigón simple, generando una tasa de degradación de la resistencia en la etapa post-peak menor respecto a probetas de tipo S, cuya degradación es abrupta una vez superada la etapa de pre-fisuración.

La Figura 5.1 muestra el modo de falla obtenido en los ensayos de carga monotónica en compresión de cada tipo de probeta, el cual corresponde en todos los casos a fisuras verticales u oblicuas con un ángulo cercano a los 45° , y que se originan en la parte superior de la probeta.



(a) Probeta S - 3. (b) Probeta F1 - 4. (c) Probeta F2 - 1.



(d) Probeta G1 - 7. (e) Probeta G2 - 12.

Figura 5.1: Modos de falla, ensayos de carga monotónica en compresión.

5.2. Ensayo de tracción directa

La Tabla 4.2 muestra una mejora de la resistencia máxima a tracción de las muestras que poseen fibra de refuerzo respecto al hormigón simple, salvo por la muestra F2 - 7, cuya resistencia máxima a la tracción disminuyó un 5.2% respecto a la resistencia de la probeta tipo S. Dicha disminución de resistencia se asocia principalmente a una mala distribución de la fibra en la matriz de hormigón debido al elevado porcentaje de contenido de fibra de refuerzo.

Respecto a las otras muestras, la probeta F1 - 8 presentó la máxima resistencia a tracción (3.28 MPa), correspondiendo a una mejora del 71% respecto al hormigón simple. Le siguieron las probetas G1 - 8 y G2 - 8, cuyas resistencias máximas respectivas aumentaron un 38.7% y 17.3% en relación a la probeta de tipo S. A pesar de que la presencia de fibras de refuerzo genera una mejora en la resistencia de las muestras, las mayores resistencias correspondieron a las probetas de tipo F y G con un 1% de contenido de fibra, ratificando que la presencia de una mayor cantidad de fibra no implica una mayor resistencia, tal como sucedió en los ensayos de compresión pura.

En la Figura 4.2 se aprecia un aumento en la ductilidad de las probetas de hormigón a medida que se incrementa el contenido de fibra de refuerzo. Consecuentemente, las deformaciones máximas fueron obtenidas en los ensayos de tracción directa asociados a las probetas de tipo F y G con 2% de contenido de fibra refuerzo. En particular, la deformación máxima de la probeta F2 - 7 fue 5.9 veces mayor respecto a la probeta de tipo S, mientras que la probeta G2 - 8 superó 14.9 veces dicho valor. En cuanto a las probetas con un contenido de fibra de 1%, ambas superaron en más de 4 veces la deformación máxima de la probeta de hormigón simple, siendo entre ambas, la probeta de tipo F1 la que obtuvo una mayor deformación.

La Figura 5.2 muestra el modo de falla obtenido en los ensayos de tracción directa de tres probetas. En todos los ensayos realizados la falla fue horizontal, y se ubicó cercana a uno de los extremos de las muestras.

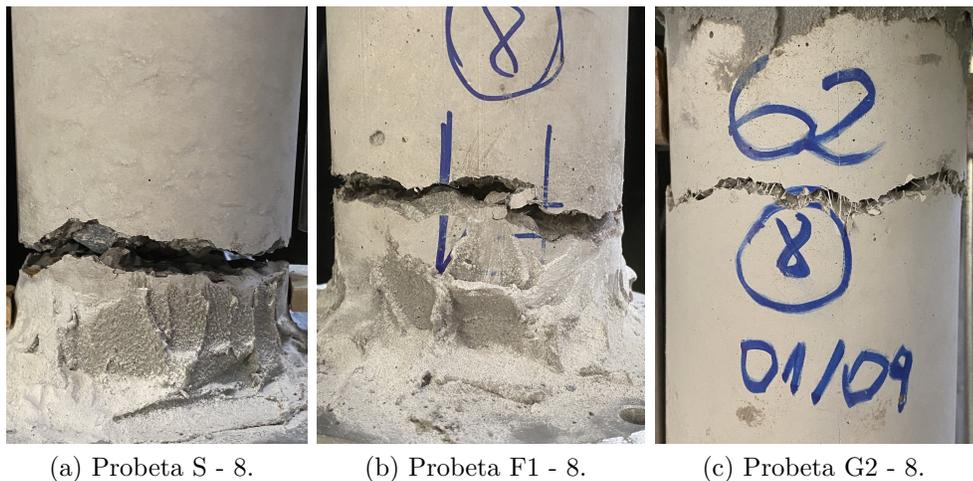


Figura 5.2: Modos de falla, ensayos de tracción directa.

La Figura 5.3 muestra la distribución de las fibras de refuerzo en la sección transversal de los cuatro tipos de probetas estudiados en la presente investigación, apreciándose una mejor distribución en las fibras de tipo F (Figuras 5.3.a y 5.3.b) respecto a las de tipo G (Figuras 5.3.c y 5.3.d). Esto último, se puede atribuir a que la fibra de tipo F posee un largo y diámetro menor que la fibra de tipo G, lo que permite que el primer tipo de fibra se integre de mejor manera en la matriz de hormigón.

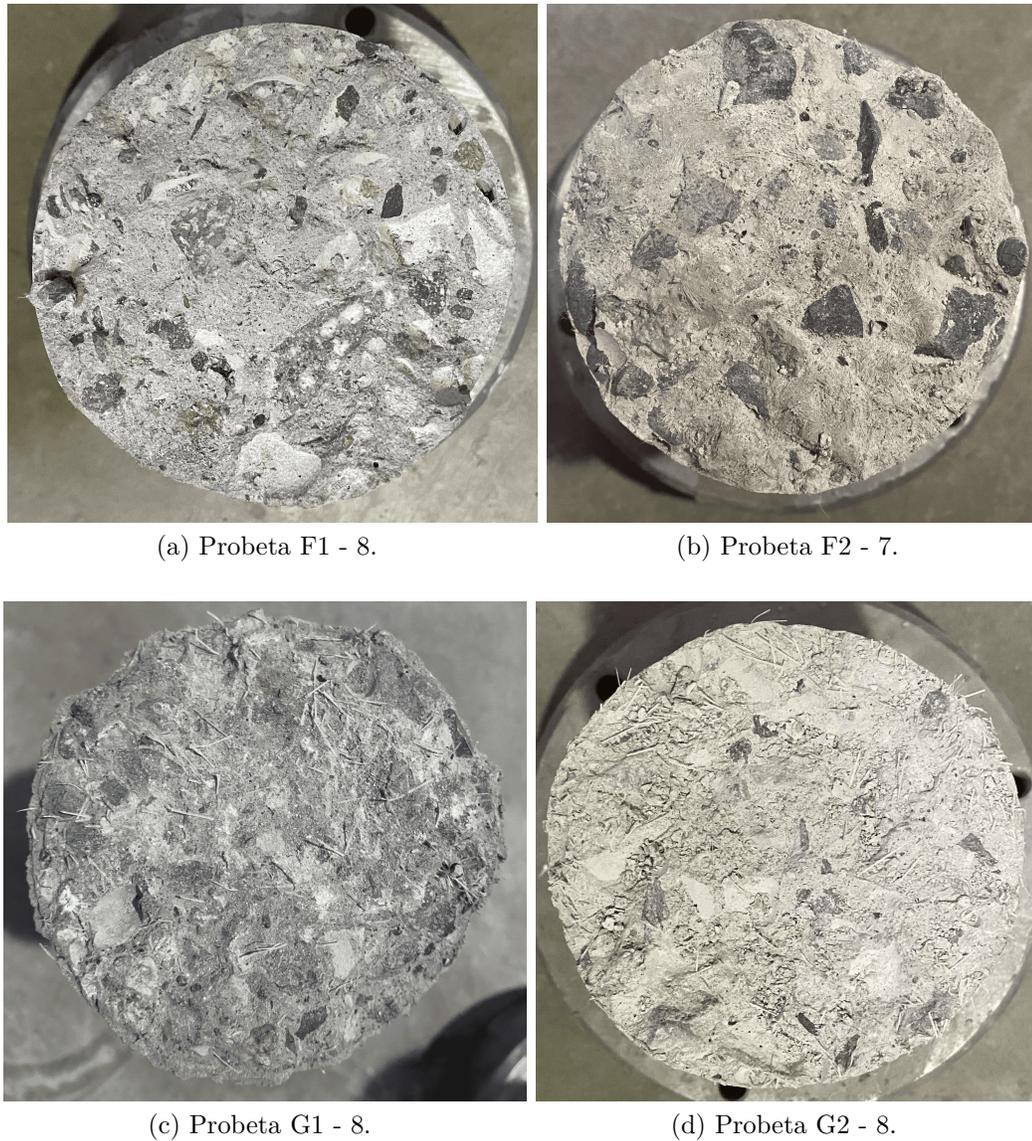


Figura 5.3: Distribución de fibras de refuerzo, ensayos de tracción directa.

5.3. Ensayos de fatiga en compresión

5.3.1. Ensayos de fatiga en compresión post-peak

El primer tipo de ensayo de fatiga en compresión realizado fue el de tipo post-peak, considerando dos porcentajes de degradación de la resistencia correspondientes a 2 % y 10 %, que debían ser alcanzados antes de comenzar con el proceso de fatiga de las muestras. El valor de la resistencia estática a la compresión promedio obtenido a partir de los resultados de las Tablas 4.3-4.8 asociadas a dichos ensayos, disminuye a medida que aumenta el contenido de fibra de refuerzo en la matriz de hormigón. Nuevamente, el tipo de probetas que presentan las menores resistencias promedio corresponden a aquellas que poseen un 2 % de contenido de fibra.

La mayor resistencia promedio correspondió a las probetas de tipo S (34.74 MPa), seguidas por las probetas de tipo G1 y F1, que registraron una disminución promedio de la resistencia a la compresión igual a un 2.7 % y 9.3 % respecto a las probetas de tipo S. Por último, las probetas de tipo F2 y G2 alcanzaron una resistencia a la compresión máxima un 20.3 % y 37.0 % menor que la resistencia promedio registrada por las probetas de hormigón simple en los ensayos de fatiga en compresión.

Las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 asociadas a los ensayos de fatiga en compresión post-peak considerando un 2 % de degradación, muestran una mejora en la ductilidad de las probetas que poseen fibra de refuerzo respecto a las probetas de hormigón simple. Lo anterior, se ve reflejado en una mayor vida a fatiga y en una menor tasa de degradación de las muestras con fibra de refuerzo una vez alcanzada la falla producto del fenómeno de fatiga. Adicionalmente, se observa que las probetas de tipo G1 presentaron un comportamiento rígido similar a probetas de hormigón sin fibra.

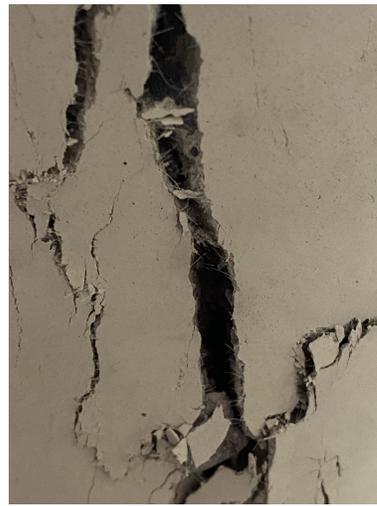
El comportamiento observado en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 correspondientes a ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 10 % de degradación es similar al de los ensayos previamente analizados en cuanto a la vida a fatiga y ductilidad de las muestras.

En términos generales, al observar ambos ensayos, las máximas deformaciones fueron registradas para las probetas de tipo G2, F2 y F1. Además, se observó que la vida a fatiga de las muestras disminuyó a medida que el máximo nivel de la tensión de fatiga aumentó. Finalmente, al comparar la vida a fatiga entre ambos tipos de ensayos en compresión post-peak, se observa que para un mismo nivel de tensión el número de ciclos necesarios para alcanzar la falla es menor en los ensayos de fatiga que consideraron un 10 % de degradación.

La Figura 5.4 muestra la distribución de la fibra de refuerzo en los cuatro tipos de probetas consideradas en ensayos de fatiga compresión post-peak. En ella, se aprecia que la fibra de tipo F se distribuye de mejor manera en la matriz de hormigón, debido principalmente a que es más fina. Existiendo un mayor número de fibras de tipo F respecto a las de tipo G en un mismo volumen.



(a) Probeta F1 - 11.



(b) Probeta F2 - 13.



(c) Probeta G1 - 2.



(d) Probeta G2 - 7.

Figura 5.4: Distribución de la fibra en probetas ensayadas en fatiga en compresión post-peak.

5.3.2. Ensayos de fatiga en compresión pre-peak

El último ensayo realizado correspondió a fatiga en compresión pre-peak. La Tabla 4.10 muestra una mejora en la vida a fatiga de las probetas con contenido de fibra de refuerzo respecto a la probeta tipo S. Adicionalmente, se aprecia un aumento de la resistencia estática del hormigón para las probetas de tipo F1 y G1 respecto a la probeta de hormigón simple, siendo nuevamente las probetas con 2% de volumen de fibra las que registraron la menor resistencia.

La Figura 4.9 muestra un comportamiento similar al de los ensayos de fatiga en compresión post-peak en cuanto al aumento de ductilidad de las probetas con contenido de fibra de refuerzo respecto al hormigón simple (salvo por la mezcla G1, cuyo comportamiento fue frágil, similar a la probeta tipo S).

Al comparar el número de ciclos hasta la falla asociado a fatiga en compresión pre y post-peak, para un mismo nivel de tensión, se observa un claro aumento en la vida a fatiga de las muestras que fueron cicladas antes de alcanzar la resistencia máxima del material. Además, a pesar de que el modo de falla en ambos tipos de ensayo fue similar al observado en los ensayos de carga monotónica en compresión (fisuras verticales u oblicuas con un ángulo cercano a los 45° , originadas en la parte superior de la probeta), el daño sufrido por las probetas fue menor en este último. Los modos de falla representativos de cada tipo de ensayo para cada tipo de probeta se presentan en el Anexo C.

5.4. Diagrama de Wöhler

5.4.1. Ensayos de fatiga post-peak con 2 % de degradación

La Figura 4.10.a muestra de forma gráfica como la adición de fibras de refuerzo mejora la vida a fatiga de hormigón sometido a ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 2 % de degradación respecto al hormigón simple. En particular, la superposición de los diagramas de Wöhler muestra que la probeta que presenta el mejor comportamiento en términos de vida a fatiga es la de tipo F2.

Al comparar la vida a fatiga de las probetas con un 1 % de contenido de fibra de refuerzo, se aprecia un mejor comportamiento a fatiga en las probetas de tipo F1 respecto a las de tipo G1, ya que a pesar de poseer pendientes similares, el diagrama de Wöhler para el primer tipo presenta un coeficiente de posición mayor.

Respecto a las fibras de tipo G, las probetas de tipo G2 presentan una vida a fatiga mejor que el de probetas del tipo G1, mostrando que el contenido de fibra de refuerzo está directamente relacionado con la vida a fatiga del hormigón. Finalmente, al comprar las probetas de tipo F1 y G2, se observa que las últimas presentan una mejor vida a fatiga para un nivel máximo de tensión superior al 90 % de la resistencia estática del hormigón; mientras que para niveles inferiores las probetas de tipo F1 presentarán una vida a fatiga mayor.

5.4.2. Ensayos de fatiga post-peak con 10 % de degradación

En cuanto a los ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 10 % de degradación, la ausencia del diagrama de Wöhler de las probetas de tipo S en la Figura 4.10.b, indica la nula capacidad de ciclaje de las probetas de hormigón simple una vez alcanzada una degradación de la resistencia del 10 %. Mostrando que la adición de fibra de refuerzo mejora la vida a fatiga del hormigón simple, incluso después de alcanzar un nivel de degradación donde la capacidad de ciclaje es nula.

Las probetas de tipo F2 y G2 fueron las que presentaron un mejor comportamiento respecto a la vida a fatiga en ensayos con un 10 % de degradación, presentando valores de pendiente y coeficiente de posición cercanos entre sí, y ubicándose a la derecha de las probetas con un 1 % de contenido de fibra de refuerzo. Finalmente, al comparar los diagramas de Wöhler de este último grupo, las probetas de tipo G1 fueron las que presentaron una mayor vida a fatiga.

5.4.3. Ensayos de fatiga pre y post-peak

Las Figuras 4.11.a y 4.11.b muestran la superposición de los diagramas de Wöhler de los ensayos de fatiga en compresión post-peak y los resultados de los ensayos de fatiga en compresión pre-peak. En ambas figuras se aprecia que los resultados de cada uno de los tipos de probetas sometidos a ensayos de fatiga en compresión pre-peak se ubicaron a la derecha de su respectivo diagrama de Wöhler, indicando que las muestras sometidas a ensayos de fatiga en compresión pre-peak presentan una vida a fatiga mayor respecto a las ensayadas a fatiga en compresión post-peak.

5.5. Tasa de deformación secundaria

5.5.1. Perfil de evolución de deformaciones irreversibles

En general, los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles presentes en las Figuras 4.14-4.16 muestran una forma similar a los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles presentes en la literatura para ensayos de fatiga en compresión pre-peak. Sin embargo, como los ensayos asociados a la presente investigación corresponden a fatiga de bajo ciclaje, las curvas obtenidas son menos suaves que las de alto y ultra alto ciclaje.

Adicionalmente, en la primera etapa del perfil de evolución de deformaciones irreversibles de los ensayos de fatiga en compresión post-peak, no se aprecia un crecimiento a tasa decreciente como ocurre en los ensayos de fatiga en compresión pre-peak. Lo anterior, se debe principalmente a que el cierre de las microfisuras y vacíos en la matriz de hormigón de los ensayos de fatiga post-peak ocurre previo al proceso de ciclado. La comparación gráfica entre ambos perfiles de evolución de deformaciones irreversibles se presenta en el Anexo D.

5.5.2. Tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga

Las Figuras 4.17.a y 4.17.b muestran que los datos de la tasa de deformación secundaria versus número de ciclos hasta la falla asociados a los ensayos de fatiga en compresión post-peak (con un 2% y 10% de degradación) se ubicaron cercanos entre sí. Siendo este un comportamiento acorde al comparar probetas con una misma matriz de hormigón y con fibras de un mismo material (que variaban en su contenido o forma) que fueron ensayadas bajo una misma frecuencia de carga de fatiga.

La existencia de un mayor coeficiente de posición en las probetas de tipo F2 y G2 en los ensayos que consideraron un 10% de degradación, respecto a los que emplearon un 2% de degradación, se debe a que dichos ensayos consideraron niveles máximos de tensión inferiores a los empleados por estos últimos.

Finalmente, las Figuras 4.17.a y 4.17.b muestran una cercanía entre los resultados de los ensayos de fatiga en compresión pre-peak y las curvas asociadas a los ensayos de fatiga en compresión post-peak con ambos niveles de degradación. Lo anterior indicaría que la relación entre la tasa de deformación secundaria y la vida a fatiga de una muestra no depende del tipo de ensayo de fatiga en compresión (pre o post-peak) al que se vea sometido.

5.5.3. Resultados respecto a la literatura

Las Figuras 4.18.a y 4.18.b muestran que las curvas que relacionan la tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga de la presente investigación se ubican bajo los modelos de hormigón de alta resistencia, hormigón reforzado con fibras de polipropileno y hormigón reforzado por fibras de acero propuestos por Isojeh et al. (2017), Saucedo et al. (2013) y Cachim et al. (2002) respectivamente.

El problema de las Figuras 4.18.a y 4.19.b, es que no consideran que los ensayos de fatiga en compresión fueron realizados a distintas frecuencias de carga, siendo este un parámetro que está directamente relacionado con la vida a fatiga del hormigón. Para solucionar este problema se construyeron las curvas de tasa de deformación secundaria por ciclo versus número de ciclos hasta la falla ($\dot{\epsilon}/f$ v/s N_f) presentes en las Figuras 4.19.a y 4.19.b.

Los modelos propuestos por Cachim et al. (2002), Isojeh et al. (2017) y Saucedo et al. (2013) se desplazaron verticalmente en la dirección negativa al ser normalizados por su frecuencia de carga respectiva (frecuencias mayores a 1 Hz). Mientras que las curvas asociadas a la presente investigación se desplazaron en dirección opuesta al haber sido ensayadas con una frecuencia de carga menor a 1 Hz, ubicándose en una zona cercana al hormigón reforzado con fibras de polipropileno (por sobre las probetas de hormigón de alta resistencia).

Como la disminución de la frecuencia de la carga de fatiga implica una reducción en la vida a fatiga de las muestras, es lógico que las curvas asociadas a la presente investigación muestren una mejora respecto a los modelos de la literatura considerados, ya que estos últimos emplearon una frecuencia de carga mayor.

5.6. Envolvente de deformaciones últimas en la falla

La superposición de las curvas de carga monotónica y de histéresis asociadas a los ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak, muestran que la máxima deformación del último ciclo de fatiga de cada ensayo se ubica cercana a una de sus receptivas curvas de carga monotónica en compresión. Siendo un resultado consecuente con la existencia de una envolvente de deformaciones últimas en la falla de ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak.

El tipo de probeta que muestra de mejor manera el comportamiento anterior corresponde al F2, debido a la baja variabilidad de la resistencia estática a la compresión que presentaron las muestras en todos los tipos de ensayos. Contrariamente, las curvas de histéresis y carga monotónica en compresión asociadas a las probetas de tipo F1 y G2 presentaron una mayor variabilidad respecto a la resistencia máxima de las muestras, desplazando verticalmente las deformaciones asociadas al último ciclo de fatiga respecto a las curvas de carga monotónica en compresión.

A pesar de lo anterior, las Figuras 4.20, 4.21 y 4.22 indican que las máximas deformaciones en la falla de ensayos de fatiga tienden a ubicarse en una zona cercana a al menos una de las curvas de carga monotónica en compresión de su respectivo tipo de probeta.

Finalmente, las Figuras 4.23, 4.24 y 4.25, correspondientes a las curvas normalizadas de carga monotónica y ensayos de fatiga en compresión, muestran que las deformaciones máximas asociadas al último ciclo del proceso de fatiga coinciden de buena manera con las curvas de carga monotónica en compresión. Reforzado la idea de que dichas curvas pueden ser empleadas como envolventes de las deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak.

Capítulo 6

Conclusiones

A lo largo de la presente investigación se estudió el comportamiento experimental de probetas cilíndricas de hormigón simple y hormigón reforzado con fibras de PVA sometidas a ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak. En total se consideraron dos tipos distintos de fibra de refuerzo (que diferían en diámetro y largo) y tres volúmenes de fibra correspondientes a 0 %, 1 % y 2 % medidos respecto al volumen geométrico de las probetas. El objetivo principal de la investigación era poder estudiar y comparar la respuesta experimental de los distintos tipos de probetas al ser sometidos a ensayos de fatiga de bajo ciclaje (pre y post-peak) utilizando la máquina universal.

En promedio, la adición de fibra de refuerzo a la matriz de hormigón generó una disminución de la resistencia estática a la compresión de las probetas de tipo F y G respecto a las de tipo S (Tabla 4.9). Esto se debió posiblemente al ingreso de aire a la mezcla y la generación de vacíos en el interior de la matriz de hormigón producto de la adición de las fibras de refuerzo. En particular, las probetas que presentaron la mayor disminución de resistencia a la compresión (respecto a las de hormigón simple) fueron las de tipo G2, seguidas por las de tipo F2, alcanzando en promedio una disminución del 36.0 % y 21.6 % respectivamente. Por otro lado, el tipo de probeta que presentó la menor disminución de resistencia estática a la compresión correspondió a la de tipo G1 (3.9 %), mientras que las probetas de tipo F1 registraron una disminución de la resistencia de 11,3 %. Por lo tanto, el aumento del contenido de fibra de refuerzo generó una disminución en la resistencia estática a compresión de las muestras.

Paralelamente, el aumento del contenido de fibra de refuerzo en la matriz de hormigón incrementó considerablemente las deformaciones máximas registradas en los ensayos de carga monotónica en compresión, tracción directa (Tablas 4.1 y 4.2) y ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak (Figuras 4.3-4.9). En particular, en el primer tipo de ensayo las deformaciones máximas promedio fueron alcanzadas por las probetas de tipo F2, siendo 6 veces mayores que las de tipo S. Mientras que para los ensayos de tracción directa, la máxima deformación fue registrada para la probeta de tipo G2, siendo 14.9 veces mayor que la deformación registrada para la probeta de hormigón simple.

En todos los tipos de ensayos se observó gráficamente un aumento en la ductilidad de las probetas con contenido de fibra de refuerzo respecto a las probetas de hormigón simple (Figuras 4.1-4.9), apreciándose un decaimiento gradual de la tensión en la etapa post-fisuración

y no de forma abrupta como ocurre en las probetas tipo S. El tipo de probeta con contenido de fibra de refuerzo que presentó el peor comportamiento en cuanto a ductilidad correspondió al tipo G1, presentando en varias ocasiones un comportamiento frágil, cercano al observado en las probetas de hormigón simple (Figuras 4.1, 4.3, 4.5 y 4.7). Dicho comportamiento se puede atribuir a que, para este tipo de fibra de refuerzo, un volumen correspondiente al 1 % es inferior al contenido de fibra óptimo.

Respecto a los diagramas de Wöhler, el aumento del contenido de fibra de refuerzo genera una mejora en la vida a fatiga del hormigón. En particular, las probetas con un contenido de fibra del 2 % fueron las que presentaron el mejor comportamiento en ambos tipos de ensayos de fatiga en compresión post-peak, mientras que el tipo de probetas que presentó el peor comportamiento correspondió a las de tipo S (Figuras 4.10.a y 4.10.b). Lo anterior se ve claramente reflejado en la ausencia del diagrama S-N para dicho tipo de probetas en los ensayos de fatiga en compresión post-peak con 10 % de degradación.

En los ensayos que consideraron un 2 % de degradación, las probetas con fibras de tipo F fueron las que presentaron una mejor vida a fatiga respecto al mismo contenido de fibra de refuerzo (Figura 4.10.a). Por otro lado, en los ensayos de fatiga con 10 % de degradación, las probetas con contenido de fibra del 2 % presentaron una vida a fatiga similar, mientras que las probetas de tipo G1 mostraron una mayor vida a fatiga respecto a las de tipo F1 (Figura 4.10.b). La mejora de la vida a fatiga de la fibra de tipo G, al ser sometida a un mayor porcentaje de degradación, se puede asociar a que dicho tipo de fibra posee mayores dimensiones (largo y diámetro) y un mayor porcentaje de deformación antes de alcanzar la falla respecto a las fibras de tipo F.

Al comparar los resultados de los ensayos de fatiga en compresión pre-peak con los diagramas de Wöhler, se aprecia que la vida a fatiga en ensayos de fatiga pre-peak es superior a la de los ensayos de fatiga en compresión post-peak (Figuras 4.11.a y 4.11.b). Siendo un comportamiento consecuente con la existencia de una envolvente de deformaciones máximas en la falla de ensayos de fatiga.

En general, la forma de los perfiles de evolución de deformaciones irreversibles asociados a ensayos de fatiga en compresión post-peak es acorde a la reportada en el Marco Teórico para ensayos de fatiga pre-peak. Observándose en cada uno de los perfiles dos etapas (Figuras 4.14-4.16), correspondientes a un aumento de la deformación a tasa constante producto del aumento de microfisuras en la matriz de hormigón y una etapa de aumento de deformación a tasa creciente debido a la fusión de las microfisuras y la generación de fisuras de mayor tamaño que conducen a la falla del material. Sin embargo, la etapa asociada al aumento de deformación a tasa decreciente no se aprecia en los ensayos de fatiga en compresión post-peak, debido a que el cierre de las microfisuras y vacíos en la matriz de hormigón ocurre previo al proceso de ciclado.

La superposición de los modelos de tasa de deformación secundaria versus vida a fatiga y los respectivos resultados asociados a cada tipo de probeta para ensayos fatiga en compresión pre-peak muestran que los datos tienden a agruparse en una misma zona (Figuras 4.17.a y 4.17.a). Lo que indicaría que la relación entre la tasa de deformación secundaria y la vida a fatiga de una muestra es independiente del tipo de ensayo de fatiga en compresión al que

se vea sometida (pre y post-peak), dependiendo de parámetros asociados a la carga cíclica como la frecuencia de carga.

Por último, la superposición de las curvas normalizadas de carga monotónica en compresión y curvas de histéresis de ensayos de fatiga en compresión pre y post-peak, muestran que las máximas deformaciones asociadas al último ciclo de fatiga coinciden de buena forma con sus respectivas curvas de carga monotónica en compresión (Figuras 4.23-4.25). Lo anterior, indicaría que las probetas sometidas a ensayos de fatiga en compresión post-peak poseen una envolvente de deformaciones máximas de fatiga, que coincide de buena manera la curva de carga monotónica en compresión, siendo un resultado similar a los reportados por Cachim et al. (2002) y Germano et al. (2016) para ensayos de fatiga en compresión pre-peak y ensayos de fatiga en flexión post-peak respectivamente.

Bibliografía

- ACI Committee 215. (1974). Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. *ACI Journal Proceedings*, 71(3), 97–121.
- ACI committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary. *American Concrete Institute*.
- Arenas, A. (2021). *Caracterización de la respuesta a tracción de hormigón reforzado con fibras de PVA*. Universidad de Chile.
- ASTM D2487-17. (2017). Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). *ASTM International*.
- Bentur, A., y Mindess, S. (2007). *Fibre Reinforced Cementitious Composites* (Second ed.). Taylor and Francis.
- Cachim, P. B., Figueiras, J. A., y Pereira, P. A. (2002). Fatigue behavior of fiber-reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 211–217.
- Dyduch, K., Szerszeń, M., y Destrebecq, J. F. (1994). Experimental investigation of the fatigue strength of plain concrete under high compressive loading. *Materials and Structures*, 27(9), 505–509.
- Gao, L., y Hsu, C. T. T. (1998). Fatigue of concrete under uniaxial compression cyclic loading. *ACI Materials Journal*, 95(5), 575–581.
- Germano, F., Tiberti, G., y Plizzari, G. (2016). Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 49(10), 4229–4245.
- Grzybowski, M., y Meyer, C. (1993). Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement. *ACI Materials Journal*, 90(6).
- Hsu, T. T. (1981). Fatigue of Plain Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 78(4), 292–305.
- Isojeh, B., El-Zeghayar, M., y Vecchio, F. J. (2017). Concrete Damage under Fatigue Loading in Uniaxial Compression. *ACI Materials Journal*, 114(2).
- Karsan, I. D., y Jirsa, J. O. (1969). Behavior of Concrete Under Compressive Loadings. *Journal of the Structural Division*, 95(12), 2543–2564.
- Kim, J. K., y Kim, Y. Y. (1996). Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(10), 1513–1523.
- McCormac, J. C., y Brown, R. H. (2017). *Diseño de concreto reforzado* (10.^a ed.). Alfaomega.
- Medeiros, A. (2012). *Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras* (Tesis Doctoral, Pontifícia Universidade Católica Do Rio De Janeiro).

- Medeiros, A., Zhang, X., Ruiz, G., Yu, R. C., y Velasco, M. D. S. L. (2015). Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. *International Journal of Fatigue*, 70, 342–350.
- Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (3.^a ed.). McGraw-Hill.
- Naaman, A. E., y Hammoud, H. (1998). Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 20(5), 353–363.
- Nilson, A. H., David, D., y Dolan, C. W. (2010). *Design of Concrete Structures* (14.^a ed.). New York: McGraw-Hill.
- Noushini, A., Samali, B., y Vessalas, K. (2013). Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 49, 374–383.
- Otter, D. E., y Naaman, A. E. (1988). Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Under Cyclic Loading. *ACI Materials Journal*, 85(4), 254–261.
- Poveda, E., Ruiz, G., Cifuentes, H., Yu, R. C., y Zhang, X. (2017). Influence of the fiber content on the compressive low-cycle fatigue behavior of self-compacting SFRC. *International Journal of Fatigue*, 101, 9–17.
- Reveco, J. (2021). *Caracterización y estudio de la respuesta de hormigón reforzado con fibras de PVA*. Universidad de Chile.
- Saucedo, L., Yu, R. C., Medeiros, A., Zhang, X., y Ruiz, G. (2013). A probabilistic fatigue model based on the initial distribution to consider frequency effect in plain and fiber reinforced concrete. *International Journal of Fatigue*, 48, 308–318.
- Son, M., Kim, G., Kim, H., Lee, S., Nam, J., y Kobayashi, K. (2020). Effects of the strain rate and fiber blending ratio on the tensile behavior of hooked steel fiber and polyvinyl alcohol fiber hybrid reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 106, 103482.
- Tepfers, R., y Kutti, T. (1979). Fatigue Strength of Plain, Ordinary, and Lightweight Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 76(5), 635–652.
- Thomas, T. L. (1979). *The effects of air content, water-cement ratio, and aggregate type on the flexural fatigue strength of plain concrete* (Tesis de Master, Iowa State University).
- Vásquez, N. (2019). *Estudio de la variación de ductilidad y resistencia del hormigón al reforzarlo con microfibras de PVA*. Universidad de Chile.
- Vicente, M. A., Minguez, J., Martínez, J. A., y Gonzalez, D. C. (2016). High-Performance Concrete and Fiber-Reinforced High- Performance Concrete under Fatigue Efforts. En *High performance concrete technology and applications*. InTech.
- Zhang, B., Phillips, D. V., y Wu, K. (1996). Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete. *Magazine of Concrete Research*, 48(177), 361–375.

Anexos

Anexo A. Ensayos preliminares

A continuación, se presentan las curvas de tensión versus deformación asociadas a los ensayos preliminares realizados para comprobar el correcto funcionamiento de la máquina universal INSTRON® 600LX en los ensayos de fatiga en compresión. La deformación de cada ensayo preliminar fue medida directamente por la máquina universal, a diferencia de los ensayos definitivos, donde se hizo uso de LVDT para lograr mediciones de deformación más representativas.

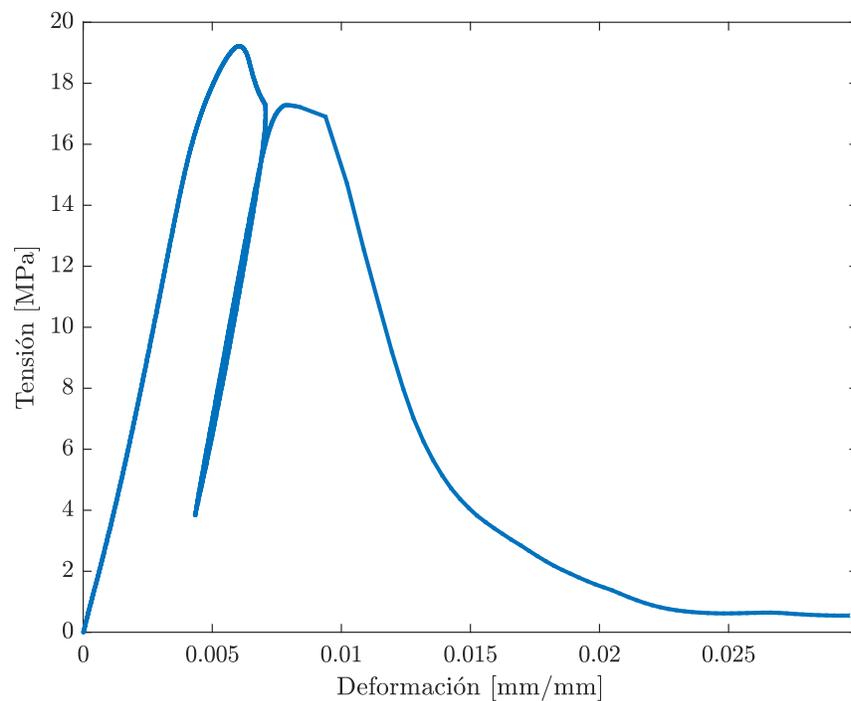


Figura A.1: Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (10 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90 \% \cdot f'_c$).

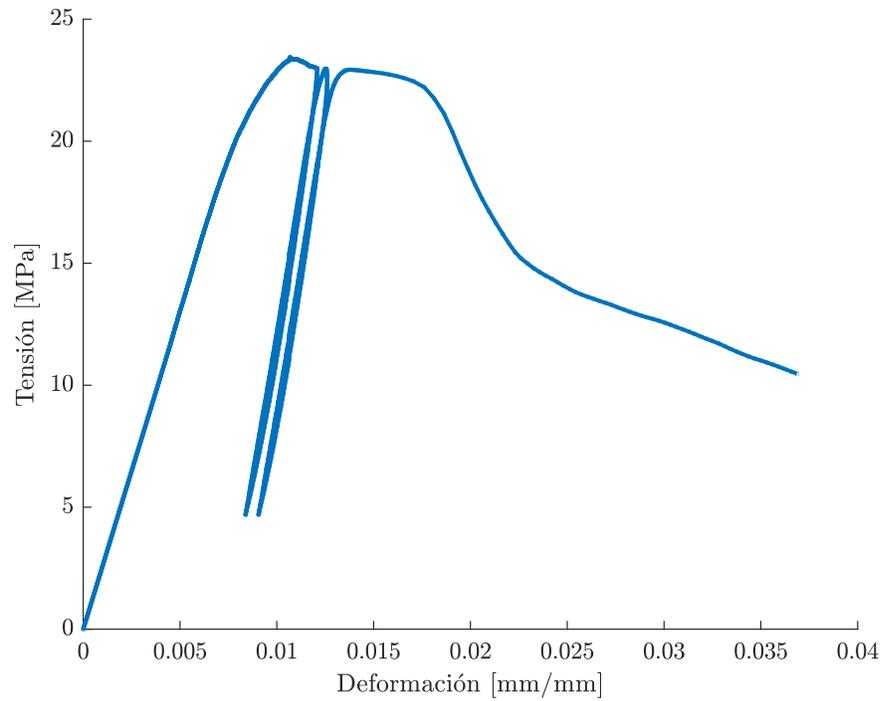


Figura A.2: Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 98 \% \cdot f'_c$).

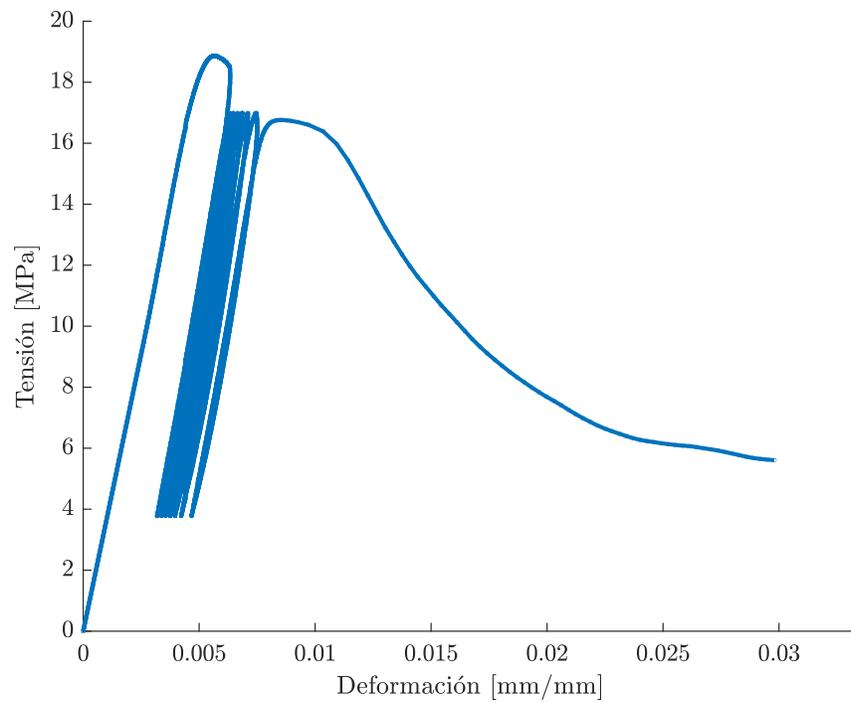


Figura A.3: Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo F1 (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90 \% \cdot f'_c$).

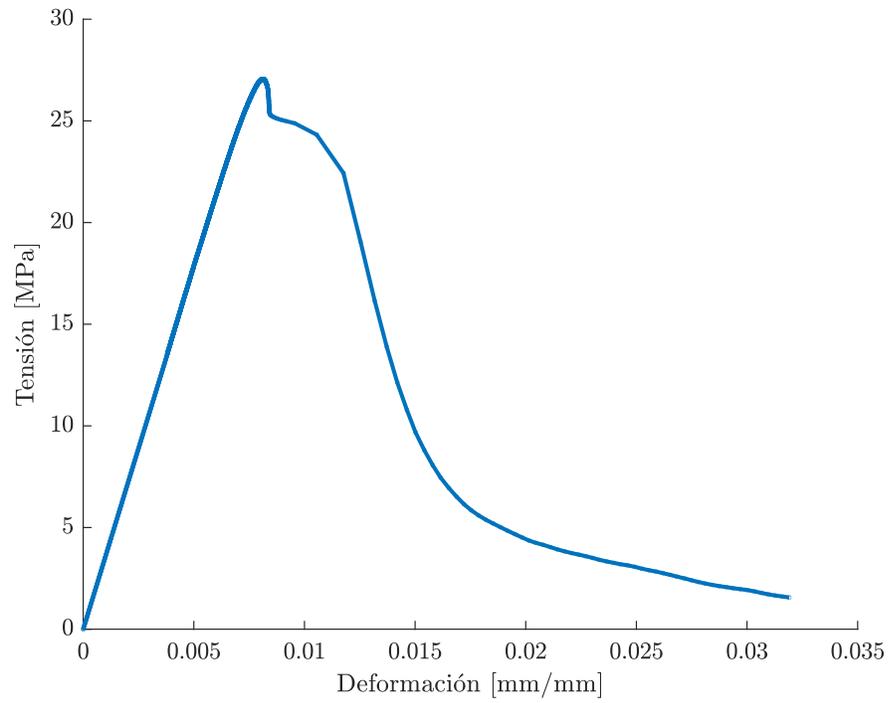
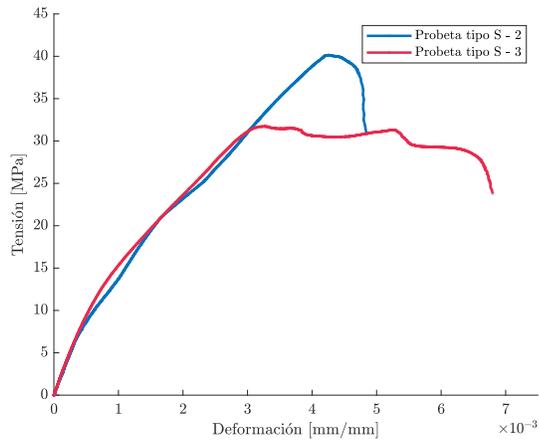


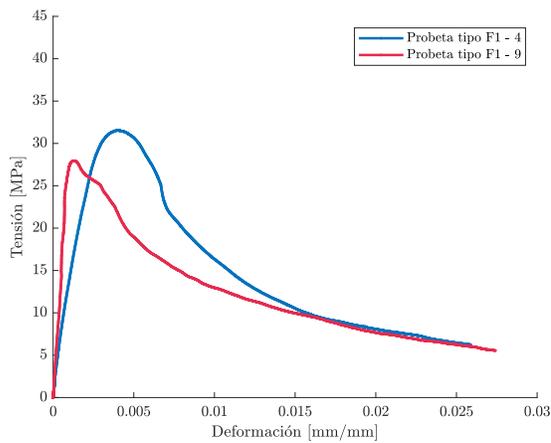
Figura A.4: Ensayo de fatiga en compresión post-peak, probeta tipo S (2 % de degradación, $S_{m\acute{a}x} = 90\% \cdot f'_c$).

Anexo B. Detalle de curvas tensión-deformación

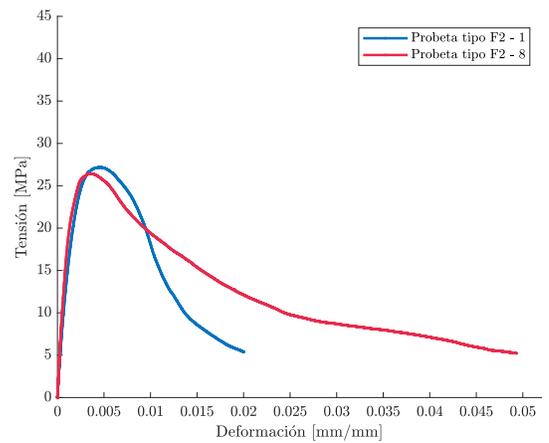
B.1. Ensayos de compresión pura



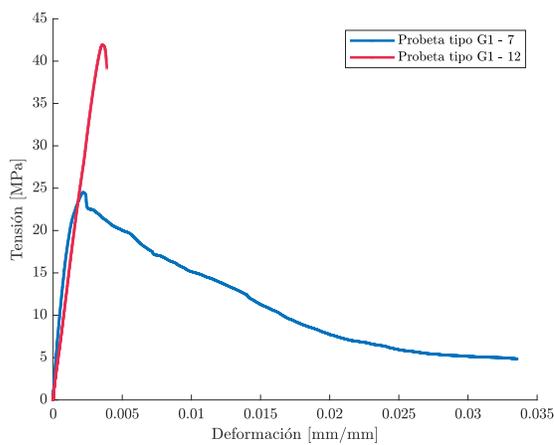
(a) Probeta S - 4



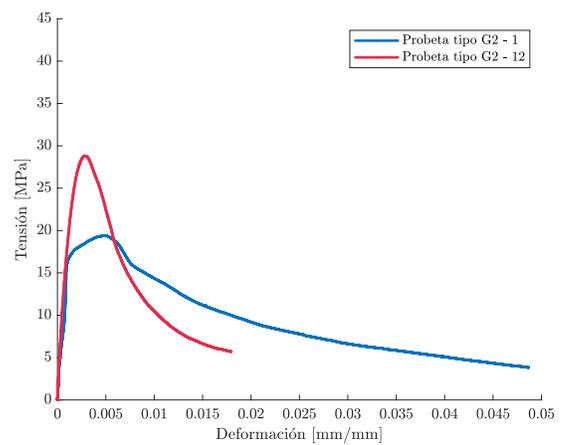
(b) Probeta F1 - 12



(c) Probeta F2 - 2



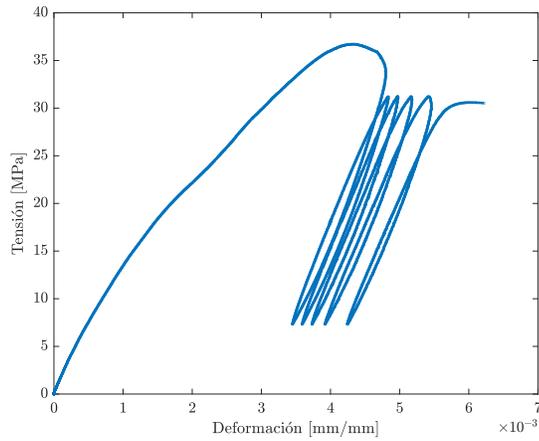
(d) Probeta G1 - 10



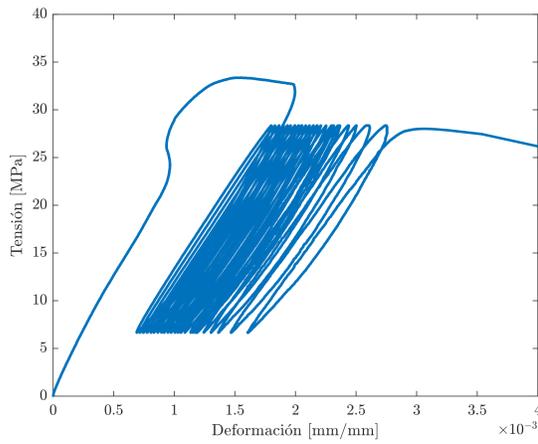
(e) Probeta G2 - 7

Figura B.1: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga de carga monotónica en compresión.

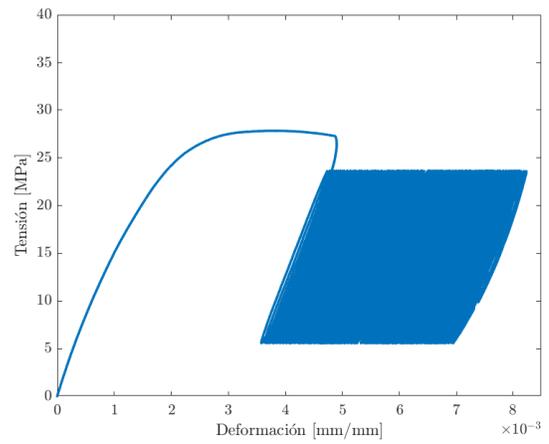
B.2. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 85\% f'_c$



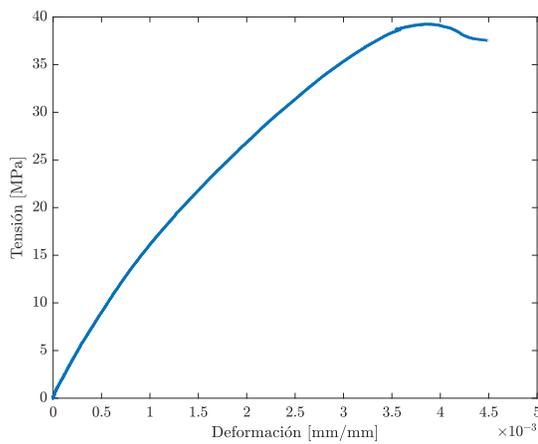
(a) Probeta S - 4



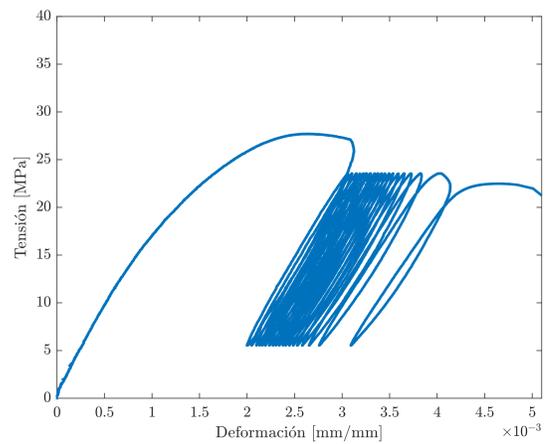
(b) Probeta F1 - 12



(c) Probeta F2 - 2



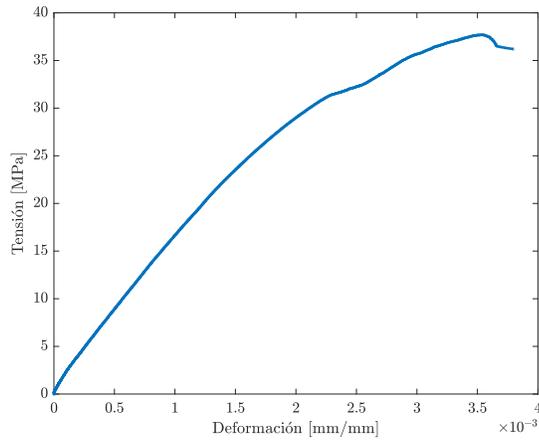
(d) Probeta G1 - 10



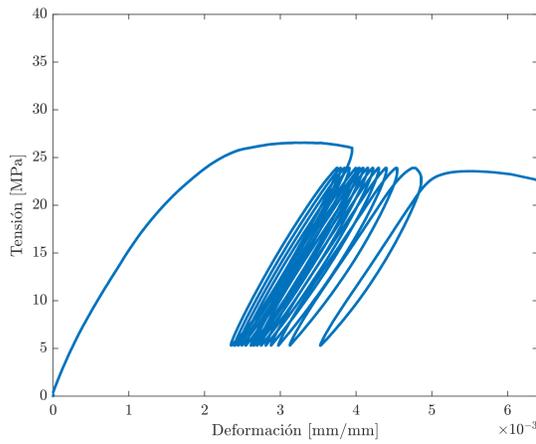
(e) Probeta G2 - 7

Figura B.2: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$.

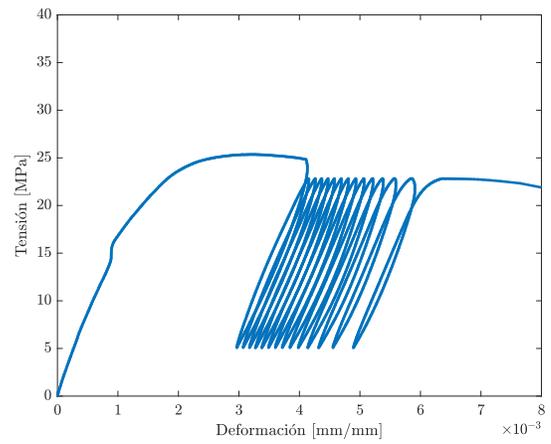
B.3. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 90\% f'_c$



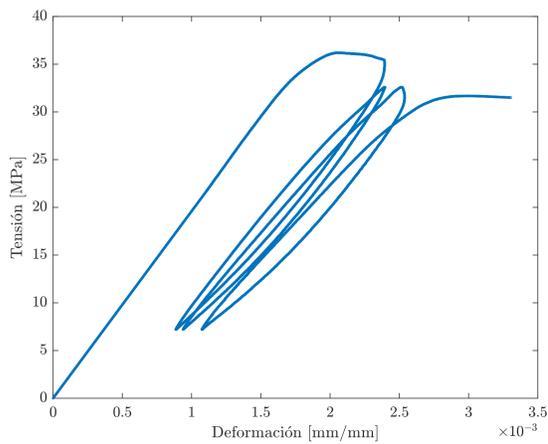
(a) Probeta S - 1



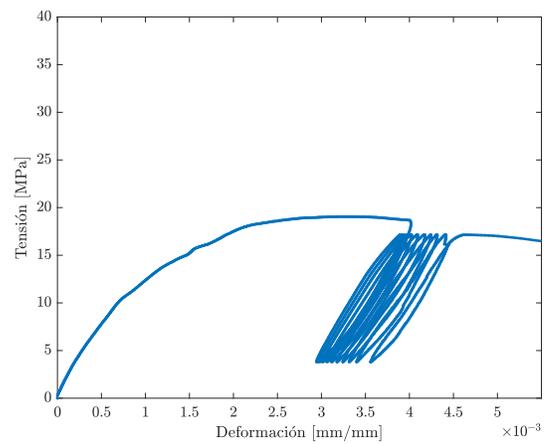
(b) Probeta F1 - 2



(c) Probeta F2 - 9



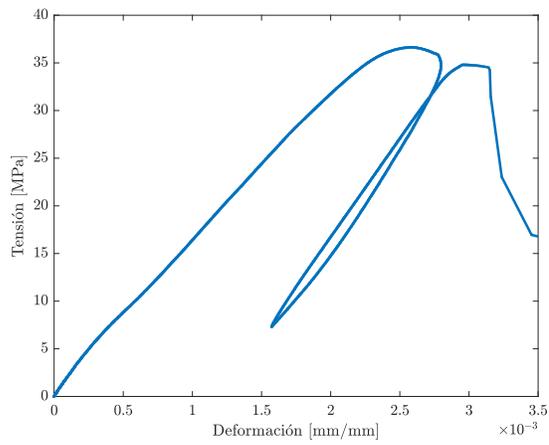
(d) Probeta G1 - 11



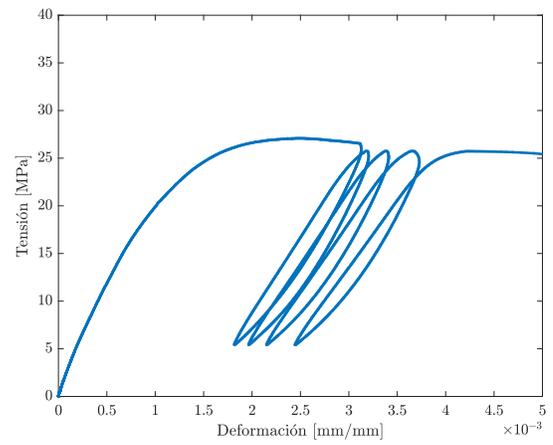
(e) Probeta G2 - 11

Figura B.3: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.90 \cdot f'_c$.

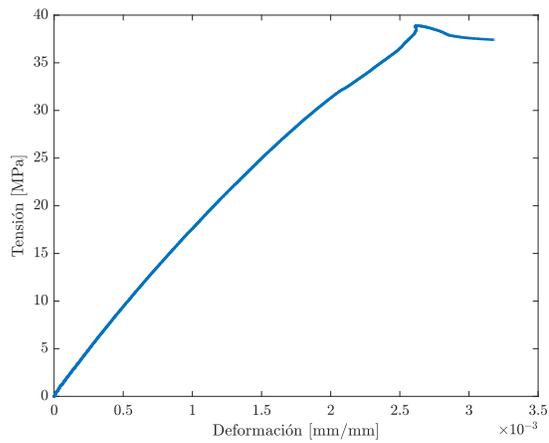
B.4. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 95\% f'_c$



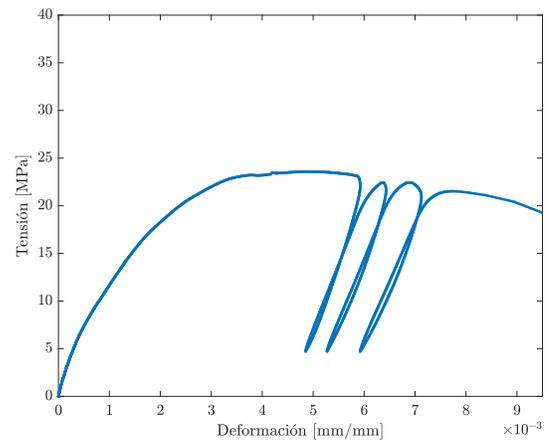
(a) Probeta F1 - 7



(b) Probeta F2 - 13



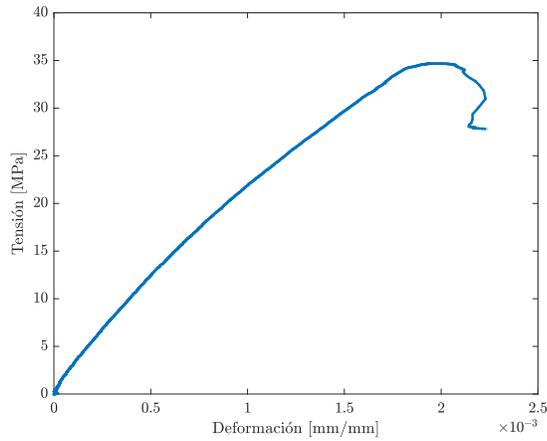
(c) Probeta G1 - 2



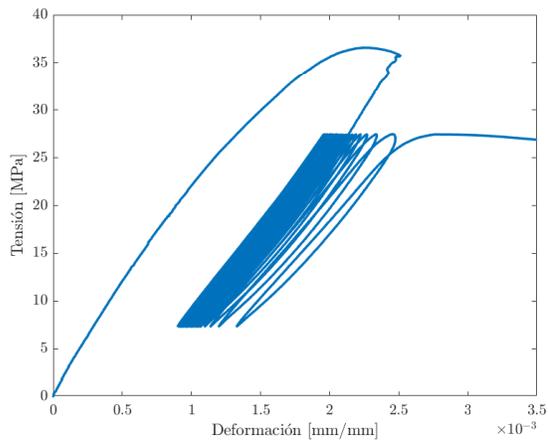
(d) Probeta G2 - 4

Figura B.4: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.95 \cdot f'_c$.

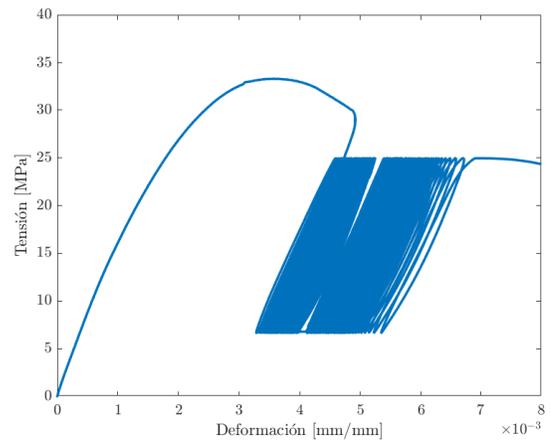
B.5. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 75\% f'_c$



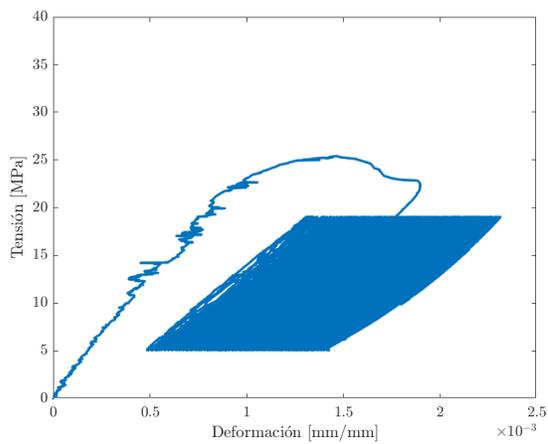
(a) Probeta S - 10



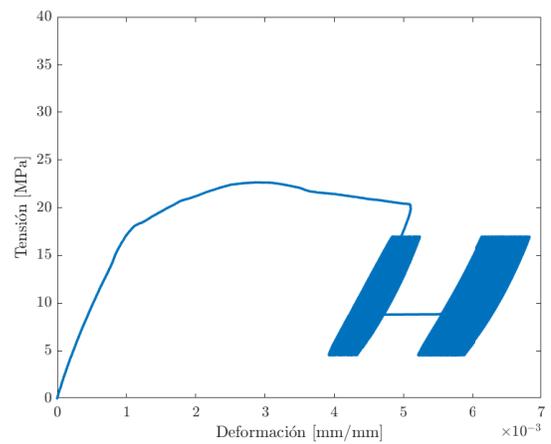
(b) Probeta F1 - 10



(c) Probeta F2 - 12



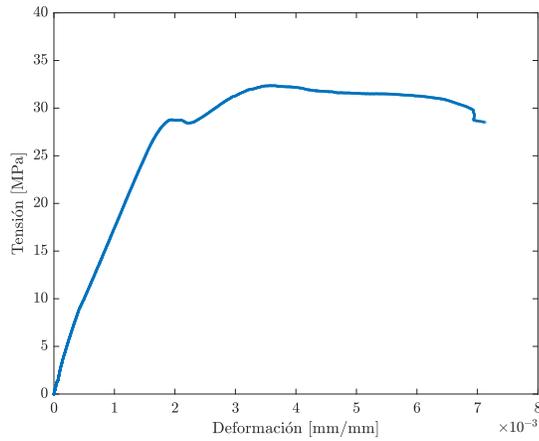
(d) Probeta G1 - 3



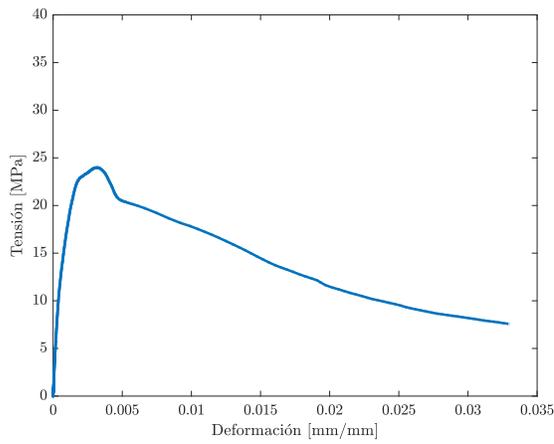
(e) Probeta G2 - 13

Figura B.5: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.75 \cdot f'_c$.

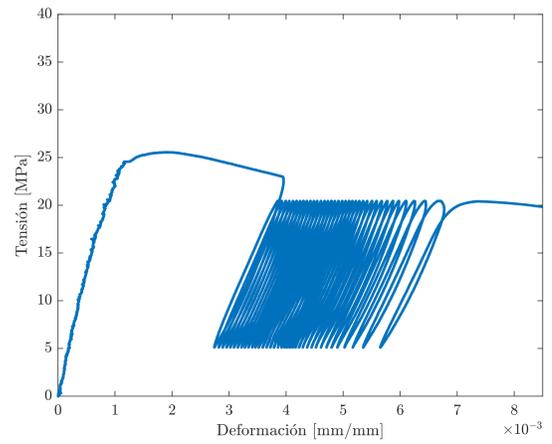
B.6. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 80\% f'_c$



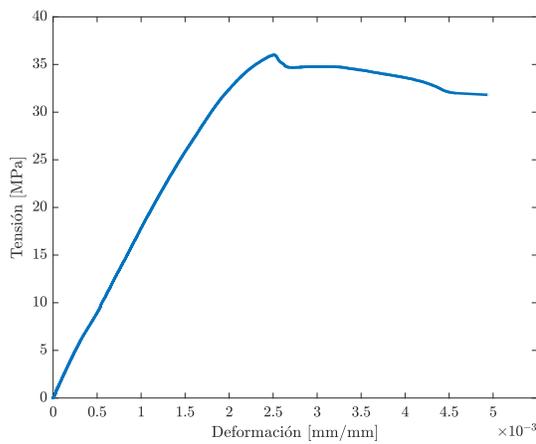
(a) Probeta S - 13



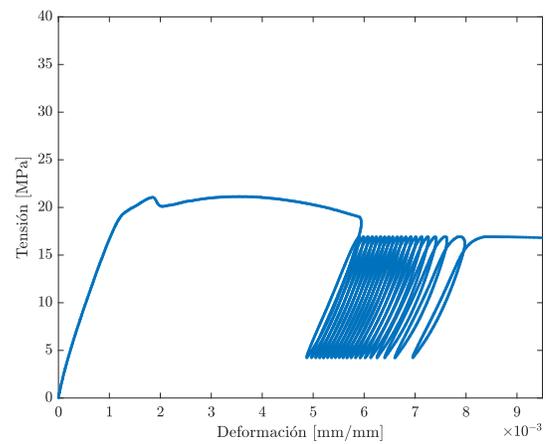
(b) Probeta F1 - 3



(c) Probeta F2 - 6



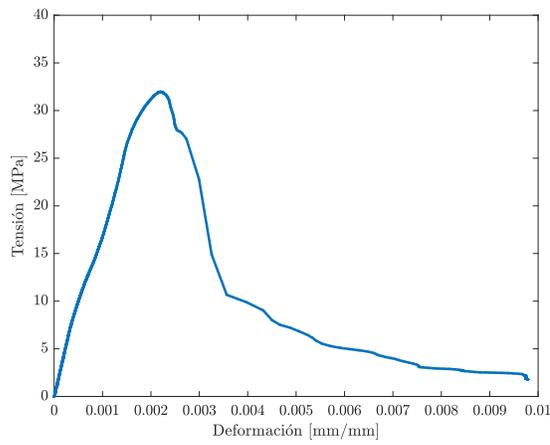
(d) Probeta G1 - 4



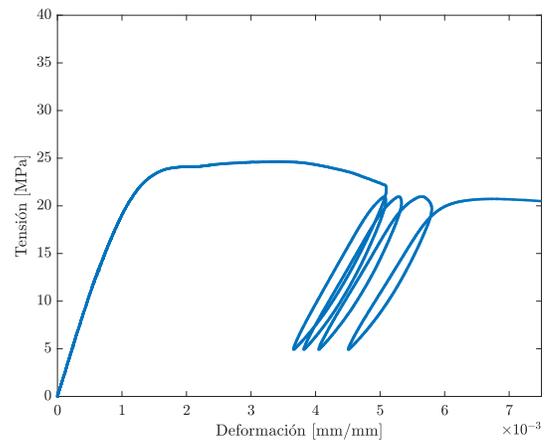
(e) Probeta G2 - 9

Figura B.6: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.80 \cdot f'_c$.

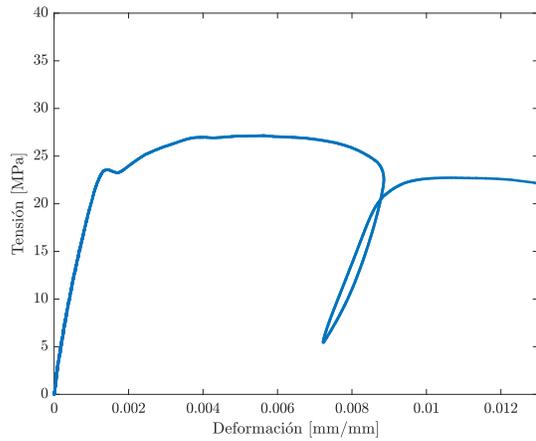
B.7. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 85\% f'_c$



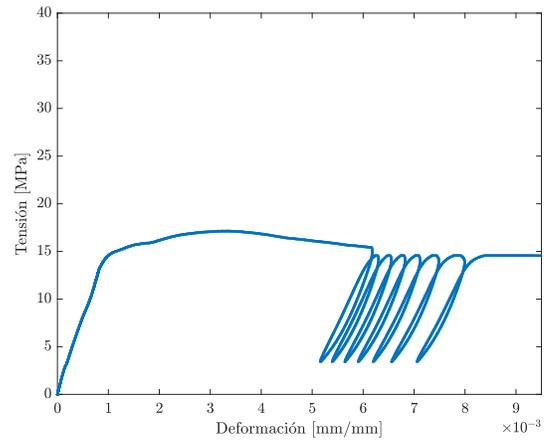
(a) Probeta F1 - 5



(b) Probeta F2 - 5



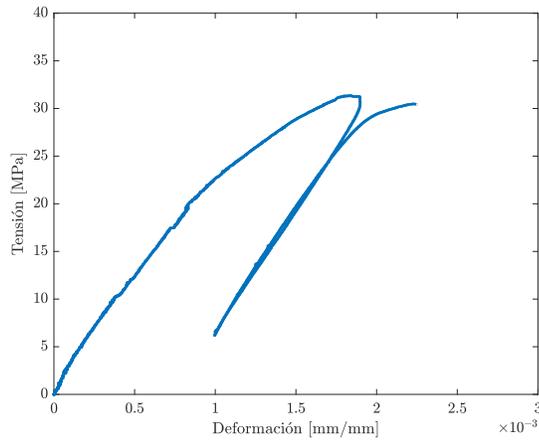
(c) Probeta G1 - 9



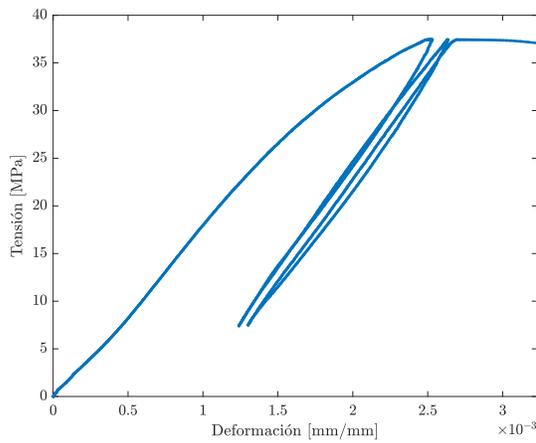
(d) Probeta G2 - 2

Figura B.7: Curvas tensión-deformación en ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10% de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 0.85 \cdot f'_c$.

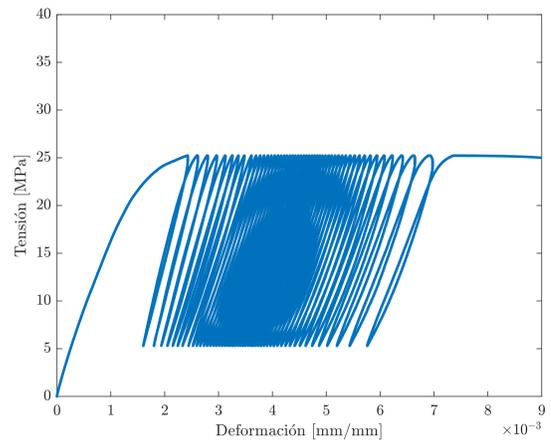
B.8. Ensayos de fatiga en compresión pre-peak



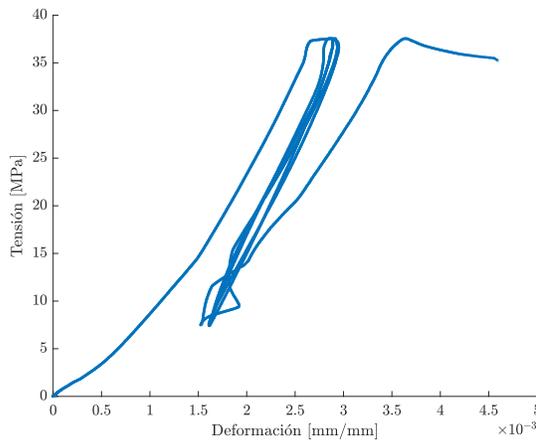
(a) Probeta S - 11



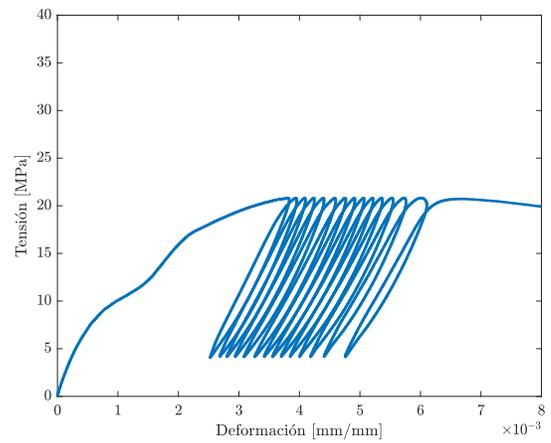
(b) Probeta F1 - 11



(c) Probeta F2 - 3



(d) Probeta G1 - 1



(e) Probeta G2 - 5

Figura B.8: Curvas tensión-deformación, ensayos de fatiga pre-peak.

Anexo C. Modos de falla

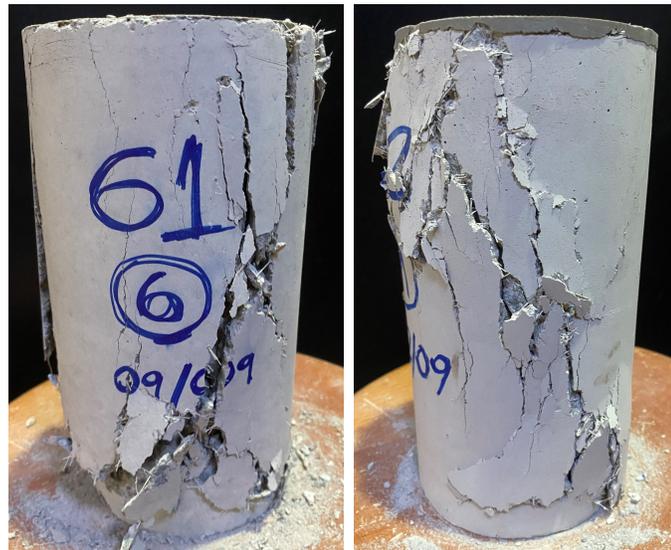
C.1. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 2% de degradación



(a) Probeta S - 1.

(b) Probeta F1 - 12.

(c) Probeta F2 - 2.



(d) Probeta G1 - 6.

(e) Probeta G2 - 11.

Figura C.1: Modos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 2% de degradación.

C.2. Ensayos de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación



(a) Probeta S - 13.

(b) Probeta F1 - 3.

(c) Probeta F2 - 12.



(d) Probeta G1 - 9.

(e) Probeta G2 - 9.

Figura C.2: Tipos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión post-peak con un 10 % de degradación.

C.3. Ensayos de fatiga en compresión pre-peak



(a) Probeta S - 11.

(b) Probeta F1 - 11.

(c) Probeta F2 - 3.



(d) Probeta G1 - 1.

(e) Probeta G2 - 5.

Figura C.3: Tipos de falla en probetas de tipo S, F y G en ensayos de fatiga en compresión pre-peak.

Anexo D. Comparación entre perfiles de evolución de deformaciones irreversibles

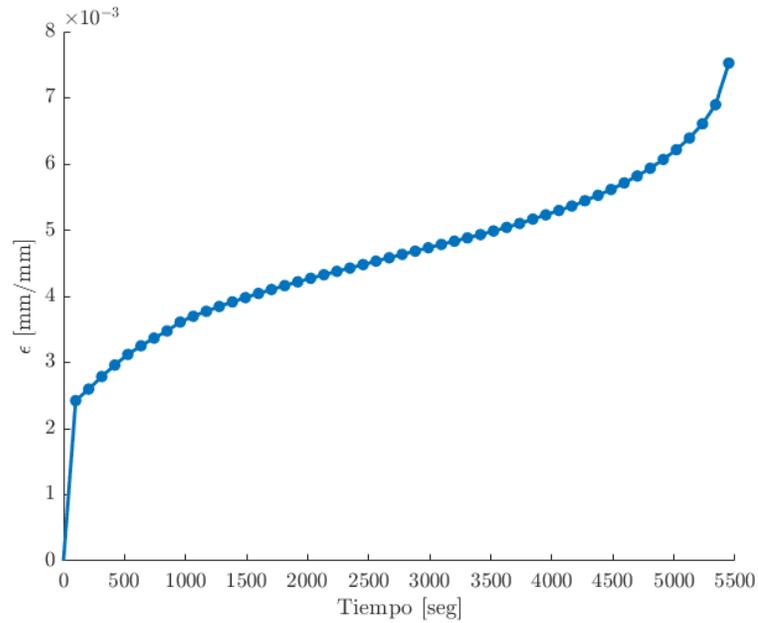


Figura D.1: Perfil de evolución de deformaciones irreversibles. Ensayo de fatiga en compresión pre-peak, probeta F2 - 3.

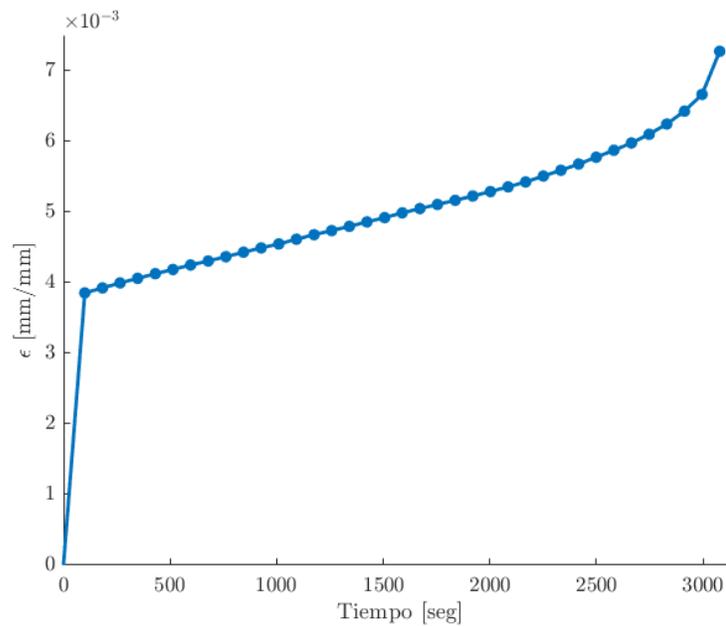


Figura D.2: Perfil de evolución de deformaciones irreversibles. Ensayo de fatiga en compresión post-peak, 10 % de degradación y $S_{m\acute{a}x} = 80\%f'_c$, probeta F2 - 6.