



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Modelización numérica del hormigón reforzado con fibras poliméricas

Trabajo realizado por:
Desirée Diez Milán

Dirigido por:
Iván Puig Damians
Sebastià Olivella Pastalle

Grado en:
Ingeniería de Obras Públicas

Barcelona, 13 de Junio del 2019

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE GRADO

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 2 |
| ABSTRACT | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. Generalidades | 3 |
| 1.2 Antecedentes | 4 |
| 1.2.1 Hormigón reforzado con fibras | 4 |
| 1.2.2 Tipos de fibra | 4 |
| 1.3 Norma UNE EN 14651:2005 | 8 |
| 1.3.1 Principio | 8 |
| 1.3.2 Aparato de medida | 8 |
| 1.3.3 Detalles del ensayo | 10 |
| 1.3.4 Preparación del ensayo | 10 |
| 1.3.5 Resultados | 11 |
| 2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA | 13 |
| 2.1 Criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Modificación de Ducker Prager | 13 |
| 2.2 Porosidad del material. Pérdida de resistencia | 14 |
| 2.3 Método de elementos finitos | 17 |
| 2.4 Geometría y condiciones de contorno | 17 |
| 2.5 Condiciones iniciales y definición de intervalos de tiempo | 17 |
| 2.6 Propiedades material del caso base | 18 |
| 2.7 Generación de la malla del modelo base: sensibilidad preliminar | 19 |
| 3. RESULTADOS | 24 |
| 3.1 Resultados cuantitativos: Sensibilidad y verificación del modelo | 24 |
| 3.1.1 Variación del módulo elástico | 24 |
| 3.1.2 Variación de parámetros plásticos o de resistencia | 25 |
| 3.2 Resultados cualitativos | 30 |
| 4. CONCLUSIONES | 35 |
| 5. TRABAJOS FUTUROS | 36 |
| 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 37 |
| ANEJOS | 39 |

RESUMEN

El hormigón tiene una elevada capacidad de resistencia frente a esfuerzos de compresión; sin embargo, esta capacidad decae en cuanto sufre esfuerzos de tracción. Es por ello que, se desarrolló el agregado de fibras ya que refuerzan este defecto dotando al hormigón de mayor comportamiento tensión-deformación. Por un lado, este cambio depende de las propiedades de la fibra, de su distribución en el proceso de amasado e incluso de la cantidad añadida (kg/m^3). Por otro lado, las características del hormigón, cuya variación puede afectar al comportamiento del conjunto de la mezcla. Por este motivo, se estudia la afectación de cuatro parámetros (ángulo de rozamiento interno, cohesión, dilatación, Módulo de Young) variando sus valores, independientes entre ellos, para llegar a alcanzar la mayor resistencia a la deformación por tracción a partir de un modelo base.

Palabras clave: CODE_BRIGHT, modelización numérica, hormigón reforzado con fibras, porosidad del hormigón

ABSTRACT

The concrete has a high capacity of resistance against compression stresses; however, this capacity declines as soon as it undergoes tensile stresses. That is why, the aggregate of fibers was developed as they reinforce this defect providing the concrete with greater stress-strain behavior. On the one hand, this change depends on the properties of the fiber, its distribution in the kneading process and even the amount added (kg/m^3).

On the other hand, the characteristics of concrete, whose variation can affect the whole of the mixture. For this reason, the affectation of four parameters (internal friction angle, cohesion, dilatance, Young's modulus) is studied, varying their values, independent of each other, to reach the highest resistance to tensile deformation from a base model.

Keywords: CODE BRIGHT, numerical modelling, reinforced concret with fibers, concret porosity

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

Es sabido que la debilidad del hormigón es su reducida resistencia a la tracción en comparación con su resistencia a la compresión. Esta falta de resistencia del hormigón a tracción hace que, para poder satisfacer criterios de estabilidad y de durabilidad, se requiera de materiales adicionales que permitan mejorar su comportamiento frente a sollicitaciones mecánicas a las que esté sometido. El uso del acero ha sido y sigue siendo fundamental para garantizar el buen funcionamiento de las estructuras, absorbiendo los esfuerzos de tracción. Este incremento de resistencia se consigue mediante la inserción de barras corrugadas en su cuantía, geometría y disposición adecuadas, cuando el hormigón está en fase líquida. A esta configuración combinada del hormigón con otros elementos insertados que le confieren la debida resistencia a tracción se la denomina hormigón reforzado, y cuando el refuerzo se constituye por barras de acero o hierro, se le denomina hormigón armado.

Hace años que hay un especial interés en comprender las causas de la rotura por fatiga de las estructuras de hormigón. Una serie de ciclos continuos puede llegar a hacer que colapsen dichas estructuras y sus materiales juegan un papel importante frente a su resistencia/durabilidad. Bajo este proceso de fatiga continua, los materiales sufren un proceso de agrietamiento que va aumentando con el paso del tiempo hasta la rotura.

Entre la variedad de aplicaciones que se le pueden dar a un hormigón reforzado con fibras se encuentran las siguientes:

- Hormigones proyectados en obras subterráneas (túneles, cavernas, minería), en la estabilización de taludes o en ejecución de piscinas.
- En soleras y pavimentos.
- En piezas prefabricadas, generalmente, con carácter tridimensional o bidimensional (muros, escaleras, etc.)
- En forjados para redistribuir tensiones en capas de compresión.

El grado de mejora en la capacidad resistente del hormigón reforzado con fibras depende del volumen relativo de fibras a considerar además del tipo de fibra, su geometría, así como su misma distribución dentro del hormigón (Al-Azzawi and Karihaloo 2017).

En el presente trabajo se pretende, mediante la generación de un modelo numérico representativo del ensayo UNE EN-14651:2005 correspondiente al ensayo a flexión de probetas de hormigón reforzado con fibras (Apartado 1.2), determinar y cuantificar las propiedades del hormigón que, junto con la inserción de fibras, son más relevantes en su comportamiento tenso-deformacional. El modelo numérico se ha desarrollado con el código CODE_BRIGHT (DECA UPC,

1990) y a través del programa GID (GID-CIMNE, 2019) se han realizado los pre/post procesos. A partir de un caso inicial base y mediante un estudio de sensibilidad paramétrico completo se ha podido ajustar el comportamiento del modelo numérico a ensayos a flexión empíricos disponibles, calibrándolo. Para ello, se hará uso de una mezcla de hormigón con polímeros de polipropileno (Masterfiber 151) cuyas propiedades se irán modificando creando, así, una serie de modelos numéricos que representaran el comportamiento tenso-deformacional del hormigón reforzado con fibras.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Hormigón reforzado con fibras

Des de 1940 (Gacén Guillén, 1978), año en el que se introdujo la fibra en una masa compuesta por cemento, agua y áridos, se han ido realizando pruebas/ensayos para poder determinar las características que aporta cada una, y en qué medida, al hormigón.

El mayor reto de un ingeniero es prolongar la duración, aumentar la resistencia de las estructuras que forman nuestras ciudades; sobre todo, teniendo en cuenta que van a estar sometidas a las actuaciones del medio donde se encuentren durante años. Por este motivo, cada vez más la tendencia de incorporar fibras al hormigón se hace más candente.

No obstante, todos los ensayos realizados en laboratorios, son pruebas ideales de lo que en realidad puede llegar a sufrir la estructura; a pesar de ello, si las condiciones reales fueran simuladas, sería imposible acertar al 100% las reacciones que podría tener. Esto es porque los comportamientos de los materiales dependen constantemente de todo su entorno.

En el caso del hormigón, ha sido el material más usado en toda la historia de la construcción y, a día de hoy, se sigue investigando cómo hacer que aumenten sus características tales como la resistencia a la fatiga, la resistencia a tracción o la resistencia al impacto.

Las fibras para reforzar el hormigón, son una solución con la que se apuesta fuerte en el sector ya que, además de aumentar las propiedades mencionadas previamente, disminuye la fisuración (tal y como veremos en los resultados del ensayo que realizaremos en los siguientes apartados), disminuye la retracción por fraguado y aumenta la tenacidad al crear una malla de fibras que se entrelaza en la fisura para distribuir mejor las tensiones.

1.2.2 Tipos de fibra

Las fibras son elementos de longitud corta y de sección reducida que se incorporan al hormigón para darle ciertas propiedades específicas.

Por un lado, encontramos las fibras estructurales que son las que proporcionan mayor energía de rotura al hormigón en masa; por otro lado, las fibras no estructurales que son aquellas que

sin tener en cuenta el cálculo de la energía mencionada en las fibras estructurales, mejoran ciertas propiedades como puede ser la fisuración por retracción entre muchas otras.

Existen distintos tipos de fibras que aportan un aumento de calidad al hormigón reforzándolo en las fisuras. Las principales propiedades que interfieren en el hormigón por parte de las fibras son las siguientes:

- El tipo de fibra
- Volumen % de fibra
- La relación longitud/diámetro
- Orientación en la matriz

En la actualidad, los tipos de fibras más usados para motivos constructivos son las fibras de acero o las de vidrio. A pesar de ello, existen otro tipo de fibras que hay que tener en cuenta y que han sido base de nuestro proyecto.

- **Fibras de acero**

Las fibras de acero aumentan la resistencia a cargas superiores que las que pueden soportar las fibras sintéticas. Se ha demostrado que puede llegar a aumentar dicha propiedad hasta 5 veces más. Por este motivo, se usan principalmente en hormigones que van a ser usados en construcciones tales como hospitales o centros comerciales. Por otro lado, la corrosión, en casos extremos, es un problema para este tipo de fibras ya que no son inoxidable y pueden ser atacadas por sales solubles haciendo que la durabilidad se vea afectada a lo largo de la vida del concreto.

Este tipo de fibras se clasifica en cuatro tipos distintos:

- Tipo I. Trefiladas
- Tipo II. Cortadas en láminas
- Tipo III. Virutas de acero
- Tipo IV. Otras

Usualmente se emplean fibras con longitudes de 2.5 a 3 veces el tamaño máximo del árido de la mezcla (esta debe ser la necesaria para dar una adherencia suficiente y evitar arrancamientos).

- **Fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas**

Este tipo de fibras, están formadas por material polimérico, extrusionado y cortado que se adhiere al mortero u hormigón. Estas, tienen distintas clases (Majoral et al. 2011).

- Según la fabricación
 - Tipo I. Monofilamentos extruidos
 - Tipo II. Láminas fibriladas.
- Según sus dimensiones
 - Micro-fibras < 0.3 mm de diámetro. Su función es reducir la fisuración por retracción plástica, sin función estructural; y, mejorar el comportamiento del hormigón frente al fuego.
 - Macro-fibras ≥ 0.3 mm de diámetro. Estas pueden usarse estructuralmente).

En 1938 el ingeniero Rusell Games Slayter presentó la fibra de vidrio para su uso en la construcción de edificios como material aislante dada su capacidad de resistencia en altas temperaturas. En este caso, la malla de fibra evita la formación de grietas (como muestra la ilustración 1.2.2) dentro del hormigón por lo que, en aislamiento, puede llegar a reemplazar mallas metálicas. Al no oxidarse, tras la segunda guerra mundial, su uso se extendió en el área militar (en aviones) o en el área medicinal o de telecomunicaciones.



Ilustración 1.2.2 Fibras de polipropileno. Fuente: Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado. Fernando Muñoz Cebrián, 2011

A continuación, se muestra la ficha técnica de las características de la fibra polimérica que será usada para el estudio de la resistencia a cortante de una viga de hormigón.

MASTERFIBER151

Se trata de una fibra extruida y transformada en una fibra más gruesa para poder ser usada en mezclas de hormigón. Esto contribuye al aumento de la durabilidad del material incrementando la resistencia ante la propagación de una rotura por su poder de absorción de la energía provocadora. Las fibras se dispersan uniformemente por el hormigón e, instantáneamente, aumenta la ductilidad de este.

MasterFiber151, aumenta la capacidad de servicio del hormigón proveyéndolo de una mayor resistencia frente a actores externos del ambiente como puede ser el agua, los cloruros y los agentes corrosivos. En la tabla 1.2.2, se muestran las propiedades del polímero en cuestión.

Tabla 1.2.2 MasterFiber151 propiedades

| Propiedades del polímero | |
|--|------------------------|
| Tipo de polímero | Polyoefin |
| Longitud | 50 mm +/- 10% |
| Diámetro equivalente | 0.85 mm +/- 50% |
| Densidad | 0.91 g/cm ³ |
| Módulo Secante (EN 14889-2) | 4.000 MPa +/- 15% |
| Resistencia a la tracción (EN 14889-2) | 490 MPa +/- 15% |

- **Beneficios**

- Fácil de dosificar tanto en planta como en camión antes de su aplicación
- Alta resistencia a ataques de ácidos por lo que es apto/adeecuado para condiciones subterráneas húmedas o construcciones subterráneas expuestas a grandes condiciones húmedas
- Reduce el tiempo de construcción
- La densidad y las dosificaciones usuales de la fibra no llevan a modificar los valores del peso específico característico del hormigón con fibras respecto al hormigón sin ellas.

- **Precauciones**

El material es muy estable; no obstante, en presencia de fuego puede producir monóxido de carbono, dióxido de carbono y otros gases peligrosos para la salud (BASF Construction Chemicals UAE LLC, MasterFiber 151).

1.3 Norma UNE EN 14651:2005

En el siguiente apartado se presenta la UNE EN 14651:2005 de la Norma Estándar Europea: Test method for metallic fibered concrete-Measuring the flexural tensile strenght (limit of proportionality (LOP), residual).

1.3.1 Principio

El comportamiento a la tracción del hormigón con fibra metálica se evalúa en términos de valores de resistencia a la tracción por flexión residual determinados a partir de la curva de desplazamiento de apertura de la grieta de la carga o la curva de desviación de la carga obtenida al aplicar una carga en el punto central en una probeta prismática del material en cuestión (como muestra la ilustración 1.3.1).



Ilustración 1.3.1 Ensayo a tracción del hormigón. Fuente: Laboratorio de estructuras UPC

1.3.2 Aparato de medida

- Sierra con cuchilla giratoria de carborundum o diamante con profundidad de corte ajustable y fijable y 90 ° dirección del corte a las longitudes de las muestras para hacer muescas en las muestras de prueba.
- Calibrador, capaz de leer las dimensiones de las muestras de ensayo con una precisión de 0.1 mm.

- Regla, capaz de leer las dimensiones de las muestras de ensayo con una precisión de 1 mm.
- Máquina de prueba que cumple con los requisitos de clase 1 de la máquina en EN 12390-4, capaz de operar en una de manera controlada, es decir, produciendo una tasa constante de desplazamiento (CMOD o deflexión), y con suficiente rigidez para evitar zonas inestables en la curva de carga-CMOD o curva de carga-desviación.
- Dispositivo para transmitir la carga de la máquina de prueba al espécimen de prueba, compuesto por dos soportes rodillo y un rodillo de carga (ilustración 1.3.2).

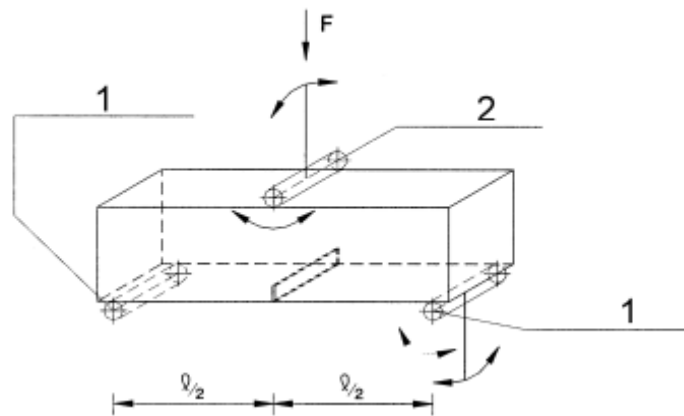


Ilustración 1.3.2. Disposición de la carga del ensayo. Fuente: UNE-EN 14651:2005

1. Soportes de rodillo
2. Rodillo de carga

Todos los rodillos deben ser fabricados de acero y deben tener una sección circular con un diámetro de $30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Deben ser al menos 10 mm más largos que el ancho de la muestra de ensayo con una superficie limpia y lisa.

Dos rodillos, incluido el superior, podrán girar libremente alrededor de su eje y ser inclinados sobre un plano perpendicular al eje longitudinal de la muestra de ensayo.

La distancia entre los centros de los rodillos de soporte (es decir, la longitud del tramo) será igual a 500 mm. Todos los rodillos deben ajustarse a su posición correcta con todas las distancias con una precisión de $\pm 2.0 \text{ mm}$.

- Dispositivo de medición de carga, capaz de medir cargas con una precisión de 0.1 kN.
- Transductor de desplazamiento lineal, capaz de medir desplazamientos con una precisión de 0.01 mm.
- Dispositivo (marco o plantilla) para montar el transductor de desplazamiento, que pueden instalarse de una manera que garantiza una determinación precisa de las deflexiones netas en el tramo medio, excluyendo cualquier efecto debido al asiento o

torsión de la muestra de prueba en sus soportes (solo si se mide la deflexión en lugar de CMOD).

- Sistema de registro de datos acoplado directamente a salidas electrónicas de carga y CMOD o deflexión, con una velocidad de grabación no inferior a 5 Hz.

1.3.3 Detalles del ensayo

Las muestras de ensayo deben ser prismas (ilustración 1.3.3) conformes a la Norma UNE-EN 12390-1:2013 con un tamaño nominal (ancho y profundidad) de 150 mm y una longitud L : $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$. La forma y el tamaño especificados son adecuados para un tamaño máximo de agregado no más de 32 mm y / o fibras metálicas no más de 60mm.

El ancho de la muesca debe ser de 5 mm o menos, la distancia h_{sp} debe ser de $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. Las muestras de ensayo se curarán de acuerdo con la norma Norma UNE-EN 12390-2:2013, a menos que se especifique lo contrario. Las pruebas se realizarán normalmente a los 28 días.

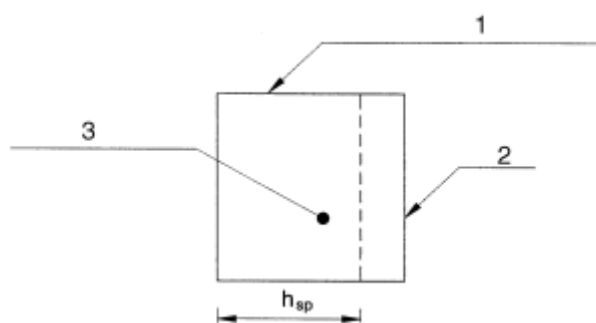


Ilustración 1.3.3 Detalle de la rebanada del prisma ensayar.
Fuente: UNE-EN 14651:2005

3. Superficie superior
4. Corte transversal de la muestra de ensayo
5. Muesca

1.3.4 Preparación del ensayo

La ilustración 1.3.4 muestra que el ancho promedio de la muestra y la distancia entre la punta de la muesca y la parte superior de la muestra en la sección de la mitad del tramo se determinará a partir de dos medidas al 0.1 mm de ancho más cercano y distancia en la parte con muesca de la muestra de ensayo, utilizando calibradores, de manera que la distancia entre la parte inferior de la muestra y la línea de medición es de 5 mm o menos.

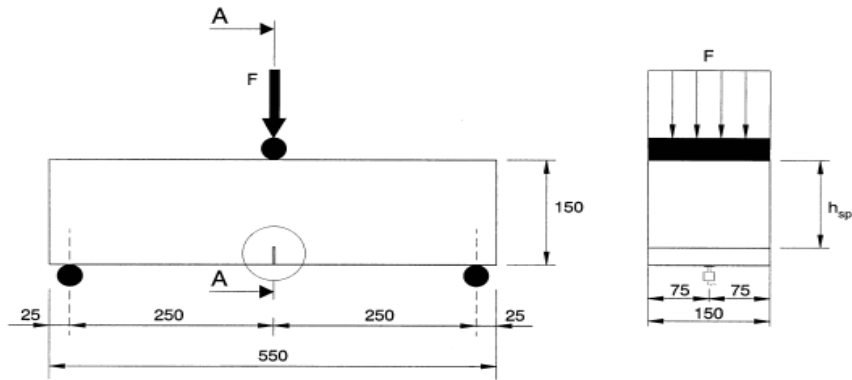
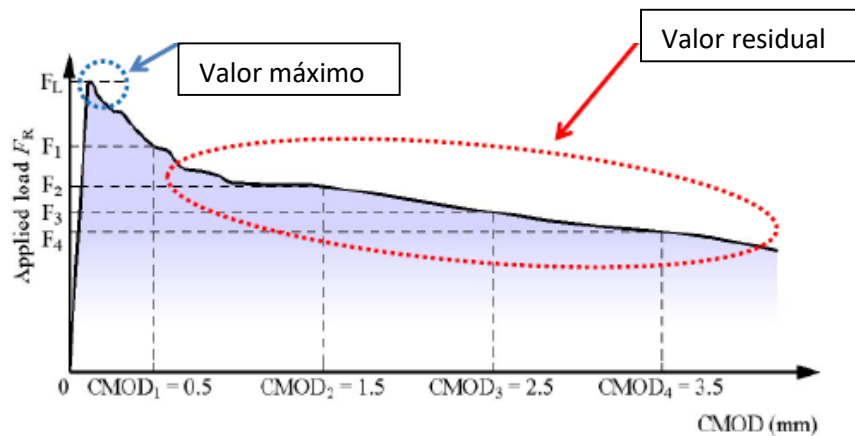


Ilustración 1.3.4. Dimensiones de la probeta de hormigón a ensayar

1.3.5 Resultados

Como se ha comentado en los apartados anteriores, el hormigón reforzado con fibras se evalúa analizando su comportamiento resistente a tracción por flexión creando un gráfico tensión-deformación. En el ejemplo de ensayo del gráfico 1.3.5.1, se observa como el valor de pico del gráfico llega, aproximadamente, a un valor de 38 kN con un desplazamiento asociado de 2 mm.



Typical graph of test load F_R vs CMOD

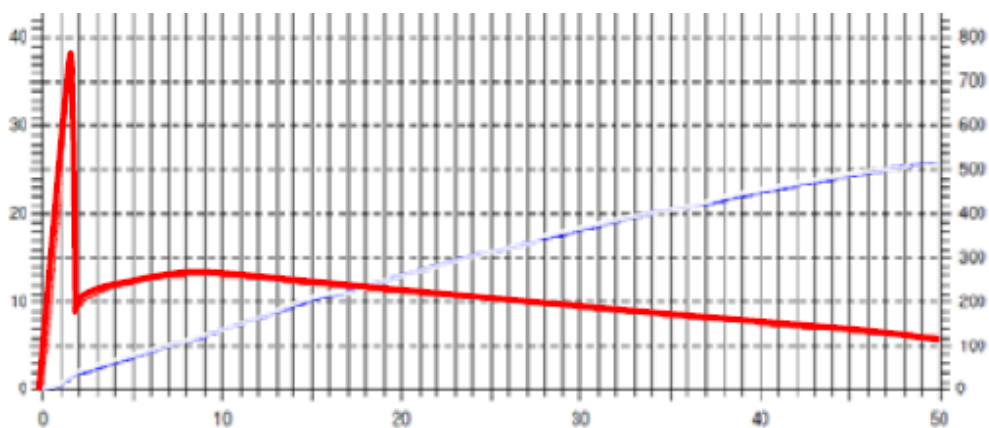


Gráfico 1.3.5.1 Medida de la resistencia a flexión. Fuente: Laboratorio de estructuras UPC

En estas coordenadas se sitúa la caída de la resistencia del hormigón con un valor residual en decaída uniforme (hasta llegar a un valor de 110 mm).

El comportamiento del hormigón puede depender de la cuantía de fibras añadidas a la mezcla a la hora de elaborar el material en el laboratorio correspondiente. En el gráfico 1.3.5.2, se muestran tres cuantías (kg/m^3) de fibras a las cuales se asocia una resistencia del hormigón f_{ck} de 40 MPa y 35 MPa. Los resultados muestran una leve variación en las deformaciones por lo que en este trabajo se usa un $f_{ck} = 35$ MPa dado a que es un valor comúnmente usado y se sitúa en un término medio entre los 20 MPa y los 40 MPa.

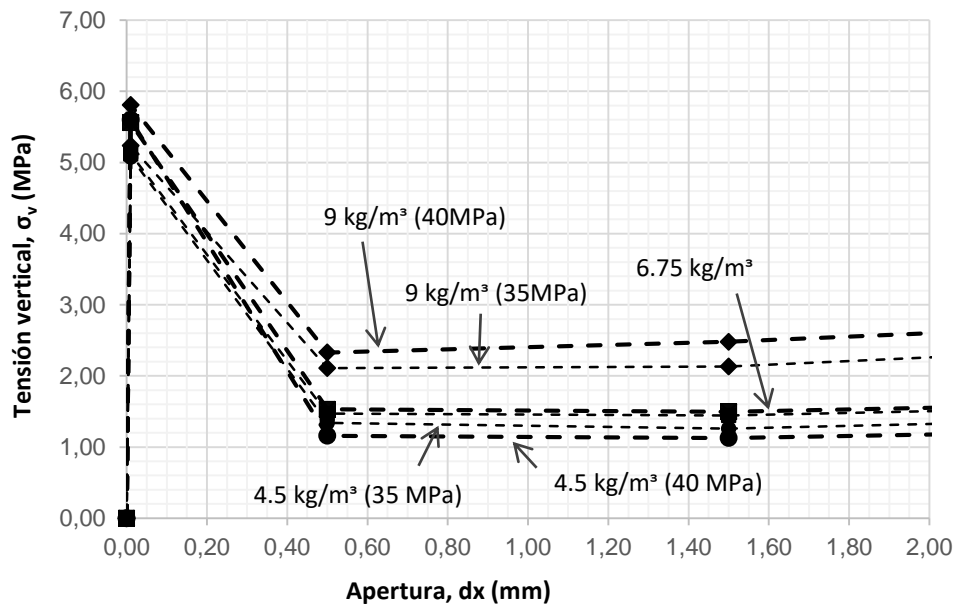


Gráfico 1.3.5.2 Variación de la cuantía de fibras. Modelo base con 35 MPa

2. MODELIZACIÓN NUMÉRICA

2.1 Criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Modificación de Ducker Prager

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se introdujo por primera vez en el año 1773 (ETSECCPB, Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas); se trata de un modelo con un elevado porcentaje de aproximación al comportamiento no lineal del suelo: el elastoplástico perfecto (con características isotrópicas). Este criterio trata de un modelo elástico seguido de un plástico perfecto: elasticidad perfecta (deformaciones reversibles) y plasticidad asociada a las deformaciones irreversibles que sufre suelo.

El criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se basa en dos componentes:

- La ley de Hooke para definir el comportamiento elastoplástico relacionando las deformaciones elásticas y plásticas.

La teoría de la plasticidad asociada relativa a la relación del modelo de Hooke, sobreestima el valor de la dilatación en el terreno. Para disminuir este efecto, el modelo de Mohr-Coulomb incorpora una función de potencial plástico para equilibrar el resultado.

- La forma genérica del criterio de falla de Mohr-Coulomb que relaciona las tensiones normales con las tangenciales tal que la zona de estados tensionales que no debe alcanzarse es la que supera el valor de la envolvente de Mohr-Coulomb ya que, en ese caso, el suelo se encuentra en situación de rotura.

Como muestra la ilustración 2.1.1, la cohesión juega un papel importante en la resistencia del suelo: cuanto mayor sea el valor de ésta mayor será también su resistencia al corte. En según qué condiciones, este resultado está directamente relacionado con la porosidad del material.

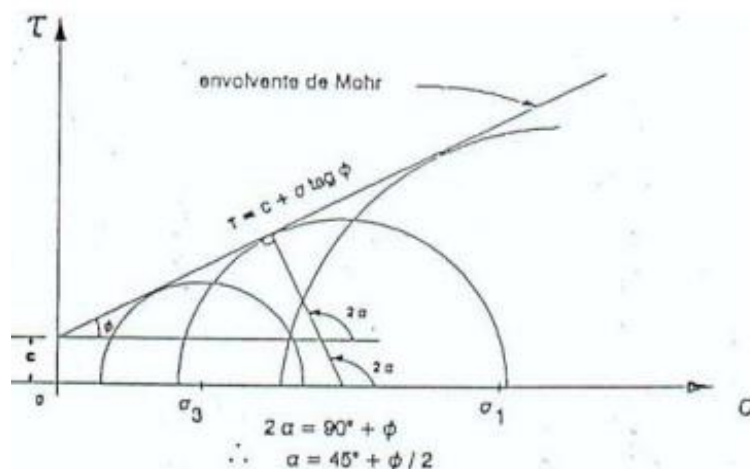


Ilustración 2.1.1 Envolvente de Mohr-Coulomb. Fuente: ETSECCPB, Criterios de rotura y clasificaciones geomecánicas

Donde:

τ es la tensión tangencial que actúa en el plano de rotura

φ se trata del ángulo de fricción

c es la cohesión del material

σ_1, σ_3 tensión normal máxima y mínima

El modelo constitutivo preliminar usado en el presente trabajo, está basado en el modelo de rotura de Drucker Prager (criterio basado en la idea de que la tensión de corte de rotura depende linealmente de la tensión normal a través de las constantes de los materiales de un modelo octaédrico). Este modelo, es una generalización de Mohr-Coulomb y es por lo que se hace este estudio con este último dado que las tensiones principales coinciden en ambos en las tres dimensiones como muestra la ilustración 2.1.2.

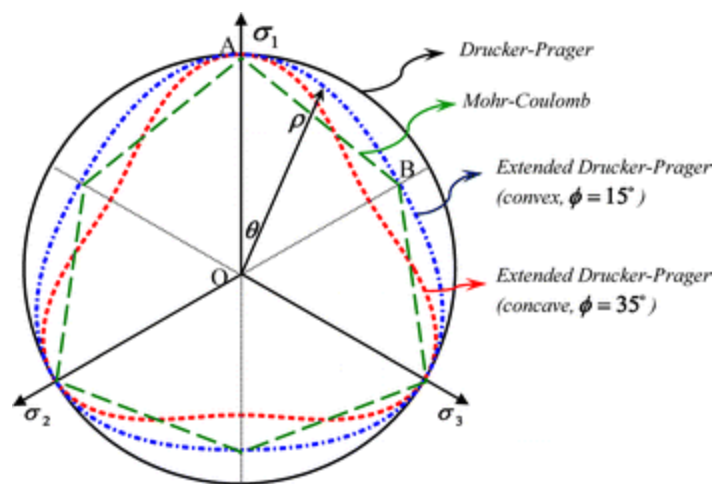


Ilustración 2.1.2 Modelo Drucker-Prager y Mohr- Coulomb. Fuente: <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0425-1>

2.2 Porosidad del material. Pérdida de resistencia.

La porosidad juega un papel vital en cuanto al comportamiento del material se refiere. Un aumento de este parámetro puede causar inestabilidad en el terreno dado a la infiltración de agua (por ejemplo) que poco a poco provoca la rotura del suelo.

El estudio realizado por Trabelsi et al (2011) permitió descubrir una relación entre la porosidad y la resistencia tensional (ilustración 2.2.1). Esta colaboración, demuestra que la rotura del suelo puede afectar de manera crítica a la estabilidad ya que en zonas muy porosas hay mayor capacidad de infiltración de agua. Para ello, se hicieron experimentos determinando la resistencia tensional del terreno.

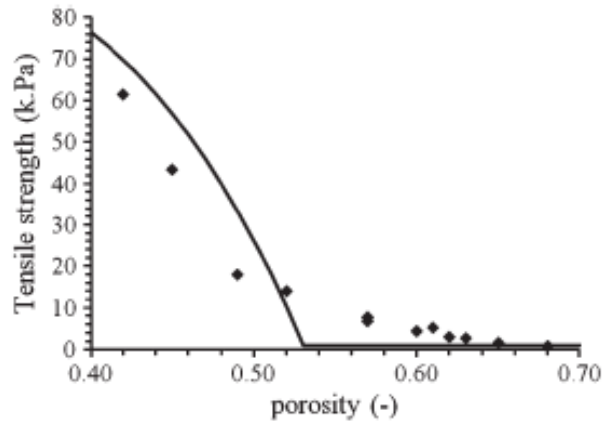


Ilustración 2.2.1 Evolución de la resistencia según la porosidad. Fuente: *Crack patterns in clayey soils: Experiments and modelling (Trabelsi et al. 2011)*

La rotura en arcillas depende en gran medida de las propiedades físicas como puede ser la plasticidad, la densidad seca o el contenido inicial de agua. Aunque dicho ensayo se haya hecho sobre un suelo arcilloso, la metodología conceptual ha servido de referencia a la hora de decidir el rango de valores de los parámetros modificados.

Mediante muestras del suelo, se analizaron las características de las arcillas a ensayar (consideradas como un sólido plástico) bajo el criterio de Mohr-Coulomb. A partir de este punto, se fue modificando, para varias muestras con densidades secas distintas, el valor de la porosidad (sabiendo que la succión no afecta demasiado a las otras propiedades de resistencia). El uso de la porosidad no contempla parámetros tales como la permeabilidad, la conductividad térmica o la difusión del vapor de agua en la zona de rotura. Es por ello, que en ciertos casos la porosidad se eleva, para simular los efectos que estos parámetros provocarían, se estipula la siguiente relación.

$$f(\phi) = 1 - \left(\frac{\phi}{\phi_o}\right)^n; \quad c_\phi(\phi) = \frac{[|f(\phi)| + f(\phi)]}{2}$$

Donde:

- ϕ es la porosidad del material
- ϕ_o es la porosidad inicial
- n es una potencia que asocia la forma de la variación de la cohesión con la porosidad

Consiste en reducir la cohesión devolviendo adherencia y fuerza después de alcanzar un cierto valor de porosidad en el material (ϕ_{ref} , ilustración 2.2.2).

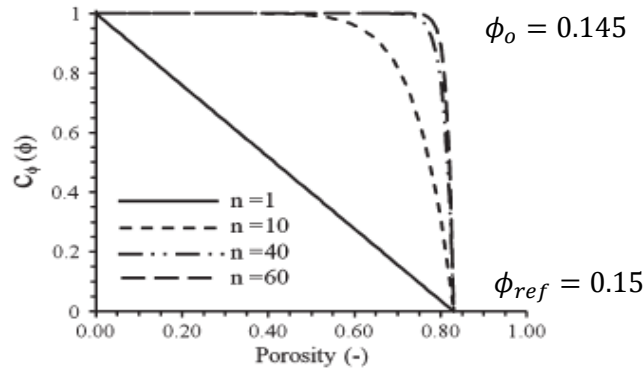


Ilustración 2.2.2 Variación de la cohesión en función de la porosidad.
Fuente: Crack patterns in clayey soils: Experiments and modelling (Trabelsi et al. 2011)

La porosidad inicial se ha supuesto del 14.5 % (esto es, $\phi_o = 0.145$), obtenida de las densidades de tanto del hormigón y de las partículas sólidas, según la ecuación siguiente:

$$\gamma_c = \gamma_s - \phi_o \gamma_s \rightarrow \phi_o = 1 - \frac{\gamma_c}{\gamma_s} = 0.145$$

Donde:

- γ_s es el valor del peso específico de las partículas sólidas, 27.5 kN/m³
- γ_c es el valor del peso específico del hormigón, considerado igual a 23.5 kN/m³

Cuanto más fisurado esté el suelo (más porosidad) la permeabilidad aumenta y la acumulación de agua es cada vez más elevada por lo que empiezan a incrementar las presiones hidrostáticas (antes casi imperceptibles) que crean la inestabilidad del suelo. El estudio que se ha comentado anteriormente, demuestra que la tensión del suelo disminuye en gran medida cuando la porosidad alcanza valores de 0.40 a 0.52.

Por lo general, los valores de los parámetros del modelo de Mohr-Coulomb (cohesión, ángulo de fricción, ángulo de dilatación, módulo de Young y la relación de Poisson) se estipulan mediante ensayos o mediante referentes de otras personas que han experimentado previamente. Esto se demuestra en el estudio de la “Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos”. Consideraron que, dado que la dilatación es un fenómeno particular de suelos granulares con comportamiento consolidado, el valor de este parámetro debería tener un valor de 0°.

En nuestro caso, en los siguientes apartados, se muestra la aplicación del ensayo UNE EN 14651:2005 donde estos parámetros (excepto la relación de Poisson) varían para ver la afectación en una viga de hormigón reforzada con polímeros.

2.3 Método de elementos finitos

Se trata de un método de resolución aproximada de ecuaciones diferenciales coincidiendo con la solución exacta únicamente en un número finito de puntos (nodos). Este método, transforma dichas ecuaciones en un problema matricial donde el conjunto de nodos crea una red (malla). (Zienkiewicz & Taylor, 1994). El proceso que debe seguirse en cuanto a programación es el siguiente.

- Preproceso donde se define la geometría, se genera la malla, se estipulan las condiciones de contorno y se asignan propiedades a los materiales.
- Cálculo en un problema no dependiente del tiempo puede ser resuelto con cualquier algoritmo para ecuaciones lineales. En un problema dependiente del tiempo (no lineal) el cálculo se complica al ser una sucesión infinita de sistemas de ecuaciones.
- Postproceso. En este paso, tras el cálculo en los nodos, se define la discretización y se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos con posibilidad de suavizar, interpolar o determinar errores de aproximación.

2.4 Geometría y condiciones de contorno

En primer lugar, se procede a crear un modelo base en el que se irán modificando las distintas características del hormigón descritas en los siguientes apartados de este trabajo.

Como se ha comentado en el apartado de Antecedentes, la geometría se basará en la norma UNE EN 14651:2005.

Este ensayo consiste en determinar las dimensiones de una viga de hormigón reforzado con fibras, crearle una brecha en la parte inferior justo en el medio de su geometría rectangular y, estipulando unos intervalos de tiempo, ver cómo la resistencia va disminuyendo en este punto de rotura. A continuación, se explican las distintas condiciones de contorno y de tiempo del modelo numérico base.

2.5 Condiciones iniciales y definición de intervalos de tiempo

En este caso, se ha impedido el movimiento horizontal y vertical de los puntos que se muestran en la ilustración 2.5 para que no se produzcan desplazamientos de la viga de hormigón reforzado y, de esta manera, simular las condiciones de contorno del ensayo real.

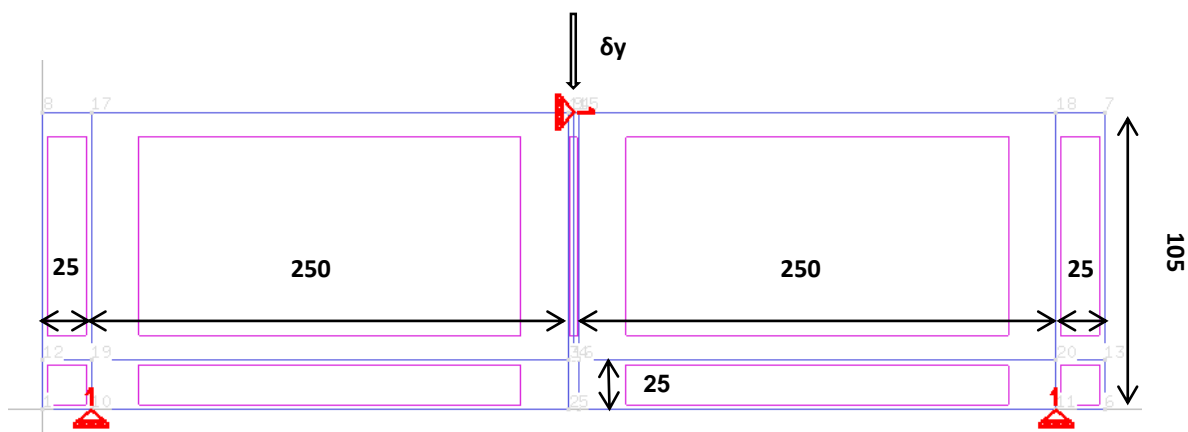


Ilustración 2.5 Condiciones iniciales y de contorno. Abertura de la brecha inicial de 5mm. Unidades [mm]

Por otro lado, para crear una progresión en el tiempo de las repercusiones que tiene la brecha en el hormigón, se han establecido dos etapas de tiempo expresados en minutos como muestra la tabla 2.5. El tiempo máximo de estos intervalos es de 50 minutos. Se ha considerado que este tiempo es suficiente para ver la evolución de la rotura de la viga y estudiar su comportamiento.

Tabla 2.5. Intervalos de tiempo

| | Etapa de equilibrio (min) | Etapa de carga (min) |
|------------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Tiempo inicial (Periodo de inicio) | 0.0 | 1 |
| Tiempo final (periodo final) | 1 | 50 |

2.6 Propiedades material del caso base

En el modelo base que vamos a generar, solo se modificaran las propiedades del hormigón ya que las características del tipo de polímero que se usa ya están estipuladas previamente.

A continuación, la tabla 2.6 muestra el resumen de los distintos parámetros que más adelante se explicaran y se modificaran para ver como varían los resultados para obtener el modelo óptimo.

Tabla 2.6 Parámetros GID del modelo base

| Elasticidad lineal | | | | | | | |
|---|-----------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Hormigón | | | | | | | |
| ITYCL | Módulo de Young (MPa) | Número de Poisson | Porosidad de referencia | | | | |
| 1 | 30000 | 0.15 | 0.145 | | | | |
| Viscoplasticidad de los materiales granulares | | | | | | | |
| ITYCL | Tensión | Viscosidad (1/s) | Cohesión (MPa) | Función de la porosidad | Factor reductor de dilatación | Porosidad de referencia | Resistencia friccional |
| 4 | 3 | 0.001 | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.20 |

2.7 Generación de la malla del modelo base: sensibilidad preliminar

Para crear la malla definitiva para los modelos (la misma para todos sensibilizada en aquellas zonas de interés de tensiones), se han calculado cuatro tipos de malla.

En cada una de las mallas estudiadas, se mostraran dos figuras; la primera, referente a como aumenta el tamaño de la brecha a causa de someterse a una carga puntual vertical, la segunda, referente a la distribución de las tensiones que sufre la viga de hormigón causadas por dicha carga.

- Malla gruesa: donde los elementos que forman la malla son tales como los que muestra la ilustración 2.7.1 formada por cuadriláteros uniformes en las zonas externas a la horizontal de la brecha.

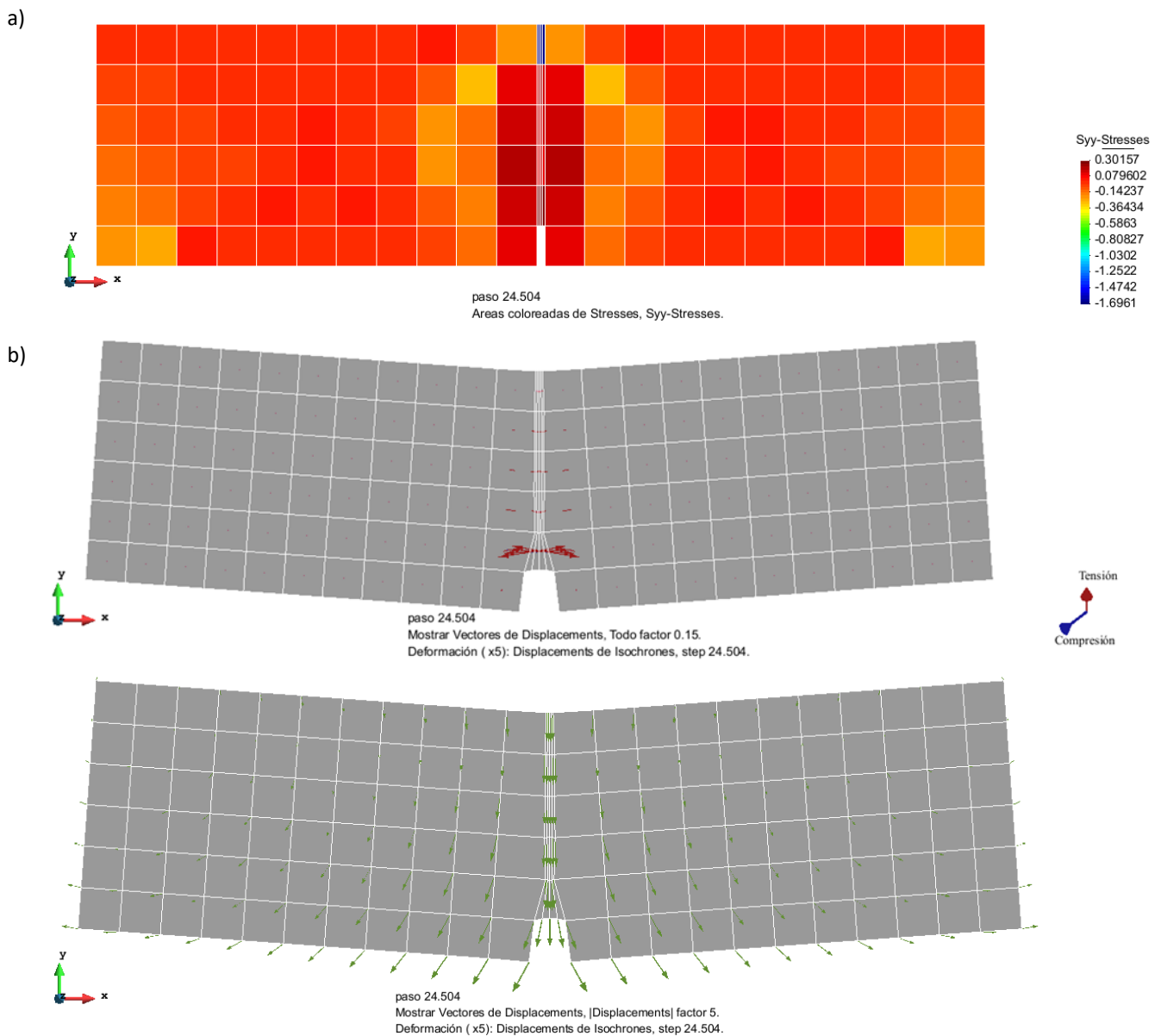


Ilustración 2.7.1 Tensiones (a) y deformaciones principales (b) resultantes para un CMOD de 4.0 mm

- Malla media: Creada a partir de cuadriláteros de tamaño medio uniformes alrededor de la vertical de la brecha. La ilustración 2.7.2, muestra las tensiones y deformaciones principales de la malla en cuestión.

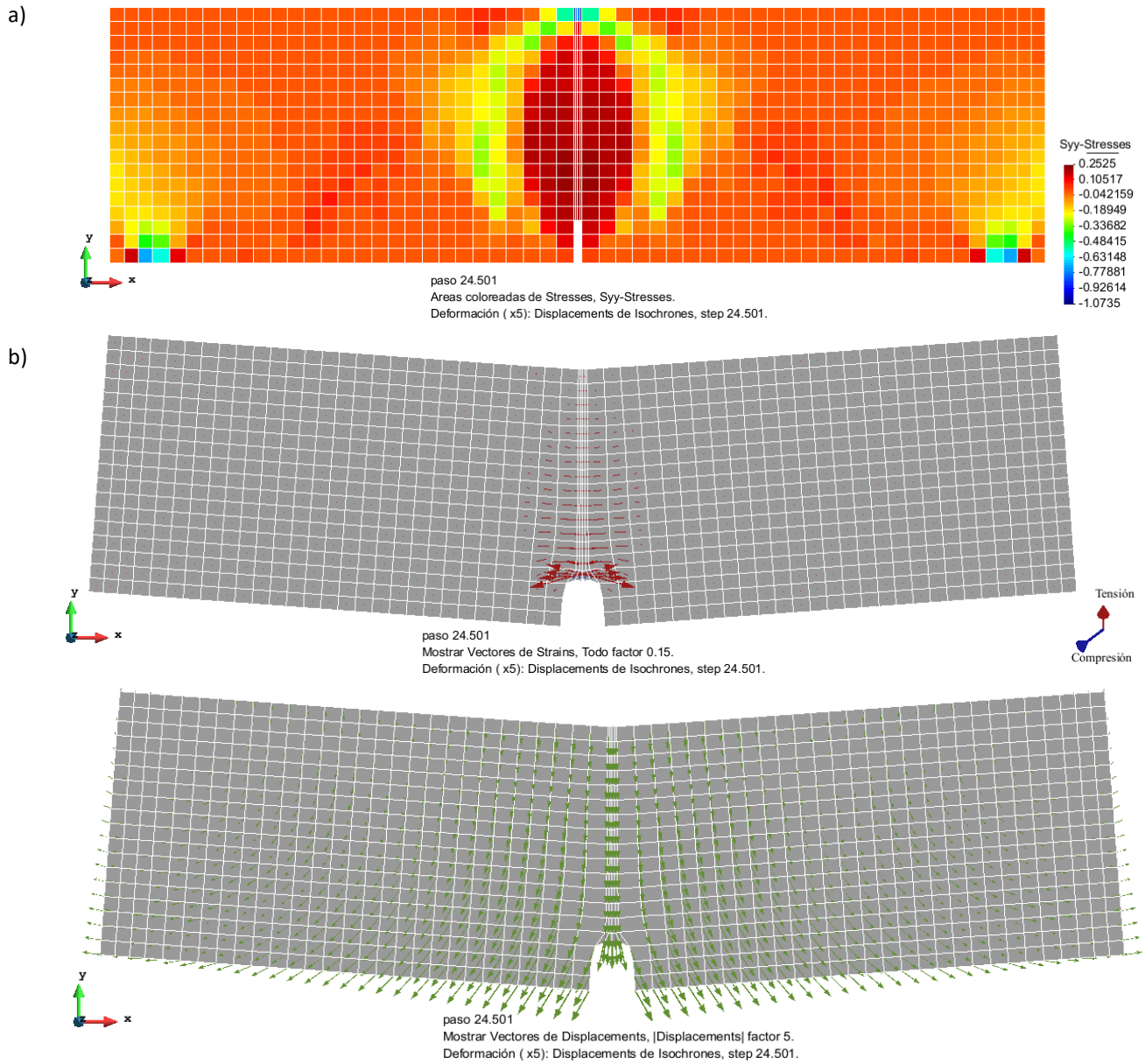


Ilustración 2.7.2 Tensiones (a) y deformaciones principales (b) resultantes para un CMOD de 4.0 mm

- Malla fina: la ilustración 2.7.3 muestra un tamaño inferior de cuadriláteros en comparación a las dos mallas anteriores.

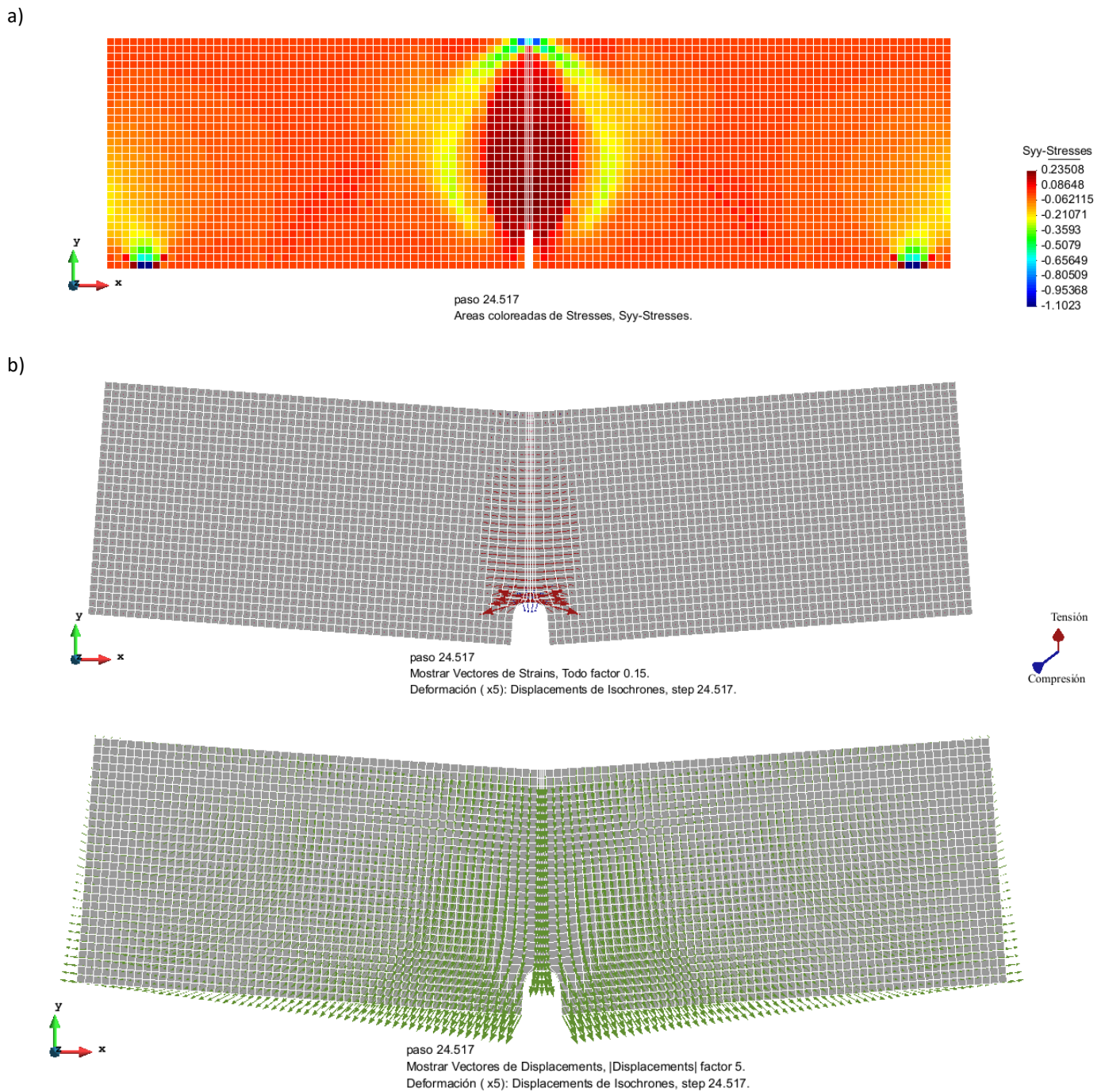


Ilustración 2.7.3 Tensiones (a) y deformaciones principales (b) resultantes para un CMOD de 4.0 mm.

Hay otras maneras de diseño de la geometría de las mallas como la triangular o la circular; no obstante, los resultados muestran menos fiabilidad dada su poca capacidad de detalle.

La ilustración 2.7.4, muestra una malla, con uso de cuadriláteros, optimizada y sensibilizada en aquellas zonas de especial sensibilidad como son la zona de la brecha y su vertical hasta llegar a la zona de carga en la parte superior de la misma.

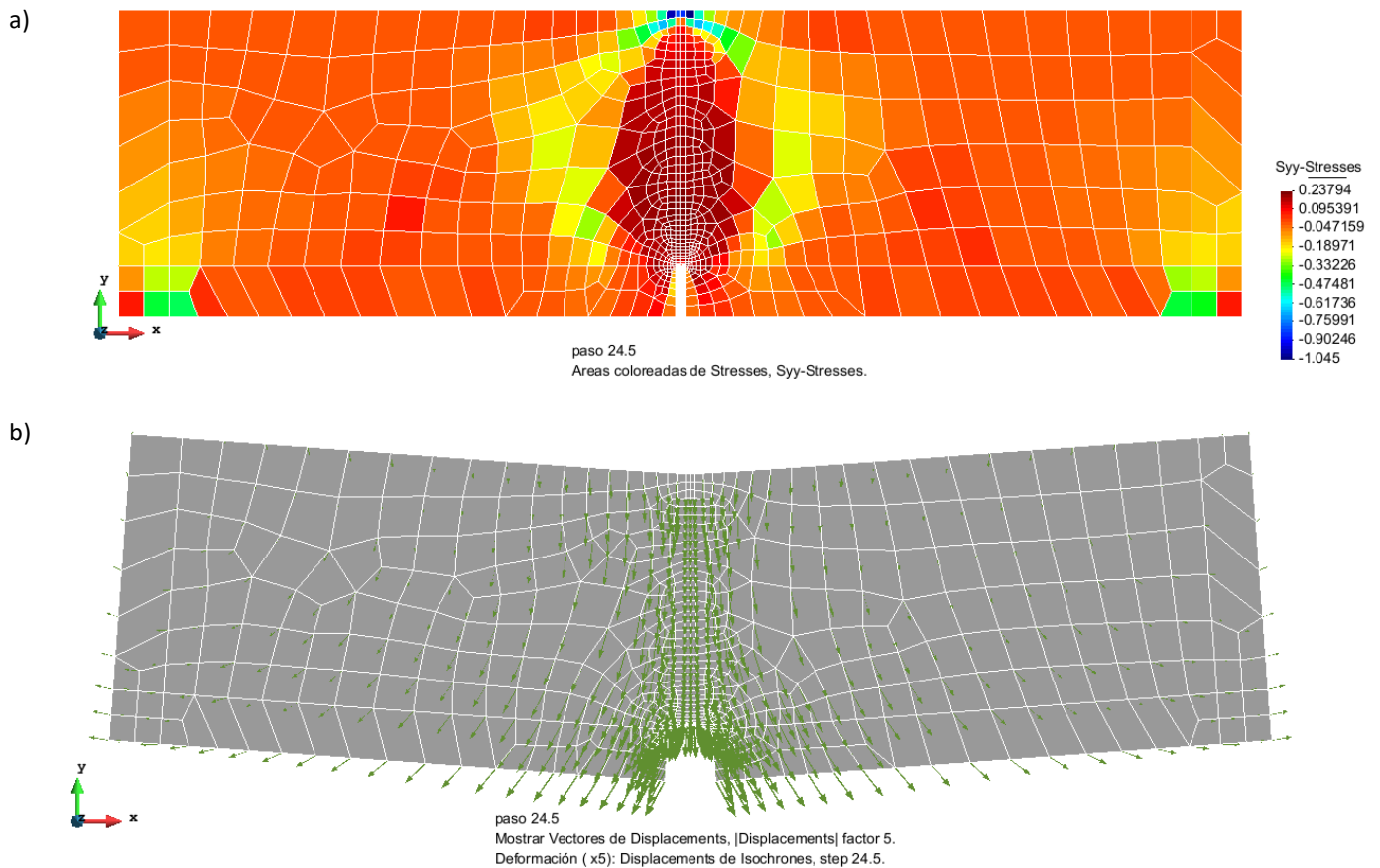


Ilustración 2.7.4 Tensiones (a) y deformaciones principales (b) resultantes para un CMOD de 4.0 mm.

A continuación, el gráfico 2.7.1 (con más detalle en el gráfico 2.7.2) recoge los resultados obtenidos de las tensiones verticales y la apertura que sufre el modelo con cada una de las mallas explicadas con anterioridad. Puede verse como el pico resistente de la curva aumenta proporcionalmente al detalle de las mallas; además, se observa que la resistencia remanente va uniformizándose en todos los modelos.

Destacar que, el hecho de aumentar el número de nodos (proporcional a aumentar el número de elementos de la malla) hace que el tiempo de cálculo aumente considerablemente en cada modelo llegando al orden de semanas. Por este motivo, no se ha hecho uso de un ordenador personal sino una máquina de cálculo intensivo disponible (Servidor Titani <https://caminstech.upc.edu/es/calculintensiu>) reduciendo de esta manera el tiempo de espera a días.

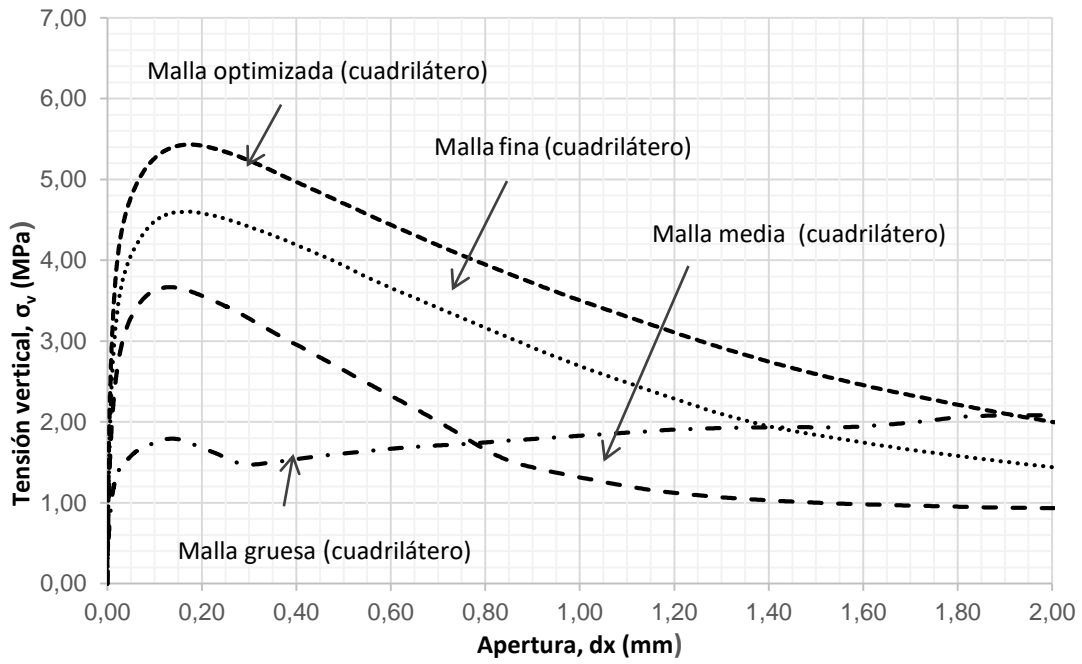


Gráfico 2.7.1 Variación del tipo de malla de elementos finitos: tamaño y distribución de los elementos.

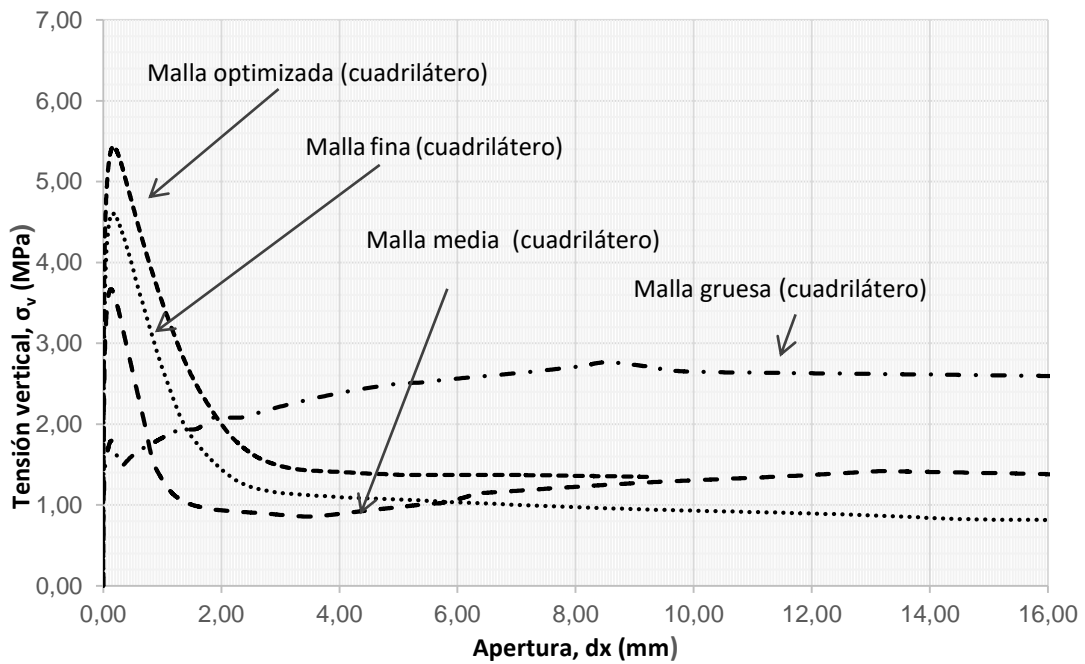


Gráfico 2.7.2 Variación del tipo de malla de elementos finitos: tamaño y distribución de los elementos.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados cuantitativos: Sensibilidad y verificación del modelo

En el anterior apartado se determinó la malla de referencia de los modelos con los que se harán las comparativas de la afectación de la modificación de las características del hormigón.

Para conocer cuáles son los parámetros determinantes en el comportamiento de una viga de hormigón reforzada con polímeros, se han establecido una serie de modelos experimentales para poder hacer una primera estimación de cómo afecta cada parámetro al comportamiento de rotura del modelo.

Todas las características referentes a los modelos que se explican en este apartado, se pueden consultar en el documento ANEJO II.

A continuación, se presentan dichas variables en dos grandes grupos:

- Variación del módulo elástico
- Variación de los parámetros plásticos o de resistencia

3.1.1 Variación del módulo elástico

El primer parámetro tratado ha sido la componente elástica directa del modelo inicia, el Módulo de Young, para ver su afectación en el modelo y poder decidir que variable se trata como la principal. De esta manera, el modelo a calibrar se creará basándonos en una de las variables y las demás se irán modificando para llegar al "ideal" al que nos queremos acercar.

Los valores estipulados en los diferentes modelos han sido: 30 MPa, 20 MPa, 10 MPa (se pueden ver las características de cada uno en el documento ANEJO II). No existe una importante diferencia en el pico elástico/plástico (como muestra el gráfico 3.1.1), se observa que el desnivel que se crea en el ramal residual es paralelo en los tres modelos.

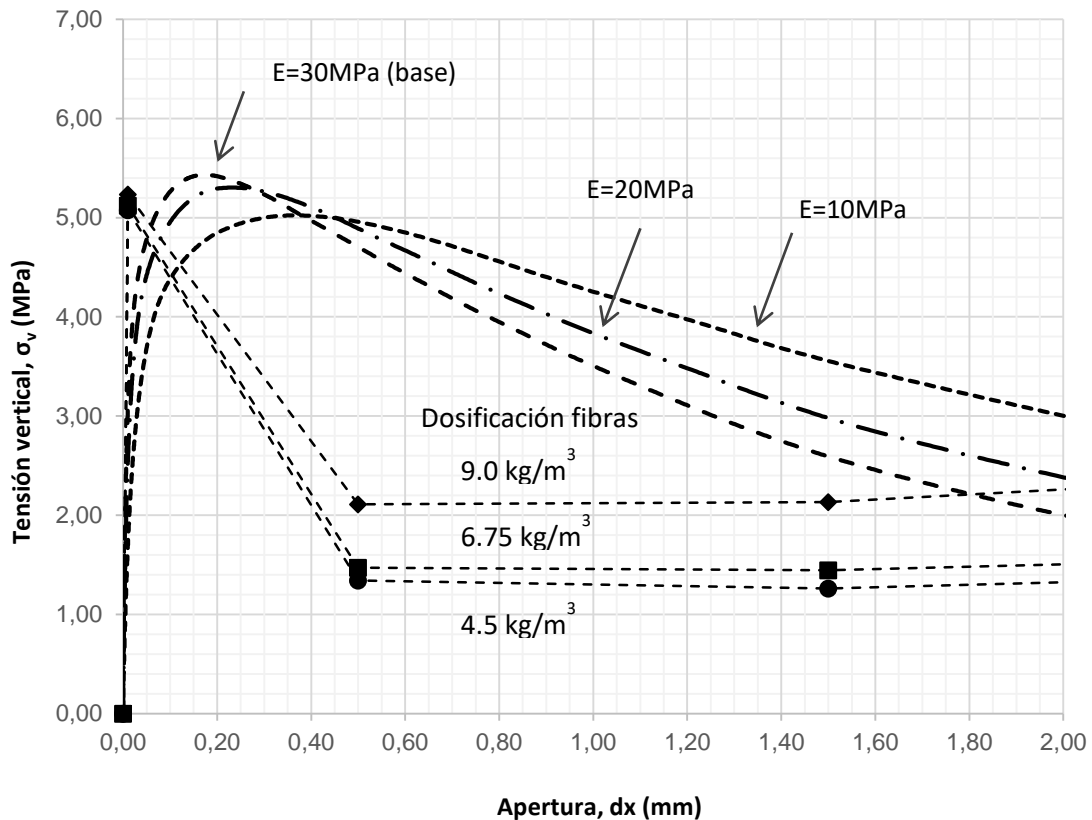


Gráfico3.1.1 Variación de los resultados según el valor de E (MPa). Modelo base de 30MPa.

3.1.2 Variación de parámetros plásticos o de resistencia

- **Resistencia friccional**

Se trata de modificar la resistencia friccional del material. El primer modelo que se presenta es el caso base des del que se ha partido cada una de las variantes, que se presentan en el ANEJO II, con un ángulo de rozamiento interno de 30°. La solución gráfica de la mayoría de los modelos calculados no llega al último intervalo de tiempo (50 min) ya que, en esta primera estimación, se pretende ver la tendencia de las curvas variando ciertas características, del material en cuestión, sin llegar necesariamente al tiempo total.

Por un lado, cuando se habla de resistencia es inevitable, en el campo de la mecánica de suelos, recurrir al criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Dicho criterio, predice la rotura de una masa de terreno si la tensión de corte alcanza un valor crítico sobre cualquier plano.

Por otro lado, David M. Wood, sugirió en 1994 que el terreno rompe de forma puramente friccional al alcanzar el estado crítico (cuando $c'=0$ (cohesión)). Por lo que, relacionando las tensiones efectivas principales del criterio de rotura de Mohr-Coulomb en función de las variables del plano de Cambridge (p' , q) se obtiene la siguiente igualación. La tabla 3.1.2.1 recoge los resultados de dicha ecuación junto a su representación en cada modelo en el gráfico 3.1.2.1.

$$M = \frac{6\text{sen}\phi'}{3 - \text{sen}\phi'}$$

M Pendiente de la recta que representa la unión de todos los estados críticos del terreno.

Tabla 3.1.2.1 Variación del pendiente de la recta de los estados críticos según el ángulo de rozamiento interno.

| Ángulo de rozamiento interno ϕ | | 30° | 35° | 45° | 40° |
|-------------------------------------|--------------------------------------|------|------|------|------|
| ϕ (rad) | | 0.52 | 0.61 | 0.79 | 0.70 |
| M _ Compresión | $6\text{sen}\phi'/3-\text{sen}\phi'$ | 1.2 | 1.42 | 1.85 | 1.64 |

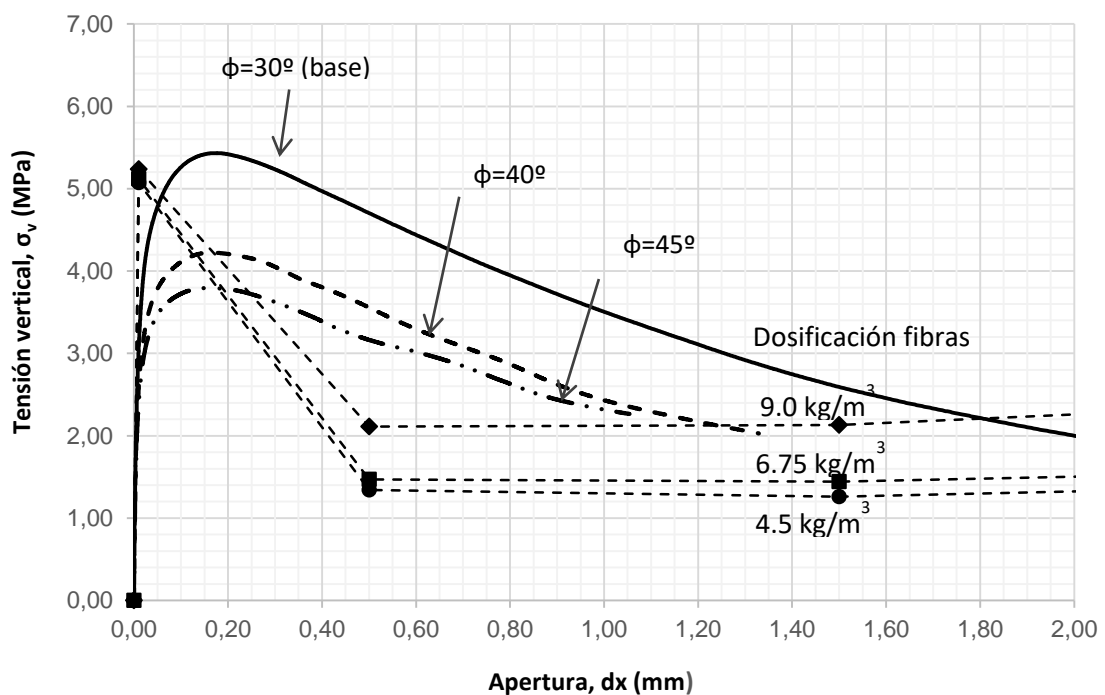


Gráfico 3.1.2.1 Variación del pendiente de la recta de los estados críticos según el ángulo de rozamiento interno. Modelo base $M=1.20$

La reducción de la resistencia al aumentar el ángulo de rozamiento interno, es con motivo de que los materiales tipo suelo no acostumbran a trabajar con tracciones y en el tipo de ensayo que se ha modelado en este trabajo, tiene precisamente esta característica.

- **Cohesión**

Otro valor modificado ha sido la cohesión del material para ver como varía la resistencia a rotura aumentando o disminuyendo esta propiedad.

A continuación, el gráfico 3.1.2.2, muestra el aumento de la subida del pico de rotura a medida que aumenta el valor de la cohesión, linealmente. No obstante, por otro lado, se puede ver como la trama residual se va igualando entre cada uno de los modelos.

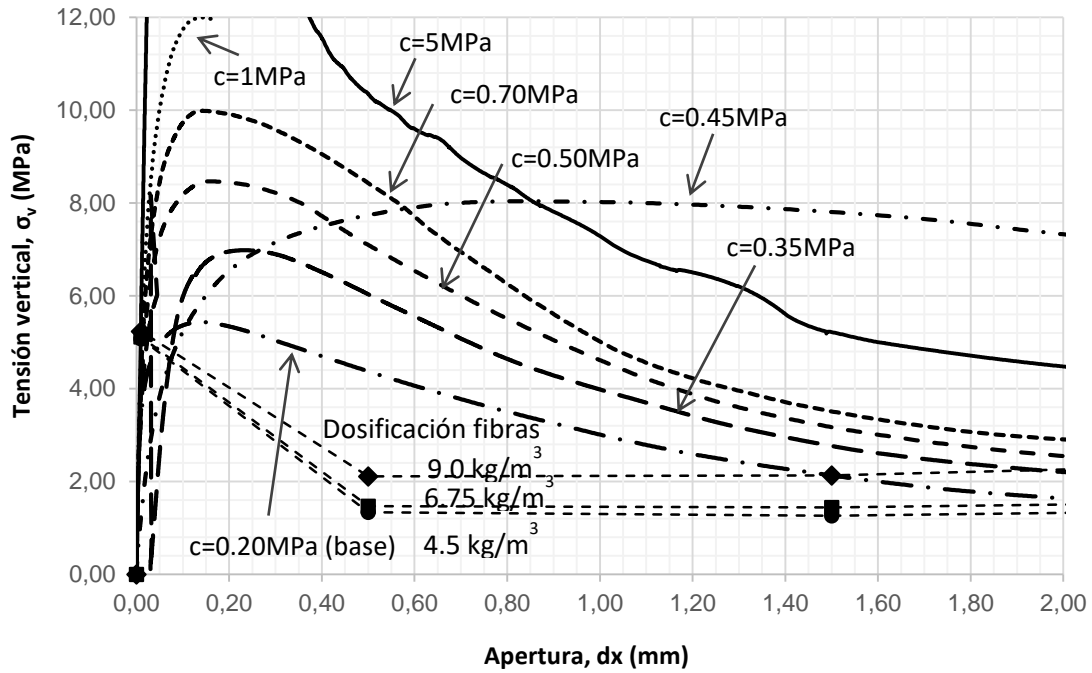


Gráfico 3.1.2.2 Variación de la resistencia según el parámetro de cohesión. Caso base de valor 0.20MPa.

- **Ángulo de dilatación**

El cuarto componente variado ha sido la dilatación del material. Esta variable se ha calculado de dos maneras diferentes que se muestra a continuación.

En el caso del modelo base, indica que el valor relativo al factor de dilatación corresponde a 0.5. Esto quiere decir que, teniendo en cuenta la relación existente entre Ψ (psi) y ϕ (phi), el valor de Ψ es igual a 15°.

A partir de este dato, se inicia un cálculo fijando este valor y extrayendo los valores de la relación según los ángulos de rozamiento interno escogidos. Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 3.1.2.2 y gráfico 3.1.2.3.

Tabla 3.1.2.2 Variación del factor de dilatación prefijando el valor de Ψ . Caso base $\Psi=15^\circ$.

| Ángulo de rozamiento interno ϕ | 30° | 35° | 40° | 45° |
|-------------------------------------|------|------|------|------|
| Ψ | 15° | | | |
| Factor de dilatación Ψ/ϕ | 0.50 | 0.43 | 0.38 | 0.33 |

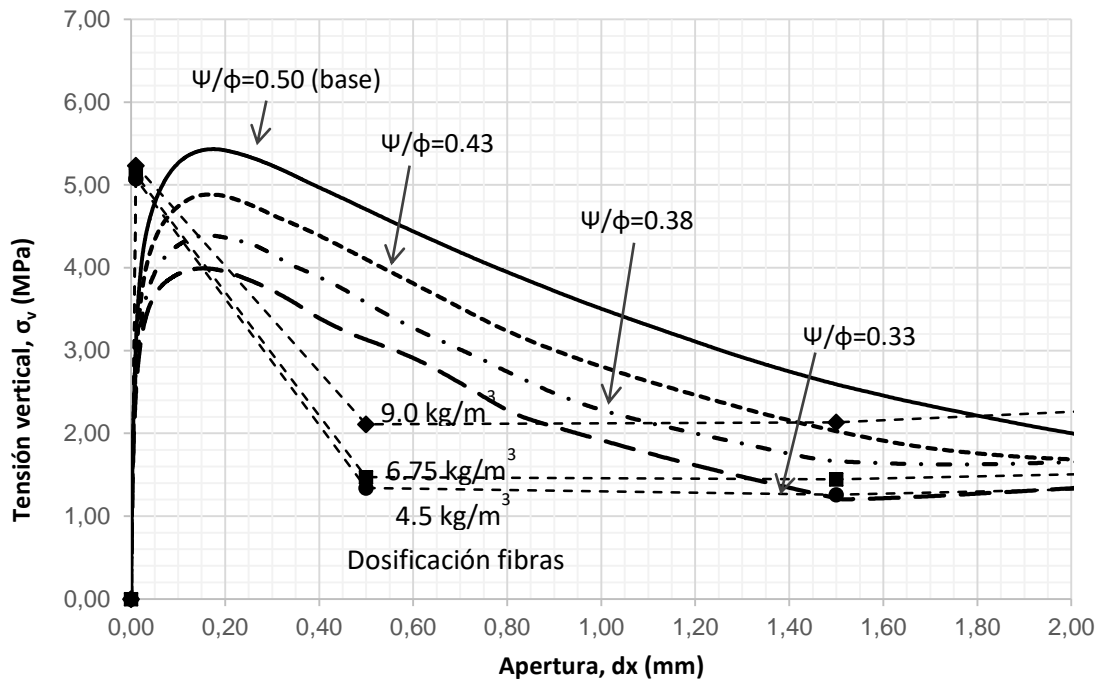


Gráfico 3.1.2.3 Variación del factor de dilatación prefijando el valor de Ψ . Caso base $\Psi=15^\circ$

Otra manera ha sido dejar el valor del modelo base del factor (0.50) e ir modificando, en este caso, el valor de Ψ (psi). El gráfico de estos valores coincide con el del ángulo de rozamiento interno- resistencia friccional. Los resultados obtenidos se pueden ver en la tabla 3.1.2.3 y en el gráfico 3.1.2.4.

Tabla 3.1.2.3 Variación de Ψ prefijando el valor de la relación de ángulos Ψ/ϕ . Caso base $\Psi=15^\circ$

| Ángulo de rozamiento interno ϕ | 30° | 35° | 40° | 45° |
|-------------------------------------|------|--------|-----|--------|
| Factor de dilatación Ψ/ϕ | 0.50 | | | |
| Ψ | 15° | 17.50° | 20° | 22.50° |

Como se muestra en el gráfico 3.1.2d, no existe apenas variedad entre los valores obtenidos en ambos casos. De todos modos, al desconocer el comportamiento real de dicho componente, se evalúan aplicándolos al modelo.

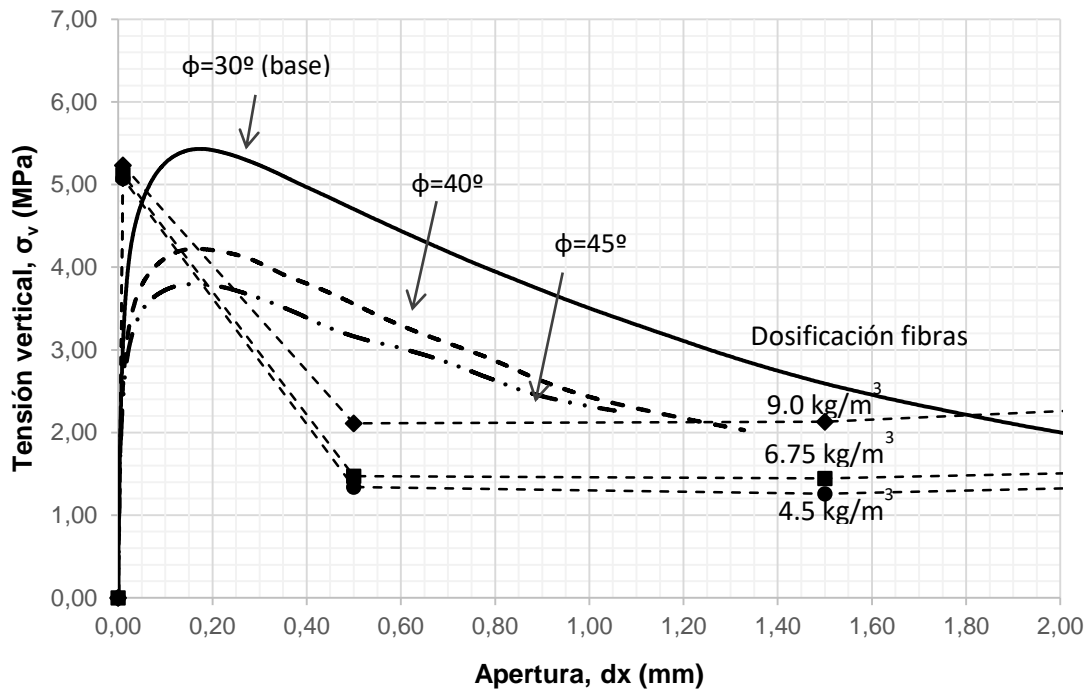


Gráfico 3.1.2.4 Variación de Ψ prefijando el valor de la relación de ángulos Ψ/ϕ . Caso base $\Psi=15^\circ$

Destacar que la reducción de la resistencia al aumentar el ángulo de rozamiento interno, es con motivo de que los materiales tipo suelo no acostumbran a trabajar con tracciones o al menos no son tan fundamentales como las compresiones y en el tipo de ensayo que se ha modelado en este trabajo, tiene precisamente esta característica: comportamiento de tracción (ilustración 3.1.2).

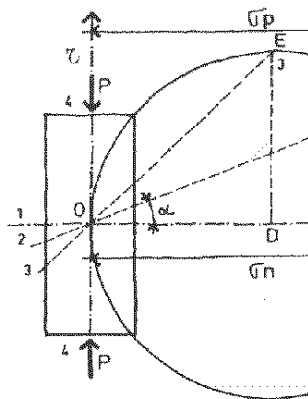


Ilustración 3.1.2 Comportamiento a tracción con $c=0\text{MPa}$. Fuente: <https://catedra.ing.unlp.edu.ar>

3.2 Resultados cualitativos

En el siguiente apartado se muestran los resultados cualitativos del modelo con la malla optimizada con el caso base. Se destacan cinco aspectos relevantes en el comportamiento del hormigón reforzado con fibras.

- **EDP (Evolución de las Deformaciones Plásticas)**

La ilustración 3.2.1, proporciona información sobre como aumentan las deformaciones plásticas totales que sufre el hormigón en cuatro etapas distintas. En la primera etapa y segunda etapa (a y b) se puede ver cómo, inicialmente, al situar la carga sobre la viga no se crean deformaciones importantes; sin embargo, a medida que avanza el tiempo del modelo, la abertura va indicando deformaciones cada vez más vitales para la resistencia/durabilidad del hormigón aunque sin llegar al estado crítico (gama de colores rojiza).

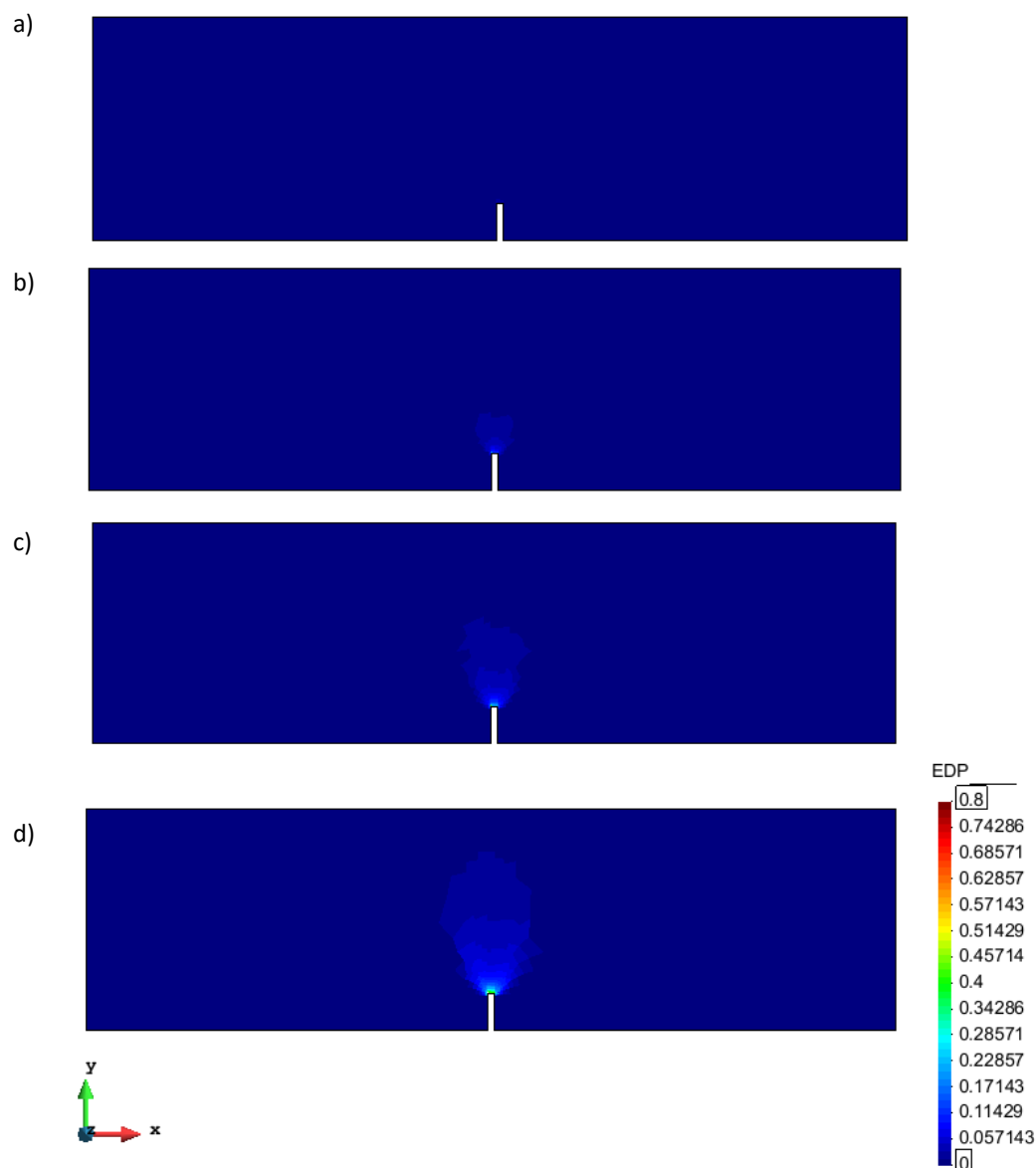


Ilustración 3.2.1 Evolución de las deformaciones de corte plásticas (EDP) según valores del CMOD de 0.2 (a), 1.0 (b), 2.0 (c) y 4.0 mm (d).

- **EVP (Evolución de las deformaciones Volumétricas Plásticas)**

En la ilustración 3.2.2, tal y como pasa con las deformaciones plásticas totales, la evolución del aumento de volumen en la zona de la brecha va siendo cada vez más importante. Llegada a la cuarta etapa (d), se empieza a vislumbrar una gama de colores rojizo indicando un estado de compresión superior.

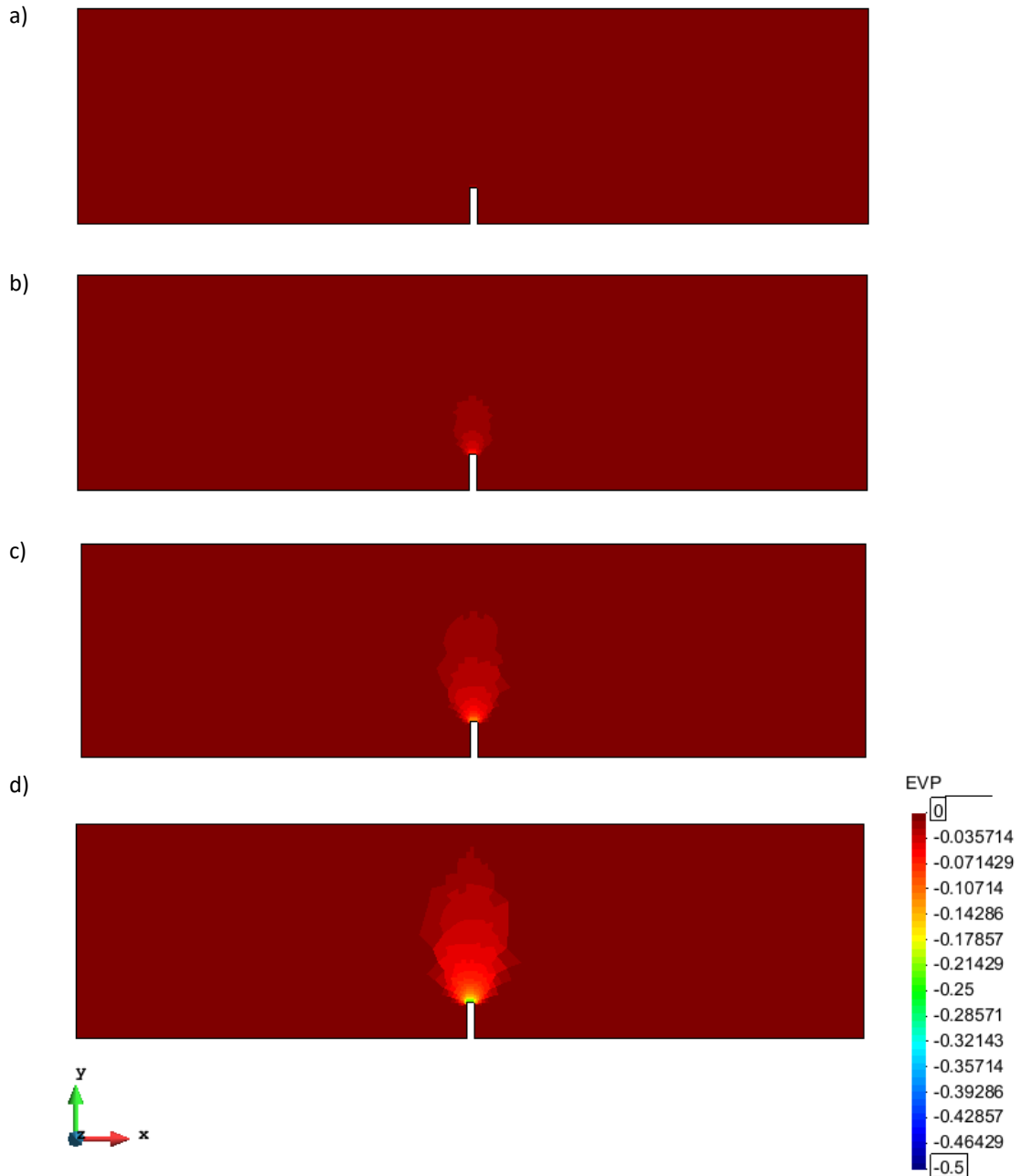


Ilustración 3.2.2 Evolución de las deformaciones volumétricas plásticas (EVP) según valores del CMOD de 0.2 (a), 1.0 (b), 2.0 (c) y 4.0 mm (d)

- **Evolución de la porosidad**

En la ilustración 3.2.3, se muestra la evolución de la porosidad. En las dos primeras etapas (a y b) aparece en la zona de carga una nube de puntos blanca, esto sucede dado a que estas etapas se sitúan en el inicio de la puesta de la carga por lo que representa la concentración de esta en este punto.

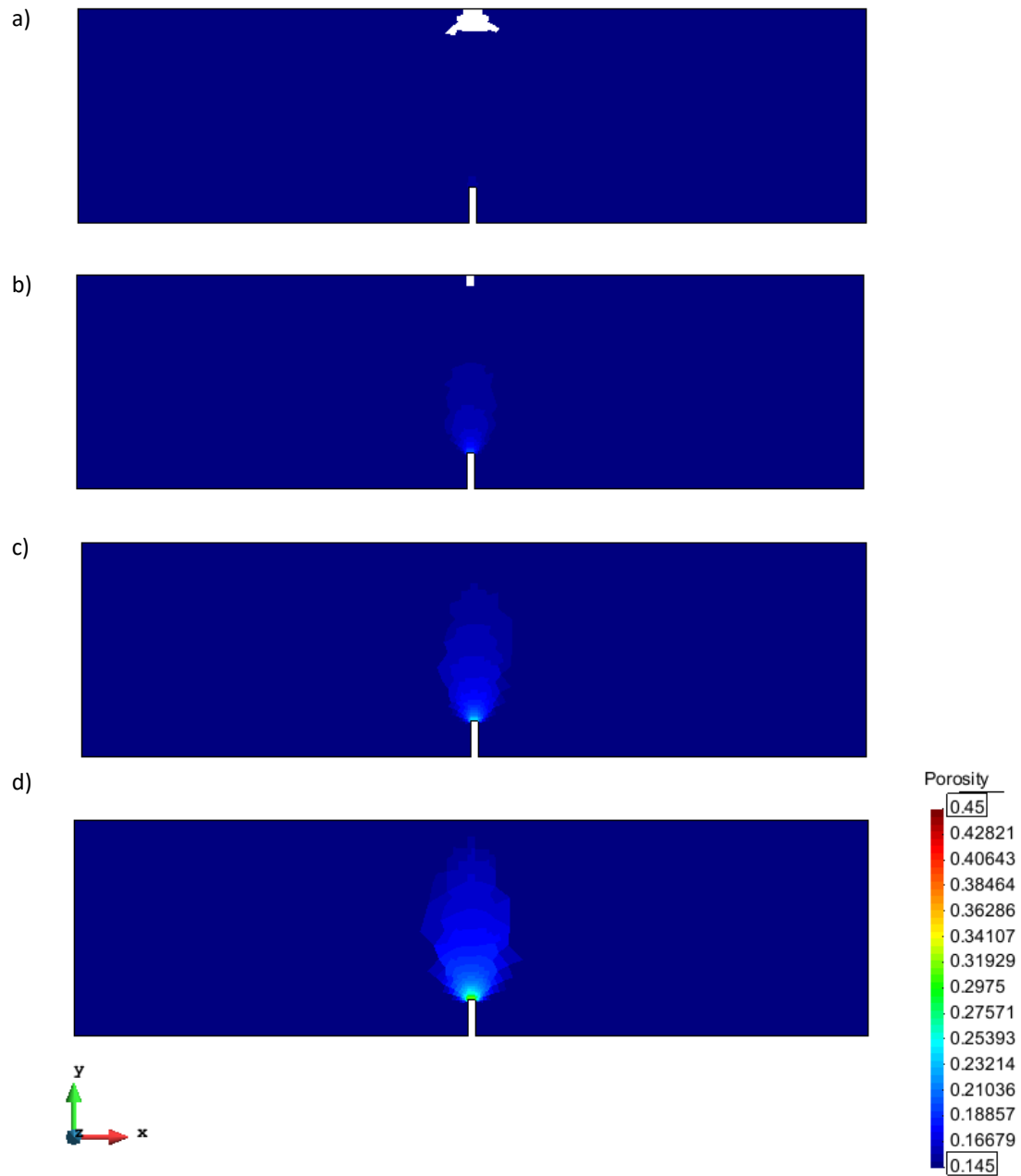


Ilustración 3.2.3 Evolución de la porosidad según valores del CMOD de 0.2 (a), 1.0 (b), 2.0 (c) y 4.0 mm (d)

- **Evolución de la rotura por pérdida de cohesión**

En la ilustración 3.2.4, destaca la rapidez de la evolución de la pérdida de resistencia al corte (en comparación con los dos casos anteriores de deformaciones plásticas). Tal y como se observa, desde la primera etapa de carga el proceso ya denota una cierta importancia en esta propiedad (la pérdida de cohesión en la zona de la brecha, la más sensible), hasta llegar al punto superior donde se sitúa la carga actuante que provoca los distintos comportamientos.

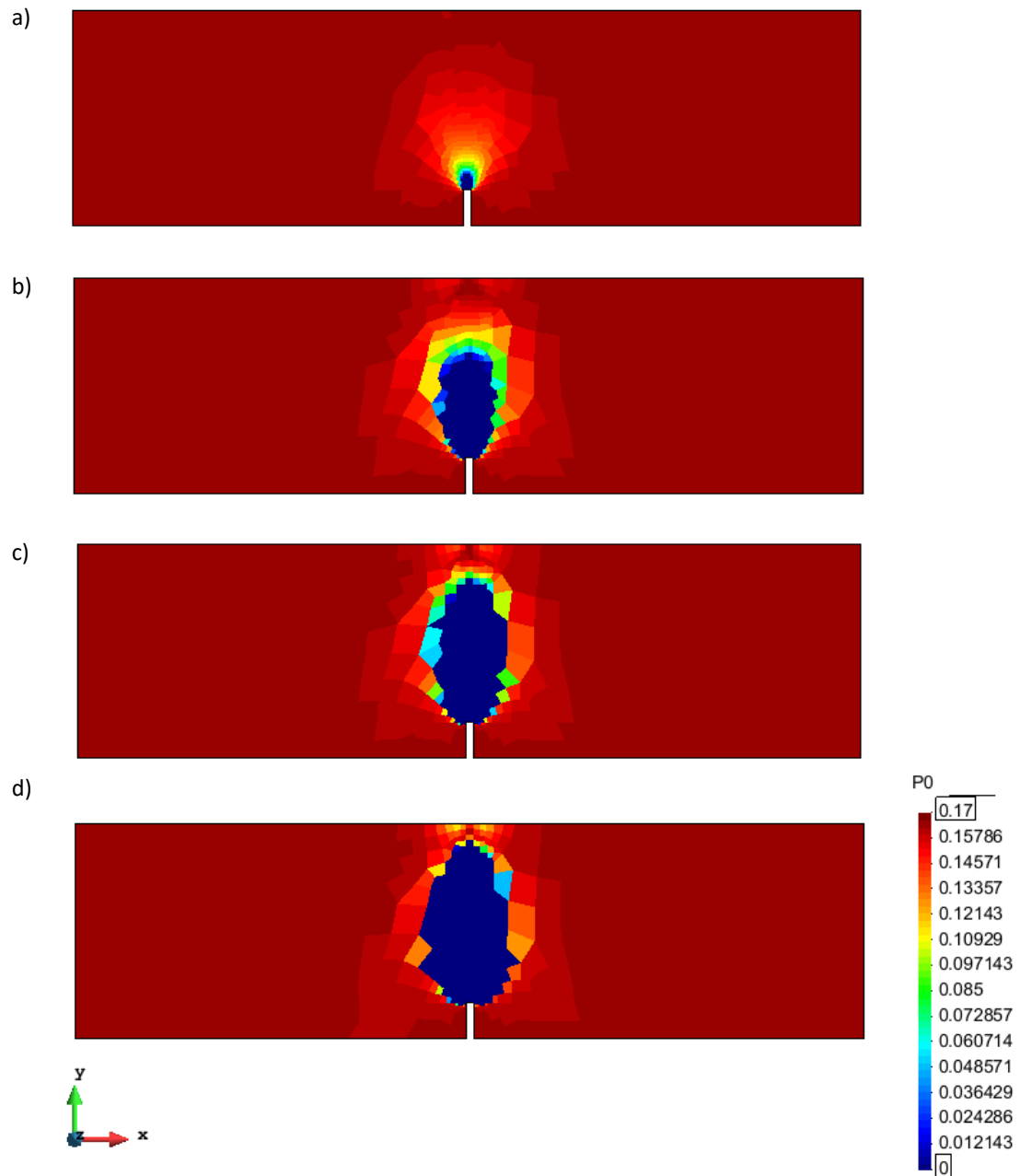
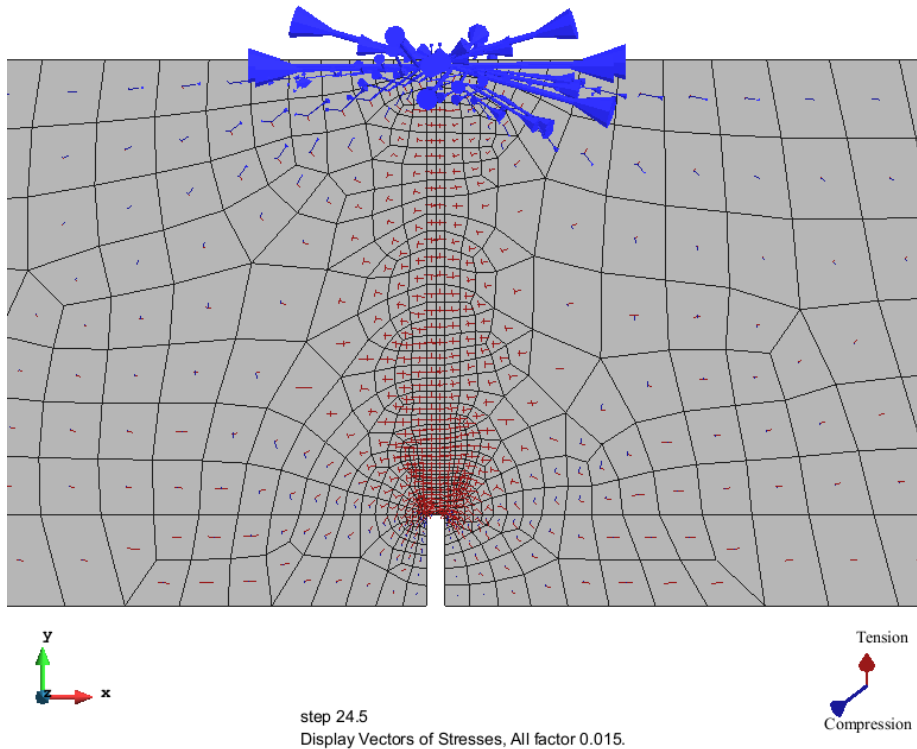


Ilustración 3.2.4 Evolución de las pérdida de resistencia al corte (cohesión) o rotura según valores del CMOD de 0.2 (a), 1.0 (b), 2.0 (c) y 4.0 mm (d)

- **Tensiones y deformaciones principales**

La ilustración 3.2.5 muestra las tensiones y deformaciones principales producidas en el hormigón reforzado por fibras. Por un lado, en cuanto a las tensiones, muestran un aumento de compresión en la zona de la carga mientras las tracciones evolucionan a lo largo de su vertical llegando a aumentar en la abertura. Por otro lado, las deformaciones muestran como la brecha va abriéndose creando compresiones en los dos lados de esta y un estado de tracción en la parte superior de la misma.

a)



b)

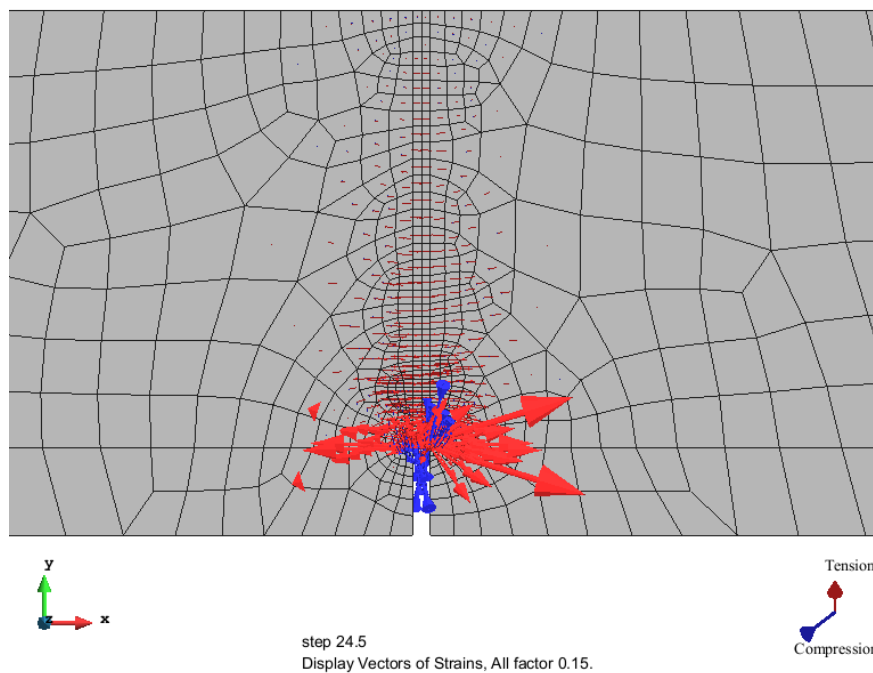


Ilustración 3.2.5 Tensiones (a) y deformaciones principales (b) resultantes para un CMOD de 4.0 mm

4. CONCLUSIONES

Después de haber realizado un estudio sobre la afectación de los distintos parámetros que caracterizan el criterio de rotura de Mohr-Coulomb para una viga de hormigón reforzado con fibras (Módulo de Young, ángulo de rozamiento interno, cohesión y dilatación), en base a los resultados se puede determinar que:

- En referencia al parámetro del Módulo de Young (E), se ha observado una resistencia remanente con inicio justo donde lo hacen cada una de las tres muestras con distinta dosificación de fibra: coordenadas (0.50 mm, 10 MPa).
Por otro lado, queda reflejado que la máxima resistencia se obtiene con un valor de E de 30 MPa.
- Con un ángulo de rozamiento interno (ϕ) inferior, la resistencia a tracción aumento. Esto no debería ser así, los valores deberían aumentar cuando aumenta el ángulo de rozamiento interno y; por lo tanto, el valor de la recta de estados críticos. Esto sucede ya que los resultados reflejan el estado de tracciones que sufre la viga reforzada con polímeros tal como sucede en el factor de dilatación.
- La cohesión es un parámetro importante ya que el proceso de rotura disminuye cuando más alto es este valor (no se destaca la resistencia remanente ya que en todos los modelos llega al mismo valor de tensión-deformación en un instante de tiempo similar). El valor de la cohesión se escoge dependiendo de la utilidad que vaya a tener el hormigón y, por lo tanto, la capacidad de resistencia necesaria.
- El parámetro de dilatación (ψ), se ha calculado teniendo en cuenta dos factores.
 - Prefijando el valor de ψ a 15°
 - Prefijando la relación de ángulos ψ/ϕ a 0.50

Con ambos se obtienen resultados similares con poca variación en cuanto decidir si se prefija un valor o la relación entre los ángulos de dilatación y rozamiento interno. El valor resistente disminuye cuando menores son los valores de las relaciones dado al importante comportamiento de tracción.

5. TRABAJOS FUTUROS

Una vez se han obtenido y analizado los resultados de los parámetros por separado, el siguiente paso sería crear un modelo de referencia usando aquellos valores (de cada uno de los parámetros estudiados) que más resistencia aporten al carácter tenso-deformacional del hormigón reforzado con fibras. Además de comprobar si la combinación de sus máximos da un resultado certero o si se debe modular una o varias variables para acercarse al comportamiento resistente óptimo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARKIPLUS. (2013, agosto). *Historia de la fibra de vidrio* | Arkiplus. Recuperado 12 junio, 2019, de <https://www.arkiplus.com/historia-de-la-fibra-de-vidrio/>
- European Standard Norme (EN 14651). (2005, abril). *Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*.
- Gacén Guillén, J. (1978). *Progreso y desarrollo de las fibras químicas*. Recuperado 12 junio, 2019, de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/5991/Article04.pdf>
- Kishor Banjara, N., Ramanjaneyulu, K. (2018). *Experimental Investigations and Numerical Simulations on the Flexural Fatigue Behaviour of Plain and Fiber-Reinforced Concrete*.
- L.Vandewalle [K.U.Leuven, Department of Civil Engineering, Leuven, Belgium] *Postcracking behaviour of hybrid Steel fiber reinforced concrete*.
- Leal Nieto, Andrés; Tatua Camacho, Javier Fernando; Blanco Ruiz, Edwin Fernando (2009, octubre). Determinación de parámetros para los modelos elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en suelos arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Majoral, R., Berge, B., & Ribeiro, P. (2011, octubre). *Fibras metálicas vs. fibras sintéticas en uso estructural: túneles, elementos prefabricados y pavimentos industriales: To be or not to be?*
- Muñoz Cebrián, F. (2011). *Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado*. Recuperado 11 junio, 2019, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13552/PFG%20completo.pdf?sequence=1>
- O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor (1994): *El Método de los Elementos Finitos*, volúmenes 1 y 2. CIMNE-Mc Graw Hill, 1994.
- Oller, S., Oliver, J., Lubliner, J., & Oñate, E. (1988). Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. parte - 1: Variables fundamentales, funciones de fluencia y potencial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 4, 4, 397–431. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/7598/Article01.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Pina Mateo, E., & Sémelas Ledesma, G. (2011, mayo). Empleo y aplicaciones de hormigones reforzados con fibras sintéticas estructurales. *Revista anales de mecánica y electricidad*, 22-25. Recuperado 11 junio, 2019, de https://revista-anales.icaei.es/web/n_8/pdf/seccion_6.pdf
- Pujadas Álvarez, P; et al (2012, octubre). *Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras*.
- Ros Avila, Joan. (Tesina, 2008-11). *Análisis comparativo de los criterios de rotura de Hoek&Brown y Mohr-Coulomb en el estudio de estabilidad en macizos rocosos*. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6529>
- Trabelsi, H., Hamei, M., Zenzri, H., & Olivella, S. (2011). Crack patterns in clayey soils: Experiments and modeling. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 1410-1433.
- Zhang, Y., Bernhardt, M., Biscontin, G. et al. Mater Struct (2014). *A generalized Drucker-Prager viscoplastic yield surface model for asphalt concrete* 48: 3585. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0425-1>

ANEJOS

- ANEJO I: Programas necesarios para el cálculo de los modelos
- ANEJO II: Características de los modelos
- ANEJO III: Masterfiber 151
- ANEJO IV: Gráficos ampliados

ANEJO I: PROGRAMAS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE LOS MODELOS

En este documento se explica brevemente cómo proceder a la resolución de los distintos modelos con el servidor de cálculo Titani disponible en:

<https://caminstech.upc.edu/es/calculintensi>

Antes de la creación del modelo base, ha sido necesaria la instalación de los programas, que se especifican a continuación, para poder realizar la comunicación con el servidor comentado previamente (Titani).

- *UPClink*. Para poder usar los programas que se explican a continuación, es conveniente dar de alta al usuario en la red UPClink mediante el programa *Pulse Secure*.
- *Putty*. Se trata de un software que permite ejecutar, mediante comandos, una serie de tareas. En este caso, se trata de los distintos cálculos de los diferentes modelos numéricos que generemos. Si queremos que dicho programa ejecute las ordenes, deberemos vincularlo al servidor *FileZilla* mediante nombres de carpetas para que pueda identificar la tarea que debe realizar (ilustración 1).
- *FileZilla Client*. Se trata de un programa para cargar y descargar archivos de un servidor a otro pudiendo entrar y salir de las diferentes carpetas creadas por el usuario. En este caso, se trata del servidor *titani* propio de la UPC (ilustración 1).

Primero, debes insertar tu usuario y el servidor al que te quieres conectar. En segundo lugar, crear una carpeta en el directorio de tu usuario de titani para insertar ahí las carpetas que desees pasar de tu ordenador. Para pasar una carpeta existen dos formas de hacerlo: hacer click sobre ella dos veces o arrastrarlas.

- *NotePad ++*. Es similar al *Block de Notas*, no obstante; los comandos salen alineados uno debajo del otro con mayor comodidad. Este programa sirve para que las ejecuciones que hagamos en el *Putty* se relacionen con el *FileZilla*. Por lo tanto, cada archivo deberá llevar su correspondiente archivo del NotePad ++ (ilustración 2).

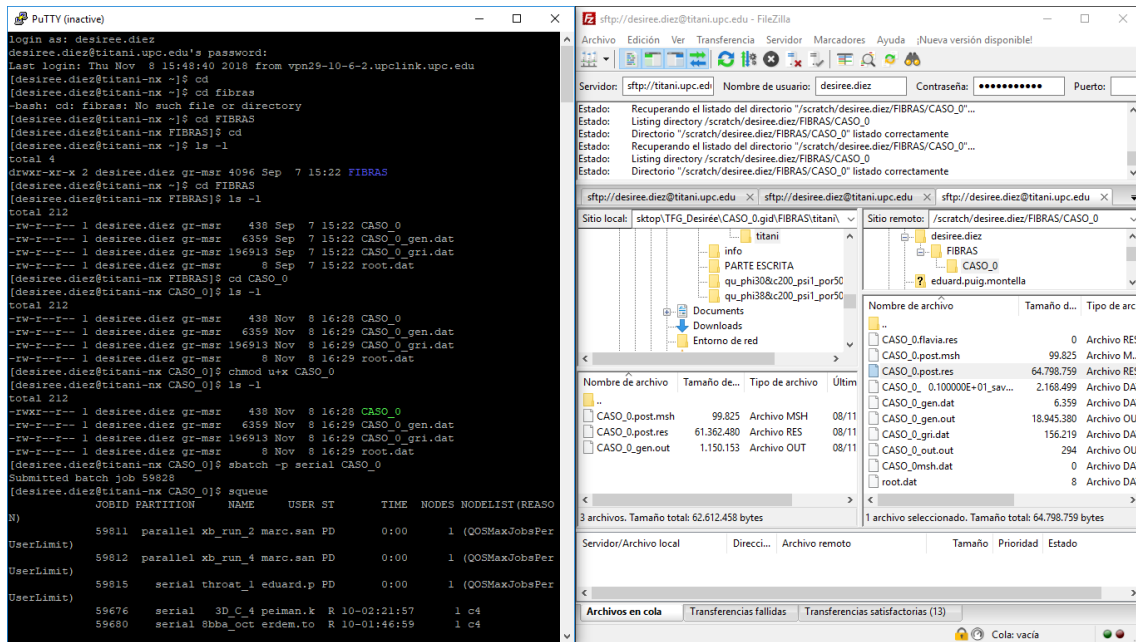


Ilustración 1. Filezilla (derecha) Putty (izquierda)

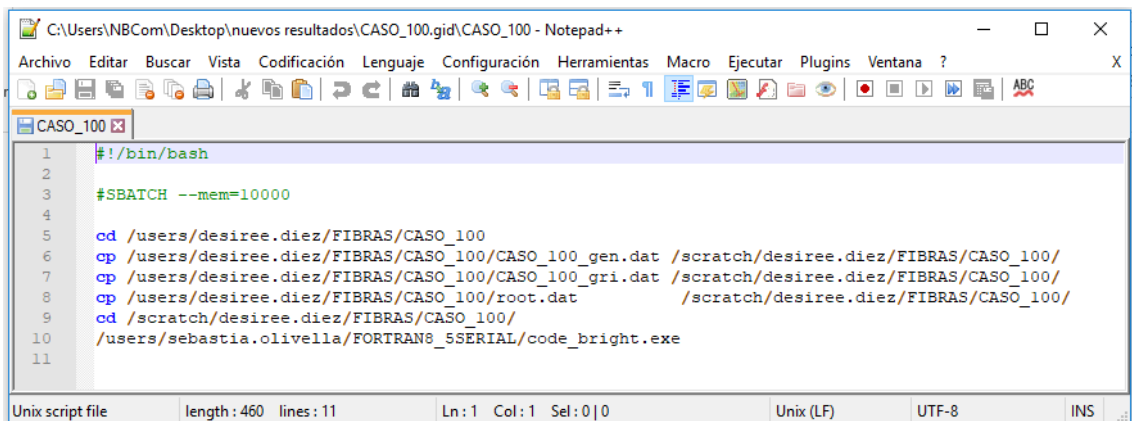


Ilustración 2. Archivo de lectura NotePad ++

ANEJO II: CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS

En este documento se presentan las características de los modelos experimentales calculados en el trabajo.

- Módulo de Young E
- Ángulo de rozamiento interno ϕ (resistencia friccional)
- Cohesión del material
- Relación entre el ángulo de dilatación y el de rozamiento interno ψ/ ϕ

| | | Módulo de Young E | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-------------------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|-----|
| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 20000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 10000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | | Ángulo de rozamiento interno ϕ (Resistencia friccional) | | | | | | | | |
|--------------------|-------|--|-------|------|-------|-----|----|-----|------|-----|
| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |
| ϕ | | | | | | | | | | 30° |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|------|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.42 |
| ϕ | | | | | | | | | | 35° |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|------|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.64 |
| ϕ | | | | | | | | | | 40° |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|-----|------|------|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.85 |

| | | Cohesión del material | | | | | | | | |
|--------------------|-------|-----------------------|-------|------|-------|------|----|-----|------|-----|
| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.20 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.50 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.45 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.35 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.70 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|----|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 5 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|----|----|-----|------|-----|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 1 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |

| | | Relación entre el ángulo de dilatación y el de rozamiento interno Ψ/ϕ | | | | | | | | |
|--------------------|-------|---|-------|------|-------|-----|----|-----|------|-----|
| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.5 | 0.15 | 1.2 |
| ϕ | | | | | | | | | | 30° |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|------|------|------|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.38 | 0.15 | 1.64 |
| ϕ | | | | | | | | | | 40° |

| | ITYCL | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P10 |
|--------------------|-------|-------|-------|------|-------|-----|----|------|------|------|
| <i>elasticidad</i> | 1 | 30000 | | 0.15 | 0.145 | | | | | |
| <i>viscosidad</i> | 4 | 3 | 0.001 | | | 0.2 | 50 | 0.33 | 0.15 | 1.85 |
| ϕ | | | | | | | | | | 45° |

MasterFiber® 151

Polypropylene fiber for reinforcement in sprayed concrete and cast concrete applications as alternative and/or supplement to existing concrete reinforcement products

DESCRIPTION

MasterFiber 151 is a fiber extruded from polyolefin polymers and formed into a flat fiber that can be used in concrete mixes for both spray and cast in-situ applications. The inclusion of fibers in a concrete mix will contribute to improving the durability of concrete by increased crack propagation resistance and by its energy absorption characteristics. The fibers will disperse uniformly throughout the concrete mix and effectively act as an anchoring mechanism within the cement matrix thereby improving the toughness and ductility of the material.

MasterFiber 151 can maximize concrete service life by providing superior resistance to attack from damaging environmental elements such as water, chlorides and corrosive environments such as sewerage conduits and/or saline water.



APPLICATIONS

Recommended for use in:

- Wet shotcrete applications in tunneling or mining applications
- Any subsurface construction
- Any structure where impact toughness shall be increased

FEATURES & BENEFITS

- Easy to dose either at the batch plant or on site concrete mixer truck prior to application.
- Only minor impact on flow & slump properties of fresh concrete.
- High resistance to acid/alkalis attack suitable for use in wet underground conditions and subsurface constructions exposed to damp conditions.
- Reduces construction time compared to a solution with conventional reinforcement.

PACKAGING

MasterFiber 151 is wrapped in water-soluble PVA to form bundles. Bundles are filled either in 6kg transparent bags or in big-bags of 450kg.

TYPICAL PROPERTIES*

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Polymer Type | Polyolefin |
| Colour | Colourless |
| Shape (Cross Section) | Flat |
| Shape (Longitudinal) | Straight |
| Equivalent diameter deq | 0.85 mm +/- 50 % |
| Length L | 50 mm +/- 10 % |
| Aspect ratio L/deq | 59 +/- 50 % |
| Tensile Strength (EN 14889-2) | 490 MPa +/- 15 % |
| Secant Modulus (EN 14889-2) | 4.000 MPa +/- 15 % |
| Density | 0.91 g/cm ³ |
| Melting point (°C) | 160-167 °C |
| Acid/Alkali resistance | High |
| No of fiber per kg | 40000 |
| Shelf-life | 24 month |

DOSAGE & BATCHING

Add fibers to the concrete mixer after water and admixtures. After addition of the fibers mix for at least 2-3 minutes to ensure even distribution of fibers within the concrete mix. Note that in the event that a slight slump loss is experienced after the addition of the fibers – the mix design should be reviewed such to allow for fiber inclusion and avoidance of addition of extra water.

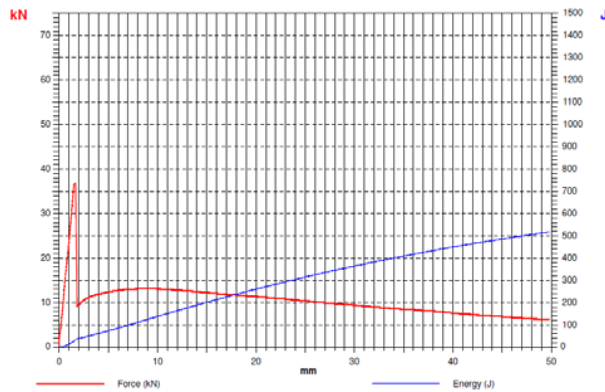
Site trials with the intended concrete mix design must be conducted to verify and determine the performance of the fiber with the proposed sprayed concrete mix.

It is recommended that where automated fiber dosing systems are utilised, that they be checked for suitability and calibrated accordingly.

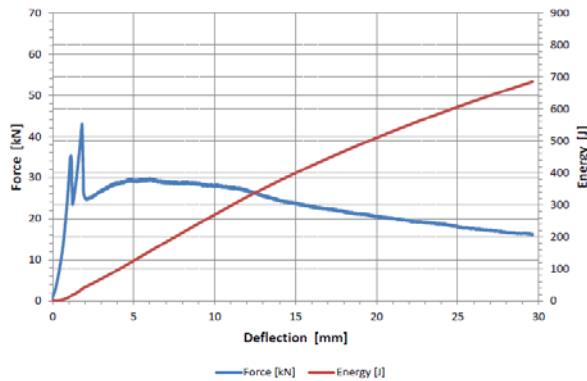
MasterFiber® 151

TYPICAL PERFORMANCE DATA

With 8kg/m³ **MasterFiber 151** more than 280 J at 25mm deflection and 400 J at 40mm deflection determined according to ASTM C-1550 have been achieved in a C40 concrete.



8kg/m³ **MasterFiber 151**, ASTM C-1550 test EFNARC panel tests have shown that for a 30MPa sprayed concrete with 5kg/m³ **MasterFiber 151** an energy absorption value of 600 J can be achieved.



5kg/m³ **MasterFiber 151**, 425kg/m³ CEM II/A-LL 42.5N, w/c = 0.47, 4.4 % **MasterRoc SA 167**, 1,20 % **MasterRheobuild UG 3**, EFNARC test

STORAGE

Material is very stable, no foreseen hazards. Opened bags shall be protected from humidity. Big-bags should be kept dry in case of longer storage on side. Protect against fire.

SAFETY PRECAUTIONS

Material is extremely stable, presenting little hazard to health. In the event of fire it should be noted that the product may produce carbon monoxide, carbon dioxide and other gases.

NOTE

Field service, where provided, does not constitute supervisory responsibility. For additional information contact your local BASF representative.

BASF reserves the right to have the true cause of any difficulty determined by accepted test methods.

QUALITY AND CARE

All products originating from BASF's Dubai, UAE facility are manufactured under a management system independently certified to conform to the requirements of the quality, environmental and occupational health & safety standards ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.

* Properties listed are based on laboratory controlled tests.

® = Registered trademark of the BASF-Group in many countries.

BASF_CC-UAE/MFiber_151_01_16/v1/

STATEMENT OF RESPONSIBILITY

The technical information and application advice given in this BASF publication are based on the present state of our best scientific and practical knowledge. As the information herein is of a general nature, no assumption can be made as to a product's suitability for a particular use or application and no warranty as to its accuracy, reliability or completeness either expressed or implied is given other than those required by law. The user is responsible for checking the suitability of products for their intended use.

NOTE

Field service where provided does not constitute supervisory responsibility. Suggestions made by BASF either orally or in writing may be followed, modified or rejected by the owner, engineer or contractor since they, and not BASF, are responsible for carrying out procedures appropriate to a specific application.

ANEJO IV: GRÁFICOS AMPLIADOS

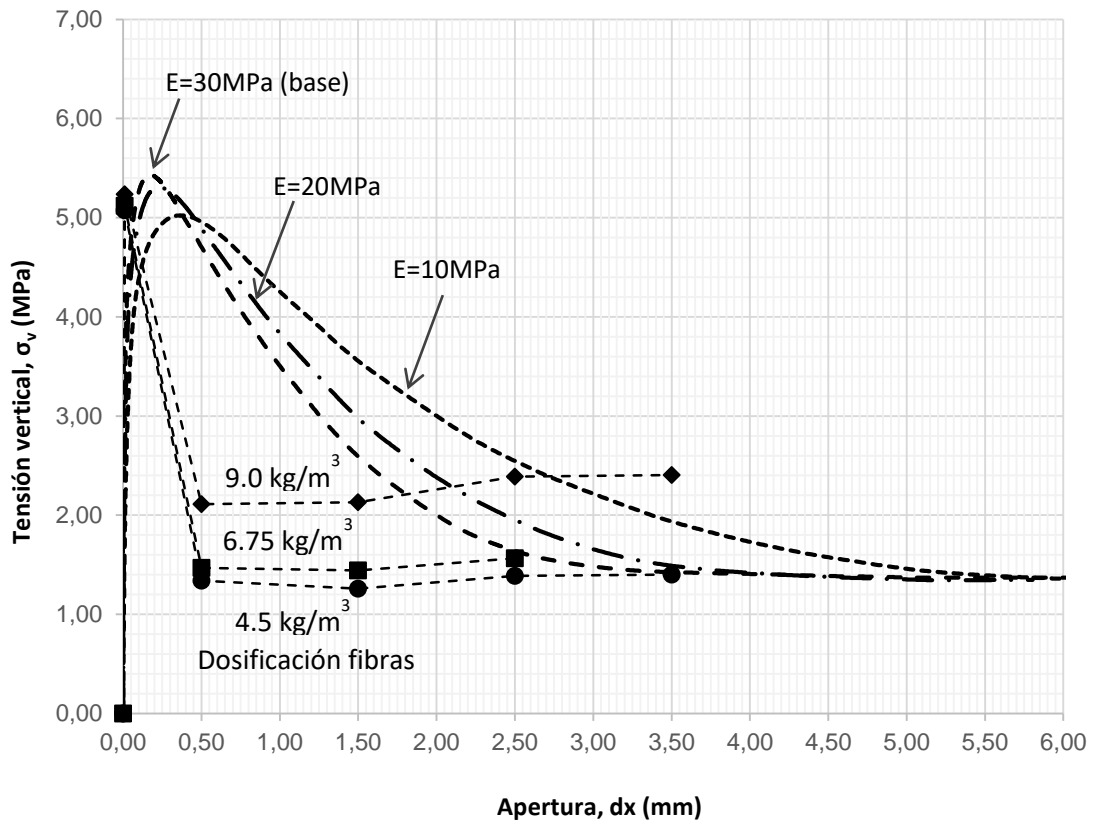


Gráfico 1 Variación de los resultados según el valor de E (MPa). Modelo base de 30MPa.

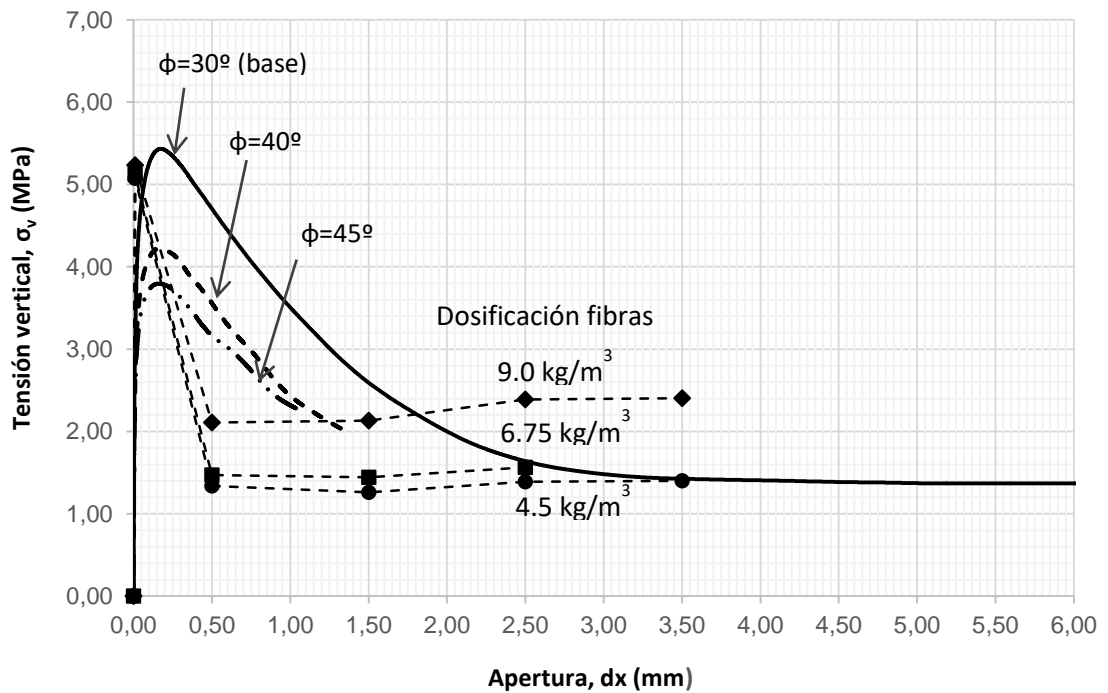


Gráfico 2 Variación del pendiente de la recta de los estados críticos según el ángulo de rozamiento interno. Modelo base M=1.20

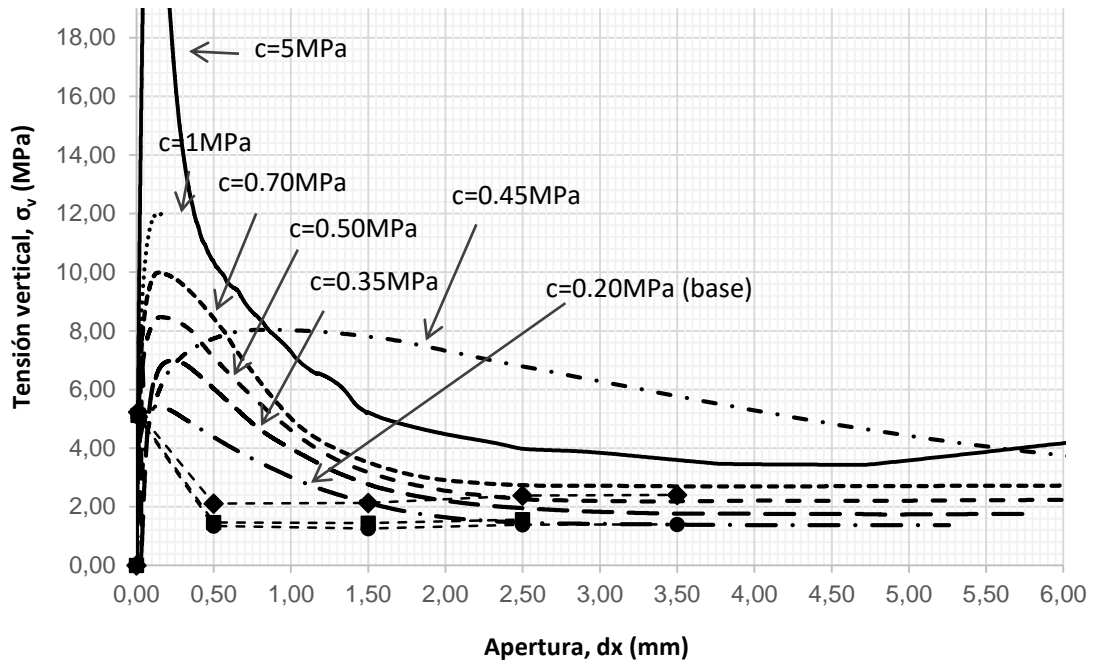


Gráfico 3 Variación de la resistencia según el parámetro de cohesión. Caso base de valor 0.20MPa

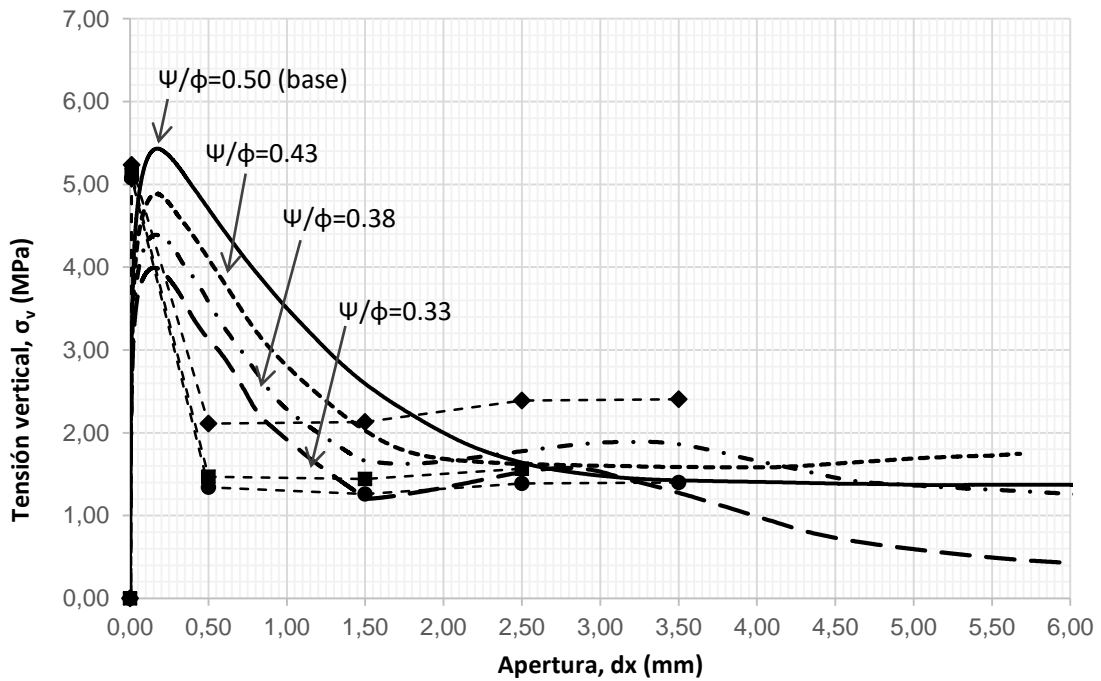


Gráfico 4 Variación del factor de dilatación prefijando el valor de Ψ . Caso base $\Psi=15^\circ$

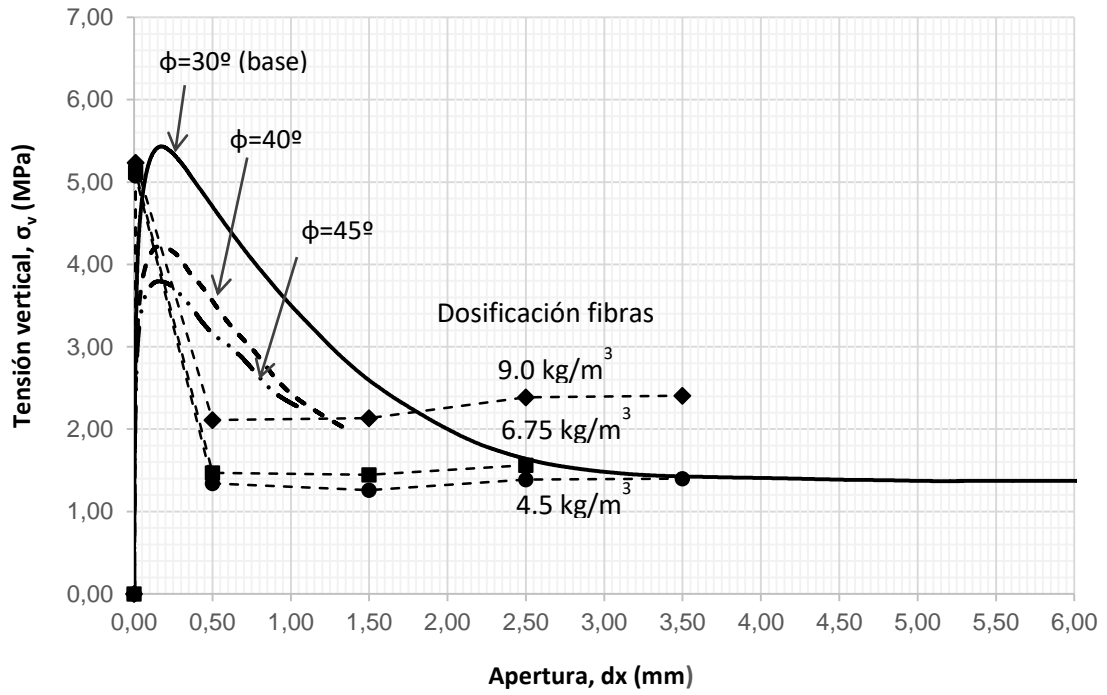


Gráfico 5 Variación de ψ prefijando el valor de la relación de ángulos ψ/ϕ . Caso base $\psi=15^\circ$