



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo de Fin de Grado

**MODELO DE ELEMENTOS FINITOS
NO-LINEAL DE UNA PROBETA
PARA ENSAYO DE HORMIGÓN
CON FIBRAS**

Alumno: Luis Ernesto Morales Baltodano

Tutor: Jesús Donaire Ávila

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Noviembre, 2020



Universidad de Jaén

Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Linares
Departamento de ingeniería Mecánica y Minera

Don JESÚS DONAIRE ÁVILA, tutor del Proyecto de Fin de Carrera titulado: modelo de elementos finitos no-lineal de una probeta para ensayo de hormigón con fibras, que presenta Luis Ernesto Morales Baltodano, autoriza su presentación para su defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Linares.

Jaén, noviembre de 2020

El alumno:

Luis Ernesto Morales Baltodano

El tutor:

Don Jesús Donaire Ávila

INDICE

Indice	i
Lista de Tablas.....	iii
Lista de Figuras	iv
Resumen.....	vi
Abstract.....	vi
1. Introducción	1
2. Objetivos	3
3. Estado del arte	4
3.1. Hormigón	4
3.2. Fibras	6
3.3. Fibras de acero	7
3.4. Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA)	8
3.5. Modelización de ruptura del hormigón	9
4. Modelo de elementos finitos de una probeta de hormigón reforzado con fibras .	11
4.1. Modelo de elementos finito (MEF).....	11
4.1.1. Geometría y mallado	11
4.1.2. Condiciones de contorno	13
4.1.3. Modelo no-lineal tipo smeared-crack, para el hormigón reforzado con fibra metálica.	14
4.2. Modelo constitutivo de los materiales constituyentes.....	15
4.2.1. Hormigón	15
4.2.2. Fibras	17
5. Análisis numérico para la calibración de los modelos numéricos sin fibra y con fibras.....	19
5.1. Caracterización de las probetas	19
5.2. Calibración del modelo de hormigón sin fibra S0	20
5.2.1. Definición del modelo numérico S0	20
5.2.2. Resultados del modelo numérico de la probeta de hormigón sin fibras S0	22

5.3. Calibración del modelo de hormigón con fibra S26	28
5.3.1. Definición del modelo numérico S26	28
5.3.2. Resultados del modelo numérico de la probeta de hormigón con fibra S26	30
5.4 Modelos numéricos desechados	37
5.4.1 Resultado de modelos desechados sin fibra (S0)	37
5.4.2 Resultado de modelos desechados con fibra (S26)	38
6. Estudio paramétrico	39
6.1. Resultados del modelo numérico del estudio paramétrico	39
7. Estimación del factor de atenuación	42
7.1 Resultado de la estimación del factor de atenuación, “c”	42
8. Conclusiones	43
9. Bibliografía	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Proporciones de mezcla de materiales (hormigón convencional).....	4
Tabla 3.2. Métodos de ensayos para hormigón en estado fresco.	4
Tabla 3.3. Métodos de ensayos para hormigón en estado endurecido.	5
Tabla 3.4. Tipos de fibras más comunes y sus propiedades.	6
Tabla 5.1. Parámetros de entrada de VecTor2.....	20
Tabla 5.2. Resultados del hormigón S0 obtenidos en la prueba experimental.....	20
Tabla 5.3. Característica de fibra de acero utilizadas en la prueba experimental. ..	29
Tabla 7.1. Parámetros característicos de la probeta S0.	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.0. Evolución de mezclas de hormigón.	2
Figura 3.1. Curvas típicas carga-deflexión, para matrices con y sin fibras. [2].....	6
Figura 4.1. Sección de la probeta.	12
Figura 4.2. Simulación de media probeta con mallado de elementos finitos.	13
Figura 4.3. Representación del mallado de la probeta.	13
Figura 4.4. Condiciones de contorno.	14
Figura 4.5. Modelos utilizados en esta investigación en el programa VecTor2: (a) modelo S0 y (b) modelo S26.	17
Figura 5.1. Números de repeticiones de carga y factor de incremento.	19
Figura 5.2. Entrada de los resultados de la prueba experimental del hormigón S0 en VecTor2.	21
Figura 5.3. Resultados de fractura de probeta S0: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.....	22
Figura 5.4. Estado tensional inicial, probeta S0.....	23
Figura 5.5. Estado tensional antes del pico, probeta S0.....	23
Figura 5.6. Estado tensional en la carga máxima, probeta S0.	24
Figura 5.7. Estado tensional después del pico, probeta S0.....	24
Figura 5.8. Estado tensional al final de la carga, probeta S0.....	25
Figura 5.9. Formación de fisura estado tensional inicial, probeta S0.	26
Figura 5.10. Formación de fisura estado tensional antes del pico, probeta S0.	26
Figura 5.11. Formación de fisura estado tensional máximo, probeta S0.....	27
Figura 5.12. Formación de fisura estado tensional después del pico, probeta S0. .	27
Figura 5.13. Formación de fisura estado tensional final, probeta S0.....	28
Figura 5.14. Caracterización de fibra en VecTor2.	29
Figura 5.15. Entrada de los resultados de la prueba experimental del hormigón S26 en VecTor2.	29
Figura 5.16. Resultados de fractura de probeta S26: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD	30
Figura 5.17. Estado tensional inicial, probeta S26.....	31
Figura 5.18. Estado tensional antes del pico, probeta S26.....	32
Figura 5.19. Estado tensional en la carga máxima, probeta S26.	32
Figura 5.20. Estado tensional después del pico, probeta S26.....	33
Figura 5.21. Estado tensional al final de la carga, probeta S26.....	33
Figura 5.22. Formación de fisura estado tensional inicial, probeta S26.	34
Figura 5.23. Formación de fisura estado tensional antes del pico, probeta S26.	35
Figura 5.24. Formación de fisura estado tensional máximo, probeta S26.....	35

Figura 5.25. Formación de fisura estado tensional después del pico, probeta S26	36
Figura 5.26. Formación de fisura estado tensional final, probeta S26.....	36
Figura 6.1. Resultados de fractura de probetas con diferentes dosificaciones de fibra metálica, S0, S7.5, S13, S26, S52, S117.5, S157: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.....	39

RESUMEN

Con este trabajo, se pretende estudiar el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibras, analizando fundamentalmente la curva de ablandamiento a tracción del mismo. Para ello, se considera una probeta de hormigón reforzada con fibras metálicas sometida a flexo compresión.

Se realiza un modelo numérico no-lineal de elementos finitos en tensión plana del tipo fisura difuminada ("*smeared crack*"), en el que la armadura son fibras metálicas. El modelo es calibrado mediante los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio sobre dicha probeta.

Una vez calibrado el modelo numérico, se realiza un estudio paramétrico para analizar la influencia de la cuantía de fibra metálica en el comportamiento mecánico a tracción del hormigón.

Por último, se obtienen parámetros característicos del modelo numérico utilizado, de tal manera que esta información puede ser útil en investigaciones posteriores como, por ejemplo: el factor de atenuación.

ABSTRACT

The aim of this work is the study of the mechanical behaviour of fiber-reinforced concrete, mainly analysing its tensile softening curve. For this purpose, a concrete specimen reinforced with metal fibers subjected to flexo-compression is considered. A non-linear numerical model of flat tension finite elements of the diffuse crack type (*smeared crack*) is made, in which the reinforcement is made of metallic fibers. The model is calibrated using the results obtained in laboratory tests on this specimen.

Once the numerical model has been calibrated, a parametric study is performed to analyse the influence of the amount of metal fibre on the mechanical behaviour of the concrete under tension.

Finally, characteristic parameters of the numerical model used are obtained, which can be useful in subsequent investigations such as attenuation factor.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen construcciones realizadas por el hombre que datan desde hace más de 2000 años aproximadamente; el hombre descubrió que, al mezclar un material, con contenido de carbonato de calcio (CaCO_3) y agua (H_2O), se formaba una pasta que fragua y endurece, razón por la cual se han encontrado construcciones que han perdurado hasta en la actualidad:

- En Egipto, encontramos La Pirámide de Guiza, la cual data 2570 antes de Cristo.
- En Roma, la civilización romana, realizó construcciones como El Coliseo, El Panteón y los alcantarillados hace aproximadamente 2000 años.
- El Templo del Gran Jaguar, construida por civilizaciones mayas en Guatemala en el año 734.
- En Perú, se localizaron grandes ciudades construidas por las civilizaciones incas, como por ejemplo el Machu Picchú, en el siglo XV.

Con el pasar del tiempo, estas construcciones han logrado resistir a acciones físicas y ataques químicos, que puedan deteriorar dichas estructuras manteniendo así sus encantos visuales, con la salvedad que en la actualidad las construcciones civiles, se realizan con secciones y elementos estructurales de mucho menor tamaño.

A inicio del siglo IX, se dieron grandes avances en la mezcla de estos materiales para llegar a lo que conocemos hoy en día como es el hormigón.

Joseph Aspdin, en el año 1824, tras una serie de experimentos y pruebas de distintos materiales, logró patentar la producción de cemento Portland, en Londres, Inglaterra. Gracias a este acontecimiento, se ha venido realizando mejoras en los métodos de producción del hormigón y en los métodos constructivos, logrando construir diversos elementos, estructurales y no estructurales, como bloques, ladrillos, losetas, muros, etc.

En el año 1845, Isaac Johnson, mejoró la formulación de la fabricación de cemento al calcinar la mezcla de caliza y arcilla, obteniendo como resultado el Clinker.

En el año 1855, se comenzó a utilizar el hormigón con armadura de acero, desarrollado por el constructor William Wilkinson.

En el año 1861, se inició a utilizar lo que hasta el día de hoy conocemos como hormigón armado cuando se introdujo en una pieza de hormigón un enmallado de alambre.

En el inicio del siglo XX, fue realmente el crecimiento de la industria y de la construcción, donde se notó enormemente, ya que se realizaron mejoras considerables en la fabricación sistemática y en el control de calidad en el cemento.

El hormigón pretensado, tuvo un desarrollo notable desde el año 1940, dada la escases de acero en Europa. Así, en el año 1951, en Philadelphia, Estados Unidos, se construyó un puente de vigas con este tipo de hormigón.

Como podemos apreciar, existe una larga historia de cómo ha venido evolucionando las construcciones civiles por medio de estos materiales tan importantes como son el cemento y del hormigón.

La ciencia e ingeniería de materiales, ha venido desarrollando diferentes componentes que mejoran las propiedades del hormigón, por lo que en la actualidad el hormigón no es únicamente una mezcla de cemento, agua y áridos, sino que, para maximizar sus prestaciones, se incorporan distintos aditivos y/o adiciones.

La incorporación de adiciones como las fibras en la matriz del hormigón, tiene como finalidad, además de brindar una mejor cohesión, principalmente incrementar la resistencia a tensión y reducir el riesgo de fisuración.

En la actualidad existen recomendaciones que marcan pautas sobre el uso del hormigón y sus componentes avalados por un sin números de pruebas experimentales, normalizadas por asociaciones tales como American Concrete Institute (ACI).



Figura 1.0. Evolución de mezclas de hormigón.

2. OBJETIVOS

En este trabajo fin de grado se pretende estudiar el comportamiento del hormigón reforzado con fibras acero (HRFA).

Por lo tanto, se proponen los siguientes objetivos:

- Realizar un modelo numérico no-lineal tipo *smeared crack*, capaz de reproducir los resultados experimentales obtenidos en probetas de hormigón con fibra sometidas a cargas crecientes a flexo-tracción.
- Realizar un estudio paramétrico, con los resultados obtenidos con incrementos de dosis de fibra.
- Calcular el factor de atenuación (c), en los casos analizados en este trabajo y compararlo con los propuestos en la literatura.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1. Hormigón

El hormigón es un material compuesto, formado de la mezcla de agua, cemento, árido fino y árido grueso cuando es hormigón convencional. En la medida de lograr una característica deseada del hormigón en cuanto a resistencia y trabajabilidad depende de la dosificación y la calidad de cada componente, pudiendo exponenciar sus características mecánicas agregándole a la mezcla aditivos y/o adiciones. Las dosificaciones aproximadas en porcentajes de un hormigón convencional están dadas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Proporciones de mezcla de materiales (hormigón convencional).

Cemento	15%
Agua	10%
Árido fino	35%
Árido grueso	40%

Existen varias metodologías de ensayos normalizados, donde se pueden determinar sus propiedades ya sea en estado fresco, como endurecido, las cuales se describen en las tablas 3.1 y 3.2 respectivamente.

Tabla 3.2. Métodos de ensayos para hormigón en estado fresco.

Norma UNE-ES		Ensayo en estado fresco
12350	1	Toma de muestras y aparatos comunes.
12350	2	Ensayo de asentamiento.
12350	3	Ensayo Vebe.
12350	4	Grado de compactibilidad.
12350	5	Ensayo de la mesa de sacudidas.
12350	6	Densidad.
12350	7	Contenido de aire. Métodos de presión.
12350	8	Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento.
12350	9	Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V
12350	10	Hormigón autocompactante. Método de la caja en L
12350	11	Hormigón autocompactante. Ensayo de segregación por tamiz.
12350	12	Hormigón autocompactante. Ensayo con el anillo japonés

Tabla 3.3. Métodos de ensayos para hormigón en estado endurecido.

Norma UNE-ES		Ensayo en estado endurecido
12390	1	Forma, dimensiones y otras características de las probetas y moldes.
12390	2	Fabricación y curado de probetas para ensayos de resistencia.
12390	3	Determinación de la resistencia a compresión de probetas.
12390	4	Resistencia a compresión. Características de la máquina de ensayo.
12390	5	Resistencia a flexión de probetas.
12390	6	Resistencia a tracción indirecta de probetas.
12390	7	Densidad del hormigón endurecido.
12390	8	Profundidad de penetración de agua bajo presión.
12390	9	Resistencia al hielo-deshielo. Pérdida de masa superficial.
12390	10	Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón a niveles atmosféricos de dióxido de carbono.
12390	11	Determinación de la resistencia a los cloruros del hormigón, difusión unidireccional.
12390	12	Determinación de la resistencia a la carbonatación del hormigón. Método de carbonatación acelerada.
12390	13	Determinación del módulo secante de elasticidad en compresión
12390	14	Método semiadiabático para la determinación del calor liberado por el hormigón durante el proceso de endurecimiento.
12390	15	Método adiabático para la determinación del calor liberado por el hormigón durante el proceso de endurecimiento.
12390	16	Determinación de la retracción del hormigón.
12390	17	Determinación de la fluencia del hormigón a compresión.

Desde mediados del siglo XIX se ha venido añadiendo distintos tipos de materiales para solventar y/o mejorar las propiedades mecánicas del hormigón.

El hormigón tiene la capacidad de obtener resultados muchos mayores a compresión que a tracción, por lo que se recurre a la metodología de hormigones armados como una solución ante esta problemática, la cual consta de barras de aceros embebidas dentro del hormigón, sin embargo, existen otros elementos que se pueden añadir para sufragar esta debilidad a un menor costo, tanto en lo económico, como en la metodología constructivas: las fibras.

El uso de las fibras en el hormigón, puede sustituir a las barras de acero parcial o totalmente, siendo esto un beneficio económico y en reducción de tiempo en la ejecución de cualquier obra.

En España, existe un documento denominado, Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08) [1], donde menciona que sus usos pueden ser tanto estructurales

como no estructurales y en ambos casos, se obtiene un mejor desempeño que un hormigón convencional siempre que su dosificación sean en proporciones menores al 2% en volumen por m^3 de hormigón. Existen pruebas experimentales donde se ha constatado como resultado que el % de volumen de fibra (V_f) es directamente proporcional a la resistencia a tracción alcanzada.

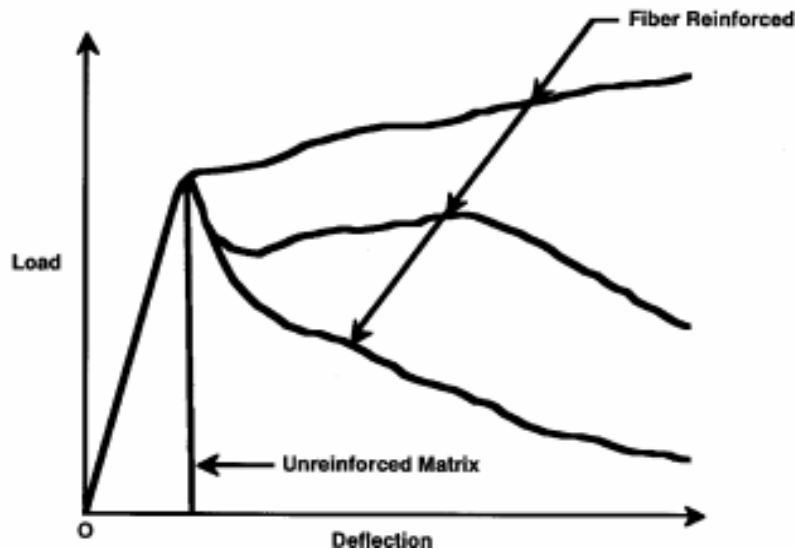


Figura 3.1. Curvas típicas carga-deflexión, para matrices con y sin fibras. [2]

3.2. Fibras

El documento del ACI 544.5R 2010 (Informe sobre las propiedades físicas y durabilidad del hormigón reforzado con fibra) [3], menciona un listado de una amplia variedad de fibras que se pueden utilizar en el hormigón, donde se describen sus características principales tal y como se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Tipos de fibras más comunes y sus propiedades.

Tipo de fibra	Diámetro equivalente (mm)	Densidad (kg/m^3)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25

Tipo de fibra	Diámetro equivalente (mm)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de rotura (%)
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

En el EHE-08, se encuentra un anejo exclusivo para este tipo de material en el cual las clasifica en fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas, siendo las 2 primeras las más utilizadas, principalmente para aumentar las resistencias a tracción y evitar la aparición de fisura por contracción.

Las fibras son dosificadas al hormigón en estado fresco, en la planta central hormigonera o bien, en la obra, cuidando que la dosificación empleada no disminuya el asentamiento solicitado.

3.3. Fibras de acero

Existe una gran variedad de tipos de fibras de acero con distintas formas (rectas, con ganchos, corrugadas, etc.) y con diferentes secciones (circulares, cuadrados, triangulares, etc.), las cuales oscilan desde los 25 mm hasta los 60 mm de longitud y una sección desde los 0.30 mm hasta 1.00 mm de diámetro, siendo estas características geométricas, las que influyen en el comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA), incrementando la ductilidad y tenacidad.

La norma UNE-EN-14889-1 [4] define a la fibra como “*elementos rectos y deformados de alambres de acero estirado en frío, recortes de fibras de acero rectas o deformadas, fibras extraídas fundidas, fibras estiradas en frío y fibras molidas de bloques de acero que son adecuados para su mezcla homogénea con hormigón o mortero*”, detalla, además, las especificaciones y conformidades de uso.

El uso de fibras de acero en el hormigón reduce la aparición de micro y macro fisura y aumenta sustancialmente la resistencia a tracción del hormigón.

El ACI 544.1R 96 (Informe sobre hormigón reforzado con fibra), recomienda dosificaciones hasta en 1.5 % de V_f sin embargo, se han realizado pruebas experimentales hasta de un 2% de V_f . Las dosificaciones más utilizadas en la práctica oscilan, entre 1 y 2% de V_f ya que en dosificaciones por debajo del 1% de V_f , el resultado no es significativo y en dosificaciones superiores al 2% del V_f , se produce un aglomeramiento de fibras que puede estropear la colocación del hormigón.

3.4. Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (HRFA)

Al añadir fibras de acero al hormigón convencional, se obtiene el HRFA, siendo este superior en prestaciones que el primero; esta diferencia de características mecánicas está determinada por las características geométricas de la fibra de acero, las cuales mejoran las siguientes propiedades del hormigón:

- Compresión.
- Tracción directa uniaxial.
- Tracción indirecta por astillamiento (ensayo brasileño).
- Tracción indirecta por flexión (medida de la tenacidad y de la energía de fractura).
- Corte y torsión.
- Fatiga.
- Impacto.
- Abrasión.
- Fluencia

La norma UNE-EN 14651 [5], hace referencia al método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).

El HRFA, frecuentemente es utilizado para pavimentos rígidos con diferentes tipos de tráfico, principalmente para el control de fisuración y/o para aumentar la resistencia a tracción.

El HRFA, también es utilizado en túneles como revestimiento de las paredes por medio de *shotcrete*, siendo este tipo de HRFA proyectado ya sea por medio de vía húmeda o seca, ayudando a minimizar el porcentaje de rebote, reduciendo el desperdicio del hormigón en su colocación.

Un inconveniente del HRFA, es que cuando se realizan colocaciones por medio de sistemas bombeados o proyectados, se reduce la vida útil de la tubería en comparación al hormigón convencional, por ello, se recomienda que el HRFA contenga una cuantía de cemento muy superior al hormigón convencional o bien que la relación agua/cemento sea mucho menos que el hormigón convencional.

El HRFA, también es utilizado para la fabricación de elementos prefabricados donde la industria de fabricación de estos elementos, ha tenido una importante mejoría en la calidad y durabilidad de dichas piezas, consiguiendo beneficios económicos, ya que la inclusión de fibra permite optimizar barras de acero, total o parcialmente, al no tener recubrimiento o bien en el proceso de producción del hormigón, aprovechando el incremento de resistencia a tracción para optimizar la cantidad de cemento en la mezcla, permitiendo mantener el cumplimiento de las especificaciones solicitadas.

3.5. Modelización de ruptura del hormigón

Experimentalmente, en los laboratorios de control de calidad, para el estudio del beneficio de la fibra en hormigón, se realiza una comparación de la resistencia a flexión obtenida a 2 probetas de hormigón; una probeta con contenido de fibra y otra probeta sin fibra. Las probetas son vigas prismáticas, las cuales se apoyan en 2 soportes separados y se aplica una carga en el centro de la probeta, tal y como se detalla en la norma UNE-EN 12390-5 [6].

Para conocer el comportamiento de la abertura de fisura y el desplazamiento de flecha sometido a carga uniaxial, se emplea la norma UNE-ES 14651 la cual se utilizan vigas primaticas con una entalla en el medio de la viga, que por medio de un transductor (transformador diferencial lineal variable), realiza la medición de la abertura de fisura y desplazamiento.

Gracias a la informática existen diferentes softwares, donde se pueden realizar simulaciones de modelos numéricos, capaces de resolver problemas del tipo ingenieriles, como es el de estructuras. VecTor 2, es un software, está basado en la teoría de campo de compresión modificada para el análisis de elementos finito no lineal de estructuras de hormigón permitiendo realizar simulaciones de elementos para conocer sus comportamientos cuando son sometidos a esfuerzos de tensión y compresión.

Estos modelos sirven de herramienta para realizar ensayos virtuales donde se conocen los comportamientos cuando son sometidas a esfuerzos de tensionales. Los

resultados obtenidos pueden acercarse en gran medida a los resultados experimentales pudiendo utilizar esto, para toma decisiones en el proceso de diseño.

Uno de los métodos más utilizados en los últimos tiempos, para resolver problemas de tipo ingenieril, es el método de elementos finitos, el cual consiste básicamente en la simulación del elemento en un medio informático, donde se divide el elemento en un mallado, el cual pueden contener dimensiones regulares o irregulares y de diferentes formas, triangular o cuadrado, de esta forma, y de esta manera la conformación de nodos que es donde se representan el resultado de las incógnitas.

Utilizando estos métodos numéricos y herramientas informáticas, desde finales del siglo XIX, han suscitados varios estudios para conocer el comportamiento de la fisura en el hormigón orientando dichos estudios a hormigones reforzados con fibras dando a la ingeniería donde se puedan representar modelos constitutivos de materiales. En la tesis doctoral, Análisis Numérico-Experimental de Elementos de Hormigón Reforzado con Fibras de Acero [7], del autor, Andrés Mauricio Núñez López, enlista, algunos de los modelos realizados para el análisis del comportamiento del HRFA, en cuanto a abertura de fisura, ancho de la zona de proceso de fractura y la deformación.

4. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE UNA PROBETA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Se pretende realizar un modelo de elementos finitos (MEF) de una probeta de hormigón reforzada con fibra metálica basado en una prueba experimental realizada previamente, que sea capaz de describir su comportamiento mecánico hasta el colapso, esto se consiguió realizando los siguientes pasos:

- Simulación de probeta con ayuda del software VecTor2, definiendo las características geométricas de una prueba experimental realizada previamente.
- Generación de un mallado compuesto de elementos triangulares proporcionales a la dimensión de la probeta y siendo de menor tamaño en el área de influencia en la zona donde exista mayor tensión y desplazamiento. En la zona donde las tensiones y desplazamiento sean de menor influencia, el mallado tendrá dimensiones de tamaños superiores.
- Representación de las condiciones de contorno, como apoyos deslizantes y control de desplazamiento.
- Selección del modelo constitutivo de los materiales constitutivos de la probeta que se encuentran en el software VecTor2.

4.1. Modelo de elementos finito (MEF)

4.1.1. Geometría y mallado

La probeta de referencia utilizada en este trabajo se ha tomado de la publicación científica *On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete* [8] (Sobre las propiedades mecánicas y el comportamiento de fractura del hormigón autocompactante reforzado con fibra de poliolefina), realizada por los investigadores M.G. Alberti, A. Enfedaque, J.C. Gálvez. En dicho trabajo, se plantean probetas de hormigón con diferentes tipos de fibras (metálica y poliolefina) y con diferentes cuantías, sometidas a ensayos de flexo-tracción al objeto de determinar la curva de comportamiento a tracción del hormigón reforzado con fibras.

La probeta tiene unas dimensiones de $430 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$ (Figura 4.1). En la publicación mencionada no presenta la dimensión de la entalla, es por ello que para este trabajo se realiza con una anchura de 2.5 mm por una altura de 33.33 mm.

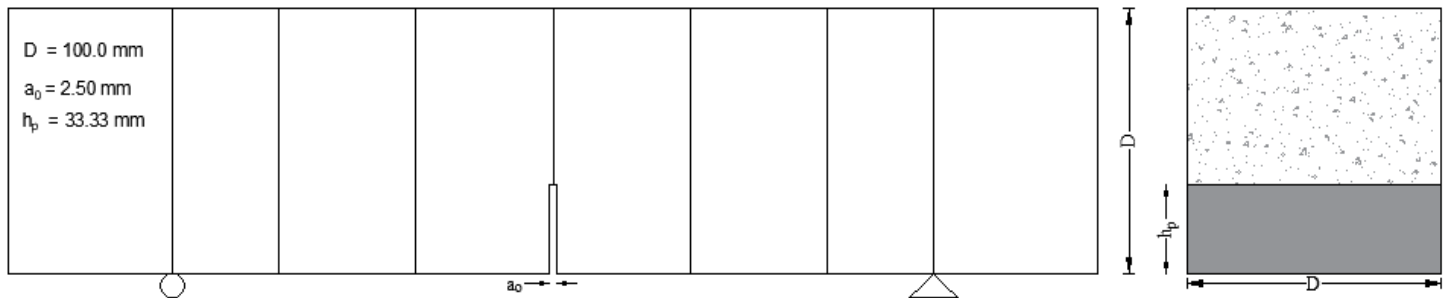


Figura 4.1. Sección de la probeta.

Para realizar el modelo de elementos finitos de la probeta, se tuvo en cuenta la simetría de la misma. Por lo tanto, se procedió a realizar un modelo de la mitad de la probeta con las condiciones de contorno esperables en simetría. Dicho modelo se dividió, a su vez, en cuatro regiones (Figura 4.2), para realizar una gradación en la reducción del tamaño de malla en las cercanías de la entalla (Figura 4.3), donde el tamaño de malla, es menor en esta zona, debido a la mayor concentración de tensiones, lo que redundaría en mayor precisión en el cálculo. Por lo tanto, se obtuvo una malla de 632 elementos triangulares con dimensiones de 25, 20, 10 y 5 mm respectivamente, para cada una de las cuatro regiones, con un total de 353 nodos.

En este trabajo, se tuvieron en cuenta dos probetas, diferenciándose cada una por la adición de fibra en una de ellas:

- Probeta S0, contenido de fibra $V_f = 0.000\%$
- Probeta S26, contenido de fibra $V_f = 0.331\%$

La simbología representa la inicial “S” de acero en inglés (*steel*) y la numeración la cantidad de fibra en kg por m^3 en el hormigón.

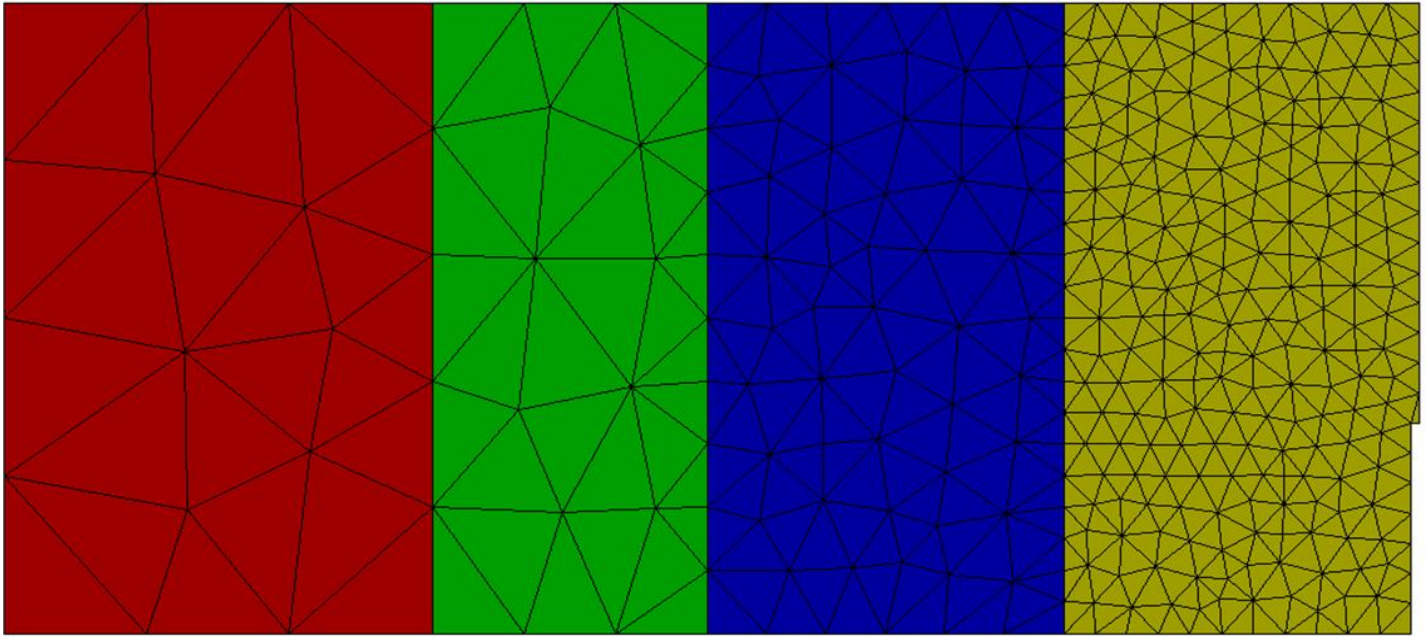


Figura 4.2. Simulación de media probeta con mallado de elementos finitos.

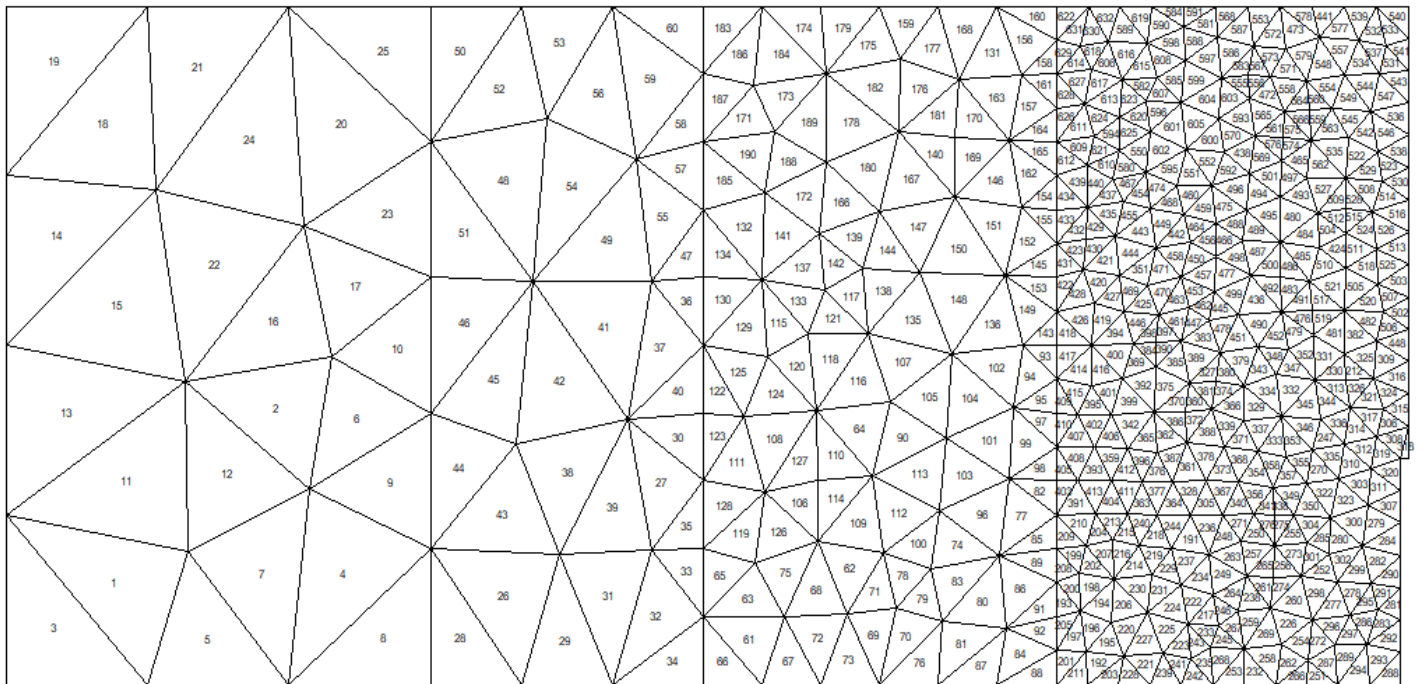


Figura 4.3. Representación del mallado de la probeta.

4.1.2. Condiciones de contorno

Teniendo en cuenta las condiciones de simetría de la probeta, se asignaron las siguientes restricciones como condiciones de contorno en el modelo numérico:

- Apoyo articulado deslizando, ubicado en el nodo 16.

- Apoyo articulado deslizante, ubicados en los nodos: 353, 352, 351, 350, 349, 348, 347, 346, 345, 344, 343, 342, 341, 340, 339.
- El análisis es por control de desplazamiento en el cual se aplicará 8 mm, ubicado en el nodo 353.

En la Figura 4.4. se representa las condiciones de contorno mencionadas previamente.

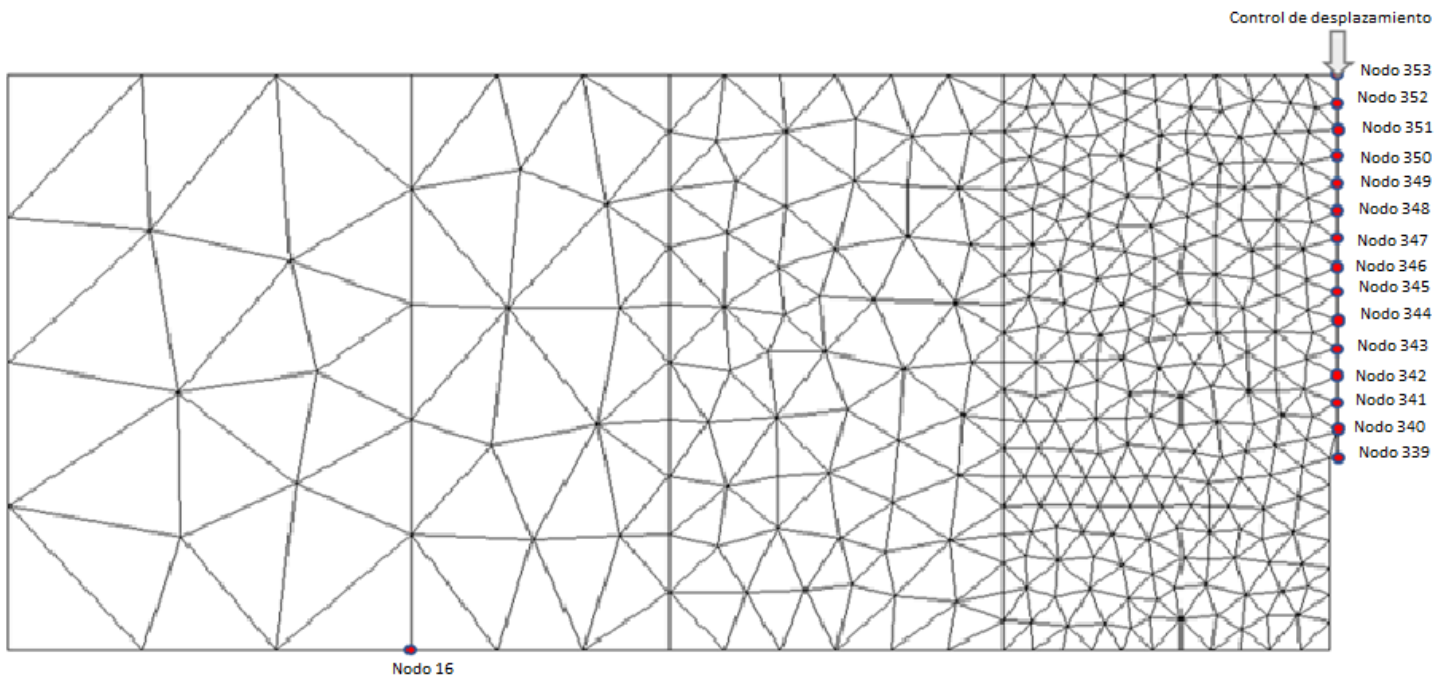


Figura 4.4. Condiciones de contorno.

4.1.3. Modelo no-lineal tipo smeared-crack, para el hormigón reforzado con fibra metálica.

La no linealidad del hormigón, se tiene en cuenta a través de sus modelos constitutivos, los cuales se pueden conocer el comportamiento de la fisura prediciendo su aparición y su posterior evolución hasta llegar al colapso. Se han desarrollado modelos que clasifican estos comportamientos en 4 modelos de fisura:

- Modelo de fisura discreta.
- Modelo de fisura distribuida.
- Modelo de fisura de daño.
- Modelo de fisura de barras.

. Para este trabajo, se utilizó el modelo fisuración distribuida o continua, llamado en ingles *smeared-crack*, para poder representar la evolución de la formación de la fisura por el modelo de elementos finitos establecido anteriormente.

4.2. Modelo constitutivo de los materiales constituyentes

El programa VecTor2, está basado en la teoría de campo de compresión modificada para el análisis de elementos finito no lineal de estructuras de hormigón, el cual contiene varios modelos de análisis que permiten ver el comportamiento cuando es sometido a esfuerzos ya sea de compresión pre-peak, post-peak y ablandamiento (softening), como tensión de endurecimiento y ablandamiento (stiffening y softening).

A continuación, se describen los modelos seleccionados utilizados en este trabajo de acuerdo al Manual del usuario de VecTor2 [9] .

4.2.1. Hormigón

El programa VecTor2, contiene varios tipos de hormigones (reforzado, en masa y albañilería), en este trabajo se utilizará el hormigón reforzado, siendo la adición de fibra la que actúe como elemento de refuerzo.

El hormigón utilizado en la prueba experimental, contiene una cuantía suficiente de cemento para que la trabajabilidad no sea afectada por la cantidad de fibra adicionada, sin embargo, cabe destacar que las calidades y cantidades de los componentes del hormigón, no son parámetros que se requieren en el programa VecTor2, para caracterizar los materiales constitutivo, siendo necesarios los resultados de comportamientos físico-mecánicos obtenidos en dicha prueba.

4.2.1.1 MODELO CONSTITUTIVO A COMPRESIÓN

Para el modelo constitutivo a compresión se seleccionó el *Lee et al 2011*, tanto para pre-peak y post-peak, ya que realiza una estimación en el comportamiento de abertura de fisura (CMOD), en ingles *Crack Mouth Opening Displacement*, ya que según el manual VecTor2 se realizaron una serie de ensayos a elementos de hormigón con fibras donde se pudo conocer y predecir las apariciones de fisura en los distintos momentos de carga.

El modelo de compresión softening, se seleccionó el Vecchio 1992-A, el cual tiene una formulación que relaciona el esfuerzo a tracción y compresión evitando sobreestimar el efecto suavizante cuando el esfuerzo a tracción pueda superar el refuerzo del hormigón.

4.2.1.2. MODELO CONSTITUTIVO A TENSIÓN

En el comportamiento a tracción, se distinguen dos ramas de endurecimiento y ablandamiento por deformación, *stiffening* y *softening*, respectivamente.

En el caso de la tensión *stiffening* se desprecia, siendo nulo el esfuerzo de tensión del hormigón posterior al agrietamiento.

Para los modelos de tensión *softening* se seleccionó tensión *softening linear* para la probeta sin fibra (S0) y tensión *softening* exponencial para la probeta con fibra (S26), los cuales se describen a continuación.

4.2.1.2.1. Tensión softening Linear

Se seleccionó el modelo de tensión linear, para la probeta S0, ya que una vez alcanzada la resistencia de tensión máxima la curva desciende linealmente hasta llegar a cero.

4.2.1.2.2. Tension softening exponencial

Para el modelo de tensión softening exponencial ($f_{c,t}$), el programa VecTor2 incluye en la formulación la energía de fractura (G_f) para hormigones reforzados con fibra y se representa con la siguiente expresión.

$$f_{c,t} = f_{cr} \exp\left(-\frac{f_{cr} w_{cr}}{G_f}\right) \quad (1)$$

donde,

f'_c , resistencia a compresión del hormigón, w_{cr} , ancho de agrietamiento y G_f , energía de fractura del hormigón.

4.2.2. Fibras

El programa VecTor2, presenta una serie de refuerzos que se pueden incluir al hormigón, dentro de las cuales encontramos la fibra, las que se clasifican en 2 tipos: fibra recta y fibra de gancho.

Las fibras de gancho, permite una unión mucho más fuerte en comparación con las fibras rectas.

El efecto de las fibras sobre el comportamiento del hormigón depende del contenido de volumen de fibra, longitud, diámetro, resistencia a la tracción de la fibra y resistencia del hormigón.

Cabe destacar, que en los modelos tipo *smeared-crack*, el refuerzo mediante fibra, se toma en cuenta definiendo las características de la fibra y no mediante su influencia en el hormigón al que refuerzan. Por tanto, es imprescindible definir un modelo constitutivo de la fibra, que represente lo mejor posible su comportamiento como refuerzo en el hormigón.

4.2.2.1 MODELO SDEM MONOTÓNICO

Se seleccionó el modelo constitutivo, Embebido Diverso Simplificado, SDEM en ingles *Simplified Diverse Embedment Mode*, ya que este modelo tiene condiciones de carga monotónica creciente, expresando la tensión de tracción en las fibras a través del comportamiento de unión por fricción en fibras, sumándole a este, el anclaje mecánico del gancho de la fibra.

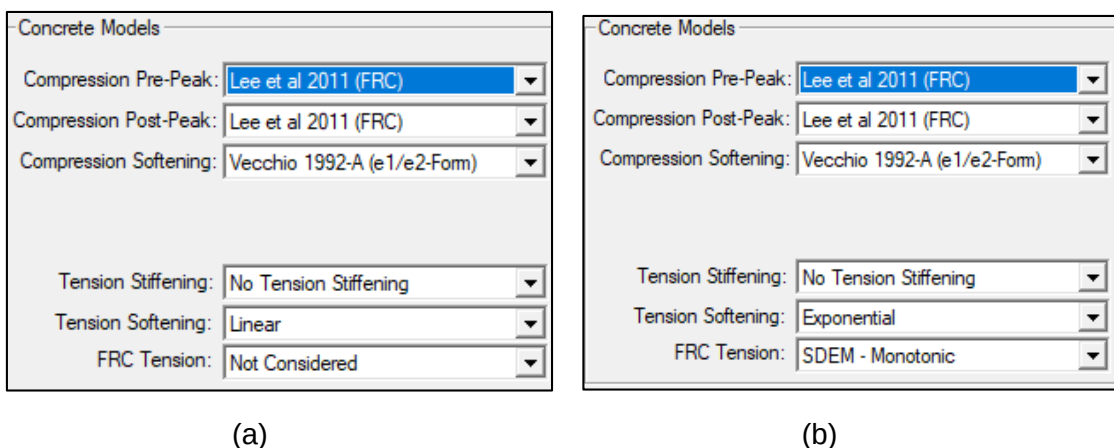


Figura 4.5. Modelos utilizados en esta investigación en el programa VecTor2: (a) modelo S0 y (b) modelo S26.

4.2.2.2. OTROS MODELOS

Los modelos mencionados anteriormente, se adecuan a este trabajo ya que el hormigón y la fibra tienen una influencia directamente con los modelos seleccionados, además de sus características físicas-mecánicas.

Los otros modelos fueron considerados en este trabajo, no obstante, por las características del mismo y al ver que los resultados obtenidos distan apreciablemente con los de la prueba experimental, no fueron tomados en cuenta.

5. ANÁLISIS NUMÉRICO PARA LA CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS NUMÉRICOS SIN FIBRA Y CON FIBRAS.

Obtenida la simulación de la probeta, se procede a la calibración de los modelos con los resultados obtenidos en la prueba experimental, caracterizando los materiales constitutivos (hormigón y fibra), posteriormente se realiza el cálculo de la abertura de fisura (CMOD) y desplazamiento de flecha para conocer por medio del modelo de elementos finitos (MEF) la distribución de tensiones.

5.1. Caracterización de las probetas

En la prueba experimental, el ensayo realizado a la probeta, consiste en la inducción a la rotura por tracción, registrando de manera continua la carga aplicada y, por tanto, la componente horizontal que se abre la entalla de la probeta abertura de fisura (CMOD) y desplazamientos por medio de un dispositivo *Linear Variable Differential Transformer* (LVDT).

Para la determinación de la abertura de fisura (CMOD) y la flecha de desplazamiento en el modelo numérico, se realizaron iteraciones con un control incremental de 201 pasos de carga, dando inicio en 0.00 mm, incrementando por un factor de 0.005, hasta llegar al control de desplazamiento establecido en la prueba experimental (8 mm), como se aprecia en la Figura 5.1.

The image shows a 'Define Job' dialog box with the following fields and values:

- Job Data:**
 - Job file name: ITFC
 - Job title: Modelo de elementos finitos no
 - Date: 01062020
- Structure Data:**
 - Structure file name: Probeta
 - Structure title: Hormigon
 - Structure type: Plane Membrane (2-D)
- Loading Data:**
 - Load series ID: ID
 - Starting load stage no.: 1
 - No. of load stages: 201
- Analysis Parameters:**
 - Seed file name: NULL
 - Max. no. of iterations: 60
 - Dynamic Averaging factor: 0.6
 - Convergence limit: 1.00001
 - Convergence criteria: Displacements - Weighted Average
 - Analysis Mode: Static Nonlinear - Load Step
 - Results files: ASCII Files Only
 - Modeling format: Stand Alone

Figura 5.1. Números de repeticiones de carga y factor de incremento.

Para esto la modelización de la probeta de hormigón reforzado, se ocupa los resultados físico-mecánicas del hormigón obtenidas en la prueba experimental. En VecTor2, las entradas de los parámetros para la caracterización de las probetas son las siguientes (Tabla 5.1):

Tabla 5.1. Parámetros de entrada de VecTor2.

Material	Parámetros de VecTor2		
Hormigón	T	mm	Espesor
	f'c	Mpa	Resistencia a compresión del cilindro
	f't	Mpa	Resistencia a tracción
	Ec	Mpa	Modulo Elástico
	eo	me	Resistencia del cilindro en f'c
	Mu		Relación de Poisson
	Cc	/°C	Coefficiente de expansión térmica
	a	mm	Tamaño máximo de agregado
		kg/m3	Densidad
	Kc	mm2/s	Difusividad térmica

5.2. Calibración del modelo de hormigón sin fibra S0

5.2.1. Definición del modelo numérico S0

Para la caracterización de este modelo, se ocuparon los resultados obtenidos en la prueba experimental del hormigón sin fibra:

Tabla 5.2. Resultados del hormigón S0 obtenidos en la prueba experimental.

Ensayo		Parámetros	Probeta
			S0
Resistencia a compresión	F _{ck} 28d	Mpa	39,3
Modulo elástico	E	Gpa	35,8

La resistencia a tensión f'_t está relacionada con la resistencia a compresión de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f'_t = 0.33\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

donde,

f'_t = Resistencia a tracción del hormigón

Con la resistencia a compresión obtenida en la prueba experimental, el f'_t en VecTor2 es de 2.07 Mpa, no obstante, fue necesario realizar una modificación de este parámetro para ajustar la curva del modelo numérico a la prueba experimental. La caracterización de la probeta S0 queda de la siguiente manera (Figura 5.2):

Material Properties		
Reference Type:	Reinforced Concrete	
Thickness, T:	100	mm
Cylinder Compressive Strength, f'_c :	39.3	MPa
Tensile Strength, f_t :	* 3.9	MPa
Initial Tangent Elastic Modulus, E_c :	* 35800	MPa
Cylinder Strain at f'_c , ϵ_c :	* 0	me
Poisson's Ratio, μ :	* 0	
Thermal Expansion Coefficient, C_c :	* 0	/°C
Maximum Aggregate Size, a :	* 12.7	mm
Density:	* 0	kg/m ³
Thermal Diffusivity, K_c :	* 0	mm ² /s

Figura 5.2. Entrada de los resultados de la prueba experimental del hormigón S0 en VecTor2.

Debido a que no se contaba con los parámetros Cylinder Strain, Poisson's Ratio, Thermal Expansion Coefficient, Density y Thermal Diffusivity, se ocuparon los valores predeterminados en el programa siendo suficientes para los resultados obtenidos.

5.2.2. Resultados del modelo numérico de la probeta de hormigón sin fibras S0

En las Figuras 5.3a y 5.3b, se presentan las curvas de fuerza-desplazamiento de flecha y la curva de fuerza-abertura de fisura (CMOD), respectivamente.

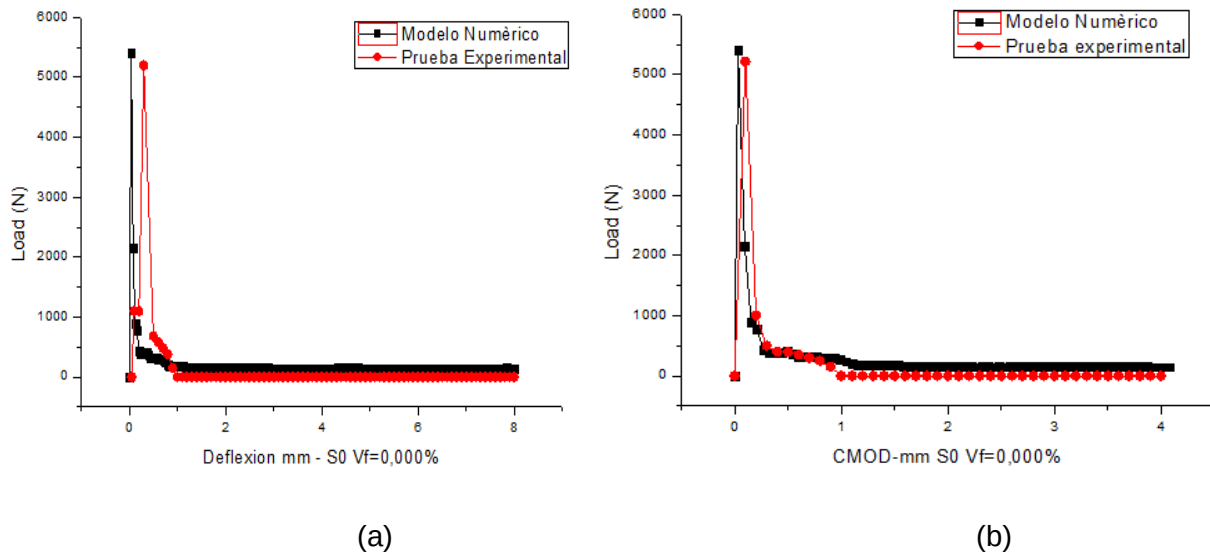


Figura 5.3. Resultados de fractura de probeta S0: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.

En la Figura 5.3 se realiza una comparación de los resultados obtenidos en la prueba experimental y en el modelo numérico de la probeta sin fibra S0. De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas experimentales y los modelos seleccionados en VecTor2, para el modelo numérico de la probeta S0, los comportamientos de las curvas son similares.

Con los datos introducidos, la curva alcanza una carga máxima próxima a los 5.4kN, poco superior a la prueba experimental y posteriormente decae de manera frágil y súbita hasta los valores de deflexión y CMOD, obteniendo una resistencia residual de 0.14kN cuando la probeta llega al colapso.

A continuación, se presenta la evolución de la tensión horizontal en el hormigón del modelo numérico de la probeta S0, en diferentes situaciones:

- Estado tensional inicial (Figura 5.4).
- Estado tensional antes del pico (Figura 5.5).
- Estado tensional máximo (Figura 5.6).
- Estado tensional después del pico (Figura 5.7).
- Estado tensional al final de la carga (Figura 5.8).

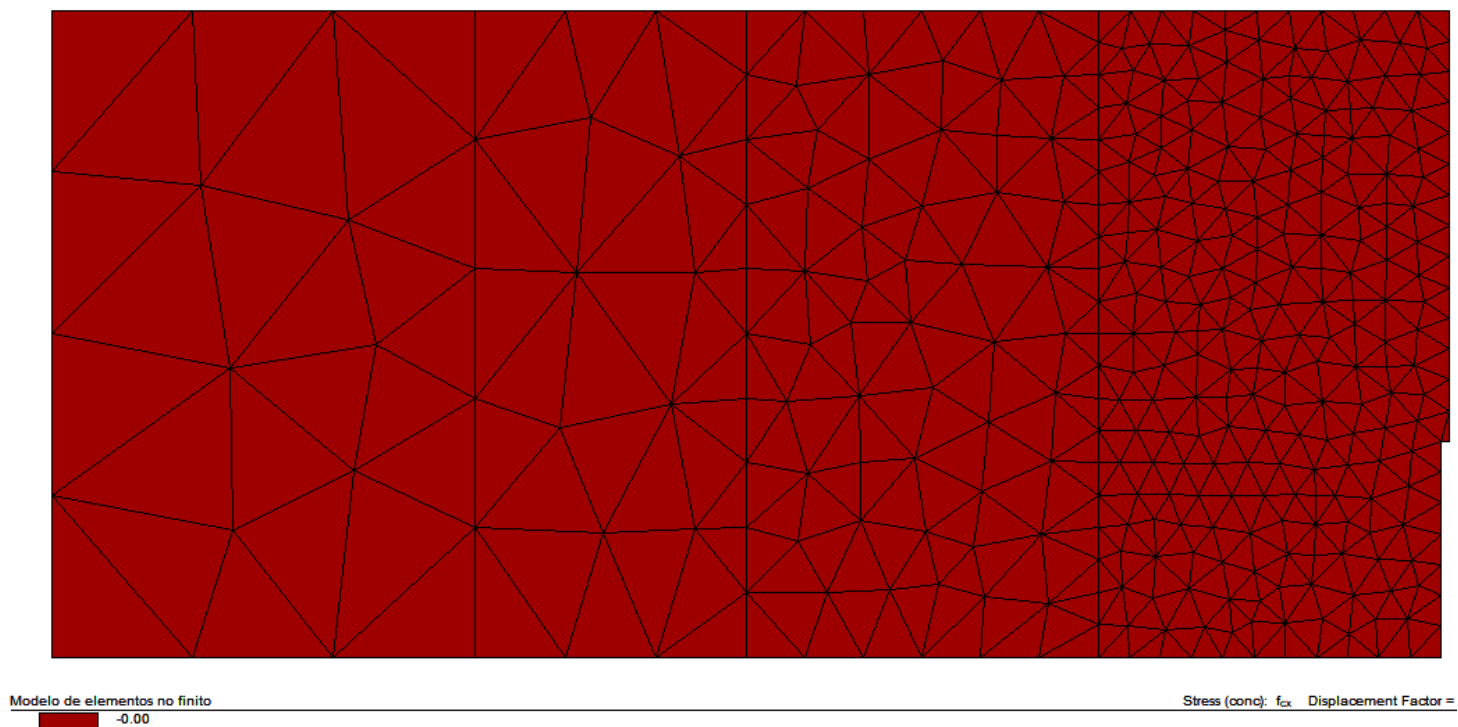


Figura 5.4. Estado tensional inicial, probeta S0.

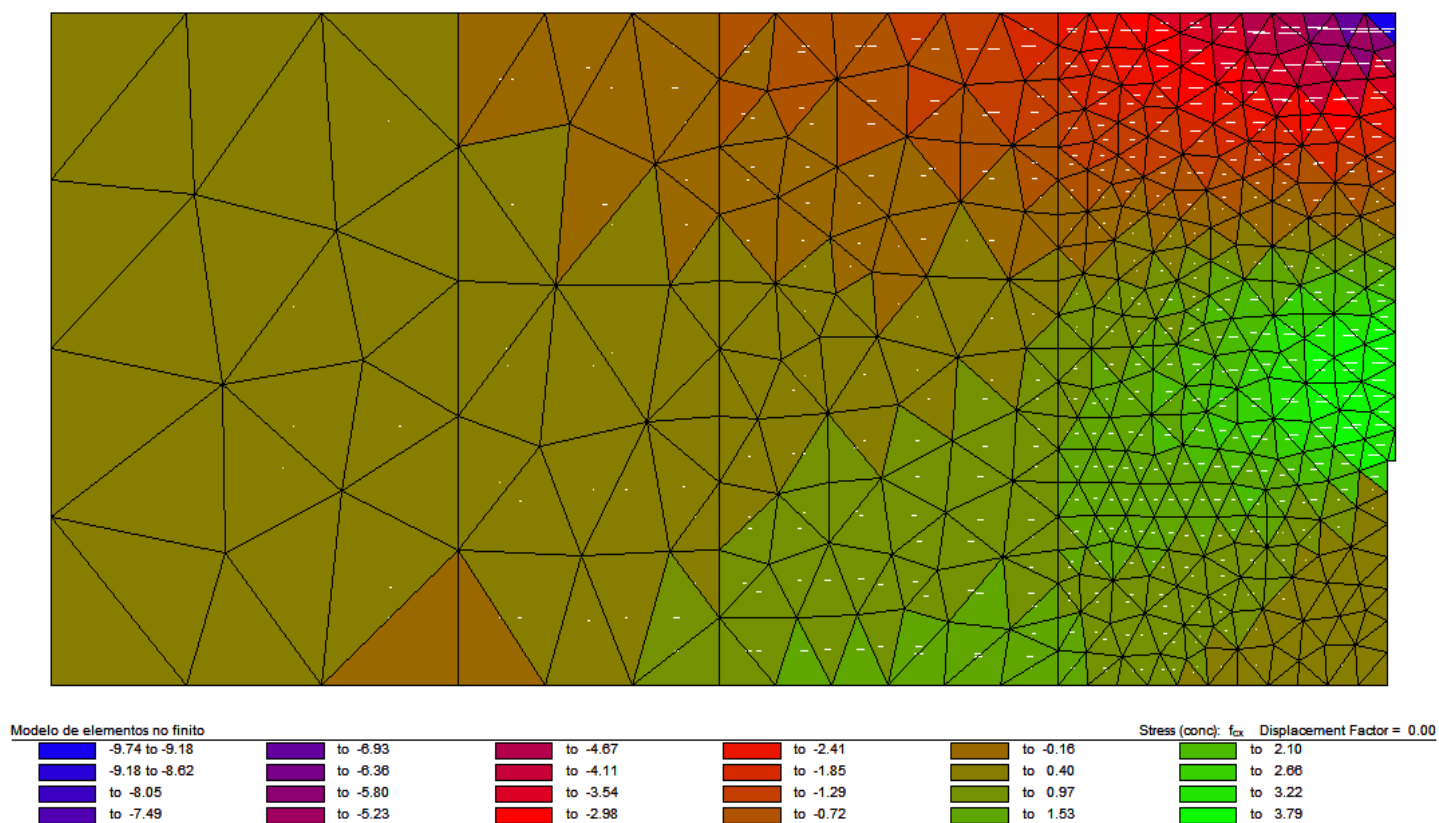


Figura 5.5. Estado tensional antes del pico, probeta S0.

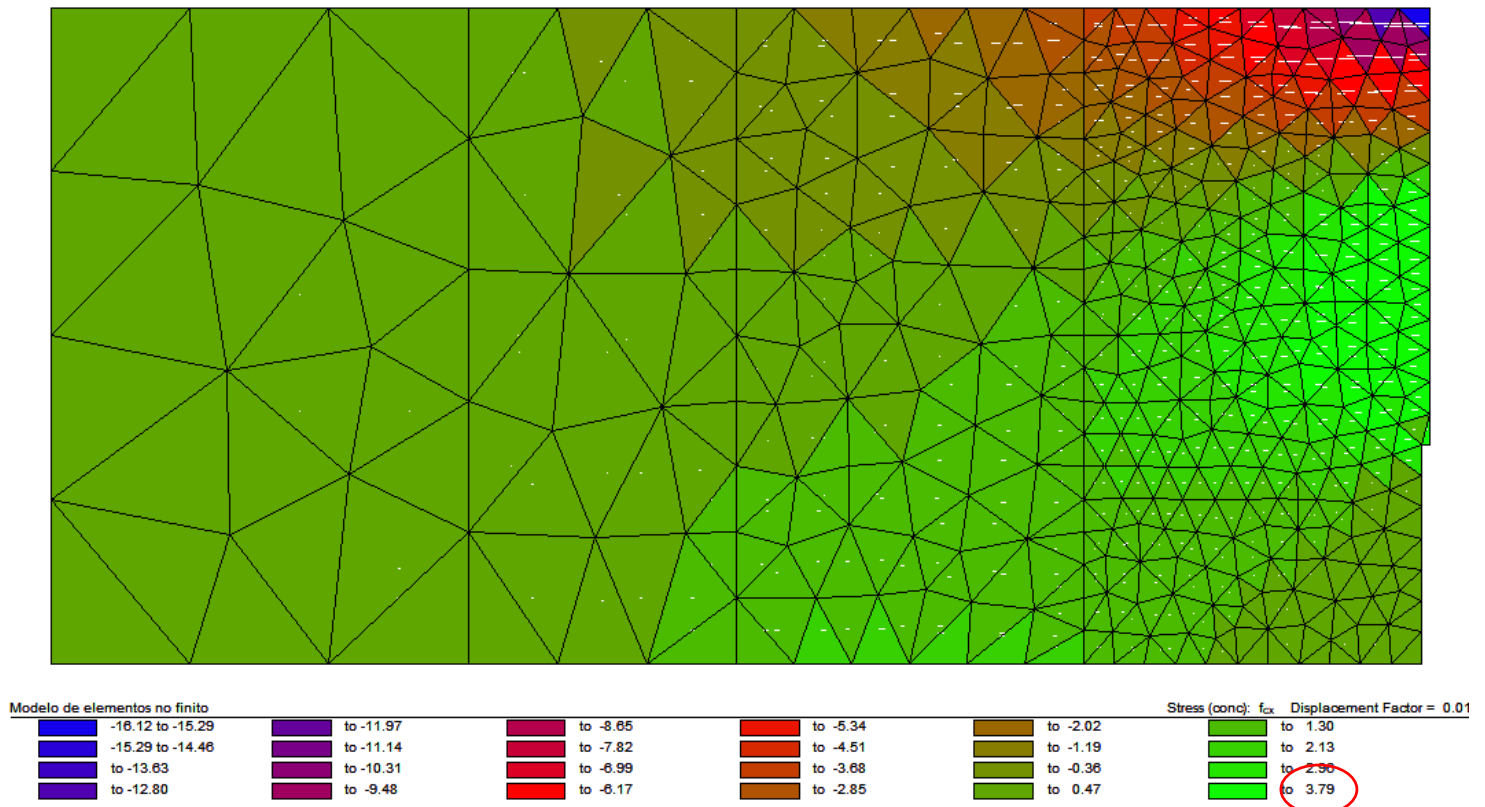


Figura 5.6. Estado tensional en la carga máxima, probeta S0.

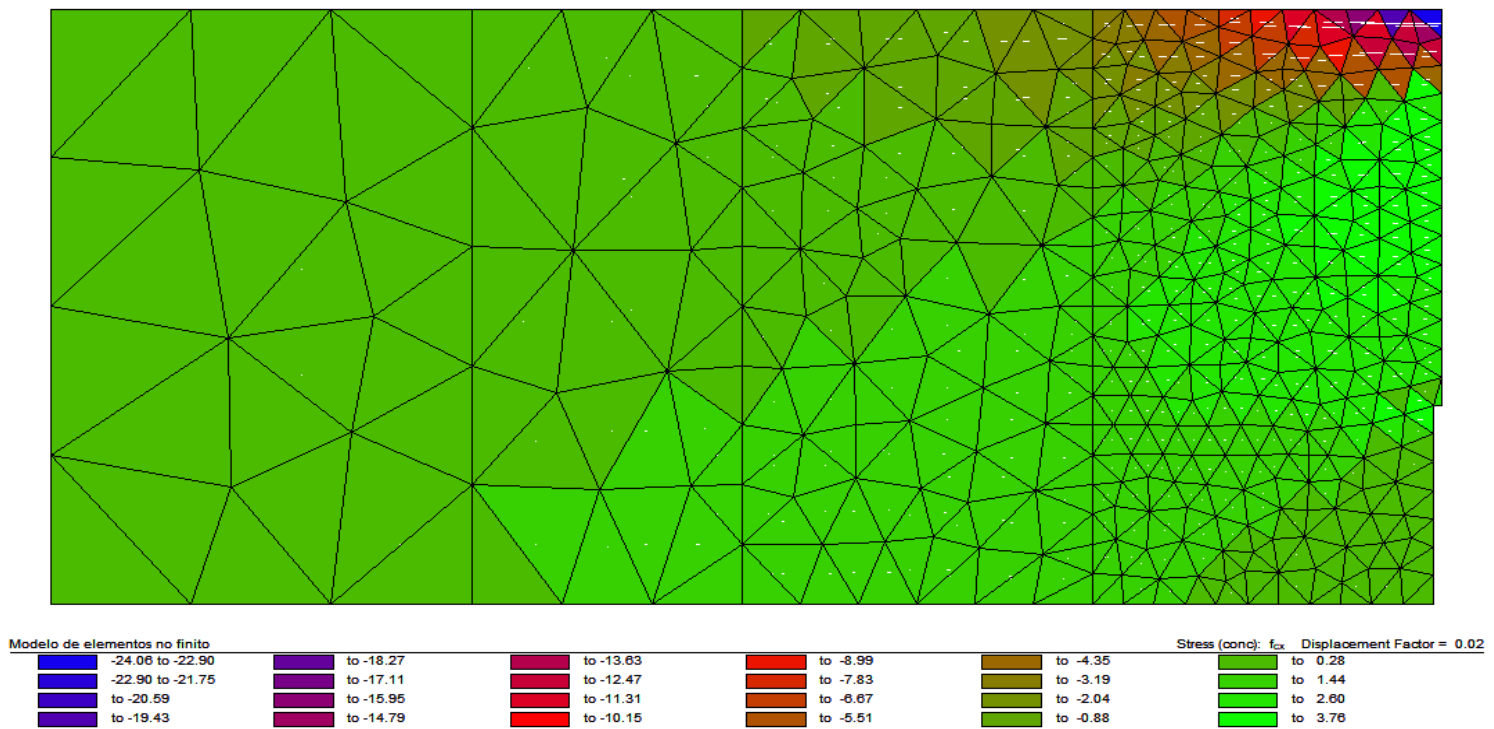


Figura 5.7. Estado tensional después del pico, probeta S0.

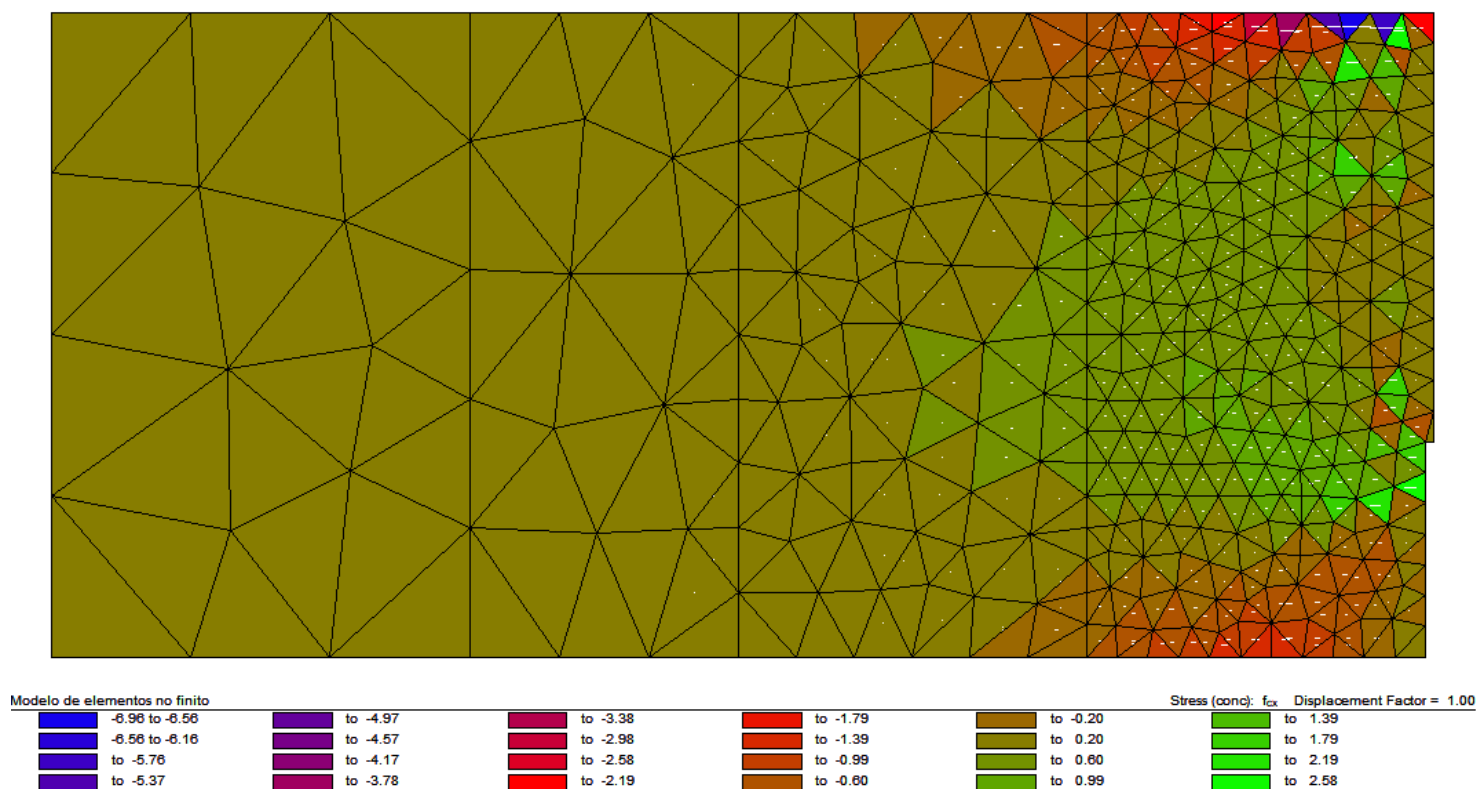
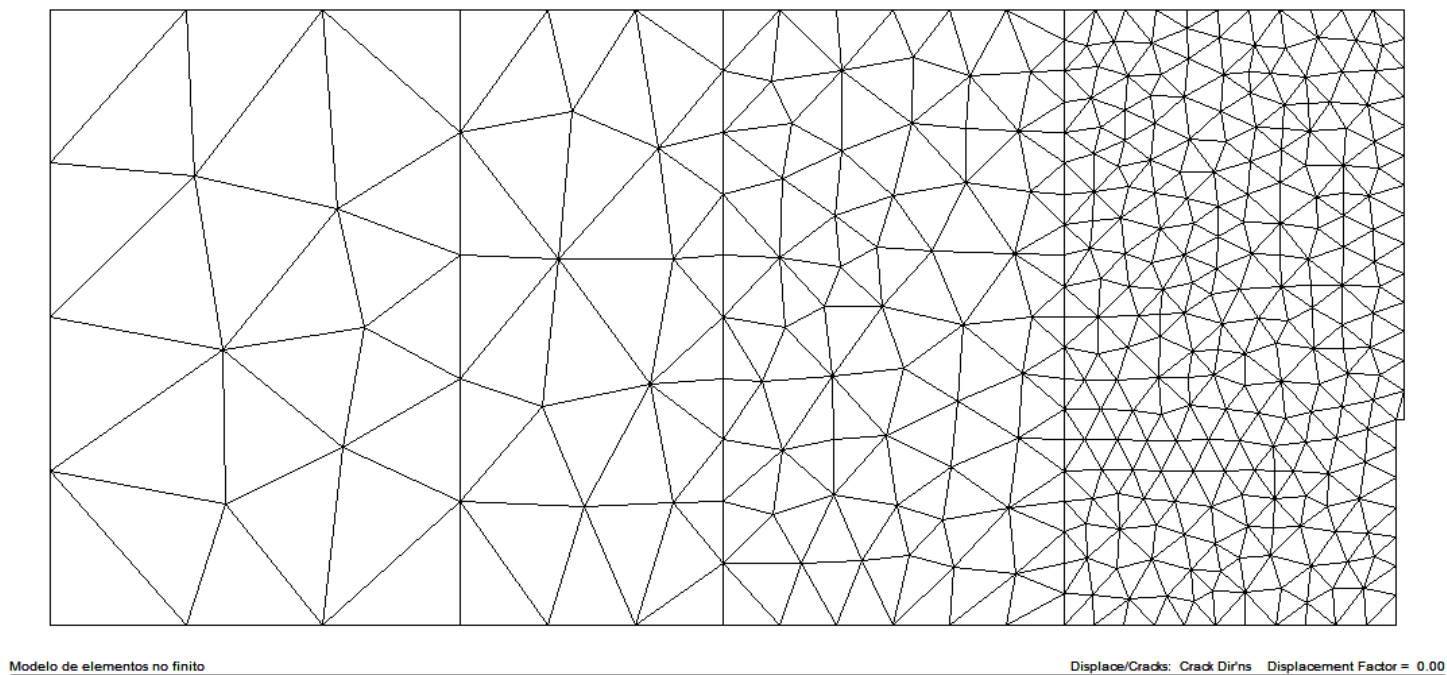


Figura 5.8. Estado tensional al final de la carga, probeta S0.

En las figuras, se aprecia la concentración de carga sobre la zona superior de la entalla, siendo afectados principalmente los nodos 339, 340, 341, 342, 343, 344, antes de llegar al pico máximo de carga (Figura 5.5) y con ello el inicio de formación de fisura en este estado de carga, hasta llegar al pico máximo (Figura 5.6), alcanzando una $f'_t=3.79$ Mpa, un 3% inferior al f'_t propuesto en la caracterización de la probeta (Figura 5.2), una vez alcanzado este punto, el descenso de la carga comienza hasta llegar a una abertura de fisura y una deflexión de 1 mm en ambos casos, tal y como se observó en la Figura 5.3.

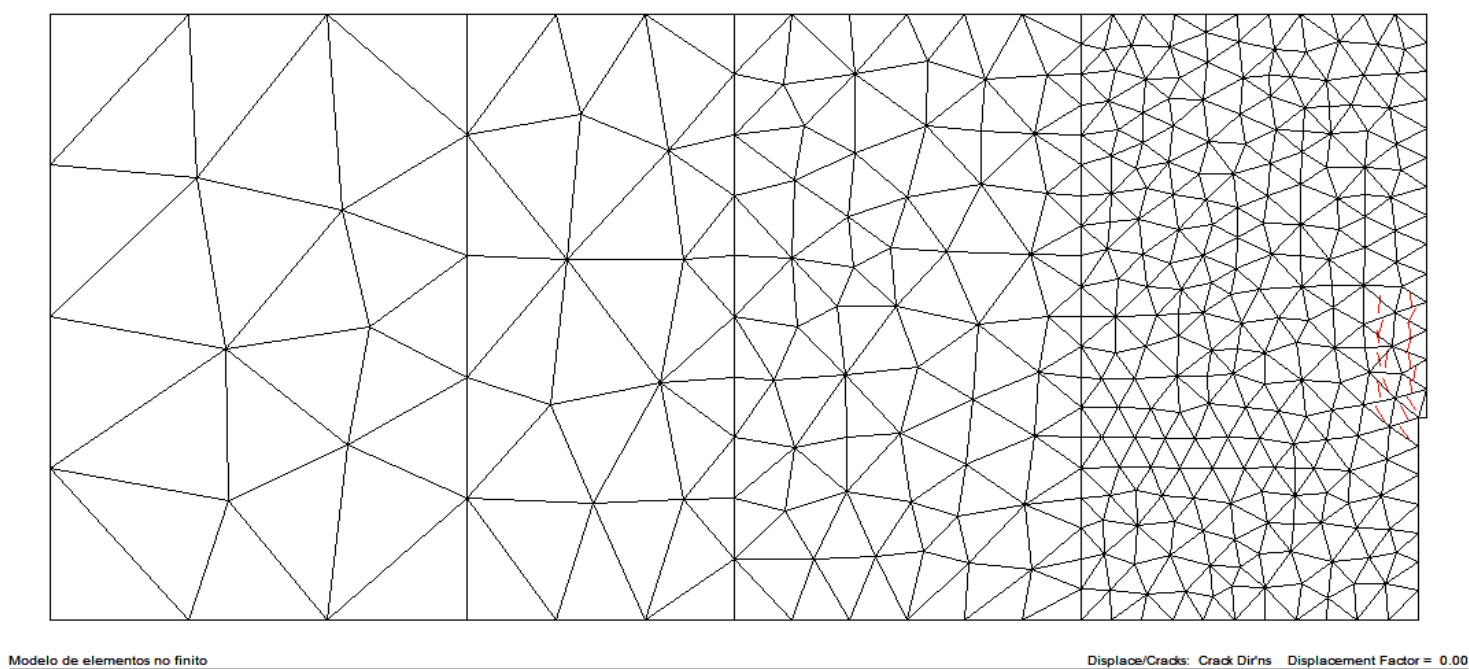
La formación de fisuras en la probeta en los distintos estados de tensiones se presenta a continuación:

- Formación de fisura en el estado tensional inicial (Figura 5.9).
- Formación de fisura en el estado tensional antes del pico (Figura 5.10).
- Formación de fisura en el estado tensional máximo (Figura 5.11).
- Formación de fisura en el estado tensional después del pico (Figura 5.12).
- Formación de fisura en el estado tensional al final de la carga (Figura 5.13).



Crack Widths: thin < 1.00 mm, mid, thick > 2.00 mm

Figura 5.9. Formación de fisura estado tensional inicial, probeta S0.



Crack Widths: thin < 1.00 mm, mid, thick > 2.00 mm

Figura 5.10. Formación de fisura estado tensional antes del pico, probeta S0.

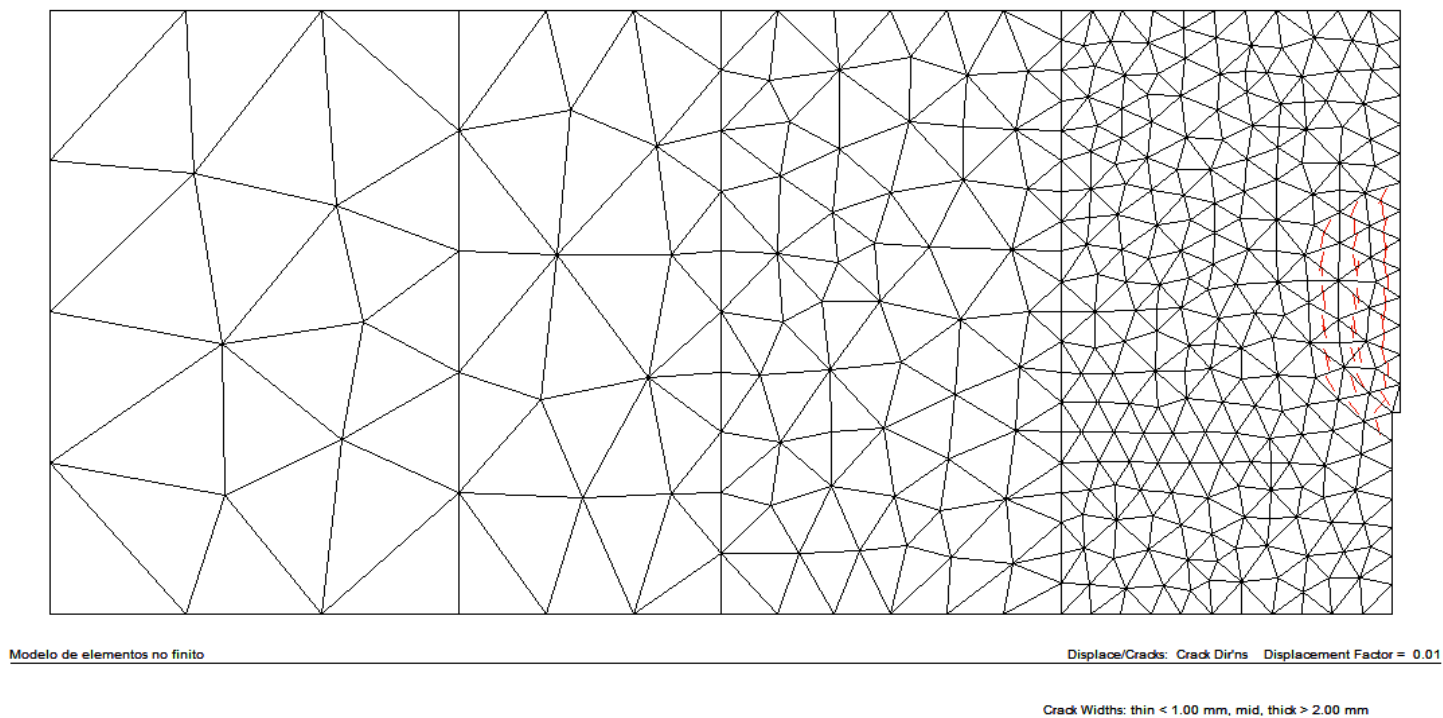


Figura 5.11. Formación de fisura estado tensional máximo, probeta S0.

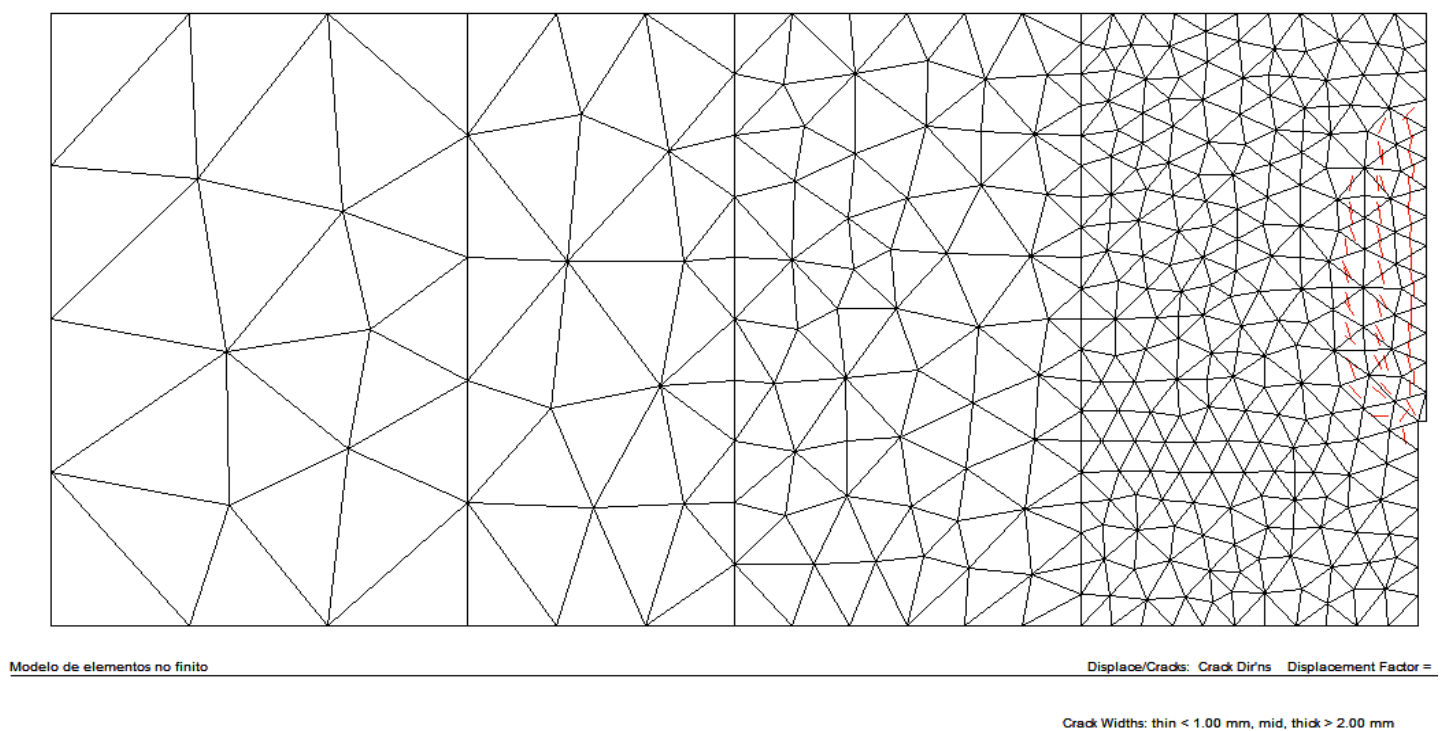


Figura 5.12. Formación de fisura estado tensional después del pico, probeta S0.

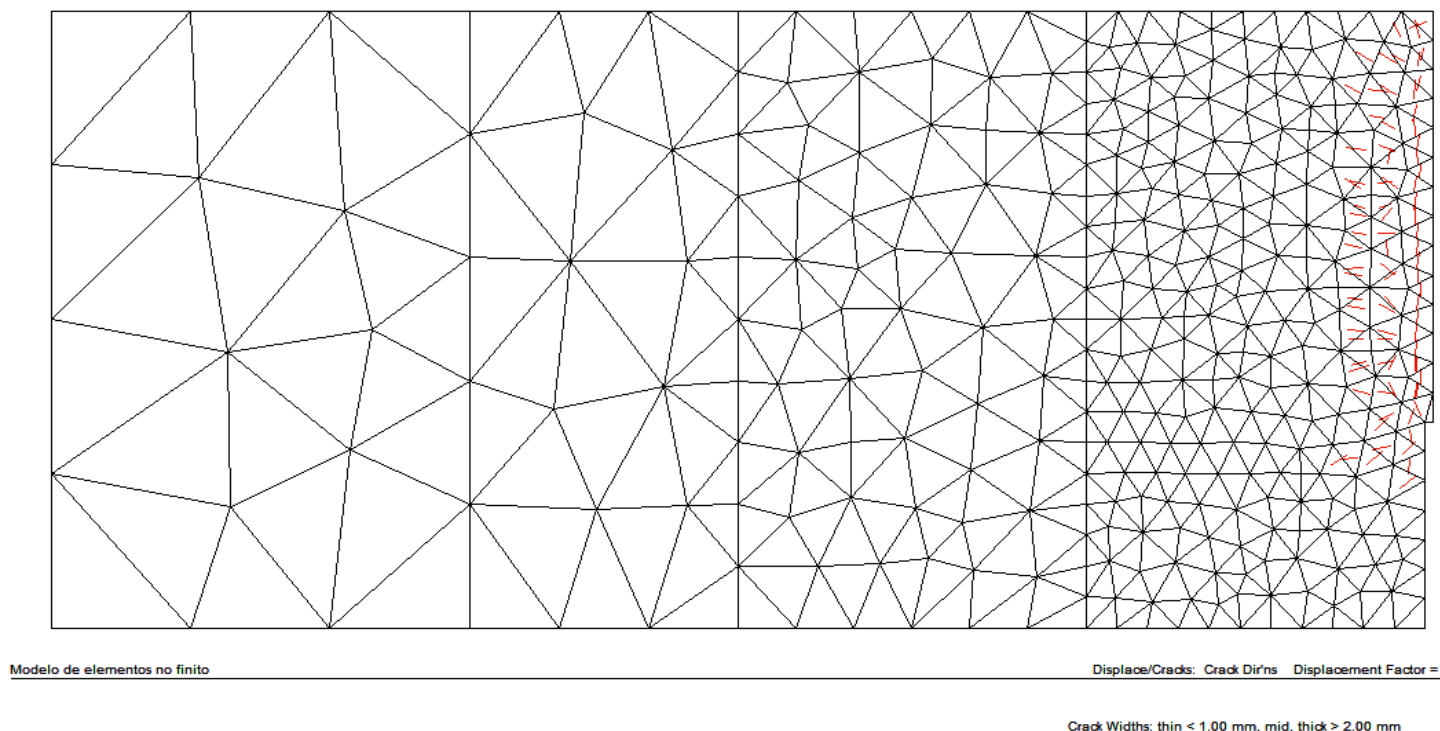


Figura 5.13. Formación de fisura estado tensional final, probeta S0.

La formación de fisura en la probeta sin fibra (S0), inicia poco antes llegar a la carga máxima en la parte superior de la entalla (Figura 5.10), de tal manera que, una vez alcanzado el estado tensional máximo (Figura 5.11), continúan su propagación de manera vertical hasta alcanzar los valores de desplazamiento y abertura de fisura de 1 mm, a como se representan en la figura 5.3a y 5.3b respectivamente.

5.3. Calibración del modelo de hormigón con fibra S26

5.3.1. Definición del modelo numérico S26

En este modelo numérico, la dosificación de fibra corresponde a 26 kg/m³, ($V_f=0.331\%$), adicionada al hormigón S0, con las características propias de la fibra para poder conocer la influencia de esta, en el hormigón.

El efecto de las fibras sobre el comportamiento del hormigón depende de:

- Volumen de fibra (V_f).
- Longitud de fibra (L_f).
- Diámetro de fibra (D_f).
- Resistencia a la tracción de fibra.

Tabla 5.3. Característica de fibra de acero utilizadas en la prueba experimental.

Densidad	gr/cm ³	7,85
Longitud	mm	35
Diámetro	Mm	0,55
Tensión	Mpa	1100
Módulo de elasticidad	Gpa	210
Anclaje		Gancho

Smeared Reinforcement Properties

Reference Type: Fibre Reinforcement

Fibre Type: Steel - Hooked

Out of Plane Reinforcement: ☐

Fibre Volume Fraction, Vf: 0.331 %

Fibre Length, Lf: 35 mm

Fibre Diameter, Df: 0.55 mm

Fibre Tensile Strength, Fu: 1100 MPa

Figura 5.14. Caracterización de fibra en VecTor2.

De la misma manera que en el caso anterior, se modificó el f'_t , con el objetivo de ajustar la curva del modelo numérico de la probeta S26 a la prueba experimental quedando la caracterización de dicha probeta, a como se muestra en la Figura 5.15.

Material Properties

Reference Type: Reinforced Concrete

Thickness, T: 100 mm

Cylinder Compressive Strength, f'c: 39.3 MPa

Tensile Strength, f't: * 2.7 MPa

Initial Tangent Elastic Modulus, Ec: * 35800 MPa

Cylinder Strain at f'c, eo: * 0 me

Poisson's Ratio, Mu: * 0

Thermal Expansion Coefficient, Cc: * 0 /°C

Maximum Aggregate Size, a: * 12.7 mm

Density: * 0 kg/m3

Thermal Diffusivity, Kc: * 0 mm2/s

Figura 5.15. Entrada de los resultados de la prueba experimental del hormigón S26 en VecTor2.

De igual forma que en el modelo numérico de la probeta S0, se ocuparon los valores predeterminados del programa para las propiedades: Cylinder Strain, Poisson's Ratio, Thermal Expansion Coefficient, Density y Thermal Diffusivity.

5.3.2. Resultados del modelo numérico de la probeta de hormigón con fibra S26

En las Figuras 5.16a y 5.16b, se presentan las curvas de fuerza-desplazamiento de flecha y la curva de fuerza-abertura de fisura (CMOD), respectivamente:

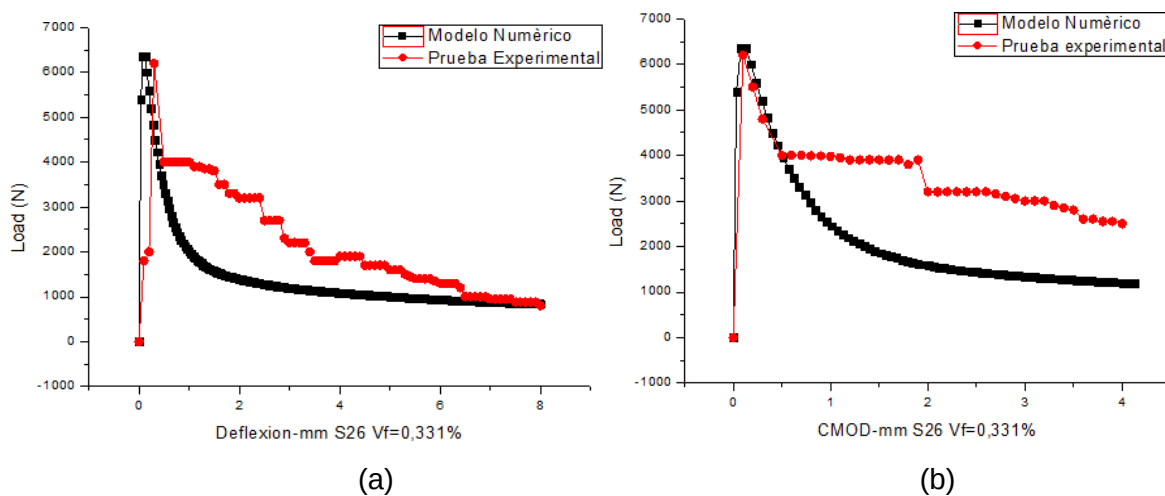


Figura 5.16. Resultados de fractura de probeta S26: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD

En la Figura 5.16, se muestra una comparación de los resultados obtenidos en la prueba experimental y en el modelo numérico de la probeta de hormigón con fibra S26.

De acuerdo a los resultados obtenidos del modelo numérico de la probeta de hormigón con fibra S26, este se comporta de manera similar en el tramo inicial (zona elástica) hasta alcanzar una resistencia a tensión máxima de 6.5kN, tal y como se obtuvo en la prueba experimental. Posteriormente se observa un incremento sustancial de resistencia distinto a la probeta de hormigón sin fibra S0, siendo esto provocado por el efecto de la fibra en el hormigón, siendo la fibra la cual resiste toda la tensión producida hasta llegar al colapso.

En lo referente a la deflexión, se obtuvo una resistencia residual similar a la prueba experimental de 1kN aproximadamente al alcanzar 8 mm de desplazamiento (Figura 5.16a).

No obstante, en cuanto a la abertura de fisura (CMOD) la resistencia alcanzada en el modelo numérico, fue de 1.2kN siendo este resultado inferior al de la prueba experimental, la cual fue de 2.5kN (Figura 5.16b).

A continuación, se presenta la evolución de la tensión horizontal en el hormigón del modelo numérico en diferentes situaciones:

- Formación de fisura en el estado tensional inicial (Figura 5.17).
- Formación de fisura en el estado tensional antes del pico (Figura 5.18).
- Formación de fisura en el estado tensional máximo (Figura 5.19).
- Formación de fisura en el estado tensional después del pico (Figura 5.20).
- Formación de fisura en el estado tensional al final de la carga (Figura 5.21).

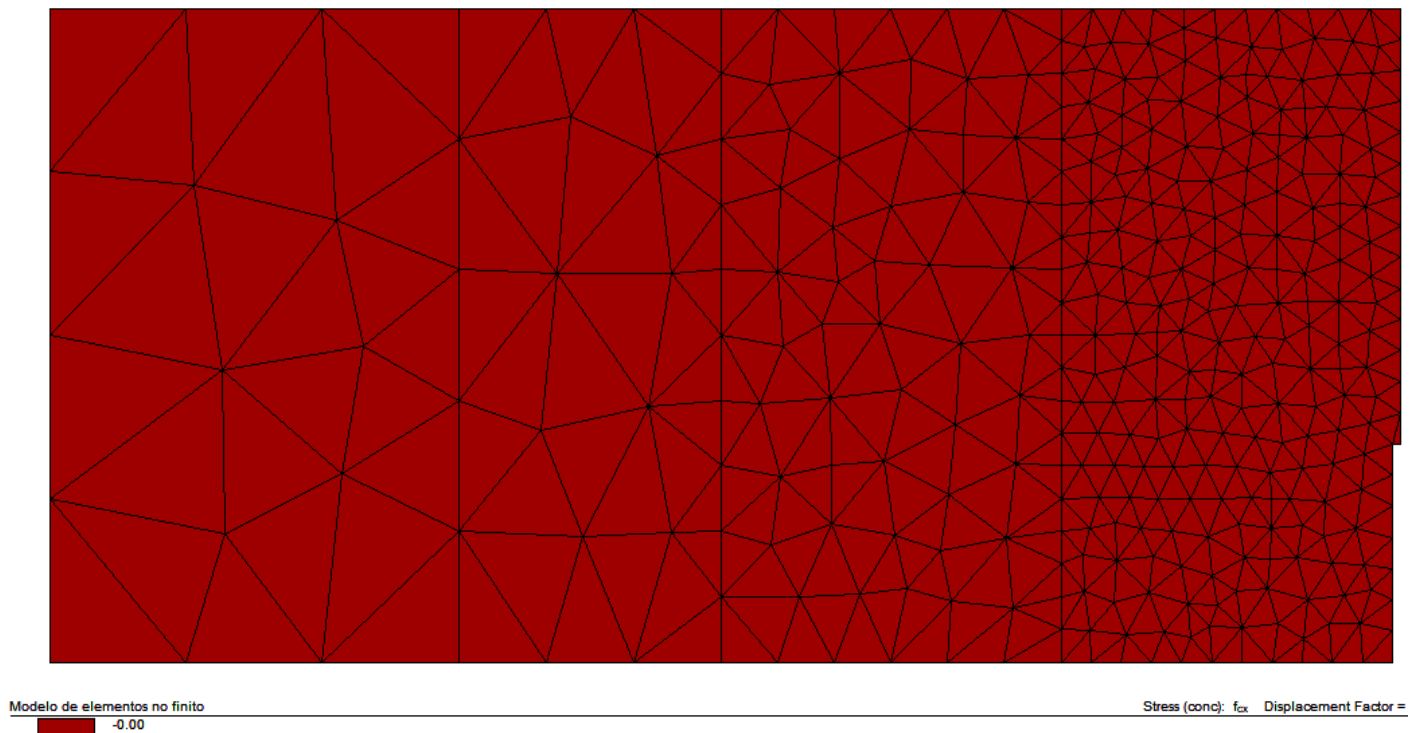


Figura 5.17. Estado tensional inicial, probeta S26.

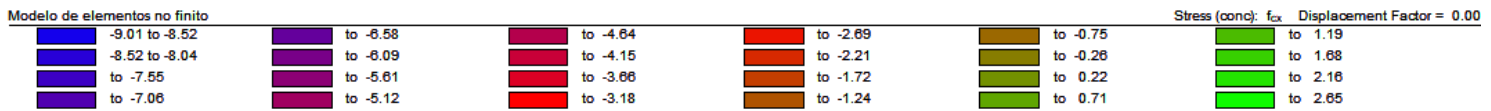
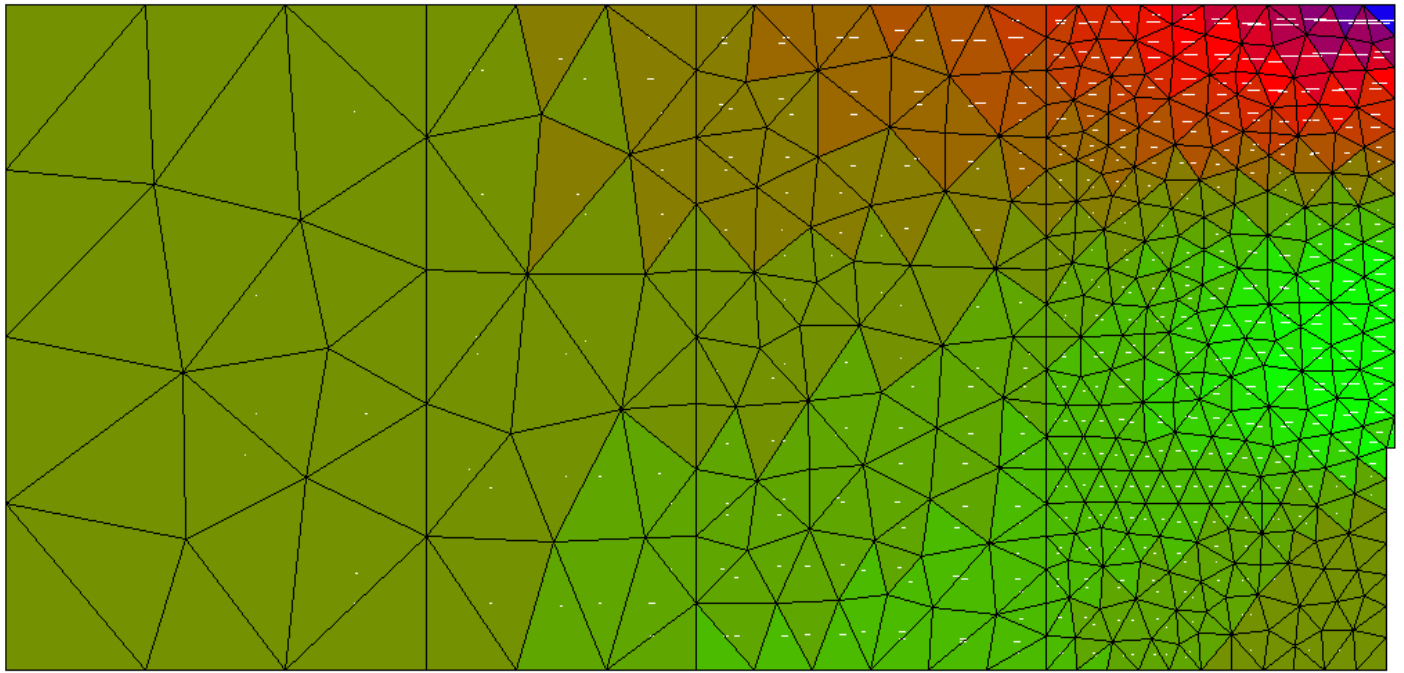


Figura 5.18. Estado tensional antes del pico, probeta S26.

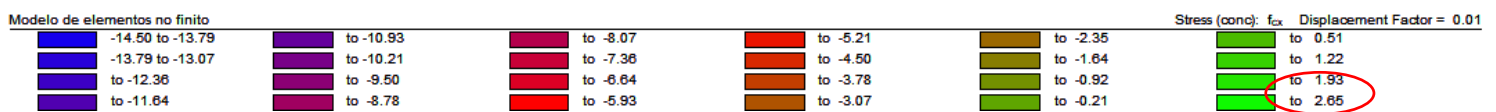
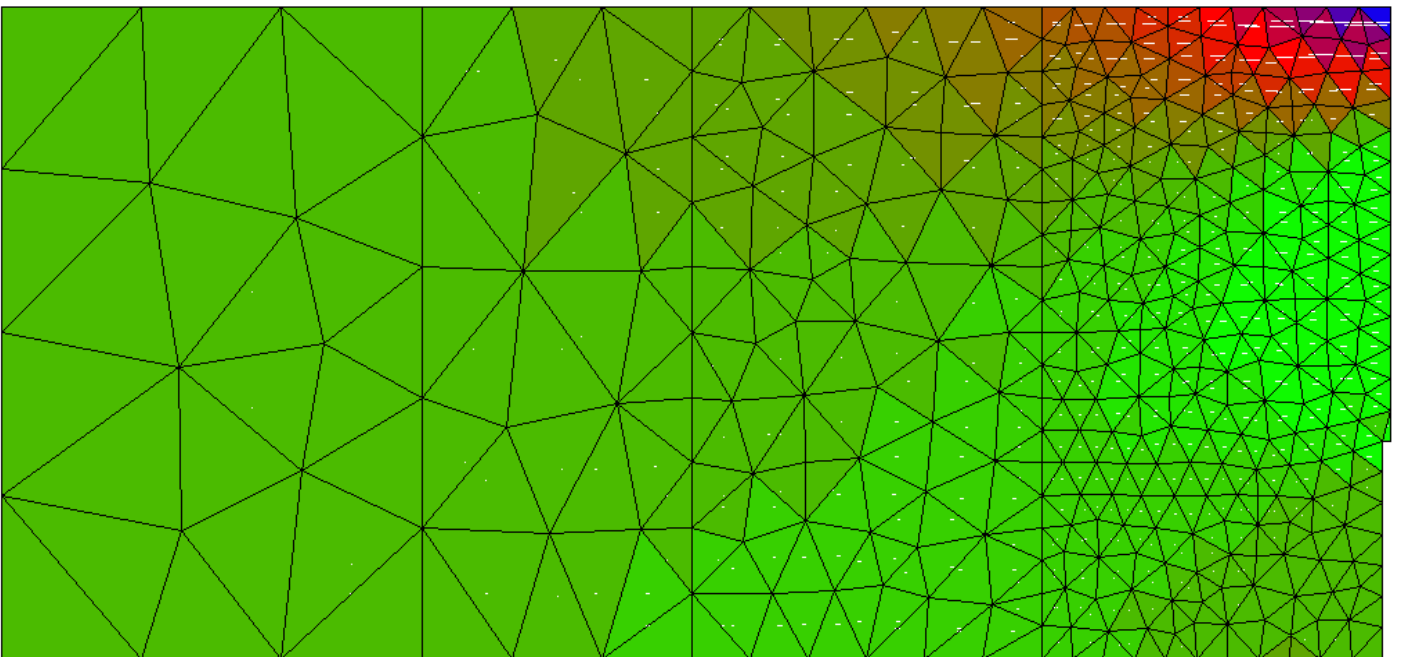


Figura 5.19. Estado tensional en la carga máxima, probeta S26.

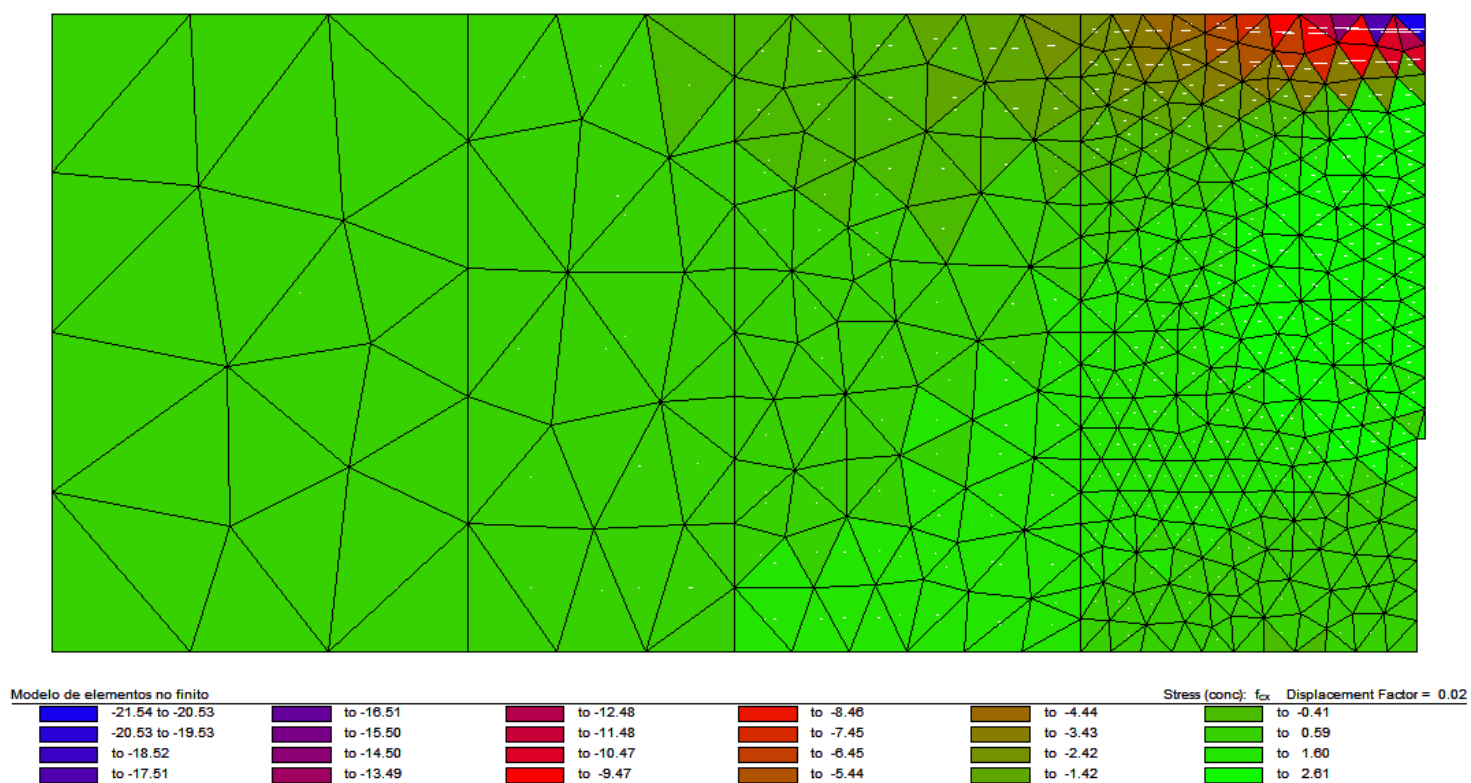


Figura 5.20. Estado tensional después del pico, probeta S26.

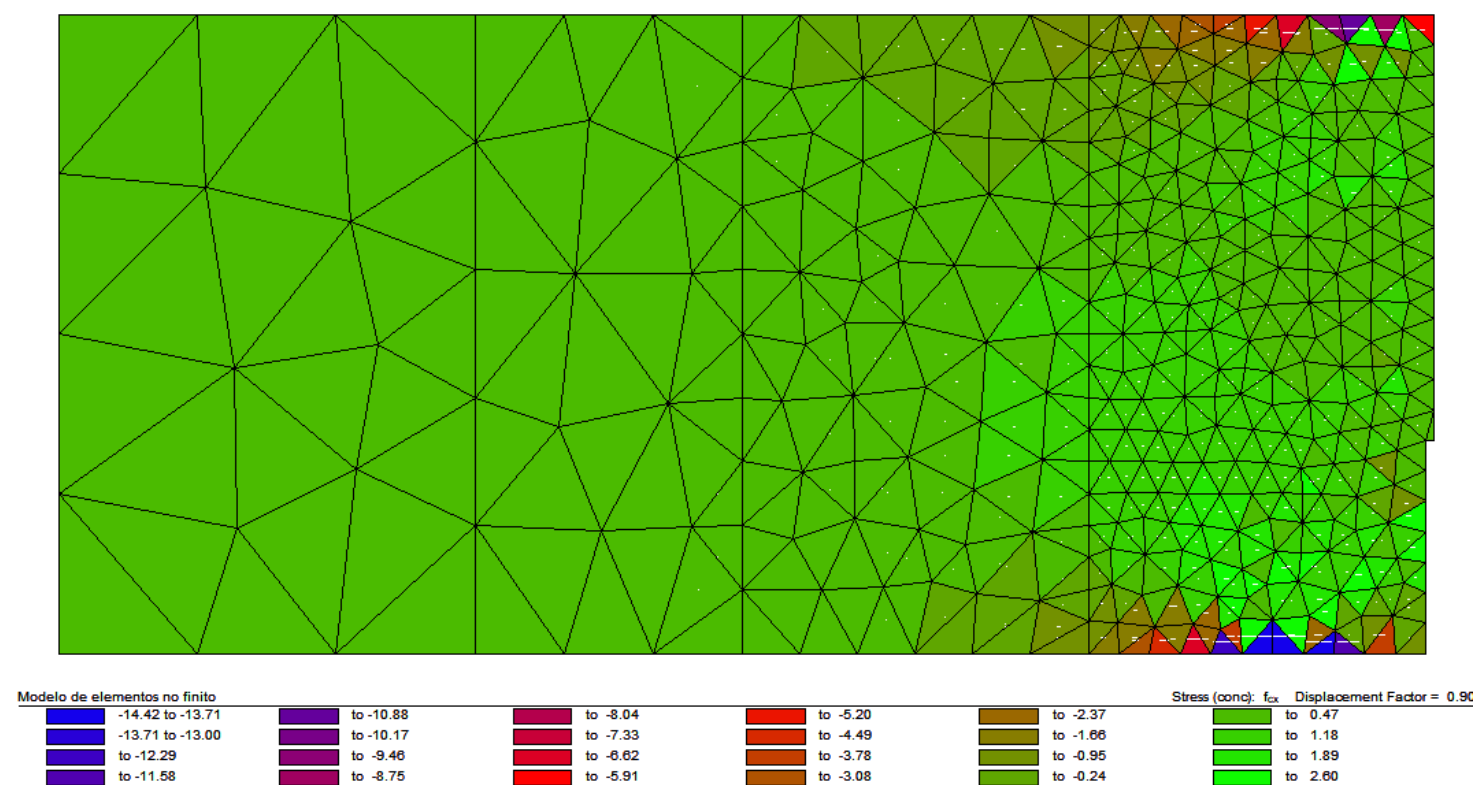


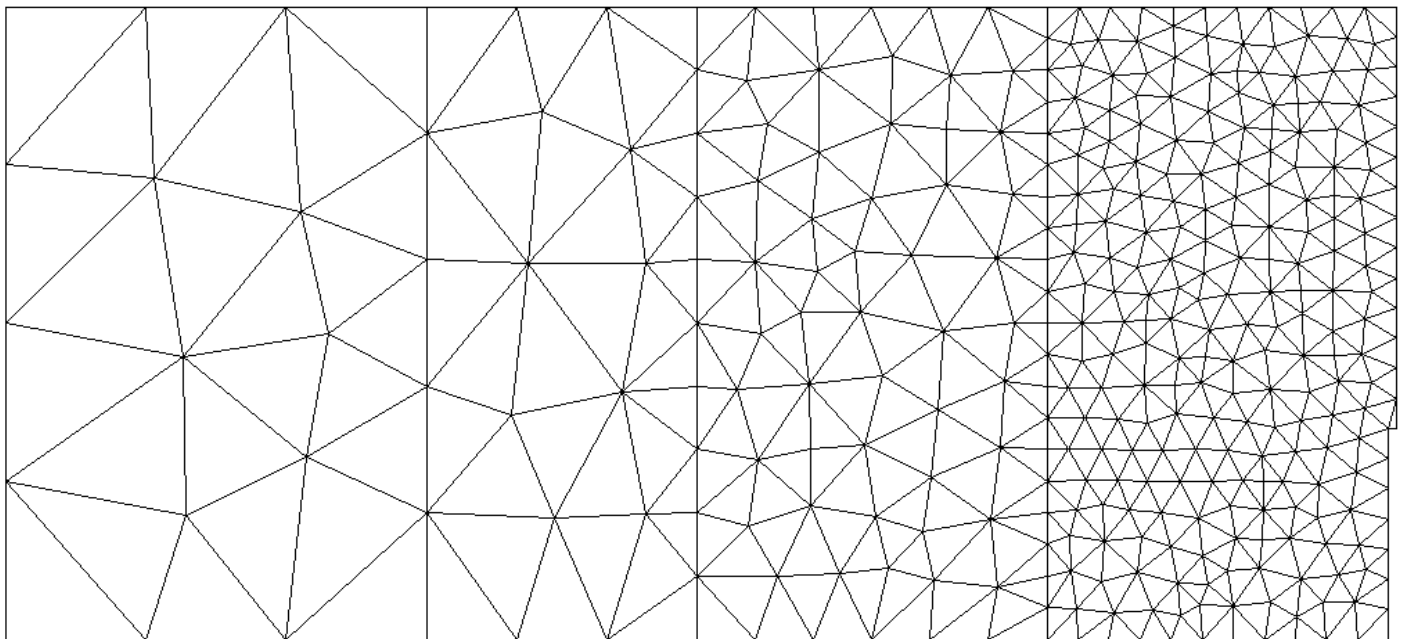
Figura 5.21. Estado tensional al final de la carga, probeta S26

En las figuras, se aprecia la concentración de carga sobre la zona superior de la entalla, de la misma manera que en la probeta de hormigón sin fibra S0. Se observa como la

influencia de la carga comienza poco antes de llegar al pico máximo de resistencia (Figura 5.20), logrando alcanzar un $f'_t=2.65$ Mpa, en el pico máximo, un 1.85% inferior al f'_t propuesto en la caracterización de la probeta (Figura 5.16). Una vez alcanzado este punto, la carga cae en descenso de manera gradual hasta lograr a una abertura de fisura y una deflexión de 1 mm a como se mostró en la Figura 5.17a y Figura 5.17b, respectivamente.

A continuación, se presenta la formación de fisuras en la probeta S26, en los distintos estados de tensiones:

- Formación de fisura en el estado tensional inicial (Figura 5.22).
- Formación de fisura en el estado tensional antes del pico (Figura 5.23).
- Formación de fisura en el estado tensional máximo (Figura 5.24).
- Formación de fisura en el estado tensional después del pico (Figura 5.25).
- Formación de fisura en el estado tensional al final de la carga (Figura 5.26).

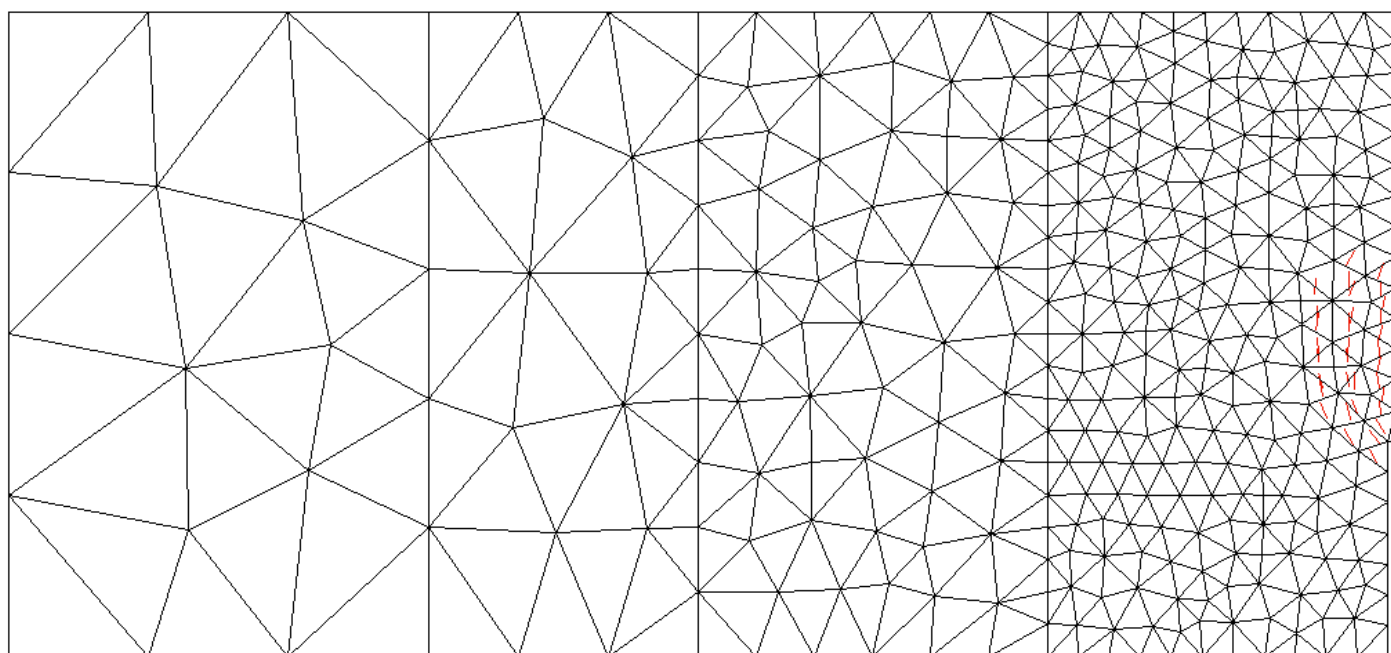


Modelo de elementos no finito

Displace/Cracks: Crack Dir's Displacement Factor = 0.00

Crack Widths: thin < 1.00 mm, mid, thick > 2.00 mm

Figura 5.22. Formación de fisura estado tensional inicial, probeta S26.

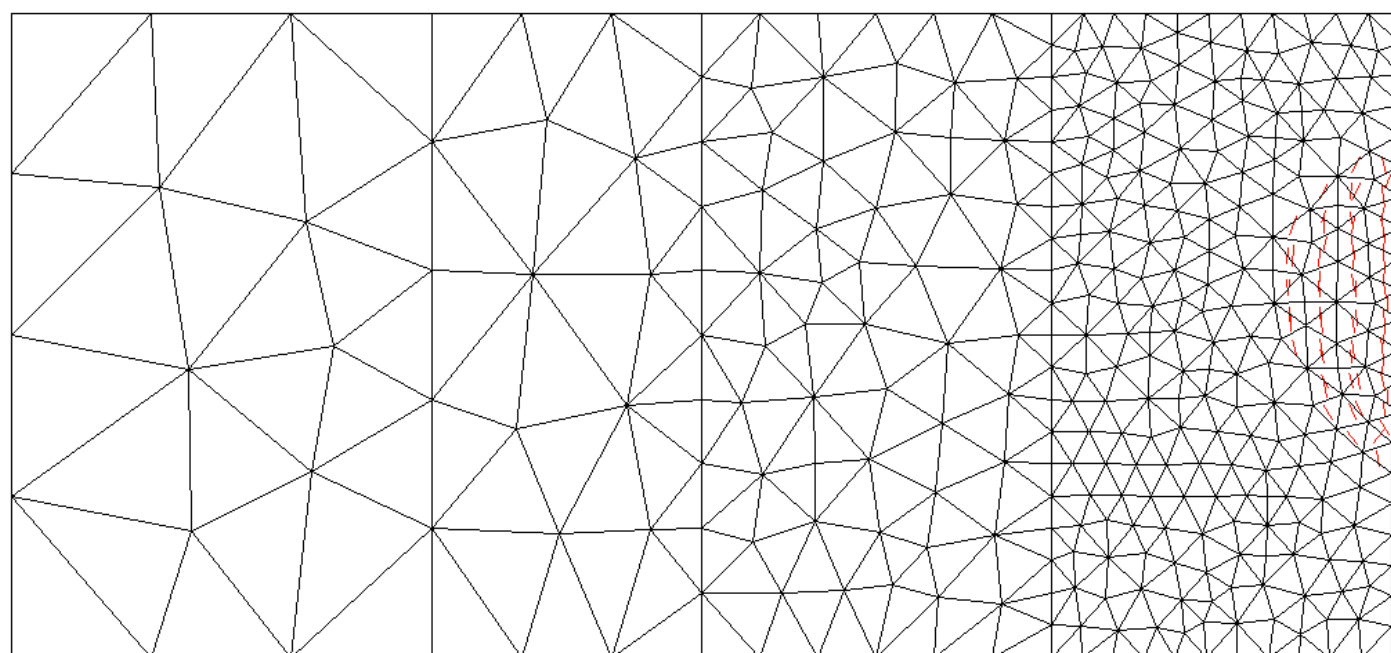


Modelo de elementos no finito

Displace/Cracks: Crack Dir'ns Displacement Factor = 0.00

Crack Widths: thin < 1.00 mm, mid, thick > 2.00 mm

Figura 5.23. Formación de fisura estado tensional antes del pico, probeta S26.



Modelo de elementos no finito

Displace/Cracks: Crack Dir'ns Displacement Factor = 0.01

Crack Widths: thin < 1.00 mm, mid, thick > 2.00 mm

Figura 5.24. Formación de fisura estado tensional máximo, probeta S26.

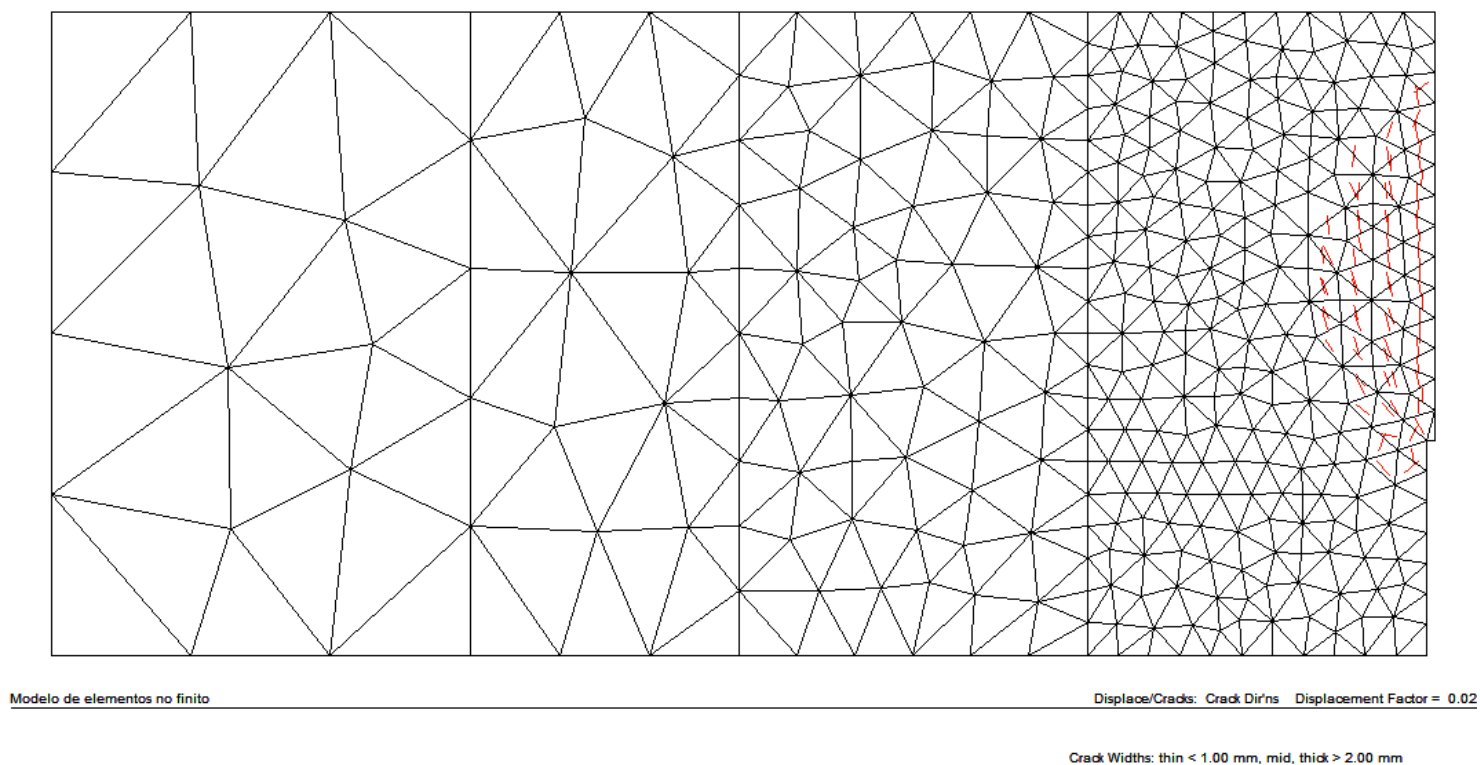


Figura 5.25. Formación de fisura estado tensional después del pico, probeta S26

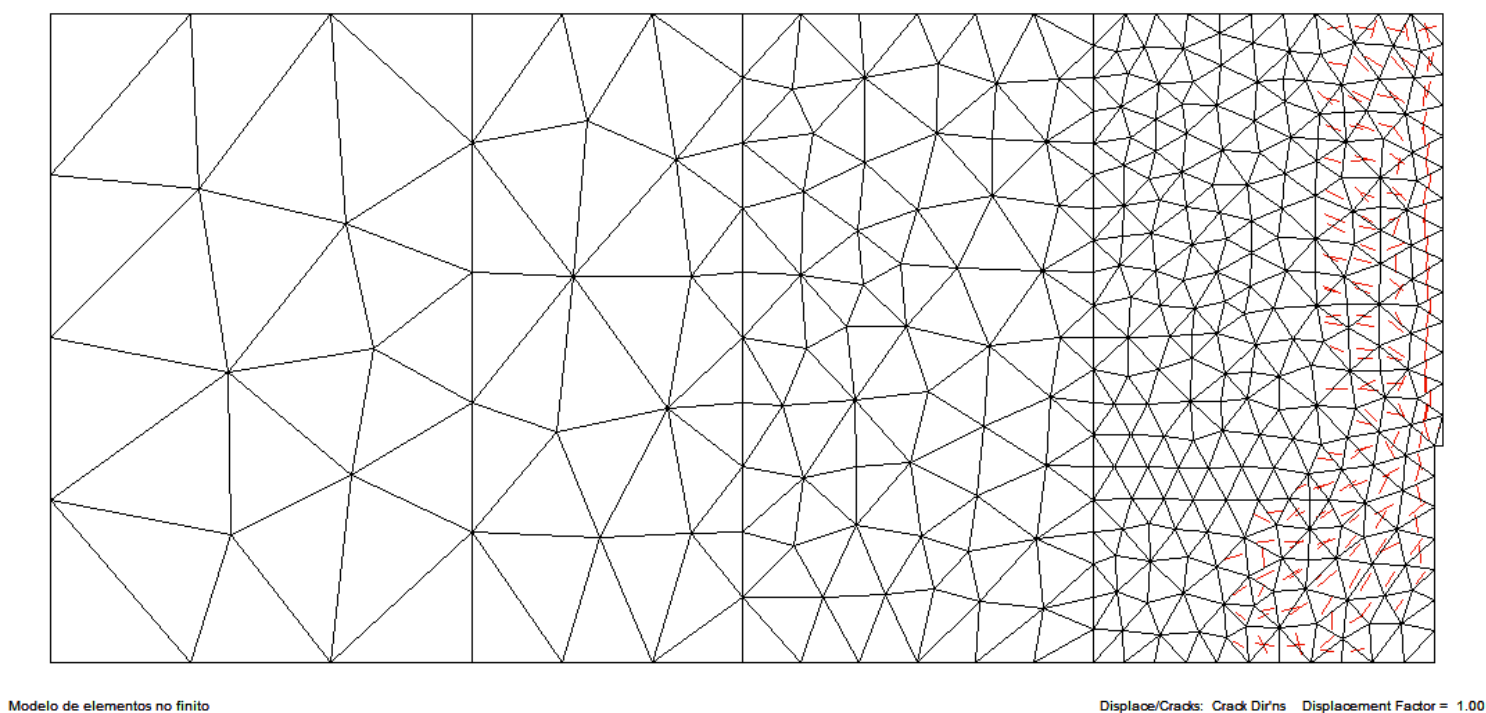


Figura 5.26. Formación de fisura estado tensional final, probeta S26.

La formación de fisura ocurre poco antes de alcanzar el estado de tensión máximo (Figura 5.23), continuando su propagación al alcanzar el pico máximo de resistencia dando lugar a la abertura de fisura (Figura 5.24). A partir de este punto, la abertura de

fisura (CMOD) incrementa al igual que la propagación de fisuras hasta alcanzar una abertura de fisura y desplazamiento a como se mostraron en la Figura 5.16.

La formación de fisura posterior al pico, es mayor que en la probeta de hormigón sin fibra (S0), ya que las fibras ejercen resistencia a la abertura de fisura, convirtiendo la probeta (S26) en un hormigón de mayor ductilidad que la probeta (S0).

5.4 Modelos numéricos desechados

Los resultados que se muestran a continuación, corresponden a probetas sometidas a cargas con otros modelos contenidos en el programa VecTor2.

5.4.1 Resultado de modelos desechados sin fibra (S0)

5.4.1.1 TENSION SOFTENING NON LINEAR

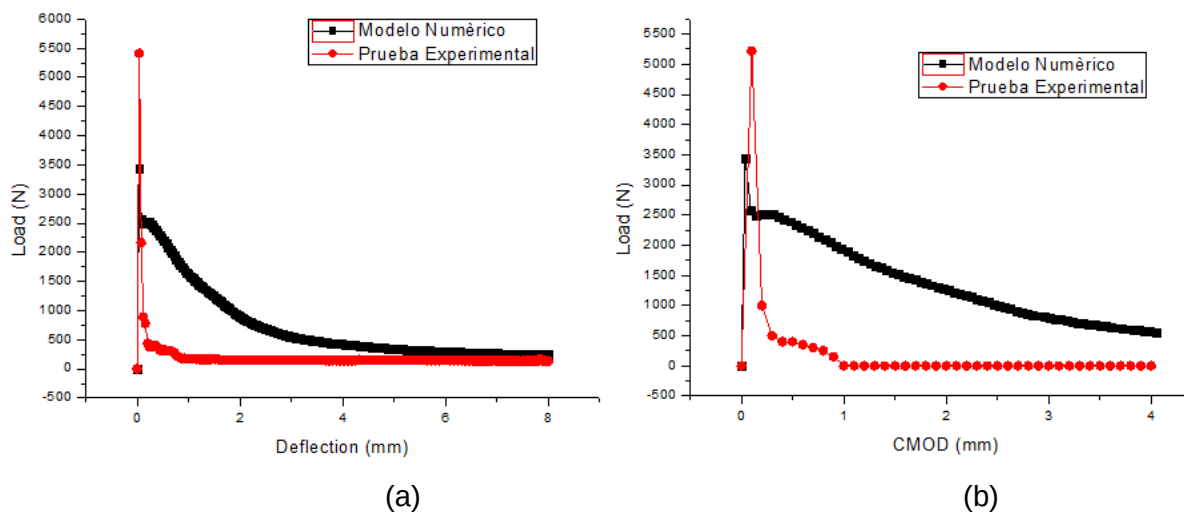


Figura 5.27. Resultados de fractura de probeta S0: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.

Este modelo numérico *tension softening non linear*, no fue tomado en cuenta, ya que el estado de tensión máximo supera significativamente, al obtenido en la prueba experimental.

5.4.1.2 TENSION EXPONENTIAL

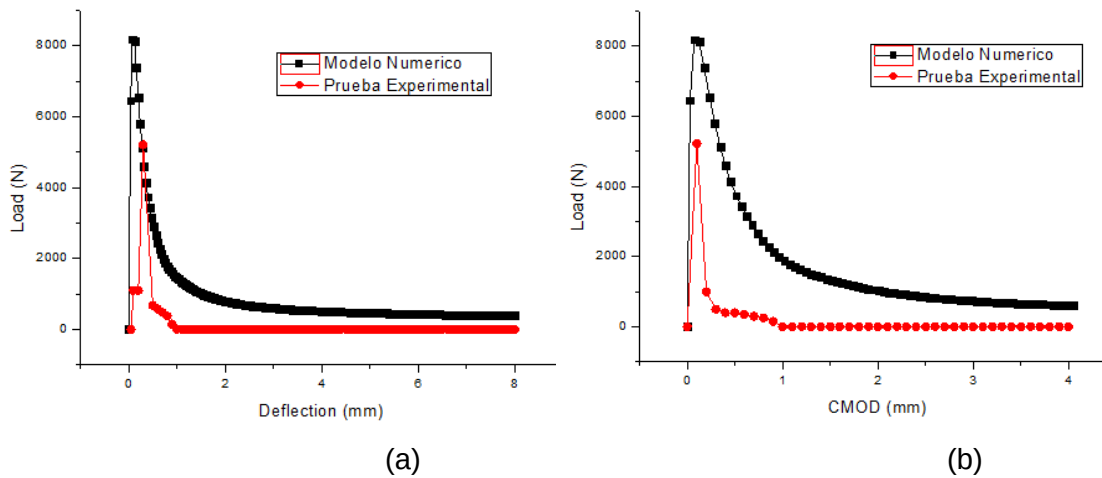


Figura 5.28. Resultados de fractura de probeta S0: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.

Este modelo numérico *tension exponencial*, no fue tomado en cuenta ya que el estado de tensión máximo era insuficiente al obtenido en la prueba experimental.

5.4.2 Resultado de modelos desechados con fibra (S26)

5.4.2.1 MODELO DE FCR TENSIÓN DEM

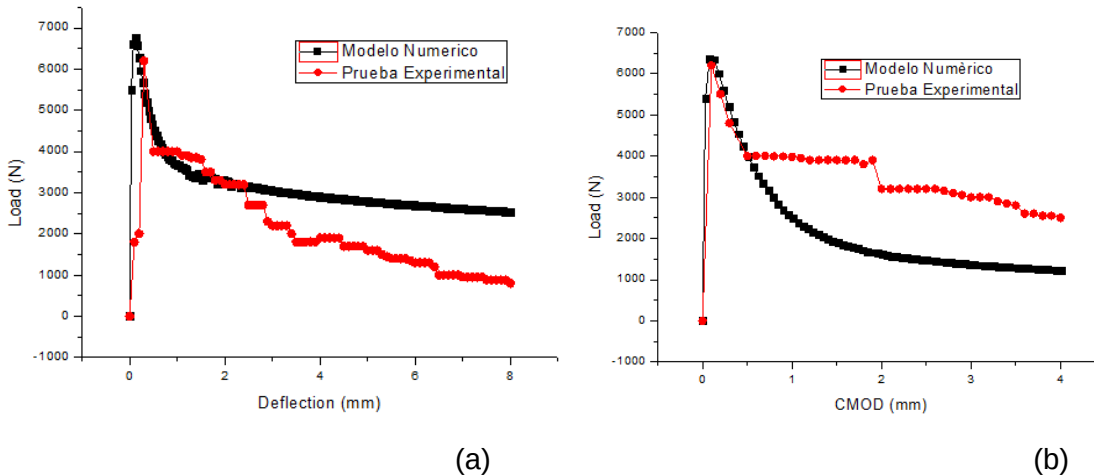


Figura 5.29. Resultados de fractura de probeta S26: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.

Este modelo numérico *FCR tensión DEM*, no fue tomado en cuenta, aunque coinciden en el estado de tensión máximo, no obstante, la resistencia residual en el modelo numérico era superior a la prueba experimental, alcanzando una deflexión en 8 mm, una resistencia residual de 3kN, una diferencia de 2kN, con respecto a la prueba experimental, significando esta desviación suficiente para desecharla.

6. ESTUDIO PARAMÉTRICO

Una vez analizado el efecto de la fibra en el hormigón, con la cuantía de 26 kg/m^3 ($V_f=0.331\%$), se estudia el efecto de la fibra, modificando las dosificaciones. Se propone las siguientes dosificaciones de fibra metálica:

- S7.5 adición de 7.50 kg/m^3 ($V_f=0.082\%$).
- S13: adición de 13.0 kg/m^3 ($V_f=0.165\%$).
- S52: adición de 52.0 kg/m^3 ($V_f=0.662\%$).
- S117.50: adición de 117.5 kg/m^3 ($V_f=1.500\%$).
- S157: adición de 157 kg/m^3 ($V_f=2.000\%$).

6.1. Resultados del modelo numérico del estudio paramétrico

A continuación, se presentan los resultados del estudio paramétrico con las diferentes dosificaciones de fibra.

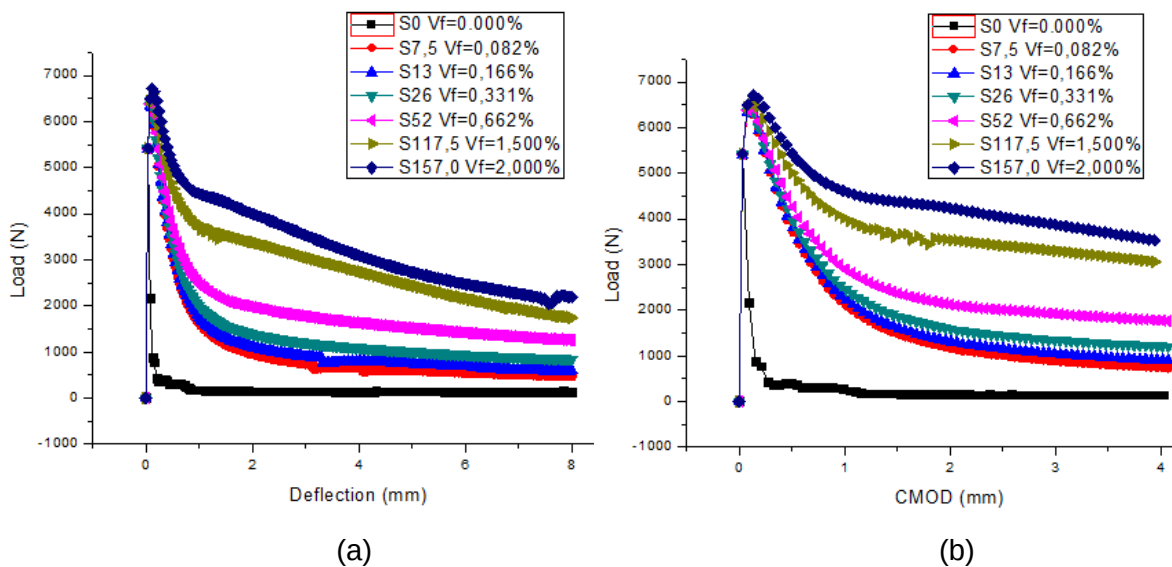


Figura 6.1. Resultados de fractura de probetas con diferentes dosificaciones de fibra metálica, S0, S7.5, S13, S26, S52, S117.5, S157: (a) carga vs deflexión. (b) carga vs CMOD.

Los resultados obtenidos se observan que la resistencia residual obtenida aumenta con el aumento de la dosificación de fibra en el hormigón para las diferentes probetas.

A continuación, se muestran los resultados aproximados obtenidos de la resistencia residual para cada una de las probetas:

- La probeta de hormigón con fibra S0 para una dosificación de 0 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 0.13kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 0.14kN.
- La probeta de hormigón con fibra S7.5 para una dosificación de 7.5 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 0.47kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 0.74 kN.
- La probeta de hormigón con fibra S13 para una dosificación de 13 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 0.59kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 0.90 kN.
- La probeta de hormigón con fibra S26 para una dosificación de 26 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 1kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 1.20 kN.
- La probeta de hormigón con fibra S52 para una dosificación de 52 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 1.2kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 1.70 kN.
- La probeta de hormigón con fibra S117.5 para una dosificación de 117.5 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 1.8kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 3.06 kN.
- La probeta de hormigón con fibra S157 para una dosificación de 157 kg/m³ de fibra metálica, obtuvo una resistencia residual de 2.19kN al alcanzar un desplazamiento de 8 mm; en cuanto al CMOD, una vez alcanzado los 4 mm la resistencia residual fue de 3.50 kN.

Utilizando la dosificación máxima de fibra $V_f = 2\%$ en el hormigón de la probeta S157, se alcanza una resistencia residual aproximada de 3.50kN, posterior a la carga máxima de rotura en comparación con el hormigón de la probeta S0. Igualmente, el incremento de esta resistencia, está relacionado con el aumento de V_f ya que crece de manera gradual en concordancia con las distintas cantidades de fibras adicionadas.

Asimismo, se observa un incremento de ductilidad a tracción en el hormigón reforzado con fibras al incrementar el volumen de fibra añadida, respecto a la rotura frágil observada en S0. Este tema es muy importante e interesante, sobre todo en estructuras sometidas a acciones dinámicas para evitar la rotura brusca de las mismas.

7. ESTIMACION DEL FACTOR DE ATENUACIÓN

Basándome en la investigación realizada en la tesis *Behaviour and Analysis of Steel and Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Loading: A Pilot Investigation*, [10] (Comportamiento y análisis de acero y hormigón reforzado con fibra macro sintética sometido a carga cíclica inversa: una investigación piloto) por el autor David Joseph Carnovale, en donde se expresa que el factor de atenuación (c), tiene una relación directa de la energía de fractura (G_f) con la resistencia a tracción (f'_t), el cual representa el incremento de energía para la formación de grieta, ocupé los resultados de la prueba experimental de la probeta de hormigón sin fibra para conocer el valor de dicho factor.

7.1 Resultado de la estimación del factor de atenuación, “c”

El factor de atenuación tiene valor adimensional y se calcula de siguiente manera:

$$c = \frac{f'_t}{G_f} \quad (3)$$

Tabla 7.1. Parámetros característicos de la probeta S0.

Ensayo	Parámetros	Probeta
		S0
f'_t	Mpa	3.9
G_f	N/m	130

El resultado obtenido del factor de atenuación es de:

$$c = \frac{f'_t}{G_f} = \frac{3.9}{0.13} = 30$$

De acuerdo con la bibliografía, el factor de atenuación obtenido, correspondería a un mortero, puesto que la relación que se propone $\frac{f'_t}{G_f} = 30$ y para hormigón es de 15.

8. CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha pretendido analizar el comportamiento a tracción del hormigón de una probeta con fibra como refuerzo. Para ello, se ha realizado en primer lugar, un modelo de elementos finitos de una probeta de hormigón sometida a un ensayo de flexo-tracción. Se ha discretizado el modelo de elementos finitos, con un mallado denso en la zona de influencia de la carga, donde se forma la primera fisura. Se ha reproducido el estado de carga de acuerdo al artículo de referencia que se ha utilizado en este trabajo.

Sobre dicho modelo, una vez calibrado se ha utilizado fibra metálica con diferentes cuantías, utilizando, primeramente, la cantidad de acuerdo a la prueba experimental y posteriormente, se realizó un estudio paramétrico con diferentes cantidades.

Se ha obtenido un modelo numérico aproximado a la probeta experimental consiguiendo información interesante en cuanto al comportamiento a tracción cuando se modificó las cantidades de fibras incrementando la resistencia final.

- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 0.082\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 3 veces superior.
- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 0.166\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 4 veces superior.
- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 0.331\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 7 veces superior.
- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 0.662\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 9 veces superior.
- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 1.500\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 13 veces superior.

- Cuando se incorpora un volumen de fibra, $V_f = 2.000\%$ a la probeta de hormigón sin fibra, el incremento obtenido de resistencia residual, es más de 15 veces superior.

El factor de atenuación obtenido para este trabajo es de 30. Según corresponde la clasificación realizada en la bibliografía corresponde a un mortero, sin embargo, aún no existen pruebas a pequeña y gran escala o estudios donde se relacione la influencia de la fibra en la matriz de hormigón con el factor de atenuación.

En resumen, los resultados obtenidos en este trabajo, se confirma que el uso de la fibra metálica, adicionada al hormigón, trae consigo beneficios, principalmente mejorando su capacidad de resistir a esfuerzos de tracción, traducándose esto, en un atractivo económico para la ingeniería.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, «*Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*», 2008, Real decreto 1247/2008, pag. 609.
- [2] ACI 544.1R-96, «*Report on Fiber Reinforced Concrete*», 2002, Reported by ACI Committee 544, pp. 1-66.
- [3] ACI 544.5R-10, «*Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete*», 2010, Reported by ACI Committee 544, pp. 1-35.
- [4] UNE-EN 14889-1, «*Fibras para hormigón. Fibras para hormigón Parte 1: Fibras de acero Definiciones, especificaciones y conformidad*», 2008, AENOR, pp 1-26
- [5] UNE-EN 14651:2007+A1, «*Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*», 2008, AENOR, pp 1-18.
- [6] UNE-EN 12390-5, «*Ensayo de hormigón endurecido, Parte 5: Resistencia a flexión de probeta*», 2001, AENOR, pp 1-12.
- [7] Andrés Mauricio Núñez López, «*Análisis Numérico Experimental de Elementos de Hormigón Reforzado con Fibras de Acero*», 2011, tesis doctoral, pp. 25-65.
- [8] M. G. Alberti, A. Enfedaque, y J. C. Gálvez, «*On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete*», 2014, Construction and Building Materials, vol. 55, pp. 274-288.
- [9] P. S. Wong, F. J. Vecchio, y H. Trommels, «*VecTor2 & FormWorks User's Manual*», 2013, University of Toronto: Toronto, Canada, pp 59-125.
- [10] David Joseph Carnovale, «*Behaviour and Analysis of Steel and Macro-Synthetic Fibre Reinforced Concrete Subjected to Reversed Cyclic Loading: A Pilot Investigation*», 2013, tesis de maestria, University of Toronto, pag 31.