

Ing. Sergio Donjuan
González

Análisis por fatiga de elementos de concreto
reforzado con fibras metálicas

2025



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

ANÁLISIS POR FATIGA DE ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de

Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Sergio Donjuan González

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Codirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Querétaro, Qro., diciembre 2025

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Estructuras)

Análisis por fatiga de elementos de concreto reforzado
con fibras metálicas

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ciencias (Estructuras)

Presenta:

Ing. Sergio Donjuan González

Dirigido por:

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Codirigido por:

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel
Presidente

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández
Secretario

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Vocal

Dr. Luis Francisco Pérez Moreno
Suplente

Dr. Iván Fermín Arjona Catzim
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
diciembre de 2025
México

RESUMEN

El concreto convencional es un material de construcción comúnmente utilizado, pero su baja resistencia a la tensión lo hace propenso a grietas y fracturas cuando se somete a carga de tensión. El concreto reforzado con fibras (FRC) es una opción que combina el concreto tradicional con fibras agregadas, como las de vidrio, acero, o polímeros, para mejorar las propiedades mecánicas y mejorar el comportamiento a la fatiga del concreto. El concreto reforzados con fibras metálicas o por siglas en inglés SFRC está conformado de cemento Portland, agregados y agua, junto con fibras de acero para proporcionan una mayor ductilidad y resistencia a la tensión. Las fibras se distribuyen aleatoriamente en el concreto, creando un puente a través de las grietas y aumentando la capacidad para absorber energía antes de la falla. La implementación de fibras de acero en el concreto puede aumentar significativamente sus resistencias a la compresión, tensión y flexión. La adición de fibras de acero en diferentes dosis y formas ha demostrado mejorar las propiedades de tensión del concreto. La calidad de la unión entre las fibras de acero y la matriz de concreto desempeña un papel muy importante en el rendimiento efectivo de los SFRC. Parámetros como la geometría, el ángulo, la longitud de anclaje, el diámetro y la resistencia a la tracción influyen en el desarrollo y la distribución de las grietas en las fibras. El rendimiento de los SFRC se basa en la comprensión de los factores que afectan a la unión y la resistencia de las fibras de acero dentro de la matriz de concreto. La aplicación en la construcción se ha visto fuertemente obstaculizada por la no disponibilidad de una normativa específica, la falta de conocimientos y de experiencia. Además, la inexistencia de normas relativas al diseño y aplicación, SFRC desarrolla este trabajo para ampliar el conocimiento sobre el comportamiento de este tipo de material. Se validó comparando los resultados con los datos experimentales, que mostraron una alta correlación y un error porcentual medio del 3,96%, revelando la capacidad del modelo para predecir el comportamiento a flexión del SFRC con una precisión superior al 96%. Por último, con el modelo se evaluó la influencia de las fibras en la resistencia a la fatiga, identificando la interacción entre las fibras metálicas y la matriz de concreto como una de las principales variables.

.

Palabras clave: Concreto, Fibras de acero, Fatiga, Elemento Finito, Cargas cíclicas.

ABSTRACT

Conventional concrete is a commonly used construction material, but its low tensile strength makes it prone to cracks and fractures when subjected to tensile loads. Fiber-reinforced concrete (FRC) is an alternative that combines traditional concrete with additional fibers, such as steel, glass, or polymers, to improve its mechanical properties and enhance the concrete's fatigue performance. Steel fiber-reinforced concrete (SFRC) consists of Portland cement, aggregates, and water, along with steel fibers that provide increased ductility and tensile strength. These fibers are randomly distributed in the concrete matrix, creating a bridge across the cracks and improving the concrete's ability to absorb energy before failure. The use of steel fibers in concrete can significantly increase its compressive, tensile, and flexural strengths. Additionally, the addition of steel fibers in different doses and shapes has been shown to improve the tensile properties of concrete. The quality of the bond between the steel fibers and the concrete matrix is crucial for the effective performance of SFRC. Factors such as the geometry, angle, anchorage length, diameter, and tensile strength of the steel fibers influence the development and distribution of cracks. The performance of SFRC depends on a deep understanding of the factors affecting the adhesion and strength of the steel fibers in the concrete matrix. Its implementation in construction has faced significant challenges due to the lack of specific standards, knowledge, and experience, as well as the absence of clear guidelines for the design and application of SFRC. Therefore, the development of this work is important for expanding knowledge on the behavior of this type of material. The model was validated by comparing the obtained results with experimental data, showing a high correlation and an average percentage error of 3.96%, which demonstrated the model's ability to predict the bending behavior of SFRC with more than 96% accuracy. Furthermore, the model allowed for evaluating the impact of the random distribution of fibers on fatigue resistance, identifying the importance of adhesion between the steel fibers and the concrete matrix.

Keywords: Concrete, Steel fibers, Fatigue, Finite Element, Cyclic loads.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Querétaro, por brindarme la oportunidad de crecer académicamente y formar parte de su comunidad como alumno e investigador.

Al Dr. Jaime Moisés Horta Rangel, presidente de mi sínodo, por su tiempo, dedicación y guía a lo largo de este proceso. Agradezco al Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández, al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, al Dr. Luis Francisco Pérez Moreno y al Dr. Iván Fermín Arjona Catzim, por sus valiosas observaciones y sugerencias que enriquecieron este proyecto.

A mis compañeros de la maestría con los que compartí a lo largo de dos años.

Finalmente, a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo económico que facilitó esta investigación, y a todos aquellos que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a este logro.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. Justificación	5
1.2. Descripción del problema	6
2. ANTECEDENTES	8
2.1. Concreto reforzado con fibras.....	8
2.1.1. Panorama del concreto reforzado con fibras.....	8
2.1.2. Clasificación de las fibras.....	9
2.1.3. Efectos de la adición de fibras en el concreto en su trabajabilidad	11
2.1.4. Factores que afectan la trabajabilidad	12
2.2. Concreto reforzado con fibras metálicas.....	13
2.2.1. Clasificación de las fibras para reforzar concreto según ASTM	14
2.2.2. Comportamiento de adherencia del SFRC.....	15
2.3. Resistencia a la fatiga del SFRC	18
2.3.1. Evaluación de la fatiga.....	19
2.3.2. Curvas S-N	19
2.3.3. Histéresis.....	20
2.4. Método de elementos finitos (FEM) en análisis estructurales	22
2.4.1. Fundamentos del Método de Elementos Finitos.....	23
2.4.2. Etapas del Método de Elementos Finitos	23
2.5. Análisis de los SFRC con modelos de elementos finitos	25
2.5.1. Modelos constitutivos para el análisis de los SFRC	25
2.6. Modelos analíticos para analizar materiales compuestos.	29
2.6.1. Modelo Lamellar	29
2.6.2. Modelo de Christensen para materiales compuestos	30

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	33
3.1. Hipótesis	33
3.2. Objetivo general.....	33
3.3. Objetivos específicos	33
4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. Desarrollo del modelo computacional	34
4.1.1. Definición de las propiedades geométricas y de los materiales.....	35
4.1.2. Modelación de la geometría del elemento.....	39
4.1.3. Generación aleatoria de fibras	40
4.1.4. Asignación de las propiedades	43
4.1.5. Definición de las condiciones de frontera.....	43
4.2. Simulación	44
4.2.1. Obtención de esfuerzos y deformaciones.....	45
4.2.2. Incremento progresivo de cargas.....	46
4.2.3. Obtención de resultados	47
4.3. Validación	48
4.3.1. Comparación de resultados.....	48
4.3.2. Determinación del grado de aproximación del modelo	49
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
5.1. Desarrollo del modelo computacional	51
5.1.1. Definición de las propiedades geométricas y de los materiales.....	52
5.1.2. Modelación de la geometría.....	53
5.1.3. Generación aleatoria de fibras	54
5.1.4. Asignación de las propiedades	54
5.1.5. Definición de las condiciones de frontera.....	56
5.2. Simulación	57
5.2.1. Obtención de esfuerzos y deformaciones en el primer paso de carga	58
5.2.2. Incremento progresivo de cargas.....	59
5.2.3. Obtención de resultados	61
5.3. Validación.....	61
5.3.1. Comparación de resultados.....	62
5.3.2. Determinación del grado de aproximación del modelo	63
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65

7. REFERENCIAS	66
APÉNDICE	73
CÓDIGO EN APDL DE LA SIMULACIÓN DE SFRC	73

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 1-1 Fibras metálicas con ganchos en sus extremos	2
Figura 1-2 Modelo de elemento finito de viga con fibras	4
Figura 2-1 Clasificación de fibras	11
Figura 2-2 Diversas fibras de acero, clasificadas según su forma geométrica adaptado de Abdallah et al., (2018)	16
Figura 2-3 Comportamiento de tracción de fibras de acero en forma de gancho con diferentes ángulos de inclinación	18
Figura 2-4 Curva de Wöhler	20
Figura 2-5 Curva de histéresis	21
Figura 2-6 Diagrama de flujo de trabajo del FEM, adaptado de Z. Zhang (2024)	24
Figura 2-7 Respuesta esfuerzo de formación en SFRC bajo compresión	26
Figura 2-8 Modelo multilíneal, adaptado de Singh (2017)	27
Figura 2-9 Modelo bilíneal de SFRC, adaptado de Singh (2017)	28
Figura 2-10 Modelo de caída constante SFRC, adaptado de Singh (2017)	29
Figura 4-1 Diagrama de la metodología	34
Figura 4-2 Diagrama de flujo	35
Figura 4-3 Dimensiones de la viga	38
Figura 4-4 Esquema de un ensayo de flexión a cuatro puntos (<i>Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading, 2022)</i>).	44
Figura 5-1 Parámetros geométricos y mecánicos del concreto	52

Figura 5-2 Parámetros de las fibras metálicas en el modelo	52
Figura 5-3 Configuración de parámetros de mallado y carga	53
Figura 5-4 Modelo geométrico de la viga en ANSYS antes de la discretización	53
Figura 5-5 Fibras distribuidas dentro de la viga.....	54
Figura 5-6 Listado de tipos de elementos utilizados en el modelo de elementos finitos.	55
Figura 5-7 Generación del modelo de elemento finito de viga en ANSYS	56
Figura 5-8 Elementos finitos de las fibras y del concreto	56
Figura 5-9 Condiciones de frontera.....	57
Figura 5-10 Distribucion de los esfuerzos principales al inicio de la carga.....	58
Figura 5-11 Distribucion de los esfuerzos principales al final del 3° ciclo de carga.....	58
Figura 5-12 Especimen con pasos de carga de 50kg con 1% de fibras a) paso de carga numero 32 b) paso de carga numero 48.....	59
Figura 5-13 Grafica carga-deformación al centro del claro con diferentes porcentajes fibras	60
Figura 5-14 viga con un 0.05% de fibras	61
Figura 5-15 Curva carga-deflexión del modelo FEM y datos experimentales para FROC 65-0.5	63

ÍNDICE DE TABLAS

	Pagina
Tabla 2-1 Efecto de las fibras en la trabajabilidad del concreto.....	12
Tabla 4-1 Propiedades de las fibras.....	37
Tabla 4-2 Propiedades de la viga del concreto	39
Tabla 5-1 Propiedades de la mezcla FROC 65-0.5 (según Boulekbache et al., 2016).....	62
Tabla 5-2 Errores porcentuales de la carga en función de la deflexión.....	63

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es de los materiales más usados en estructuras de ingeniería, infraestructura y arquitectura. El concreto, desde su forma básica hasta su versión reforzada con acero, conocida como concreto reforzado, y más recientemente el concreto pretensado y postensado, ha revolucionado la construcción a lo largo de los siglos.

A finales del siglo XX, nuevas tecnologías como la química, la nanotecnología y la ciencia de materiales permitieron avances que transformaron su uso y aplicaciones. Su gran resistencia y bajo costo lo hacen indispensable en la construcción y la obra civil. Una gran desventaja del concreto es su comportamiento frágil, esto quiere decir que tiene un excelente rendimiento a ser comprimido, sin embargo, su resistencia a la tensión es considerablemente más baja.

Para mejorar esta limitación la técnica más usada es combinar el concreto con barras de acero de diferentes diámetros, pero ahora también se combina con fibras, mallas y otros formatos que han ampliado sus aplicaciones, incluso fuera de la ingeniería civil y la construcción. Los avances científicos han mejorado su durabilidad y resistencia, permitiendo adaptarlo a nuevas necesidades.

La adición de fibras de acero como las mostradas en la Figura 1-1 en el concreto, mejora su comportamiento, al reducir la propagación de microgrietas y aumentar su resistencia a la fatiga, impactos y cargas dinámicas. Las fibras actúan como un refuerzo localizado, formando una red estructural dentro de la mezcla que aumenta la capacidad de tensión. Además, se ha demostrado que las fibras de acero son más efectivas que las sintéticas en mejorar estas propiedades debido a su mayor resistencia y rigidez.



Figura 1-1 Fibras metálicas con ganchos en sus extremos

El uso de fibras como refuerzo en el concreto es una técnica antigua, que data de la época romana y, aún antes, de ladrillos de barro reforzados con paja encontrados en sitios del Medio Oriente. En tiempos modernos, las fibras de acero comenzaron a usarse como refuerzo en concreto a partir de patentes de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Sin embargo, su adopción fue limitada inicialmente debido a los altos costos, la falta de pruebas adecuadas y el desarrollo paralelo del concreto reforzado con varillas de acero.

Los elementos de concreto reforzados con fibras metálicas (SFRC por sus siglas en inglés) pueden estar sujetos a cargas cíclicas en diversas situaciones, especialmente en aplicaciones donde se espera que el concreto esté expuesto a movimientos sísmicos, cargas de viento, cargas de tráfico vehicular, o cargas repetidas debido a la expansión y contracción térmica.

En estos casos, la presencia de cargas cíclicas puede influir en el comportamiento mecánico del SFRC, incluidos efectos como la fatiga del material, la acumulación de daño y el eventual fallo estructural si no se diseña y construye adecuadamente.

La fatiga es un proceso de desgaste que ocurre cuando un material se somete a cargas o esfuerzos cíclicos repetidos, incluso si estos no superan la resistencia máxima. Este fenómeno puede generar pequeñas grietas que, al expandirse, provocan finalmente la fractura o el fallo del material.

Los factores como la magnitud y frecuencia de las cargas, las condiciones ambientales y las propiedades específicas del material son relevantes en el estudio por fatiga. Es de gran importancia diseño de componentes mecánicos y estructurales, ya que suele ser una de las principales causas de fallos inesperados en elementos que están sujetos a esfuerzos repetitivos, como los pisos de edificios industriales, la pavimentación de carreteras y los tableros de puentes.

El método de elementos finitos (FEM por sus siglas en inglés) permite analizar y predecir el comportamiento de materiales sometidos a fatiga, permitiendo modelar con precisión cómo las cargas cíclicas y las propiedades del material influyen en su degradación, así como en el probable fallo.

La modelación con FEM nos permite estudiar en detalle la interacción entre las fibras metálicas y la matriz de concreto, considerando su distribución aleatoria y orientación dentro del volumen del material (Figura 1-2). Esto es importante para evaluar cómo cambia la resistencia y el comportamiento a la fatiga del concreto reforzado.

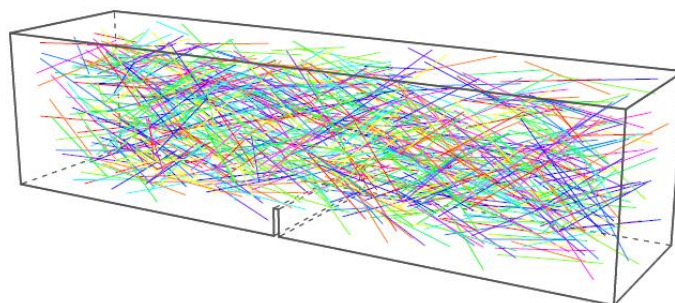


Figura 1-2 Modelo de elemento finito de viga con fibras

El FEM es una técnica matemática que se utiliza para resolver problemas complejos, como el análisis estructural, la transferencia de calor, la dinámica de fluidos y los campos electromagnéticos. Consiste en dividir un objeto o sistema en pequeñas partes llamadas elementos finitos, que forman una mallado, y darle solución a las ecuaciones que describen su comportamiento en cada parte del mallado.

Estas ecuaciones se ensamblan en un sistema que explica el comportamiento de todo el conjunto, y se resuelven numéricamente. Esto permite estudiar sistemas con geometrías complejas, materiales heterogéneos, condiciones externas variables. Pero requiere alta capacidad de cálculo, gran uso por su exactitud y adaptabilidad en áreas como diseño estructural, simulación de fluidos y análisis térmico.

Hasta el momento, no se ha abordado la comparación de los resultados de las simulaciones con la técnica de elemento finito, con modelos analíticos de materiales compuestos que permitan determinar propiedades como el módulo de elasticidad y la carga máxima de fallo. De esta forma, es necesario contar con una herramienta que permitirá modelar la geometría con la distribución aleatoria de fibras y aplicar condiciones de carga cíclicas para de esta manera obtener la carga de fallo que soporta el SFRC.

En las siguientes secciones del capítulo se presenta la justificación del proyecto donde se detalla el porqué de la investigación, además de una breve descripción del problema, que incluye un contexto general de la actualidad de la situación y el que es lo que debería estar pasando.

En el Capítulo 2, se presenta los antecedentes relevantes para el desarrollo de este proyecto, prestando el contexto necesario para entender la importancia del estudio. A continuación, en el Capítulo 3, se formula la hipótesis y se puntualizan los objetivos que se buscan alcanzar a lo largo del trabajo.

En el Capítulo 4 se representa la metodología que se usó para cumplir con los objetivos establecidos en el capítulo anterior, exponiendo los pasos y procedimientos seguidos.

En el Capítulo 5, se presenta la discusión de los resultados, y se muestran los gráficos que muestran los principales resultados. Por último, el Capítulo 6 presenta las conclusiones de la investigación y propone sugerencias para investigaciones posteriores en este campo.

1.1. Justificación.

La necesidad de materiales constructivos de alta resistencia mecánica y durabilidad ha impulsado la creación y utilización del SFRC. Anualmente se producen 300.000 toneladas de fibras de acero, y se espera que incremente un 20% anual. (Vijayan et al., 2022).

Este material se ha caracterizado por disminuir la propagación de fisuras y incrementar la resistencia a tensión y flexión en comparación al concreto convencional. Aunque el estudio del comportamiento a fatiga del SFRC sigue siendo difícil por la complejidad de los mecanismos que intervienen. Por lo tanto, el uso de metodologías avanzadas, como la simulación por elementos finitos, es indispensable para modelar y comprender con precisión los procesos de deterioro bajo cargas repetitivas, lo que permitiría optimizar su diseño y aplicación en estructuras sometidas a esfuerzos cíclicos.

Las estructuras de concreto acumulan daño gradualmente durante su vida útil, particularmente, los puentes carreteros, siendo la fatiga y los efectos ambientales, las

principales causas de deterioro (Crespo Sánchez et al., 2013). Un ejemplo relacionado con esto es el colapso del puente de Ixtla en 2014 que, con base en los reportes, fue ocasionado por el paso de un tráiler con exceso de carga poco antes de que fallara el puente. La fatiga del concreto fue un factor contribuyente al colapso, especialmente considerando la edad del puente y las condiciones ambientales a las que estuvo expuesto a lo largo de los años (Tonantzin, 2014).

Otro caso en el que los elementos estructurales de concreto están sometidos a cargas cíclicas es en las pistas de despegue y aterrizar de los aeropuertos, un incidente relacionado con esto ocurrió en el aeropuerto regional de Ankeny, en Iowa, un jet Raytheon Premier One sufrió daños en su tren de aterrizaje tras pasar sobre una grieta en la pista (Gupta et al., 2021).

El estudio del SFRC ayudara para desarrollar soluciones constructivas adaptadas a las condiciones y necesidades, con el objetivo de conseguir estructuras más seguras, duraderas y sostenibles a largo plazo. De este modo, contribuir al avance del conocimiento sobre estos materiales compuestos.

El objetivo de esta investigación es incorporar el método de elementos finitos al análisis del SFRC con modelos que representen explícitamente la orientación y localización aleatoria de las fibras metálicas en el concreto. Esta metodología permitirá caracterizar mejor el comportamiento del SFRC ante cargas repetitivas.

Mediante simulaciones precisas con FEM se logrará comprender mejor la interacción entre las fibras y el concreto, y así establecer las bases para desarrollar o mejorar las especificaciones para el diseño y uso de SFRC. Fomentando la adopción de técnicas analíticas avanzadas y materiales sostenibles de alto rendimiento.

1.2. Descripción del problema

La simulación del comportamiento de los SFRC es una tarea compleja y costosa computacionalmente, sobre todo cuando se tiene en cuenta la interacción entre las fibras metálicas y la matriz de mortero. La experimentación física, a pesar de ser fundamental, se

enfrenta a altos costos en pruebas dinámicas para caracterizar completamente su comportamiento y modos de falla (J. Zhang et al., 2022).

Aspectos como la forma, longitud y propiedades mecánicas de las fibras influyen en la resistencia y tenacidad del SFRC, por lo que es necesario estudiarlas y entender cómo alteran sus propiedades (Carvalho et al., 2020).

Modelar las fibras de acero es difícil, ya que están distribuidas y orientadas de forma aleatoria. Además, es necesario crear modelos que simulen la adherencia entre fibras y matriz para calcular correctamente su capacidad de disipación de energía (A. G. Bitencourt L. et al., 2019).

Para simular de forma realista el comportamiento del SFRC bajo fatiga es necesario definir parámetros apropiados que muestren la respuesta dinámica y formen la interacción entre las fibras y la matriz de concreto, así como la magnitud de las cargas aplicadas y el número de ciclos de carga y descarga. Y esto hace posible estimar con mayor precisión su comportamiento a falla por fatiga.

2. ANTECEDENTES

En este capítulo se describen los antecedentes que sustentan esta investigación, proporcionando un marco teórico sobre el SFRC y su aplicación en estructuras sometidas a cargas repetitivas. Se inicia explicando el SFRC, sus propiedades y la clasificación de los tipos de fibras.

Después, se analizan estudios anteriores sobre la resistencia a la fatiga del SFRC, ya que la resistencia a la fatiga depende de las influencias mecánicas y ambientales sobre el comportamiento estructural. Adicionalmente, se muestra el Método de Elementos Finitos (FEM) como una técnica para modelar y estudiar el comportamiento del SFRC, detallando sus principios y procedimientos para modelar materiales compuestos.

Después, se tratan las diversas formas de modelar SFRC utilizando elementos finitos, desde simulaciones y modelos analíticos para materiales compuestos. Se examinan modelos como los Lamellares y el de Christensen para calcular el módulo de elasticidad de materiales compuestos.

Finalmente, se propone el uso de FEM para el análisis del SFRC, siendo capaz de predecir su comportamiento a fatiga y mejorar su diseño en usos ingenieriles.

2.1. Concreto reforzado con fibras

El concreto reforzado con fibras constituye una nueva forma de material de construcción que mejora las propiedades mecánicas del concreto ordinario, como la resistencia a la tensión, la ductilidad, la tenacidad y la absorción de energía, y disminuye la fisuración (Mukhopadhyay & Khatana, 2015; Zhao et al., 2023). Este material combina la matriz cementante con fibras de distintos materiales distribuidas aleatoriamente con el fin de mejorar su comportamiento estructural y crear soluciones sostenibles en la edificación (Wang et al., 2000; H. Wu et al., 2023).

2.1.1. Aspecto del concreto reforzado con fibras..

El uso de fibras como refuerzo en materiales constructivos se viene dando desde tiempos ancestrales, en donde se utilizaban fibras naturales (paja, cabello animal, etc.) en

materiales como el adobe o la tapia pisada para mejorar su resistencia a la tensión y evitar la ruptura (Ahmad & Zhou, 2022). Al comienzo del siglo XX se registraron los primeros intentos de añadir refuerzos discontinuos como; clavos, trozos de cable, etc. en el concreto (Choi et al., 2014).

En el siglo XX el cemento-asbesto se usó mucho en prefabricados como tejas por su capacidad de dar monolitismo y resistencia a la tensión, pero por problemas de salud se sustituyeron las fibras de asbesto por otras (Ahmad & Zhou, 2022).

En las últimas décadas, el desarrollo del concreto reforzado con fibras ha avanzado con la introducción de fibras sintéticas (polipropileno, polietileno, nylon), metálicas (principalmente acero) y recicladas, estas últimas alineadas con los principios de economía circular (Ahmad & Zhou, 2022). Estas innovaciones han permitido mejorar las propiedades mecánicas del concreto, al tiempo que se reduce el impacto ambiental mediante el uso de materiales reciclados y naturales (Abbas & Khan, 2016)

2.1.2. Clasificación de las fibras

Las fibras utilizadas en el concreto se clasifican principalmente por su material y por su funcionalidad, geometría y dosificación, según estándares como ASTM C 1116. A continuación, se describen las principales categorías:

Por materiales

- Fibras metálicas: Generalmente de acero con bajo contenido de carbono, presentan una relación de aspecto (longitud/diámetro) de 20 a 100. Mejoran la ductilidad y la resistencia a la tensión.
- Fibras sintéticas: Incluyen materiales como polipropileno, nylon, poliéster y acrílico, caracterizados por su alta resistencia y facilidad de procesamiento.
- Fibras de vidrio: Secciones discretas resistentes a los álcalis, utilizadas para mejorar la resistencia a la tensión.

- Fibras naturales: Provenientes de materiales como coco, yute, bambú o caña de azúcar, con diámetros entre 0.2 y 0.5 mm. Son ecológicas, biodegradables y económicas.
- Fibras recicladas: Obtenidas de residuos industriales o posconsumo, contribuyen a la sostenibilidad, aunque sus propiedades pueden variar.

Por funcionalidad:

- Microfibras: Diseñadas para prevenir la fisuración por retracción plástica en el concreto fresco (antes de 24 horas). Generalmente de polipropileno, con diámetros de 0.023 a 0.050 mm y dosificaciones de 0.3 a 1.2 kg/m² (0.03% a 0.15% del volumen) [8].
- Macrofibras: Utilizadas en el estado endurecido para reducir el ancho de fisuras y mejorar el desempeño estructural post-fisuración. Pueden ser metálicas, sintéticas o naturales, con diámetros de 0.05 a 2.00 mm, relaciones de aspecto de 20 a 100 y dosificaciones de 0.2% a 0.8% del volumen .

Esta clasificación se muestra en el diagrama de la Figura 2-1.

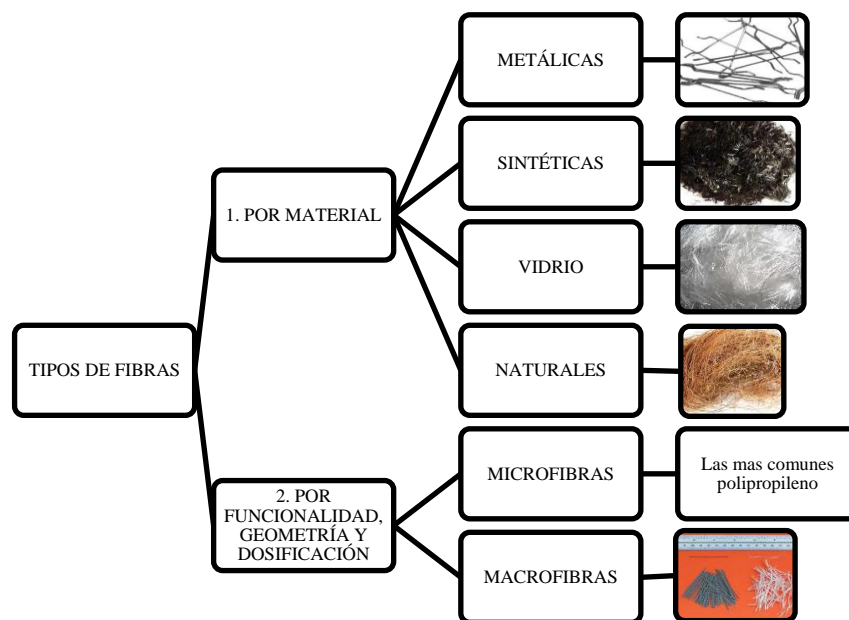


Figura 2-1 Clasificación de fibras

2.1.3. Efectos de la adición de fibras en el concreto en su trabajabilidad

La incorporación de diferentes tipos de fibras en el concreto, mejora sus propiedades mecánicas, pero generalmente reduce la trabajabilidad (facilidad de manejo y colocación) del material fresco. El grado de afectación depende del tipo, forma, tamaño y cantidad de fibra utilizada.

Las fibras de acero tienden a reducir la trabajabilidad del concreto en mayor medida que las fibras sintéticas o de vidrio, afectando significativamente el asentamiento y la facilidad de compactación. Entre las fibras de acero, aquellas con ganchos en los extremos tienen un impacto menor en la fluidez en comparación con las fibras rectas o cortas (Guerini et al., 2018; Li et al., 2025; Soroushian & Bayasi, 1991; Zeyad, 2020).

Por su parte, las fibras sintéticas, como las de polipropileno y poliolefina, también disminuyen la trabajabilidad, aunque en menor grado que las de acero. Este efecto se intensifica con mayores dosis y longitudes de fibra, pero puede mitigarse mediante el uso de superplastificantes (Abdelrazik & Khayat, 2020; Abousnina et al., 2021; Bentegri et al., 2020; Shafei et al., 2021).

Las fibras de vidrio y de lana presentan una reducción en la trabajabilidad menor que las de acero, con un impacto que varía según la cantidad y la forma de la fibra (Meesala, 2019). Finalmente, las fibras basálticas exhiben un efecto intermedio, disminuyendo la fluidez, pero contribuyendo a optimizar la distribución de poros en la matriz del concreto (Hou et al., 2025a; Zeyad, 2020).

2.1.4. Factores que afectan la trabajabilidad

La longitud, el diámetro, la dosis, la forma y la rigidez de las fibras influyen significativamente en la trabajabilidad del concreto reforzado con fibras. Las fibras más cortas, delgadas y flexibles tienen un impacto menor en la trabajabilidad y favorecen una mejor densidad de empaque de los agregados, optimizando la distribución en la matriz (Nouri et al., 2022).

Sin embargo, a mayor dosis de fibra, se incrementa la pérdida de trabajabilidad, lo que puede derivar en segregación si se excede la cantidad recomendada. Estos efectos se mencionan en la Tabla 2-1. Además, las fibras más flexibles y con formas combinadas tienden a reducir el impacto negativo en la fluidez del concreto, mejorando su manejabilidad en comparación con fibras más rígidas o de geometrías simples (Abdelrazik & Khayat, 2020; Bentegri et al., 2020; Guerini et al., 2018; Zeyad, 2020).

Tabla 2-1 Efecto de las fibras en la trabajabilidad del concreto

Tipo de fibra	Impacto en trabajabilidad	Notas adicionales
Acero (gancho)	Moderado	Mejor que acero recto
Acero (recto/corto)	Alto	Mayor reducción de fluidez
Polipropileno	Bajo a moderado	Menor impacto, mejora con aditivos
Vidrio/Lana	Bajo a moderado	Depende de la dosis
Basalto	Moderado	Optimiza porosidad

La adición de fibras al concreto generalmente disminuye su trabajabilidad, siendo más notable con fibras de acero y en mayores dosis. Fibras sintéticas y de vidrio afectan menos la fluidez, y el uso de aditivos puede compensar parcialmente esta pérdida. La selección adecuada del tipo, forma y cantidad de fibra es clave para equilibrar trabajabilidad y desempeño mecánico.

2.2. Concreto reforzado con fibras metálicas.

El concreto convencional tiene baja resistencia a la tensión, ductilidad, resistencia al agrietamiento y absorción de energía. Las micro fisuras internas son inherentes en el concreto y su baja resistencia a la tensión se debe a la propagación de estas micro fisuras, lo que eventualmente conduce a una falla frágil (Abdulhameed et al., 2022).

Mejorar la fragilidad y reducir las deficiencias del concreto podría aumentar su rendimiento en diferentes usos. El concreto, al ser frágil, tiende a tener baja resistencia y ductilidad después de agrietarse. La adición de fibras cortas en la matriz del concreto puede mitigar micro y macro fisuras, mejorando su resistencia y ductilidad post-fisura (Abdulhameed & Said, 2020).

Sin embargo, la adición de fibras tiene poco efecto sobre las propiedades anti fisuras del concreto. En las mezclas de concreto se utilizan diferentes tipos de fibras, tantas fibras poliméricas, de acero, de vidrio, nailon y polipropileno. El refuerzo de concreto y acero puede deformarse en muchos niveles diferentes de concreto reforzado debido a las cargas aplicadas, la corrosión, el calor, la fluencia y la contracción (García-Taengua et al., 2015).

La mayoría de las fibras disponibles para refuerzo están predeformadas mecánicamente. Las fibras de acero con extremos curvados se usan más comúnmente en compuestos cementosos que cualquier otro tipo de fibra, por lo que es sumamente importante comprender los procesos básicos que rigen la unión de fibras predeformadas (Feng et al., 2014).

Las aplicaciones comunes de concretos reforzados con fibras (FRC) incluyen aplicaciones de pavimentación para aeropuertos, carreteras, tableros de puentes y pisos industriales que soportan una carga cíclica significativa durante la vida útil. Dentro de estas áreas de aplicación, las características de fatiga del FRC son parámetros importantes de rendimiento y diseño.

Aunque los estudios empíricos han demostrado una correlación entre la resistencia estática y a la fatiga del concreto, se ha demostrado que varios factores además de los

parámetros de la fibra, como el contenido de volumen, el tipo y la dosificación, influyen en el comportamiento a la fatiga del concreto simple y reforzado con fibras (*Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete*, 2017).

2.2.1. Clasificación de las fibras para reforzar concreto según ASTM

Varios tipos de fibras se añaden al concreto para compensar las propiedades en las que tiene un menor desempeño (Venkateshwaran & Rajesh, 2019).

Las clasificaciones según la norma ASTM (*Specification for Fiber-Reinforced Concrete*, 2015) son:

- Tipo I fibras metálicas: pueden ser fibras de acero inoxidable, acero al carbono o acero aleado.
- Tipo II fibras de vidrio: Se trata de fibras de vidrio con resistencia frente a los álcalis.
- Tipo III fibras sintéticas: Se trata de fibras sintéticas para las que existen evidencias documentales que validan su capacidad de resistir el desgaste causado por la humedad, los álcalis en la pasta cementicia y los compuestos de los aditivos, a lo largo de toda la duración estimada de la estructura.
- Tipo IV fibras naturales: Fibras respaldadas por evidencias documentales que demuestran su durabilidad ante el deterioro provocado por la humedad, los álcalis de la pasta cementicia y los componentes de los aditivos, a lo largo de la vida útil proyectada de la estructura.

Las fibras metálicas según la norma ASTM (*Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*, 2004) se clasifican de la siguiente forma con base en su forma de fabricación:

- Tipo I, alambre estirado en frío.
- Tipo II, chapa cortada.
- Tipo III, extraído por fusión.
- Tipo IV, corte de laminador.
- Tipo V, alambre estirado en frío modificado

2.2.2. Comportamiento de adherencia del SFRC.

La fricción entre el concreto y la fibra define el comportamiento de adherencia de la fibra. Una geometría alargada con una mayor relación de aspecto puede tener un mejor comportamiento de adherencia.

El papel clave de las fibras de acero en la matriz de concreto es ayudar a mitigar la propagación de micro fisuras. Existen dos modos en los que las fibras pueden fallar en la matriz. El primero es la fractura de la fibra y el segundo es el desprendimiento de la fibra de la matriz de concreto.

Se prefiere el segundo escenario por ser más dúctil y servir para absorber energía. En otras palabras, las fibras con extremos en forma de gancho y onduladas pueden doblarse considerablemente y ceder, lo que permite arrancar la fibra. (Kim & Yoo, 2020).

Tras la fractura, la interacción interfacial del SFRC entre las fibras de acero y la matriz desempeñó un papel más significativo en los miembros de concreto reforzado que en las barras de acero. En un material compuesto no fisurado, la tensión se transfiere principalmente a través de la unión por fricción en la interfaz de la matriz al eje longitudinal de la fibra. Uno de los factores más críticos que determinan el proceso y los modos de fallo de los materiales compuestos es la calidad de la unión (Chun & Yoo, 2019).

2.2.2.1. *Geometría de las fibras*

Las fibras de acero utilizadas en los compuestos de concreto se pueden clasificar en fibras deformadas y no deformadas en función de su forma, como se muestra en la Figura 2-2. Las fibras de acero rectas son poco comunes en la práctica y casi todas las fibras disponibles en el mercado en la actualidad tienen una geometría mecánica predeformadas.

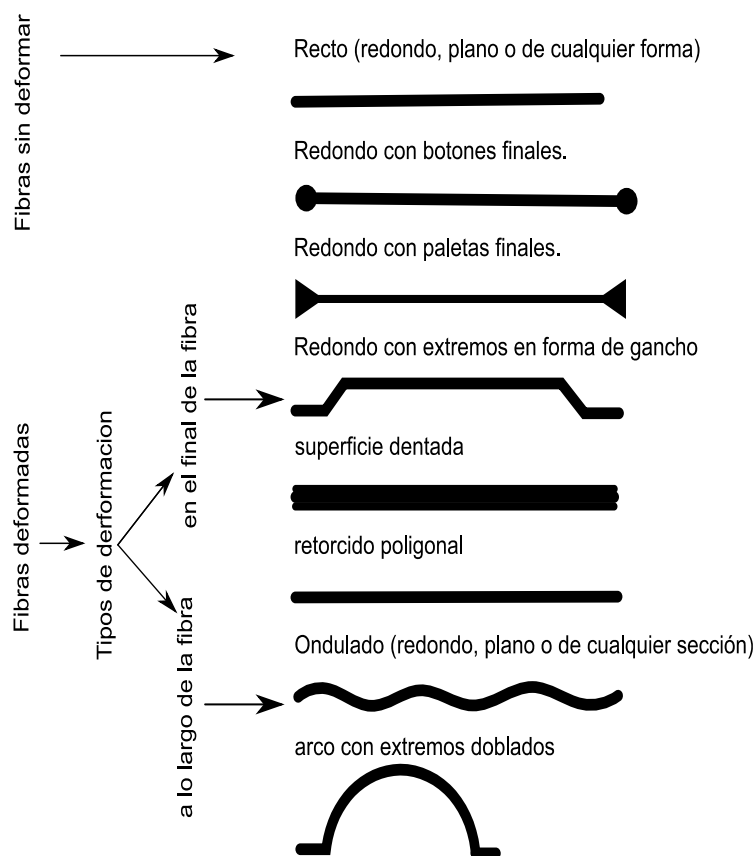


Figura 2-2 Diversas fibras de acero, clasificadas según su forma geométrica adaptado de Abdallah et al., (2018)

La razón principal para deformar mecánicamente las fibras es proporcionar anclaje mecánico o unión dentro de la matriz cementosa. La deformación puede producirse en los extremos de la fibra, por ejemplo: ganchos, paletas, botones; o a lo largo de la longitud de la fibra, por ejemplo: fibras identadas, onduladas y poligonales retorcidas (Bangi & Horiguchi, 2012).

Las fibras de acero parecen ser arrancadas de la matriz, en lugar de romperse al inicio del fallo. En consecuencia, el anclaje mecánico proporcionado por las fibras deformadas es fundamental para el comportamiento de los SFRC. En estudios experimentales recientes y en el crecimiento de modelos constitutivos se han utilizado fibras rectas con ganchos en los extremos. Las contribuciones al anclaje mecánico de los distintos tipos de fibras deformadas varían significativamente debido a las diferencias en su geometría (Nili & Afroughsabet, 2010).

2.2.2.2. *Fracción volumétrica de las fibras*

La fracción volumétrica de la fibra (V_f) es una de las principales variables que afectan al comportamiento de los SFRC. Se ha demostrado que el aumento de la fracción volumétrica de fibra mejora la durabilidad, la ductilidad y la tenacidad en varios ensayos de tensión crítica, incluidos los ensayos de flexión, tensión directa uniaxial y corte directo.

Es probable que más fibras intercepten las grietas a medida que aumenta el contenido de fibra, lo que aumenta la capacidad de la matriz para unir grietas y mejorar el rendimiento tras la fisuración. La tenacidad, definida como el área bajo el diagrama carga-deflexión, mejora drásticamente con el aumento del contenido de fibras (Marcos-Meson et al., 2020).

A pesar de las ventajas de aumentar el contenido de fibra, la fracción volumétrica máxima de fibra debe limitarse, debido a problemas de trabajabilidad y saturación de la fibra. Un alto contenido en fibras reduce la cantidad de fracción volumétrica de pasta disponible para el libre movimiento de los áridos gruesos y las fibras, reduciendo la trabajabilidad del SFRC fresco (Z. Wu et al., 2016).

2.2.2.3. *Relación de aspecto de la fibra*

La relación de aspecto de la fibra, definida como la relación entre la longitud y el diámetro de la fibra, influye significativamente en la eficacia del refuerzo de la fibra y en el comportamiento de la unión a la matriz.

Con la misma fracción de volumen de fibra, una mayor relación de aspecto se traduce en una mayor superficie de fibra, que desarrolla aún más la unión entre la matriz y las fibras, lo que resulta en una matriz más rígida y un comportamiento superior del material compuesto.

Las fibras con una mayor relación de aspecto, igual diámetro, pero diferente longitud, producían una mezcla de SFRC con una resistencia mayor, pero con una tenacidad significativamente mayor en los ensayos de flexión y tensión uniaxial. Las relaciones de aspecto de las fibras en el rango de 25 a 100 mejoran la respuesta a la tensión a partir de relaciones de aspecto más altas sólo es válida hasta una relación de aspecto de 75; a partir de

ahí, la respuesta a la tensión se disminuye con cualquier aumento de la relación de aspecto (Cao & Yu, 2018).

2.2.2.4. Orientación de las fibras

La orientación de las fibras es un factor complejo pero necesario de medir. Las fibras de acero son más eficaces cuando están alineadas paralelamente a los esfuerzos de tensión y menos eficaces cuando están alineadas perpendicularmente a la dirección del esfuerzo de tensión. La eficacia de la orientación aleatoria de las fibras está en un punto intermedio entre las dos condiciones límite (Soroushian & Lee, 1990).

Se ha demostrado que el poder de extracción de las fibras inclinadas es mayor que el de las fibras alineadas con una inclinación óptima de 0° a 20° como se muestra en la Figura 2-3 (Nieuwoudt & Boshoff, 2017).

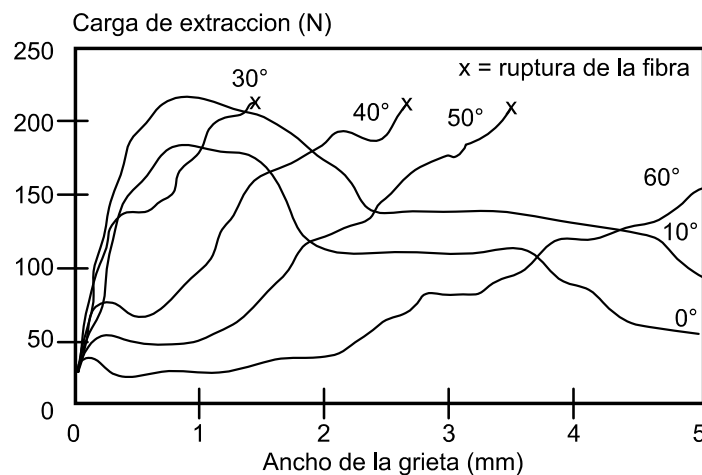


Figura 2-3 Comportamiento de tensión de fibras de acero en forma de gancho con diferentes ángulos de inclinación

2.3. Resistencia a la fatiga del SFRC

Cuando un elemento está sometido a sollicitaciones variables en el tiempo, se produce la falla a niveles de tensión inferiores a los obtenidos a través de cargas estáticas. Ese comportamiento es conocido como fatiga del material. La fatiga es una de las razones principales de fractura en muchas aplicaciones estructurales y mecánicas (Chiacchiarelli, 2017).

El AISC define la fatiga como el estado límite de inicio y crecimiento de fisuras y grietas resultantes de la aplicación repetida de cargas variables (Steel Construction Manual., 2017).

La fatiga se relaciona con la resistencia del SFRC bajo cargas cíclicas, como el tráfico en puentes o las olas rompiendo contra muros de contención, se modela a través del daño introducido en el material, derivado de la pérdida de rigidez del SFRC durante ciclos de carga (Vandecruys et al., 2021).

2.3.1. Análisis de la fatiga.

La fatiga en materiales se puede medir con varios modelos y teorías que intentan estimar la vida útil de un componente estructural bajo cargas repetidas. Se puede medir a través de modelos predictivos para estimar la vida útil de materiales bajo cargas repetitivas, intentando predecir la degradación de la resistencia del material. Con métricas de daño monitoreando la acumulación de daño a través de métricas como la resistencia residual y la rigidez, las cuales disminuyen con el tiempo y los ciclos de carga.

Hay modelos macroscópicos empíricos y modelos mecanicistas que analizan los fenómenos micromecánicos. La degradación de la rigidez es un buen indicador porque se va acumulando daño y se puede medir de forma no destructiva para controlar la fatiga.

2.3.2. Curvas S-N

Las curvas de Wöhler (curvas de fatiga o curvas S-N) son una forma gráfica muy utilizada en ingeniería para representar la relación entre el número de ciclos de carga y la resistencia a la fatiga de un material. Estas curvas son esenciales para entender cómo se comportan los materiales bajo cargas repetidas y se aplican en el diseño de piezas estructurales sometidas a carga cíclica.

La curva de Wöhler representa la resistencia a la fatiga (S) en función del número de ciclos (N) a los que se somete el material. Se grafica en papel logarítmico, siendo en el eje horizontal el número de ciclos (N) y en el eje vertical la resistencia a la fatiga (S) en escala lineal.

En una curva de Wöhler típica, la resistencia a la fatiga disminuye al aumentar el número de ciclos de carga (según la Figura 2-4). Esto quiere decir que un material puede soportar grandes cargas pocas veces, pero su resistencia se irá reduciendo con el tiempo al ser sometido a cargas repetitivas.

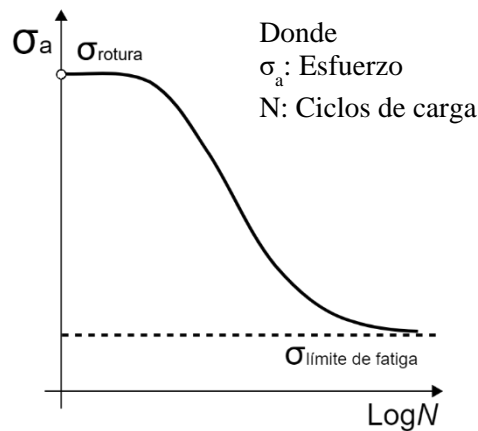


Figura 2-4 Curva de Wöhler

Las curvas de Wöhler son fundamentales para predecir la vida útil de los componentes sujetos a cargas cíclicas y para diseñar estructuras que minimicen el riesgo de falla por fatiga. Los ingenieros utilizan estas curvas para determinar las cargas máximas seguras que un material o componente puede soportar sin sufrir daños por fatiga durante su vida útil prevista.

El método más común de ensayo de fatiga son los ensayos de flexión. Debido a la gran cantidad de variables que influyen, los resultados de las pruebas de fatiga suelen tener un alto grado de variabilidad. Entre los diversos enfoques utilizados en la evaluación de la vida a fatiga de los elementos estructurales, uno ampliamente aceptado para la práctica de la ingeniería se basa en las curvas S-N derivadas empíricamente, que trazan para cada relación de tensión probada S con el número de ciclos hasta el fallo, N (*Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete*, 2017).

2.3.3. Histéresis

En la mecánica de materiales, la histéresis se refiere al fenómeno mediante el cual el comportamiento de un material al ser sometido a cargas externas, como tensiones o deformaciones, exhibe una dependencia de la historia de las cargas aplicadas. Esto significa

que el material puede experimentar cambios en su estructura interna o propiedades mecánicas que no son reversibles cuando las cargas se aplican y luego se eliminan.

La histéresis es la diferencia entre las curvas de carga y descarga, lo que significa que se pierde energía en el ciclo de carga. Es la diferencia entre las cargas aplicadas y las respuestas del material, por causas como elasticidad viscoelástica, plasticidad u otros fenómenos materiales. (Vandecruys et al., 2021).

2.3.3.1. *Curvas de histéresis*

Las curvas de histéresis son patrones de comportamiento que describen la relación entre dos variables, donde el valor de una variable depende del valor previo de la otra. Esta relación es no lineal y exhibe un efecto de retardo o desfase.

En el contexto de la mecánica de materiales, las curvas de histéresis describen la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante en un material, especialmente en materiales viscoelásticos o en materiales que sufren deformación plástica.

La Figura 2-5 muestra un ciclo de histéresis, una curva característica en materiales en sistemas sometidos a cargas cíclicas. En el contexto de ingeniería estructural y materiales, este comportamiento se asocia a la respuesta de un material ante cargas y descargas repetidas, reflejando la disipación de energía y la evolución del daño.

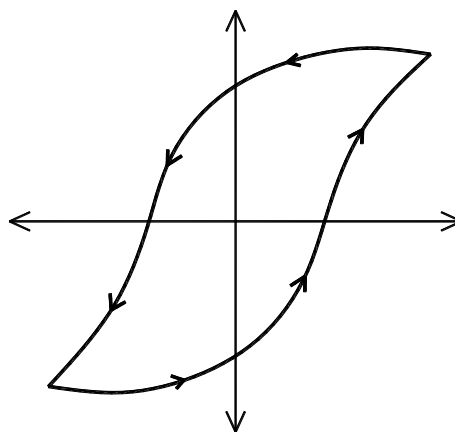


Figura 2-5 Curva de histéresis

Cuando se aplica una fuerza sobre un material éste se deforma. Pero cuando se quita el esfuerzo, el material no siempre regresa a su forma original. Esta diferencia en la deformación bajo carga y descarga se puede explicar por varios fenómenos, como la plasticidad, la viscoelasticidad o la microestructura del material.

La curva puede presentar una forma característica con una zona elástica lineal, una zona plástica de deformación permanente y una zona de fluencia en que la deformación crece rápidamente para un esfuerzo constante.

Evaluar las curvas de histéresis es útil en la ingeniería de materiales y estructuras para determinar la capacidad de un material para soportar cargas repetitivas, su resistencia a la fatiga y su comportamiento bajo cargas dinámicas.

2.4. Método de elementos finitos (FEM) en análisis estructurales

El Método de Elementos Finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica ampliamente utilizada en ingeniería estructural, mecánica de sólidos, mecánica de fluidos y más disciplinas científicas computacionales. Este método es capaz de resolver problemas difíciles, subdividiendo una estructura o dominio continuo en pequeñas subregiones llamadas elementos finitos, las cuales están interconectadas en puntos llamados nodos. El método FEM permite resolver problemas físicos que no tienen solución analítica..

El desarrollo del FEM ha estado de la mano con el avance de los sistemas computacionales, lo que ha hecho posible resolver problemas estructurales de gran magnitud. Su aplicación en el diseño y análisis estructural es capaz de determinar desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en materiales y elementos estructurales bajo diferentes condiciones de carga. El FEM se aplica para resolver problemas de ingeniería que involucran ecuaciones diferenciales complejas. La base de este método consiste en dividir los sistemas en "elementos" individuales cuyo comportamiento sea más fácil de analizar. Luego, se recompone el sistema original para analizarlo a partir de sus partes (Hou et al., 2025b).

2.4.1. Fundamentos del Método de Elementos Finitos

El método FEM consiste en segmentar un dominio continuo en un número finito de elementos, cada uno con sus características propias y propiedades, las cuales contribuyen al comportamiento global del sistema. En este método, todo se discretiza en elementos, cada uno con un comportamiento regido por funciones matemáticas que aproximan la deformación y tensión en el interior del material. La superposición de estos elementos permite representar con exactitud la respuesta estructural del sistema estudiado.

El método FEM se basa en la formulación variacional y en la mecánica de sólidos para convertir ecuaciones diferenciales parciales en sistemas de ecuaciones algebraicas que se pueden resolver numéricamente. Esto es particularmente útil en problemas donde la geometría, las condiciones de carga o las propiedades del material hacen imposible una solución analítica.(Le, 2025).

2.4.2. Etapas del Método de Elementos Finitos

El proceso de aplicación del FEM consta de varias etapas clave que permiten la correcta representación del problema físico y su posterior resolución:

- Discretización del dominio: El primer paso consiste en discretizar el dominio continuo en una malla de elementos finitos. La elección del tipo de elementos y su disposición influyen en la exactitud y estabilidad del análisis.
- Especificación de las propiedades de los materiales: Cada cual con sus propias características según el material al que representan. La elección adecuada de estas variables permite una simulación realista del comportamiento estructural.
- Imposición de las condiciones de contorno: Se definen restricciones y cargas que representan el entorno real en el que se encuentra el sistema. Estas condiciones pueden ser soportes, fuerzas externas, condiciones térmicas o contactos con otros cuerpos.

- Resolución del sistema de ecuaciones: Se emplean métodos numéricos para obtener los desplazamientos en los nodos del sistema. Una vez conocidos estos valores, se pueden calcular los esfuerzos y deformaciones en cada elemento de la estructura.
- Análisis de resultados: Los resultados obtenidos se comparan con datos experimentales o soluciones analíticas para verificar su validez. Esta etapa es crucial para garantizar que el modelo represente fielmente el comportamiento real del sistema.

El flujo de trabajo para el análisis de elementos finitos se muestra en la Figura 2-6.

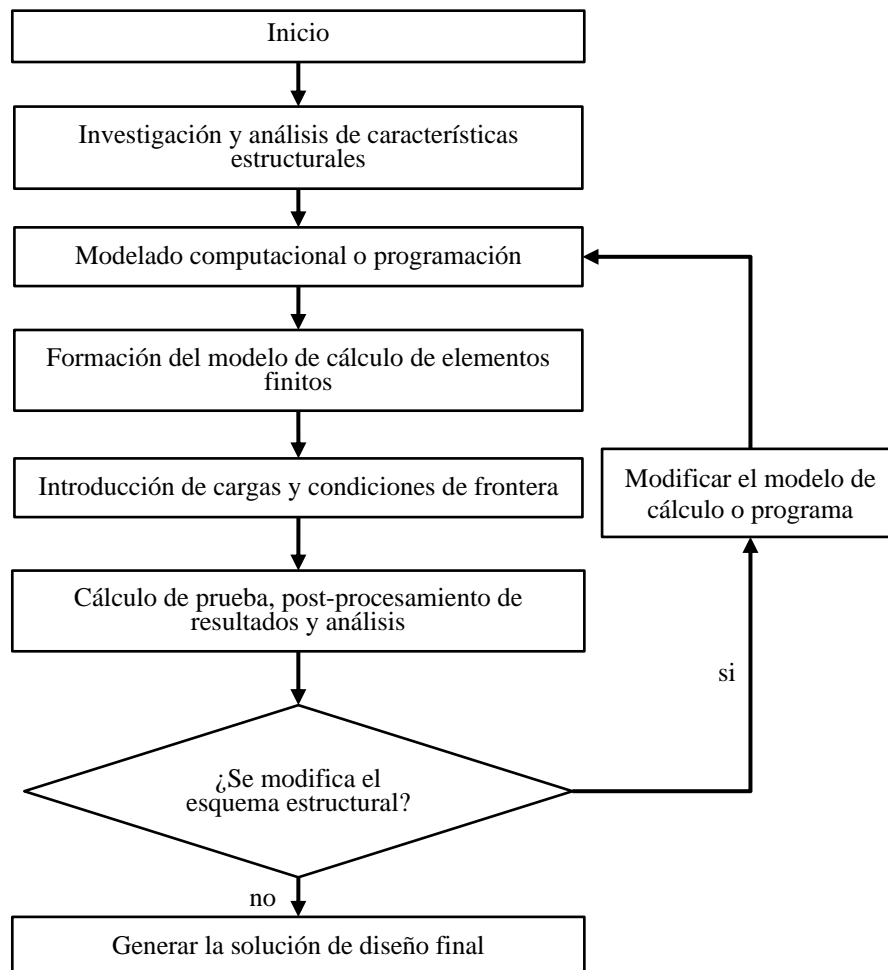


Figura 2-6 Diagrama de flujo de trabajo del FEM, adaptado de Z. Zhang (2024)

2.5. Análisis de los SFRC con modelos de elementos finitos

Las fibras refuerzan el concreto, mejorando su resistencia a la tensión y flexión después de que se ha producido una fisura, al mismo tiempo que ayudan a limitar el ancho de las grietas (ACI Committee 544, 2018).

Diferentes formas de analizar el comportamiento del SFRC se han desarrollado a lo largo de los últimos 40 años (Singh, 2017a). Algunos de estos métodos se basan en modificar las fuerzas internas de los elementos que se desean analizar con el fin de tomar en cuenta la resistencia a la tensión que proporcionan las fibras metálicas (ACI Committee 544, 2018).

El SFRC ha llamado la atención por su capacidad para resistir cargas dinámicas. Las fibras de acero de alta resistencia incrustadas en la matriz de concreto suelen actuar como puentes, mejorando la fuerza de unión entre la fibra y la matriz, lo que contribuye directamente a mejorar el comportamiento posterior al agrietamiento y la resistencia residual del SFRC.

2.5.1. Modelos constitutivos para el análisis de los SFRC

Un modelo constitutivo es un conjunto de expresiones que describen cómo responde un material cuando se somete a tensiones, ya sea externas o internas. Estas expresiones son esenciales para predecir el comportamiento de elementos estructurales bajo diferentes condiciones de carga. Varios modelos constitutivos han sido, se utilizan para desarrollar métodos de diseño para vigas de SFRC, pero su utilidad se limita cuando se desconocen parámetros de esfuerzos como requisito previo al análisis.

2.5.1.1. Modelos de compresión

El concreto, al ser un material heterogéneo, no puede resistir fuerzas de tensión, a pesar de su considerable resistencia a la compresión. Se reporta una mejora significativa en el comportamiento compresivo post-pico en la literatura publicada cuando se mezclan fibras cortas de manera aleatoria en la masa de concreto, aunque la resistencia compresiva máxima del concreto aumenta marginalmente con la inclusión de las fibras en la mezcla.

La contribución de las fibras es más evidente en la región post-pico en el caso del SFRC, donde la respuesta se describe por una curva de esfuerzo-deformación con una pendiente decaída relativamente menos pronunciada. Una vez que la matriz se agrieta bajo tensión inducida, el desprendimiento y la extracción de las fibras del concreto disipan energía, lo que conduce a un aumento sustancial en las características post-agrietamiento.

La Figura 2-7 muestra una respuesta típica de tensión-deformación exhibida por muestras de SFRC en compresión cuando está reforzada por fibras de acero con diferente relación de aspecto.

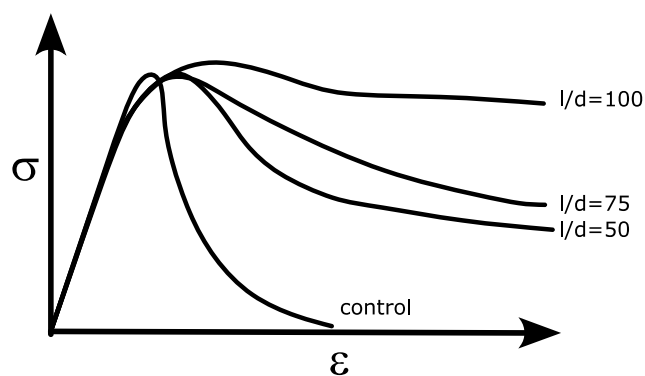


Figura 2-7 Respuesta esfuerzo de formación en SFRC bajo compresión

Al igual que el concreto normal, el SFRC exhibe un comportamiento elástico lineal hasta un nivel de tensión del 30% de la resistencia última del concreto en compresión. En esta etapa, la microestructura interna del concreto permanece más o menos estable.

Cuando el nivel de tensión en el espécimen se aumenta gradualmente al 50% de la resistencia última del concreto en compresión, la respuesta esfuerzo-deformación comienza a desviarse de la linealidad debido a la extensión interna de las micro fisuras presentes en la zona de transición interfacial del concreto hacia las regiones adyacentes.

2.5.1.2. Modelos de tensión

El concreto por lo general no está diseñado para resistir tensión directa debido a su baja capacidad de deformación en tensión. Sin embargo, los esfuerzos de tensión pueden desarrollarse en elementos de concreto debido a la flexión y/o tensiones principales que surgen por cargas externas.

El concreto se agrieta una vez que la deformación supera su límite de deformación en tensión. A diferencia del concreto simple, el SFRC muestra una resistencia a la tensión residual significativa debido a las fibras incrustadas, lo que permite deformaciones considerables y fisuración antes del fallo.

La forma en que las fibras están embebidas y orientadas en la matriz de concreto afecta su capacidad para transferir fuerzas a través de las grietas. Este comportamiento único del SFRC permite generar relaciones entre esfuerzo y apertura de grieta, lo que facilita su diseño y análisis.

2.5.1.3. *Relación multilinear*

La relación multilinear es un modelo simplificado de la respuesta tensión-deformación del SFRC. En este modelo, la respuesta del SFRC se divide en tres etapas distintas: una parte descendente después de la formación de la primera grieta, seguida de una disminución lenta y finalmente una disminución rápida de la resistencia.

En la relación multilinear, se utilizan líneas rectas ideales que se unen en puntos clave A, B, C, D, como se muestran en la Figura 2-8 para representar la respuesta real tensión-deformación del SFRC. Esta representación simplificada permite obtener una relación tensión-apertura de grieta realista y útil para el análisis y diseño de miembros de SFRC.

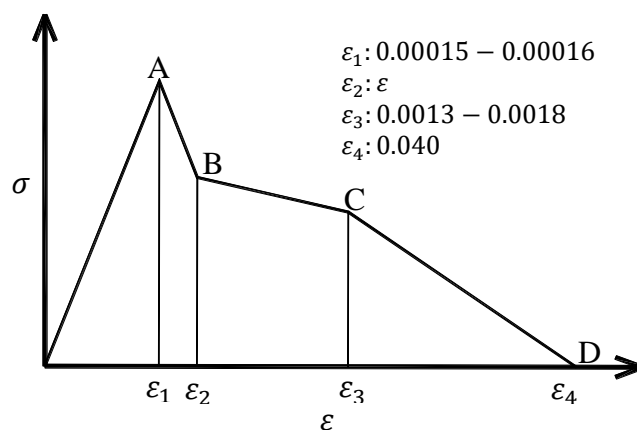


Figura 2-8 Modelo multilinear, adaptado de Singh (2017)

2.5.1.4. Relación de bilineal

La relación bilineal es otro modelo simplificado de la respuesta tensión-deformación del SFRC. En este modelo, se ignora la parte de la respuesta que resulta en una pérdida rápida de resistencia después de la formación de grietas anchas en la muestra, lo que lo hace más simple que el modelo multilinear como se muestra en la Figura 2-9.

En la relación bilineal, se requieren cuatro parámetros materiales para describir la respuesta tensión-deformación y la relación correspondiente entre la tensión y la apertura de grieta del material. Estos parámetros incluyen el estrés movilizado y el valor de deformación correspondiente al punto B, determinados mediante pruebas experimentales, y los valores correspondientes al punto C, generalmente dictados por el criterio de estado límite adoptado en el diseño con respecto a la apertura de grieta en el estado último.

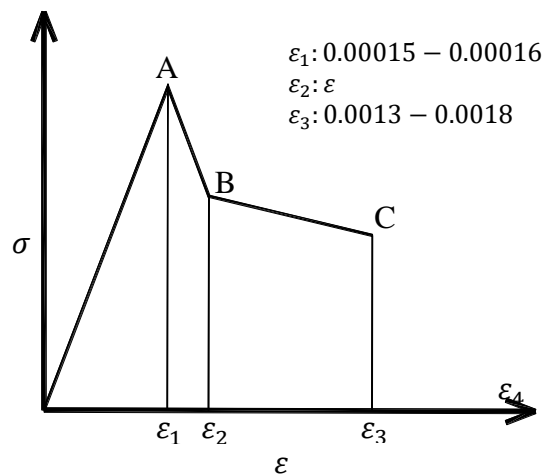


Figura 2-9 Modelo bilineal de SFRC, adaptado de Singh (2017)

2.5.1.5. Relación de caída constante

La relación de caída constante es una representación aún más simple de la relación tensión-deformación para el SFRC. En este modelo, se asume que la resistencia residual del SFRC en los puntos B y C es virtualmente la misma, lo que simplifica aún más el análisis.

En la relación de caída constante, solo se necesita el valor de la resistencia a tensión residual del SFRC correspondiente a los puntos B o C mostrados en el modelo, junto con los valores correspondientes de deformación. El valor de deformación en el punto C en el modelo puede tomarse del valor permitido de la apertura de grieta considerado en el diseño, mientras

que el valor de deformación correspondiente a los puntos A o B mostrados en el modelo es la deformación límite del concreto que causa la formación de la primera grieta en la muestra cuando se somete a una fuerza de tensión.

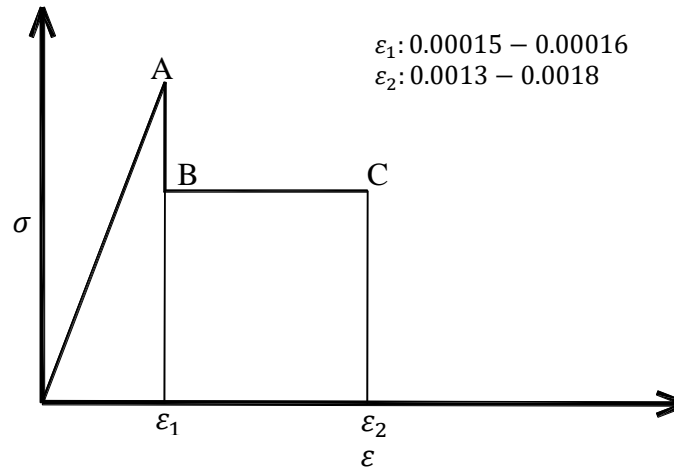


Figura 2-10 Modelo de caída constante SFRC, adaptado de Singh (2017)

2.6. Modelos analíticos para analizar materiales compuestos.

2.6.1. Modelo Lamellar

El modelo Lamellar, también conocido como modelo de dispersión de barreras, es una forma de entender y modelar la resistencia mecánica de materiales compuestos reforzados con partículas laminares dispersas en una matriz.

Este enfoque es particularmente útil para entender materiales como polímeros reforzados con nanopartículas de arcilla, donde las partículas lamellares proporcionan una mejora significativa en propiedades mecánicas y barreras de difusión.

El modelo considera que esas partículas están dispersas y funcionan como obstáculos que dificultan la propagación de grietas y la propagación de defectos en el material compuesto. Esta mayor resistencia mejora las propiedades mecánicas, como la resistencia a la tracción, la tenacidad y la resistencia al impacto.

Para describir este modelo, se pueden utilizar ecuaciones que relacionen la fracción volumétrica de partículas lamellares dispersas (ϕ) con la mejora en propiedades mecánicas.

La ecuación para modelar el módulo elástico efectivo es la siguiente:

$$\frac{E_{ef}}{E_m} = \frac{1 + \frac{3}{2} \phi \frac{E_f - E_m}{E_f + 2E_m}}{1 - \phi \frac{E_f - E_m}{E_f + 2E_m}} \sigma_1 \quad (2-1)$$

Donde:

- E_{ef} módulo elástico efectivo del material compuesto.
- E_m módulo elástico de la matriz.
- E_f módulo elástico de las partículas reforzantes.
- ϕ fracción volumétrica de las partículas lamelares dispersas.

La Ecuación (2-1) muestra cómo el módulo elástico efectivo del material compuesto varía con la fracción volumétrica de partículas Lamellares y las propiedades elásticas de la matriz y las partículas reforzantes.

Además del módulo elástico, también se pueden derivar ecuaciones similares para predecir otras propiedades mecánicas, como la resistencia a la tensión, la resistencia al impacto y la tenacidad, en función de la fracción volumétrica de partículas dispersas.

El modelo Lamellar proporciona un marco teórico útil para comprender y predecir las propiedades mecánicas de materiales compuestos reforzados con partículas laminares, lo que permite diseñar materiales con propiedades específicas para diversas aplicaciones en ingeniería.

2.6.2. Modelo de Christensen para materiales compuestos

Este criterio se fundamenta en la simetría transversal de los materiales compuestos reforzados con fibras, y su determinación implica una serie de análisis micromecánicos, entre ellos el supuesto de que estos materiales exhiben isotropía transversal (Christensen, 1998).

Para esta clase de simetría existen 7 invariantes de tensión, en términos de polinomios cuadráticos:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \sigma_1 \\
I_2 &= \sigma_2 + \sigma_3 \\
I_3 &= \sigma_1^2 \\
I_4 &= [\sigma_2 + \sigma_3]^2 \\
I_5 &= \sigma_1[\sigma_2 + \sigma_3] \\
I_6 &= \sigma_6^2 + \sigma_5^2 \\
I_7 &= \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2
\end{aligned} \tag{2-2}$$

La presencia de tensiones en las direcciones longitudinal y transversal apunta a una distinción entre dos fases, dado que las disparidades entre ellas pueden alcanzar un orden de magnitud o superior. Esta diferenciación de modos solo se logra mediante el empleo de análisis micromecánicos. (Christensen, 2019).

Bajo las premisas de los análisis micromecánicos, se contemplan dos mecanismos de rotura:

Fallo de matriz (FM): Esto esta representado por la siguiente ecuación:

$$f(I_2, I_4, I_6, I_7) \leq 1 \tag{2-3}$$

que se pueden expresar como de la siguiente forma con coeficientes $\lambda_1, \beta_1, \gamma_1$, y Δ a determinar:

$$\lambda_1 I_2 + \beta_1 I_4 + \gamma_1 I_6 + \Delta I_7 \leq 1 \tag{2-4}$$

Fallo de fibras (FF): depende de las invariantes:

$$f(I_1, I_3, I_5) \leq 1 \tag{2-5}$$

Que se puede representar de la siguiente forma con los coeficientes $\lambda_2, \beta_2, \gamma_2$:

$$\lambda_2 I_1 + \beta_2 I_3 + \gamma_2 I_5 \leq 1 \tag{2-6}$$

Estos se obtienen siguiendo dos condiciones: (I) se permite el fallo bajo tensión hidrostática, pero no bajo compresión, (II) el criterio es una forma generalizada de Von-Mises.

Para aplicar el criterio de Christensen hay que tener en cuenta que:

- Ambos modos deben ser considerados para cualquier evaluación.

- Para algunos subespacios de esfuerzos sólo se podrá evaluar un modo, mientras que para otros se evalúan ambos.

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1. Hipótesis

El comportamiento histerético de elementos de concreto con refuerzo de fibras metálicas permite evaluar su resistencia a la fatiga, parámetro útil para determinar su eficiencia bajo determinado tipo de fibra y volumen aplicado. Por tanto, el análisis por fatiga determina de manera más eficiente las propiedades constitutivas de un elemento estructural comparado con soluciones alternas tipo Lamellares o Christiansen.

3.2. Objetivo general

Analizar el comportamiento no lineal del concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC) como un material compuesto mediante experimentación numérica-computacional usando software de métodos de elementos finitos.

3.3. Objetivos específicos

Desarrollar un modelo computacional en APDL (ANSYS Parametric Design Language, por sus siglas en inglés) para simular el comportamiento del SFRC, incorporando una distribución aleatoria y orientación específica de las fibras metálicas en la matriz de concreto.

Simular el comportamiento mecánico del SFRC sometido a diferentes condiciones de carga cíclica, utilizando el modelo computacional desarrollado para analizar esfuerzos, deformaciones y propiedades de resistencia.

Validar el modelo computacional mediante la comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones con datos experimentales o reportes previos disponibles en la literatura científica.

4. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este estudio se estructuró en tres fases, desarrolladas con base en los objetivos específicos mencionados en el capítulo anterior. En este apartado, se detalla cada una de estas fases, describiendo los procedimientos, herramientas y enfoques aplicados para lograr los objetivos propuestos. En la Figura 4-1 se presenta las etapas y actividades mediante la cuales se desarrolló el presente trabajo.

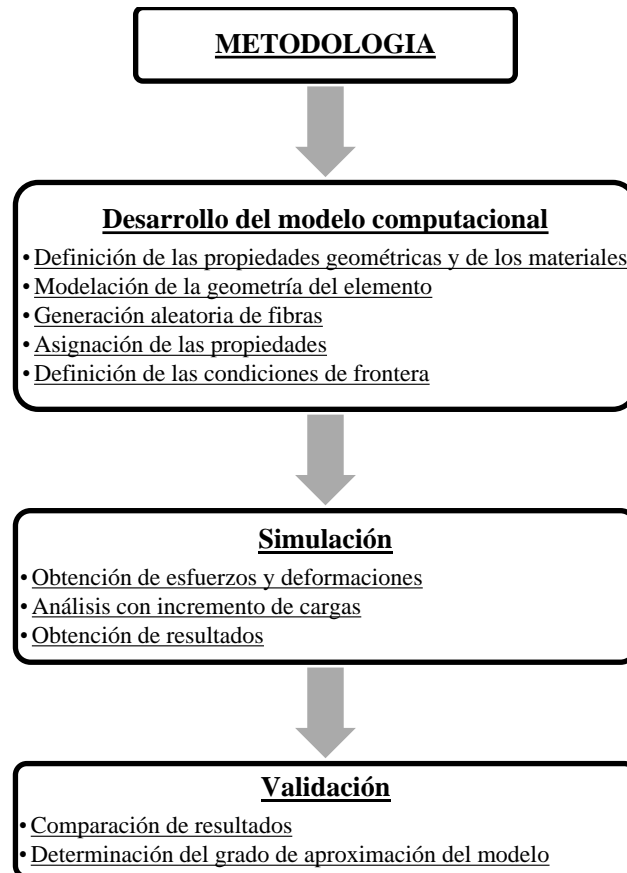


Figura 4-1 Diagrama de la metodología

4.1. Desarrollo del modelo computacional

Este paso se enfocó en desarrollar un modelo computacional en el entorno de ANSYS mediante el uso del lenguaje APDL (ANSYS Parametric Design Language), lo que permitió llevar a cabo el análisis. La estructura del programa se presenta en el diagrama de flujo de la

En el diagrama de flujo presentado en la Figura 4-2 muestra el procedimiento a que se siguió para generar el código.

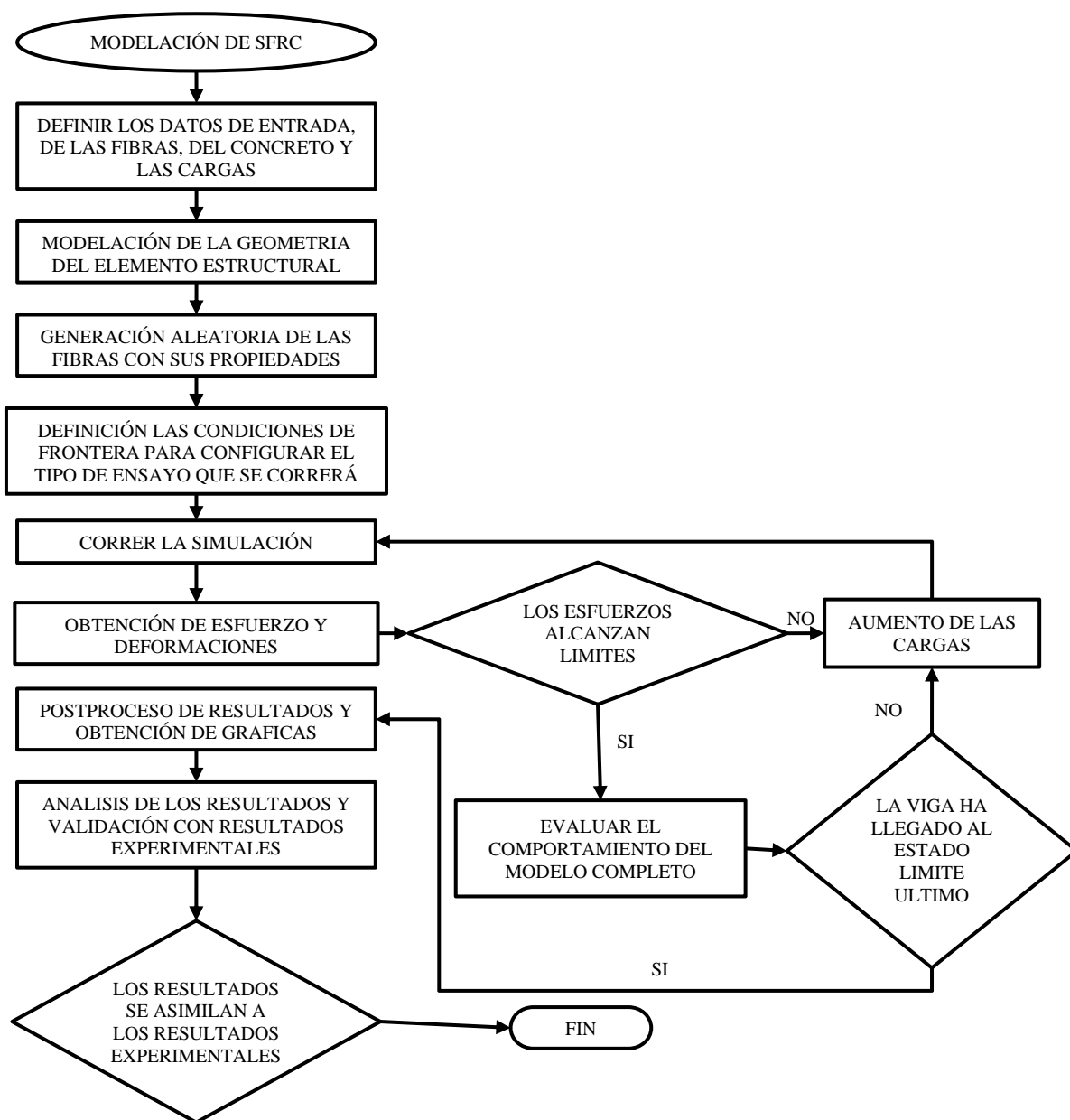


Figura 4-2 Diagrama de flujo

4.1.1. Definición de las propiedades geométricas y de los materiales

En primer lugar, se realizó la definición de las propiedades de los materiales y geométricas, donde se establecieron las dimensiones del elemento estructural a modelar. Además, se especificaron las propiedades mecánicas de los materiales que componían el

modelo, incluyendo parámetros como la resistencia a la compresión y tensión del concreto, así como las características de las fibras metálicas, entre ellas el tipo, la relación de aspecto, la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad.

4.1.1.1. Elección del tipo de fibras

La elección de fibras metálicas con ganchos en los extremos para este estudio se basa en sus altas propiedades mecánicas en concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC). Estas fibras, consideradas como macrofibras según ASTM C 1116, son adecuadas para reforzar el comportamiento del concreto endurecido, disminuyendo el ancho de fisuras y mejorando la tenacidad post-fisuración.

Su forma con ganchos optimiza la adherencia con la matriz cementante, mejorando la transferencia de esfuerzos y la resistencia a la tensión. Además, su gran rigidez y resistencia inherente mejoran el comportamiento estructural bajo cargas repetitivas. Esta fibra se eligió por su capacidad para disipar energía y detener la propagación de grietas.

Las fibras con ganchos en los extremos afectan poco la trabajabilidad del concreto en comparación con las fibras rectas o cortas, lo que permite incorporarlas en mezclas sin sacrificar la fluidez. Su forma proporciona una mejor dispersión en la matriz, evitando la segregación en el mezclado.

Estudios anteriores han demostrado que estas fibras aumentan la ductilidad y la capacidad de absorción de energía, características importantes para estructuras sometidas a fatiga. La elección de macrofibras con ganchos se debe a su capacidad en refuerzos estructurales. Es por esto que se priorizaron estudios que evalúen su comportamiento en pruebas de flexión y fatiga.

La elección de fibras con ganchos también se debió a su idoneidad para el modelado por elementos finitos (FEM), ya que su forma permite simular la interacción fibra-matriz en modelos computacionales. Estas fibras, por ser macrofibras, trabajan principalmente en estado endurecido, reforzando el comportamiento estructural después de 24 horas de fraguado. La longitud y la relación de aspecto (20 a 100) pueden salvar fisuras, propiedad importante para la resistencia a la fatiga. Además, su dosificación, generalmente entre 20 y

50 kg/m³, garantiza la optimización entre mejora mecánica y viabilidad constructiva. Este método proporciona predicciones precisas del comportamiento del SFRC.

Las investigaciones en fibras con ganchos se eligieron por su aplicabilidad en la práctica, tales como pavimentos, puentes, pistas de aeropuertos, donde predominan las cargas repetitivas.

Estas investigaciones destacan la superioridad de las macrofibras metálicas con ganchos en términos de durabilidad y resistencia a largo plazo. La elección de este tipo de fibra permite al modelo desarrollado en esta tesis abordar los desafíos asociados con el SFRC. Propiedades de Fibras las fibras de acero.

4.1.1.2. *Propiedades de Fibras las fibras de acero*

El tipo de fibras metálicas que se consideraron tienen las propiedades mostradas en la Tabla 4-1, las cuales están basadas en las reportadas en el trabajo de Xie et al. (2021).

Tabla 4-1 Propiedades de las fibras

Propiedad	Valor
% Volumétrico (V_f)	0.05 %
Diámetro	0.55 mm
Largo	35.0 mm
Módulo de elasticidad	2,100,00 kg/cm ²
Módulo de poisson	0.30
Morfología	Redonda

El código configuró las propiedades de las fibras metálicas utilizadas en el modelo estructural mediante el comando *CSET, asignando valores a cada parámetro. Se estableció la variable PF, que representó el porcentaje de volumen de fibras en la matriz de concreto, con un valor de 0.5%, asegurando una distribución adecuada de las fibras en el material compuesto.

Además, se definió el diámetro de las fibras con la variable DN, asignándole un valor de 0.055 cm, mientras que la longitud de las fibras se especificó con la variable LN, estableciendo un tamaño de 3.5 cm.

El módulo de elasticidad de las fibras, se configuró mediante la variable MODUF, con un valor asignado de 2,100,000 kg/cm². Asimismo, la relación de Poisson de las fibras se determinó con la variable MPOIF, otorgándole un valor de 0.30, lo cual permitió modelar la deformación transversal respecto a la longitudinal de las fibras bajo carga.

Además, se estableció el número de ciclos de carga y descarga para las simulaciones, utilizando la variable NCICL, con un valor de 10, garantizando que el modelo pudiera representar el comportamiento a fatiga del material.

Finalmente, se incluyó la etiqueta descriptiva DATOS DE LAS FIBRAS, que ayudó a organizar la sección del código relacionada con las propiedades de las fibras, facilitando su interpretación y modificación en futuras simulaciones. El bloque de código se cerró con el comando MULTIPRO, 'END', asegurando que todas las configuraciones se almacenaran correctamente para el análisis computacional en ANSYS.

4.1.1.3. *Viga de concreto*

Las dimensiones que se propusieron para modelar la viga de concreto son de una sección con base de 10 cm y 15 de peralte, 150 cm de largo, dejando un claro libre entre apoyos de 135 cm. Las cargas se aplicaron en dos puntos de la viga los cuales se encuentran a 50 cm entre ellos. Esta configuración se muestra en la Figura 4-3, basadas en el trabajo de Infant Alex & Arunachalam (2019). Estos parámetros se resumen en la Tabla 4-2

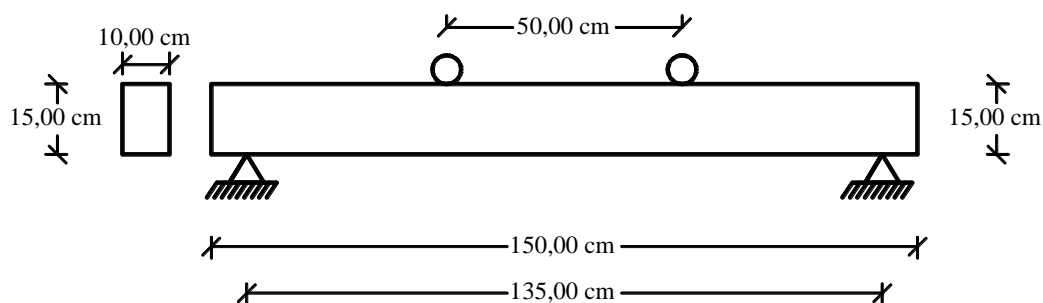


Figura 4-3 Dimensiones de la viga

Para dar de alta los valores de estos parámetros se implementó un primer bloque de programación en el cual despliega una ventana para poder introducir los valores. Esta ventana gráfica en un entorno de simulación como ANSYS desempeñó un papel fundamental al

proporcionar una interfaz visual e intuitiva. Su principal objetivo fue facilitar la interacción con el modelo computacional, permitiendo manipular la geometría, las condiciones de carga y los resultados del análisis estructural de manera sencilla.

Tabla 4-2 Propiedades de la viga del concreto

Propiedad	Valor
Datos del concreto	
Base	10 cm
Altura	15 cm
Largo	150 cm
Resistencia	250 kg/cm ²
Módulo de poisson	0.1
Peso volumétrico	2.4 ton/m ³

El código en APDL estableció las variables clave mediante el uso del comando *CSET, asignando valores específicos, a cada parámetro y asociándolos con etiquetas descriptivas. Se definió la variable B, que representaba la base de la viga de concreto, con un valor de 10 cm, así como la variable H, que indicó la altura de la viga, con un valor de 15 cm. La longitud de la viga se estableció mediante la variable LAR, a la cual se le asignó un valor de 150 cm. Además, se especificó la resistencia del concreto a la compresión mediante la variable FC, con un valor de 250 kg/cm².

El módulo de Poisson del concreto, un valor adimensional que define la relación entre deformaciones longitudinales y transversales, se definió con la variable NUC, a la que se le dio un valor de 0.1. Además, el peso volumétrico del concreto se simbolizó con la variable PVOL, asignándole un valor de 2.4 t/m³.

Todas estas variables ayudaron a parametrizar el modelo numérico y así poder modificar fácilmente la geometría y el material en el análisis estructural de la viga en Mechanical APDL.

4.1.2. Modelado de la geometría del elemento

Se codificó la modelización geométrica de la viga, creando una representación informática que definiera su geometría en términos de posición espacial y características necesarias para las condiciones de carga y apoyos.

El código en APDL modeló la geometría de una viga en una serie de 8 pasos. Primero, se generó un bloque de código llamado GEOMETRÍA, donde se agruparon todas las instrucciones para generar la geometría de la viga.

Luego, se creó la viga de concreto usando el comando BLC4 para generar un bloque 3D con dimensiones deseadas. Las coordenadas (0,0) determinaron la esquina inferior izquierda del bloque, y los parámetros B, H y LAR definieron el ancho, alto y longitud de la viga, respectivamente. Una vez generada la geometría, se estableció el plano de trabajo..

4.1.3. Creación aleatoria de fibras

Para modelar el comportamiento del concreto reforzado con fibras de acero (SFRC), se generó un procedimiento computacional que dispersa aleatoriamente las fibras de acero en el volumen de la viga de concreto. Este procedimiento garantiza una dispersión homogénea (similar a la realidad) de las fibras en la mezcla de concreto, a través de una función generadora de números aleatorios que posee el software de análisis estructural.

El proceso se inicia con una serie de instrucciones para modelar las fibras. Se asignaron propiedades a las fibras, tales como el tipo de elemento (elemento lineal que representa una fibra de acero), su área transversal y las propiedades del material (resistencia, rigidez) para modelar su comportamiento mecánico.

Se generó un archivo de texto para guardar los datos de la simulación, como la longitud de las fibras. Se usó un contador para sumar la longitud total de las fibras producidas y asegurar que se lograra el porcentaje de fibras establecido. A través de un ciclo repetitivo se crearon hebras una por una, dándole coordenadas aleatorias al punto de inicio de cada hebra y calculando su punto final según su longitud predefinida. Cada hebra se modeló como un elemento que une estos dos nodos en el volumen de la viga.

Para garantizar la calidad del modelo, se revisó cada fibra creada. Si una fibra tenía una longitud no válida (por ejemplo, cero, por fallos en la generación), se descartaba. Las fibras elegibles se contaban, y su longitud se añadía al totalizador. Una vez generada, se

volvió a establecer el sistema de coordenadas global (una referencia para que todas las posiciones se midan desde un mismo origen) para mantener la coherencia del modelo.

Para prevenir errores (nodos o elementos duplicados que alteren los resultados), se unificaron puntos coincidentes y se eliminaron redundancias. Luego, se seleccionaron todas las fibras generadas para calcular su volumen total y el porcentaje que ocupan en la viga de concreto respecto al volumen total de este. Este valor es fundamental para determinar la contribución de las fibras al refuerzo del concreto.

4.1.3.1. *Cálculo del número de fibra*

La generación de fibras de acero dentro del volumen de una viga se realizó mediante un procedimiento que distribuye las fibras de manera aleatoria y uniforme. Este proceso modela cada fibra como un elemento lineal definido por dos nodos en un espacio tridimensional, con una longitud fija y una orientación aleatoria. A continuación, se describe el enfoque, destacando la selección aleatoria del nodo inicial y la determinación de la dirección de las fibras, así como las operaciones para verificar la validez de las fibras y calcular su contribución volumétrica.

El volumen de la viga se definió como $V_{viga} = B \cdot H \cdot L$, donde B, H, L, son la base, altura y longitud respectivamente. Cada fibra tiene una sección con diámetro d y longitud l , con un volumen por fibras $v_{fibra} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot l$. El número objetivo del total de fibras, N_{obj} se calcula según el porcentaje volumétrico deseado ϕ .

$$N_{obj} = \left\lceil \frac{\phi V_{viga}}{v_{fibra}} \right\rceil \quad (4-1)$$

4.1.3.2. *Selección aleatoria de los nodos*

El modelo de elemento finito de la viga contiene un conjunto de N_{nodos} nodos, cada uno con coordenadas $x_i = (x_i, y_i, z_i)$, donde $i = 1, 2, \dots, N_{nodos}$. Para cada fibra, se selecciona un nodo inicial de manera aleatoria entre estos nodos. Este proceso uso una distribución uniforme discreta sobre el intervalo $\{1, 2, \dots, N_{nodos}\}$.

4.1.3.3. Determinación aleatoria de la dirección de las fibras

La orientación de cada fibra se definió en un sistema coordenado local centrado en x_i . La dirección de la fibra se estableció mediante una rotación aleatoria en el espacio tridimensional, parametrizado para tres ángulos α, β, γ , que representan rotaciones alrededor de los ejes x, y y z respectivamente. Cada ángulo se tomó de forma independiente, usando una distribución uniforme en $[0, 360^\circ]$:

$$\alpha, \beta, \gamma \sim U(0, 360) \quad (4-2)$$

Estos ángulos se redondean a enteros para simplificar los cálculos numéricos

En el sistema de coordenadas local, el nodo final de la fibra se define inicialmente en la dirección del eje x con una distancia igual a la longitud de la fibra l , es decir, $x'_2 = (l, 0, 0)$. Este vector se transforma al sistema global aplicando la rotación y trasladándolo al nodo inicial:

$$x_2 = x_1 + R \cdot x'_2 \quad (4-3)$$

No se verifica explícitamente si x_2 está dentro de los límites de la viga $([0, B] \times [0, H] \times [0, L])$, pero la selección de nodos iniciales dentro del volumen y la longitud relativamente corta de las fibras ($l = 3.5 \text{ cm}$ frente a $L = 70 \text{ cm}$) minimizan la probabilidad de que x_2 caiga fuera.

4.1.3.4. Generación y verificación de las fibras

Cada fibra se representó como un elemento lineal que conecta x_1 y x_2 . La longitud del elemento, $l_e = \|x_2 - x_1\|$, se calcula de la siguiente forma:

$$l_e = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (4-4)$$

Si $l_e \approx 0$, este elemento se descartará. Si $l_e \approx l$, la fibra se considera válida, y se incrementa en el contador N_{gen} que registra el número de fibras generadas. El proceso se repite hasta que $N_{gen} \geq N_{obj}$.

Para evitar errores en el modelo, se fusionan nodos cercanos, aquellos con coordenadas idénticas o casi idénticas y se eliminan elementos redundantes, evitando errores

en el análisis de elementos finitos. El número final de fibras generadas, N_{total} , se obtiene contando los elementos lineales asociados al material de las fibras. El volumen total de las fibras es:

$$V_{fibras} = N_{total} \cdot v_{fibra} \quad (4-5)$$

Con este valor se corrobora el porcentaje real de fibras que contiene el modelo. Los datos de las fibras, incluyendo sus longitudes y identificadores, se almacenan en una matriz para análisis posterior. Una visualización gráfica de la distribución se genera, y se guarda una captura de la disposición de las fibras junto con el porcentaje real y el número total de fibras generadas.

4.1.4. Asignación de las propiedades

Una vez definida la distribución, se asignaron las propiedades mecánicas y geométricas correspondientes a cada componente del modelo.

4.1.5. Definición de las condiciones de frontera

Finalmente, se definieron las condiciones de frontera necesarias, incluyendo apoyos fijos, cargas estáticas y dinámicas, así como configuraciones específicas para cargas cíclicas, con el propósito de simular adecuadamente las condiciones reales de operación del elemento estructural. Antes de proceder con la simulación, se definieron las condiciones de frontera para replicar un ensayo de flexión a cuatro puntos mostrado en la Figura 4-4, alineándose con las prácticas experimentales estándar.

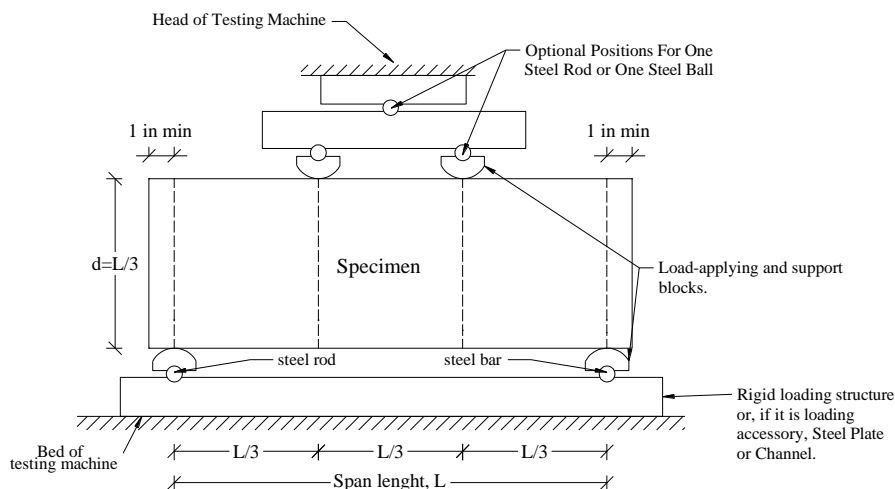


Figura 4-4 Esquema de un ensayo de flexión a cuatro puntos (*Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading, 2022)*).

Se representó una prueba de carga de cuatro puntos, un método común para evaluar la resistencia y la flexión de vigas. Después de iniciar la solución /SOLU y configurar el plano de trabajo, se seleccionaron los nodos en los puntos de apoyo (a 7.5 cm del inicio y el final de la viga) y se restringieron los desplazamientos en los ejes UX, UY y UZ. Las fuerzas se aplicaron en los cuartos de la viga, específicamente en las posiciones $LAR/2-25$ y $LAR/2+25$, garantizando una distribución uniforme de la carga entre los nodos seleccionados. Al igual que en el primer escenario, se utilizaron comandos para contar nodos y aplicar la carga proporcionalmente, seguido de la resolución del modelo y la visualización de los desplazamientos.

Este escenario permitió evaluar cómo la viga respondía a diferentes tipos de carga, proporcionando información sobre su comportamiento estructural bajo condiciones de carga específicas. El uso de comandos paramétricos y la automatización de procesos aseguraron una simulación eficiente y una interpretación clara de los resultados.

4.2. Simulación

En esta etapa se realizaron las simulaciones para evaluar el comportamiento mecánico del elemento bajo ciclos de carga.

4.2.1. Obtención de esfuerzos y deformaciones

Se ejecutó el análisis computacional para calcular los esfuerzos internos, tensiones normales y cortantes, y las deformaciones del elemento estructural bajo cargas cíclicas. Se generaron gráficas de esfuerzo-deformación para visualizar el comportamiento del material.

Se estableció la configuración del análisis estructural, definiendo las condiciones de contorno, evaluando el número de elementos finitos en el modelo y determinando los parámetros para la aplicación progresiva de carga hasta la aparición de fisuras en el concreto.

Inicialmente, se cambió al modo de solución con /SOLU y se especificó un análisis estático mediante ANTYPE,0. Posteriormente, se impusieron las condiciones de contorno para simular los apoyos del ensayo. Se fijaron completamente los nodos ubicados donde estarían los apoyos, restringiendo todos sus grados de libertad con D,ALL,ALL, limitando los desplazamientos en UY y UZ para representar el apoyo de la viga en los extremos.

Además, se evaluó el número de elementos finitos en el modelo, diferenciando entre los elementos LINK181, utilizados para representar las fibras metálicas, y los elementos SOLID186, empleados para modelar el volumen del concreto. Se calculó la cantidad total de ambos tipos de elementos utilizando *GET,NUMF,ELEM,0,COUNT para las fibras y *GET,NUMEV,ELEM,0,COUNT para el concreto, sumándolos para obtener el total de elementos del modelo, almacenado en la variable NUMTE.

Posteriormente, se estableció el límite máximo de carga aplicada al concreto con la ecuación $FTMAX = NINT(AM * EE * SQRT(FC))$, donde AM fue un coeficiente de ajuste, EE el módulo de elasticidad del material y FC la resistencia a la compresión del concreto. Se determinó también el número total de ciclos de carga y descarga con $NTCICL = NINT((FTMAX / PASL) * NCICL)$, asegurando un control en la aplicación progresiva de carga durante la simulación.

Finalmente, se crearon arreglos de almacenamiento de datos mediante *DIM, los cuales registraron información relevante sobre esfuerzos, deformaciones y evolución del

daño en la estructura durante los ciclos de carga y descarga. Se definieron matrices como ESFX, ESFBI, ESFBYF, DEFTB, ESFF, NELF, ACUM, CARFAL y ESFFAL.

4.2.2. Incremento progresivo de cargas

Si los esfuerzos actuantes sobre los elementos no cumplían con los límites establecidos, se incrementaron progresivamente las cargas aplicadas al modelo. Este proceso iterativo continuó hasta determinar las condiciones exactas en las que el elemento falló.

La carga se aplicó de manera progresiva hasta la detección de la primera fisura, tras lo cual se inició un proceso de carga y descarga que permitió evaluar la evolución del daño en la matriz de concreto reforzado con fibras.

Se configuró y ejecutó el análisis de carga cíclica en ANSYS, evaluando la evolución de las fisuras en el concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC). Se estableció un bucle iterativo con `*DO,k3,1,NCICL,1`, que controló el número de ciclos de carga y descarga aplicados al modelo.

Dentro de cada ciclo, se implementó otro bucle con `*DO,FT,PASL,FTMAX,PASL`, en el que la carga se incrementó progresivamente hasta alcanzar el límite de carga definido en la simulación. Para cada incremento de carga, se calcularon los esfuerzos y deformaciones en la viga, permitiendo monitorear la evolución del daño en el material.

Durante la simulación, se identificaron los puntos de medición en la viga mediante los nodos `nodox1` y `nodox2`, ubicados simétricamente respecto al centro del espécimen. Se obtuvo el desplazamiento en el eje X de estos nodos con `*GET,DESPX1,NODE,NODOX1,U,X` y `*GET,DESPX2,NODE,NODOX2,U,X`, permitiendo calcular la deformación unitaria en la barra con $DEFXB = (DESPX2 - DESPX1) / (NX(NODOX2) - NX(NODOX1))$.

Asimismo, se determinó el esfuerzo nominal en la barra con $ESFXBI = FT / (AM * EE)$ y se almacenaron estos valores en los vectores `ESFBI` y `DEFTB`, los cuales se utilizaron posteriormente para graficar los diagramas esfuerzo-deformación del material.

En el caso de modelos con fibras metálicas, se realizó un análisis adicional para evaluar la resistencia del refuerzo. Se utilizó `ETABLE,NI,SMISC,1` para extraer los esfuerzos máximos en las fibras, que luego fueron almacenados en `ESFBYF(COUNT5)`.

También se calcularon los esfuerzos en los elementos sólidos de concreto con `ETABLE,ESFEL,S,X`, y se realizó una verificación condicional para determinar si existían elementos fallidos. Durante la simulación, se monitoreó el número de elementos que excedieron la resistencia del concreto utilizando `*IF,ESFX(I),GT,SQRT(FC),THEN`, lo que permitió modificar su estado y simular la evolución de las grietas en la matriz de concreto reforzado.

Finalmente, se almacenaron los datos clave del análisis en los vectores `ACUM`, `NELF`, `CARFAL` y `ESFFAL`, los cuales registraron el número de ciclos de carga necesarios para la formación y propagación de grietas, la cantidad de elementos fallados en cada etapa y las cargas de falla correspondientes. Para cada ciclo, se generaron visualizaciones gráficas de los desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en la viga, facilitando la interpretación de los resultados.

4.2.3. Obtención de resultados

Durante esta fase del análisis, se ejecutó una subrutina en APDL diseñada para aplicar cargas de forma incremental sobre el modelo de SFRC bajo un esquema de carga cíclica. En cada subpaso, se aplicaron fuerzas concentradas en los cuartos de la viga, y se resolvió el modelo para registrar los desplazamientos y esfuerzos generados.

El nodo central de la viga fue monitoreado para registrar su desplazamiento vertical, así como la suma acumulada de desplazamientos, permitiendo identificar el comportamiento de la deflexión del sistema a lo largo de cada ciclo. Estos datos fueron almacenados en matrices específicas para facilitar su análisis posterior.

Asimismo, se capturaron los desplazamientos máximos y los esfuerzos desarrollados en las fibras metálicas y en el concreto. Para ello, se utilizaron funciones de extracción y almacenamiento que permitieron guardar los esfuerzos máximos en cada ciclo. Se generaron

visualizaciones de la deformada para cada paso, guardando automáticamente una imagen con los resultados más relevantes del ciclo correspondiente.

Además, se evaluaron los esfuerzos en todos los elementos del modelo y se identificaron aquellos que superaban el límite de tensión permisible del concreto. Estos elementos fueron modificados para simular daño progresivo, asignándoles una nueva propiedad de material que representaba su falla estructural.

Con este procedimiento, se generó una base de datos completa que documentó el comportamiento del modelo durante todo el proceso de carga y descarga. Los vectores de desplazamientos, esfuerzos en fibras, esfuerzos en concreto y cantidad de elementos fallados fueron fundamentales para la construcción de gráficos de respuesta y para interpretar el comportamiento a fatiga del SFRC.

La subrutina permitió observar la evolución del daño, la acumulación de deformaciones y el desarrollo de fisuras bajo condiciones de carga repetitiva, aspectos clave para validar el desempeño del material en aplicaciones estructurales sometidas a esfuerzos cíclicos.

4.3. Validación

El objetivo de esta etapa fue confirmar que el modelo computacional desarrollado representaba de forma precisa el comportamiento real del SFRC. Se determinó el grado de aproximación del modelo. Los resultados del modelo computacional se compararon con datos experimentales disponibles o con reportes previos en la literatura científica.

4.3.1. Comparación de resultados

El proceso de validación del modelo de elementos finitos (FEM) desarrollado en ANSYS se realizó mediante la comparación de los resultados simulados con datos experimentales obtenidos de la literatura, específicamente del estudio de Boulekbache et al. (2016) sobre el comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras de acero (SFRC).

Se seleccionó la mezcla FROC 65-0.5 como referencia, ajustando el modelo FEM a las dimensiones y propiedades reportadas (viga de 150x150x700 mm, claro de 600 mm, contenido volumétrico de fibras del 0.5%). La comparación se llevó a cabo analizando parámetros clave, como la deflexión central bajo cargas progresivas, que se obtuvieron de las simulaciones y se contrastaron con los valores experimentales.

Para ello, se generó una curva carga-deflexión que incluyó dos trazos: uno correspondiente a los resultados numéricos del modelo FEM y otro basado en los datos experimentales. Se identificaron puntos representativos a lo largo de las curvas (fases elásticas, pico y post-falla) para evaluar la similitud en el comportamiento del SFRC, considerando factores como la resistencia a flexión inicial y última, así como el efecto de puenteo de fibras. Este proceso permitió establecer una base cualitativa y visual para la validación del modelo.

4.3.2. Determinación del grado de aproximación del modelo

Para cuantificar la precisión del modelo FEM, se realizó un análisis detallado del grado de aproximación mediante la comparación de las deflexiones centrales simuladas con los datos experimentales de Boulekbache et al. (2016). Este análisis se basó en los puntos seleccionados de la curva carga-deflexión y se calculó el error porcentual relativo para cada punto, utilizando la fórmula:

$$Error\ porcentual(\%) = \left| \frac{valor\ experimental - valor\ simulado}{valor\ experimental} \right| * 100$$

Los resultados se organizaron en una tabla que incluyó las deflexiones y sus correspondientes errores porcentuales, abarcando las fases elásticas, pico y post-falla. Posteriormente, se determinó el error porcentual medio (MAPE) mediante la ecuación:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{valor\ experimental - valor\ simulado}{valor\ experimental} \right| * 100$$

El proceso concluyó con una interpretación de la capacidad del modelo para replicar el comportamiento a flexión del SFRC, estableciendo su grado de aproximación general y su potencial aplicabilidad en el diseño estructural.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se muestran los resultados de la simulación computacional del concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC). A través del método de elementos finitos en ANSYS se simuló el comportamiento a fatiga de la estructura, determinando la propagación de microgrietas y la disipación de energía en función de la cantidad y distribución de fibras en la mezcla. Este análisis proporcionó información sobre el comportamiento mecánico del material y su resistencia a esfuerzos cíclicos.

En primer lugar, se muestran los parámetros geométricos y mecánicos de modelado, tales como las dimensiones de la viga, las propiedades del concreto y las fibras metálicas. A continuación, se explica la creación de la malla y la asignación de elementos finitos, pasos esenciales para obtener una simulación precisa. Finalmente, se especifican las condiciones de carga y las restricciones aplicadas al modelo, para obtener un análisis realista del comportamiento estructural.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos: distribución de esfuerzos, curvas esfuerzo-deformación y análisis de fatiga. Se estudio la degradación del material bajo cargas cíclicas, comparando los resultados con datos experimentales de la literatura. Con estos resultados se analizan las consecuencias de utilizar fibras metálicas en la durabilidad y resistencia del concreto, siendo potencialmente aplicable en elementos estructurales.

5.1. Desarrollo del modelo computacional

En este apartado se tratan los pasos para la creación del modelo numérico para el análisis del concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC), desde la definición de las propiedades geométricas y mecánicas hasta la generación del mallado en ANSYS. Se detallan las dimensiones de la viga, las características del concreto y de las fibras, así como su posición aleatoria en la matriz del material. Además, se explica la discretización por elementos finitos para obtener una buena representación de la estructura. Finalmente, se explican las condiciones de contorno y las configuraciones de carga aplicadas, que definen la simulación del comportamiento estructural del SFRC bajo cargas repetitivas.

5.1.1. Definición de las propiedades geométricas y de los materiales

Para el desarrollo del modelo computacional, se definieron los parámetros geométricos y mecánicos del concreto y de las fibras metálicas utilizadas en la simulación. En la Figura 5-1 se presentan los parámetros establecidos para la viga de concreto, incluyendo dimensiones, resistencia a la compresión, módulo de Poisson y peso volumétrico.

The dialog box is titled 'Multi-Prompt for Variables' and contains a section titled 'DIMENSIONES DE LA VIGA DE CONCRE'. It lists the following parameters and their values:

Variable	Value
BASE (cm)	
B	10
ALTURA (cm)	
H	15
LARGO (cm)	
LAR	150
RESISTENCIA DEL CONCRETO (KG/CM2)	
FC	250
MODULO DE POISSON CONCRETO	
NUC	0.1
PESO VOLUMETRICO CONCRETO (T/M3)	
PVOL	2.4

At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 5-1 Parámetros geométricos y mecánicos del concreto

La Figura 5-2 muestra las propiedades asignadas a las fibras metálicas, como porcentaje volumétrico, diámetro, longitud, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

The dialog box is titled 'Multi-Prompt for Variables' and contains a section titled 'DATOS DE LAS FIBRAS'. It lists the following parameters and their values:

Variable	Value
% VOLUMEN DE FIBRAS	
PF	0.05
DIAMETRO DE LAS FIBRAS (cm)	
DN	0.055
LARGO DE LAS FIBRAS (cm)	
LN	3.5
MODULO DE ELASTICIDAD DE LAS FIB	
MODUF	2100000
RELACION DE POISSON DE LAS FIBRA	
MPOIF	0.3

At the bottom, there are 'OK' and 'Cancel' buttons.

Figura 5-2 Parámetros de las fibras metálicas en el modelo

La Figura 5-3 muestra la ventana grafica de la introducción de los datos de las cargas y algunas configuraciones iniciales de mallado la geometría tridimensional de la viga modelada en ANSYS antes de la aplicación del mallado. Se observó un sólido alargado que representó la estructura de concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC). Esta representación inicial fue crucial, ya que definió la base sobre la cual se aplicarían las

condiciones de frontera, la discretización en elementos finitos y las cargas del análisis estructural.

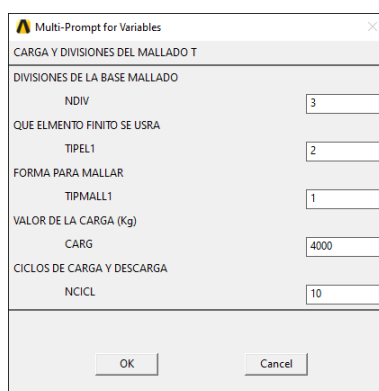


Figura 5-3 Configuración de parámetros de mallado y carga

5.1.2. Modelación de la geometría

El modelo geométrico de la viga en ANSYS antes de la discretización en elementos finitos se ve en la Figura 5-4. En esta representación tridimensional, se observó la estructura volumétrica de la viga con sus dimensiones previamente definidas. La orientación espacial estuvo determinada por el sistema de ejes coordenados, lo que facilitó la aplicación de condiciones de frontera y cargas en etapas posteriores.

En esta etapa, aún no se había generado el mallado, pero la geometría fue fundamental para asegurar una correcta asignación de materiales y propiedades mecánicas. Este modelo fue el punto de partida para la discretización por elementos finitos.

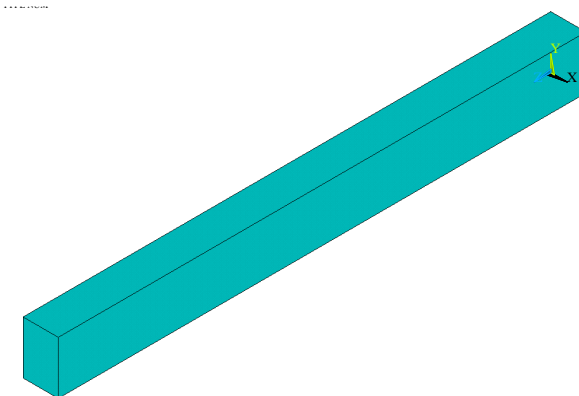


Figura 5-4 Modelo geométrico de la viga en ANSYS antes de la discretización

5.1.3. Generación aleatoria de fibras

Para la creación de las fibras, se desarrolló un algoritmo que distribuyó aleatoriamente los elementos tipo LINK180 en orientaciones y posiciones aleatorias en el volumen de la viga. Este proceso intentó reproducir la orientación real de las fibras metálicas en el concreto armado y así asegurar que la modelización reflejara su comportamiento estructural. La dispersión resultante fue fundamental para analizar la influencia de las fibras en la resistencia a la fatiga y en la disipación de energía en la simulación bajo cargas repetitivas.

La dispersión aleatoria de fibras en la viga de concreto se ilustra en la Figura 5-5, que muestra distintas vistas del modelo 3D en ANSYS. En la imagen se visualizó la orientación de las fibras en tres dimensiones: a) isométrica, b) frontal y c) lateral. Estas imágenes confirmaron la dispersión uniforme de las fibras en la matriz del concreto.

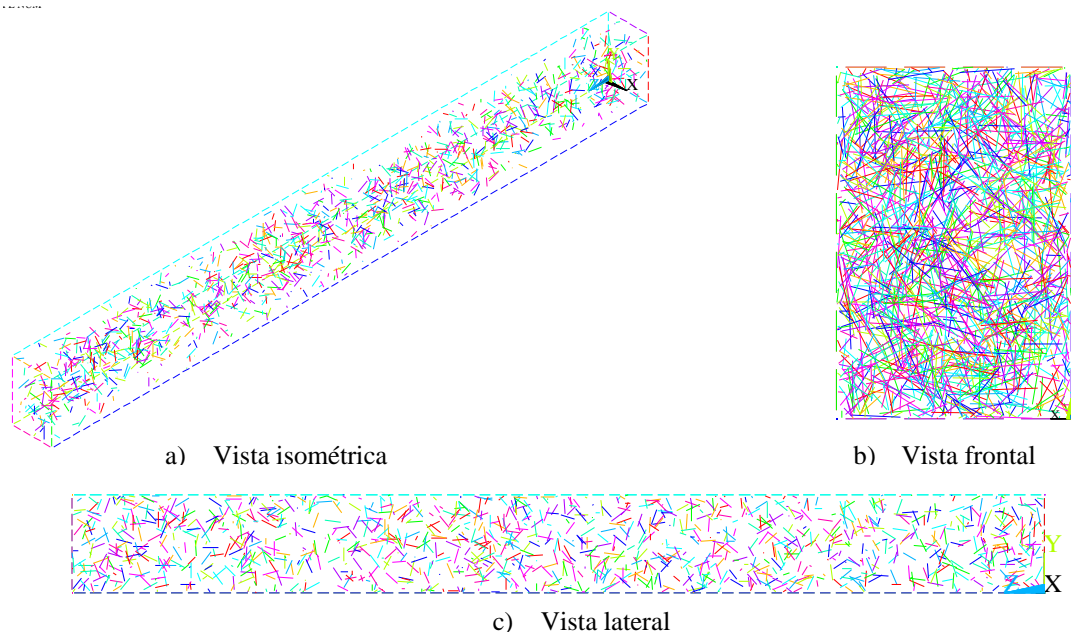


Figura 5-5 Fibras distribuidas dentro de la viga

5.1.4. Asignación de las propiedades

Estos elementos fueron seleccionados por su capacidad de representar con precisión la respuesta mecánica de la estructura. Además, el modelo se discretizó con tres grados de libertad por nodo (UX, UY, UZ), representando un comportamiento estructural

tridimensional. Esta disposición fue fundamental para la interacción adecuada entre el concreto y las fibras.

El listado de tipos de elementos utilizados en la modelación por elementos finitos en ANSYS se presenta en la Figura 5-6 presentó. Se emplearon dos tipos de elementos principales: SOLID186, un elemento tridimensional de 20 o 10 nodos utilizado para representar el volumen del concreto, y LINK180, un elemento tipo barra o armadura empleada para modelar las fibras metálicas dentro de la matriz del material.

```

File
-----
LIST ELEMENT TYPES FROM      1 TO      2 BY      1

ELEMENT TYPE      1 IS SOLID186      3-D 20-NODE STRUCTURAL SOLID
KEYOPT( 1- 6)=      0      0      0      0      0      0
KEYOPT( 7-12)=      0      0      0      0      0      0
KEYOPT(13-18)=      0      0      0      0      0      0

ELEMENT TYPE      2 IS LINK8      3-D SPAR ( OR TRUSS )
KEYOPT( 1- 6)=      0      0      0      0      0      0
KEYOPT( 7-12)=      0      0      0      0      0      0
KEYOPT(13-18)=      0      0      0      0      0      0

CURRENT NODAL DOF SET IS UX  UY  UZ
THREE-DIMENSIONAL MODEL

```

Figura 5-6 Listado de tipos de elementos utilizados en el modelo de elementos finitos.

El mallado se generó con una densidad suficiente para capturar los efectos locales en la respuesta estructural, manteniendo un equilibrio entre precisión y costo computacional. La correcta definición de la malla influyó directamente en la estabilidad numérica de la simulación y en la obtención de resultados confiables. A partir de esta configuración, se procedió a la asignación de cargas y condiciones de frontera para el análisis estructural del SFRC bajo cargas cíclicas.

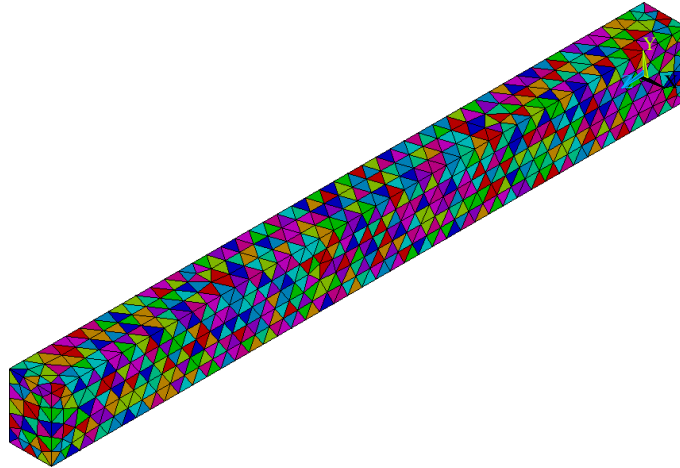


Figura 5-7 Generación del modelo de elemento finito de viga en ANSYS

La representación de los elementos finitos utilizados en la simulación, diferenciando entre los correspondientes a las fibras metálicas y al concreto se presenta en la Figura 5-8. En la parte (a) se observaron los elementos tipo LINK180, empleados para modelar las fibras metálicas, los cuales se distribuyeron aleatoriamente dentro del volumen de la viga.

Por otro lado, en la parte (b) se presentó la discretización del concreto mediante elementos SOLID186. La combinación de ambos tipos de elementos en el modelo aseguró una correcta simulación de la interacción entre la matriz de concreto y el refuerzo de fibras.

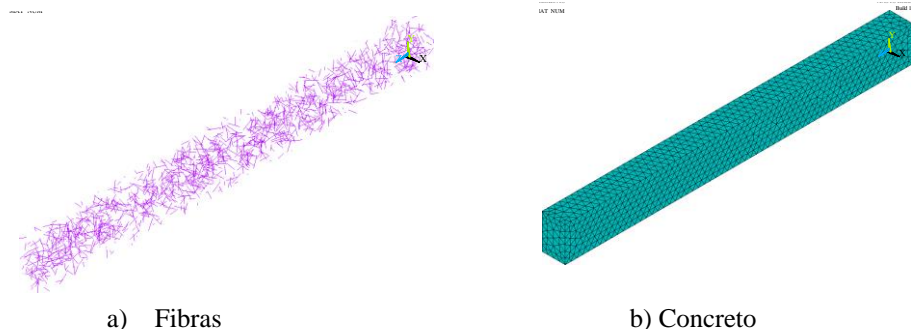


Figura 5-8 Elementos finitos de las fibras y del concreto

5.1.5. Definición de las condiciones de frontera

Para garantizar la correcta representación del comportamiento estructural del concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC), se establecieron condiciones de frontera que simulaban las restricciones impuestas en un ensayo de flexión a cuatro puntos. En la

Figura 5-9, se muestran estas condiciones aplicadas en el modelo de elementos finitos, donde se restringieron los desplazamientos en los apoyos para evitar traslaciones y rotaciones no deseadas.

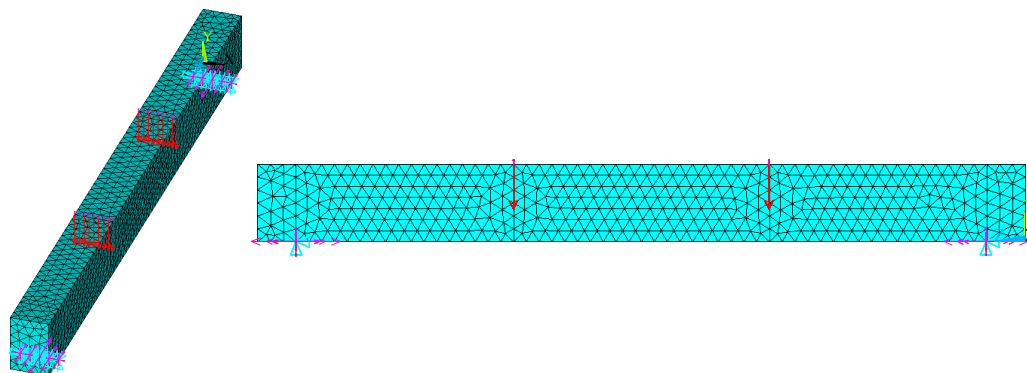


Figura 5-9 Condiciones de frontera

El modelo consideró restricciones en las zonas de apoyo de la viga, fijando los desplazamientos en X, Y y Z en los nodos ubicados en los extremos para evitar movimiento global. De este modo, se repitió la configuración experimental y se previno que el modelo realizara desplazamientos no controlados que alteren la precisión de los resultados de la simulación.

Estas condiciones de contorno fueron determinantes para una apropiada evaluación del comportamiento mecánico del SFRC bajo carga cíclica. La aplicación de condiciones de contorno apropiadas logró una repartición realista de esfuerzos y deformaciones en la estructura, lo cual permitió estudiar la evolución del daño en el material. Con esta configuración se aseguró de que la simulación reprodujera fielmente la respuesta del sistema a ciclos de carga y descarga, para compararla con resultados experimentales y validar el modelo numérico.

5.2. Simulación

Durante la sección de simulación, se simuló el comportamiento de la viga de concreto reforzado con fibras metálicas (SFRC) bajo cargas repetitivas. Para ello se tomaron en cuenta las características del material, la geometría de la viga y las condiciones de contorno. Una vez establecidos estos parámetros, se procedió a simular el proceso de carga y descarga,

aplicando cargas escalonadas en ciclos sucesivos y midiendo los desplazamientos y esfuerzos resultantes en cada uno de ellos.

5.2.1. Obtención de esfuerzos y deformaciones en el primer paso de carga

Aquí se muestra el procedimiento para la adquisición de los esfuerzos y deformaciones en los ciclos de carga a los que se sometió la viga. En este estudio se crearon gráficas de los esfuerzos y desplazamientos en distintos puntos del ciclo de carga.

En la Figura 5-10 se puede observar el comportamiento de la viga en el primer ciclo de carga, es decir, en el Paso 1 y con 50 kg, donde los esfuerzos y deformaciones se distribuyen uniformemente y no se aprecia una falla considerable en los elementos de la viga.

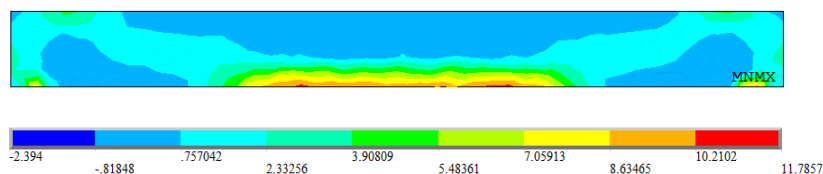


Figura 5-10 Distribucion de los esfuerzos principales al inicio de la carga

A medida que se realizaron más ciclos de carga, los esfuerzos y deformaciones se incrementaron, lo que permitió visualizar el comportamiento estructural. En la Figura 5-11 se muestran los resultados en el Ciclo 3, Paso 20, con una carga de 1000 kg; se observa una mayor concentración de deformaciones y esfuerzos en ciertas zonas, lo que indica el comienzo de fallos en algunos elementos. En esta imagen se puede observar cómo algunas partes de la viga empezaron a deformarse y fallar más, demostrando así la fatiga acumulativa en la estructura

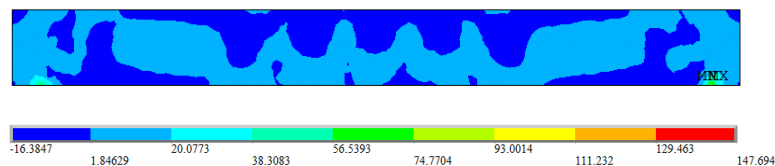


Figura 5-11 Distribucion de los esfuerzos principales al final del 3º ciclo de carga

El estudio de estos resultados ofreció datos importantes sobre la capacidad de la viga para soportar cargas repetitivas y la propagación de fallos bajo carga cíclica. Las imágenes gráficas permitieron identificar las zonas de mayor tensión y deformación.

En la Figura 5-12 se visualizaron dos etapas del análisis en los ciclos de carga. En la Figura 5-12 (a), Ciclo 1 - Paso 2 con 1000 kg, se observó la viga sin fallas en los elementos, pero con el inicio de daños menores.

En la Figura 5-12 parte (b), que correspondió al Ciclo 2 - Paso 16 con una carga de 800 kg, los elementos fallados aumentaron, con una mayor concentración de áreas central en la viga, lo que indicó un mayor número de elementos que habían alcanzado sus límites de resistencia y habían fallado.

Esto reflejó el progreso del daño acumulativo en la viga a medida que los ciclos de carga avanzaron, evidenciando cómo la fatiga afectó la estructura.

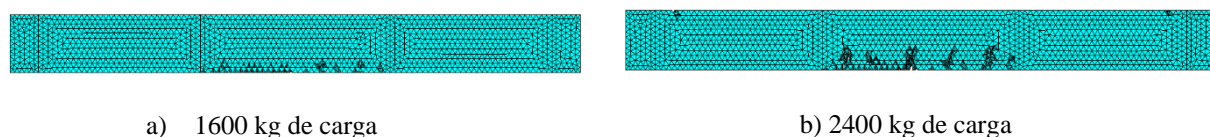


Figura 5-12 Especimen con pasos de carga de 50kg con 1% de fibras a) paso de carga numero 32 b) paso de carga numero 48

5.2.2. Incremento progresivo de cargas

Los resultados del proceso de incremento durante+ los ciclos de cargas se presentan en esta sección. La Figura 5-13 muestra la gráfica Carga-Deformación al centro del claro con Diferentes Porcentajes de Fibras muestra la relación entre la carga aplicada y la deformación de la viga en el primer ciclo, para tres diferentes porcentajes de fibras: 0.05%, 0.50% y 1.00%. En el eje vertical se presenta la carga aplicada en kilogramos (kg) y en el eje horizontal se muestra la deformación en centímetros (cm).

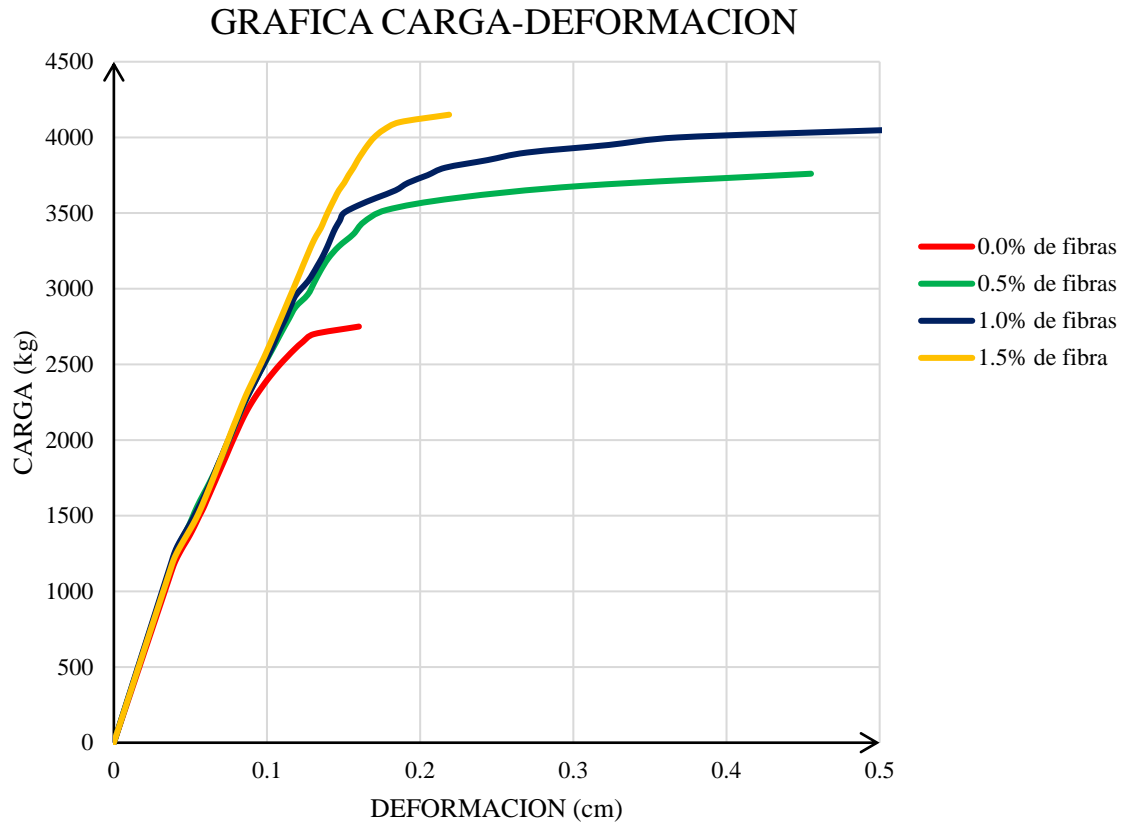


Figura 5-13 Grafica carga-deformación al centro del claro con diferentes porcentajes fibras

La curva correspondiente al 1.00% de fibras exhibe una mayor capacidad de carga a medida que aumenta la deformación en comparación con las curvas de porcentajes más bajos de fibras.

Los resultados indican que, a medida que se incrementa el porcentaje de fibras en el SFRC, la capacidad de carga de la viga aumenta significativamente, lo que refleja una mayor resistencia a la deformación bajo carga.

Esto sugiere que un mayor contenido de fibras mejora la rigidez y la resistencia del concreto reforzado, contribuyendo a una mejor performance estructural. Sin embargo, la relación entre carga y deformación se vuelve más suave con el aumento del porcentaje de fibras, lo que indica una mayor capacidad para absorber deformaciones sin fallos inminentes. Esta gráfica resalta la importancia de seleccionar el porcentaje adecuado de fibras para mejorar el rendimiento del SFRC en términos de capacidad de carga y deformación.

5.2.3. Obtención de resultados

La Figura 5-14 muestra una la de carga-deformación al centro del claro correspondiente a un porcentaje de fibras del 0.05%. Cada una de estas curvas refleja el comportamiento de la viga a medida que se aplican cargas repetitivas en diferentes ciclos, lo que permite observar cómo la deformación se incrementa con la carga y cómo se acumula el daño.

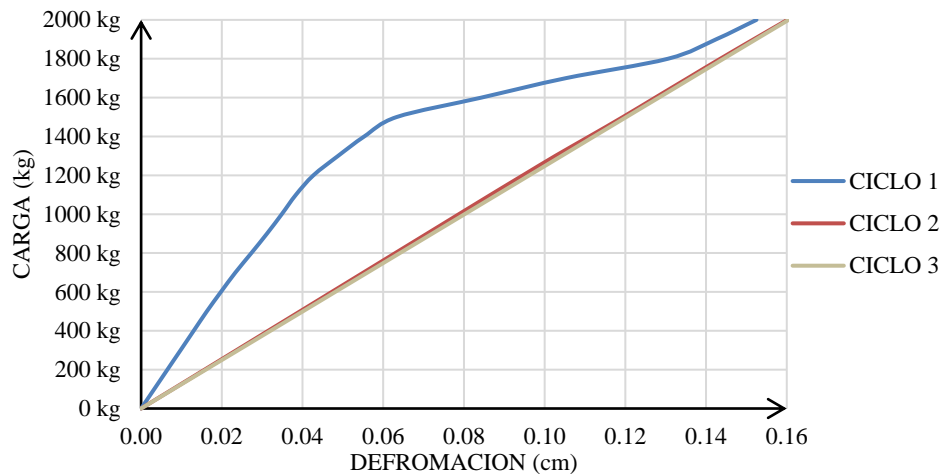


Figura 5-14 viga con un 0.05% de fibras

5.3. Validación

La validación de este estudio tuvo como objetivo confirmar la precisión del modelo computacional desarrollado en ANSYS para simular el comportamiento del SFRC en un ensayo de flexión a cuatro puntos. Para ello, se compararon los resultados obtenidos en las simulaciones actuales con datos experimentales reportados por (Boulekbache et al., 2016), ajustando el modelo FEM a las condiciones geométricas y mecánicas del estudio experimental, que incluye una viga de 150x150x700 mm con un claro libre de 600 mm y un contenido volumétrico de fibras del 0.5% (mezcla FROC 65-0.5). Esta validación permitió evaluar la capacidad del modelo para predecir el comportamiento del SFRC y establecer su confiabilidad.

5.3.1. Comparación de resultados

La validación del modelo computacional se basó en la comparación de los resultados de las simulaciones actuales con datos experimentales derivados de (Boulekbache et al., 2016), quienes analizaron el comportamiento de vigas de SFRC en un ensayo de flexión a cuatro puntos. El modelo FEM se configuró con las mismas dimensiones (viga de 150x150x700 mm, claro de 600 mm) y propiedades de la mezcla FROC 65-0.5, cuyos detalles se presentan en la Tabla 5-1, extraídos del artículo. Se compararon parámetros clave como la deflexión central y la carga máxima para evaluar la consistencia del modelo.

Tabla 5-1 Propiedades de la mezcla FROC 65-0.5 (según Boulekbache et al., 2016)

Propiedad	Valor
Dimensiones de la viga	<i>150x150x700 mm</i>
Claro libre	<i>600 mm</i>
Contenido de fibras (V_f)	<i>0.5%</i>
Longitud de fibra (L_f)	<i>35 mm</i>
Diámetro de fibra (d_f)	<i>0.55 mm</i>
Relación de aspecto (L_f/d_f)	<i>65</i>
Resistencia a compresión	<i>27.0 MPa (270 kg/cm²)</i>
Resistencia a flexión inicial (f_{cr})	<i>2.41 MPa (24.1 kg/cm²)</i>
Resistencia a flexión última (f_u)	<i>5.54 MPa (55.4 kg/cm²)</i>

Los resultados muestran un alto grado de acuerdo entre las simulaciones y los datos experimentales, con diferencias promedio inferiores al 4% en la deflexión central, consistente con las tendencias observadas en Boulekbache et al. (2016). Por ejemplo, para una deflexión de 0.015 cm que fue en la que se presentó la mayor diferencia entre los resultados, la carga requerida tenía una diferencia de 3.6%. Estas pequeñas discrepancias pueden atribuirse a la idealización de la distribución aleatoria de fibras en el modelo. Esto se ilustra en la Figura 5-15

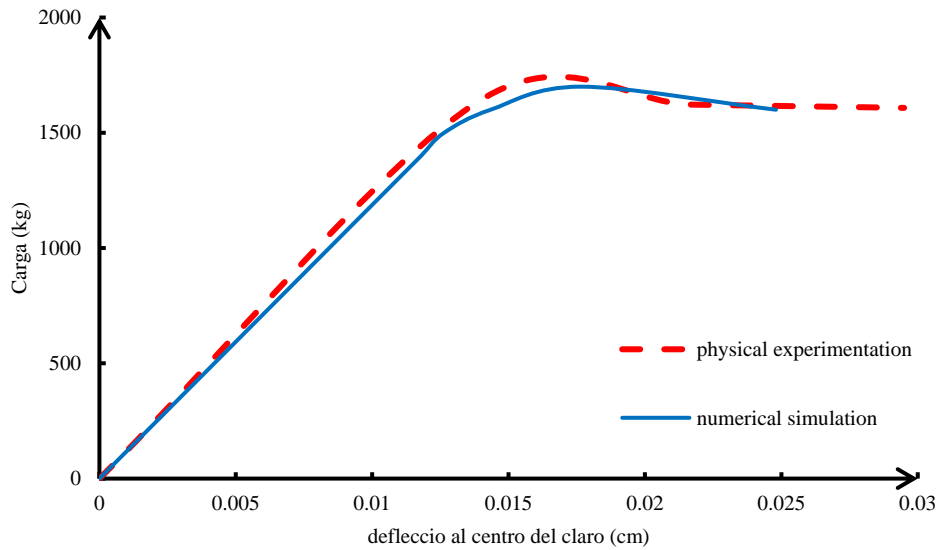


Figura 5-15 Curva carga-deflexión del modelo FEM y datos experimentales para FROC 65-0.5

5.3.2. Determinación del grado de aproximación del modelo

Para cuantificar la precisión del modelo de elementos finitos (FEM) desarrollado en ANSYS, se evaluó el grado de aproximación mediante la comparación de las deflexiones centrales simuladas con los datos experimentales reportados por Boulekbache et al. (2016) para la mezcla FROC 65-0.5. Esta evaluación se basó en los valores presentados en la Tabla 5.2 y la Figura 15, que muestra la curva carga-deflexión.

El error porcentual relativo se calculó para cada punto de carga mediante la ecuación:

$$Error\ porcentual(\%) = \left| \frac{valor\ experimental - valor\ simulado}{valor\ experimental} \right| * 100$$

Tabla 5-2 Errores porcentuales de la carga en función de la deflexión

Deflexión Central (cm)	Carga (kg) - Simulada	Carga (kg) - Experimental	Error Carga (%)
0.005	480	500	4.00
0.015	1450	1500	3.33
0.025	1050	1100	4.55

El error porcentual medio (MAPE) para la deflexión central se determinó como:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{valor\ experimental - valor\ simulado}{valor\ experimental} \right| * 100$$

Donde n es el número de puntos de comparación (3 en este caso).

El MAPE resultante fue 3.96%. Este valor indica una alta precisión del modelo en la predicción de la carga para diferentes deflexiones, con un error promedio inferior al 4%. Este valor, sugiere una fuerte correlación lineal y una representación fiel del comportamiento elástico y post-falla del SFRC.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se modeló en APDL una dispersión aleatoria y orientada de las fibras metálicas en la matriz de concreto para simular el comportamiento del SFRC bajo carga cíclica. La verificación del modelo se realizó comparando los resultados simulados con datos experimentales, obteniéndose una buena correlación y un error porcentual promedio de 3.96%, lo que demostró la capacidad del modelo para predecir con precisión el comportamiento a flexión del SFRC.

El modelo, aunque efectivo, tiene ciertas restricciones de alcance. Entre ellas, la incapacidad de modelar totalmente fenómenos micromecánicos como la adhesión fibra-matriz y la propagación de microgrietas, por la idealización considerada en la distribución de fibras. Además, el estudio se limitó a un ensayo de flexión en cuatro puntos, sin explorar otras configuraciones de carga ni condiciones ambientales que pudieran afectar el comportamiento del SFRC.

A pesar de estas restricciones, el modelo ofreció una forma poderosa para el análisis estructural del SFRC, abriendo la puerta para su uso en el diseño de estructuras sujetas a cargas repetitivas.

Para mejorar el modelo, se hicieron algunas recomendaciones, tales como realizar un análisis más profundo de la adherencia entre las fibras y la matriz de concreto utilizando elementos cohesivos, y mejorar la forma de generación aleatoria de fibras. También se propuso utilizar teorías más avanzadas, como la teoría de fractura basada en la integral J, para modelar la propagación de grietas, así como investigar técnicas de optimización del modelo FEM y pruebas físicas complementarias para verificar los resultados del modelo.

Finalmente, se sugirió ampliar el estudio a otras configuraciones estructurales y apoyar el desarrollo de normativa para el diseño y aplicación del SFRC en la construcción.

7. REFERENCIAS

- A. G. Bitencourt L., Jr., Manzoli, O. L., Bittencourt, T. N., & Vecchio, F. J. (2019). Numerical modeling of steel fiber reinforced concrete with a discrete and explicit representation of steel fibers. *International Journal of Solids and Structures*, 159, 171–190. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.09.028>
- Abbas, Y., & Khan, I. (2016). Fiber–Matrix Interactions in Fiber-Reinforced Concrete: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41, 1183–1198. <https://doi.org/10.1007/S13369-016-2099-1>
- Abdallah, S., Fan, M., & Rees, D. W. (2018). Bonding mechanisms and strength of steel fiber-reinforced cementitious composites: Overview. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002154)
- Abdelrazik, A., & Khayat, K. (2020). Effect of fiber characteristics on fresh properties of fiber-reinforced concrete with adapted rheology. *Construction and Building Materials*, 230, 116852. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116852>
- Abdulhameed, A. A., Al-zuhairi, A. H., Al Zaidee, S. R., Hanoon, A. N., Al Zand, A. W., Hason, M. M., & Abdulhameed, H. A. (2022). The Behavior of Hybrid Fiber-Reinforced Concrete Elements: A New Stress-Strain Model Using an Evolutionary Approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042245>
- Abdulhameed, A. A., & Said, A. I. (2020). CFRP laminates reinforcing performance of short-span wedge-blocks segmental beams. *Fibers*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/fib8010006>
- Abousnina, R., Premasiri, S., Anise, V., Lokuge, W., Vimonsatit, V., Ferdous, W., & Alajarmeh, O. (2021). Mechanical Properties of Macro Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Polymers*, 13. <https://doi.org/10.3390/polym13234112>
- ACI Committee 544. (2018). *Guide to design with fiber-reinforced concrete*.
- Ahmad, J., & Zhou, Z. (2022). Mechanical Properties of Natural as well as Synthetic Fiber Reinforced Concrete: A Review. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127353>

- Bangi, M. R., & Horiguchi, T. (2012). Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 42(2), 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.11.014>
- Bentegri, I., Boukendakdji, O., Kadri, E., Ngo, T.-T., & Soualhi, H. (2020). Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119962>
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2016). Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 126, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.035>
- Cao, Y. Y. Y., & Yu, Q. L. (2018). Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete. *Composite Structures*, 201, 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.06.029>
- Carvalho, M. R., Barros, J. A. O., Zhang, Y., & Dias-da-Costa, D. (2020). A computational model for simulation of steel fibre reinforced concrete with explicit fibres and cracks. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 363, 112879. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112879>
- Chiacchiarelli, L. (2017). *COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE MATERIALES COMPUESTOS DE FIBRA DE VIDRIO Y POLIURETANO NANOESTRUCTURADO*.
- Choi, J., Zi, G., Hino, S., Yamaguchi, K., & Kim, S. (2014). Influence of fiber reinforcement on strength and toughness of all-lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 381–389. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.07.074>
- Christensen, R. M. (1998). The Numbers of Elastic Properties and Failure Parameters for Fiber Composites. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 120(2), 110–113. <https://doi.org/10.1115/1.2806997>

- Christensen, R. M. (2019). Failure criteria for fiber composite materials, the astonishing sixty year search, definitive usable results. *Composites Science and Technology*, 182, 107718. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107718>
- Chun, B., & Yoo, D.-Y. (2019). Hybrid effect of macro and micro steel fibers on the pullout and tensile behaviors of ultra-high-performance concrete. *Composites Part B: Engineering*, 162, 344–360. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.026>
- Crespo Sánchez, S. E., Carrión Viramontes, F., Juan, V., Quintana, A., Andrés Hernández, R., José, G., & López, A. (2013). Análisis del deterioro estructural por fatiga y pronóstico de un puente típico de concreto utilizando simulación MonteCarlo. *Publicación Técnica No. 379*, 379.
- Feng, J., Sun, W. W., Wang, X. M., & Shi, X. Y. (2014). Mechanical analyses of hooked fiber pullout performance in ultra-high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 69, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.049>
- García-Taengua, E., Martí-Vargas, J. R., & Serna, P. (2015). Bond of rebars to steel fibre reinforced concrete: Minimum concrete cover requirements to prevent splitting. *Concrete - Innovation and Design: fib Symposium Proceedings*, 259–260. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85015387039&partnerID=40&md5=b69aad26a23e2f1f830457ab152eb0ef>
- Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., & Kawashima, S. (2018). Influence of Steel and Macro-Synthetic Fibers on Concrete Properties. *Fibers*. <https://doi.org/10.3390/FIB6030047>
- Gupta, S., Lin, Y.-A., Lee, H.-J., Buscheck, J., Wu, R., Lynch, J. P., Garg, N., & Loh, K. J. (2021). In situ crack mapping of large-scale self-sensing concrete pavements using electrical resistance tomography. *Cement and Concrete Composites*, 122, 104154. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104154>

- Hou, J., Guo, X., Li, Q., Zhu, D., & Weng, G. J. (2025a). Review on interpretations, applications, and developments of numerical methods in studying interface fracture. *Acta Mechanica*. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04212-6>
- Hou, J., Guo, X., Li, Q., Zhu, D., & Weng, G. J. (2025b). Review on interpretations, applications, and developments of numerical methods in studying interface fracture. *Acta Mechanica*. <https://doi.org/10.1007/s00707-024-04212-6>
- Infant Alex, X., & Arunachalam, K. (2019). Flexural behavior of fiber reinforced lightweight concrete. *Revista de la construcción*, 18(3), 536–544. <https://doi.org/10.7764/RDLC.18.3.536>
- Le, X. (2025). *Fundamentals of Finite Element Analysis (FEA)* (pp. 47–77). https://doi.org/10.1007/978-3-031-64132-9_2
- Li, T., Zhang, J., Yao, Z., Yao, Y., Hu, X., Yu, H., Yang, J., Jin, H., Zhou, M., & Wu, J. (2025). Workability, mechanical properties, pore characteristics and microstructure of magnesium phosphate cement-based concrete: Influence of curing age, fiber type and dosage. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139537>
- Marcos-Meson, V., Solgaard, A., Fischer, G., Edvardsen, C., & Michel, A. (2020). Pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in cracked concrete exposed to wet-dry cycles of chlorides and carbon dioxide – Mechanical performance. *Construction and Building Materials*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117764>
- Meesala, C. (2019). Influence of different types of fiber on the properties of recycled aggregate concrete. *Structural Concrete*, 20, 1656–1669. <https://doi.org/10.1002/suco.201900052>
- Mukhopadhyay, S., & Khatana, S. (2015). A review on the use of fibers in reinforced cementitious concrete. *Journal of Industrial Textiles*, 45, 239–264. <https://doi.org/10.1177/1528083714529806>

- Nieuwoudt, P. D., & Boshoff, W. P. (2017). Time-dependent pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 79, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.006>
- Nili, M., & Afroughsabet, V. (2010). Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 37(8), 879–886. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.03.004>
- Nouri, N., Hosseinpour, M., Yahia, A., & Khayat, K. (2022). Coupled effect of fiber and granular skeleton characteristics on packing density of fiber-aggregate mixtures. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127932>
- Report on Measuring Mechanical Properties of Hardened Fiber-Reinforced Concrete*. (2017). www.concrete.org
- Shafei, B., Kazemian, M., Dopko, M., & Najimi, M. (2021). State-of-the-Art Review of Capabilities and Limitations of Polymer and Glass Fibers Used for Fiber-Reinforced Concrete. *Materials*, 14. <https://doi.org/10.3390/ma14020409>
- Singh, H. (2017a). *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2507-5>
- Singh, H. (2017b). *Steel Fiber Reinforced Concrete*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-2507-5>
- Soroushian, P., & Bayasi, Z. (1991). FIBER-TYPE EFFECTS ON THE PERFORMANCE OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE. *Aci Materials Journal*, 88, 129–134. <https://doi.org/10.14359/1883>
- Soroushian, P., & Lee, C.-D. (1990). Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, 87(5), 433–439. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0025488934&partnerID=40&md5=7f98d5de668a1567eac388fdec99b8d0>

- Specification for Fiber-Reinforced Concrete*. (2015). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C1116_C1116M-10AR15
- Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete*. (2004). ASTM International. https://doi.org/10.1520/A0820_A0820M-04
- Steel Construction Manual. (2017). *Steel Construction Manual*.
- Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. (2022). ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22
- Tonantzin, P. (2014). *Colapsa puente en Morelos; hay tres personas heridas*. <https://www.excelsior.com.mx/nacional/2014/07/26/972877>
- Vandecruys, E., De Smedt, M., Vrijdaghs, R., Verstrynge, E., & Vandewalle, L. (2021). Sectional analysis of the cyclic behavior of steel fiber reinforced concrete. *Structural Concrete*, 22(5), 3123–3139. <https://doi.org/10.1002/suco.202000763>
- Venkateshwaran, S., & Rajesh, A. (2019). A Review on the Study of Strength Properties of High Performance Concrete Using Various Fibers. *International Research Journal of Multidisciplinary Technovation*, 411–415. <https://doi.org/10.34256/irjmtcon56>
- Vijayan, D. S., Sivasuriyan, A., Parthiban, D., Jakimiuk, A., Bayat, H., Podlasek, A., Vaverková, M. D., & Koda, E. (2022). A Comprehensive Analysis of the Use of SFRC in Structures and Its Current State of Development in the Construction Industry. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 7012, 15(19), 7012. <https://doi.org/10.3390/MA15197012>
- Wang, Y., Wu, H., & Li, V. (2000). Concrete Reinforcement with Recycled Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12, 314–319. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2000\)12:4\(314\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2000)12:4(314))
- Wu, H., Shen, A., Cheng, Q., Cai, Y., Ren, G., Pan, H., & Deng, S. (2023). A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265>

- Wu, Z., Shi, C., He, W., & Wu, L. (2016). Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 103, 8–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028>
- Xie, C., Cao, M., Khan, M., Yin, H., & Guan, J. (2021). Review on different testing methods and factors affecting fracture properties of fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121766>
- Zeyad, A. (2020). Effect of fibers types on fresh properties and flexural toughness of self-compacting concrete. *Journal of materials research and technology*, 9, 4147–4158. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.042>
- Zhang, J., Wu, Z., Yu, H., Ma, H., & Da, B. (2022). Mesoscopic Modeling Approach and Application for Steel Fiber Reinforced Concrete under Dynamic Loading: A Review. *Engineering*, 16, 220–238. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2022.01.011>
- Zhang, Z. (2024). Application of finite element analysis in structural analysis and computer simulation. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.2478/amns.2023.1.00273>
- Zhao, C., Wang, Z., Zhu, Z., Guo, Q., Wu, X., & Zhao, R. (2023). Research on different types of fiber reinforced concrete in recent years: An overview. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130075>

APÉNDICE

CÓDIGO EN APDL DE LA SIMULACIÓN DE SFRC

```
!PROGRAMA PARA SIMULACION DE PRUEBA A FLEXION SFRC
/CLEAR
!*****
*****
*CREATE,DATOS
!*****
*****
/NOPR
!/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
/GO
/UIS,MSGPOP,3
/PREP7
MULTIPRO,'START',6
  *CSET,1,3,B,'BASE (cm)',15
  *CSET,4,6,H,'ALTURA(cm)',15
  *CSET,7,9,LAR,'LARGO(cm)',70
  *CSET,10,12,FC,'RESISTENCIA DEL CONCRETO(KG/CM2)',275
  *CSET,13,15,NUC,'MODULO DE POISSON CONCRETO',0.1
  *CSET,16,18,PVOL,'PESO VOLUMETRICO CONCRETO(kg/m3)',2400
  *CSET,61,62,'DIMENSIONES DE LA VIGA DE CONCRETO'
MULTIPRO,'END'
MULTIPRO,'START',7
  *CSET,1,3,PF,'% DE FIBRAS',0.5 !poner 0.5
  *CSET,4,6,DN,'DIAMETRO DE LAS FIBRAS (cm)',0.055
  *CSET,7,9,LN,'LARGO DE LAS FIBRAS (cm)',3.5
  *CSET,10,12,MODUF,'MODULO DE ELASTICIDAD DE LAS FIBRAS (Kg/cm2)',2100000
  *CSET,13,15,MPOIF,'RELACION DE POISSON DE LAS FIBRAS',0.30
  *CSET,16,18,PVOLF,'PESO VOLUMETRICO FIBRAS (kg/m3)',7850
  *CSET,19,21,RESTR,'RESISTENCA A LA TRACCION(kg/cm2)',11217
  *CSET,61,62,'DATOS DE LAS FIBRAS'
MULTIPRO,'END'
MULTIPRO,'START',5
  *CSET,1,3,NDIV,'DIVISIONES DE LA BASE MALLADO',6 !tamaño de los elemento finitos
  *CSET,4,6,TIPEL1,'QUE ELEMENTO FINITO SE USAR',2 !1,2,3
  *CSET,7,9,TIPMALL1,'FORMA PARA MALLAR',1
  *CSET,10,12,CARG,'VALOR DE LA CARGA EN CADA PUNTO (Kg)',850
  *CSET,13,15,NCICL,'CICLOS DE CARGA Y DESCARGA',1
  *CSET,61,62,'CARGA Y DIVISIONES DEL MALLADO TIPO ELEMENTO'
MULTIPRO,'END'
!PASOS PARA LA CARGA-----
PASL=CARG/34
NUM_PASOS=CARG/PASL
*DIM,LABEL,CHAR,1
LABEL(1)='V7-21'
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
PARSAV,SCALAR,'PARAMETROS_%LABEL(1)%','TXT',' '
/CWD,'D:\ANSYS'
!parametros de las distancias de los apoyos y la ubicacion de las cargas en cm
DIST_CEN=10
DIST_APOY=5
*END
!*****
*****
*CREATE,GEOMETRIA
!*****
*****
!en esta subrutina se creara la geometria de la viga
!introducion de la geometria de la viga
!se crea un bloque que representa la viga de concreto
BLC4,0,0,B,H,LAR
```

```

!SFL,7,PRES,1
!configuracion del workplane*****
WPSTYLE,5,5,-H/2,LAR+B,0.003,0,0,,5
WPRO,,, -90.
WPOF,,, -B/2
!configuraciones para el ploteo para tomar capturas
!Apagar el marco de la ventana
/TITLE,GEOMETRIA
/PLOPTS,FRAME,0
/PLOPTS,LOGO,0
/PLOPTS,DATE,2
/VIEW,1,1,1,1
/dev,font,1,Times*New*Roman,400,0,-24,0,0,,
/ANG,1
/REP,FAST
WPSTYLE,,,,,,,,,0
/REPLOT,RESIZE
/RGB,INDEX,100,100,100,0
/RGB,INDEX,80,80,80,13
/RGB,INDEX,60,60,60,14
/RGB,INDEX,0,0,0,15
VPLOT
!plano de trabajo para dividir los volumens en los puntos donde van las cargas y los apoyos
wpro,,,90.000000
wpof,,, (DIST_APOY)
VSBW,ALL
WPCSYS,-1
wpof,,,LAR-(DIST_APOY)
VSBW,ALL
WPCSYS,-1
wpof,,,LAR/2-(DIST_CEN)
VSBW,ALL
WPCSYS,-1
wpof,,,LAR/2+(DIST_CEN)
VSBW,ALL
WPCSYS,-1
NUMMRG,ALL ! Fusionar y eliminar elementos duplicados
NUMCMP,ALL ! Comprobar duplicados después de fusionar
!contar el numero de líneas que se generaron y de kp
*GET,NUM_LINEAS,LINE,0,COUNT
*GET,NUM_KP,KP,0,COUNT
*END
!*****
*****
*CREATE, PROPMAT
!*****
*****

PI=ACOS(-1)
!declaramos el elemento finito para el concreto
!en este caso se hizo para probar como trabajaban diferentes tipos de elementos solid
*IF,TYPE1,EQ,1,THEN
  ET,1,SOLID95
  KEYOPT,1,5,2
  TIPO_ELEM = 'SOLID95'
*ELSEIF,TYPE1,EQ,2,THEN
  ET,1,SOLID186
  TIPO_ELEM = 'SOLID186'
*ELSEIF,TYPE1,EQ,3,THEN
  ET,1,SOLID187
  TIPO_ELEM = 'SOLID187'
*ENDIF
!declaramos el elemento finito para la fibra
ET,2,LINK180
AR=PI*DN**2/4
R,1,AR
!modulo de elasticidad del concreto
EC=8000*SQRT(FC)

```

```

!propiedades del material: concreto
MP,EX,1,EC
MP,PRXY,1,NUC
!propiedades del material: fibras
MP,EX,2,MODUF
MP,PRXY,2,MPOIF
!materia que no aporta muy poco al modelo
MP,EX,3,1
MP,PRXY,3,0.46
!PROPORCION DE FIBRAS EN FUNCION DEL VOLUMEN*****
VOLBL=B*H*LAR
VOLFI=(PI*DN**2/4)*LN
PESO_CONCRETO=PVOL*VOLBL/100/100/100
PESO_FIBRA=PVOLF*VOLFI/100/100/100
*IF,PF,NE,0,THEN
  NFI=NINT((VOLBL)*0.01*PF/VOLFI)
*ELSE
  NFI=0
*ENDIF
*END
! *****
! *****SUBROUTINA PARA MALLAR*****
! *****
*CREATE,MALLADO
DVOL=B/NDIV
ESIZE,DVOL
! para definir si se mallea con triangulos o con cuadrados
! en este caso sera con triangulos y el tamaño del mallado
! 1 para elementos triangulares
! 0 para elementos cuadrados
*IF,TYPE1,EQ,1,THEN
  MSHAPE,1,3D
  MSHKEY,0
*ELSE
  MSHAPE,TIPMALL1,3D
  *IF,TIPMALL1,EQ,1,THEN
    MSHKEY,0 ! ESPECIFICA QUE SE MALLE DE FORMA LIBRE
  *ELSE
    MSHKEY,1 ! ESPECIFICA QUE SE MALLE DE FORMA
  *ENDIF
*ENDIF
! seleccionamos el volumen y le asignamos sus atributos para despues mallarlo
VSEL,S,VOLU,,ALL
VATT,1,,1
VMESH,ALL
*GET,NELEM1,ELEM,0,NUM,MAX
*GET,NUMAX,NODE,0,NUM,MAX
D_NFI=2*NFI
PAR=1
ITER=0 ! Inicializar el contador de iteraciones
!Refinar el mallado hasta tener nodos suficientes para las fibras
*DOWHILE,PAR
  VCLEAR,ALL
  DVOL=B/NDIV
  ESIZE,DVOL
  VMESH,ALL
  *GET,NUMAX,NODE,0,NUM,MAX
  NDIV=NDIV+1
  ITER=ITER+1 ! Incrementar el contador

  *IF,NUMAX,GT,D_NFI,THEN
    PAR=0
  *ELSEIF,ITER,GE,10,THEN ! Detener si se alcanzan 10 iteraciones
    PAR=0
  *ELSE
    PAR=1
  *ENDIF
*ENDDO

```

```

*GET,NELEM1,ELEM,0,NUM,MAX ! Obtener el número de elementos después de mallar el volumen
*END
!*****
*****
*CREATE,FIBRAS
!*****
*****
TYPE,2
REAL,1
MAT,2
/TRIAD,OFF
/PSYMB,CS,0
/REPLOT,FAST
PAR2=1
CONTADOS_FI_CR=0
COUNTE=0
!Generar los elementos de las fibras de acero
*DOWHILE,PAR2
  NODO1=NINT(RAND(1,NUMAX))
  LOCAL,11,1,NX(NODO1),NY(NODO1),NZ(NODO1),NINT(RAND(1,360)),NINT(RAND(1,360)),NINT(RAND(1,360))
  /PSYMB,CS,0
  NODO2=NODE(LN,0,0)
  E,NODO1,NODO2
  *GET,ULTEL,ELEM,O,NUM,MAX
  *GET,LONGEL,ELEM,ULTEL,LENG
  *IF,LONGEL,EQ,0,THEN
    EDELE,ULTEL
    NUMCMP,ELEM
  *ELSE
    COUNTE=COUNTE+LONGEL
    CONTADOS_FI_CR=CONTADOS_FI_CR+1
  *ENDIF
  *IF,CONTADOS_FI_CR,GE,NFI,THEN
    PAR2=0
  *ELSE
    PAR2=1
  *ENDIF
*ENDDO
CSYS,0      ! Se coloca en el sistema de cordnadas global
NUMMRG,KP
NUMMRG,ALL  ! Fusionar y eliminar elementos duplicados
NUMCMP,ALL  ! Comprobar duplicados después de fusionar
ALLSEL,ALL
KSEL,U,,ALL
GPLOT
/REPLOT
!Cuenta realmente cuántas fibras se generaron después de haber generado las figuras aleatorias
ESEL,S,MAT,,2
*GET,NTFIBRAS,ELEM,0,COUNT
VOLTFI=NTFIBRAS*VOLFI
PFR=((VOLTFI*PESO_FIBRA)/PESO_CONCRETO)*100
EPLOT
/AUTO,1
/REP,FAST
/NUMBER,1
/PNUM,ELEM,1
!*VGET,LARGO_FIBRAS,ELEM,all,GEOM,,2
WPSTYLE,,,,,0
/TITLE,PORCENTAJE DE FIBRAS= %PF% ;NUMERO DE FIBRAS= %NTFIBRAS% ;%LABEL(1)%
/REPLOT
!CAPTURAS DE LA DISTRIBUCION ALEATORIA DE LAS FIBRAS Y SU PORCENTAJE
/CWD,'D:\ANSYS\CAPTURAS\FIBRAS'
/IMAGE,SAVE,'%LABEL(1)% POR DE FIBRAS= %PF% ;NUMERO DE FIBRAS= %NTFIBRAS%',JPG
/CWD,'D:\ANSYS'
!Guardar en un matriz el largo de las fibras
*DIM,DATOS_FIBRAS,ARRAY,NTFIBRAS,2,1
!Guardar el numero total de elementos con volumentes y el numero de fibras
ALLSEL,ALL

```



```

*GET,NELEM2,ELEM,0,NUM,MAX
*DO,I,NELEM1+1,NELEM2,1
  *GET,LARGO_FIBRAS,ELEM,I,LENG
  J=I-NELEM1
  DATOS_FIBRAS(J,1)=I
  DATOS_FIBRAS(J,2)=LARGO_FIBRAS
*ENDDO
SAVE,GEOMETRIA_%LABEL(1)%,db
*END
!*****
*****
*CREATE,PASO_A_PASO
!*****
*****
!UIS,MSGPOP,3
FINISH
/SOLU
WPSTYLE,,,,,,,,0
/REPLOT
!restricciones en un apoyo
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,DIST_APOY
!NSEL,A,LOC,Z,LAR-DIST_APOY
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
!restricciones en el segundo apoyo
NSEL,ALL
!NSEL,S,LOC,Z,DIST_APOY
NSEL,S,LOC,Z,LAR-DIST_APOY
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
ALLSEL,ALL
FTMAX=CARG
NTCICL=NINT(((FTMAX/PASL))*NCICL)
SUBPASO=NINT(FTMAX/PASL)      !Numero de subapsos dentro de cada ciclo
FTCONT=1.5*SQRT(FC)          !Esfuerzo de tencion maximo que puede soportar el concreto
FTFIBRAS=AR*RESTR             !Esfuerzo de tencion maximo que puede soportar la fibra
LIM_DEF=((LAR-(DIST_APOY*2))/240)+.5 !limite de deformacion para salir de los ciclos de carga (segun NTC23)
SUBPASO2=(SUBPASO*2)-1
/VIEW,1,1
/ANG,1
/REP,FAST
!Definir las matrices donde vamos a guardas los parametro de interes
*DIM,CARGA,ARRAY,SUBPASO2
*DIM,DESPL,ARRAY,NUMAX,2      ! Matriz para guardar los desplazamientos de todos los nodos
*DIM,DESPLNX1,ARRAY,SUBPASO2,2,NCICL      ! Matriz para guardar los desplazamientos del nodo central en Y
*DIM,DESPL_MAX,ARRAY,SUBPASO2*NCICL,1      ! Matriz para guardar los desplazamientos máximos
*DIM,ESF_FIB,ARRAY,NTFIBRAS      ! Matriz para guardar las esfuerzos en las fibras
*DIM,ESF_CON,ARRAY,NELEM1      ! Matriz para guardar las esfuerzos en el concreto
*DIM,ESF_MAX_FIB,ARRAY,SUBPASO2*NCICL      ! Matriz para guardar el esfuerzos máximos en las fibras
*DIM,DESPL_MAX_NTC,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL+1      !Desplazamiento maximo en el numero total de ciclos
*DIM,ELEMENTOS_FALLADOS,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL !Matriz para guardar el numero de los elementos fallados
*DIM,COR_ELE_CON,ARRAY,NELEM1      ! Matriz para guardar las coordenadas de los elementos de concreto
*DIM,ELEMENTOS_FALLADOS_ACU,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL !Matriz para guardar el numero de los elementos
fallados acumulados
*DIM,POR_ELE_FALLADOS,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL !Matriz para guardar el porcentaje de los elementos fallados
*DIM,DESPL_MAX_CEN,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL+1 !Desp. maximo en el total de ciclos en el nodo del centro
*DIM,FIB_FAL,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL      !Matriz para guardar el numero de fibras falladas
*DIM,FIB_FAL_ACU,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL      !Matriz para guardar el numero de fibras falladas acumulados
*DIM,POR_FIB_FAL,ARRAY,SUBPASO2+1,NCICL      !Matriz para guardar el porcentaje de las fibras falladas
acumulados
*DIM,DET_CARGA,ARRAY,7,1      !Matriz para guardar desplazamiento en le cual se inicia el ciclo de carga
*DIM,TOTAL_CARG,ARRAY,SUBPASO*2*NCICL,4      !Guardar las cargas que se van aplicando en cada paso de carga
!*DIM,SIGMA_F,ARRAY,SUBPASO2*NCICL,1      !!Guardar los esfuerzos en la parte inferior de la viga

```

```

!deflecciones en las que se reiniciara el paso de carga
DET_CARGA(1,1)=0.2/10
DET_CARGA(2,1)=0.5/10
DET_CARGA(3,1)=1/10
DET_CARGA(4,1)=2/10
DET_CARGA(5,1)=3/10
DET_CARGA(6,1)=4/10
DET_CARGA(7,1)=5/10
*DO,I,2,SUBPASO2+1,1
*IF,I,LE,SUBPASO,THEN
    DESPL_MAX_NTC(I,1)=PASL*(I-1)*2
    DESPL_MAX_CEN(I,1)=PASL*(I-1)*2
*ELSE
!DISMINUIR LA CARGA EN LA MISMA MAGNITUD DEL PASO DE CARGA HASTA LLEGARA AL PASL
    DESPL_MAX_NTC(I,1)=2*PASL*(SUBPASO2-I+2)
    DESPL_MAX_CEN(I,1)=2*PASL*(SUBPASO2-I+2)
*ENDIF
*ENDDO
!GUARDAR LA COORDENADA EN Z DE TODOS LOS ELEMENTOS DE CONCRETO
*DO,I,1,NELEM1,1
    *GET,COR_ELE_CON(I,1),ELEM,I,CENT,Z
*ENDDO
CON_ELE_FALL=0          !Cuanta cuantos elementos fallan en cada ciclo de carga
CON_ELE_FALL_ACU=0      !Acumula en numero de elemetos fallados
CON_FIB_FALL=0          !Cuanta cuantas fibras fallan en cada ciclo de carga
CON_FIB_FALL_ACU=0      !Acumula en numero de fibras que fallan
SELTOL,1.0E-4
CONTADOR2=0
CONTADOR3=0             !para contar el total de ciclos
FTDES=0
*DO,K3,1,NCICL,1
    CONTADOR1=0
    CONTADOR3=CONTADOR3+1
    FTDES=0
    FT1=0
    *DO,FT,1,SUBPASO2,1
        CONTADOR1=CONTADOR1+1    !Contador de pasos se reinicia en cada ciclo
        CONTADOR2=CONTADOR2+1    !Contador que no se reinicia, llega al numero total de pasos
        CONTADOR3=CONTADOR3+1
        !selecinar todos los nodos y borrar las fuerzas para reinicar el proceso
        /SOLU
        NSEL,ALL
        FDELE,ALL,ALL
        TOTAL_CARG(CONTADOR3,1)=K3
        TOTAL_CARG(CONTADOR3,2)=CONTADOR3
        *IF,FTDES,EQ,0,THEN
            FT1=FT1+1 !Incrementar carga
            *IF,FT1,GE,SUBPASO,THEN
                FT1=SUBPASO ! Limitar carga a SUBPASO
                FTDES=1     ! Iniciar descarga
            *ELSE
            *ENDIF
        *ELSE
        FT1=FT1-1 ! Decrementar carga
        *IF,FT1,LT,1,THEN ! Terminar ciclo cuando la carga llegue a PASL
            *EXIT
        *ENDIF
    *ENDIF
    TOTAL_CARG(CONTADOR3,3)=FT1*2*PASL
    !guardara los esfuerzos en la parte inferior de la viga kg/cm2
    !SIGMA_F(CONTADOR3,1)=(3*(FT1*PASL*2)*(LAR-2*DIST_APOY))/(4*B*H*H)
    !aplicar las fuerzas en los cuartos
    NSEL,ALL
    NSEL,S,LOC,Z,LAR/2-(DIST_CEN)
    NSEL,R,LOC,Y,H
    *GET,NUM_NODOS1,NODE,0,COUNT
    F,ALL,FY,-(FT1*PASL)/NUM_NODOS1

```

```

NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,Z,LAR/2+(DIST_CEN)
NSEL,R,LOC,Y,H
*GET,NUM_NODOS1,NODE,0,COUNT
F,ALL,FY,-(FT1*PASL)/NUM_NODOS1

!resolver
ALLSEL,ALL
ACEL,,.981
SOLVE
FINISH
/POST1
!Ploteo de la deformada
/TITLE,CICLO -%K3%- PASO -%CONTADOR1%- CARGA -%PASL*FT1*2%- ELE FALL -%CON_ELE_FALL%
ESEL,S,MAT,,1
PLDISP,0
/DSCALE,ALL,AUT
/NUMBER,1
/PNUM,MAT,1
/REPLLOT,FAST
/CWD,'D:\ANSYS\CAPTURAS\FALLA'
/IMAGE,SAVE,'%LABEL(1)% CICLO_%K3%_PASO_%CONTADOR1%',JPG
/CWD,'D:\ANSYS'
ALLSEL,ALL

!Ubicamos un nodo al centro del claro
!y guardamos su desplaamiento en y y la suma de los desplazamientos en cada uno de los pasos
NODOX1=NODE(B/2,0,LAR/2)
*GET,DESPX1,NODE,NODOX1,U,Y
*GET,DESPSUM1,NODE,NODOX1,U,SUM
DESPLNX1(CONTADOR1,1,K3)=DESPX1
DESPLNX1(CONTADOR1,2,K3)=DESPSUM1

!Guardar los desplazamientos de todos los nodos en la matriz DESPL, de fibras y de concreto
*DO,I,1,NUMAX,1
  *GET,DESP,NODE,I,U,SUM
  DESPL(I,1)=I
  DESPL(I,2)=DESP
*ENDDO
!Guardar los desplazamientos máximos
*VSCFUN,MAYOR_DESPL_Y,MAX,DESPL(1,2)
DESPL_MAX(CONTADOR2,1)=MAYOR_DESPL_Y
!Obtener los esfuerzos en las fibras y guardalos en una matriz
ESEL,S,TYPE,,2
ETABLE,NF,SMISC,1
*DO,I2,NELEM1+1,NELEM2,1
  *GET,ESF_FIB(I2-NELEM1),ETAB,1,ELEM,I2
*ENDDO
!buscar el esfuerzo maximo en las fibras y guardarlo en una matriz con el numero total de ciclo
*VSCFUN,FIBMA,MAX,ESF_FIB
ESF_MAX_FIB(CONTADOR2,1)=FIBMA
ESEL,ALL
!Obtner los esfuerzon en el concreto y guardalos en una matriz
ESEL,S,TYPE,,1
ETABLE,ESFEL,S,1
*DO,IP,1,NELEM1,1
  *GET,ESF_CON(IP),ETAB,2,ELEM,IP
*ENDDO
ESEL,ALL
CON_ELE_FALL=0 !Contador de elementos fallados
!en cada paso de carga modifica los elementos que tengan un esfuerzo mayor al esfuerzo de tencion maximo
! ESEL,S,TYPE,,1

*DO,I,1,NELEM1,1
  *IF,ESF_CON(I),GT,FTCONT,THEN
    !Condiconal para cambiar el elemento solo si está en el centro de los apoyos
    ! Verificar si la coordenada en Z del centroide del elemento está en el rango deseado
    *IF,COR_ELE_CON(I),GT,DIST_APOY,AND,COR_ELE_CON(I,1),LT,LAR-DIST_APOY,THEN

```

```

    FINISH
    /PREP7
    EMODIF,I,MAT,3
    CON_ELE_FALL=CON_ELE_FALL+1
    CON_ELE_FALL_ACU=CON_ELE_FALL_ACU+1
    FINISH
    /POST1
    *ELSE
    *ENDIF
    *ELSE
    *ENDIF
    *ENDDO

CON_FIB_FALL=0
!cambiar las propiedades de los elementos fibras que tengan un esfuerzo mayor al esfuerzo de tencion maximo
*DO,I,1,NTFIBRAS,1
    *IF,ESF_FIB(I),GT,FTFIBRAS,THEN
        FINISH
        /PREP7
        EMODIF,DATOS_FIBRAS(I,1),MAT,3
        CON_FIB_FALL=CON_FIB_FALL+1
        CON_FIB_FALL_ACU=CON_FIB_FALL_ACU+1
        FINISH
        /POST1
        *ELSE
        *ENDIF
    *ENDDO
    ESEL,U,MAT,,2
    /DSCALE,ALL,OFF
    PLETAB,ESFEL,,AVG
    /CWD,'D:\ANSYS\CAPTURAS\ESFUERZOS'
    /IMAGE,SAVE,'%LABEL(1)% ESFUERZOS; CICLO_%K3%_PASO_%CONTADOR1% POR %PF%',JPG
    /CWD,'D:\ANSYS'
    ELEMENTOS_FALLADOS(CONTADOR1+1,K3)=CON_ELE_FALL
    ELEMENTOS_FALLADOS_ACU(CONTADOR1+1,K3)=CON_ELE_FALL_ACU

!Guardar los desplazamientos maximos en cada nodo en cada paso de carga y en todos los ciclos
DESPL_MAX_NTC(CONTADOR1+1,K3+1)=MAYOR_DESPL_Y
DESPL_MAX_CEN(CONTADOR1+1,K3+1)=DESPSUM1
TOTAL_CARG(CONTADOR3,4)=DESPSUM1
! Verificar si se alcanzó DET_CARGA para iniciar descarga
!si el desplazamiento es mayor que DET_CARGA(K3,1) y aun no llegamos a la parte de descarga empezar la descarga
*IF,FTDES,EQ,0,AND,DESPSUM1,GT,DET_CARGA(K3,1),THEN
    FTDES=1
    !que sea igual a 1 indica que ya estamos en la parte de descarga
    !por que alcanzamos el desplazamiento maximo establecido para empezar la descarga
    *ELSE
    *ENDIF
    !si el desplazamiento maximo es mayor al limite de deformacion salir del ciclo
    *IF,DESPSUM1,GT,LIM_DEF,THEN
        *EXIT
    *ELSE
    *ENDIF
    *ENDDO
    !si el desplazamiento maximo es mayor al limite de deformacion salir del ciclo
    *IF,DESPSUM1,GT,LIM_DEF,THEN
        *EXIT
    *ELSE
    *ENDIF
    *ENDDO
    !Matriz de los % de elementos fallados en cada ciclo de carga
    *DO,I,1,SUBPASO+1,1
        *DO,J,1,NCICL,1
            POR_ELE_FALLADOS(I,J)=ELEMENTOS_FALLADOS_ACU(I,J)/NELEM1*100 !Porcentaje de elementos fallados en
cada ciclo de carga
        *ENDDO
    *ENDDO
    !SAVE,RESULTADOS-%LABEL(1)%,db

```

```

SAVE,RESULTADOS-%LABEL(1)%-PAS %NUM_PASOS%-CAR %CARG*2%,db
*END
!*****
*****
*CREATE,DIAGRAMAS
*DIM,GRAFICA1,TABLE,SUBPASO2+1,NCICL+1
*DO,I,1,SUBPASO2+1,1
  *DO,J,1,NCICL+1,1
    GRAFICA1(I,J)=DESPL_MAX_CEN(I,J)
  *ENDDO
*ENDDO
*END
!SUBROUTINAS PARA CREAR LOS ARCHIVOS DE TEXTO DEPENDIENDO DEL NUMERO DE
CICLO*****
*CREATE,GRAFICA1CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
  *VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2), , , , , ,
(2F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA2CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3), , , , , ,
(3F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA3CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3),GRAFICA1(1,4), , , , , ,
(4F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA4CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3),GRAFICA1(1,4),GRAFICA1(1,5), , , , , ,
(5F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA5CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3),GRAFICA1(1,4),GRAFICA1(1,5),GRAFICA1(1,6), , , , ,
(6F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA6CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3),GRAFICA1(1,4),GRAFICA1(1,5),GRAFICA1(1,6),GRAFIC
A1(1,7)
(7F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,GRAFICA7CICLO
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'GRAFICA_%LABEL(1)%','TXT',' '
*VWRITE,GRAFICA1(1,1),GRAFICA1(1,2),GRAFICA1(1,3),GRAFICA1(1,4),GRAFICA1(1,5),GRAFICA1(1,6),GRAFIC
A1(1,7),GRAFICA1(1,8)

```

```

(8F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
!*****
*****
*CREATE,ELEM_FAL1
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1), , , , , , ,
(2F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL2
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2), , , , , ,
(3F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL3
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2),POR_ELE_FALLADOS(1,3), , , , , ,
(4F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL4
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2),POR_ELE_FALLADOS(1,3),POR_ELE_FALLADO
S(1,4), , , , ,
(5F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL5
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2),POR_ELE_FALLADOS(1,3),POR_ELE_FALLADO
S(1,4),POR_ELE_FALLADOS(1,5), , , , ,
(6F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL6
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2),POR_ELE_FALLADOS(1,3),POR_ELE_FALLADO
S(1,4),POR_ELE_FALLADOS(1,5),POR_ELE_FALLADOS(1,6), , , , ,
(7F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ELEM_FAL7
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'ELEM_FALL_%LABEL(1)%', 'TXT', ' '
*VWRITE,POR_ELE_FALLADOS(1,1),POR_ELE_FALLADOS(1,2),POR_ELE_FALLADOS(1,3),POR_ELE_FALLADO
S(1,4),POR_ELE_FALLADOS(1,5),POR_ELE_FALLADOS(1,6),POR_ELE_FALLADOS(1,7), , , ,
(8F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END
*CREATE,ansuitmp3
*CFOPEN,'ESF_FIB_%LABEL(1)%', 'TXT', 'ESFUERZOS FIBRAS\

```

```

*VWRITE,ESF_FIB(1),,,,,,,,,,
(F)
*CFCLOS
*END
*CREATE,GUARDASTXT
!PARA GUARDARA EL ARCHIVO TXT SEGUN EL NUMERO DE CICLOS DE CARGA
*IF,NCICL,EQ,1,THEN
  /INPUT,GRAFICA1CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL1
*ELSEIF,NCICL,EQ,2,THEN
  /INPUT,GRAFICA2CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL2
*ELSEIF,NCICL,EQ,3,THEN
  /INPUT,GRAFICA3CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL3
*ELSEIF,NCICL,EQ,4,THEN
  /INPUT,GRAFICA4CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL4
*ELSEIF,NCICL,EQ,5,THEN
  /INPUT,GRAFICA5CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL5
*ELSEIF,NCICL,EQ,6,THEN
  /INPUT,GRAFICA6CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL6
*ELSEIF,NCICL,EQ,7,THEN
  /INPUT,GRAFICA7CICLO
  /INPUT,ELEM_FAL7
*ENDIF
/INPUT,PRUEBAS
*END
!*****
*****
*USE,DATOS
*USE,GEOMETRIA
*USE,PROPMAT
*USE,MALLADO
*USE,FIBRAS
*USE,PASO_A_PASO
*USE,DIAGRAMAS
*USE,GUARDASTXT
!*****
*****
*CREATE,PRUEBAS
/CWD,'D:\ANSYS\TXT'
*CFOPEN,'TOTALCARGAS %LABEL(1)%.TXT',
*VWRITE,TOTAL_CARG(1,1),TOTAL_CARG(1,2),TOTAL_CARG(1,4),TOTAL_CARG(1,3),,,,,,
(F,F,F,F)
*CFCLOS
/CWD,'D:\ANSYS'
*END

```