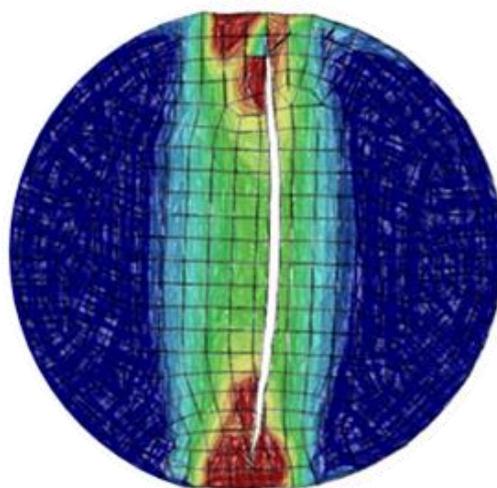




Master de Estructuras
Universidad de Granada



Modelización mediante el Método de Elementos Finitos del Ensayo UNE-EN 12697-23 de Tracción Indirecta en Mezclas Bituminosas



Granada, Diciembre 2013

Autor	Miguel Pérez Martínez Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Tutores	Dr. Rafael Gallego Sevilla Dr. Fernando Moreno Navarro

Modelización mediante el Método de Elementos Finitos del Ensayo UNE-EN 12697-23 de Tracción Indirecta en Mezclas Bituminosas

Autor Miguel Pérez Martínez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Tutores Dr. Rafael Gallego Sevilla
Dr. Fernando Moreno Navarro

Trabajo Fin de Máster entregado al Departamento de
Mecánica de Estructuras e Ingeniería Hidráulica
como requerimiento para la obtención del

MASTER EN ESTRUCTURAS

Universidad de Granada, Edificio Politécnico, Campus de Fuentenueva,
18001 Granada, España

Diciembre 2013

AUTORIZACIÓN

D.

Profesor del departamento de.....

de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Máster de

D.

Informa:

Que el presente trabajo, titulado:

.....
.....

Ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo nuestra dirección, y con esta fecha autorizo a su presentación.

Granada, ade de 20.....

Fdo.

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Máster se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, ade de 20.....

(Firmas y números de DNI / NIE del alumno y de los tutores)

Informe de valoración del proyecto

El tribunal constituido para la evaluación del Proyecto Fin de Máster titulado:

.....

Realizado por el alumno:

.....

Y dirigido por el tutor:

.....

Ha resuelto la calificación de:

- SOBRESALIENTE (9-10 puntos)
- NOTABLE (7-8.9 puntos)
- APROBADO (5-6.9 puntos)
- SUSPENSO

Con la nota¹: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, ade de 20.....

¹Solamente con un decimal.

RESUMEN

MODELIZACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DEL ENSAYO UNE-EN 12697-23 DE TRACCIÓN INDIRECTA EN MEZCLAS BITUMINOSAS

El Trabajo Fin de Máster que se presenta recoge los resultados obtenidos de la modelización mediante el método de los elementos finitos del ensayo de tracción indirecta en mezclas bituminosas. Este trabajo se ha llevado a cabo como requisito para la finalización de los estudios del Máster en Estructuras de la Universidad de Granada.

Las características asociadas al ensayo de mezclas bituminosas hacen que se planteen nuevos frentes de análisis. Dado el consumo económico, temporal y de recursos necesario para la investigación y dimensionamiento de los firmes de carreteras, donde las variables influyentes son numerosas (áridos, betún, contenido de huecos...) se plantea la posibilidad de modelizar determinados ensayos cuyo resultado permita disminuir la carga de trabajo en laboratorio y así aportar otro tipo de soluciones.

Los trabajos se han desarrollado en dos etapas en las que se presenta una metodología de actuación para el diseño y comparación de los resultados. Se han empleado dos modelos de análisis y se ha determinado cuál de ellos arroja unos resultados más próximos a los obtenidos previamente en laboratorio. Para ello se ha empleado el programa de cálculo ABAQUS, donde mediante los modelos implementados de cálculo con elementos finitos extendidos (XFEM) y de daño plástico en hormigón (Concrete Damage Plasticity) se ha estudiado el comportamiento a fractura de una mezcla bituminosa. El estudio se ha llevado a cabo tanto para una geometría bidimensional como tridimensional para analizar las variaciones que pueda haber.

El estudio de materiales y su modelización con elementos finitos se plantea como un arma de cálculo potente que le da un valor añadido a la investigación de estos compuestos. El ahorro de tiempo y trabajo de laboratorio que conlleva el empleo de estas herramientas puede ayudar a estimar las distintas soluciones posibles y así elegir aquellas más viables para su reproducción.

Palabras Clave: Elementos Finitos, modelización, XFEM, Daño plástico, Mezcla bituminosa.

ABSTRACT

MODELIZATION BY FINITE ELEMENT METHOD OF THE UNE-EN 12697-23 INDIRECT TENSILE TEST IN BITUMINOUS MIXTURES

The Final Dissertation presented includes the results of modeling the indirect tensile test on bituminous mixtures using the finite element method. This work has been carried out as a requirement for completing the Master studies in Structures at the University of Granada.

The characteristics associated with bituminous mixtures testing make appear new analysis fronts. Given the financial, temporal and resources consumption necessary for the investigation and design of road pavements, where there are many influential variables (aggregates, bitumen, void content ...), make arise the possibility of modeling certain tests which results may allow decreasing laboratory workload and thus provide other solutions.

The work was carried out in two stages in which a methodology for the design and performance comparison of the results is presented. Two models have been used for analysis, determining which one yields closer results to those obtained previously in laboratory tests. To do this ABAQUS calculation program has been used, where by the implemented calculus models of extended finite element (XFEM) and Concrete Damage Plasticity the fracture behavior of a bituminous mixture has been studied. The study was carried out in either a two-dimensional and three-dimensional geometry in order to analyze the possible variations that may occur.

The study of materials and their finite element modeling is proposed as a powerful calculation tool that increases the value of investigating these compounds. The use of these tools involves saving time and laboratory work, helping at the same time to estimate the various possible solutions to choose those most viable for laboratory reproduction.

Keywords: Finite Elements, modelization, XFEM, Plastic damage, Asphalt mixture.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a mis tutores, D. Rafael Gallego Sevilla y D. Fernando Moreno Navarro que hayan dedicado su tiempo y conocimientos en la realización de este Trabajo Fin de Máster. Al igual que a D. Héctor Cifuentes Bulté, profesor de la Universidad de Sevilla, sin cuya ayuda y conocimiento sobre el programa ABAQUS esto no habría sido posible.

Igualmente recordar y agradecer a todos los miembros del grupo de investigación LabIC.UGR, en especial a Mayca y Germán, por darme la oportunidad de compatibilizar trabajo y formación, y a mis compañeros, Jesús, Miguel, Ana, Gema y Jaime, por su colaboración en los trabajos de laboratorio, paciencia, apoyo y compañerismo.

Agradecer también a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada, por facilitar sus instalaciones y equipamientos para la realización del Máster en Estructuras, y en particular, el trabajo que se presenta

Finalmente, a modo personal, agradecer a la familia, a los amigos y a Elena, la comprensión y el apoyo brindado durante la realización del máster y este trabajo.

Modelización mediante el Método de Elementos Finitos del Ensayo UNE-EN 12697-23 de Tracción Indirecta en Mezclas Bituminosas

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Conceptos previos	1
Descripción de una mezcla bituminosa.....	1
Comportamiento de las Mezclas Bituminosas a Tracción.....	1
Aplicación de la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal a las mezclas bituminosas	2
1.2. Aplicación del Método de los Elementos Finitos al comportamiento en Fractura de las mezclas bituminosas	3
Abaqus XFEM.....	3
Abaqus CONCRETE DAMAGE PLASTICITY.....	6
2. OBJETIVO	9
3. METODOLOGÍA.....	11
3.1. Plan de Trabajos	11
Etapa 1: Estudio de Laboratorio.....	11
Etapa2: Estudio mediante el Método de los Elementos Finitos.	19
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	31
4.1. Resultados de laboratorio	31
4.2. Modelos en 2D	33
XFEM	33
Concrete Damage Plasticity	34
4.3. Modelos en 3D	36
XFEM	36
Concrete Damage Plasticity	38
4.4. Comparación de Resultados.....	40
5. CONCLUSIONES	41
6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	43
REFERENCIAS.....	45
ANEXO	49
ANEXO 1. NORMA UNE-EN 12697-23 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.....	49

Lista de Figuras

Figura 1. Ejemplos de dominio de grieta y su localización en 2D y 3D. (Fuente: Abaqus 6.10)....	4
Figura 2. Principio del método de los nudos fantasma (Fuente: Abaqus 6.10)	5
Figura 3. Equivalencia entre grieta y zona dañada.	7
Figura 4. Aspecto probetas Marshall.	14
Figura 5. Probetas del grupo húmedo acondicionándose.	14
Figura 6. Equipo Wheel Tracking, para el Ensayo de rodadura.	15
Figura 7. Ensayo de rigidez.....	15
Figura 8. Bastidor de ensayo con bandas de carga y probeta.....	17
Figura 9. Tipos de rotura por tracción indirecta.	18
Figura 10. Secuencia de trabajo en ABAQUS.	19
Figura 11. Definición de la geometría en 2D.....	20
Figura 12. Definición del comportamiento para XFEM.....	20
Figura 13. Definición del comportamiento para CONCRETE DAMAGE PLASTICITY.	21
Figura 14. Definición de la zona de fractura.	22
Figura 15. Set de datos 2D.	23
Figura 16. Cargas y condiciones de contorno en 2D.	23
Figura 17. Elementos Quad dominated para un mallado estructurado.	24
Figura 18. Aspecto del mallado de la probeta en 2D.	24
Figura 19. Definición de la geometría en 3D.....	26
Figura 20. Set de datos 3D.	27
Figura 21. Cargas y condiciones de contorno en 3D.	28
Figura 22. Aspecto del mallado de la probeta en 3D.	28
Figura 23. Graficas Fuerza-Deformación del ensayo de tracción indirecta a 5°C en laboratorio.	32
Figura 24. Probeta rota a tracción indirecta.	32
Figura 25. Proceso de fisuración 2D XFEM.....	33
Figura 26. Diagrama Carga-Deformación modelo 2D XFEM.	33
Figura 27. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 2D XFEM.....	34
Figura 28. Diagrama vectorial de tensiones y fisura en el modelo 2D XFEM.....	34
Figura 29. Proceso de daño 2D con Concrete Damage Plasticity.....	34
Figura 30. Diagrama Carga-Deformación modelo Concrete Damage Plasticity 2D.	35
Figura 31. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 2D Concrete Damage Plasticity.	35
Figura 32. Diagrama vectorial de tensiones y daño en el modelo 2D Concrete Damage Plasticity.	36
Figura 33. Proceso de daño 3D XFEM.	36
Figura 34. Diagrama Carga-Deformación modelo 3D XFEM.	37
Figura 35. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 3D XFEM.....	37
Figura 36. Diagrama vectorial de tensiones y fisura en el modelo 3D XFEM.....	38
Figura 37. Proceso de daño 3D Concrete Damage Plasticity.	38
Figura 38. Diagrama Carga-Deformación modelo 3D Concrete Damage Plasticity.	39
Figura 39. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 3D Concrete Damage Plasticity.	39

Figura 40. Diagrama vectorial de tensiones y daño en el modelo 3D Concrete Damage Plasticity.	40
Figura 41. Diagrama Carga-Deformación Laboratorio vs. Modelos 2D y 3D.	40

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de los áridos.	12
Tabla 2. Características del betún B 20/25.	13
Tabla 3. Ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas.	13
Tabla 4. Anchura de la banda de carga.	16
Tabla 5. Resumen parámetros de entrada de los modelos.	21
Tabla 6. Resultados diseño mezcla AC 16 S.	31
Tabla 7. Resultados de laboratorio para el ensayo UNE-EN 12697-23.	31
Tabla 8. Valores para el modelo obtenidos experimentalmente.	32

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de las líneas de investigación tuteladas en el Máster Universitario en Estructuras, se ha desarrollado para el Trabajo Fin de Máster, en colaboración con el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción, la “Modelización mediante el Método de Elementos Finitos del Ensayo UNE-EN 12697-23 de Tracción Indirecta en Mezclas Bituminosas”.

Dentro de la gama de ensayos existentes para la caracterización del comportamiento mecánico de una mezcla bituminosa se ha elegido el ensayo de resistencia a tracción indirecta por ser determinante a la hora de evaluar su actuación frente a los esfuerzos a los que va a ser sometido el firme durante su vida útil, pudiendo determinar de antemano los esfuerzos máximos que podrá aguantar, así como la resistencia a fractura del pavimento.

1.1. Conceptos previos

Descripción de una mezcla bituminosa

Las vías de comunicación han ido evolucionando de forma continua a lo largo de la historia, desde los caminos de herradura a los actuales pavimentos bituminosos o de hormigón, pasando por los caminos empedrados, alquitranados o el macadán (Uriol-Salcedo, 1992).

Una mezcla bituminosa convencional en caliente está constituida por tres materiales fundamentalmente, áridos, polvo mineral y betún. Los áridos se dividen en fracción gruesa, la cual dota a la mezcla de capacidad portante, y fracción fina, que junto al filler y al ligante conforman el mortero que da cohesión a la mezcla, y otorgan una gran resistencia ante esfuerzos tangenciales. Estas mezclas se fabrican en centrales fijas o móviles y posteriormente se transportan a obra para su extendido y compactación, dando como resultado un pavimento con la capacidad necesaria para distribuir las cargas de tráfico y ambientales a las que va a ser sometido (EAPA, 2012).

Comportamiento de las Mezclas Bituminosas a Tracción

El ensayo de tracción se ha empleado ampliamente en ingeniería, ya que permite determinar las propiedades mecánicas de los materiales, resistencia y deformabilidad, así como la tensión máxima y el módulo de rigidez entre otros (Garrote-Villar, 2006). Existen dos tipos de ensayos para determinar la resistencia a tracción de una mezcla bituminosa, el ensayo de tracción directa y el de tracción indirecta.

Sin embargo, en el campo de las mezclas asfálticas no hay un ensayo estandarizado y de amplia utilización de tracción directa, siendo el más utilizado el de tracción indirecta. El ensayo de tracción indirecta destaca por ser un ensayo simple y representativo, permitiendo imitar la respuesta del pavimento y obtener la carga máxima que es capaz de aguantar antes de romper.

El comportamiento general de la mezcla bituminosa lo conforman cada uno de sus componentes, los áridos son materiales elastoplásticos y el betún viscoelástico, por lo tanto se considera que las mezclas bituminosas son un material viscoelastoplástico. Debido a las características del betún, las mezclas bituminosas tienen un comportamiento que depende de la temperatura y la velocidad de aplicación de las cargas, y sólo en determinadas condiciones

se puede considerar que tienen un comportamiento elástico y lineal (Novak et al., 2003; Akbulut et Aslantas, 2004; Li et Marasteanu, 2010a; Kim et al. 2009). Estas condiciones son cuando las temperaturas son bajas y la velocidad de aplicación de las cargas es elevada, los diagramas fuerza-desplazamiento obtenidos experimentalmente por Li et Marasteanu (2010a), al igual que los trabajos dirigidos por Kim et al. (2009) muestran cómo a muy bajas temperaturas las mezclas bituminosas se comportan de forma elástica lineal hasta la carga máxima, y por tanto dentro de este marco la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (LEFM) podría ser aplicable a estos materiales (Li et Marasteanu, 2010b)

Aplicación de la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal a las mezclas bituminosas

La aplicación de la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal en las mezclas bituminosas se asume generalmente como poco acertada para aproximaciones a temperatura ambiente, aunque parece razonable su utilización a bajas temperaturas (Li et Marasteanu, 2006).

Majidzadeh en el año 1976 fue el pionero en la aplicación de la mecánica de la fractura a las mezclas bituminosas, Little et Mahboub (1985) estudiaron las propiedades de primera generación de la mecánica de la fractura en betunes sulfúricos plastificados, estudiando probetas entalladas a flexión a tres puntos para determinar el valor crítico de la integral J , J_{1c} . Abdulshafi et Majidzadeh (1985) realizaron una aproximación energética para predecir la vida de fatiga del pavimento empleando para ello la iniciación de la fisura, su propagación y el fallo, en probetas entalladas junto al concepto de la integral J para fractura y fatiga de la mezcla. Dongre et al. (1989) aplicaron tanto el modelo elastoplástico de fractura como el elástico lineal para desarrollar el criterio de fractura de las mezclas a baja temperatura.

En la década de los 90, Roque et Buttlar (1992) investigaron sobre la aplicación del ensayo de tracción indirecta para determinar las propiedades de fractura de las mezclas bituminosas. Labuz et Dai (1994) llevaron a cabo ensayos de fractura controlada sometiendo a las probetas a ciclos de flexión de carga y descarga en tres puntos para la obtención del factor de intensidad de tensiones, K_{Ic} .

En trabajos más recientes, Zhengyu et al. (2005) aplicaron una aproximación diferente para el modelo de zona cohesiva (CZM), teniendo en cuenta los efectos combinados de la temperatura y el tipo de carga, estados tridimensionales, varias capas de mezcla y el gradiente de envejecimiento inducido en las propiedades de los materiales. De la misma manera, a través del ensayo de la probeta semicircular SCB (Semi Circular Bend) otros autores llegaron a la conclusión de que el factor de intensidad de tensiones no dependía del tamaño de la probeta (Molenaar et al., 2004), y que los resultados de tensiones sobre pavimentos reciclados eran comparables a los obtenidos mediante el ensayo de tracción indirecta (Huang et al., 2004).

Diversos autores han empleado la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal al estudio de las mezclas bituminosas (Lee et al. 1995; Kim et al. 1995; Sulaiman et Stock, 1995; Aglan et al. 1992; Jacobs et al. 1996; Ioannides 1997; Mobasher et al. 1997; Marasteanu et al. 2004; Molenaar et al. 2004; Wendling et al. 2004).

1.2. Aplicación del Método de los Elementos Finitos al comportamiento en Fractura de las mezclas bituminosas

Se pretenden dar a conocer una serie de modelos capaces de reproducir con mayor o menor precisión el comportamiento a fractura de las mezclas bituminosas, detallando en mayor medida los usos de aplicación al trabajo.

La aplicación del Método de los Elementos Finitos al comportamiento a Fractura de las mezclas bituminosas puede realizarse a través de los siguientes modelos:

- Modelo de grieta discreta: Se pueden emplear dos tipos de técnicas, grietas discretas interelementales (necesaria la utilización de técnicas de remallado) y grietas discretas intraelementales (incluye la discontinuidad).
 - Modelo de Grieta discreta mediante elementos Cohesivos tipo muelle.
 - Método de los elementos finitos extendidos, XFEM (Belytschko et Black 1999), es un modelo donde se evita el remallado. Implementado en ABAQUS.
 - Modelos de elementos libres de Galerkin (Hyun et al. 1986), es un modelo donde se evita el remallado.
 - Brittle Cracking. Implementado en ABAQUS.
 - Elementos Cohesivos.
- Modelos de fisuración difusa: Basados en la mecánica de los medios continuos.
 - Concrete Smeared Cracking. Preferiblemente para hormigón fisurado. Implementado en ABAQUS.
- Modelos de daño: Basados en la mecánica de los medios continuos
 - Concrete Damage Plasticity. Implementado en ABAQUS, basado en una teoría de daño elástico isotrópico en combinación con tracción isotrópica y plasticidad en compresión.

De todos los modelos de cálculo disponibles en el programa ABAQUS, se va a hacer uso de los elementos finitos extendidos (XFEM) y del Concrete Damage Plasticity, tanto en dos dimensiones como en tres dimensiones para realizar una comparativa entre ambos respecto a los ensayos de laboratorio. A continuación se procede a explicar de manera más detallada ambos modelos.

Abaqus XFEM

El método de elementos finitos extendidos (XFEM) reduce los inconvenientes asociados al mallado de superficies de fractura, grietas. El método XFEM fue introducido por primera vez por Belytschko et Black (1999). Es una extensión del método de elementos finitos convencional basado en el concepto de partición de la unidad de Melenk y Babuska (1996), que permite las funciones de enriquecimiento local fácilmente incorporables aun elemento de aproximación finita. La presencia de discontinuidades se asegura por las funciones especiales enriquecidas junto a grados de libertad adicionales. Sin embargo, el marco de elementos finitos y sus propiedades, tales como la simetría se conservan.

Mediante el método XFEM se puede estudiar el inicio y propagación de la fisuración en problemas casi estáticos. XFEM permite el estudio de crecimiento de la grieta a lo largo de una trayectoria arbitraria sin necesidad de volver a mallar el modelo. XFEM está disponible para los

modelos planos bidimensionales y sólidos tridimensionales. La grieta se puede definir al otorgarle una ubicación inicial, o alternativamente Abaqus permite su determinación durante el análisis, basándose en el valor de la tensión principal máxima o la tensión calculada en el dominio de la grieta.

Dominio de la Grieta: Para definir el dominio de la grieta, se pueden seleccionar una o más celdas de una geometría tridimensional, o una o más caras de una bidimensional, al igual que si se define el dominio de la grieta en una pieza de malla huérfana, se pueden seleccionar los elementos independientemente. El dominio de la grieta incluye regiones tanto que contengan las grietas como en las que podría iniciarse o propagarse una grieta.

Crecimiento de la grieta: Se permite la propagación de la grieta de forma arbitraria mediante la determinación de una solución dependiente o simplemente estacionaria.

Localización inicial de la grieta: Para definir la situación inicial de la grieta hay que seleccionar en el modelo tridimensional las celdas, o los bordes en el caso del modelo bidimensional. Ésta debe estar dentro del dominio de la grieta.

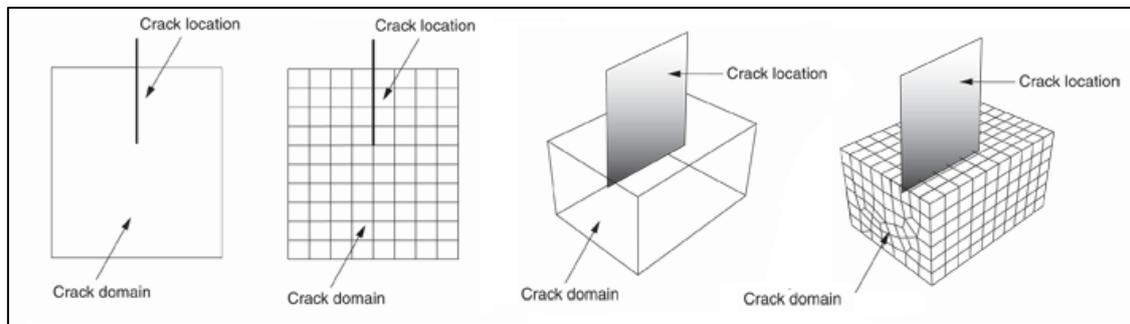


Figura 1. Ejemplos de dominio de grieta y su localización en 2D y 3D. (Fuente: Abaqus 6.10)

Por otra parte, se puede no definir la localización de la grieta. Independientemente de si se define o no la ubicación inicial de la misma, ABAQUS la inicia durante la simulación mediante la búsqueda de las regiones que experimentan tensiones principales superiores a los valores máximos de daños especificados en las leyes de tracción-separación.

Radio de Enriquecimiento: El radio de enriquecimiento es un pequeño radio en la punta de la grieta donde los elementos se utilizarán para el cálculo de la singularidad (grieta estacionaria). Los elementos dentro del radio de enriquecimiento deben ser incluidos en las celdas o caras elegidas para representar el dominio de la grieta. Si se permite, ABAQUS puede calcular el radio (este será tres veces el elemento de longitud característica típica de la zona enriquecida), o se puede especificar su valor.

Iniciación del daño: Las condiciones que permiten el inicio del daño se deben introducir en los parámetros del material cuando se defina. El criterio de fallo puede basarse tanto en la máxima tensión principal como en la máxima deformación principal.

Procedimiento de análisis: La grieta puede ser incluida en el proceso de análisis estático. Alternativamente, la grieta se puede añadir a un procedimiento de análisis dinámico implícito para simular la fractura y fallo en una estructura bajo impacto a alta velocidad. La propagación de grietas mediante XFEM simula en el procedimiento dinámico implícito, pudiendo estar

precedido o seguido por un proceso estático para modelizar el daño y el fallo a lo largo del historial de carga.

ABAQUS ofrece dos enfoques para el estudio de la iniciación y propagación de grietas utilizando XFEM, “Traction-separation cohesive behavior” (Comportamiento cohesivo de separación por tracción) donde se pueden especificar las propiedades de los materiales que definen la evolución del daño que conduce al colapso, donde al establecer la sección al material se le asigna el dominio de la grieta. Y la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (LEFM), que utiliza la técnica del cierre virtual de la grieta (VCCT-Virtual Crack Closure Technique), para calcular la velocidad de liberación de energía de deformación en el vértice de la grieta.

- Comportamiento cohesivo de separación por tracción: Este enfoque se utiliza en Abaqus para simular la iniciación y propagación de grietas. Esta es una capacidad de modelado muy general, que puede ser empleada para fractura frágil o dúctil, simulando la rotura de forma arbitraria o a través de una solución dada, ya que no está ligada a elementos del mallado.

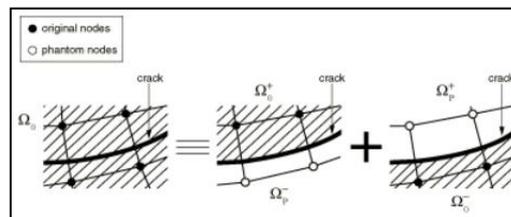


Figura 2. Principio del método de los nodos fantasma (Fuente: Abaqus 6.10)

Los nodos fantasma, que se superponen con los originales, se introducen para representar la discontinuidad de los elementos agrietados. Cuando el elemento está intacto, cada nodo fantasma está completamente limitado al nodo real que le corresponde. Cuando el elemento se corta a través de una grieta, el elemento agrietado se divide en dos partes. Cada parte está formada por una combinación de algunos de los nodos reales y fantasmas dependiendo de la orientación de la grieta. Cada nodo fantasma y su correspondiente nodo real ya no están unidos entre sí y pueden separarse.

Este método ofrece un enfoque eficaz y atractivo, y se ha utilizado para la simulación de la iniciación y crecimiento de múltiples grietas en sólidos por Song et al. (2006) y Remmers et al. (2008). Se ha demostrado que hace alarde de casi ninguna dependencia de malla si la mallase refina lo suficiente.

- Mecánica de la Fractura Elástica Lineal: Es el enfoque alternativo al modelo de grietas que se desplazan dentro del marco de XFEM, siendo más apropiado para los problemas en los que se produce la propagación de grietas frágiles, considerando solo el salto a través de elementos agrietados. La fractura en este caso se debe propagar a través del elemento completo, evitando la necesidad de modelar la singularidad de tensiones.

La técnica de modelado es muy similar al enfoque descrito anteriormente donde se introducen los nodos fantasma para representar la discontinuidad del elemento agrietado cuando el criterio de fractura se satisface. El nodo real y el nodo fantasma

correspondiente se separarán cuando la tasa de liberación de energía de deformación equivalente supera la velocidad de liberación de energía de deformación crítica en el vértice de la grieta en un elemento enriquecido. La tracción se realiza inicialmente como fuerzas iguales y opuestas en las dos superficies del elemento agrietado. Y esta se reduce linealmente con el tiempo para reducir la probabilidad de dificultades de convergencia y de distorsión de la malla.

Para la correcta identificación de las variables de salida se debe hacer uso de las opciones, PHILSM, describe la cara de fractura, PSILSM, describe el frente de fractura inicial, y STATUSXFEM, donde se especifica si el elemento está totalmente, parcialmente o no agrietado.

Las limitaciones del modelo están asociadas a que:

- Una grieta no puede cortar más de un elemento enriquecido.
- La grieta no puede girar más de 90° en un incremento durante un análisis.
- Sólo los campos de grietas asintóticas en un material elástico isótropo se consideran para una grieta estacionaria.
- No es compatible el remallado adaptativo.

Abaqus CONCRETE DAMAGE PLASTICITY

El modelo Concrete Damage Plasticity (Daño plástico en el hormigón) de Abaqus proporciona las capacidades para la modelización del hormigón y otros materiales cuasi-frágiles. Para ello emplea conceptos de daño elástico isotrópico combinándolo con la tracción isotrópica y la plasticidad a compresión para representar el comportamiento inelástico del material.

Se puede utilizar para hormigón en masa, a pesar de que está destinado principalmente para el análisis de estructuras de hormigón armado. Estando diseñado para aplicaciones en las que el hormigón se vea sometido a cargas monótonas, cíclicas y/o dinámicas a bajas presiones de confinamiento. El modelo consiste en la combinación no asociada del endurecimiento plástico múltiple y del daño elástico isótropo para describir el daño irreversible que se produce durante el proceso de fractura.

Se permite el control de los efectos de recuperación de la rigidez durante la carga cíclica. En él se puede definir la sensibilidad ante las tasas de esfuerzo, y utilizarse en conjunto con una regularización viscoplástica de las ecuaciones constitutivas para la mejora de la velocidad de convergencia en régimen de ablandamiento. En general es necesario que el comportamiento elástico del material sea isótropo y lineal.

Se trata de un modelo continuo de daño basado en la plasticidad del hormigón. Supone que los dos principales mecanismos de fallo son las grietas de tracción y el aplastamiento a compresión. La evolución del fallo superficial está controlada por dos variables de endurecimiento, ε_t^{pl} y $\gamma \varepsilon_c^{pl}$, vinculadas a los mecanismos de fallo bajo cargas de tensión y compresión, referidas como deformaciones plásticas equivalentes de tracción y de compresión, respectivamente. Los principales supuestos sobre el comportamiento mecánico del material se describen a continuación.

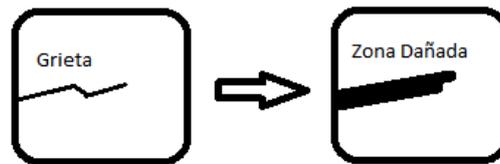


Figura 3. Equivalencia entre grieta y zona dañada.

Comportamiento uniaxial a tensión y compresión: El modelo asume que la tracción uniaxial y la respuesta a compresión del hormigón se caracteriza por el daño plástico.

Bajo tensión uniaxial la respuesta tensión-deformación sigue una relación elástica lineal hasta que se alcanza la tensión de rotura, σ_{t0} . Esta se corresponde con la aparición de las microgrietas en el material. Más allá de la tensión de rotura, la formación de microfisuras se representa macroscópicamente con una respuesta de ablandamiento, que induce la localización de las deformaciones en la estructura interna. Bajo compresión uniaxial la respuesta es lineal hasta el valor elástico inicial, σ_{c0} . En el régimen plástico la respuesta se caracteriza por el endurecimiento seguido de un ablandamiento más allá de la tensión de rotura, σ_{cu} . Esta representación, aunque simplificada, muestra las principales características de la respuesta del hormigón.

Comportamiento cíclico uniaxial: Bajo condiciones de carga cíclica uniaxial los mecanismos de degradación son más complejos, implicando la apertura y cierre de microgrietas previamente formadas, así como su interacción. Experimentalmente, se observa que existe una cierta recuperación de la rigidez elástica a medida que la carga cambia de signo durante el ensayo cíclico uniaxial. El efecto de recuperación de la rigidez, también conocido como el "efecto unilateral", es un aspecto importante del comportamiento bajo carga cíclica. El efecto es generalmente más pronunciado a medida que cambia la carga de tensión a compresión, generando el cierre de las grietas de tracción, cuyo resultado es la recuperación de la rigidez a compresión.

Comportamiento multiaxial: Las relaciones de tensión-deformación para las condiciones general multiaxiales tridimensionales se dan por el daño escalar elástico.

El comportamiento post-fallo por agotamiento se modela mediante la rigidez, lo que permite definir el comportamiento deformación-ablandamiento para el hormigón fisurado. Este comportamiento también permite los efectos de la interacción del hormigón armado de una manera sencilla. La rigidez es necesaria en el modelo Concrete Damage Plasticity, pudiendo especificarla por medio de una relación de tensión-deformación post-fallo o aplicando el criterio de fisuración mediante la energía de fractura.

En cuando a la energía de fractura, Hillerborg (1976) la define como la energía necesaria para abrir una unidad de área de la grieta, G_f , es un parámetro del material que utiliza el concepto de fractura frágil. Con este enfoque el comportamiento frágil del hormigón se caracteriza por una respuesta de tensión-desplazamiento en lugar de una respuesta de tensión-deformación. Dado que bajo cargas de tensión una muestra de hormigón se agrieta a través de alguna de sus secciones, la apertura no depende de la longitud de la muestra. Esta energía de fractura para el modelo de fisuración se puede especificar a través del comportamiento de tensión post-fallo como una función del desplazamiento de la fisura.

2. OBJETIVO

El objetivo principal de este trabajo se centra en la modelización del ensayo de tracción indirecta mediante el cálculo con el método de elementos finitos, haciendo uso concretamente del programa ABAQUS para la realización de los cálculos necesarios.

Para la consecución de este objetivo principal se establecen hitos secundarios, establecer una base de conocimiento del método de los elementos finitos, el diseño de una mezcla bituminosa cuyo comportamiento mecánico permitiese su aplicación en obra y la modelización en dos y tres dimensiones del ensayo de tracción indirecta.

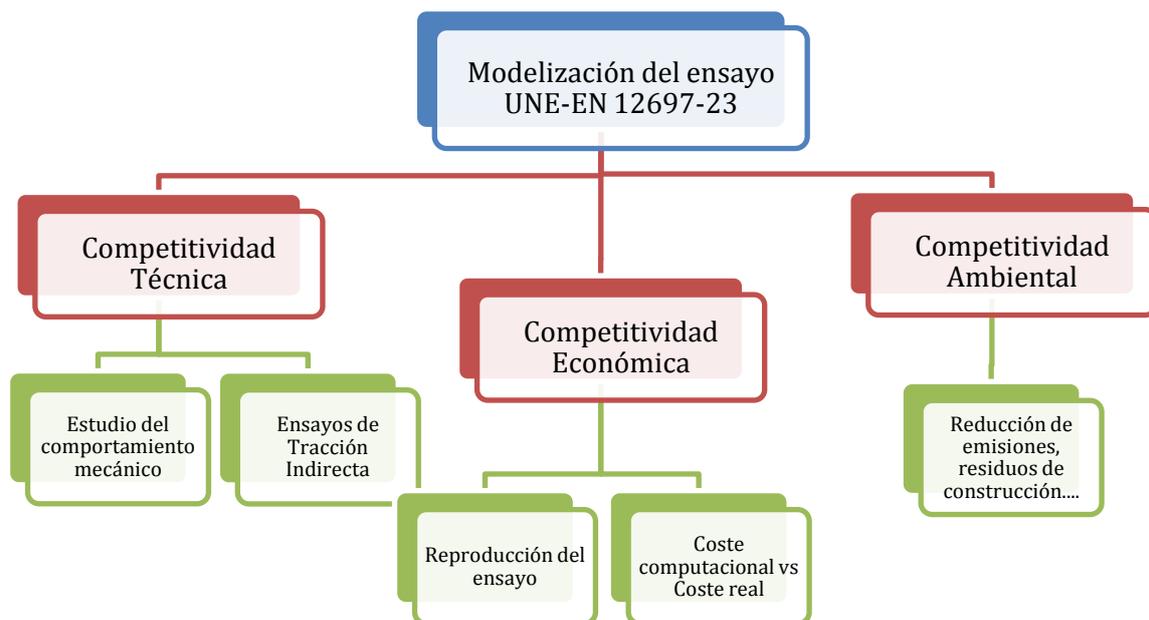
3. METODOLOGÍA

La metodología seguida para la consecución del objetivo marcado para este trabajo fin de máster se estructura en dos etapas, dentro de las cuales se engloban diferentes fases que tratan de dar respuesta a cada uno de los aspectos técnicos a estudiar, para garantizar la fiabilidad del empleo del modelo sobre este tipo de ensayo.

Con carácter previo al inicio de los trabajos se contempla el estudio de la materia, donde se sientan las bases de la investigación a realizar y a partir del cual se definen los pasos a seguir para la ejecución de los trabajos.

En la primera etapa, centrada en los trabajos a desarrollar en laboratorio, se contempla el estudio y diseño de una mezcla bituminosa que cumpla con las condiciones exigidas en la normativa de carreteras para ser empleada como capa de firme, ensayándose de manera más concreta las probetas a tracción indirecta para el cálculo de su resistencia.

Finalmente, la segunda etapa se centra en el cálculo mediante el método de los elementos finitos, a través de los modelos XFEM y Concrete Damage Plasticity en dos y tres dimensiones, del ensayo de resistencia a tracción indirecta de la norma UNE-EN 12697-23.



3.1. Plan de Trabajos

Etapa 1: Estudio de Laboratorio.

Esta primera etapa se estructura en dos fases diferenciadas. La primera de ellas consiste en la caracterización de los materiales para el diseño y estudio del comportamiento mecánico de una mezcla bituminosa en caliente, y la segunda en el estudio detallado de su resistencia frente a la tracción indirecta a 5°C de temperatura, para así obtener todos los datos necesarios para la modelización del ensayo.

Los materiales, áridos y betún, empleados para la realización de la mezcla bituminosa se caracterizaron con el objetivo de conocer bien la base del estudio. Se ha elegido una mezcla tipo AC 16 S por ser una de las mezclas de estudio en el Laboratorio de Ingeniería de la Construcción (LabIC.UGR).

Áridos

Los áridos empleados en la fabricación la mezcla fueron para las todas las fracciones fueron de naturaleza caliza, fracciones gruesas (12/18 mm y 6/12 mm) y fina (0/6 mm). Por su parte, el filler de aportación utilizado para la fabricación de la mezcla fue cemento. Las características de cada una de las fracciones utilizadas vienen recogidas en la Tabla 1.

Ensayo	Árido Grueso	Árido Fino	Filler		
Granulometría (EN 933-1) / (EN 933-10) Tamices (mm)	12/18 Calizo	6/12 Calizo	0/6 Calizo		
22,4	100	100	100		
16	62	100	100		
8	1	21	99		
4	1	2	86		
2	1	1	55		
0,500	0	1	21		
0,250	0	1	15		
0,125	0	0	12		
0,063	0,2	0,1	10,4		
Equivalente de arena (EN 933-8) (>50)	-	-	66		
Densidad Aparente (UNE-EN 1097-3) (0.5-0.8 Mg/m³)	-	-	0,8		
Proporción de Partículas Trituradas (EN 933-5) (100%)	98	87	-		
Forma del árido Grueso. Índice de Lajas (EN 933-3) (≤25)	8	7	-		
Resistencia ala fragmentación (EN 1097-2)(≤20)	20	20	-		
Limpieza (Contenido de impurezas) (UNE 146130, Anexo C)(≤0.5%)	0,3	1,7	-		
Densidad relativa y absorción (EN 1097-6)	ρ_a (Mg/m ³)	2,80	2,87	2,82	-
	ρ_{SSD}^* (Mg/m ³)	2,81	2,83	2,75	-
	ρ_{RD} (Mg/m ³)	2,83	2,85	2,77	-
	Absorción del agua tras inmersión (%)	0,40	0,51	0,98	-

Tabla 1. Características de los áridos.

Ligante. Betún B 20/25

El ligante empleado la fórmula de trabajo ha sido un betún convencional de baja penetración (B 20/25) cuyas características vienen descritas en la Tabla 2.

Ensayo	Betún B 20/25
Penetración (UNE-EN 1426)	22 mm
Punto de Reblandecimiento (UNE-EN 1427)	67°C

Tabla 2. Características del betún B 20/25.

Mezcla bituminosa en caliente

El plan de ensayos definido para la mezcla modelo se resume en la Tabla 3.

Ensayos Mezcla Bituminosa	NORMATIVA
Ensayo Marshall	NLT-159
Densidad Máxima	UNE EN 12697-5
Contenido de huecos	UNE EN 12697-8
Sensibilidad al agua	UNE-EN 12697-12
Ensayo de rodadura	UNE-EN 12697-22
Módulo de rigidez	UNE-EN 12697-26 (C)
Resistencia a la tracción indirecta	UNE-EN 12697-23

Tabla 3. Ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas.

Para la realización del ensayo Marshall (NLT-159) se prepararan tres series de tres probetas de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de alto, compactadas con 75 golpes por cada cara a en el compactador de impactos, en las que en cada serie se varía el porcentaje de betún añadido. Para cada porcentaje de betún se calcula la media de los parámetros obtenidos en el ensayo, deformación Marshall (mm) y estabilidad Marshall (kN).

Para cada una de las tres probetas realizadas en cada serie hay que obtener la densidad aparente, y para cada contenido de betún la Densidad máxima (UNE-EN 12697-5), según el procedimiento volumétrico. Este se determina a partir de la muestra sin huecos (tras hacerle el vacío) y a partir de su masa seca, usando para ello un picnómetro, del cual se conoce el volumen. La Densidad aparente (UNE-EN 12697-6, B) se obtiene a partir de la masa seca de las probetas, de su masa saturada sumergida, y de la masa con su superficie saturada seca.

En base a los valores de estabilidad y deformación Marshall, junto con el contenido de huecos y la densidad máxima se determina el contenido óptimo de betún con el que se realizan los ensayos de caracterización mecánica de la mezcla.



Figura 4. Aspecto probetas Marshall.

Posteriormente, para la evaluación del comportamiento se utiliza el ensayo de Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12), que implica la fabricación de 6 probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y unos 60 mm de espesor, compactadas mediante el compactador de impactos aplicando 50 golpes por cara. A continuación, se lleva a cabo el acondicionamiento de las probetas dividiéndolas en dos grupos de 3, uno seco y otro húmedo. El grupo seco se almacena a temperatura ambiente de laboratorio comprendida entre $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, mientras que al grupo húmedo se le aplica el vacío hasta obtener una presión de $6,7\pm 0,3$ kPa durante 30 ± 5 minutos, y dejándolas posteriormente en condiciones de inmersión a 40°C durante 72 horas. Finalmente se lleva a cabo la rotura a tracción indirecta de cada una de las probetas (tanto del grupo seco, como del grupo húmedo), a una temperatura de 15°C , y tras una aclimatación previa durante 120 minutos a dicha temperatura. Los resultados del ensayo se expresan en función de la resistencia conservada de las probetas obtenidas tras dividir la media de las resistencias de las probetas húmedas entre la de las secas (ITSR, %).



Figura 5. Probetas del grupo húmedo acondicionándose.

Así mismo, el Ensayo de rodadura (UNE-EN 12697-22) implica la fabricación de dos probetas prismáticas de 408 mm x 256 mm y un espesor de 60 mm, compactadas con un dispositivo equivalente a un rodillo liso de acero, consiguiéndose una densidad mínima de 98% de la densidad obtenida en probetas cilíndricas preparadas según la UNE-EN 12697-30, aplicando 75 golpes por cara. Tras dos días de almacenamiento, las probetas están en disposición de ser acondicionadas a $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas. El ensayo consiste en la aplicación de carga a las probetas mediante repetidas pasadas, 10.000 ciclos de carga, de una rueda cargada aplicando una fuerza de 700 N. La frecuencia de carga es de 26,5 ciclos de carga por minuto. Durante el ensayo se mide en cada ciclo la profundidad de la deformación producida, para luego calcular

la pendiente media de deformación en pista (mm para 10^3 ciclos de carga) entre los 5.000 y 10.000 ciclos.



Figura 6. Equipo Wheel Tracking, para el Ensayo de rodadura.

Por su parte, para el ensayo del módulo de rigidez (UNE-EN 1267-26, C) se fabrican 4 probetas siguiendo el proceso Marshall, 75 golpes por cara, 101,6 mm de diámetro y 60 mm de altura. El ensayo consiste en la determinación del módulo de rigidez a partir de la aplicación de una serie de 15 pulsos de carga controlada a tracción indirecta (en forma de medio seno), de 3 segundos de duración. Los 10 primeros pulsos serán de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, y los 5 siguientes pulsos servirán para determinar el módulo de rigidez de la mezcla, siendo éste la media obtenida de los últimos 5 pulsos. Una vez determinado dicho valor, deberá girarse la probeta y determinar el módulo del diámetro perpendicular, debiendo estar comprendido entre 80% y el 110% del primero, sino el ensayo se considerará no válido. El valor final del módulo de rigidez de cada probeta será la media obtenida de ambos diámetros. Además, para poder comparar los resultados obtenidos entre las diferentes probetas, se calculó un módulo de rigidez ponderado para un valor de factor de carga de 0,60, que será el valor utilizado en el análisis de los resultados. Por otra parte, con el objetivo de caracterizar bien la mezcla a la temperatura de ensayo, se realiza el módulo de rigidez a una temperatura de 5°C.

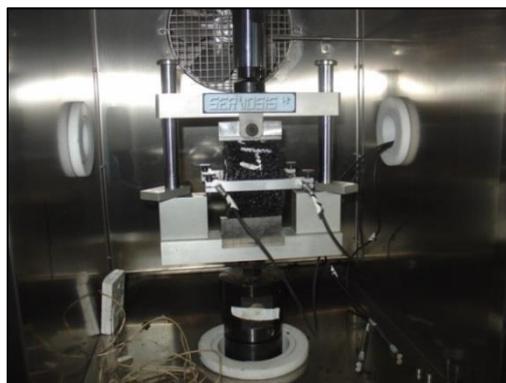


Figura 7. Ensayo de rigidez.

Finalmente, se lleva a cabo el ensayo de tracción indirecta una vez tenemos la mezcla bituminosa totalmente caracterizada. Para su descripción más detallada se procede a resumir brevemente la norma.

NORMA UNE-EN 12697-23 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas

El Anexo 1 aporta la norma UNE-EN 12697-23, mostrándose a continuación un resumen del objeto de la misma, las definiciones relevantes a efectos de este trabajo, los aparatos necesarios para que se lleve a cabo, la forma de preparación de las muestras, el acondicionamiento y el procedimiento de ensayo.

Objeto

Esta norma especifica un método de ensayo para determinar la resistencia a la tracción indirecta (resquebrajamiento) de probetas cilíndricas de mezclas bituminosas.

Definiciones:

Resistencia a la tracción indirecta, ITS: Es la resistencia máxima (calculada) a la tracción de una probeta cilíndrica sometida a carga diametral hasta su rotura, a la temperatura de ensayo especificada y a la velocidad de desplazamiento especificada de la prensa de ensayo.

Probeta cilíndrica: Probeta moldeada de forma cilíndrica elaborada en laboratorio o testigo extraído de una capa o placa bituminosa.

Principio de ensayo:

La probeta cilíndrica que se va a ensayar debe estar a la temperatura de ensayo especificada, colocada entre las bandas de carga de la prensa de ensayo, y se somete a una carga diametral a lo largo de la dirección del eje del cilindro, con una velocidad constante de desplazamiento hasta que se produzca su rotura. La resistencia a la tracción indirecta es el esfuerzo de tracción máximo calculado en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura y de las dimensiones de la probeta.

Aparatos:

Prensa: Es necesaria una prensa de ensayo del tipo Marshall, conforme a la Norma UNE-EN 12697-34, o un aparato similar, que tenga una capacidad mínima recomendada de 28 kN y que permita la aplicación de cargas sobre las probetas de ensayo a una velocidad de deformación constante de (50 ± 2) mm/min, después de un periodo de tiempo transitorio inferior al 20% del tiempo de carga. Es necesario un aparato que permita medir una carga con una precisión de $\pm 0,2$ kN.

Bastidor de ensayo con bandas de carga: Bastidor de ensayo equipado con bandas de carga de acero templado, que dispongan de una superficie cóncava con un radio de curvatura que se corresponda con el radio nominal de la probeta. La superficie del bastidor debe estar guiada para asegurar un desplazamiento paralelo de las bandas de carga.

	Dimensiones (mm)		
Diámetro probeta	100 \pm 3	150 \pm 3	160 \pm 3
Anchura de banda de carga	12,7 \pm 0,2	19,1 \pm 0,2	20,0 \pm 0,2

Tabla 4. Anchura de la banda de carga.

Las bandas de carga para el ensayo de probetas cilíndricas deben tener un radio de curvatura adaptado a la probeta sometida a ensayo, y una anchura conforme a las dimensiones de las probetas. Debiendo tener, al menos, la misma longitud de la probeta sometida a ensayo.

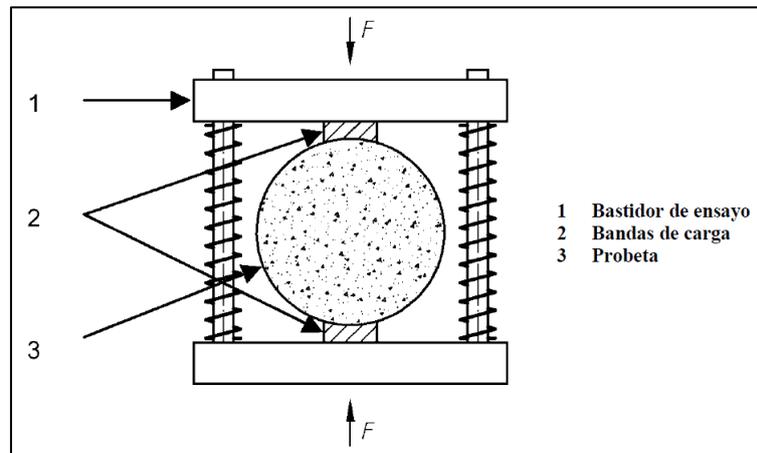


Figura 8. Bastidor de ensayo con bandas de carga y probeta.

Preparación de las muestras:

Número: Para cada muestra a ensayar se deben preparar, al menos, tres probetas.

Dimensiones: Las dimensiones de las probetas cilíndricas deben tener un diámetro de (100 ± 3) mm, (150 ± 3) mm o (160 ± 3) mm. Deben de ser probetas moldeadas obtenidas en laboratorio conforme a las normas UNE-EN 12697-30, UNE-EN 12697-31 o UNE-EN 12697-32, o testigos extraídos de una placa bituminosa producida según la UNE-EN 12697-33, o testigos extraídos de una capa bituminosa según la UNE-EN 12697-27. Y una altura comprendida entre los 35 mm y 75 mm.

Examen visual: Visualmente las probetas deben ser simétricas y la superficie curva debe ser regular.

Acondicionamiento:

La probeta de ensayo se debe poner a la temperatura de ensayo seleccionada, bien en un baño de agua caliente estando protegida o en una cámara de aire controlada mediante termostato.

El almacenamiento de las mismas debe ser al menos 2 h para aquellas inferiores a 150 mm de diámetro y mínimo 4 h para las de diámetro mayor o igual a 150 mm.

Procedimiento de ensayo:

La temperatura de ensayo se debe seleccionar dentro de la gama comprendida entre 5°C y 25°C, con una tolerancia de $\pm 2^\circ\text{C}$. Para obtener una línea de rotura “correcta” a tracción indirecta, se recomienda una temperatura de ensayo de 5°C. Sin embargo, cuando se trate de la determinación de la sensibilidad al agua conforme a la Norma UNE-EN 12697-12, se recomienda una temperatura de ensayo de 25°C.

A continuación se toma una probeta acondicionada y se coloca en el bastidor de ensayo. La máquina de ensayo debe estar situada en una habitación cuya temperatura este comprendida entre 15°C y 25°C. La probeta se debe alinear sobre la banda inferior, de forma que la carga se pueda aplicar diametralmente.

Posteriormente se inicia la compresión de la probeta. Después de un periodo de tiempo inferior al 20% del tiempo de carga, se aplica, de forma continua y sin saltos bruscos, una carga diametral a una velocidad constante de deformación de (50 ± 2) mm/min, hasta que se alcance la carga máxima, y se registra esta carga máxima aplicada, P . Después se continúa aplicando carga hasta que se produzca la rotura de la probeta. Se registra el tipo de rotura, de acuerdo con las siguientes categorías:

- a) “Rotura limpia por tracción” – La probeta se rompe de forma limpia a lo largo de una línea diametral, con la posible excepción de pequeñas secciones triangulares próximas a las bandas de carga.
- b) “Deformación” – Las probetas no presentan una línea claramente visible.
- c) “Combinación” – Las probetas presentan una línea de rotura limitada y áreas deformadas más grandes, próximas a las bandas de carga.

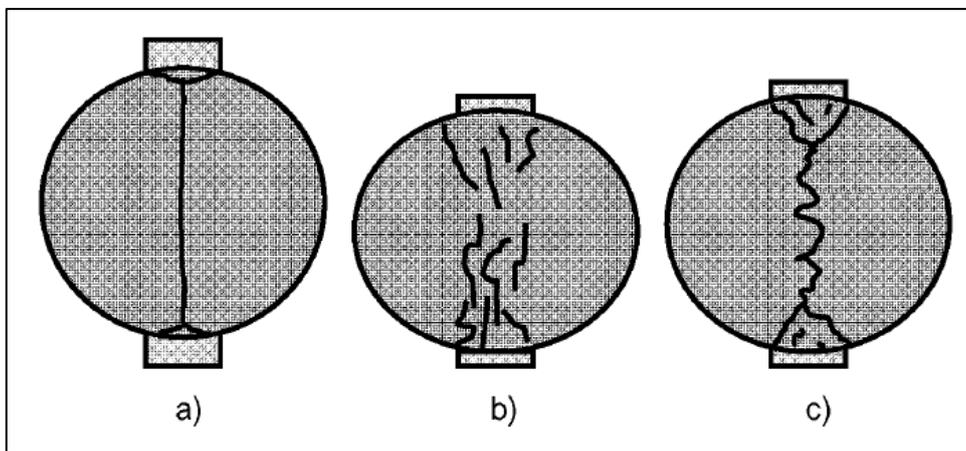


Figura 9. Tipos de rotura por tracción indirecta.

Una vez rota la probeta, se debe abrir por la línea de rotura y se inspecciona visualmente el aspecto de las superficies con objeto de detectar la posible presencia de áridos agrietados o rotos, y se anota si los áridos, principalmente en la superficie de rotura, están rotos o intactos.

El ensayo se debe terminar antes de que hayan transcurrido 2 min después de sacar la probeta del medio de acondicionamiento.

Cálculos

Para cada una de las probetas ensayadas se calcula la resistencia a tracción indirecta, ITS, aplicando la siguiente fórmula, y calculando a posteriori el valor medio de los valores obtenidos.

$$ITS = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot H}$$

ITS es la resistencia a tracción indirecta expresada en gigapascales (GPa), con tres decimales.

P es la carga máxima, expresada en kilonewtons (kN), con tres dígitos significativos.

D es el diámetro de la probeta, expresado en milímetros (mm), con un decimal.

H es la altura de la probeta, expresada en milímetros (mm), con un decimal.

Si los resultados obtenidos difieren más del 17% del valor medio, se deben ensayar dos probetas adicionales. Se calcula la desviación típica de todos los resultados, y se desechan los valores extremos, aquellos con un valor mayor del 10% del valor medio de todos los resultados.

Etapa2: Estudio mediante el Método de los Elementos Finitos.

Durante esta segunda fase del trabajo se aplican los modelos haciendo uso del programa de cálculo ABAQUS/CAE. Las tareas a realizar en cuanto a geometría, cargas y resultados serán las mismas para ambos modelos elegidos, XFEM y CONCRETE DAMAGE PLASTICITY, pero a la hora de definir cada uno de ellos, al igual que el proceso de mallar cada uno de ellos se hace de manera independiente en función de que se trate del modelo en 2D o 3D.

Haciendo uso de la interfaz de usuario de ABAQUS, se procede a introducir todos los datos necesarios para definir la geometría, material, cargas, y puntos de adquisición de datos para el cálculo de los resultados. El proceso se repite para ambos modelos, comprendiendo un total de 8 pasos:

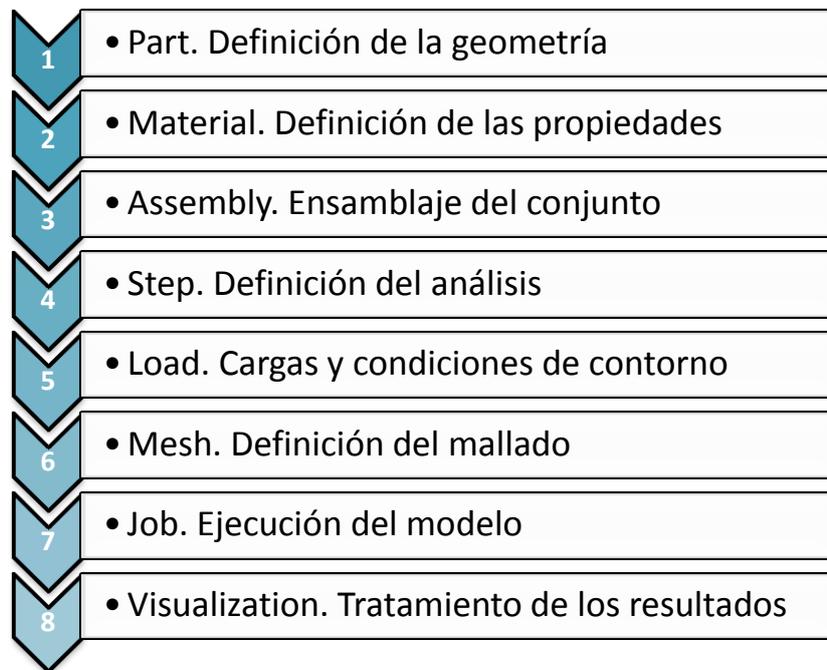


Figura 10. Secuencia de trabajo en ABAQUS.

Descripción de los modelos en 2D

1. Definición de la geometría

Se trata de utilizar el apartado PART. Las probetas que se emplean para la etapa de laboratorio son tipo Marshall, compactadas a 75 golpes por cara. Como se trata de un modelo en dos dimensiones no hay que definir la profundidad, altura de la probeta, por tanto solo será necesario establecer el diámetro de 101,6 mm ($R = 50,8$ mm). Se determina tamaño aproximado de 150 para evitar que la probeta salga de la zona de dibujo.

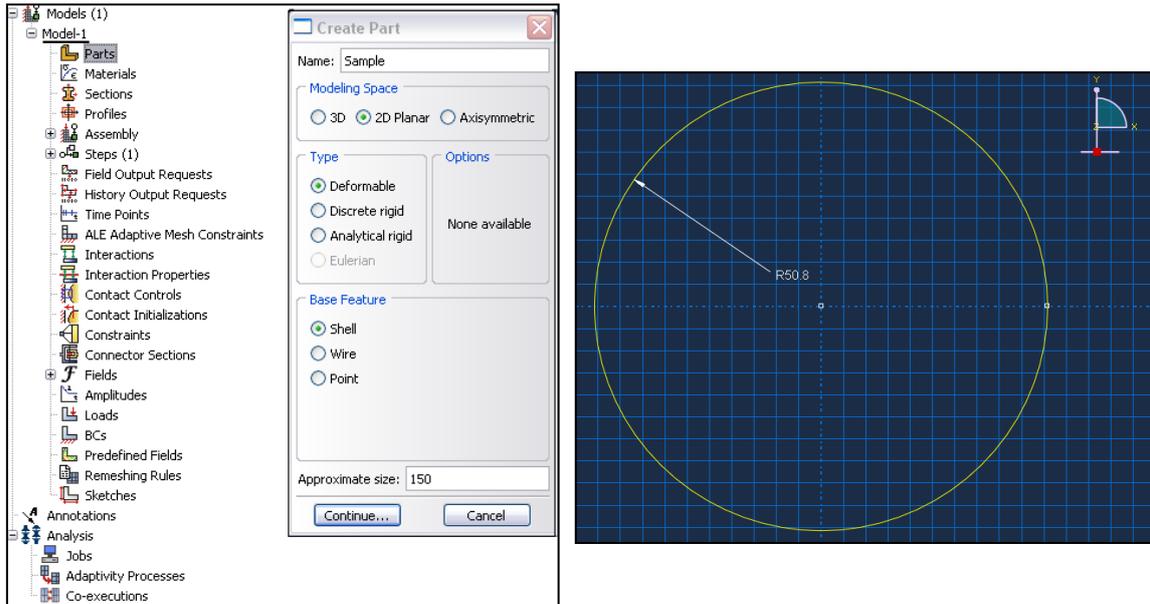


Figura 11. Definición de la geometría en 2D.

2. Definición de las propiedades

Haciendo uso de los resultados obtenidos de laboratorio se establecen los parámetros del material comunes, densidad y módulo elástico, el coeficiente de Poisson. Y de manera independiente se introducirán los parámetros necesarios para cada modelo de cálculo.

General: Density

Mechanical / Elasticity / Elastic: Young's Modulus and Poisson's Ratio

En función del modelo a emplear se deben introducir determinados valores, que en los casos de resistencia a tracción y energía de fractura son los mismos para ambos modelos, pues se obtienen de los ensayos de laboratorio.

XFEM

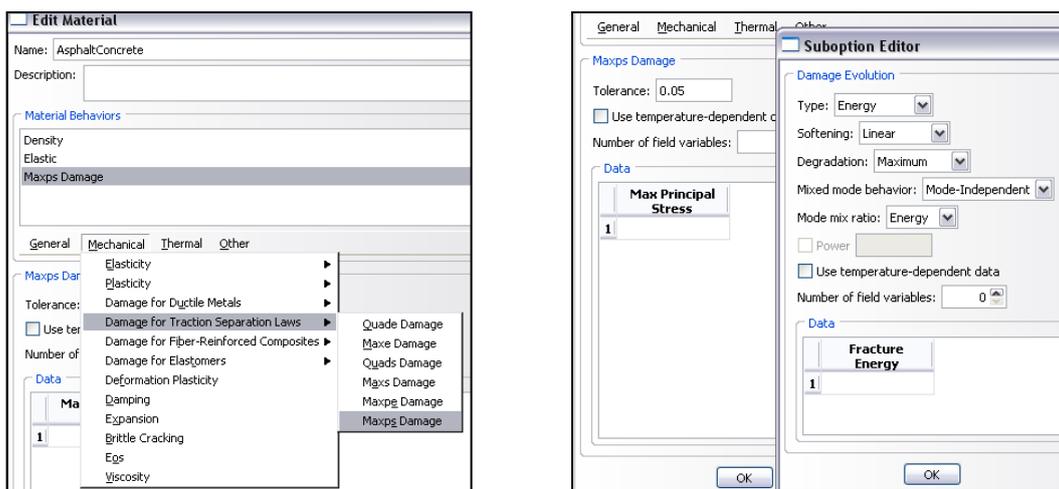


Figura 12. Definición del comportamiento para XFEM.

Para el caso de los XFEM se establece un comportamiento mecánico de daño bajo leyes de separación por tracción, entre ellos el de máxima tensión de daño. Se indican los valores de tensión máxima principal y la energía de fractura.

CONCRETE DAMAGE PLASTICITY

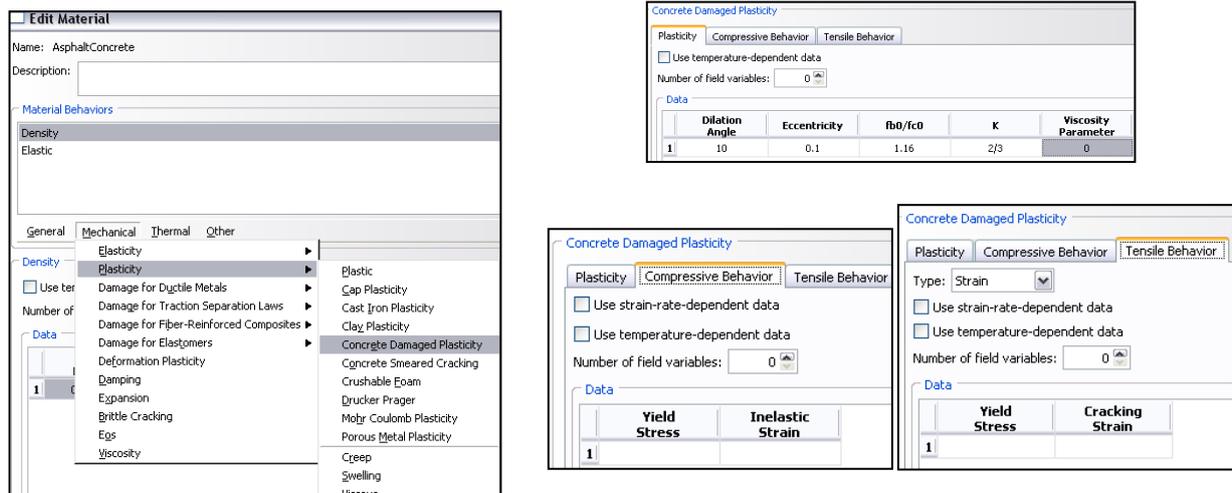


Figura 13. Definición del comportamiento para CONCRETE DAMAGE PLASTICITY.

Para el modelo de comportamiento Concrete Damage Plasticity se definen los parámetros de comportamiento plástico, en él hay que definir los valores de plasticidad (se tomarán los valores por defecto señalados en la Tabla 5 siendo los más adecuados al no realizarse ensayos para su determinación), el comportamiento a compresión (valores para evitar el fallo a compresión previo a la rotura por tracción) y el comportamiento a tracción (obtenidos de los ensayos de laboratorio).

Una vez establecidas las propiedades del material se procede a definir la sección a través del módulo Section, al cual se le asigna el tipo de material (AsphaltConcreteXFEM o AsphaltConcreteDAM), para luego asignarlo a la geometría con la función Section Assignment.

Parámetros comunes		Valor	Concrete Damage Plasticity	
Diámetro		101,6 mm	Plasticidad	
Profundidad (3D)		59,1 mm	Dilation angle	10
Densidad		2,560 Mg/m ³	Eccentricity	0,1
Módulo de Young		25.037 MPa	f_{b0}/f_{c0}	1,16
Coefficiente de Poisson		0,3*	K	2/3
*(Jiang-Miao et al., 2006)			Viscosity	0
XFEM		Valor	Comportamiento a Compresión	
Maxps Damage			Yield Stress	45 – 45 (MPa)
Maximum Principal Stress		3,98 MPa	Inelastic	0 – 1
Fracture Energy		4,20 N/mm	Comportamiento a Tracción	
			Yield Stress	3,98 MPa
			Fracture Energy	4,20 N/mm

Tabla 5. Resumen parámetros de entrada de los modelos.

3. Ensamblaje, Assembly

Cuando se crea una parte, geometría, esta tiene su propio sistema de coordenadas, independiente de otras partes del modelo, en caso de haber varias. Al utilizar el módulo de ensamblaje se crean Instancias de cada una de ellas y las posiciona en un sistema de coordenadas global, creando así el ensamblaje completo. La geometría mantiene su asociación con la pieza original (Part). Si la geometría de una parte cambia, Abaqus/CAE actualiza automáticamente todas las instancias de la dicha parte para reflejar estos cambios.

En este paso se puede determinar si el mallado se quiere realizar dependiente de la geometría, solo alterable en el módulo Part, o independiente, y por tanto modificable en el ensamblaje. Para todos los casos se va a seleccionar el modo independiente.

Para el caso del modelo XFEM, es en este paso cuando se define la zona de fractura, que será la geometría completa, pero no se determinará la localización inicial de la misma por no tratarse de una probeta entallada.



Figura 14. Definición de la zona de fractura.

4. Definición del análisis

Esta sección se le denomina en el programa STEP, y será empleada para definir el proceso de análisis. Se evalúa la respuesta del modelo frente a los procesos de análisis estático general y estático de Riks, para ambos casos, XFEM y Concrete Damage Plasticity. Se empleará un para la obtención de resultados el que mejor se adapte al cálculo y menos problemas de convergencia plantee.

Análisis estático general: Es un procedimiento de tensión estática en el que se desprecian los efectos de la inercia. El análisis puede ser tanto lineal como no lineal, y en él se pasan por alto los efectos que dependen del tiempo.

Análisis estático de Riks: Se trata para problemas estáticos no lineales que a veces implican deformación o colapso, donde la respuesta carga-desplazamiento muestra una rigidez negativa, y la estructura debe liberar energía de tensión para permanecer en equilibrio. El método Riks modificado permite encontrar estados de equilibrio estático durante la fase inestable de la respuesta. Se puede utilizar este método para los casos en que las magnitud es de carga se rigen por un solo parámetro escalar. También es útil para resolver problemas mal acondicionados tales como problemas de carga límite o problemas inestables que presentan ablandamiento.

En esta fase se definen los puntos de los cuales se pretenden obtener los datos necesarios para poder comparar los modelos con lo que ocurre en laboratorio. Para ello se va a utilizar la

herramienta SET, y los puntos se van a definir como A, B y C y son aquellos sometidos al desplazamiento vertical. Se trata de los puntos extremos y central de la banda de carga superior.

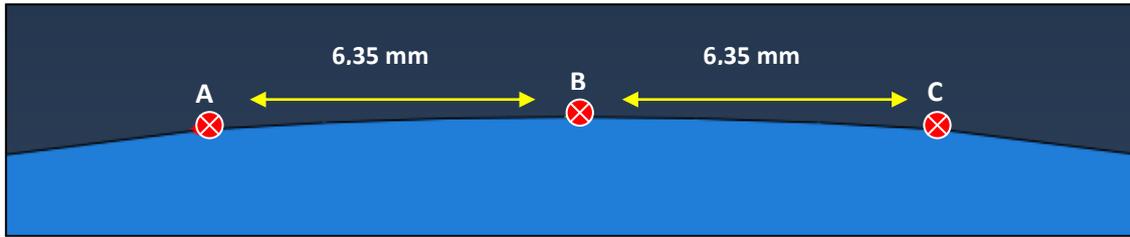


Figura 15. Set de datos 2D.

Para el correcto tratamiento de los datos, en la opción History Output Requests se establece que se recojan los datos de RF2 y U2 para cada uno de los Sets creados (Puntos A, B y C). Estos parámetros consisten en las reacciones y desplazamientos, respectivamente, de manera que se pueda obtener la curva Fuerza-Desplazamiento del ensayo.

Una vez definido el modo de análisis, se deben establecer los parámetros de resultados, Field Output Requests, en ambos casos se guardan los resultados de desplazamientos, tensiones, deformaciones y para los XFEM es necesario establecer la opción PHILSM, fallo, para poder ver la fractura en los resultados.

5. Definición de las cargas y condiciones de contorno

La definición de las cargas se lleva a cabo a través del módulo Load, y las condiciones de contorno con la función BC. Las cargas y condiciones son:

Parte superior de la probeta:

Carga: Se define como condición de contorno al tratarse de un ensayo en deformación controlada (50 mm/min).

Limitación del movimiento horizontal en el punto del eje vertical: No se permite el movimiento para evitar la rotación y desplazamiento horizontal de la probeta.

Parte inferior de la probeta:

Apoyo inferior: Consiste en el apoyo inferior de la probeta, no permite el movimiento vertical de la probeta.

Limitación del movimiento horizontal en el punto del eje vertical: No se permite el movimiento horizontal para evitar la rotación y desplazamiento horizontal de la probeta.

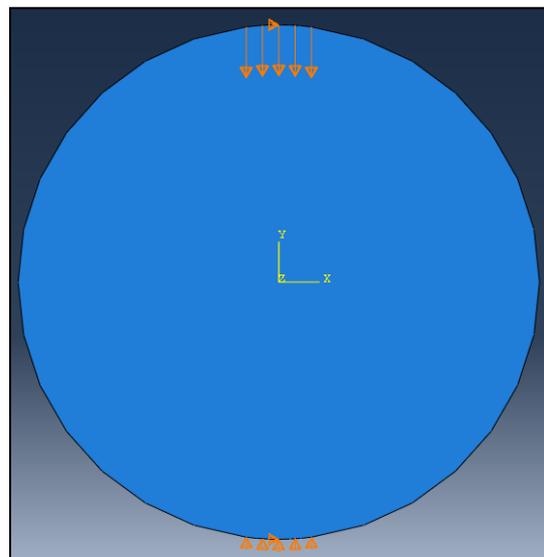


Figura 16. Cargas y condiciones de contorno en 2D.

6. Definición del mallado

Una vez definido todo el problema, se puede mallar la geometría para proceder al cálculo. El módulo de malla permite generar mallas de piezas y conjuntos creados dentro de Abaqus/CAE. Existen varios niveles de automatización y control disponibles para crear una malla que cubra las necesidades del análisis. Al igual que con la creación de piezas y conjuntos, el proceso de asignación de malla atribuye al modelo técnicas de mallado, y de elementos tipo. Como resultado, se pueden modificar los parámetros que definen una pieza o un ensamblaje, y los atributos de la malla que se especifica en el módulo de malla se regeneran automáticamente.

Se eligen los elementos de mallado CPS4R, cuadrilátero de tensión plana bilineal de 4 nodos, integración reducida y el control de reloj de arena. El control se establece para elementos cuadrangulares y estructurados. La densidad de mallado también se define en este paso, y será de 2 mm de ancho.

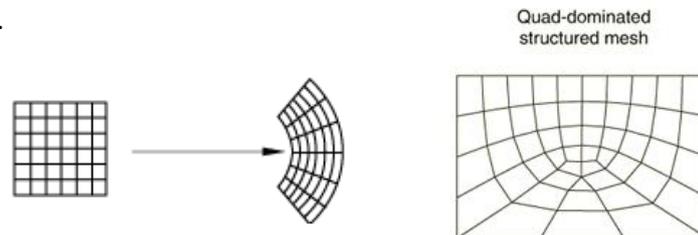


Figura 17. Elementos Quad dominated para un mallado estructurado.

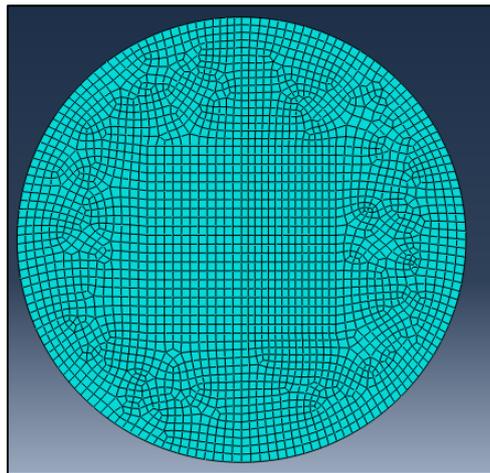


Figura 18. Aspecto del mallado de la probeta en 2D.

7. Lanzamiento del modelo

Se realiza a través de la función JOB, y con él ejecutamos el análisis.

8. Visualización de resultados

Una vez finalizado el ensayo se procede a la visualización de resultados y al tratamiento de los datos obtenidos para su comparación, tanto entre modelos de cálculo como con los ensayos de laboratorio.

Listado de comandos de entrada

A continuación se muestra el listado de comandos de entrada para el modelo XFEM en 2D.

```
**
** PARTS
**
*Part, name=Probeta
*End Part**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Probeta, part=Probeta
*Element, type=CPS4R
**Section: Probeta
*Solid Section, elset=_PickedSet3, material=AsphaltConcrete
,
*End Instance
**
*Nset, nset="Set A", intance=Probeta
*Nset, nset="Set B", intance=Probeta
*Nset, nset="Set C", intance=Probeta
*Enrichment, name=Crack, type=PROPAGATION CRACK, elset=_PickedSet127
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name= AphaltConcrete
*Damage Initiation, criterion=MAXPS, tolerance=0.1
3.98,
*Damage evolution, type=ENERGY
4.2,
    *Density
    2560.,
    *Elastic
    25037., 0.3
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**Name:BottomSupport Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet128, 2, 2
** Name: BottomU1 Type: Displacement/Rotation
** -----
**
** STEP: Loading
**
*Step, name=Loading, nlgeom=YES
*Static, stabilize=0.002, allsdtol=0.05, continue=NO
0.01, 1., 1e-20, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Load Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet83, 2, 2, -50.
** Name: LoadNOU1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet74, 1, 1
**
** CONTROLS
**
*Controls, reset
*Controls, analysis=discontinuous
*Controls, parameters=time incrementation
, , , , , , 20, , ,
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field
    *Node Output
    CF, PHILSM, RF, U
    *Element Output, directions=YES
    LE, PE, PEEQ, PEMAG, S
*Contact Output
```

```
CDISP, CSTRESS
**
** HISTORY OUTPUT: A
**
*Output, history
  *Node Output, nset="Set A"
    RF2, U2
**
** HISTORY OUTPUT: B
**
*Output, history
  *Node Output, nset="Set B"
    RF2, U2
**
** HISTORY OUTPUT: C
**
*Output, history
  *Node Output, nset="Set C"
    RF2, U2
**
** HISTORY OUTPUT: H-Output-1
**
*Output, history, variable=PRESELECT
*End Step
```

Descripción de los modelos en 3D

Para el caso de la modelización tridimensional, los pasos van a ser los mismos, cambiando en estos casos la geometría y el método de mallado. De la misma manera que en el apartado anterior se resume el procedimiento a seguir en las fases que se ven alteradas.

1. Definición de la geometría

Se trata de utilizar el apartado PART. Las probetas que se emplean para la etapa de laboratorio son tipo Marshall, compactadas a 75 golpes por cara. Como se trata de un modelo en tres dimensiones se define la profundidad (59,1mm), altura de la probeta según ensayos, y será necesario también establecer el diámetro de 101,6 mm (R = 50,8 mm). Se determina como en el caso anterior un tamaño aproximado de 150 para evitar que la probeta salga de la zona de dibujo.

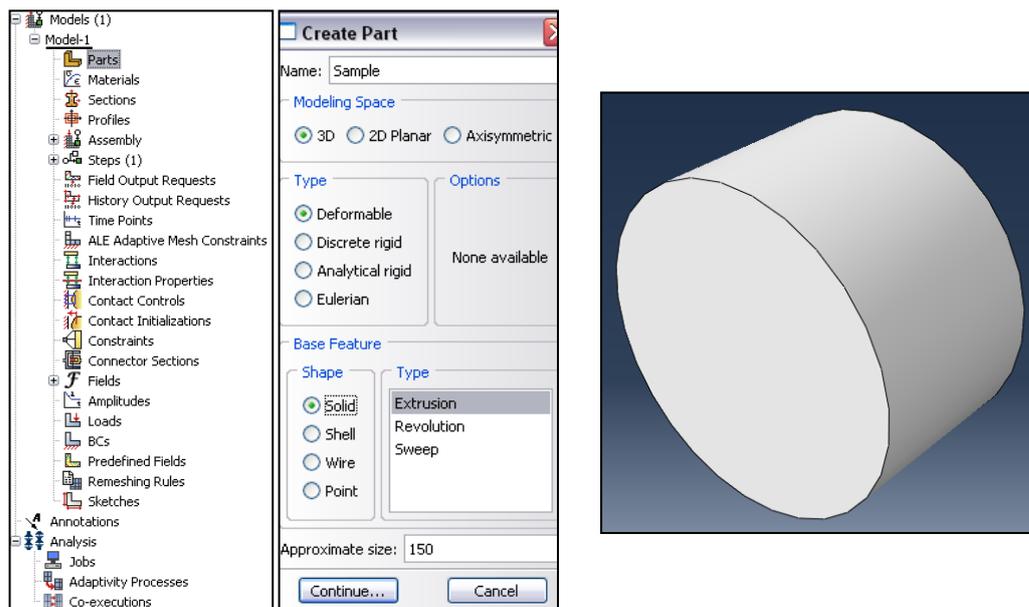


Figura 19. Definición de la geometría en 3D.

2. Definición de las propiedades

Los materiales son los mismos que los empleados para los modelos en dos dimensiones, por tanto se exportarán y serán utilizados en estos análisis. Solo se debe seleccionar nuevamente la sección, pues esta ha cambiado.

3. Ensamblaje, Assembly

El proceso es el mismo que en el apartado anterior, caso bidimensional.

4. Definición del análisis

Los procesos de análisis serán los mismos que en el caso bidimensional. En cambio los puntos donde se van a tomar los datos se ven alterados. En este caso, se definen los puntos A y B como las áreas en la superficie del cilindro correspondientes a la banda de carga superior.

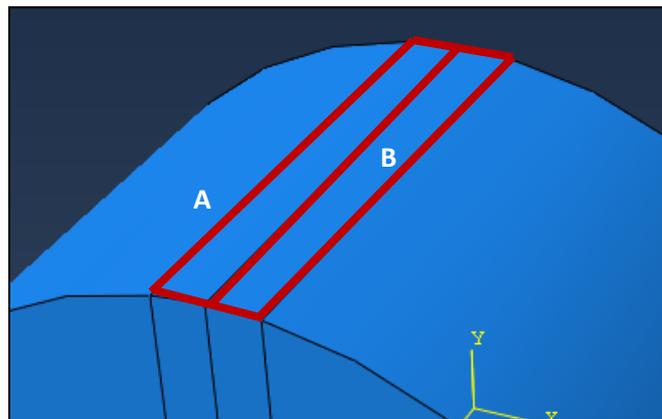


Figura 20. Set de datos 3D.

Para el correcto tratamiento de los datos, en la opción History Output Requests se va a establecer que se recojan los datos de RF2 y U2 para cada uno de los Sets creados (Áreas A y B). En este caso a lo largo de la generatriz elegida, por tanto se tomarán tantos puntos como densidad de mallado se establezca. Estos parámetros consisten en las reacciones y desplazamientos, respectivamente, de manera que se pueda obtener la curva Fuerza-Desplazamiento del ensayo.

Una vez definido el modo de análisis, se deben establecer los parámetros de resultados, Field Output Requests, en ambos casos se guardarán los resultados de desplazamientos, tensiones, deformaciones y caso de los XFEM es necesario establecer la opción PHILSM, fallo, para poder ver la fractura en los resultados.

5. Definición de las cargas y condiciones de contorno

De la misma manera, la definición de las cargas se lleva a cabo a través del módulo Load, y las condiciones de contorno con la función BC. Las cargas y condiciones son:

Parte superior de la probeta:

Carga: Se define como condición de contorno al tratarse de un ensayo en deformación controlada (50 mm/min).

Limitación del movimiento horizontal en el punto del eje vertical: No se permite el movimiento para evitar la rotación y desplazamiento horizontal de la probeta.

Parte inferior de la probeta:

Apoyo inferior: Consiste en el apoyo inferior de la probeta, no permite el movimiento vertical de la probeta.

Limitación del movimiento horizontal en el punto del eje vertical: No se permite el movimiento horizontal para evitar la rotación y desplazamiento horizontal de la probeta.

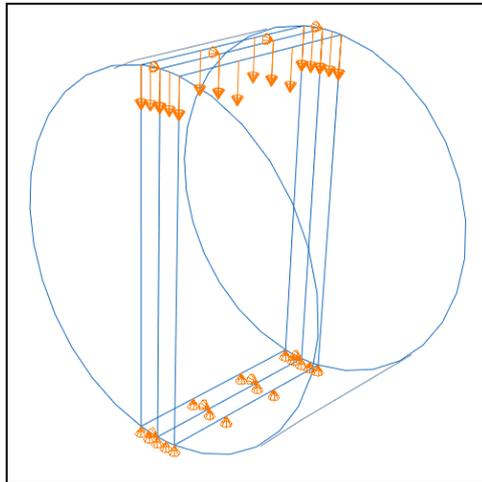


Figura 21. Cargas y condiciones de contorno en 3D.

6. Definición del mallado

De nuevo, una vez definido todo el problema, se puede mallar la geometría para proceder al cálculo.

Se eligen los elementos de mallado C3D8R, cubo lineal de 8 nodos, con integración reducida y el control de reloj de arena. El control se establece para elementos cúbicos y estructurados. La densidad de mallado también se define en este paso, y será de 4 mm de ancho, debido a las limitaciones computacionales para el cálculo con elementos más pequeños.

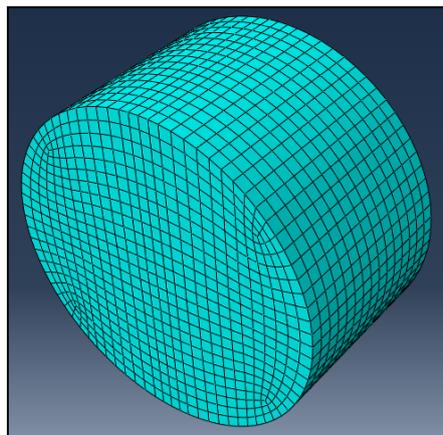


Figura 22. Aspecto del mallado de la probeta en 3D.

7. Lanzamiento del modelo

Se realiza a través de la función JOB, y con él ejecutamos el análisis.

8. Visualización de resultados

Una vez finalizado el ensayo se procede a la visualización de resultados y al tratamiento de los datos obtenidos para su comparación, tanto entre modelos de cálculo como con los ensayos de laboratorio.

Listado de comandos de entrada

A continuación se muestra el listado de comandos de entrada para el modelo Concrete Damage Plasticity en 3D.

```

**
** PARTS
**
*Part, name=Probeta
*End Part**
**
** ASSEMBLY
**
*Assembly, name=Assembly
**
*Instance, name=Probeta, part=Probeta
*Element, type=C3D8R
**Section: Probeta
*Solid Section, elset=_PickedSet16, material=AsphaltConcrete
,
*End Instance
**
**
*Nset, nset="SetA", instance=Probeta
*Elset, elset=SetA, instance=Probeta
*Nset, nset="SetB", instance=Probeta
*Elset, elset=SetB, instance=Probeta
*Enrichment, name=Crack, type=PROPAGATION CRACK, elset=_PickedSet127
*End Assembly
**
** MATERIALS
**
*Material, name= AsphaltConcrete
*Damage initiation, criterion=MAXPS, tolerance=0.1
3.98,
*Damage evolution, type=ENERGY
4.2,
    *Density
    2560.,
    *Elastic
    25037., 0.3
*Concrete Damaged Plasticity
10., 0.1, 1.16, 0.667, 0.
*Concrete Compression Hardening
45.,0.
45.,1.
*Concrete Tension Stiffening, type=GFI
3.98, 4.2
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
**Name:BottomSupport Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet107, 2, 2
** Name: BottomU1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet109, 1, 1
_PickedSet109, 3, 3
** Name: UPU1 Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet106, 1, 1
_PickedSet106, 3, 3
** -----
**
** STEP: Loading
**
*Step, name=Loading, nlgeom=YES,inc=50
*Static, stabilize=0.002, allsdtol=0.05, continue=NO

```

```
0.01, 1., 1e-20, 0.01
**
** BOUNDARY CONDITIONS
**
** Name: Load Type: Displacement/Rotation
*Boundary
_PickedSet108, 2, 2, -50.

** CONTROLS
**
*Controls, reset
*Controls, analysis=discontinuous
*Controls, parameters=time incrementation
, , , , , 20, , ,
**
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
**
** HISTORY OUTPUT: A
**
*Output, history
  *Node Output, nset=SetA
    RF2, U2
**
** HISTORY OUTPUT: B
**
*Output, history
  *Node Output, nset=SetB
    RF2, U2
*End Step
```

De esta manera, se sientan las bases de trabajo para poder proceder de una forma ordenada y clara en el análisis de mezclas bituminosas con el método de los elementos finitos.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Resultados de laboratorio

En primer lugar se muestra una tabla resumen de los resultados de la mezcla diseñada con el contenido óptimo de betún, y posteriormente los resultados detallados del ensayo a tracción indirecta.

Ensayo	Resultado
Contenido óptimo de betún (%)	5,2
Diámetro (mm)	101,6
Altura (mm)	60,2
Densidad aparente (Mg/m ³) UNE-EN 12697-6:2012	2,553
Densidad Máxima (Mg/m ³) UNE-EN 12697-5:2010/AC:2012	2,604
% Huecos aire UNE-EN 12697-8:2003 (%V _m)	2,0
% Huecos árido UNE-EN 12697-8 (%VMA)	14,9
% Huecos rellenos con ligante UNE-EN 12697-8:2003 (%VFB)	86,7
Estabilidad Marshall máxima (KN) NLT-159/00	13,604
Deformación Marshall máxima(mm) NLT-159/00	3,4
Sensibilidad al agua (UNE-EN 12697-12), ITS	100%
Resistencia a la rodadura (UNE-EN 12697-22) (mm/10 ³ ciclos de carga)	0,100
Rigidez, E a 5°C(UNE-EN 12697-26, Anexo C) (MPa)	25.037

Tabla 6. Resultados diseño mezcla AC 16 S.

La mezcla diseñada cumple con los estándares exigidos por la normativa.

Los resultados de laboratorio obtenidos para las 5 probetas ensayadas según la norma UNE-EN 12697-23 de resistencia frente a la tracción indirecta se resumen en la Tabla 7. El tiempo de acondicionamiento fue de 6 horas a 5°C de temperatura.

Probeta	Altura (mm)	Densidad (kg/m ³)	F _{max} (N)	ITS (GPa)	G _F (N/mm)
1	57,76	2,588	37.186	4,03E-03	4,24
2	59,02	2,550	36.608	3,89E-03	4,10
3	61,89	2,536	35.364	3,58E-03	3,79
4	59,25	2,563	40.616	4,30E-03	4,54
5	57,51	2,563	37.716	4,11E-03	4,35

Tabla 7. Resultados de laboratorio para el ensayo UNE-EN 12697-23.

Altura (mm)	Densidad (kg/m ³)	F max (N)	ITS (GPa)	G _F (N/mm)
59,1	2,560	37.498	3,98E-03	4,20

Tabla 8. Valores para el modelo obtenidos experimentalmente.

La Figura 23 muestra las gráficas fuerza-desplazamiento obtenidas en la realización del ensayo. Al tratarse de un ensayo a baja temperatura la rotura del material se producía de manera súbita en intervalos de 2 a 2,5 segundos.

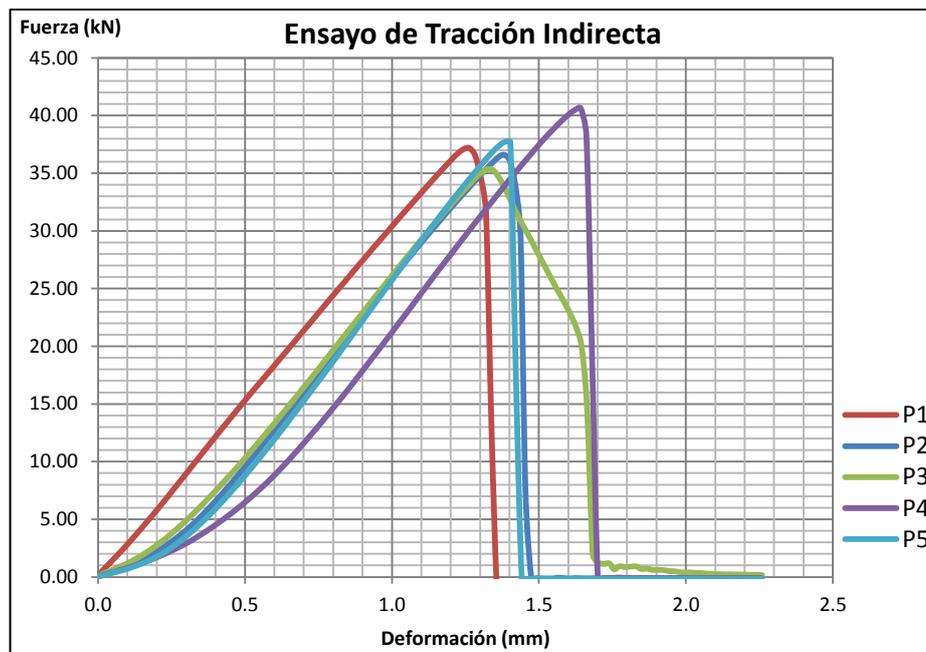


Figura 23. Graficas Fuerza-Deformación del ensayo de tracción indirecta a 5°C en laboratorio.

El estado de la probeta tras el ensayo se aprecia en la Figura 24, donde se ve una rotura lineal por tracción indirecta bajo la zona de aplicación de la carga.

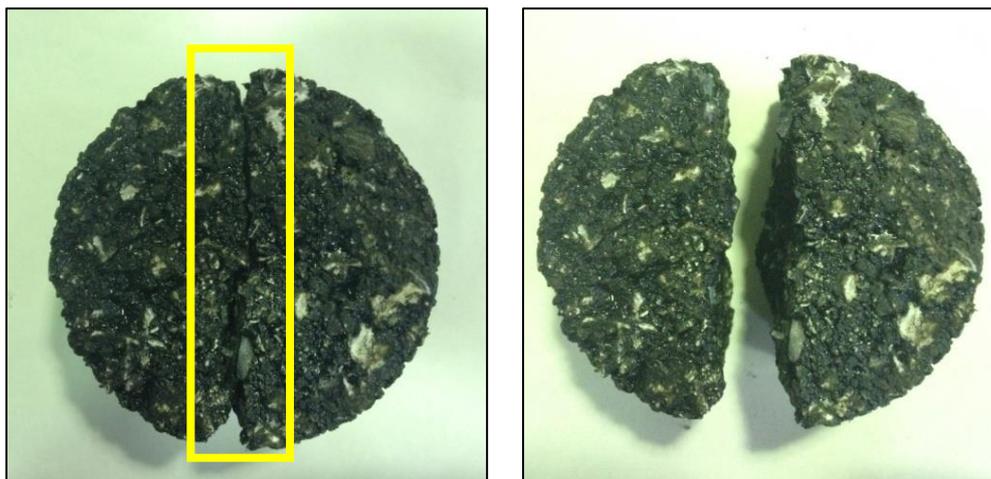


Figura 24. Probeta rota a tracción indirecta.

4.2. Modelos en 2D

Los resultados obtenidos para la modelización en dos dimensiones se dividen según el procedimiento aplicado, XFEM o Concrete Damage Plasticity.

XFEM

El modelo de cálculo a través de los elementos finitos extendidos reproduce la fisuración por tracción indirecta en una probeta bidimensional. Los esfuerzos simulados dan como resultado una rotura limpia por tracción. La Figura 25 representa tres de las fases, la inicial, al 10% y la final, donde es apreciable la separación entre las caras de fractura.

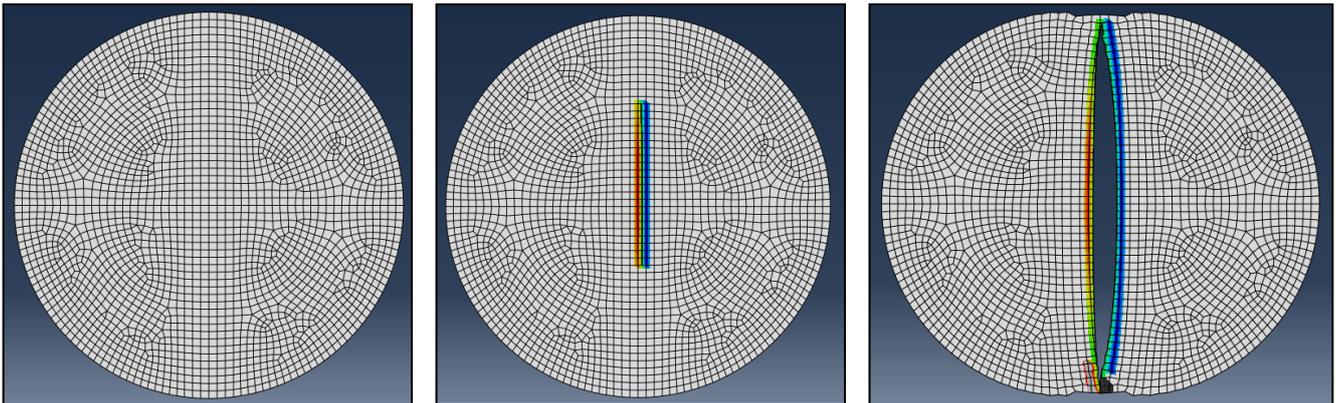


Figura 25. Proceso de fisuración 2D XFEM.

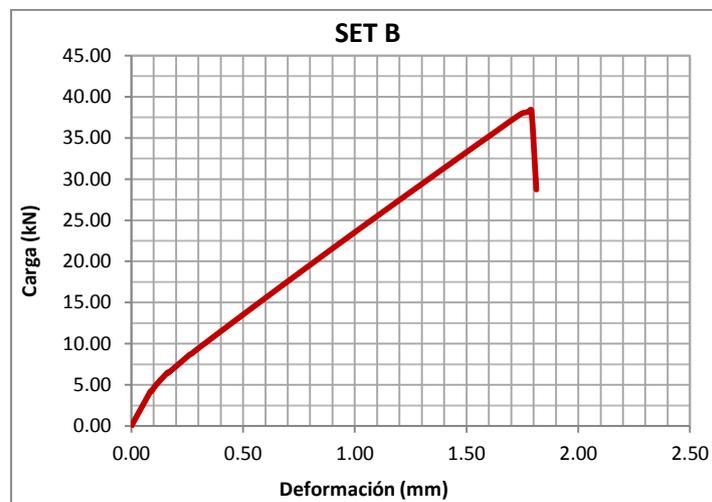


Figura 26. Diagrama Carga-Deformación modelo 2D XFEM.

El gráfico de la Figura 26 representa el diagrama carga-deformación obtenido para el modelo, se descartan los datos registrados por los Sets A y C, al no corresponderse con las medidas esperadas, siendo el Set B el que arroja los mejores resultados. Se aprecia como la carga que alcanza previa a la rotura es próxima a la experimentada en laboratorio.

El tipo de análisis utilizado ha sido el estático general, pues mediante el análisis estático de Riks no se producía bajo las mismas condiciones y tipo de mallado la fisuración del material.

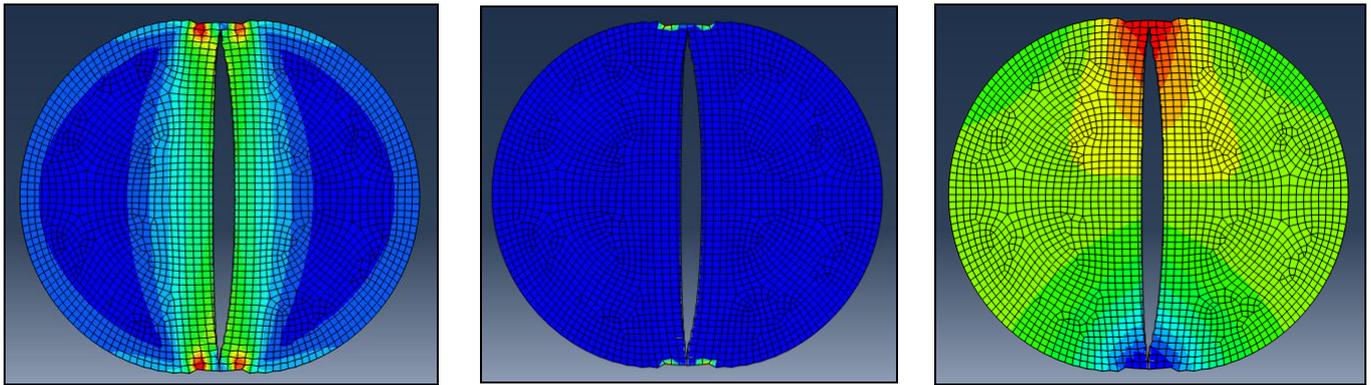


Figura 27. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 2D XFEM.

En la figura anterior muestra la concentración de tensiones en la zona de la grieta, las reacciones en la vertical de la misma y los desplazamientos en rojo se ve cómo se producen en la zona superior de la probeta donde se aplica la carga.

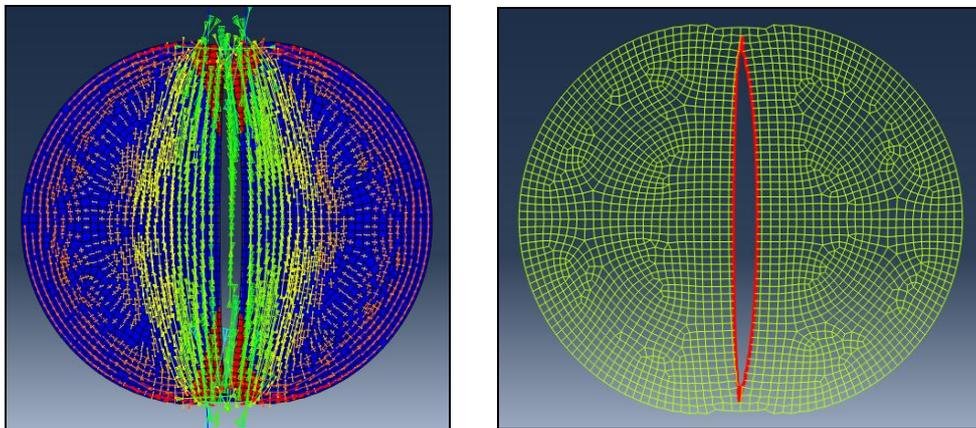


Figura 28. Diagrama vectorial de tensiones y fisura en el modelo 2D XFEM.

Concrete Damage Plasticity

El modelo de cálculo de daño por plasticidad, representa la fisuración por tracción indirecta en una probeta bidimensional a través de la plastificación del material. Los esfuerzos simulados producen el fallo del material en la zona próxima al eje vertical de la probeta. La Figura 29 representa tres de las fases, la inicial, al 25% y la final, en la cual es posible apreciar lo que sería la línea de rotura entre bandas de carga.

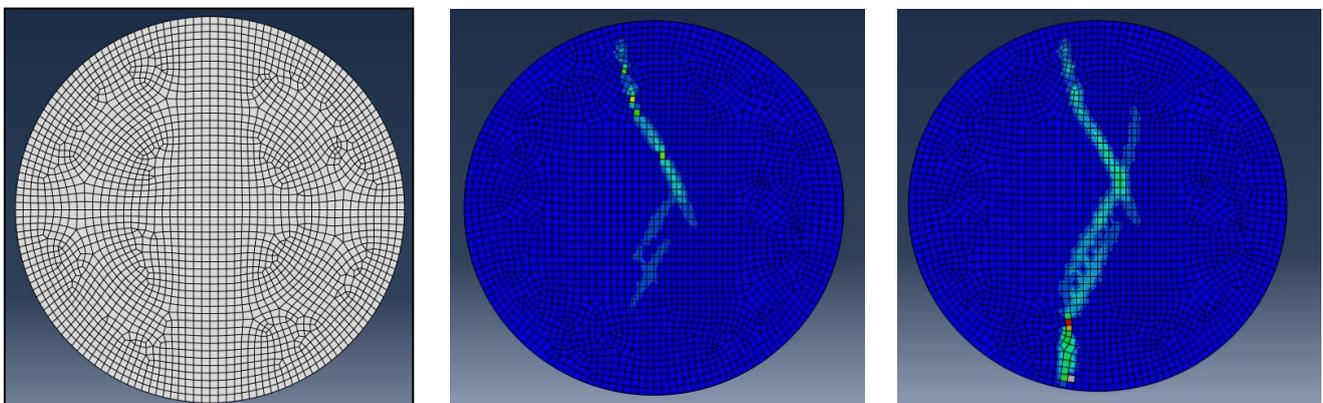


Figura 29. Proceso de daño 2D con Concrete Damage Plasticity.

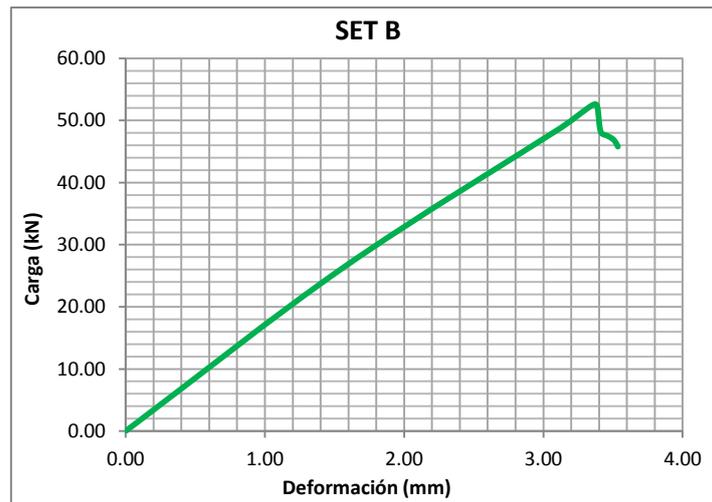


Figura 30. Diagrama Carga-Deformación modelo Concrete Damage Plasticity 2D.

Al igual que en el caso de los elementos finitos extendidos, se hace uso solamente de los datos proporcionados por el Set B, punto del eje vertical en la superficie de la probeta, pues los obtenidos para los Sets A y C se mantienen elevados. Este hecho se debe a la rotura del material por el eje, que hace que la resistencia a ambos lados del mismo se mantenga en valores más elevados que la zona dañada.

El tipo de análisis empleado ha sido el estático general, pues la ausencia de proceso de rotura por plastificación en el análisis estático de Riks no permitía la obtención de resultados. La Figura 30 representa el diagrama carga deformación, donde se alcanza un valor de carga más elevado que en el caso anterior, y en los modelos experimentales, con una deformación también más elevada.

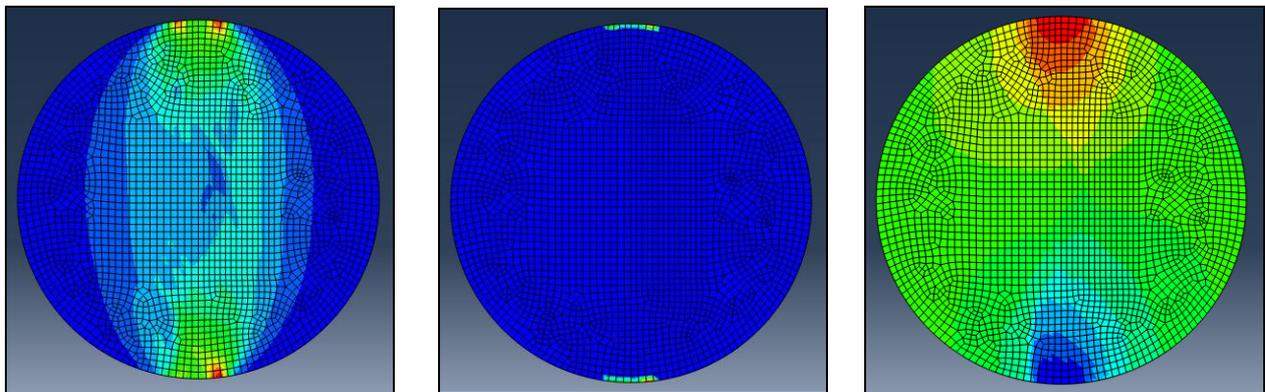


Figura 31. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 2D Concrete Damage Plasticity.

La Figura 31 muestra las tensiones, reacciones y desplazamientos en la superficie de la probeta, el color azul muestra el valor mínimo y el rojo los máximos. En el caso de los esfuerzos se aprecia al igual que en el caso anterior como no sufre la probeta en los extremos más alejados de la zona de carga, como la reacción se produce en los apoyos-bandas de carga, y en el caso de los desplazamientos como solo se produce un movimiento vertical.

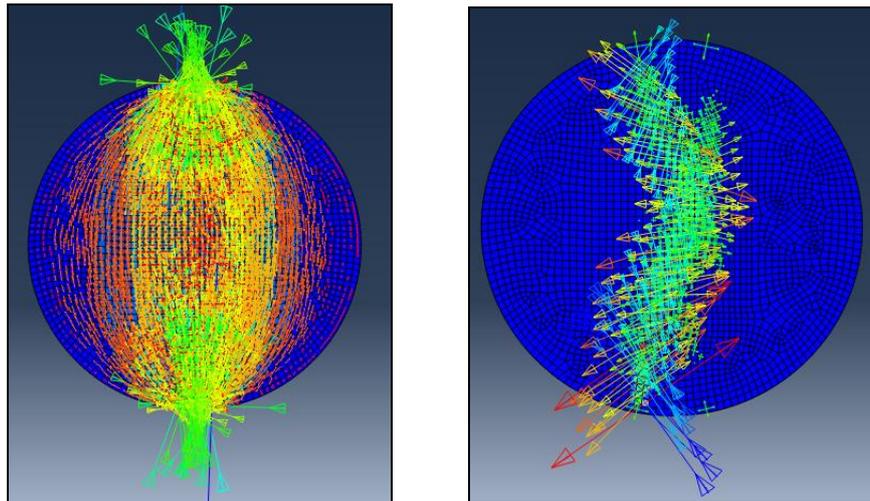


Figura 32. Diagrama vectorial de tensiones y daño en el modelo 2D Concrete Damage Plasticity.

Para el diagrama vectorial de tensiones se aprecia en amarillo la zona donde se produce una concentración de los mismos mientras se lleva a cabo el daño. Igualmente se distingue la zona traccionada en la zona de daño en torno al eje vertical.

4.3. Modelos en 3D

Los resultados obtenidos para la modelización en tres dimensiones se dividen según el procedimiento aplicado, XFEM o Concrete Damage Plasticity. En ambos casos, para realizar una comparación directa con los modelos en dos dimensiones se empleó el análisis estático general.

XFEM

El modelo de elementos finitos extendidos, XFEM, en tres dimensiones reproduce la rotura, proceso de fisuración por tracción indirecta en el material. Los esfuerzos introducidos reproducen una rotura en el eje vertical, aunque esta vez no llega a ser perfectamente lineal. La Figura 33 representa tres de las fases, la inicial, al 50% y la final, en la cual se aprecia la separación entre las caras de la grieta.

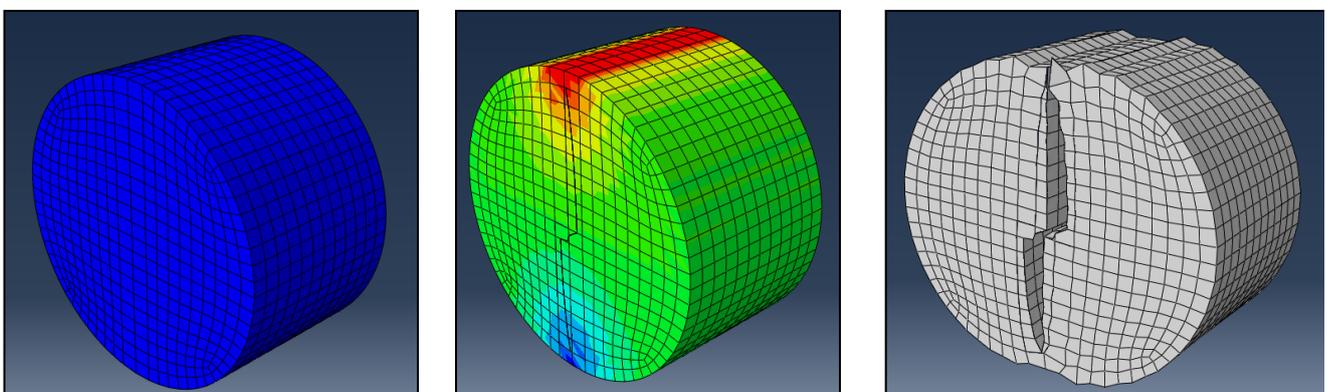


Figura 33. Proceso de daño 3D XFEM.

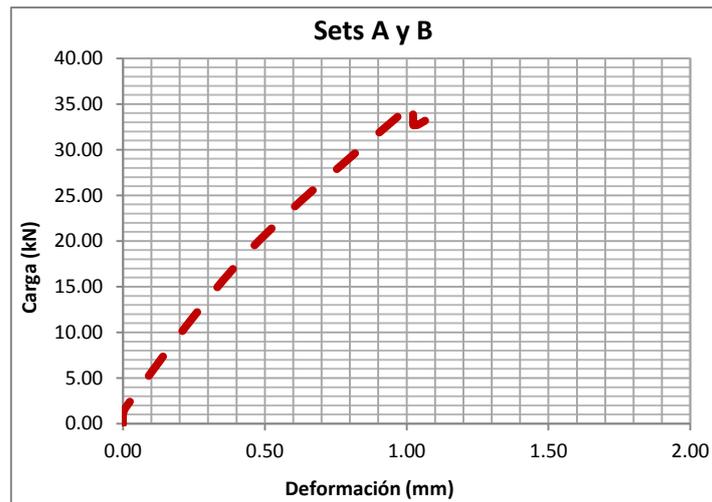


Figura 34. Diagrama Carga-Deformación modelo 3D XFEM.

A diferencia de lo ocurrido para la simulación en 2D, se ha tomado la media de los valores registrados en las áreas de los Sets A y B. La Figura 34 representa el diagrama carga deformación, donde la velocidad de rotura es superior y en espacio más reducido, viéndose también un descenso en la carga cuando se completa la rotura, aunque hay un leve repunte debido a que el sistema sigue cargando hasta que separa las caras y se vuelve inestable.

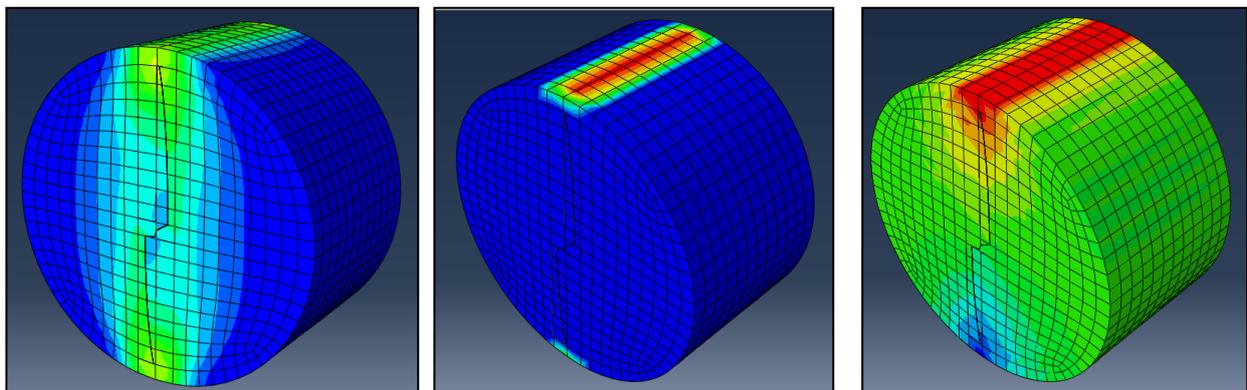


Figura 35. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 3D XFEM.

La Figura 35 muestra las tensiones, reacciones y desplazamientos en la probeta, el color azul muestra el valor mínimo y el rojo los máximos. Los esfuerzos se concentran en la parte central donde se está produciendo la fractura del material, las reacciones igual que en los casos anteriores vienen representadas en la zona de las bandas de carga, y en el caso de los desplazamientos como solo se produce movimiento vertical.

Para el diagrama vectorial de tensiones, Figura 36, se aprecia para la sección del eje vertical como la grieta se ha desarrollado de forma simétrica respecto al centro de la probeta. En este caso solo se ve la zona superior izquierda e inferior derecha como zona de concentración de esfuerzos. En el caso de la grieta, se aprecia como completa toda la sección previa a la separación.

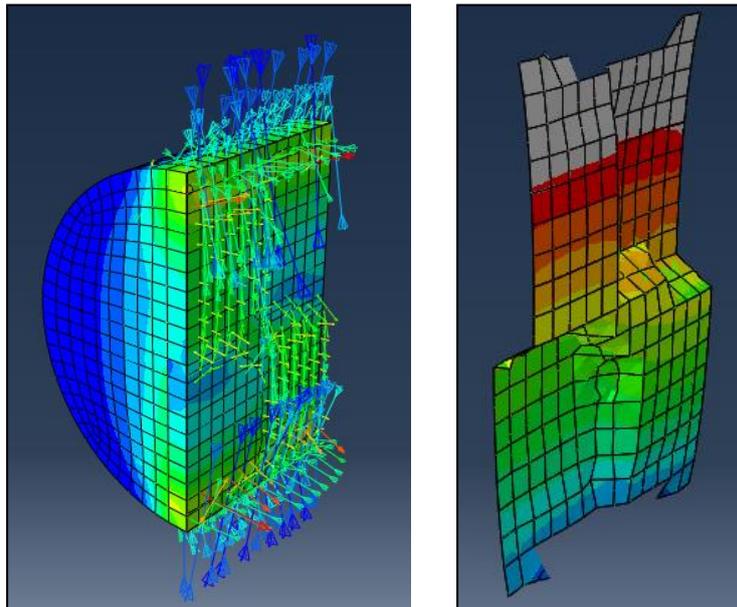


Figura 36. Diagrama vectorial de tensiones y fisura en el modelo 3D XFEM.

Concrete Damage Plasticity

El modelo de cálculo de daño por plasticidad en tres dimensiones, representa otro grado de dificultad al añadirle profundidad al modelo y aumentar los puntos de distribución de tensiones y desplazamientos.

La fisuración o fallo del material se representa en la Figura 37 como la zona más próxima al eje vertical donde se aplica la carga, deformación controlada. Se representa así tres fases del daño, la inicial, la final y una sección de la misma. Por el mayor tamaño de los elementos esta se aprecia de forma más gruesa, pero arroja unos resultados similares a los obtenidos para el modelo bidimensional.

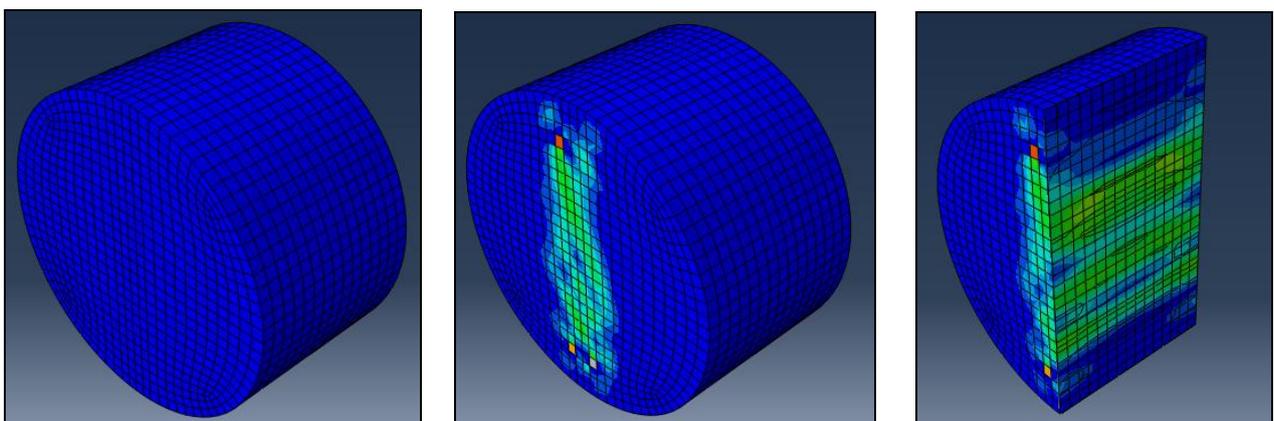


Figura 37. Proceso de daño 3D Concrete Damage Plasticity.

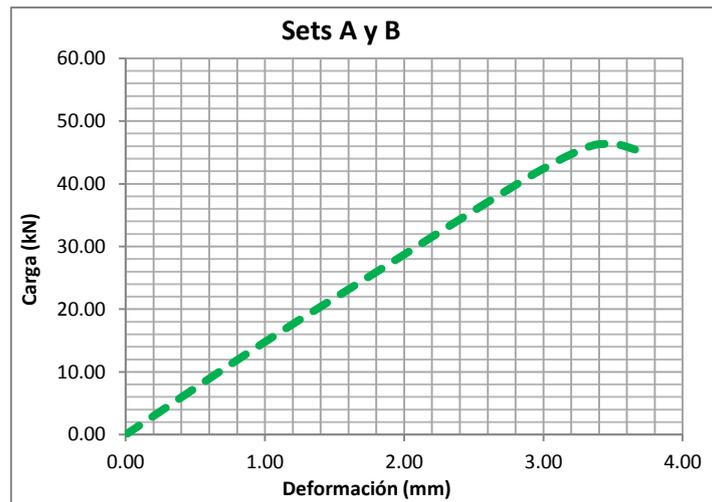


Figura 38. Diagrama Carga-Deformación modelo 3D Concrete Damage Plasticity.

Para la determinación de la curva Carga-Deformación se ha tomado la media de las medidas obtenidas en la superficie de aplicación de la carga. Tal y como se definió en la metodología son los Sets A y B. La curva obtenida es similar, aunque algo inferior, a la representada en el modelo bidimensional, separándose de los resultados de laboratorio.

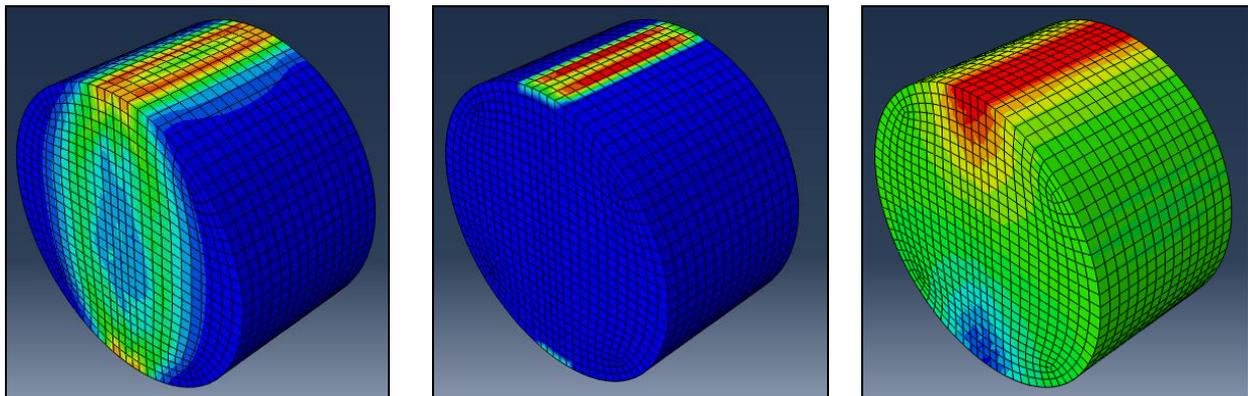


Figura 39. Distribución tensiones, reacciones y desplazamientos para el modelo 3D Concrete Damage Plasticity.

En la Figura 40 se muestran las tensiones, reacciones y desplazamientos que tienen lugar sobre la probeta al final del ensayo. Se representan en escala de colores donde en rojo se aprecian las magnitudes máximas y en azul las mínimas.

Para el diagrama vectorial de tensiones se aprecia en azul el movimiento de la carga, y en rojo la reacción de los elementos sometidos a tracción, mientras que en la imagen de la derecha se ve en rojo la concentración del daño en la zona central.

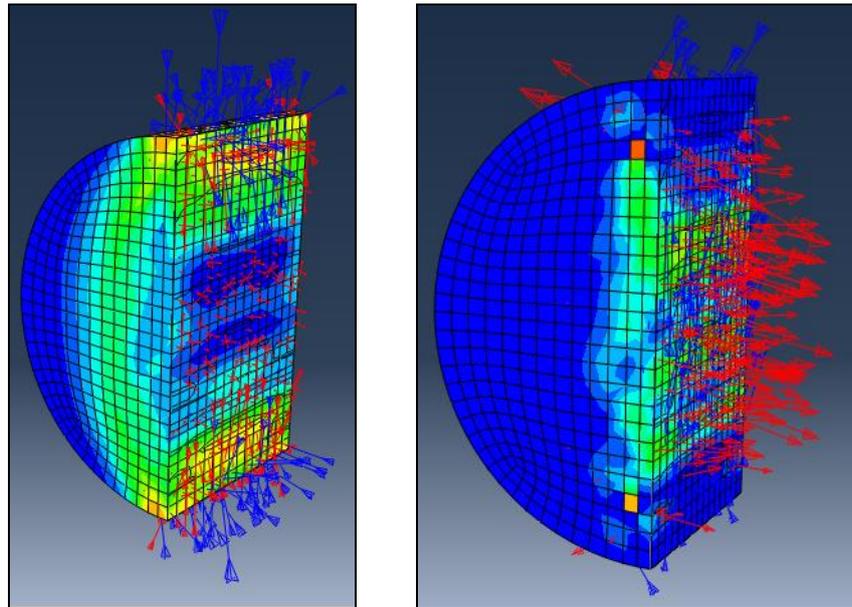


Figura 40. Diagrama vectorial de tensiones y daño en el modelo 3D Concrete Damage Plasticity.

4.4. Comparación de Resultados

Tras la realización de todos los modelos, y de los trabajos experimentales, se procede a realizar una comparativa global de todos ellos, donde se aprecia como los resultados obtenidos para el modelo de XFEM en 2D es el que mejor se ha ajustado a los resultados obtenidos en laboratorio. En relación a los resultados de XFEM 3D y ambos de Concrete Damage Plasticity.

En todos los casos se ha empleado un análisis estático general que asegurase la misma base de comparación entre modelos. Y las mismas cargas, geometría y condiciones de contorno.

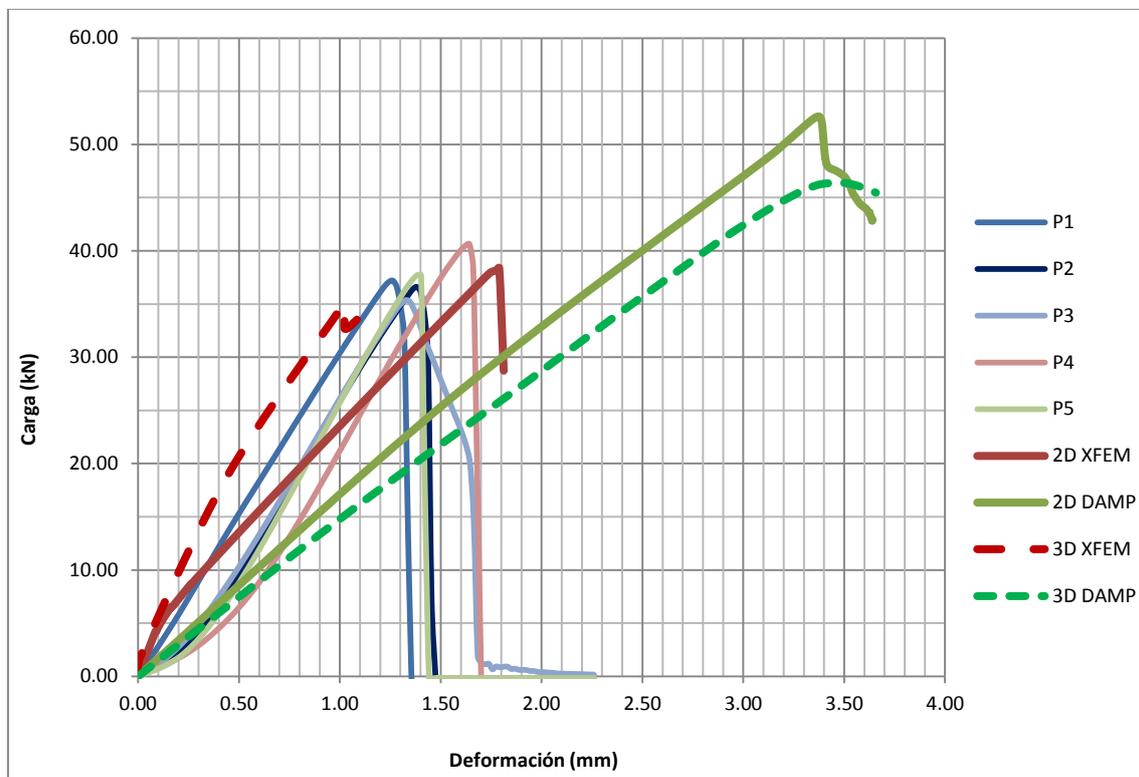


Figura 41. Diagrama Carga-Deformación Laboratorio vs. Modelos 2D y 3D.

5. CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de los trabajos se ha llevado a cabo un análisis comparativo de los distintos procedimientos de cálculo y modelización, haciendo un balance entre los realizados en dos y tres dimensiones, junto a los ensayos de laboratorio que sirvieron para dar forma y sentar la base de ambos modelos.

De esta manera, las principales conclusiones extraídas han sido:

- La modelización de ensayos de laboratorio ha sido posible mediante los cuatro modelos, si bien en determinadas circunstancias las limitaciones computacionales no han hecho posible un cálculo con mayor número de elementos.
- El tipo de análisis que conduce a mejores resultados respecto a los obtenidos en laboratorio fue el análisis estático general, ya que con el análisis estático de Riks no se obtienen resultados concordantes en estos modelos, dando lugar a la entrada en bucle del programa no permitiendo el resultado final.
- El modelo de cálculo en 2D mediante los elementos finitos extendidos se ajusta mejor a la nube de curvas obtenidas en laboratorio, alcanzando una resistencia y deformación similar.
- El modelo XFEM en 3D no llega a alcanzar la resistencia de laboratorio pero se ajusta bien la pendiente de carga-desplazamiento.
- Tanto el modelo en 2D como en 3D mediante el proceso de Concrete Damage Plasticity obtiene unos resultados similares, pero superiores a los obtenidos en laboratorio bajo las mismas condiciones iniciales que el resto de los modelos. Por tanto parece necesario una revisión del mismo para su ajuste y posterior validación en laboratorio.

6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

A partir de los trabajos realizados para este Trabajo Fin de Máster y viendo las posibilidades que brinda la utilización de un software como ABAQUS/CAE se plantean diversos caminos por donde continuar la investigación.

Se plantea la validación del modelo mediante el diseño de otra geometría y ante otras condiciones de carga, para su ejecución en laboratorio y evaluación posterior de todos los datos que se obtengan.

Así mismo se plantea la utilización de software de tratamiento de imágenes para simular la distribución de áridos y mastico para un análisis en profundidad del modelo, así se discretizará el comportamiento de los distintos materiales que componen una mezcla bituminosa.

De la misma manera se pretende incluir en los procesos de cálculo el comportamiento viscoelástico del conjunto, para así entrar a valorar la simulación de otros ensayos de carreteras donde esta característica es esencial, por ejemplo el ensayo de rodadura que mide las deformaciones plásticas en la capa de firme.

REFERENCIAS

- ABAQUS. Abaqus Analysis User's Manual v. 6.10. DSimulia, 2010.
- Abdulshafi, A.A., Majidzadeh, K. (1985)*J-integral and cyclic plasticity approach to fatigue and fracture of asphaltic mixtures*. Transportation Research Record, 1034:112-123.
- Aglan, H., Shehata, I., Figueroa, L., Othman, A. (1992) *Structure-fracture toughness relationships of asphalt concrete mixtures*. Transportation Research Record, 1353:24-30.
- Akbulut, H., Aslantas K. (2004).*Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism*. Materials and Design, 26(4):383–397.
- Belytschko, T., Black, T. (1999). *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 45(5):601-620.
- Cifuentes, H., Medina, F. (2012).*Aplicación de la mecánica de la fractura al hormigón estructural*. Conceptos, análisis experimental y modelos numéricos. Apuntes de clase.
- Dongre, R., Sharma, M.G., Anderson, D.A., (1989). *Development of fracture criterion for asphalt mixes at low temperatures*. Transportation Research Record, 1228.
- European Asphalt Pavement Association (2012). www.eapa.org
- Garrote-Villar, E. (2006). *Efecto de la temperatura en la tenacidad de diferentes mezclas bituminosas*. Tesina, Universidad Politécnica de Cataluña.
- Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P. E. (1976). *Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements*. Cement and Concrete Research, 6:773–782.
- Hyun, Y.W., Belytschko, T., Bazant, Z.P., Chang, T.P. (1986).*Strain softening materials and finite element solutions*. Computers & Structures, 23:163-180.
- Ioannides, A.M. (1997).*Fracture mechanics in pavement engineering*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1568:10-16.
- Jacobs, M.M.J., Hopman, P.C., Molenaar, A.A.A. (1996).*Application of fracture mechanics principles to analyze cracking in asphalt concrete*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 65:1-39.
- Jiang-Miao, Y., Pei-Lin, C., Xiao-Jun, L., Xiao-Ning, Z. (2006).*Study of microstructural finite element modelling of asphalt mixture*. Proceedings of the 25th Southern African Transport Conference, Pretoria, South Africa.
- Kim, K.W., El Hussein, H.M. (1995).*Effect of differential thermal contraction on fracture toughness of asphalt materials at low temperatures*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64: 474- 499.

- Kim, H, Wagoner, MP, Buttlar, W.G. (2009). *Numerical fracture analysis on the specimen size dependency of asphalt concrete using a cohesive softening model*. Construction and Building Materials, 23(5):2112–2120.
- Labuz, F. J., Dai, S., (1994). *Cracking of Asphalt Concrete at Low Temperatures*. Final Report, Minnesota Department of Transportation.
- Lee, N.K., Morrison, G.R., Hesp, S.A.M. (1995). *Low temperature fracture of polyethylene-modified asphalt binders and concrete mixes*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64:534- 574.
- Li, X.J., Marasteanu, M.O. (2006). *Evaluation of the Factors that Affect the Fracture Resistance of Asphalt Mixtures at Low Temperatures Using Mechanical Testing and Acoustic Emission Methods*. Dissertation at Minnesota University.
- Li, X.J., Marasteanu, M.O. (2010a). *The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature*. Engineering and Fracture Mechanics, 77(7):1185–90.
- Li, X.J., Marasteanu, M.O. (2010b). *Using semi-circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete*. Experimental Mechanics, 50:867–76.
- Little, D.N., Mahboub, K. (1985). *Engineering properties of first generation plasticized sulfur binders and low temperature fracture evaluation of plasticized sulfur paving mixtures*. Transportation Research Record 1034:103-111.
- Majidzadeh, K. (1976). *Application of fracture mechanics for improved design of bituminous concrete*. Washington Department of Transportation, Federal Highway Administration. Springfield, Va.
- Marasteanu, M.O., Li, X.J., Clyne, T.R., Voller, V.R., Timm, D.H., Newcomb, D.E. (2004). *Low temperature cracking of asphalt concrete pavements*. Minnesota Department of Transportation.
- Melenk, J., Babuska, I. (1996). *The Partition of Unity Finite Element Method: Basic Theory and Applications*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 39:289–314.
- Mobasher, B., Mamlouk, M.S., Lin, H.M. (1997). *Evaluation of crack propagation properties of asphalt mixtures*. Journal of Transportation Engineering, 123(5):405-413.
- Molenaar, P., Hugo, F., Beukes, J., Catin, G. (2004). *Rehabilitation of RWY 03L/21R at Johannesburg International Airport: the quest for a suitable surfacing mix*. Paper accepted for publication and presentation at 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, South Africa.
- Novak, M., Birgisson, B., Roque, R. (2003). *Near-surface stress states in flexible pavements using measured radial tire contact stresses and ADINA*. Computers and Structures, 81(8–11):859–70.

- Remmers, J.J.C., de Borst, R., Needleman, A. (2008). *The Simulation of Dynamic Crack Propagation using the Cohesive Segments Method*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 56:70–92.
- Roque, R., Buttlar, G.W. (1992). *The Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Mode*. Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions, 61:304-328.
- Song, J. H., Areias, P.M.A., Belytschko, T. (2006). *A Method for Dynamic Crack and Shear Band Propagation with Phantom Nodes*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 67:868–893.
- Sulaiman, S.J., Stock, A.F. (1995). *The use of fracture mechanics for the evaluation of asphalt mixes*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 64:500-533.
- Uriol-Salcedo, J.I. (1992). *Historia de Los Caminos de España*. Vol.2. Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Wendling, L., Xolin, E., Gimenez, D., Reynaud, P., De La Roche, C., Chevalier, J., Fantozzi, G. (2004). *Characterization of Crack Propagation in Bituminous Mixtures*. 5th International RILEM Conference on Cracking Pavements. Limoges, France, RILEM Publications, 639-646.
- Zhengyu (Jenny) Z., Glaucio, P. (2005). *Cohesive zone modeling of dynamic failure in homogeneous and functionally graded materials*. International Journal of Plasticity, 21:1195–1254.

ANEXO

ANEXO 1. NORMA UNE-EN 12697-23 Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas