

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Implementación del modelo Concrete Damage
Plasticity en el contexto del hormigón
autorreparable.

Autor: Pedro Gómez-Coronado Castillo

Tutores: José Antonio Sanz Herrera y Francisco de Paula
Montero Chacón

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría
de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Carrera
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Implementación del modelo Concrete Damage Plasticity en el contexto del hormigón autorreparable.

Autor:

Pedro Gómez-Coronado Castillo

Tutor:

José Antonio Sanz Herrera

Profesor titular

Francisco de Paula Montero Chacón

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Implementación del modelo Concrete Damage Plasticity en el contexto del hormigón autorreparable.

Autor: Pedro Gómez-Coronado Castillo

Tutores: José Antonio Sanz Herrera y
Francisco de Paula Montero
Chacón

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

A mi familia e Inés, por apoyarme incondicionalmente durante mi etapa de estudio y estar siempre presentes cuando los he necesitado.

A mis amigos, por hacerme más sencillo este tiempo y por alentarme en los momentos difíciles.

Sevilla, 2019

En el presente documento se va a llevar a cabo un estudio en el ámbito de la mecánica de materiales y de los materiales autorreparables. Para ello, partiendo de trabajos existentes, se van a analizar las consecuencias de la autorreparación en hormigón y las condiciones a las que tendrá que estar expuesto el mismo para que sea viable esta autorreparación. Se pretenden replicar los resultados experimentales obtenidos en un artículo de referencia mediante análisis computacionales con el software de elementos finitos Abaqus, obteniendo los valores de los parámetros del modelo “Concrete Damage Plasticity” que mejor aproximen el comportamiento observado en estos resultados. El “Concrete Damage Plasticity” se empleará para modelar el comportamiento plástico y frente al daño del material. Se pretende también establecer una guía para la posterior inclusión de los mecanismos de “healing”, o reparación, en este ajuste, de manera que se tendría un modelo mecano-físico-difusivo en el que se apreciaría la autorreparación del material. Finalmente, con el objetivo de darle un valor adicional al documento, se incluyen detalles de las tensiones y desplazamientos experimentados durante los análisis computacionales.

Abstract

This document will carry out a study in the field of material mechanics and self-healing materials. To achieve this objective, on the basis of existing work, the consequences of concrete self-healing and the conditions to which it will have to be exposed will be analyzed in order to make feasible this self-healing process. It is intended to replicate the experimental results obtained in a reference article by means of computational analysis with the Abaqus finite element software, obtaining values of those parameters of the model Concrete Damage Plasticity which best approximate the behavior which is observed in these results. The Concrete Damage Plasticity model will be used so as to model plastic behavior and against material damage in concrete. It is also intended to establish a guide for the subsequent inclusion of the healing in this adjustment. Thus, a mechanical-physical-diffusive model would be applied, in which the self-healing of the material would be appreciated. Finally, in order to provide additional value to the document, details of the stresses and displacements experienced during computational analyses are included.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>Mecánica de materiales</i>	1
1.2 <i>Materiales estructurales</i>	2
1.3 <i>Materiales autorreparables</i>	3
1.4 <i>Aplicación del concepto de material autorreparable: Hormigón</i>	4
2 Mecánica del daño continuo	9
2.1 <i>Mecánica del daño continuo irreversible</i>	9
3 Modelo Implementado	13
3.1 <i>Modelo de daño: Concrete Damage Plasticity (CDP)</i>	13
3.1.1 <i>Comportamiento mecánico</i>	13
3.1.2 <i>Parámetros constitutivos esenciales para el modelo CDP</i>	16
3.1.3 <i>Definición de la energía de fractura</i>	18
4 Introducción del ensayo experimental de referencia	21
4.1 <i>Objetivo del ensayo experimental.</i>	21
4.2 <i>Configuración de los especímenes.</i>	22
4.3 <i>Configuración mecánica del ensayo.</i>	22
4.4 <i>Caracterización mecánica de la autorreparación en grietas.</i>	23
5 Implementación en Abaqus	25
5.1 <i>Entorno de Abaqus</i>	25
5.2 <i>Implementación del modelo</i>	25
5.2.1 <i>Definición de la geometría.</i>	26
5.2.2 <i>Definición del material.</i>	27
5.2.3 <i>Mallado.</i>	28
5.2.4 <i>Definición de los “Steps”.</i>	29
5.2.5 <i>Condiciones de contorno y cargas.</i>	30
6 Resultados	35
6.1 <i>Parámetros del modelo mecánico.</i>	35
6.2 <i>Ajuste de la curva P-CMOD.</i>	38
6.2.1 <i>Ajuste de E.</i>	38
6.2.2 <i>Ajuste de G_F y f_t.</i>	39
6.2.3 <i>Ajuste de la descarga e inmediata recarga.</i>	41
6.2.4 <i>Evolución de las variables.</i>	44

7	Conclusiones	61
8	Líneas futuras de trabajo	63
	Referencias	65

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 5–1. Amplitud del desplazamiento impuesto.</i>	32
<i>Tabla 6–1. Parámetros relevantes</i>	36
<i>Tabla 6–2. Propiedades del material.</i>	38
<i>Tabla 6–3. Propiedades del material actualizadas tras el ajuste de E.</i>	39
<i>Tabla 6–4. Ajuste 2D de G_F y de f_i.</i>	40
<i>Tabla 6–5. Ajuste de w, de G_F y de f_i.</i>	41
<i>Tabla 6–6. Propiedades del material actualizadas tras el ajuste de E.</i>	42
<i>Tabla 6–7. Amplitud del desplazamiento impuesto para $v =2$ mm.</i>	45
<i>Tabla 6–8. Amplitud del desplazamiento impuesto para $v =6$ mm.</i>	45

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1-1. a) Un ciclo de reparación. b) Varios ciclos de reparación. c) Material autorreparable ideal. (Van der Zwaag, 2007)</i>	3
<i>Figura 1-2. a) carbonato de calcio. b) partículas del hormigón. c) hidratación a posteriori de las partículas de cemento no hidratado. d) expansión de la matriz de cemento. (Aliko-Benítez, et al., 2015)</i>	5
<i>Figura 2-1. Elemento finito de volumen aislado del volumen total (Luccioni, 2003).</i>	10
<i>Figura 2-2. Esquema de tres posibles caminos para el punto A en una curva tensión-deformación (Darabi, et al., 2012).</i>	11
<i>Figura 3-1. Respuesta del hormigón a carga uniaxial a tracción para el CDP (Guía de Abaqus, s.f.)</i>	14
<i>Figura 3-2. Respuesta del hormigón a carga uniaxial a compresión para el CDP (Guía de Abaqus, s.f.)</i>	15
<i>Figura 3-3. Curva de Kupfer (Kupfer, et al., 1969).</i>	17
<i>Figura 3-4. Grieta ficticia de la zona de fractura (Hillerborg, 1978).</i>	18
<i>Figura 3-5. Curvas del modelo de energía de fractura propuesto (Hillerborg, 1978).</i>	19
<i>Figura 3-6. Representación gráfica de la energía de fractura (Hillerborg, 1978).</i>	19
<i>Figura 4-1. Configuración geométrica del artículo de referencia (Granger, et al., 2007).</i>	22
<i>Figura 4-2. Comportamiento mecánico experimental de la probeta con grieta previa (Granger, et al., 2007).</i>	23
<i>Figura 5-1. Parámetros a especificar para la geometría en Abaqus.</i>	26
<i>Figura 5-2. Herramientas de partición en Abaqus.</i>	26
<i>Figura 5-3. Geometría del espécimen en Abaqus.</i>	27
<i>Figura 5-4. Definición del material en Abaqus.</i>	27
<i>Figura 5-5. Creación de la sección en Abaqus y asignación de la misma.</i>	28
<i>Figura 5-6. Malla de elementos finitos utilizada en el análisis 2D.</i>	28
<i>Figura 5-7. Malla de elementos finitos utilizada en el análisis 3D.</i>	29
<i>Figura 5-8. Definición del “Step” en Abaqus.</i>	29
<i>Figura 5-9. Condiciones de contorno del espécimen en Abaqus.</i>	30
<i>Figura 5-10. Desplazamiento impuesto en Abaqus.</i>	31
<i>Figura 5-11. Carga frente a tiempo en Abaqus.</i>	31
<i>Figura 5-12. Desplazamiento impuesto frente a tiempo en Abaqus.</i>	32
<i>Figura 6-1. Gráfico carga- desplazamiento.</i>	36
<i>Figura 6-2. a) Aproximación lineal de la curva $\sigma - w$; b) aproximación bilineal de la curva $\sigma - w$. (Pettersson, 1981).</i>	37
<i>Figura 6-3: Valores de la energía de fractura para distintos tipos de especímenes (Pettersson, 1981)</i>	37
<i>Figura 6-4. Ajuste de E</i>	38
<i>Figura 6-5. Ajuste 2D de G_F y de f_i.</i>	39
<i>Figura 6-6. Ajuste 3D de G_F y de f_i.</i>	40
<i>Figura 6-7. Ajuste final de E, f_i y G_F.</i>	41

<i>Figura 6-8. Efecto del parámetro de recuperación de rigidez w_c (Guía de Abaqus, s.f.).</i>	42
<i>Figura 6-9. Ajuste de la descarga y la posterior carga.</i>	43
<i>Figura 6-10. Ajuste final de la descarga y la posterior carga.</i>	44
<i>Figura 6-11. Carga frente al tiempo para distintas deflexiones</i>	45
<i>Figura 6-12. Daño para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 4$ mm.</i>	46
<i>Figura 6-13. Daño para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 2$ mm.</i>	47
<i>Figura 6-14. Daño para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 6$ mm.</i>	48
<i>Figura 6-15. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 4$ mm.</i>	49
<i>Figura 6-16. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 2$ mm.</i>	50
<i>Figura 6-17. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 6$ mm.</i>	51
<i>Figura 6-18. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 4$ mm.</i>	52
<i>Figura 6-19. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 2$ mm.</i>	53
<i>Figura 6-20. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 6$ mm.</i>	54
<i>Figura 6-21. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 4$ mm.</i>	55
<i>Figura 6-22. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 2$ mm.</i>	56
<i>Figura 6-23. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 6$ mm.</i>	57
<i>Figura 6-24. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 4$ mm.</i>	58
<i>Figura 6-25. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 2$ mm.</i>	59
<i>Figura 6-26. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $v = 6$ mm.</i>	60

Notación

A	Área nominal
\bar{A}	Área efectiva
A^D	Área dañada del espécimen
CAE	Complete Abaqus Environment
CDP	Concrete Damage Plasticity
CM	Compressive Meridian
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement
cm	Centímetro
CW	Ancho de grieta
D	Módulo tangente de rigidez
\bar{D}	Módulo tangente de rigidez específico
E	Módulo secante de rigidez
\bar{E}	Módulo secante de rigidez específico
E_0	Módulo secante de rigidez inicial
F	Función de la superficie de fluencia
f_{bo}	Resistencia a compresión bajo cargas biaxiales
f_c	Resistencia uniaxial a compresión
f_t	Resistencia uniaxial a tracción
G	Función potencial de flujo plástico
G_F	Energía de Fractura
GPa.	Giga Pascales
J_2	Segundo invariante de las tensiones
kN.	Kilo Newton
m	Excentricidad de la función potencial de flujo plástico
m	Metro
mm	Milímetro
MDC	Mecánica de Daño Continuo
MPa.	Mega Pascales
\vec{n}	Normal a una superficie
N	Newton
\bar{p}	Presión Hidrostática efectiva
P	Carga Aplicada
\bar{q}	Tensión de Von Misses equivalente efectiva
\bar{S}	Parte desviatoria del tensor de tensiones efectivo
S	Span o distancia entre los dos apoyos

TM	Tensile Meridian
TPBT	Three-Point Bending Test o Ensayo de Flexión en Tres Puntos
t	Tiempo del Step
u_t^{ck}	Cracking Displacement
u_t^{pl}	Desplazamiento plástico
UHPC	Ultra High Performance Concrete
v	Deflexión máxima impuesta o desplazamiento máximo impuesto
w	Ancho de la grieta ficticia
w/c	Ratio de Agua-Cemento
w_c	Factor de peso en compresión
w_t	Factor de peso en tracción
ϕ	Daño Irreversible
ϕ_c	Daño a compresión
ϕ_t	Daño a tracción
σ	Tensión
σ_c	Tensión en compresión
σ_t	Tensión en tracción
σ_{co}	Tensión inicial de fluencia en compresión uniaxial
σ_{cu}	Tensión última de fluencia en compresión uniaxial
σ_{to}	Tensión de fallo en tracción uniaxial
$\bar{\sigma}$	Tensión efectiva
$\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$	Máximo valor propio algebraico de la tensión efectiva
ε	Deformación
ε_c	Deformación en compresión
ε_t	Deformación en tracción
$\bar{\varepsilon}$	Deformación efectiva
ε^{pl}	Deformación plástica
$\bar{\varepsilon}^{pl}$	Deformación plástica equivalente
$\bar{\varepsilon}_c^{pl}$	Deformación plástica equivalente a compresión
$\bar{\varepsilon}_t^{pl}$	Deformación plástica equivalente a tracción
ε_t^{ck}	Cracking Strain
β	Ángulo de dilatación de la función potencial de flujo plástico
γ	Parámetro de la superficie de fluencia de plasticidad
α	Parámetro de la superficie de fluencia de plasticidad
μm	Micrómetro
:	Doble Contracción
$\langle x \rangle$	Paréntesis de Macauley
θ	Parámetro de la superficie de fluencia de plasticidad

1 INTRODUCCIÓN

En el presente documento se va a llevar a cabo un estudio en el ámbito de la mecánica de los materiales, el cual estará relacionado con los materiales estructurales con base de hormigón. El objetivo es llevar a cabo el ajuste de los parámetros característicos del comportamiento plástico y de daño en hormigón, mediante la definición de una serie de modelos con los cuales se representará el comportamiento de este tipo de materiales.

Todos los resultados y análisis estarán basados en estudios previos realizados de forma experimental que muestran el comportamiento autorreparable de determinados hormigones, de manera que se pretenden abalar estos resultados previamente obtenidos por otros autores mediante análisis computacionales en el software Abaqus, para en estudios posteriores aplicar los que se conocen como mecanismos de autorreparabilidad y terminar de corroborar los resultados.

1.1 Mecánica de materiales

El objetivo de la **mecánica de materiales** es proporcionar a los ingenieros y estudiosos los conocimientos necesarios para **analizar, diseñar y construir** las máquinas y estructuras cuya función será soportar distintos tipos de carga. Como bien es sabido, estas cargas generan **esfuerzos** y **deformaciones**, por lo que el conocimiento de los mismos será fundamental en el diseño de dichas estructuras.

La mecánica de los materiales, y por tanto el conocimiento de las tensiones generadas en una estructura, así como las correspondientes deformaciones, juega un papel fundamental en la actualidad, pues está presente en la actividad industrial, la arquitectura y la agricultura entre otros campos cotidianos. Debido al amplio uso de los diversos materiales y debido a la enorme evolución en los campos de la teoría cuántica de sólidos, se han abierto muchas posibilidades para un mejor entendimiento y utilización de los mismos. Un claro ejemplo de esto es el éxito alcanzado en el estudio del espacio, el cual es debido a los avances en la construcción de estructuras resistentes a altas tensiones y temperaturas, que por tanto tendrán que ser diseñadas para **evitar deformaciones excesivas** que les impidan llevar a cabo su función. (Kakani, 2004)

Como bien es sabido, a la hora de llevar a cabo el diseño de una estructura, es necesario elegir correctamente el material mediante el cual se desarrolla su construcción. No todos los materiales resisten de la misma forma las cargas aplicadas y no todos los materiales sufren una misma deformación ante una misma carga, en definitiva, **no todos los materiales tienen las mismas propiedades mecánicas**. Por ello, para realizar el diseño de una estructura hay que tener en cuenta diversos requerimientos, los cuales pueden ir desde condicionantes de peso hasta el simple factor económico. Piénsese sin más en un avión, el cual debe ser capaz de volar a kilómetros de distancia de la superficie de la Tierra, y que por lo tanto no podrá tener un peso excesivo, o piénsese en la estructura de un edificio que deberá soportar toneladas de material para evitar que se derrumbe.

Por ello, si se quiere llevar a cabo un diseño efectivo y correcto de una estructura, es necesario conocer las propiedades, conocidas como mecánicas, de los materiales que se vayan a usar. Teniendo esto en cuenta, y con el objetivo de conseguir un mayor aprovechamiento de los mismos, el hombre ha intentado conocer la **composición** y **organización** de estos materiales, así como sus **propiedades mecánicas**, llegando en algunos casos a ser capaz de modificar las composiciones para obtener determinadas propiedades, así como a predecir los posibles efectos de diversas acciones sobre las estructuras. (González-Viñas & Mancini, 2005)

Una vez que se alcanza el conocimiento de las propiedades de los materiales, se puede estudiar su actuación en relación a una determinada aplicación. Los factores más determinantes en la estructura de un material son aquellos relacionados con su **composición química** y la manera en la que estos elementos químicos adquieren su forma final. De esta forma, se genera la microestructura de un material, y así, se establecen sus propiedades.

Hoy en día se ha avanzado en el conocimiento de la relación de la estructura de los materiales y sus propiedades. Gracias a estos avances, y al descubrimiento y diseño de nuevos materiales, se han mejorado las comunicaciones, el transporte, la salud, las edificaciones, en definitiva, la calidad de vida de las personas. Con todo esto, en los últimos años, y gracias a los conocimientos que se han adquirido acerca de la estructura de los materiales, se ha pensado en la posibilidad de diseñar materiales **átomo a átomo**, con todas las ventajas que esto implica en el conocimiento de sus propiedades mecánicas, consiguiendo así que cumplan con los requisitos deseados y que tengan las propiedades adecuadas para determinados usos. Se está evolucionando hacia materiales que permitan, no solo cumplir con los requisitos necesarios para una determinada aplicación, sino abrir nuevas posibilidades inimaginables hasta hace pocos años. (González-Viñas & Mancini, 2005)

De acuerdo a estos avances, se generan **nuevos sectores industriales**, como podría ser el de la microelectrónica, aplicada en los electrodomésticos, ordenadores y fibras ópticas o en áreas tan específicas como el almacenamiento de energía o la domótica. Otro de estos sectores, y sobre el que se centrará este documento, es el de los materiales destinados a **usos estructurales** tales como la aeronáutica, la arquitectura o la ingeniería civil.

1.2 Materiales estructurales

Cuando se habla de materiales estructurales, se hace referencia a aquellos empleados en la elaboración de **estructuras** de cualquier tipo, desde el fuselaje de un avión, hasta las vigas de un edificio, es decir, son materiales diseñados para primar sus **funciones mecánicas** sobre cualquier otra función que puedan llevar a cabo. Este tipo de materiales abarca un amplio rango de posibilidades, tales como aluminio, acero, hormigón, etc.

Para que un material sea considerado como material de construcción, este debe tener ciertas propiedades ingenieriles. Estas propiedades son las responsables de las cualidades y capacidades de los mismos, y ayudan a decidir qué material es adecuado para cada labor. Las propiedades de los materiales se pueden dividir como sigue:

- Propiedades físicas
- Propiedades mecánicas
- Propiedades químicas
- Propiedades eléctricas
- Propiedades magnéticas
- Propiedades térmicas

Cada una de las cuales deben ser tenidas en cuenta a la hora de llevar a cabo el diseño de una estructura, para poder evitar así el fallo o colapso de las mismas. (Anupoju, 2016)

Teniendo esto en cuenta, el tratamiento de los materiales estructurales se basa en su **resistencia, rigidez y comportamiento a fractura**. Es la combinación de las propiedades del material con las dimensiones y la forma que se le da lo que proporcionará la funcionalidad deseada. Cuando se habla de las propiedades de los materiales estructurales, es importante resaltar que es la **cohesión entre los átomos** el factor limitante de cualquier material. Para conseguir materiales resistentes y rígidos, se necesita unir tantos átomos a sus vecinos con **enlaces fuertes** y en un **volumen tan pequeño** como sea posible, es decir, una gran **cohesión** entre los átomos proporcionará un material resistente y rígido, mientras que una cohesión débil llevará a materiales flexibles y débiles. (Van der Zwaag, 2007)

La rigidez y la resistencia son propiedades distintas de un material, aunque ambas serán las más importantes en los materiales estructurales. La rigidez hace referencia a la respuesta reversible del material a una carga mecánica, es decir, es la **resistencia** del material **frente a la deformación**, y depende de la fuerza de enlace entre los átomos y su densidad de empaquetamiento. La resistencia, por su parte, tiene que ver con la habilidad de material para **soportar grandes cargas** sin dividirse en varias partes. Estas cargas, mientras no superen el límite de fractura, llevan a una separación de los átomos que forman el material, y estos desplazamientos serán los que generen defectos internos en los mismos que a su vez generarán grietas, terminando en la **fractura** del material. (Van der Zwaag, 2007)

Tener un buen conocimiento acerca de la extensión de los microdefectos y poder **predecir** cómo se van a originar las grietas en función de las cargas aplicadas es de gran importancia, y es por ello que se ha convertido en una de las disciplinas más importantes dentro del ámbito de la mecánica de materiales. Por todo esto, hoy en día se puede simplificar el método empleado para crear materiales más fuertes en crear microestructuras que se opongan a la formación y desarrollo de micro-grietas. Esto se puede resumir en un término que en los últimos años está ganando potencia, y es el de **prevención del daño**. Teniendo en cuenta este concepto y observando el comportamiento de los materiales actuales, se puede ver cómo, cuando una carga es aplicada a un material, este sufre daño e, incluso cuando la carga se reduce o cuando se elimina completamente, el daño provocado al material permanece presente. Esto conduce a un aumento de los costes y una necesidad de continua **comprobación del estado** de las estructuras. (Van der Zwaag, 2007)

De la mano del concepto de prevención de daño, surge un nuevo concepto conocido como “*Damage Management*” (**gestión del daño**) (Van der Zwaag, 2007), y de ciertos comportamientos de la naturaleza surge la posibilidad de crear **materiales autorreparables**, lo cual implicaría un enorme ahorro en tiempo y coste en cuanto al mantenimiento y revisión de las estructuras.

1.3 Materiales autorreparables

Como una consecuencia del principio de la selección natural, se puede afirmar que los materiales presentes en la naturaleza son especialmente eficientes. Cuando se habla de **eficiencia** en este aspecto se hace referencia a que cumplan con los requisitos que las plantas y animales les imponen, y que lo hagan con la menor cantidad de material posible. Muchos de los condicionantes a los que son impuestos son **requerimientos mecánicos**, tales como la necesidad de soportar cargas estáticas y dinámicas, como podrían ser las creadas por el viento (Van der Zwaag, 2007). De esta observación del comportamiento de los materiales de la naturaleza, surge la curiosidad por uno de sus propiedades más llamativas, la de la **autorreparabilidad**. Materiales tales como huesos, la piel, etc. son capaces de sufrir una fractura y solucionarla de forma **autógena**.

Considerando esta capacidad de autorreparabilidad, se investiga el concepto de **gestión de daño** antes comentado, el cual implica que tras la formación del daño le seguiría un nuevo proceso autónomo de **reparación**, en el que se recuperarían determinadas propiedades del material. Esto es la base de la idea de material autorreparable (Van der Zwaag, 2007). Este hecho ha sido también observado en numerosos estudios experimentales de las últimas décadas, en los que se ve como numerosas clases de materiales ingenieriles tienen la propiedad de recuperar parte de su resistencia y rigidez bajo determinadas condiciones. (Miao, et al., 1995; Kessler & White, 2001; Brown, et al., 2002; Reinhardt & Jooss, 2003; Guo & Guo, 2006; Kessler, 2007; Bhasin, et al., 2009).

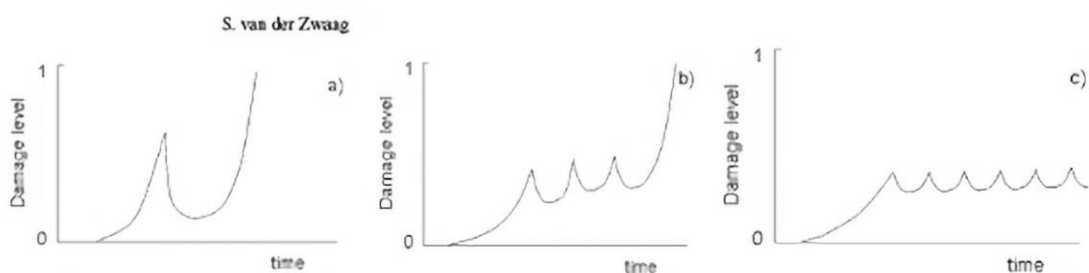


Figura 1-1. a) Un ciclo de reparación. b) Varios ciclos de reparación. c) Material autorreparable ideal. (Van der Zwaag, 2007)

En las imágenes anteriores se pueden observar distintos procesos de “*self-healing*” o autorreparación. En la *Figura 1-1 a*) se puede ver cómo el daño se repara casi totalmente, tras lo cual se aprecia cómo el nuevo daño causado lleva a la fractura final. Por su parte, en la *Figura 1-1 b*) se observa un proceso con distintas etapas de “*self-healing*”, en cada una de las cuales se repara parcialmente el daño causado, no obstante, tras una serie de ciclos de curado este deja de suceder y de nuevo el daño lleva a la fractura del material. Se puede ver cómo esta fractura se produce en un tiempo mayor del que sucedía en el caso de un solo ciclo de curado o en el caso en el que no existía reparación. Finalmente, en la *Figura 1-1 c*) se puede ver lo que corresponde con una **autoreparación ideal**. En esta se observa cómo constantemente el daño se ve reducido tras alcanzar un determinado nivel, no alcanzando nunca el nivel de daño catastrófico, y por lo tanto el material tendría **una vida infinita** (Van der Zwaag, 2007). Con estas imágenes se puede llegar por lo tanto a la conclusión de que el comportamiento de un material autorreparable depende de dos variables principalmente, la **formación de daño** y la **reparación** del mismo.

Como se comentó anteriormente, la clave para entender el comportamiento de los materiales es la **microestructura** de los mismos. Por esto, resulta interesante considerar qué debería ocurrir en esta para que un material sea autorreparable. Como es entendible, para conseguir esta propiedad en un material es necesario que los defectos que se producen en el mismo desaparezcan. El espacio vacío que generan los defectos debe ser rellenado con nuevo material que sea capaz de restaurar las propiedades del material original. Teniendo esto en cuenta, se llega a la conclusión de que en este tipo de materiales, en contraposición con los materiales tradicionales, una fracción de los átomos que lo forman debe tener cierta **posibilidad de movimiento**, en aras de poder reparar las zonas dañadas. Este es un concepto complejo, los átomos de un material rígido deben ser capaces de desplazarse a las zonas dañadas, unir las superficies que las separan, y una vez hecho esto, deben perder su capacidad de movimiento quedándose donde se han situado. Esta capacidad inicial de movimiento y posterior estaticismo se puede conseguir mediante temperatura, procesos químicos o mediante nuevos procesos que puedan ser creados fruto de futuras investigaciones. (Van der Zwaag, 2007)

Finalmente, resulta necesaria la presencia de un mecanismo que funcione como sensor, informando de la aparición del daño para que los agentes reparadores puedan comenzar su actuación. Una buena idea sería que este sensor sea el daño en sí mismo. El último requisito necesario para la autoreparación sería que las superficies dañadas que se quieren volver a unir, deben permanecer cercanas la una a la otra, de manera que una fractura total en la que un material queda dividido en dos partes no entraría dentro de los alcances actuales de la autoreparación. (Van der Zwaag, 2007)

Por último, es de interés señalar que, debido a que el proceso de reparación necesita un **cese o reducción de la carga aplicada**, la autoreparación será más aplicable en estructuras sometidas a **ciclos de cargas** que en aquellas sometidas a una carga constante.

1.4 Aplicación del concepto de material autorreparable: Hormigón

Como se comentó anteriormente, el concepto de la autorreparabilidad tiene amplias posibilidades para su aplicación, entre las que destaca la ingeniería civil. Como bien es sabido, el hormigón estructural es un material que trabaja bien a compresión, alcanzando una amplia resistencia, no siendo así en caso de que trabaje a tracción, en el cual se puede ver fuertemente dañado. Este daño puede generar la aparición de **grietas**, las cuales traen consigo serios problemas para la integridad de una estructura, desde el **incremento característico de las tensiones en la proximidad del borde de grieta**, hasta un aumento de las posibilidades de **corrosión del armazón interno** al quedar este al descubierto a través de las mismas en el caso de hormigones reforzados. Estas condiciones que dañan el material pueden ser debidas a multitud de causas, por lo que para asegurar un correcto funcionamiento de la estructura, así como la seguridad de la misma, será necesario un continuo mantenimiento y revisión de su estado.

Resulta evidente que el mantenimiento recién comentado, al que es necesario someter a las estructuras construidas mediante hormigón, es una tarea muy **costosa** tanto en **mano de obra** como en **tiempo y costes**. Piénsese sin más en un gran puente el cual tiene que ser revisado centímetro a centímetro en busca de posibles grietas o daños, los cuales pueden estar situados en zonas de difícil acceso. Teniendo esto en cuenta, resulta fácil de entender el intento de los ingenieros e investigadores de **alargar la vida** de las estructuras o de **reducir las**

labores de mantenimiento a las que deban ser sometidas. Por todo ello, el concepto de autoreparación en hormigón aparece con fuerza, abriendo uno de los caminos más prometedores de los últimos años, permitiendo la posibilidad de construir **estructuras “inteligentes”** capaces de repararse parcial o totalmente de forma autógena, con todos los beneficios que esto implica. (Aliko-Benítez, 2017)

El fenómeno de autoreparación en hormigón se conoce desde hace años, tal y como se ha observado en ciertas grietas en las que se aprecia material cristalino (Van der Zwaag, 2007). Este concepto sugiere cierta habilidad de algunos tipos de hormigón de rellenarlas por sí mismo con ciertas sustancias químicas y con la ayuda del agua de la lluvia y el dióxido de carbono en el aire. También se detecta en ciertos estudios (White, et al., 2001; Remmers, 2006) una **reducción de la permeabilidad** a lo largo del tiempo, pudiendo implicar esto de nuevo cierta capacidad autorreparadora de estos materiales.

Por otro lado, se distinguen dos aproximaciones en torno a la reparación del hormigón. La primera de ellas es la de **autosellado**, en el cual las grietas que permiten filtraciones son selladas, mientras que no hay recuperación de las propiedades mecánicas. Por otro lado, la **autorreparación** del hormigón consiste en una recuperación de propiedades como la rigidez o la permeabilidad entre otras (Glanville, 1993).

En general, se puede distinguir también entre otros dos tipos de reparación en hormigones, la **reparación no autógena**, que es aquella en la que el agente reparador forma parte del material como un agente externo, y la **autorreparación autógena**, en la cual es el propio material el encargado de generar el agente reparador. Dentro de la autorreparación autógena del material se pueden encontrar seis atributos que son importantes para que esta pueda ser llevada a cabo de forma funcional (Van der Zwaag, 2007). Estos son:

- **Disponibilidad:** implica que el mecanismo esté listo para la activación cuando sea necesario.
- **Estabilidad:** que el mecanismo permanezca activo durante la vida de la estructura.
- **Factor económico:** que sea económicamente factible dentro del mundo de la construcción, en el que se usan diariamente grandes volúmenes de material.
- **Fiabilidad:** consiste en un funcionamiento del mecanismo autorreparador que se base en una autoreparación consistente y fiable de las estructuras.
- **Calidad:** que el material recupere las propiedades mecánicas y de transporte tal y como eran antes del proceso de daño.
- **Repetibilidad:** que el material sea capaz de autorrepararse en repetidas ocasiones.

Con todo esto, se puede ver cómo la autoreparación no es más que una complicada sucesión de **procesos químicos y físicos**, en la que las principales causas que pueden llevar a ella sin la necesidad de añadir sustancias externas son (Aliko-Benítez, 2017):

- Formación de carbonato cálcico o hidróxido de calcio.
- Bloqueo de las grietas mediante impurezas presentes en el agua y partículas del hormigón.
- Posterior hidratación de partículas de cemento que en la hidratación original quedaron sin reaccionar.
- Expansión de la matriz de cemento a lo largo de los flancos de la grieta.

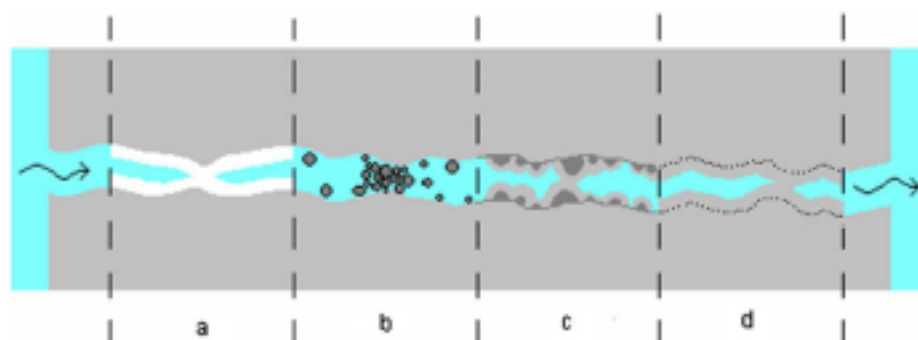
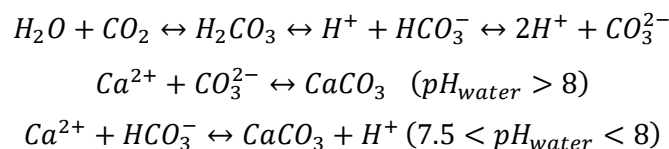


Figura 1-2. a) carbonato de calcio. b) partículas del hormigón. c) hidratación a posteriori de las partículas de cemento no hidratado. d) expansión de la matriz de cemento. (Aliko-Benítez, et al., 2015)

En cuanto a los distintos mecanismos usados para autorreparar, a modo de introducción se van a mencionar y explicar brevemente alguno de ellos (Aliko-Benítez, 2017):

- **Fibras huecas:** consiste en la utilización de fibras huecas repartidas de manera homogénea a lo largo de una matriz de cemento, de manera que estas fibras están rellenas de algún tipo de agente reparador. Cuando se produce algún daño en forma de grieta, se rompen estas fibras, soltando el agente reparador, que por acción de la gravedad y la capilaridad típica de la matriz de cemento, alcanza la grieta y la cierra, consiguiendo la reparación de la misma.
- **Microencapsulamiento:** consiste en unas cápsulas sólidas que forman una capa inerte que lo separa del medio exterior, y dentro de las cuales existen gases o líquidos con el agente reparador. El mecanismo de reparación es similar al de las fibras anteriormente explicadas, al propagarse la grieta rompe las microcápsulas y estas vierten su contenido. La principal diferencia entre las fibras y las microcápsulas es que en las primeras el componente interno se considera como un agente externo al material, es decir, no forma previamente parte del mismo, mientras que en las cápsulas lo que se tiene dentro es una sustancia que se aísla del exterior para evitar posibles reacciones indeseadas con las sustancias presentes en el propio material (Ghosh, 2006).
- **Agente expansivo:** consiste en usar agentes que se expandan cuando interaccionan con el agua para recuperar las grietas. El principal problema que esto acarrea es la posible activación de los agentes reparadores antes de tiempo, lo cual puede provocar que no se activen cuando se produzca daño en la matriz o que aumenten el daño producido en la misma.
- **Bacterias:** básicamente consiste en provocar la autorreparación a través de técnicas de reparación biológicas, introduciendo ciertas bacterias que colaboren con la formación de carbonato de calcio (CaCO_3), pues este se produce como parte de su metabolismo.

Finalmente, fuera de esta lista se destaca el mecanismo de reparación más importante hoy en día, el cual no es más que la **formación de precipitados de carbonato de calcio** (Neville, 2002; Edvardsen, 1999; Cowie & Glassert, 1992). Este mecanismo requiere una serie de pasos para que se produzca de forma satisfactoria. Debido a que en el cemento existen partículas que no han sido hidratadas durante la fabricación del mismo, y tras distintos procesos de adición de agua, el hidróxido de calcio es liberado. Se liberan iones de calcio que reaccionan con el dióxido de carbono disuelto en el agua, de manera que se forman precipitados de calcio que van desde los bordes de la grieta hasta rellenar los huecos dejados por la misma (Aliko-Benítez, 2017). Se añade de manera explicativa la reacción química que tiene lugar:



Para finalizar con este bloque, se hace énfasis en que los métodos de autorreparación autógena son los más económicos, y por ello los más útiles a la hora de su puesta en marcha en comparación con los no autógenos, tales como el microencapsulamiento o el uso de microorganismos (Fadrique Contreras, 2017). Pese a esto, la fiabilidad y la repetibilidad de los mecanismos de autorreparación autógena son aún desconocidos, por lo que la aplicación de estos materiales es hoy en día imposible, optándose por la utilización de materiales tradicionales.

Numerosos estudios han puesto de manifiesto las condiciones necesarias que se deben cumplir para que se pudiesen utilizar los materiales autorreparables autógenos. Se deberían dar condiciones adecuadas de concentración de determinadas sustancias químicas; las condiciones en las que se podría producir la autorreparación irían desde exposición permanente al agua (el material debería estar sumergido o expuesto a altos grados de humedad) hasta ciclos húmedos y secos y, por último, el CWs (ancho de la grieta) deberían estar por debajo de 200 μm , el cual es el criterio más difícil de lograr. (Fadrique Contreras, 2017)

2 MECÁNICA DEL DAÑO CONTINUO

A la hora de llevar a cabo el estudio de los materiales conocidos como **autorreparables**, resulta interesante distinguir entre dos etapas o procesos distintos a los que se ven sometidos. En primer lugar, estarán sometidos a una **etapa de daño** y, posteriormente, se verán expuestos a un **proceso de recuperación o "healing"**. Por simplicidad del proceso, resulta interesante destacar que estas etapas se considerarán independientes, es decir, no se producen de forma simultánea en ningún momento, por lo que primero tendrá lugar la etapa de daño, tras finalizar la anterior, se llevará a cabo la de "healing". Dado este matiz, resulta necesario introducir la **mecánica clásica del daño continuo**, en la que el daño es considerado como una variable irreversible, de manera que la primera etapa de las dos comentadas estará dominada por esta variable.

El fenómeno de daño representa discontinuidades en la superficie en forma de **microgrietas** o discontinuidades en el volumen en forma de **microcavidades**. La preocupación por modelar el progresivo deterioro de un material es un hecho relativamente novedoso, cuyo desarrollo ha tenido lugar en los últimos años (Lemaitre & Chaboche, 1990).

2.1 Mecánica del daño continuo irreversible

Los orígenes del estudio de la **Mecánica del Daño Continuo** (MDC) se deben a Kachanov, el cual fue su precursor, comenzando su estudio en 1958 (Kachanov, 1958), aunque posteriormente su teoría fue modificada por Rabotnov, en 1969 (Rabotnov, 1969). Como se ha comentado a lo largo de este documento, las estructuras utilizadas en las diversas construcciones que se llevan a cabo sufren un deterioro con el tiempo, por lo que serán necesarias importantes tareas de mantenimiento y revisión. Este deterioro está totalmente relacionado con el concepto de **daño**, que a su vez va ligado con la aparición de grietas, ya sea a nivel microscópico como a nivel macroscópico. A la hora de intentar desarrollar un material con la capacidad de autorreparar estos defectos que se producen, es necesario determinar una serie de variables que nos permitan representar dichos defectos. Esta tarea se realiza mediante la mecánica del daño continuo, en la que se lleva a cabo el modelado del deterioro progresivo del material que precede a la fractura macroscópica, para lo que se utiliza la variable denominada **daño** (Aliko-Benítez, 2017).

La definición de una variable mecánica de daño presenta dificultades, ya que en algunos materiales no existe prácticamente nada que a nivel macroscópico distinga un elemento de volumen muy dañado de uno en estado virgen, mientras que en los materiales cuasi-frágiles, como puede ser el hormigón, la zona de proceso de fractura, la cual es de unos milímetros de tamaño, es claramente apreciable en forma de grietas visibles. No obstante, considerando un volumen de material en el que se aísla un elemento finito de volumen con unas dimensiones suficientes respecto a las inhomogeneidades del material se puede definir esta variable (Lemaitre & Chaboche, 1990).

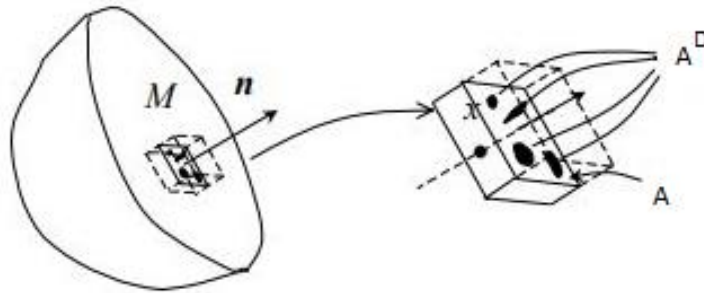


Figura 2-1. Elemento finito de volumen aislado del volumen total (Luccioni, 2003).

Si se considera una sección de material dañado de área A (área nominal), la cual está definida por su normal \vec{n} , resultando comprensible que contendrá grietas y cavidades, y por otro lado se considera lo que se denomina **área efectiva**, es decir, el mismo área pero sin considerar los defectos que contiene, de forma que $\bar{A} < A$, se llega así a la conclusión de que el área correspondiente a los defectos, grietas, cavidades, etc, sería $A^D = A - \bar{A}$. Teniendo todo esto en cuenta, se llega a la definición de la variable daño, la cual puede ser obtenida como:

$$\phi = \frac{A^D}{A} \quad (2-1)$$

En lo que a la variable daño recién definida se refiere, esta representa una medida del daño local, relativo al área A , de manera que $\phi = 0$ corresponderá a material sin daños, mientras que $\phi = 1$ será el correspondiente con la fractura en dos partes del volumen inicial a través de la superficie de normal \vec{n} (Aliko-Benítez, 2017). Teniendo esto en cuenta se llega a la conclusión de que $0 \leq \phi \leq 1$. Dado que el problema se vuelve más complicado al tener en cuenta que el daño sería una variable anisótropa, ya que se produce en determinadas direcciones preferentes, se considera oportuno simplificarlo mediante la **hipótesis de isotropía**, asumiendo que grietas y cavidades se distribuyen de forma homogénea a lo largo de las superficies. Otra simplificación que se consigue con esto, es que la variable daño no dependa de la normal de la superficie, por lo que queda totalmente definida mediante el escalar ϕ . (Kachanov, 1958; Rabotnov, 1969).

La introducción de una variable daño representando la superficie de discontinuidades del material lleva directamente a la necesidad de definir el tensor de tensión efectiva, $\bar{\sigma}$. Este representa la tensión calculada sobre la sección que soporta de manera efectiva las fuerzas. Teniendo todo esto en cuenta se llega a la expresión (Voyiadjis & Kattan, 1990; Lemaitre & Chaboche, 1990):

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - \phi} \quad (2-2)$$

Con el objetivo de simplificar el entendimiento de los distintos desarrollos que siguen, se puede definir a continuación el módulo tangente de rigidez, el cual viene dado por:

$$D = \frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon} \quad (2-3)$$

En este caso se usa el módulo tangente de rigidez en lugar del módulo secante de rigidez, el cual se suele usar en los estudios de la mecánica de daño continuo, porque este recoge la respuesta no lineal de los materiales de una forma más sencilla, por lo que suele usarse con propósitos de implementación numérica (Darabi, et al., 2012). Esto puede verse claramente representado en la siguiente imagen:

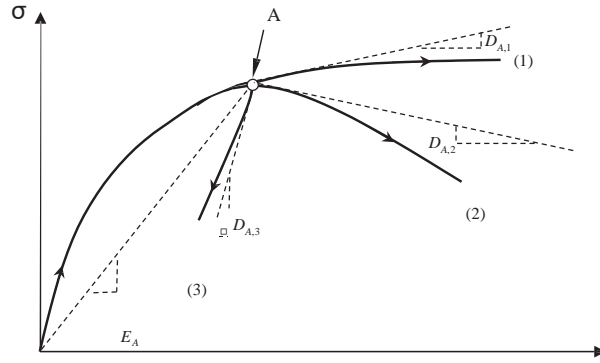


Figura 2-2. Esquema de tres posibles caminos para el punto A en una curva tensión-deformación (Darabi, et al., 2012).

En esta imagen se pueden ver tres caminos distintos que podría tomar una curva tensión-deformación a partir de un determinado punto “A”. Como se puede observar, usando el módulo de rigidez secante (**E**) en ese punto no se podría distinguir entre esos tres caminos, mientras que usando el módulo de rigidez tangente (**D**) serían fácilmente reconocible cada uno de ellos, es por eso que se usa el módulo de rigidez tangente en esta primera parte del análisis. Para ambos módulos de rigidez se puede escribir lo que sigue:

$$\sigma = E: \varepsilon \quad (2-4)$$

$$\dot{\sigma} = D: \dot{\varepsilon} \quad (2-5)$$

Donde $\dot{\sigma}$ y $\dot{\varepsilon}$ son las respectivas derivadas respecto al tiempo y el símbolo “:” es un operador matemático que implica doble contracción. En cuanto a la relación entre las deformaciones y tensiones efectivas se tiene:

$$\bar{\sigma} = \bar{E}: \bar{\varepsilon} \quad (2-6)$$

$$\dot{\bar{\sigma}} = \bar{D}: \dot{\bar{\varepsilon}} \quad (2-7)$$

A continuación, se realiza una hipótesis en aras de relacionar las tensiones y deformaciones en los casos nominales y efectivos:

- **Hipótesis de deformación equivalente:** el objetivo de esta hipótesis es relacionar las tensiones y deformaciones nominales con las efectivas. Se asume a que la deformación del material solo se ve afectada por el daño en términos de la tensión efectiva. Se establece así que las deformaciones en el caso nominal y en el caso efectivo son iguales. (Lemaitre & Chaboche, 1990):

$$\varepsilon = \bar{\varepsilon} \rightarrow \dot{\varepsilon} = \dot{\bar{\varepsilon}} \quad (2-8)$$

Usando ahora la Ecuación (2-2) y la Ecuación (2-7) se puede llegar a:

$$\dot{\sigma} = (1 - \phi) \bar{D} \dot{\bar{\varepsilon}} \quad (2-9)$$

Y finalmente con la Ecuación (2-9) y la Ecuación (2-5) se llega a la conclusión de que:

$$\mathbf{D} = (1 - \phi)\bar{\mathbf{D}} \quad (2-10)$$

3 MODELO IMPLEMENTADO

Para llevar a cabo la resolución del problema planteado, se propone un modelo mecano-físico-difusivo en el que, como se comentó anteriormente, se va a distinguir entre las etapas de **daño** y las etapas de “**healing**” o de reparación. Finalmente, se plantearía el acoplamiento entre ambas etapas.

Como ya se explicó en la sección anterior, el proceso de daño y el de reparación no ocurren al mismo tiempo, por ello se considera que mientras el material está siendo dañado, no está siendo reparado y viceversa. Se considera por tanto un **daño irreversible**, que ocurrirá durante la etapa de daño, y un **daño reversible**, el cual se tendrá tras el proceso de “*healing*”.

3.1 Modelo de daño: Concrete Damage Plasticity (CDP)

Cualquier estrategia de resolución de un problema de valores de contorno debe considerar modelos constitutivos avanzados. El concepto de “*Concrete*” (hormigón) supone un amplio abanico de materiales, cuyas propiedades son cualitativamente y cuantitativamente diferentes para los distintos tipos de ensayos, ya sean a tracción o a compresión.

En los últimos años, el modelado del fallo y la fractura se ha convertido en uno de los aspectos fundamentales en los mecanismos estructurales, especialmente en las estructuras de hormigón. El principal factor en la descripción del fallo es el descubrimiento de los **patrones de avance de las grietas**.

3.1.1 Comportamiento mecánico

El modelo de “*Concrete Damage Plasticity*”, abreviadamente **CDP**, es uno de estos posibles modelos constitutivos y, como se puede intuir, es un modelo continuo basado en la **plasticidad** que sirve para modelar el **daño** en el hormigón. Asume que los dos principales mecanismos de daño en el mismo son el agrietamiento por tracción y el aplastamiento por compresión. Como ya fue comentado anteriormente en la *Sección 2*, Kachanov (Kachanov, 1958) y posteriormente Rabotnov (Rabotnov, 1969), introdujeron la ecuación constitutiva de un material con daño escalar isótropo. Como se comentó en la *Sección 2*, se utilizaba el módulo de rigidez tangente, ya que es más usado cuando se requieren tareas de implementación numérica, debido a que es capaz de capturar de una forma más precisa la respuesta no lineal de los materiales (Darabi, et al., 2012). Pese a ello, se sabe que el módulo de rigidez secante, **E**, es más utilizado cuando se pretende capturar la **degradación de rigidez** que se produce debido a la evolución del daño. Por ello, se formulan las ecuaciones de la siguiente forma:

$$\sigma = (1 - \phi)E_o : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) = E : (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \quad (3-1)$$

Donde se recuerda que σ es el tensor de tensiones nominal, ϕ es la variable escalar daño, ε es el tensor de deformaciones, E_o es el módulo de rigidez inicial y E es la rigidez elástica degradada. Además se puede deducir la siguiente relación:

$$E = (1 - \phi)E_o \quad (3-2)$$

Por otro lado, el tensor de tensiones efectivo vendría dado por:

$$\bar{\sigma} = \mathbf{E}_0 : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}) \quad (3-3)$$

Que se ha obtenido teniendo en cuenta la *Ecuación (2-2)*, y donde $\boldsymbol{\varepsilon}^{pl}$ es el tensor de deformación plástica. Para continuar con la formulación del modelo, es necesario establecer la evolución de la variable escalar **daño**, de manera que esta vendrá dada por:

$$\phi = \phi(\bar{\sigma}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}) \quad (3-4)$$

Por lo que se puede ver que estará dominada por el tensor de tensiones efectivas y por las variables de endurecimiento o ablandamiento $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}$, según el caso sea de tensión o de compresión, respectivamente. En el modelo de **CDP**, el daño es inicialmente isotrópico, y vendrá definido por la variable daño ϕ_c en las zonas a compresión, y por la variable daño ϕ_t en las zonas a tracción. Por esto, se puede llegar finalmente a la relación entre el tensor de tensiones nominales y el de tensiones efectivas, dada por:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - \phi)\bar{\boldsymbol{\sigma}} \quad (3-5)$$

Como bien es sabido, el daño puede ser a compresión o a tracción, y cada uno de ellos está caracterizado independientemente por dos variables de endurecimiento, $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl}$ y $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl}$, las cuales se refieren a las deformaciones plásticas equivalentes a tracción y compresión, respectivamente (Jankowiak & Lodygowski, 2005). Por su parte, su evolución vendrá dada por las siguientes ecuaciones:

$$\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} = \begin{bmatrix} \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_c^{pl} \\ \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_t^{pl} \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}}^{pl} = h(\bar{\boldsymbol{\sigma}}, \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl}) \cdot \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{pl} \quad (3-7)$$

Teniendo en cuenta estas expresiones y los conceptos de variables de endurecimiento, se puede entender que el agrietamiento en tracción y el aplastamiento en compresión vendrán dados por un aumento de estas variables de endurecimiento (o ablandamiento), controlando la evolución de la superficie de fluencia y la degradación de la rigidez elástica. También estarán íntimamente relacionadas con la **energía de fractura** necesaria para crear nuevas microfisuras. Por otro lado, el modelo supone que la respuesta uniaxial a compresión y a tracción del hormigón está caracterizadas por el daño plástico.

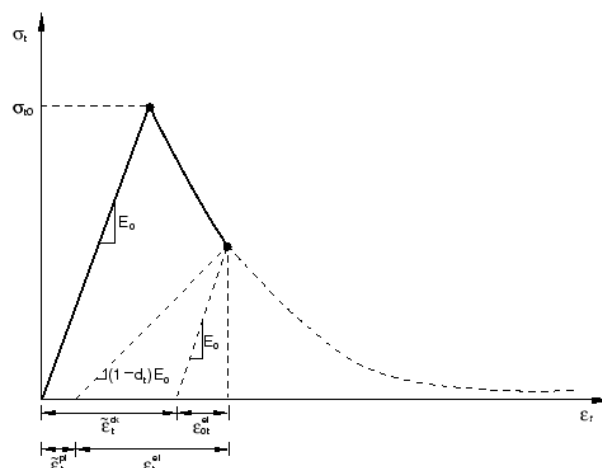


Figura 3-1. Respuesta del hormigón a carga uniaxial a tracción para el CDP (Guía de Abaqus, s.f.).

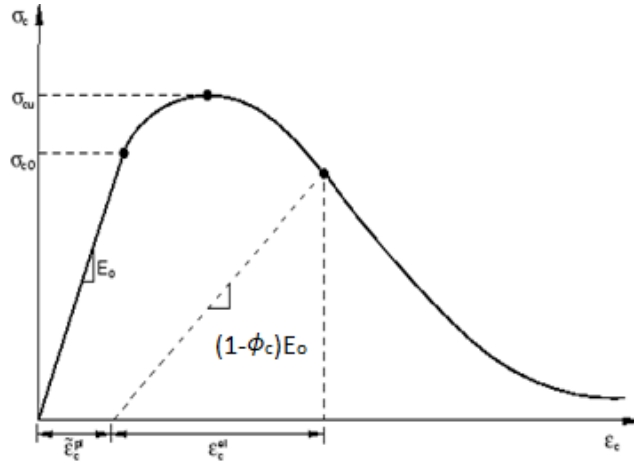


Figura 3-2. Respuesta del hormigón a carga uniaxial a compresión para el CDP (Guía de Abaqus, s.f.).

Como se observa, en tracción uniaxial la respuesta de la curva de tensión-deformación sigue una relación elástica lineal hasta el valor de la **tensión de fallo** σ_{to} , que se corresponde con la aparición de microgrietas en el material. Tras la tensión de fallo, la formación de microgrietas se representa macroscópicamente con una respuesta de ablandamiento de la curva tensión-deformación. Por su parte, bajo compresión uniaxial la respuesta será lineal hasta que se alcanza la **tensión inicial de fluencia** σ_{c0} . Por su parte, en la zona plástica la respuesta se caracteriza por un endurecimiento inicial, para posteriormente pasar a un ablandamiento de la respuesta tras la **tensión última** σ_{cu} . También se puede observar como al descargar el material desde algún punto de la zona de ablandamiento de la respuesta, se obtiene un comportamiento más débil, ya que la rigidez elástica del material se ha visto dañada o degradada. Esta degradación se mide con la ya comentada variable **daño**.

Los parámetros esenciales de cualquier modelo basado en la teoría clásica de la plasticidad son el criterio de fluencia (“Yield criterion”), la regla de flujo y la regla de endurecimiento (ablandamiento en el caso de compresión) (Lubliner, et al., 1989). Este criterio de fluencia se establece mediante la superficie de fluencia recién comentada, que representa una superficie en el espacio de las tensiones efectivas que determina el estado de daño o fallo, de manera que toma la forma de:

$$F(\bar{\sigma}, \tilde{\varepsilon}^{pl}) \leq 0 \quad (3-8)$$

Por su parte el flujo plástico vendrá gobernado por una función potencial de flujo, $G(\bar{\sigma})$ de acuerdo con una ley no asociativa. Esta función potencial de flujo también se define en el espacio de las tensiones efectivas (Jankowiak & Lodygowski, 2005).

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \lambda \frac{\partial G(\bar{\sigma})}{\partial \bar{\sigma}} \quad (3-9)$$

Por otro lado, la *Figura 3-1* y la *Figura 3-2* implican que la respuesta uniaxial a tracción y a compresión del hormigón se ven influenciadas por el **daño plástico**, lo cual constituye la base de este modelo. Estas respuestas en el modelo CDP vienen dadas por:

$$\sigma_t = (1 - \phi_t)E_o(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (3-10)$$

$$\sigma_c = (1 - \phi_c)E_o(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (3-11)$$

De donde se pueden obtener las tensiones efectivas, dadas por las siguientes expresiones:

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1 - \phi_t)} = E_o(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl}) \quad (3-12)$$

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1 - \phi_c)} = E_o(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (3-13)$$

Una posibilidad para especificar cómo va a ser el comportamiento tras fallo (“post-pico”) del material es como una función de “*cracking strain*” $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$, siendo esta la medida de la deformación inelástica a tracción, pudiéndose observar en la *Figura 3-1* y estando definida de la siguiente manera:

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{0t}^{el} \quad (3-14)$$

$$\varepsilon_{0t}^{el} = \frac{\sigma_t}{E_o} \quad (3-15)$$

Finalmente, a través de los resultados anteriores se consigue obtener los valores de **deformación plástica** mediante el uso de la siguiente relación (Lubliner, et al., 1989; Hillerborg, et al., 1976; Lee & Fenves, 1998):

$$\tilde{\varepsilon}^{pl} = \tilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{\phi_t}{1 - \phi_t} \frac{\sigma_t}{E_o} \quad (3-16)$$

Cuando se tienen en cuenta materiales estructurales tales como el hormigón, es necesario considerar o identificar un gran número de parámetros, de manera que el comportamiento del material dependerá de esos parámetros (Jankowiak & Lodygowski, 2005).

3.1.2 Parámetros constitutivos esenciales para el modelo CDP

En aras de obtener unos parámetros que definan el comportamiento de los materiales según el modelo de “*Concrete Damage Plasticity*”, se emplean una serie de ensayos. Se utilizan una serie de parámetros para describir la forma de la función del flujo potencial, β y m , y otros distintos para la identificación de la forma de la función de fluencia, f y γ . Teniendo esto en cuenta, el conjunto de los parámetros constitutivos consiste en cuatro valores, de manera que se considera para la función potencial de flujo la siguiente expresión:

$$G = \sqrt{(f_c - mf_t \tan(\beta))^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan(\beta) - \sigma \quad (3-17)$$

Donde f_t y f_c son las **resistencias uniaxiales a tracción y a compresión** del hormigón, respectivamente. Por su parte, β es el ángulo de dilatación medido en el plano p-q con alto límite de presión y m es una excentricidad de la superficie de potencial plástico. Como se ha dicho, esto está definido en el plano p-q, donde se tiene que $\bar{p} = -\frac{1}{3}\bar{\sigma}I$ es la tensión hidrostática efectiva y $\bar{q} = \sqrt{\frac{3}{2}\bar{\mathbf{S}}:\bar{\mathbf{S}}}$ es la tensión de Von Mises equivalente efectiva, mientras que $\bar{\mathbf{S}}$ es la parte desviadora del tensor de tensiones efectivo. (Jankowiak & Lodygowski, 2005)

Como se comentó anteriormente, en este modelo se usa una regla de flujo no asociativa. Este modelo usa una condición de fluencia basada en una función propuesta por Lubliner (Lubliner, et al., 1989):

$$F = \frac{1}{(1 - \alpha)} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \theta(\tilde{\varepsilon}^{pl})\langle\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}\rangle - \gamma\langle-\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}\rangle) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) \quad (3-18)$$

La forma de la superficie de carga viene dada por el parámetro γ , mientras que el parámetro α se calcula basándose en la curva conocida como curva de Kupfer. Por otro lado, $\bar{\sigma}_{m\acute{a}x}$ es el máximo valor propio algebraico de la tensión efectiva. Se puede observar en la ecuación también un operador denominado paréntesis de Macauley, el cual viene dado por $\langle x \rangle = \frac{1}{2}(|x| + x)$. Finalmente, la función $\theta(\tilde{\varepsilon}^{pl})$ viene dada por:

$$\theta(\varepsilon^{pl}) = \frac{\bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\varepsilon_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (3-19)$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{f_{bo}}{f_c}\right) - 1}{2\left(\frac{f_{bo}}{f_c}\right) - 1} \quad (3-20)$$

Donde se tiene que f_{bo} es la resistencia a compresión bajo cargas biaxiales del hormigón. Algunos valores experimentales de $\frac{f_{bo}}{f_c}$ están entre **1.10** y **1.16**, de manera que α toma valores en torno a **0.08** y **0.12**. (Lubliner, et al., 1989) Como se puede observar por tanto, el parámetro α dependerá tanto de la resistencia a compresión biaxial, como de la uniaxial (Jankowiak & Lodygowski, 2005). Para obtenerlo pues será necesario realizar sendos ensayos (Kupfer, et al., 1969).

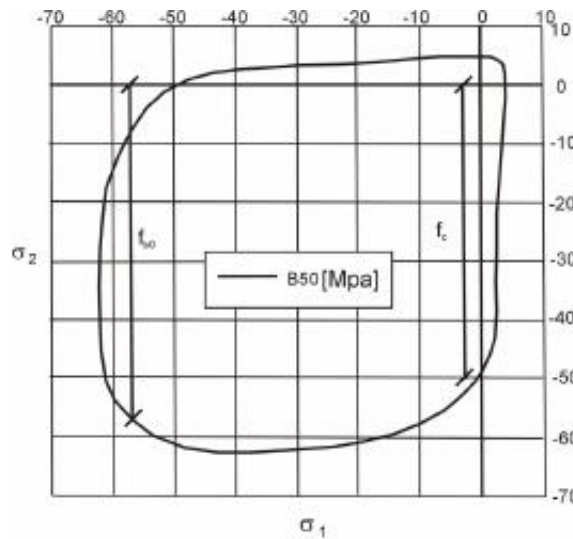


Figura 3-3. Curva de Kupfer (Kupfer, et al., 1969).

Una vez se obtiene α , β se obtendrá de la siguiente ecuación (Lubliner, et al., 1989):

$$\frac{f_{bo}}{f_c} = \frac{1 + \alpha + \beta}{1 - \alpha} \quad (3-21)$$

Por otro lado, para la determinación del parámetro γ será necesario realizar un test triaxial del hormigón a compresión, de manera que de acuerdo a (Lubliner, et al., 1989) vendrá dado de la siguiente forma:

$$\gamma = \frac{3(1 - \rho)}{2\rho + 3} \quad (3-22)$$

De manera que el coeficiente viene dado por $\rho = \frac{(\sqrt{J_2})_{TM}}{(\sqrt{J_2})_{CM}}$ y viene definido en un estado dado $\bar{\rho}$, siendo J_2 el segundo invariante de las tensiones, *CM* correspondiente a la notación “compressive meridian” ($\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$), y *TM* correspondiente con “tensile meridian” ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) (Guía de Abaqus, s.f.).

3.1.3 Definición de la energía de fractura

Cuando no se utilizan refuerzos en las estructuras, o al menos en una buena parte de ellas, la utilización del método anterior para aproximar el comportamiento “post-pico” introduce inestabilidades debido a la sensibilidad de la malla del software de elementos finitos con el que se desarrollarán los cálculos posteriores. Para solucionar esto, se introduce el modelo propuesto por Hillerborg, el cual define la energía necesaria para abrir una unidad de grieta (Hillerborg, et al., 1976).

Para llevar a cabo la definición de la **energía de fractura** el desarrollo se va a basar en los estudios realizados por Hillerborg (Hillerborg, 1978), en los que se hacen una serie de hipótesis previas:

- Cuando se aplica una tensión a tracción que aumenta desde cero, resulta en una serie de deformaciones ε , las cuales vienen gobernadas por la curva $\sigma - \varepsilon$. En el caso de dos y tres dimensiones se observa que afectarán también las tensiones y deformaciones en otras direcciones, pero la idea principal no cambia.
- La curva $\sigma - \varepsilon$ es válida únicamente hasta una deformación determinada ε_l . El valor de la tensión correspondiente con esta es la resistencia a tracción f_t . Ambos valores dependen de las tensiones y deformaciones en direcciones perpendiculares.
- Cuando las deformaciones superan el valor recién comentado, comienza a desarrollarse una zona de fractura en la que las tensiones experimentan un decrecimiento. Dentro de esta zona de fractura el desplazamiento correspondiente a la curva $\sigma - \varepsilon$ se denota por la letra w , que proviene de la palabra inglesa “width”, de manera que ya no tendría sentido hablar de deformación, sino de apertura de grieta, ya que se tendría un salto en desplazamientos. Finalmente, existe una relación entre σ y w mediante una curva $\sigma - w$.
- Se supone que la zona de fractura tiene una longitud inicial de cero en la dirección de la tensión principal de tracción y una longitud de w una vez que la zona se ha comenzado a desarrollar. Por este mismo motivo, la zona de fractura se puede suponer como una **grieta ficticia**, con capacidad de transferir tensiones de tracción, de manera que la tracción es una función del ancho de la grieta ficticia mencionada w .

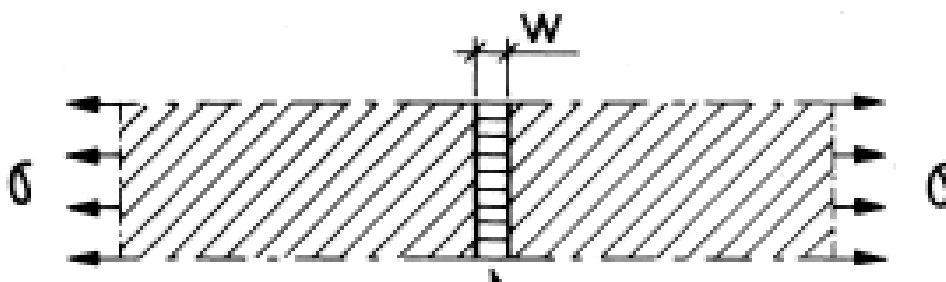


Figura 3-4. Grieta ficticia de la zona de fractura (Hillerborg, 1978).

Teniendo esto en cuenta, se necesitarán dos curvas para poder representar el comportamiento, la curva $\sigma - \varepsilon$ y la curva $\sigma - w$, siendo la primera válida hasta alcanzar el valor de ε_l y la segunda tras alcanzarlo.

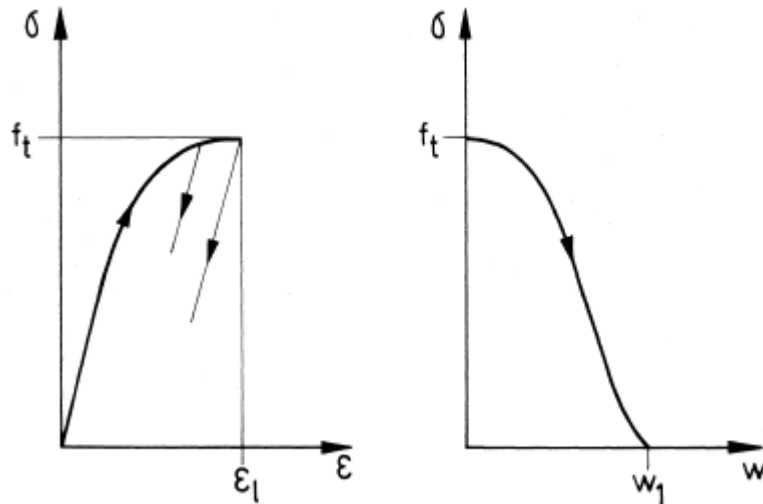


Figura 3-5. Curvas del modelo de energía de fractura propuesto (Hillerborg, 1978).

Como se ha dicho previamente, se puede visualizar la zona de fractura como una grieta ficticia con capacidad de transferir tensiones que dependen del **ancho de grieta ficticio** w . Por esto, en el borde de grieta ficticio se tendría $\varepsilon = \varepsilon_l$ y $\sigma = f_t$. Con esto, se puede entender que el borde de grieta ficticio es un límite entre las zonas en las que σ depende de ε y la zona en la que depende de w . Cuando aumenta la tensión, la grieta ficticia se agranda, al igual que su ancho. Cuando este ancho alcanza el valor de w_1 , las tensiones en ese punto desaparecen y la grieta se propaga.

Partiendo de esta explicación se puede llegar a la definición de **energía de fractura**. Cuando el ancho de la zona de fractura w se ve incrementado en un valor dw , se absorbe por unidad de área de la zona de fractura una energía igual a σdw . En la mecánica de fractura, la energía absorbida para formar una unidad de área de grieta se denomina G_F o **energía de fractura**, es decir, es la energía total absorbida cuando w pasa de cero a w_1 .

$$G_F = \int_0^{w_1} \sigma dw \quad (3-23)$$

Por lo tanto, el área bajo la curva $\sigma - w$ será correspondiente a la energía de fractura G_F . Esta es considerada como una propiedad del material y se implementará mediante los valores de las tensiones tras el fallo en función del desplazamiento de grieta, "cracking displacement" u_t^{ck} .

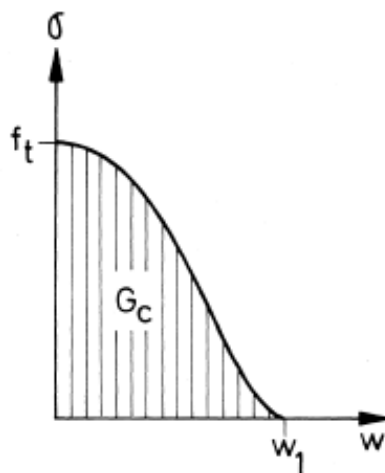


Figura 3-6. Representación gráfica de la energía de fractura (Hillerborg, 1978).

Para materiales como el hormigón, en el que no existe fluencia en tracción, la curva $\sigma - w$ es una **propiedad del material** y no depende significativamente del tipo de espécimen que se ensaya y de sus dimensiones. Empleando un modelo lineal que relacione la energía de fractura G_F , la resistencia de tracción f_t y el desplazamiento w , se llega a la siguiente expresión:

$$w = \frac{2G_F}{f_t} \quad (3-24)$$

De manera que relacionándolo con el daño plástico se obtiene el desplazamiento plástico como:

$$u_t^{pl} = u_t^{ck} - \frac{\phi_t}{(1 - \phi_t)} \frac{\sigma_t}{E_o} \quad (3-25)$$

4 INTRODUCCIÓN DEL ENSAYO EXPERIMENTAL DE REFERENCIA

Como se comentó anteriormente, la presencia de **grietas** es uno de los factores fundamentales que influyen en la **durabilidad** y en la **calidad** del servicio de las distintas estructuras, afectando a la resistencia, la permeabilidad y a la transferencia de propiedades. De acuerdo con este aspecto, se investiga la posibilidad de generar materiales **autorreparables**, lo cual afectaría incrementando la durabilidad de dichas estructuras. En algunos casos, para conseguir este tipo de materiales, es fundamental la presencia de componentes capaces de reaccionar con agua para reparar las zonas afectadas (Granger, et al., 2007). La forma más efectiva para cuantificar la autorreparación de una estructura es mediante la medición de la reducción del **ratio de permeabilidad** de las mismas. Ensayos basados en estos principios fueron ejecutados por Edvardsen (Edvardsen, 1999).

Como se comentó en secciones anteriores, el método en el que se basa este trabajo, así como los trabajos previos existentes (Edvardsen, 1999), es la cristalización de **precipitados de carbonato de calcio CaCO_3** . Otros tipos de experimentos para simular el efecto de la autorreparación fueron llevados a cabo por Jacobsen y Sellevold (Jacobsen & Sellevold, 1996). Finalmente, y dado que se han desarrollado muy pocos estudios para investigar el efecto de la autorreparación en las propiedades mecánicas, se destaca el trabajo realizado por Pimienta y Chanvillard (Pimienta & Chanvillard, 2004), en los que se muestran propiedades mecánicas de especímenes dañados en **“Three-Point Bending Tests”** y posteriormente sometidos a ciclos de autorreparación. Otros trabajos que muestran algunos resultados mecánicos de este tipo son los realizados por Heide (Heide, 2005)

El objetivo de este documento es simular un mecanismo de autorreparación en un tipo concreto de hormigón, de manera que los resultados en los que se basa el presente estudio se obtendrán de un artículo en el que se encuentra la tarea experimental previamente realizada por diversos autores (Granger, et al., 2007). Por ello, partiendo de los datos extraídos de este artículo se tratará de ajustar de la manera más precisa posible los parámetros del modelo de daño y plasticidad que se ha decidido utilizar.

Para tratar de clarificar lo máximo posible la geometría y condiciones del ensayo experimental que se quiere replicar, se va a introducir brevemente el artículo en el cual se ha basado el desarrollo. De esta manera, se va a explicar detalladamente el proceso que ha llevado a cabo el artículo de referencia, así como la geometría y características del espécimen utilizado en el mismo para, en secciones posteriores, explicar cómo se ha construido la geometría y cuáles han sido las condiciones y cargas impuestas en el presente trabajo mediante el software Abaqus 6.13.

4.1 Objetivo del ensayo experimental.

El artículo a tratar pretende investigar la autorreparación de grietas en **“Ultra High Performance Concrete” (UHPC)**. Para cuantificar este fenómeno, lleva a cabo un programa experimental basado en ensayos de permeabilidad de agua. Se considera el comportamiento mecánico del hormigón autorreparable bajo un ensayo de flexión en tres puntos. Por otro lado, también se lleva a cabo un análisis de emisiones acústicas para demostrar que la respuesta mecánica se debe a la precipitación de cristales en la grieta (Granger, et al., 2007).

Lo que pretende por tanto el artículo de referencia es generar un aporte adicional a los estudios previamente existentes en el campo de los materiales autorreparables y en relación con su comportamiento mecánico. Los ensayos que realiza incluyen probetas con entallas iniciales, así como la caracterización de su comportamiento mecánico tras diversas etapas de envejecimiento en distintas condiciones.

4.2 Configuración de los especímenes.

El ensayo experimental se lleva a cabo sobre UHPC con un coeficiente w/c de **0.2**, es decir, un hormigón con gran cantidad de cemento sin hidratar, de manera que este podrá contribuir enormemente a la autorreparación. La composición de este material incluye cemento, sílice, arena, agua y un superplastificante. Para tener una grieta localizada durante el ensayo se genera una entalla de **20 mm** de profundidad y de **1.5 mm** de espesor, mediante una lámina de PMMA, en el punto de su longitud transversal y perpendicular a esta.

Una vez se fabrican los especímenes, se curan durante dos días a **20° C** y una humedad relativa del **100%**, para posteriormente aplicarles un tratamiento térmico para acelerar la hidratación. Los especímenes luego se colocan en una cámara aclimatada a **90° C** y humedad relativa del **100 %** nuevamente por 48 h. (Granger, et al., 2007)

4.3 Configuración mecánica del ensayo.

El espécimen a tratar tiene una **grieta** inicial de 20 mm de profundidad y un espesor de **1.5 mm**, y las dimensiones generales del espécimen son de **50 × 100 × 500 mm³**. El objetivo será simular un proceso de carga, seguido por una posterior descarga, un proceso de envejecimiento que permita la autorreparación o no, un proceso de reparación y una nueva carga.

El análisis ha sido realizado con control de desplazamiento en un **“Three-Point Bending Test” (3PBT)** o ensayo de flexión en tres puntos, cuya configuración es la mostrada en la *Figura 4-1*, consiguiendo por tanto llevar a cabo un control sobre la apertura de grieta (**CMOD**). La descarga del espécimen también se realiza con control en desplazamiento, y por tanto control de **CMOD**. Esta apertura de grieta se mide mediante un sensor colocado entre dos placas de acero situadas cada una a un lado de la entalla y en la cara inferior del espécimen.

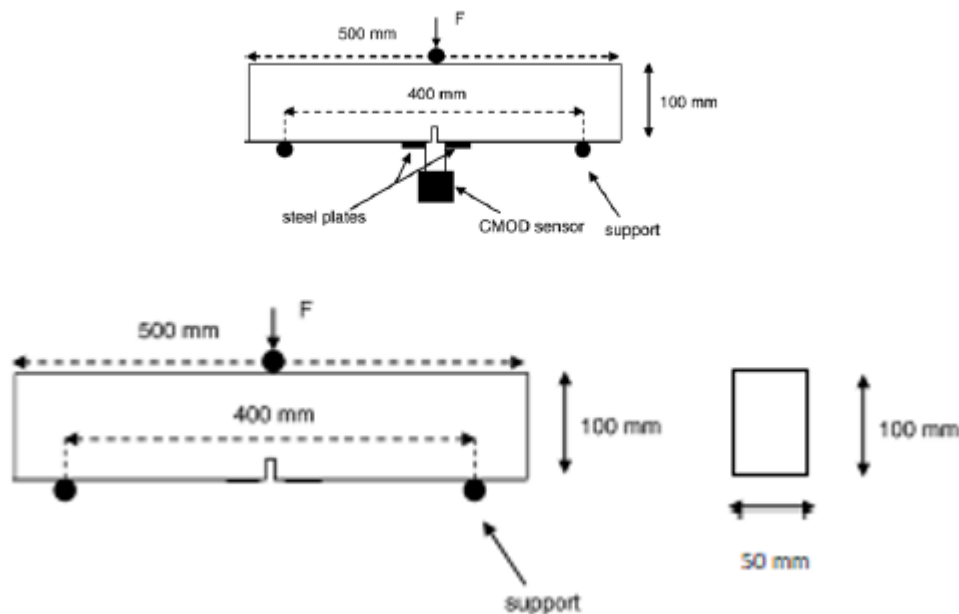


Figura 4-1. Configuración geométrica del artículo de referencia (Granger, et al., 2007).

En la *Figura 4-1* se observa que la distancia $S = 400 \text{ mm}$ (“*Span*”), siendo esta la distancia entre los apoyos del modelo. Por otro lado, se ve cómo la carga estará aplicada en la parte central superior de la viga. Finalmente, la descarga se lleva a cabo cuando la carga alcanza el valor de 2 kN, lo que se corresponde con un 60% de la carga del pico, la cual estará entre 3 kN y 4kN.

Tras llevar a cabo los procesos recién comentados, se guardan los especímenes en distintas condiciones de envejecimiento. Se escogen 5 periodos de tiempo de envejecimiento distintos, los cuales serán de 1, 3, 6, 10 y 20 semanas. Para cada periodo de tiempo se introducen unos especímenes en agua a 20°C, sin movimiento ni renovación de la misma, y otros especímenes se conservan en aire a 20°C y 50% de humedad relativa. Una vez que se llevan a cabo los ciclos de envejecimiento, se realiza una nueva carga de los especímenes bajo flexión en tres puntos para estudiar su comportamiento mecánico. Estos nuevos ensayos se hacen de nuevo bajo control de desplazamientos y hasta el fallo total del espécimen 2 horas después de terminar con el envejecimiento.

4.4 Caracterización mecánica de la autorreparación en grietas.

En el artículo de referencia se muestran 3 tipos de resultados, cada uno de los cuales se corresponde con curvas cuyo material ha sufrido procesos de envejecimiento distintos. Se tiene por un lado un material en el que se lleva a cabo una primera carga, y que por lo tanto se agrieta, y posteriormente se realiza la descarga e inmediatamente se vuelve a cargar (en el caso de la *Figura 4-2* se corresponde con “*cracking and immediate reloading*”). Por otro lado, se tienen otros dos especímenes que se someten a carga y descarga y sufren un envejecimiento en agua o en aire durante tres semanas antes de volverlos a cargar (“*cracking and 3 weeks ageing in water*” y “*cracking and 3 weeks ageing in air*”).

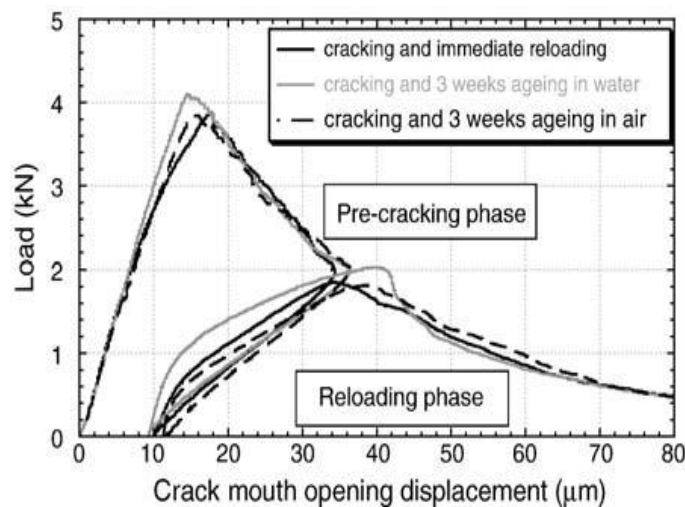


Figura 4-2. Comportamiento mecánico experimental de la probeta con grieta previa (Granger, et al., 2007).

Se pretende pues, observar las consecuencias del envejecimiento en agua frente a las de envejecimiento en aire y a las de no envejecimiento. Se puede ver cómo, la curva cuyo material ha sido envejecido en aire y aquella inmediatamente recargada sin envejecimiento, prácticamente muestran el mismo comportamiento mecánico. Por su parte, se puede ver cómo, en el espécimen envejecido en agua tras la carga y descarga inicial, existe una diferencia en la rigidez tras la recarga y en el pico tras la recarga. Esto no hace más que confirmar que efectivamente el agua es necesaria para la autorreparación (Granger, et al., 2007), pues esta recuperación de rigidez y por tanto de propiedades mecánicas es lo que se entiende puramente por autorreparación.

Con el objetivo de demostrar que estos resultados se deben a la autorreparación y no a otros posibles efectos del envejecimiento en agua, se introduce un espécimen en agua durante 10 semanas sin producirle daños previamente mediante la aplicación de cargas. Posteriormente, se lleva a cabo la carga, descarga e inmediata recarga, y se observa que el comportamiento es el mismo que en el caso en el que no había envejecimiento y el caso del envejecimiento en aire, por lo que se puede afirmar que los efectos que se observaban eran causados por la autorreparación.

Teniendo todo esto en cuenta, se está en disposición de explicar el método mediante el cual se ha implementado este ensayo en Abaqus, de manera que conociendo todas las características del mismo, las cuales se acaban de explicar, simplemente hay que replicarlo en el software de elementos finitos. Hay que recordar que el objetivo perseguido es replicar estas curvas recién comentadas mediante un método computacional de elementos finitos, por lo que es necesaria la comentada implementación del mismo en Abaqus.

5 IMPLEMENTACIÓN EN ABAQUS

El objetivo de este documento es simular un mecanismo de autorreparación en hormigones, basándose en resultados experimentales obtenidos como consecuencia de las investigaciones que se están llevando a cabo en este campo durante los últimos años (Granger, et al., 2007). Se pretende simular el comportamiento mecánico de este material, obtenido en estos estudios, mediante su implementación y sometido a un “*Three-Point Bending Test*” o ensayo de flexión en tres puntos en el software **Abaqus 6.13**.

Abaqus es un software usado en automoción, la industria aeroespacial y el sector industrial, que permite un amplio abanico de posibilidades en cuanto al modelado de materiales. Además, posee una gran flexibilidad en cuanto a la física de los problemas que permite resolver, lo que lo hace muy útil en aquellas aplicaciones en las que se mezclan varios campos del conocimiento.

5.1 Entorno de Abaqus

Abaqus es un software para análisis de elementos finitos, originalmente creado en 1978, que utiliza Python como lenguaje de programación. El núcleo de Abaqus consiste en 5 componentes fundamentales, de los cuales son brevemente explicados aquellos que se van a utilizar para una mayor comprensión del trabajo a desarrollar:

- Abaqus/CAE (*Complete Abaqus Environment*): no es más que una aplicación diseñada para modelar y analizar componentes mecánicos, lo cual se conoce como pre-procesamiento, y por otro lado visualizar los resultados de los análisis de elementos finitos, lo cual es conocido como post-procesamiento.
- Abaqus/Standard: es una aplicación de análisis de elementos finitos que únicamente utiliza integración implícita.
- Abaqus/Explicit: es una aplicación de análisis elementos finitos que utiliza estrategias de integración explícita para resolver sistemas altamente no lineales con contactos complejos y bajo cargas variables o transitorias.

La secuencia de trabajo que lleva a cabo este programa es sencilla. En primer lugar existe un proceso o etapa de modelado o pre-procesamiento, en el que se lleva a cabo la generación del diseño y la creación de los archivos de entrada necesarios para realizar un **análisis de elementos finitos**. Este proceso es desarrollado con *Abaqus/CAE*. A continuación, se lleva a cabo la tarea de procesamiento o de análisis, proporcionando archivos de salida y archivos visuales con las soluciones. Esta etapa corresponde a *Abaqus/Standard* o *Abaqus/Explicit* según el análisis que se quiera realizar. Finalmente, está la etapa de post-procesamiento, en la cual se permite la generación de tablas, imágenes, animaciones y otras aplicaciones a través de los archivos de salida previamente generados. Este proceso es realizado nuevamente con *Abaqus CAE*.

5.2 Implementación del modelo

El entorno de trabajo de Abaqus se divide en módulos, cada uno de los cuales sirve para llevar a cabo una determinada tarea en el modelado. A medida que se va avanzando por los distintos módulos, se va avanzando

también en la construcción del modelo, de manera que una vez se tiene completado este proceso, se generan los archivos de entrada previamente comentados.

5.2.1 Definición de la geometría.

Para llevar a cabo la definición de la geometría del modelo que se pretende analizar en Abaqus, se emplea el primer módulo que nos proporciona el programa, “Part”. Este módulo permitirá definir la forma del espécimen, ya sea en 2 dimensiones o en 3 dimensiones. En este trabajo, se van a llevar a cabo ambos tipos de análisis, cada uno de los cuales tendrá una determinada función. Como resulta entendible, el programa tardará **más tiempo** en llevar a cabo un **análisis de elementos finitos** en aquellos casos en los que haya **mayor número de nodos**, o en los que se implementen modelos más complejos, como puede ser un modelo de daño o un modelo de plasticidad. Como se ha comentado en la *Sección 3*, el modelo de daño empleado en este caso es el **CDP**, que es un modelo complejo ya que incluye **no linealidades** dado el comportamiento del hormigón. Por ello, un análisis en 3 dimensiones conllevará una gran cantidad de tiempo de cálculo, por lo que para obtener primeras aproximaciones a los resultados se va a emplear un análisis en 2 dimensiones, mucho más rápido de resolver, y posteriormente se refinarán los resultados mediante análisis en 3 dimensiones.

Por otro lado, la geometría en 2 dimensiones se corresponde con una sección de la geometría en 3 dimensiones a la que se le da un espesor ficticio. Por ello, se va a mostrar únicamente la geometría en 3 dimensiones. Para desarrollar esta geometría se indica que sea **deformable** y se construye mediante la opción de **extrusión**. Se recuerda que esta geometría es la de la *Figura 4-1*.

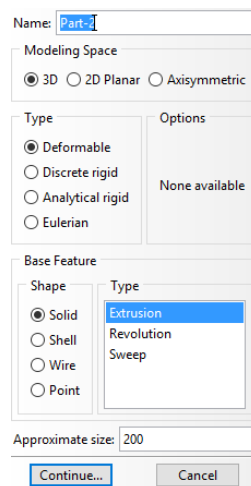


Figura 5-1. Parámetros a especificar para la geometría en Abaqus.

Por otro lado, en aras de conseguir un mallado más eficiente y como se comentará posteriormente, se realizan una serie de particiones en la pieza, de manera que esta quede dividida en varias partes o células. Esto se hace mediante la partición de la cara correspondiente a la célula que se quiera dividir y posteriormente prolongando el eje de partición de esa cara a toda la célula.

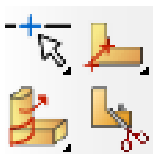


Figura 5-2. Herramientas de partición en Abaqus.

Finalmente, el resultado que se obtiene para la geometría es el siguiente:

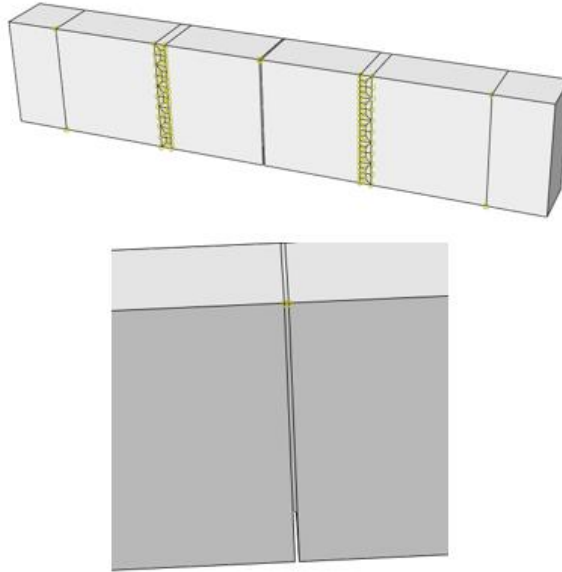


Figura 5-3. Geometría del espécimen en Abaqus.

En la *Figura 5-3* puede verse la geometría tridimensional que se construye junto a un mayor detalle de la grieta o entalla que posee la probeta antes de someterla a los ciclos de carga. Se aprecian en la imagen ciertos puntos cuya única finalidad es facilitar la realización de los elementos de transición del mallado, como se comentará posteriormente.

5.2.2 Definición del material.

El material que se pretende simular es un **UHPC** con un índice w/c cercano a 0.2. Teniendo esto en cuenta, se pasa a definir este material mediante el módulo de “*Property*”. En este módulo se establecen todas las propiedades básicas del material, además de aquellas que van a determinar el comportamiento plástico del mismo y el comportamiento sometido a daño.

En este módulo se seleccionarán la densidad del material, las propiedades elásticas y aquellas que determinan la plasticidad del mismo. Para este último caso, Abaqus proporciona la posibilidad de seleccionar el modelo de **CDP**, para el cual habrá que ajustar una serie de parámetros. Este ajuste se especifica en secciones posteriores a esta, *Sección 6*.

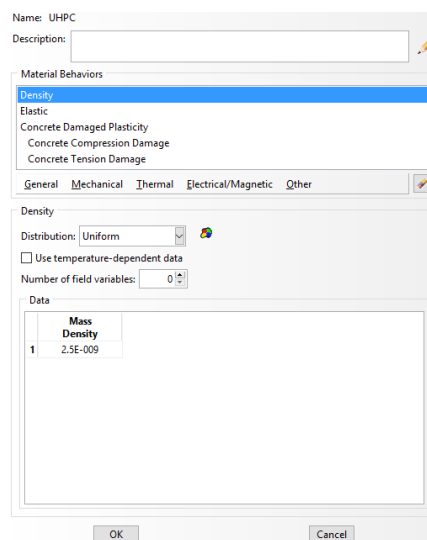


Figura 5-4. Definición del material en Abaqus.

Finalmente, y para terminar con este módulo, será necesario definir una sección del material y posteriormente asociar esta sección a la geometría previamente creada en el modelo. Esto simplemente se hace para asociar el material a la geometría, indicando de qué material está compuesta cada una de las partes del conjunto de la geometría. En el caso estudiado la geometría entera es de un **UHPC**, por lo que tendrá las mismas propiedades.

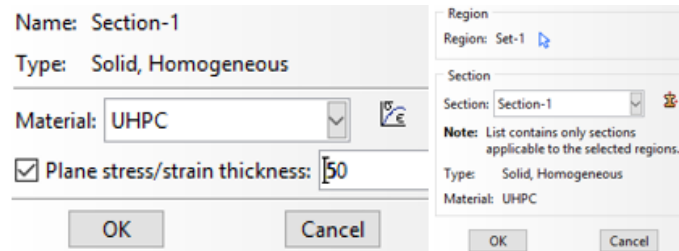


Figura 5-5. Creación de la sección en Abaqus y asignación de la misma.

En la imagen anterior, se puede apreciar que se ha creado al menos un conjunto o “Set”. Esto no es más que una selección que se realiza a partir del conjunto total de la geometría o el mallado, en aras de utilizarla de forma independiente respecto al conjunto total. En este caso el “Set 1” que se define se corresponde con el conjunto total de la geometría.

5.2.3 Mallado.

La malla es un componente fundamental del análisis, pues determinará el número de nodos y elementos que se utilizará en el método de elementos finitos. Para llevar a cabo esta tarea en Abaqus se emplea el módulo “Mesh”. Este módulo permite definir las semillas o puntos en los que va a ir un nodo en las distintas aristas del espécimen, el tipo de malla que se va a usar (estructurado, libre,..), el tipo de elementos a utilizar (2D, 3D, tetraédricos, hexaédricos, triangulares,..) y permite llevar a cabo el control de malla.

Puesto que este tipo de análisis son **fuertemente dependientes** del mallado utilizado, se considera oportuno mostrar el que se ha decidido usar en este documento. Pese a que se han llevado a cabo dos tipos de análisis, uno 2D, más simple y para obtener primeras aproximaciones de los parámetros a ajustar, y uno 3D, más complejo y para simular de forma más precisa el comportamiento real, ambos tienen una malla basada en las mismas consideraciones. Para aquellas zonas apartadas de la grieta que necesitan una menor precisión en los cálculos se ha optado por elementos de lado **10 mm**, mientras que para las zonas cercanas a la grieta se ha decidido refinar la malla mediante elementos de tamaño **5 mm**. El paso de un tamaño de malla a otro, se ha hecho de la forma más eficiente posible mediante una serie de **elementos de transición** tal y como se muestra a continuación.

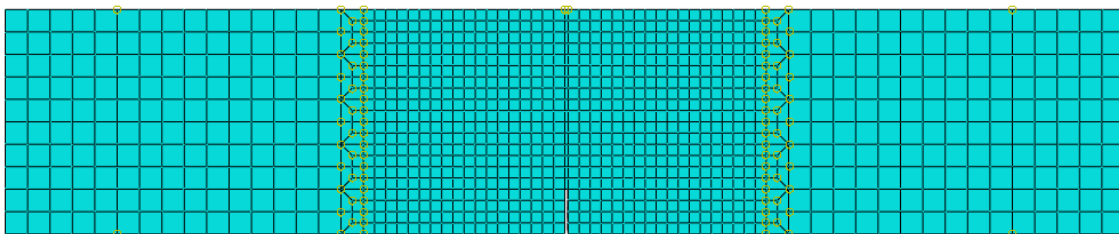


Figura 5-6. Malla de elementos finitos utilizada en el análisis 2D.

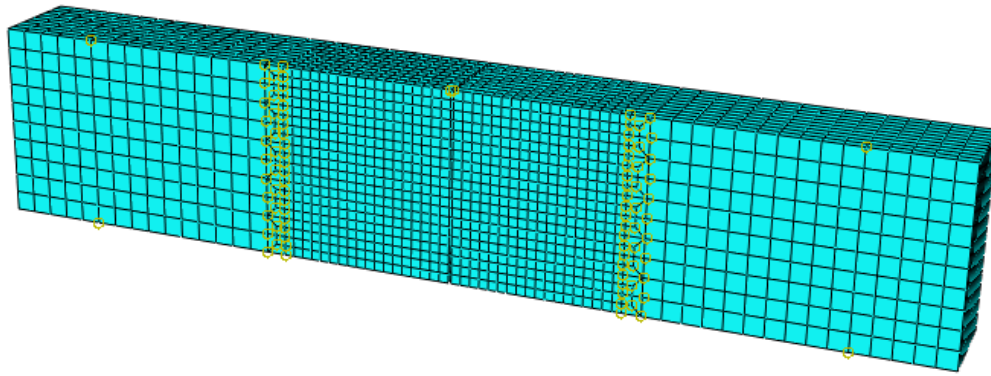


Figura 5-7. Malla de elementos finitos utilizada en el análisis 3D.

Cabe recalcar que el mallado que se ha empleado, como se puede observar, es estructurado, con elementos hexaédricos en el caso 3D y elementos cuadrangulares en el caso 2D, teniendo ambos casos un orden geométrico lineal. Es importante asignar un tipo de elemento Explícito, ya que el análisis que se va a realizar es de esta índole y que es necesario para abordar problemas no lineales, como se explicará en la siguiente sub-sección. En el ancho de la grieta se coloca un único elemento, de manera que este será más estrecho que los demás, midiendo **1.5 mm** en vez de **5 mm**. Será por tanto un elemento rectangular en el caso 2D, dado que la altura del mismo sigue siendo **5 mm**.

5.2.4 Definición de los “Steps”.

Existen dos tipos de “Steps” que se pueden utilizar en Abaqus. En primer lugar, el propio programa genera un tipo especial de “Step” al que denomina inicial automáticamente, no siendo posible modificar ninguna de sus características. En este paso se pueden definir condiciones iniciales, interacciones y cualquier campo aplicable desde el mismo comienzo del análisis. Por otro lado, existe lo que se conoce como “analysis steps”, que no son más que procesos específicos para definir el tipo de análisis que el usuario desea realizar. No existen límites en el número de “analysis steps” que se pueden establecer.

En el caso tratado, se define un único “Step” a parte del inicial. Dado que el problema a resolver incluye no linealidades propias del modelo “Concrete Damage Plasticity” que se va a utilizar, se opta por llevar a cabo un análisis Explícito. Se realizará por tanto un análisis dinámico explícito, donde otro de los parámetros fundamentales a establecer es el paso de tiempo. Según lo recomendado para este tipo de análisis se opta por usar un incremento de tiempo elemento a elemento.

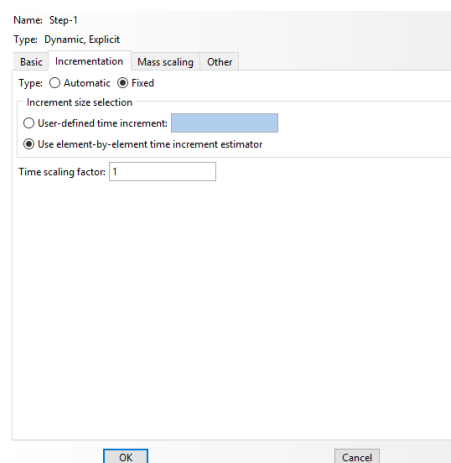


Figura 5-8. Definición del “Step” en Abaqus.

Otra de las funciones proporcionadas por este módulo es la posibilidad de crear historias de salida. Esto no es más que una forma de indicarle al programa lo que se quiere que calcule, de manera que se distinguen dos posibilidades: “*Field Output Request*” y “*History Output Request*”. La primera establece automáticamente una serie de cálculos, que dependerán del tipo de análisis y de propiedades del material que se hayan establecido previamente. Por su parte, las historias de salida se establecen en función de lo que se quiera calcular y obtener como variable de salida, en vista a su posterior manipulación en la etapa de post-procesamiento.

Para definir estas historias de salida, ha sido necesario crear varios “*Sets*”, cuya función se discutió previamente. Como ya se ha comentado, estos pueden ser geométricos o estar basados en la malla, por lo tanto pueden abarcar nodos o elementos. Dado que en el caso estudiado se va a llevar a cabo un análisis a flexión en tres puntos (“*Three-Point Bending Test*”), y dado que se quiere realizar una representación de la curva carga-apertura de grieta para compararla con otros resultados obtenidos en diversos estudios *Figura 4-2* (Granger, et al., 2007), las salidas que se van a pedir son: reacciones en los puntos de apoyo, desplazamiento vertical de los puntos de aplicación de la carga y desplazamiento horizontal de los puntos del borde inferior de la grieta. Dado que se va a llevar a cabo un **control en desplazamientos**, es decir, las “cargas” que se van a introducir serán en forma de desplazamiento, siendo el parámetro a indicar el desplazamiento final máximo $|v|$, no se tiene una medida directa de la carga aplicada. Por ello, se usarán las reacciones en los puntos de apoyo del espécimen, ya que la suma de estas debe ser igual a la carga total aplicada.

5.2.5 Condiciones de contorno y cargas.

Para llevar a cabo la definición, tanto de las cargas, como de las condiciones de contorno se va a hacer uso de los desplazamientos. Esto implica que se lleva a cabo un **control de desplazamientos**, por lo que, como ya se ha comentado anteriormente, será necesario medir las reacciones en los apoyos del espécimen para poder obtener la carga aplicada.

En cuanto a las condiciones de contorno se refiere, y dado que se va a llevar a cabo un “*Three-Point Bending Test*” *Figura 4-1*, se establecen dos, correspondientes con cada uno de los apoyos. En el apoyo izquierdo se restringirá el desplazamiento en las tres direcciones, dejando libre los posibles giros del mismo, mientras que en el apoyo derecho se restringen únicamente dos de los desplazamientos, dejando libres los giros y uno de los desplazamientos horizontales.

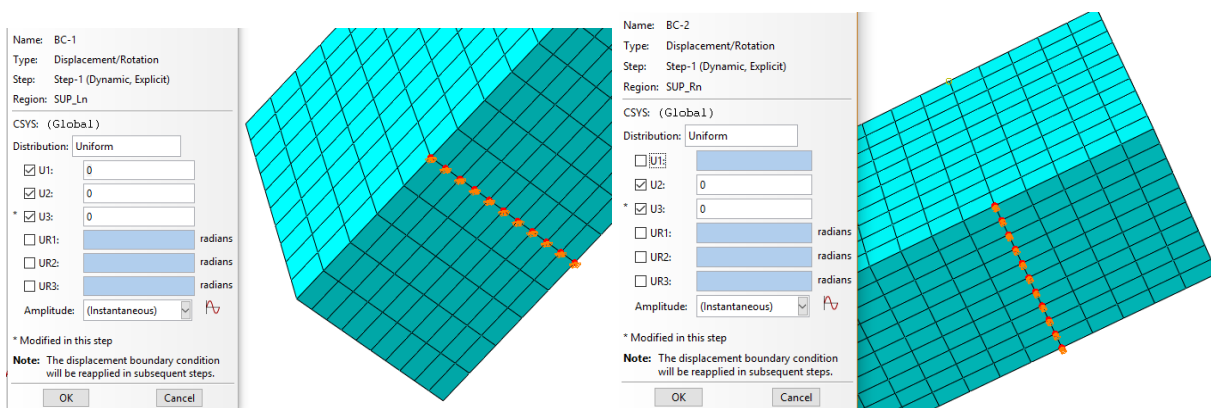


Figura 5-9. Condiciones de contorno del espécimen en Abaqus.

Por otro lado, la carga se va a definir como un desplazamiento. Con el objetivo de evitar desplazamientos excesivos o deformaciones excesivas en los elementos cercanos a la zona de aplicación de la carga (desplazamiento en este caso), se ha decidido utilizar un único elemento en la franja superior de la grieta aplicando el desplazamiento impuesto en dos puntos distintos de cada sección, los correspondientes a los nodos de las aristas superiores de la franja, como se puede ver en la *Figura 5-10*. El valor de la deflexión máxima que

se impone es de $|v|=4 \text{ mm}$.

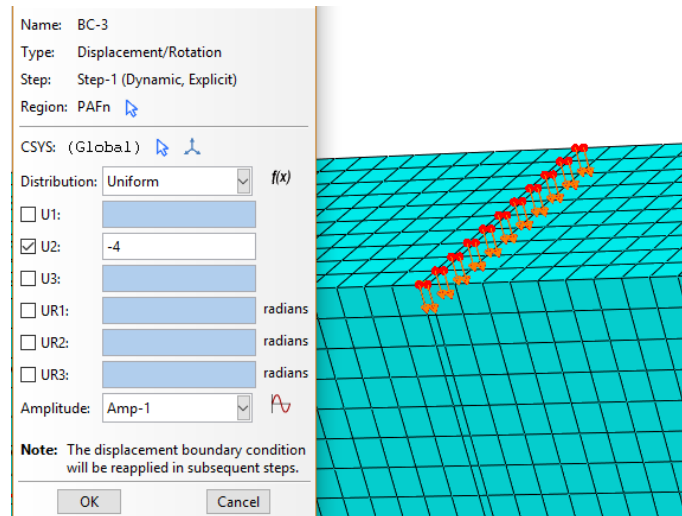


Figura 5-10. Desplazamiento impuesto en Abaqus.

Por otro lado, es importante tener en cuenta las definiciones de las amplitudes que se le da a las distintas condiciones de contorno y cargas. Estas amplitudes sirven para indicar cómo varían con el tiempo tanto las cargas como las condiciones de contorno. En el caso de las condiciones de contorno relativas a los apoyos, se sabe que estas se aplicarán antes de que se introduzca ninguna carga o desplazamiento en el espécimen, por lo que se introducen en el “Step” inicial. Además, como su amplitud es constante, se define una aplicación instantánea, como se puede observar en la Figura 5-9. En cambio, cuando se quiere imponer una carga que **variará con lo que se denominará pseudotiempo**, o en el caso tratado un desplazamiento, es necesario indicar cómo va a modificarse esta amplitud previamente comentada con el tiempo. Para ello, es necesario tener en cuenta en qué momento se quiere realizar la descarga. Esta descarga se llevará a cabo cuando en la zona “post-pico” de ablandamiento se alcance la carga correspondiente a un **60%** de la carga en el pico, es decir, lo que sería equivalente a **2 kN** (Granger, et al., 2007). Como puede verse, se ha utilizado el término pseudotiempo, lo cual es debido a que el tiempo al que se hace referencia, al tratarse de un problema cuasi-estático, no se refiere al tiempo real, sino al paso de integración que se usará en el software. Por ello, mediante la gráfica **P (carga)-pseudotiempo** y **desplazamiento impuesto (desplazamiento vertical, $|v|$)-pseudotiempo**, se puede obtener cómo debe ser esta variación.

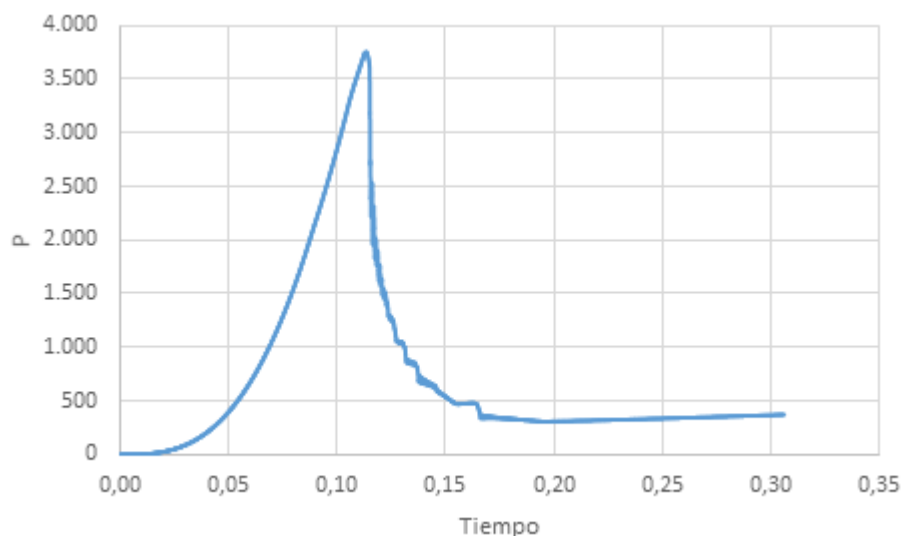


Figura 5-11. Carga frente a tiempo en Abaqus.

Como se observa pues en la imagen anterior, la carga equivalente a **2 kN** se alcanza para $t=0.116425$, siendo el tiempo total del “Step” de 1, es decir, en un 11% aproximadamente del tiempo total de ensayo. Teniendo en cuenta este tiempo, se puede ir a la gráfica **desplazamiento impuesto (desplazamiento vertical, |v|)-tiempo**:

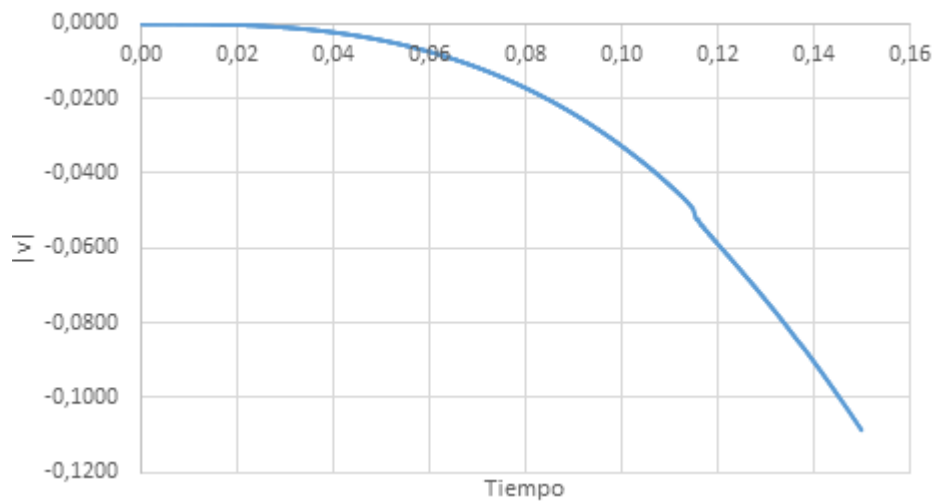


Figura 5-12. Desplazamiento impuesto frente a tiempo en Abaqus.

En esta se observa cómo para el 11% del tiempo se ha alcanzado un desplazamiento vertical de **0.05353 mm**. Dentro del software Abaqus, el valor a introducir es la amplitud de la carga total en cada instante de pseudotiempo. Teniendo en cuenta que, como puede observarse en la *Figura 5-10*, el desplazamiento total al final del pseudotiempo que se impone en la parte superior de la probeta es de 4 mm, se plantea la siguiente ecuación para obtener la amplitud necesaria a introducir:

$$4 \cdot amp = 0.05353 \rightarrow amp = \frac{0.05353}{4} \quad (5-1)$$

Tabla 5-1. Amplitud del desplazamiento impuesto.

<i>Time/frequency</i>	<i>Amplitude</i>
0	0
0.116425	0.0133825
0.2	0.0035
1	1

Respecto a la *Tabla 5-1*, es necesario mencionar que el tipo de evolución que se ha seleccionado es la configuración conocida como “smooth” la cual se caracteriza por ser suave. Esta configuración es escogida en aras de suavizar la evolución del desplazamiento para evitar posibles dificultades en cuanto a la convergencia de los resultados. Además asegura una mayor cantidad de puntos de tiempo en las zonas más delicadas del proceso, el inicio principalmente.

Además se puede observar cómo la descarga no llega hasta 0 en cuanto a la amplitud se refiere. Esto se debe a que en caso de que se alcanzase dicho valor se estaría incurriendo en tensiones negativas o de comprensión, y el caso que se pretende analizar solo incluye aquellas de tracción, por lo que se ajusta la amplitud en este punto para que las tensiones queden lo más cercanas a cero. Por otro lado, como se puede ver en los resultados experimentales que han sido expuestos en la sección anterior, la gráfica a replicar tampoco incurre en estas

tensiones negativas *Figura 4-2*, y el objetivo del presente estudio es aproximar lo más fidedignamente posible su comportamiento.

6 RESULTADOS

Recordando que el objetivo de este documento es ajustar los resultados experimentales de los que se dispone para posteriormente simular un mecanismo de autorreparación en hormigones, basándose en resultados obtenidos como consecuencia de las investigaciones que se están llevando a cabo en este campo durante los últimos años (Granger, et al., 2007), y teniendo en cuenta el proceso explicado anteriormente en la *Sección 5*, se lleva a cabo el análisis y ajuste del modelo empleado. Para ello, una serie de **parámetros** previamente presentados necesitarán ser **calibrados** de manera que los resultados que se obtengan mediante el software **Abaqus** se parezcan lo máximo posibles a los experimentales obtenidos de la literatura.

El ajuste de los parámetros necesarios para hacer funcionar el “*Concrete Damage Plasticity*” se llevará a cabo teniendo en cuenta la teoría expuesta en las *Secciones 2 y 3*, modificando aquellos valores que se consideren oportunos. Por ello, el trabajo básicamente consistirá en realizar varias **iteraciones** hasta alcanzar una solución que se considere lo suficientemente precisa.

6.1 Parámetros del modelo mecánico.

Como ya se ha comentado anteriormente, se pretenden simular los resultados obtenidos experimentalmente en (Granger, et al., 2007) mediante el uso del software **Abaqus**. Recordando el modelo mecánico utilizado en este documento (“*Concrete Damage Plasticity*”), cabe recordar que esta es una de las opciones que proporciona Abaqus para el análisis del daño y la plasticidad en hormigones. Para su correcto funcionamiento es necesario ajustar una serie de parámetros, algunos de los cuales se obtienen de referencias bibliográficas (Jankowiak & Lodygowski, 2005) y trabajos previos en este campo, mientras que otros se ajustan a los resultados que se desean conseguir.

En el presente estudio, se seguirán los resultados expuestos en la *Figura 4-2*, y solo son de interés el caso inmediatamente recargado, el cual es necesario para el ajuste inicial de los parámetros requeridos en el modelo de daño y plasticidad desarrollado, y el caso con envejecimiento en agua, que como ya se ha explicado, será un componente fundamental para la viabilidad de la autorreparación, y que además es el caso cuya simulación será perseguida tras llevar a cabo el ajuste inicial.

Como se comentó en la *Sección 3*, las superficies de fluencia, *Ecuación (3-14)* y la superficie de flujo plástico, *Ecuación (3-13)*, vienen determinadas por una serie de parámetros, para algunos de los cuales se acepta el valor predeterminado proporcionado por el programa, dado que proporcionan un buen ajuste de los resultados perseguidos. Los parámetros β y m describen la superficie de flujo plástico, mientras que f y γ describen la superficie de fluencia (Jankowiak & Lodygowski, 2005). Los valores de estos parámetros se obtienen de trabajos experimentales (Davies, 1996; Schlangen, 1993).

En primer lugar, un valor adecuado para el parámetro γ sería **0.667**, mientras que para definir el valor de $f = \frac{f_{bo}}{f_c}$ será necesaria la curva de Kupfer, *Figura 3-3*, se considera su valor por defecto, **1.16**. Por otro lado, el parámetro m , que es la excentricidad, se asume como **0.1**, lo cual implica que el material tiene aproximadamente el mismo ángulo de dilatación β , para un amplio rango de valores limitantes de las tensiones de presión. Incrementar el valor de m aumentaría la curvatura de la función de flujo, lo cual indicaría que el ángulo de

dilatación aumentaría más rápidamente cuando la limitación de presión se reduzca. Valores de la excentricidad menores al indicado podrían conducir a problemas de convergencia (Hillerborg, et al., 1976; Lee & Fenves, 1998; Lubliner, et al., 1989). Finalmente, el valor del ángulo de dilatación que se aceptará será de **38°**. Se comprueba en los resultados que se mostrarán posteriormente que estos valores aproximan de forma correcta el comportamiento buscado (Guía de Abaqus, s.f.).

Tabla 6-1. Parámetros relevantes

β	$f = \frac{f_{bo}}{f_c}$	m	γ
38°	1.16	0.1	0.667

Fijándose a continuación en la curva **P-CMOD** (carga-desplazamiento), se pueden hacer una serie de consideraciones, necesarias para poder llevar a cabo el correcto ajuste de los resultados.

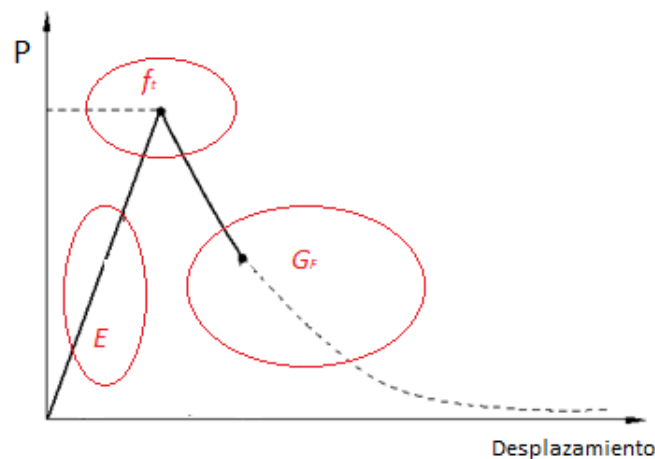


Figura 6-1. Gráfico carga- desplazamiento.

Como se puede observar, se distinguen cuatro zonas claramente. La primera, que es la **parte lineal** del comportamiento de hormigón, está dominada por el **Módulo de Young**, de manera que la forma de ajustar la pendiente de esta zona lineal será mediante la modificación de este parámetro, teniendo una mayor pendiente mientras mayor sea su valor, y una menor pendiente mientras más pequeño sea su valor. En segundo lugar, se tiene una **zona plástica**, cuyo ajuste se lleva a cabo con los parámetros comentados en los párrafos superiores. Por otro lado, el comportamiento del **pico** para el que se obtiene la **carga máxima** estará dominado por la **Resistencia a Tracción**. Como se sabe, esta se corresponde con la resistencia que ejerce el material ante la rotura cuando se carga a tracción. Como se observa por el comportamiento de la gráfica, al alcanzar la carga máxima o pico, se empieza a experimentar un ablandamiento, en el que al reducir la carga siguen aumentando los desplazamientos. Esto se debe a que el material sufre la fractura mediante la aparición de grietas, y por tanto el valor de la resistencia a tracción será el que controle este pico. Finalmente, la zona **“post-pico”** de la respuesta, viene dominada por la **Energía de Fractura**, cuya definición fue aportada en la *Sección 3*.

Para ajustar la zona “post-pico” hay que tener en cuenta la definición ya comentada de Energía de Fractura. Como se dijo, esta es la energía necesaria para formar una unidad de área de grieta, y es una propiedad del material. Teniendo en cuenta su definición, *Ecuación (3-22)*, es el área bajo la curva $\sigma - w$ de la *Figura 3-6*. Esta curva puede ser aproximada de diversas formas, dentro de las cuales se destacan dos: **aproximación lineal**, que será la forma más sencilla, y **aproximación bilineal**, que será una forma más compleja pudiendo ser más precisa que la anterior.

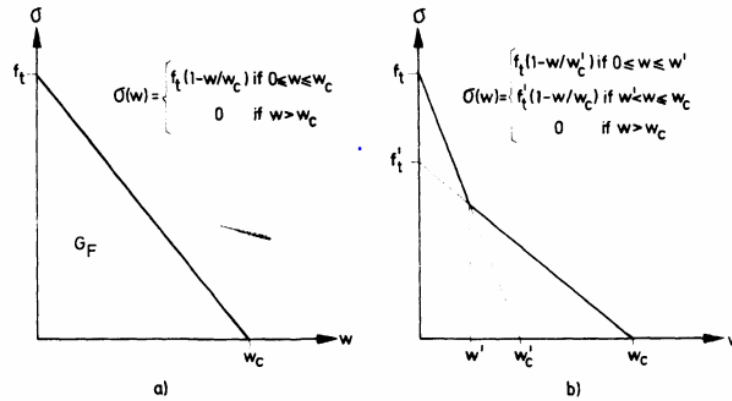


Figura 6-2. a) Aproximación lineal de la curva $\sigma - w$; b) aproximación bilineal de la curva $\sigma - w$. (Petersson, 1981).

En este documento se opta por el uso de la **aproximación lineal** debido a su mayor sencillez. Según este modelo, y como se acaba de mostrar, hay tres factores fundamentales en la curva: la Energía de Fractura G_F , el ancho de la grieta ficticia o desplazamiento w y la Resistencia a Tracción f_t . La relación existente entre estos valores se puede obtener sabiendo que la energía representa el área bajo la curva $\sigma - w$, tal y como muestra la *Ecuación (3-23)*, la cual se obtiene para el modelo lineal.

Para obtener un valor de la Energía de Fractura en un “*Three-Point Bending Test*” con una grieta o muesca inicial, hay que tener en cuenta que la cantidad de energía eliminada por la fuerza de carga y el peso debe ser igual a la cantidad de energía consumida por la propagación de la grieta, con lo que la fractura será un fenómeno estable (Petersson, 1981). Como se ha dicho también, esta Energía de Fractura es considerada como una propiedad del material, lo cual tiene dos criterios fundamentales: que sea independiente de la geometría del material, y que no se ve influenciada por el tipo de carga (Petersson, 1981). Usando los resultados de estudios anteriores, como pueden ser los realizados por Petersson en 1981, se puede considerar una buena primera aproximación de la Energía de Fractura un valor de **100 N/m**. Pese a que los resultados de Petersson no se corresponden con el mismo tipo de hormigón, debido a sus características parecidas pueden ser considerados en aras de realizar una primera aproximación. Por otro lado, el punto de partida para la Resistencia a Tracción, teniendo en cuenta que se está tratando un **UHPC**, puede obtenerse de otros estudios previamente realizados (Gheitanbaf, 2011; Kusumawardaningsih, et al., 2015). Se coge pues un valor inicial de $f_t = 4 \text{ MPa}$.

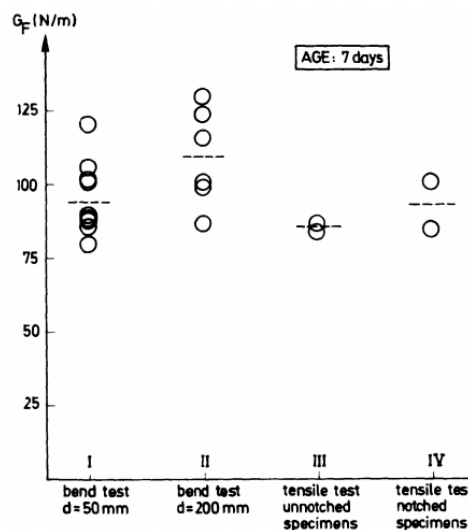


Figura 6-3: Valores de la energía de fractura para distintos tipos de especímenes (Petersson, 1981)

Cabe destacar que a la hora de llevar a cabo el ajuste se van a modificar el valor de f_i y el valor de $w_{m\acute{a}x}$, de manera que a partir de estos dos valores se irá calculando el correspondiente de G_F mediante la relación ya comentada. Teniendo en cuenta los valores iniciales escogidos para los distintos factores, $G_{F0}=100\text{ N/m}$, $f_{i0}=4\text{ MPa}$, se tiene que $w_{m\acute{a}x0}=0.05$. Se especifican algunas propiedades propias del material, necesarias para poder ajustar el modelo y que se toman como valores iniciales, extrayéndolos de estudios similares (Jankowiak & Lodygowski, 2005):

Tabla 6–2. Propiedades del material.

ρ	E	ν
2500 kg/m ³	31.7 GPa	0.18

Finalmente, existen un último concepto fundamental para la definición del modelo “Concrete Damage Plasticity” previamente mencionado, que es el daño a tracción del mismo. Este concepto se introduce de manera tabular.

6.2 Ajuste de la curva P-CMOD.

A continuación, se procede a realizar el ajuste de la curva experimental obtenida en (Granger, et al., 2007). Este ajuste se lleva a cabo debido a que los valores de los distintos parámetros que gobiernan el comportamiento mecánico de los especímenes ensayados no se indican en la literatura de referencia, por lo que se hace necesario realizar un ajuste de los mismos para poder replicar este comportamiento. Para ello, se ha hecho en primer lugar una captura de la curva experimental inmediatamente recargada tras la aparición de grietas mostrada en la *Figura 4-2*. En esta captura se ha eliminado la descarga y posterior recarga para una mayor simplicidad, pues en primer lugar se pretende ajustar los parámetros de la curva previamente mencionados.

6.2.1 Ajuste de E.

Como se puede observar en el apartado anterior, para el ajuste del Módulo de Young se parte de un valor de $E=31.7\text{ GPa}$. Para llevar a cabo este análisis se ha empleado un modelo 2D en el software de elementos finitos Abaqus, con la finalidad de simplificar la implementación. Todos los resultados obtenidos se extenderán posteriormente a un modelo 3D, pues es el que se quiere replicar, mostrando nuevamente los datos obtenidos. En la siguiente imagen se puede apreciar el ajuste de este parámetro, de manera que al aumentar su valor aumenta la pendiente de la zona lineal, como bien es sabido de la teoría.

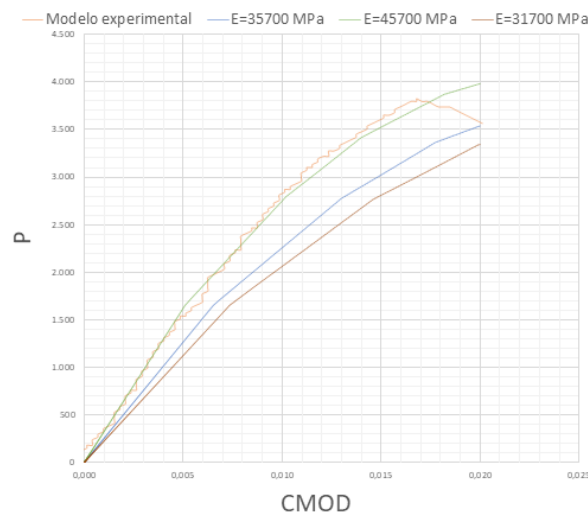


Figura 6-4. Ajuste de E

En la *Figura 6-4* se aprecia que un buen valor para el módulo de Young sería de **45.7 GPa**, pues puede verse como para este resultado se obtiene una muy buena aproximación de la pendiente. Por ello, se considerarán los siguientes valores a partir de este punto:

Tabla 6-3. Propiedades del material actualizadas tras el ajuste de E.

ρ	E	ν
2500 kg/m ³	45.7 GPa	0.18

Se observa también como la curva ha sido cortada en torno al punto de carga máxima, pues lo que interesa en este apartado no es más que la zona lineal, ya que esta será la controlado por el Modulo de Young.

6.2.2 Ajuste de G_F y f_t .

Como ya se ha comentado, se va a proceder al ajuste de G_F y de f_t de forma simultánea mediante la siguiente expresión:

$$w = \frac{2G_F}{f_t} \quad (6-1)$$

Al igual que para el ajuste del Módulo de Young, para llevar a cabo esta tarea en Abaqus, se va a usar inicialmente un análisis 2D, pese a que el que se pretende realizar como objetivo del trabajo sea 3D. La diferencia entre ambos tipos de análisis no es más que la geometría, que será considerada como 2D y 3D en cada uno de los casos, al igual que los elementos necesarios para la implementación del método de los elementos finitos, de manera que en el caso 2D serán elementos cuadrangulares con 4 nodos, mientras que en el caso 3D serán hexaedros de 8 nodos, en ambos casos se emplea un orden geométrico lineal. La razón de llevar a cabo esta simplificación de los análisis al comienzo del ajuste no es otra que los tiempos de resolución por parte del software son mucho menores. Una vez se obtienen valores cercanos a la solución, estos son empleados como valores de entrada en el análisis 3D, reduciendo así el tiempo total necesario para los cálculos. Una mejor explicación de las características de cada uno de los análisis ha sido proporcionada en la *Sección 5*.

Retornando al objetivo de ajuste del comportamiento y teniendo en cuenta la definición de cada uno de los valores, al aumentar f_t , aumentará el pico o la carga máxima en la curva P-CMOD, mientras que al aumentar w , aumenta G_F , aumentando pues el área bajo la curva $\sigma - w$. Teniendo todo esto en cuenta, se ajusta la curva modificando cada uno de los parámetros.

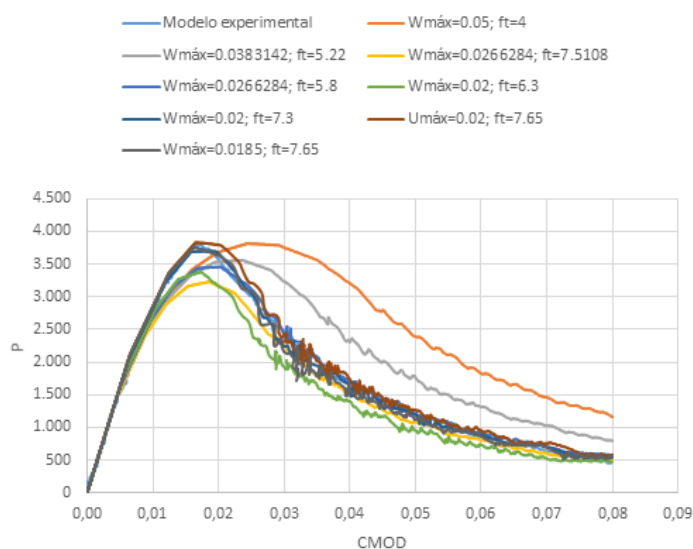


Figura 6-5. Ajuste 2D de G_F y de f_t .

De donde se obtiene la siguiente tabla que representa cada una de las iteraciones que se han llevado a cabo para obtener la primera aproximación.

Tabla 6-4. Ajuste 2D de G_F y de f_t .

f_t (MPa)	w (mm)	G_F (N/m)
4	0.05	100
5.22	0.0383142	100
7.5108	0.0266284	100
5.8	0.0266284	77.22236
6.3	0.02	63
7.3	0.02	73
7.65	0.02	76.5
7.65	0.0185	70.7625

Partiendo pues de los últimos valores de la *Tabla 6-4*, se pasa a realizar el ajuste 3D de la curva experimental. Los valores de partida serán por tanto $f_t = 7.65$ MPa, $w = 0.0185$ mm y $G_F = 70.7625$ N/mm.

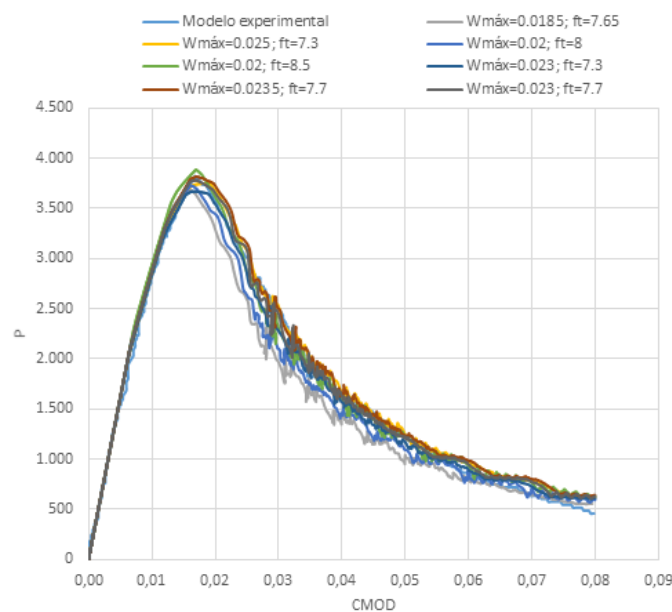


Figura 6-6. Ajuste 3D de G_F y de f_t .

De igual manera que en el caso anterior, se muestra una tabla en la que se recogen los datos de cada una de las iteraciones realizadas.

Tabla 6-5. Ajuste de w , de G_F y de f_t .

f_t (MPa)	w (mm)	G_F (N/m)
7.65	0.0185	70.7625
7.3	0.025	91.25
8	0.02	80
8.5	0.02	85
7.3	0.023	83.95
7.7	0.0235	90.475
7.7	0.023	88.55

Como se puede observar de los resultados obtenidos, la resistencia a tracción quedaría fijada en **7.7 MPa**, mientras que el desplazamiento o ancho de la grieta ficticia sería de **0.023 mm**. Esto proporciona un valor de la Energía de Fractura de **88.55 N/m**, de manera que como puede verse es un valor cercano a los que se tenían en consideración como datos de partida y por tanto puede ser considerado como válido (Petersson, 1981). Por otro lado, se tiene que el valor de la Resistencia a Tracción también está dentro del rango considerado como posible según se puede observar en diversos estudios (Gheitanbaf, 2011; Kusumawardaningsih, et al., 2015).

Se muestra pues en la *Figura 6-7*, el ajuste final al que se ha llegado sin tener en cuenta la descarga y posterior recarga del material. Como puede observarse, se ha conseguido una aproximación bastante exacta mediante el enfoque lineal del método de la Energía de Fractura, por lo que no se considera necesario probar el enfoque bilineal.

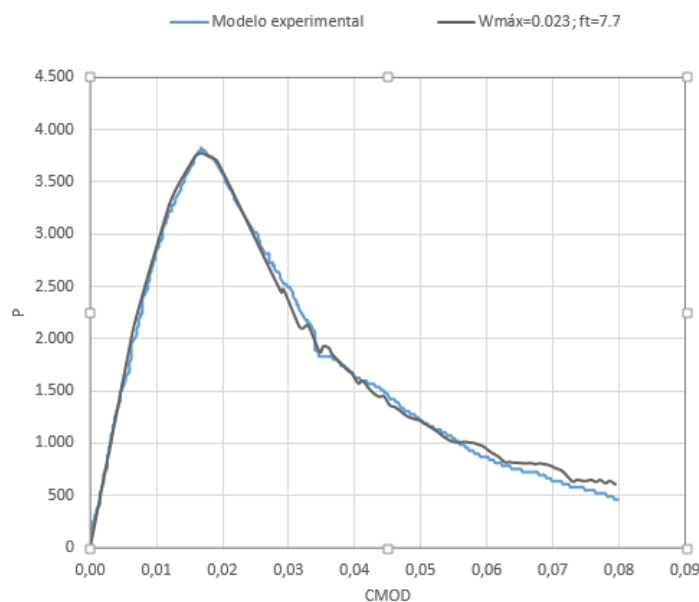


Figura 6-7. Ajuste final de E , f_t y G_F .

6.2.3 Ajuste de la descarga e inmediata recarga.

A continuación, se va a llevar a cabo el ajuste de la descarga y la recarga en la zona “post-pico” de la curva P-CMOD de comportamiento del material. Para llevar a cabo esta tarea hay que tener en cuenta diversos factores aún no mencionados. En primer lugar, este ajuste va a ser realizado sin considerar los procesos de “healing”, de manera que se tendrá una descarga seguida por una nueva carga del espécimen y, en estudios posteriores, se hará este mismo proceso pero incluyendo la etapa de “healing”, pudiendo así comparar el resultado en ambas

circunstancias.

Por otro lado, recordando la *Figura 3-1* y la *Ecuación (3-12)*, se podían observar dos variables influyentes en la descarga, $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ y $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$. Como puede verse, $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$ se correspondería con el caso en el que la descarga se produce sin la pérdida de rigidez característica del proceso, materializándose esto en una descarga paralela a la etapa elástica de la primera carga. Considerando E como el Módulo Elástico de la segunda descarga y E_0 como el inicial, en este caso se tendría $E=E_0$. Considerando ahora el valor $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$, puede verse como este se corresponde con la descarga cuando se considera que ha existido daño en el material durante la misma, de manera que en este caso se tendría una disminución de la rigidez y por ello de la pendiente de descarga según la expresión $E=(1-\phi_t)E_0$.

Como en el caso desarrollado se ha considerado el enfoque de la Energía de Fractura para el ajuste de la curva, es necesario aclarar que u_t^{pl} será el valor de desplazamiento ficticio correspondiente con $\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$, mientras que u_t^{ck} será el que se corresponda con $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$. Teniendo en cuenta la *Ecuación (3-24)* puede verse como al aumentar el daño ($0 \leq \phi_t \leq 1$) se reduciría el valor de u_t^{pl} , que en este caso resultaría en una descarga con menor pendiente. Conociendo estos conceptos se puede proceder a ajustar la zona de descarga mediante la modificación de la variable daño. Esta, como se ha comentado anteriormente, se introduce de manera tabular, siendo la siguiente tabla la utilizada en este desarrollo:

Tabla 6-6. Propiedades del material actualizadas tras el ajuste de E.

ϕ_t	$w(\text{mm})$
0	0
0.999	0.023

Existe un último parámetro a tener en cuenta a la hora de llevar a cabo este ajuste. Cuando se lleva a cabo un clico de carga, abriendo y cerrando las grietas (al cargar y descargar), el comportamiento se complica. Se puede observar en determinados estudios, que existe cierta **recuperación de la rigidez** cuando la carga cambia de signo, es decir, de tracción a compresión o viceversa, siendo más relevante este efecto cuando se pasa de tracción a compresión como podría ocurrir al cerrar una grieta. Por ello, al realizar la descarga en el modelo tratado, se tiene un cierre de las grietas existentes, lo que genera que tome relevancia este parámetro fundamental en el comportamiento del hormigón. Por tanto, modificando su valor se podrá ajustar la pendiente de la curva de descarga. Este efecto se puede ver de forma más clara en la siguiente figura:

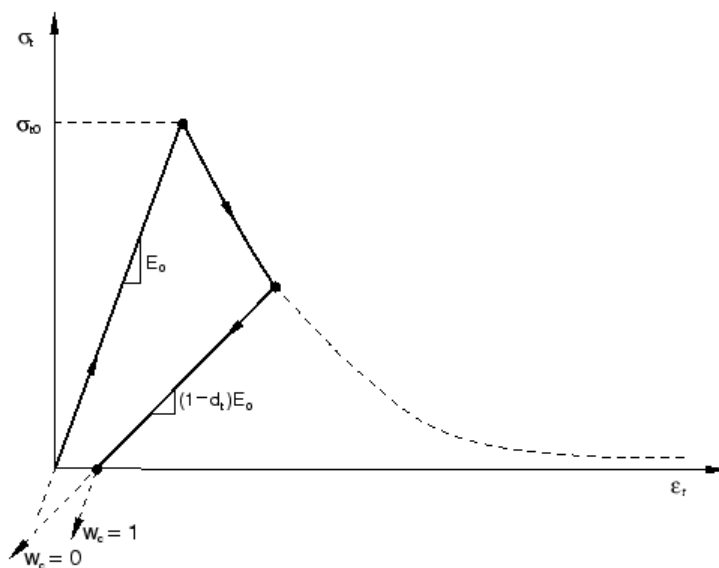


Figura 6-8. Efecto del parámetro de recuperación de rigidez w_c (Guía de Abaqus, s.f.).

Para cuantificar este efecto se utilizan dos valores o **factores de peso**, w_c y w_t , que son propiedades del material y que controlan la recuperación de la rigidez cuando se produce un cambio de signo en las cargas. Estos valores tienen una interpretación sencilla: cuando su valor es 1, se considera una recuperación total de la rigidez en el paso de un tipo de carga (tracción o compresión) a otra, mientras que cuando su valor es 0, se considera que no existe recuperación de la rigidez. Por esto, se va a considerar el valor de $w_c=0$, pues es el único que interesa en el caso de tracción.

Con todo lo anterior, se puede proceder a ajustar la descarga y posterior recarga del ensayo. Para ello, hay que tener en cuenta que en el modelo experimental al descarga se produce cuando la carga aplicada ha alcanzado el valor de **2 kN** en la zona de “post-pico”, lo cual representa un **60%** de la carga máxima alcanzada o pico (Granger, et al., 2007). Cabe resaltar que este proceso se realiza también con control en desplazamiento, controlando pues el CMOD.

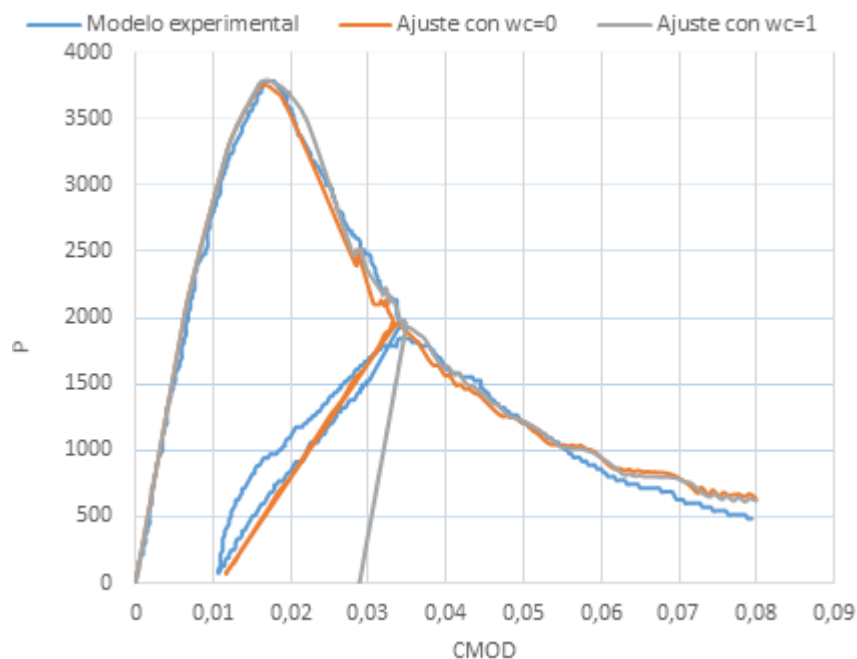


Figura 6-9. Ajuste de la descarga y la posterior carga.

Como puede verse en esta *Figura 6-9*, se aprecian los comportamientos antes mencionados. Por un lado se puede ver que al dar el valor de $w_c=1$, que se correspondería con una recuperación total de la rigidez, la descarga y posterior recarga se producen de forma paralela a la carga elástico-lineal inicial. Por otro lado, haciendo $w_c=0$, se considera que no existe recuperación de la rigidez, teniéndose por tanto una menor pendiente de descarga. La razón por la que existe esta pérdida de rigidez, está en la teoría explicada en la *Sección 2*. Es necesario calibrar el factor w_c ya que al descargar se cierra la grieta, es decir, este cierre de la grieta se debe a una relajación de las tensiones, lo que se puede interpretar como si se diera un paso de tracción a compresión, siendo necesario este factor para indicar la existencia de pérdida de rigidez. Cabe resaltar que no es que se pase a compresión, sino que sería un comportamiento similar al que sucedería en esas circunstancias.

Por otro lado, en la curva correspondiente a los resultados experimentales obtenidos de la literatura (Granger, et al., 2007), puede verse que existe una pendiente distinta entre la descarga y la recarga. Este fenómeno podría ser explicado debido a la deformación inelástica acumulada, por lo que sería otro parámetro a tener en cuenta a la hora de realizar el ajuste. No obstante, en la literatura de la que se parte no se posee la suficiente información para llevar este paso a cabo. Finalmente, se muestra el resultado final al que se ha llegado:

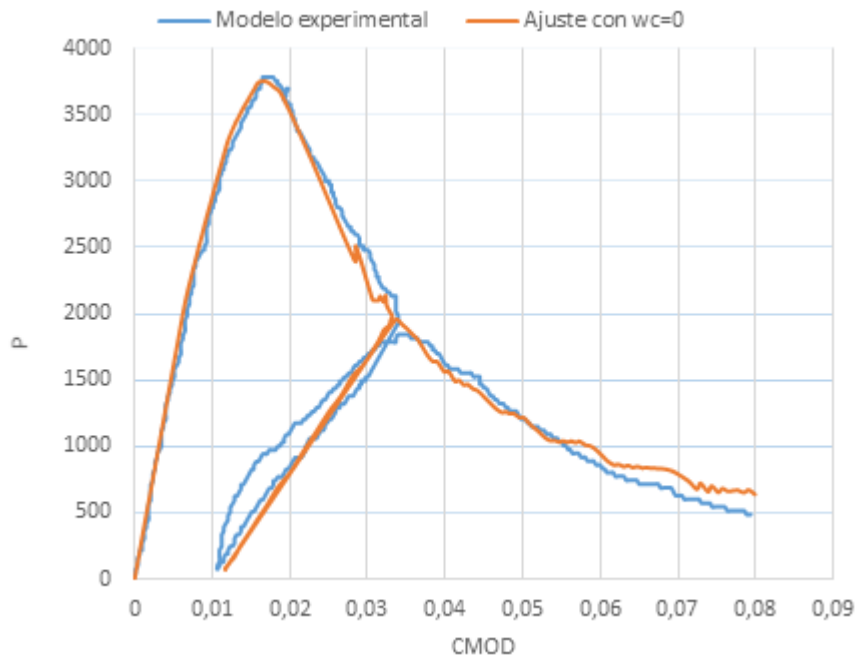


Figura 6-10. Ajuste final de la descarga y la posterior carga.

6.2.4 Evolución de las variables.

Para finalizar con la exposición de los resultados obtenidos, se va a proceder a mostrar mapas de color de las diferentes variables que intervienen en el problema. Se consigue así un documento más completo y en el que se intenta dejar lo más claro posible el comportamiento experimentado por el espécimen en las condiciones en las que se ha llevado a cabo el análisis, sirviendo de complemento para los resultados encontrados en la literatura y sirviendo como guía para la posterior incorporación de los procesos de autorreparación, pudiéndose comparar estos resultados con los que se obtengan en el futuro y observando por tanto las ventajas ya comentadas de estos mecanismos.

En estos mapas de color, se mostrarán además de los resultados de caso que ha sido considerado como base, $|v|=4$ mm, aquellos correspondientes con dos nuevas deflexiones, $|v|=2$ mm y $|v|=6$ mm, con el único objetivo de tener material con el que comparar y poder explicar en qué influye está deflexión y las variaciones que puede provocar en el comportamiento.

6.2.4.1 Evolución del Daño.

A continuación, se procede a mostrar a evolución del daño en la pieza sometida a análisis. Cabe hacer mención a que la zona en la que se producirá daño en este espécimen es la superior a la grieta, por lo que cabe esperar una única franja dañada de material. Esto se debe a que el daño en el caso estudiado es comprendido como la aparición de grietas, de manera que mientras mayor sea el valor de este en un determinado punto, más grietas habrá en su entorno, correspondiéndose el caso en el que el daño sea máximo a la apertura total de la grieta, es decir, todo el material en esa zona estaría dañado. Se puede ver cómo, a medida que pasa el tiempo, el daño se propaga por la zona superior de la grieta. En las zonas completamente dañadas, se puede ver cómo se alcanza el máximo valor de daño posible (0.999 en el caso propuesto), mientras que en el fondo o borde de grieta se puede ver cómo este valor es menor que el máximo. A medida que el borde de grieta va avanzando, se ve que en estas zonas en las que el daño es menor o inexistente, el valor del mismo va aumentando hasta alcanzar el máximo indicado, apareciendo por tanto grietas más grandes o mayor número de ellas. Aquellas zonas en las que se alcanza el valor máximo daño pueden ser interpretadas como zonas en las que se va abriendo la grieta. De esta manera, los resultados se pueden considerar como si la franja roja que va avanzando fuese la grieta.

Para llevar a cabo estos análisis del daño, y posteriormente de las tensiones y desplazamientos, también se han considerado, los resultados correspondientes a deflexiones máximas de $|v|=2$ mm y $|v|=6$ mm, además del caso base del presente estudio que será el correspondiente a $|v|=4$ mm. Como se comentó anteriormente, para llevar

a cabo este proceso, era necesario calcular el instante de la descarga así como la amplitud de la carga en el mismo. Para ello, se proporcionaba una tabla en la que se indicaba cómo se quería que fuese la evolución de la mencionada amplitud. Se procede a mostrar las tablas correspondientes a los dos nuevos casos de carga:

Tabla 6-7. Amplitud del desplazamiento impuesto para $|v|=2$ mm.

<i>Time/frequency</i>	<i>Amplitude</i>
0	0
0.150487	0.02732
0.2	0.0035
1	1

Tabla 6-8. Amplitud del desplazamiento impuesto para $|v|=6$ mm.

<i>Time/frequency</i>	<i>Amplitude</i>
0	0
0.101785	0.00920833
0.2	0.0035
1	1

A simple vista puede verse como para un caso de carga con una deflexión máxima mayor que el base, el instante de descarga se alcanza para un tiempo menor, mientras que para el caso de carga con una deflexión máxima menor que el base se tiene un instante de descarga posterior. Con el objetivo de unificar lo máximo posible todos los resultados, se ha establecido el mismo punto de tiempo para el alcance de la mínima deflexión en todos los análisis, $t=0,2$. Esto se puede ver en la *Figura 6-11*.

Por otro lado, se recalca que la diferencia en el desplazamiento máximo impuesto no afecta a las curvas de P-CMOD que se han ajustado en apartados anteriores y cuyo ajuste es el objetivo de este trabajo. Lo único que sucede al cambiar esta deflexión máxima es que el comportamiento se adelanta o se atrasa, en función de si el desplazamiento que se impone es mayor o menor.

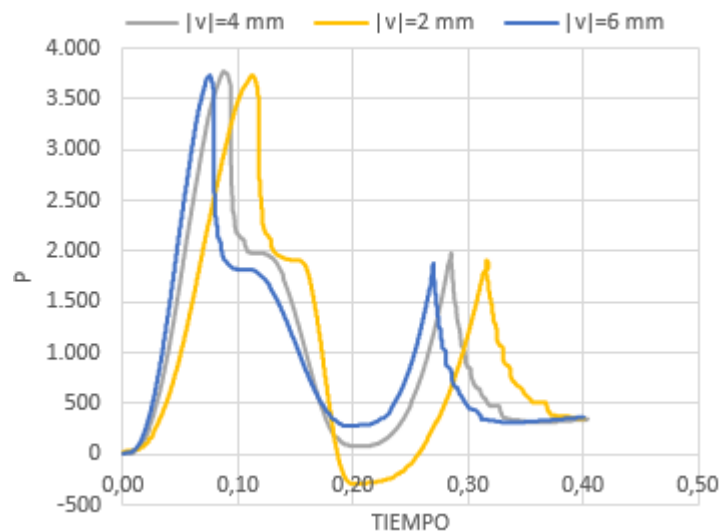


Figura 6-11. Carga frente al tiempo para distintas deflexiones

En esta imagen se aprecia que las distintas deflexiones máximas producen los mismos resultados en la carga y por lo tanto en la curva P-CMOD. Las pequeñas diferencias que se aprecian en esta figura se deben exclusivamente a imprecisiones a la hora de captar las curvas para su representación en la presente memoria, y en el caso de las diferencias en las descargas, se deben a imprecisiones mínimas a la hora de calcular el momento de descarga. Se ve también como, mientras mayor es la deflexión máxima, menor debe ser la deflexión mínima a la que se llegue. La única diferencia real que produce el cambio de la deflexión máxima es el desplazamiento en el tiempo de la curva.

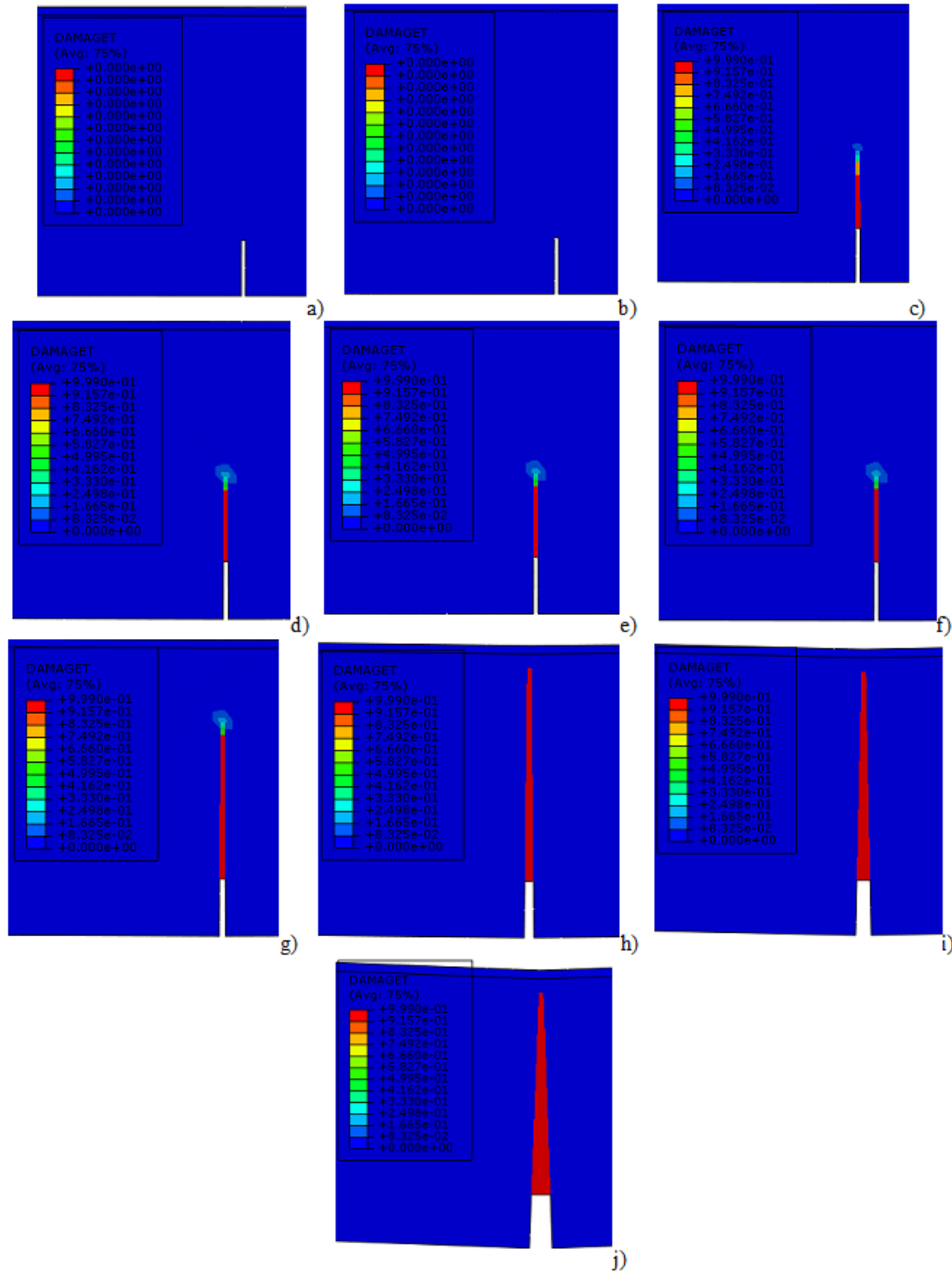


Figura 6-12. Daño para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 4 \text{ mm}$.

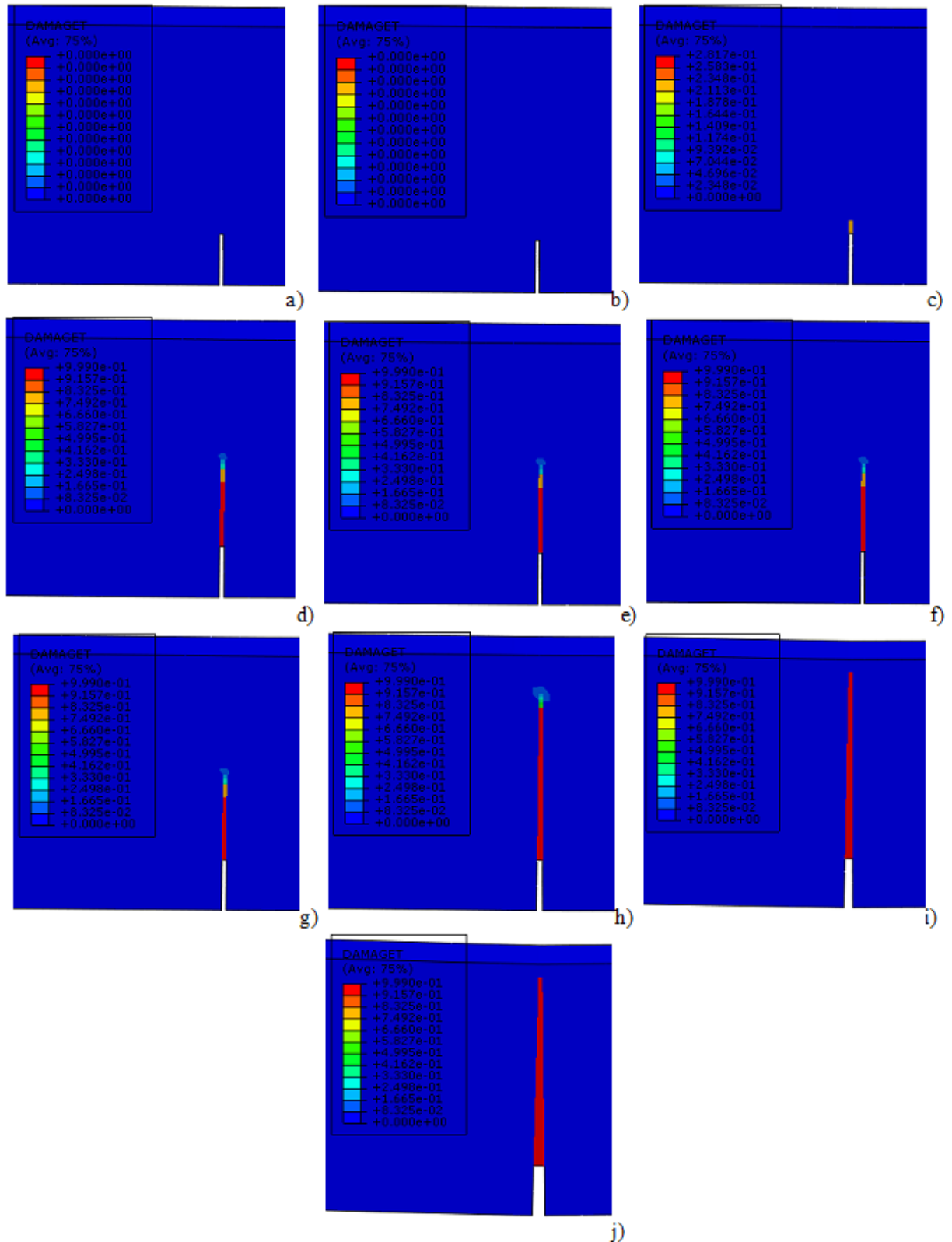


Figura 6-13. Daño para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 2 \text{ mm}$.

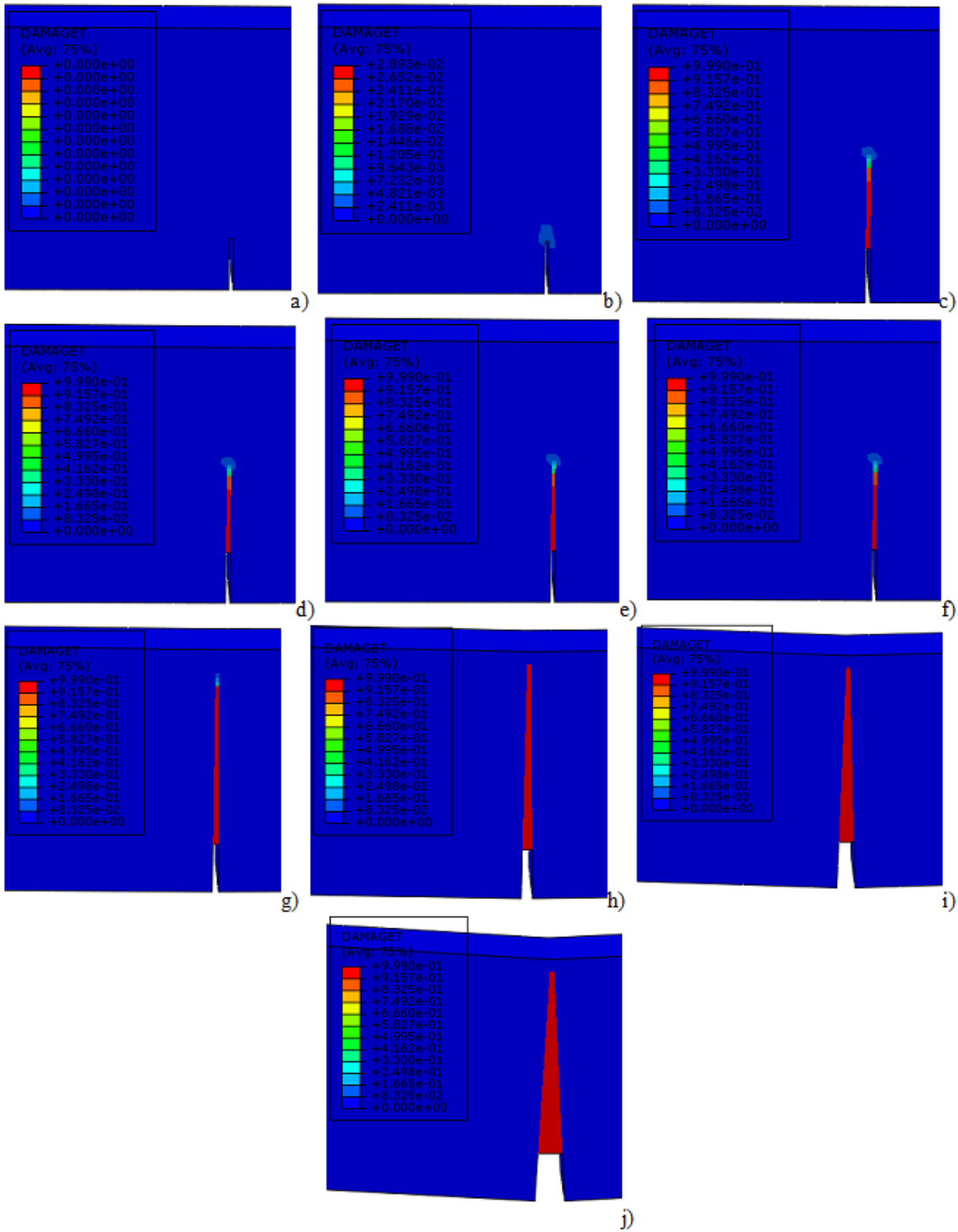


Figura 6-14. Daño para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 6 \text{ mm}$.

En la *Figura 6-13* y *Figura 6-14* se muestra el daño que experimentaría la grieta para deflexiones máximas de $|v|=2 \text{ mm}$ y $|v|=6 \text{ mm}$. El objetivo de mostrar estos resultados es puramente comparativo, pudiéndose ver así las diferencias con el comportamiento respecto a cuándo esta deflexión máxima es menor y cuando es mayor. Como puede observarse, en el caso de un desplazamiento máximo menor, el avance de la grieta es más lento,

aunque finalmente se alcanza un estado de daño similar. Por su parte, en el caso de un desplazamiento máximo mayor, puede verse como este avance es algo más rápido. También se ve cómo, mientras mayor sea la deflexión máxima, mayor es la apertura de grieta. Finalmente, cabe resaltar que se ha ampliado el factor de deformación en la simulación en un factor de 10:1. El objetivo de esta acción no es otro que facilitar la visualización del daño y la apertura de la grieta, por lo que los resultados mostrados estarían exagerados en cuando a lo visual se refiere.

6.2.4.2 Tensiones principales máximas y mínimas.

En aras de proporcionar un análisis lo más completo posible, se van a mostrar los mapas de evolución de las tensiones principales máximas y mínimas. En ellos se podrá observar, en cada instante de tiempo, cuales son estas tensiones en cada parte de la probeta

Finalmente, se procede a mostrar los mapas de tensiones máximas principales obtenidos para cada uno de los casos, en los que se podrán ver las consecuencias de las distintas deflexiones consideradas así como indicativos de la descarga realizada.

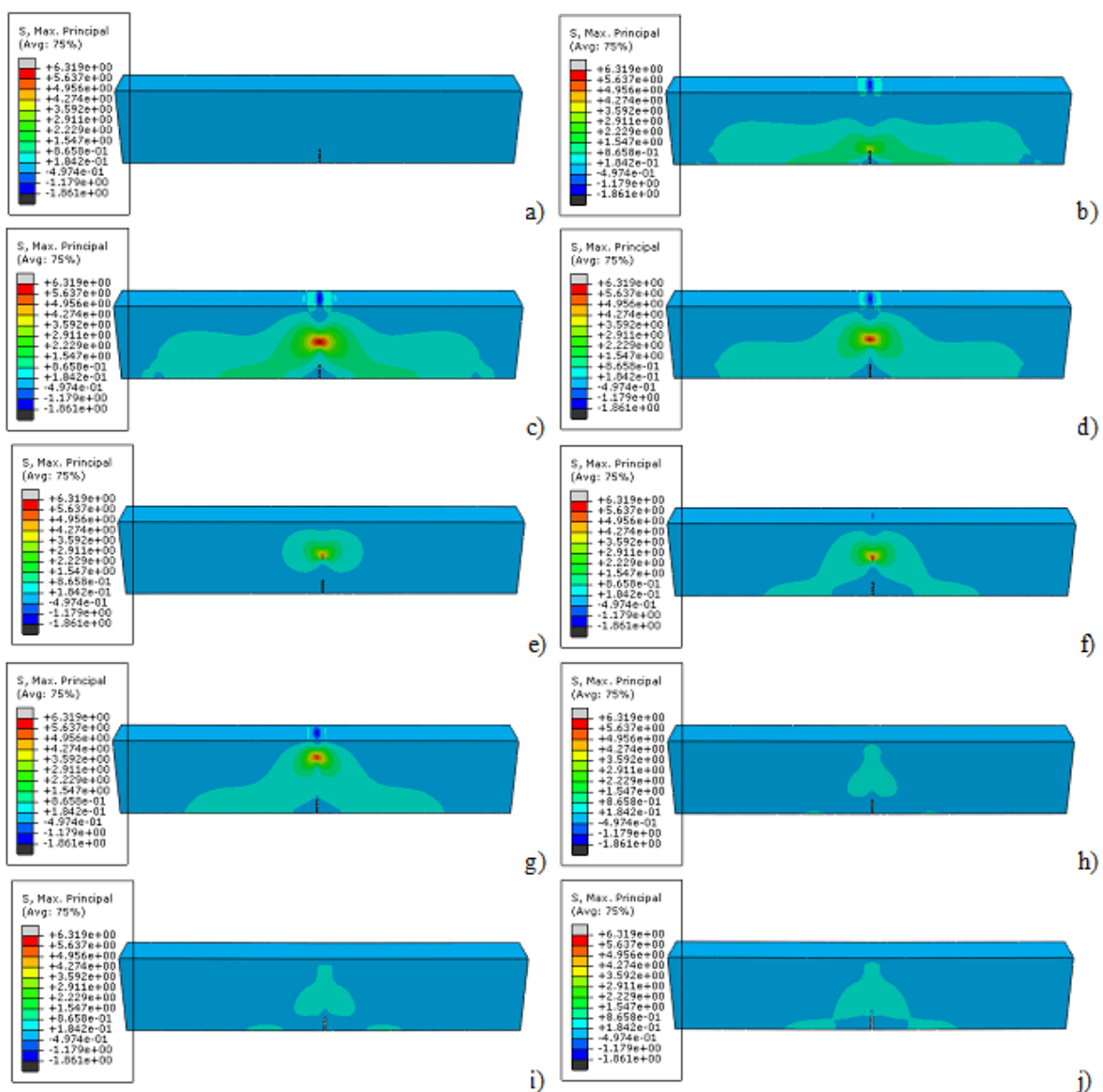


Figura 6-15. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 4 \text{ mm}$.

Como puede observarse en la *Tabla 5-1*, la descarga en el caso de $|v| = 4 \text{ mm}$, se llevaba a cabo para un instante de tiempo de 0.116425. Observando la *Figura 6-15*, puede verse como entre los instantes de tiempos correspondientes al caso c) y al caso e) se observa una reducción de las tensiones principales máximas. Este suceso es característico de la descarga que se ha producido, alcanzando el menor valor de estas tensiones en torno al punto de tiempo correspondiente con 0.2 (e), como también puede verse en la tabla antes mencionada. A partir de este punto, se observa un nuevo aumento de las tensiones máximas correspondientes a la recarga que se produce, para posteriormente, y teniendo en cuenta la *Figura 6-10* en la que se ve cómo tras la descarga se tiene un ablandamiento característico, observarse una nueva reducción de las tensiones, quedando algunas tensiones residuales en la probeta que se muestran en color claro.

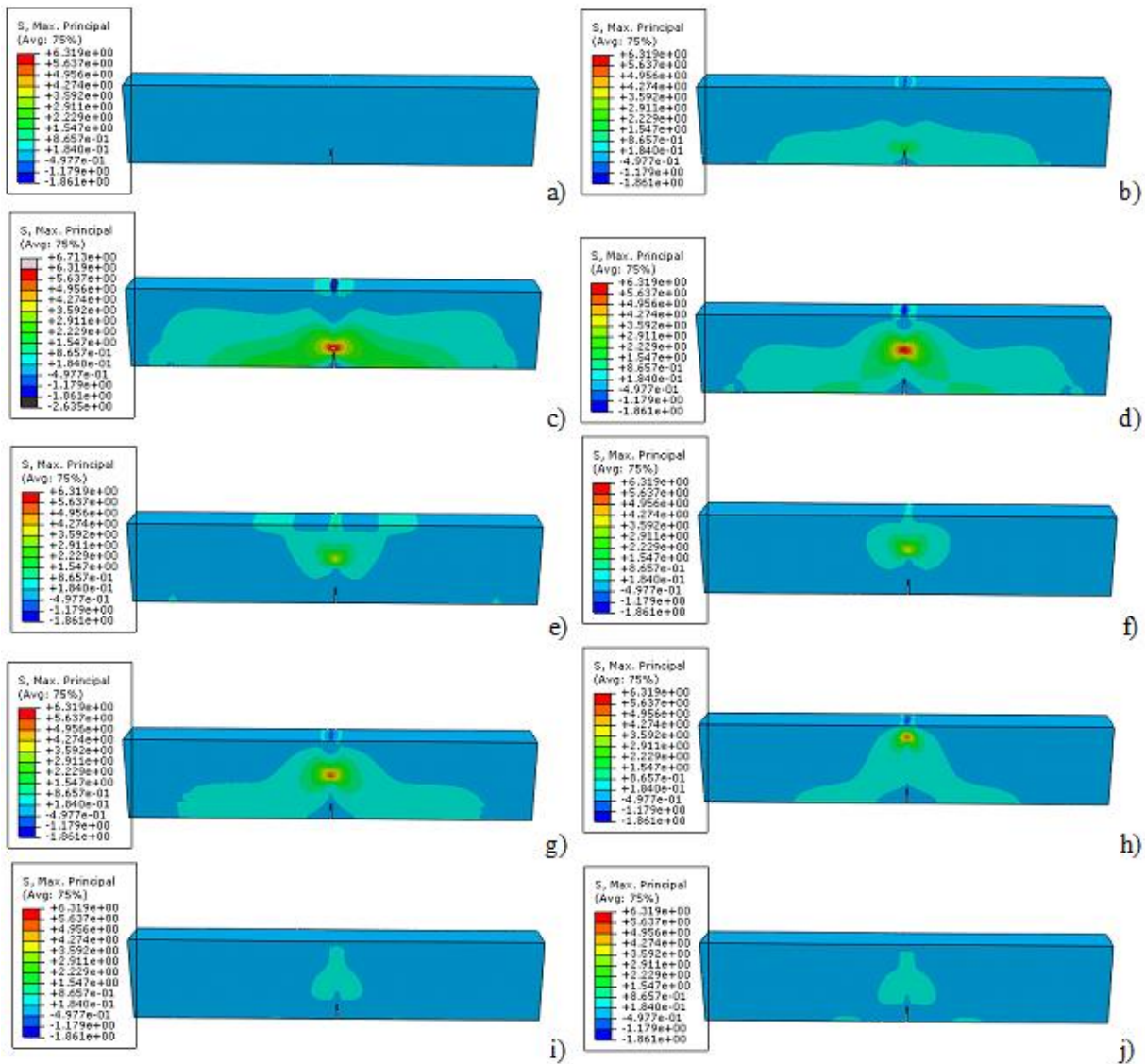


Figura 6-16. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 2 \text{ mm}$.

Teniendo ahora en cuenta la *Tabla 6-7*, puede observarse el mismo efecto que para el caso recién comentado. A partir del instante de la descarga d), comienza una reducción de las tensiones, para posteriormente volver a aumentar hasta alcanzar el punto en el que se comienza de nuevo a experimentar ablandamiento, caracterizado por una reducción de las tensiones, quedando únicamente algunos valores residuales de las mismas. Se observa, como es fácil de entender debido a la menor deflexión máxima, que estas tensiones residuales son menores que las experimentadas en el caso anterior.

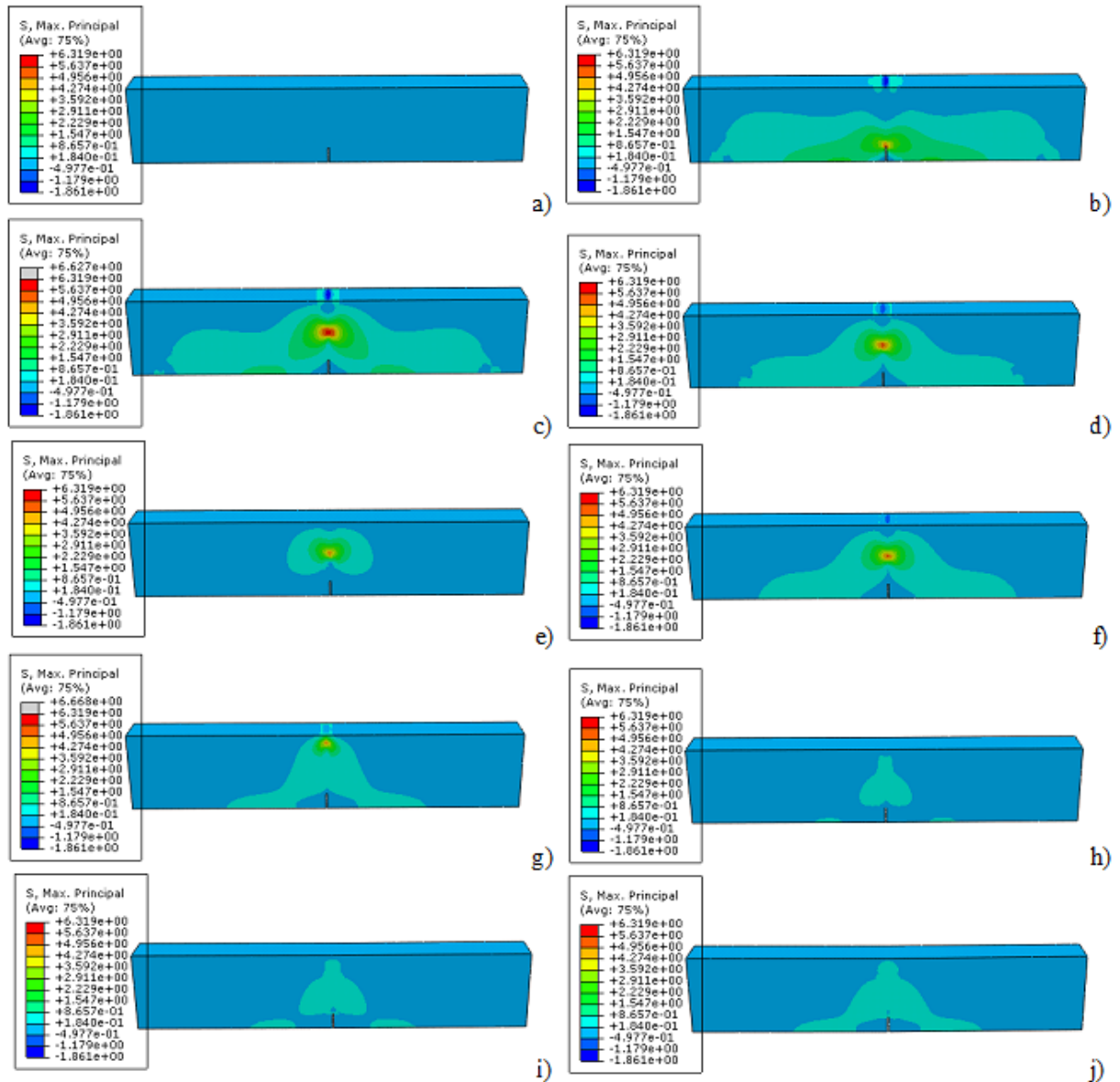


Figura 6-17. Tensiones máximas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 6 \text{ mm}$.

De nuevo se aprecia el mismo efecto que en los dos casos anteriores, siendo el instante de la descarga en este caso el correspondiente con $t = 0.101785$ y por ello c). En este caso, se observan las mayores tensiones residuales, pues la deflexión máxima es mayor respecto al caso base, de manera que para instantes de tiempo iguales la evolución del comportamiento avanza más en este caso que en el base, es decir, las tensiones máximas se alcanzan antes, al igual que la zona de ablandamiento.

El comportamiento que se puede apreciar en los casos de las tensiones mínimas, en cuanto al punto de descarga se refiere, es similar al de las tensiones máximas. Se observan en todos los casos la misma relajación de las tensiones, con la única diferencia que en estos casos, como puede verse en las tablas de los valores alcanzados adjuntas a las imágenes, las tensiones son de compresión en lugar de tracción, salvo determinadas zonas en las que las mínimas tensiones que se alcanzan son de tracción, como puede ser el borde de grieta. Se observan también valores residuales de las tensiones tras el ciclo completo de carga.

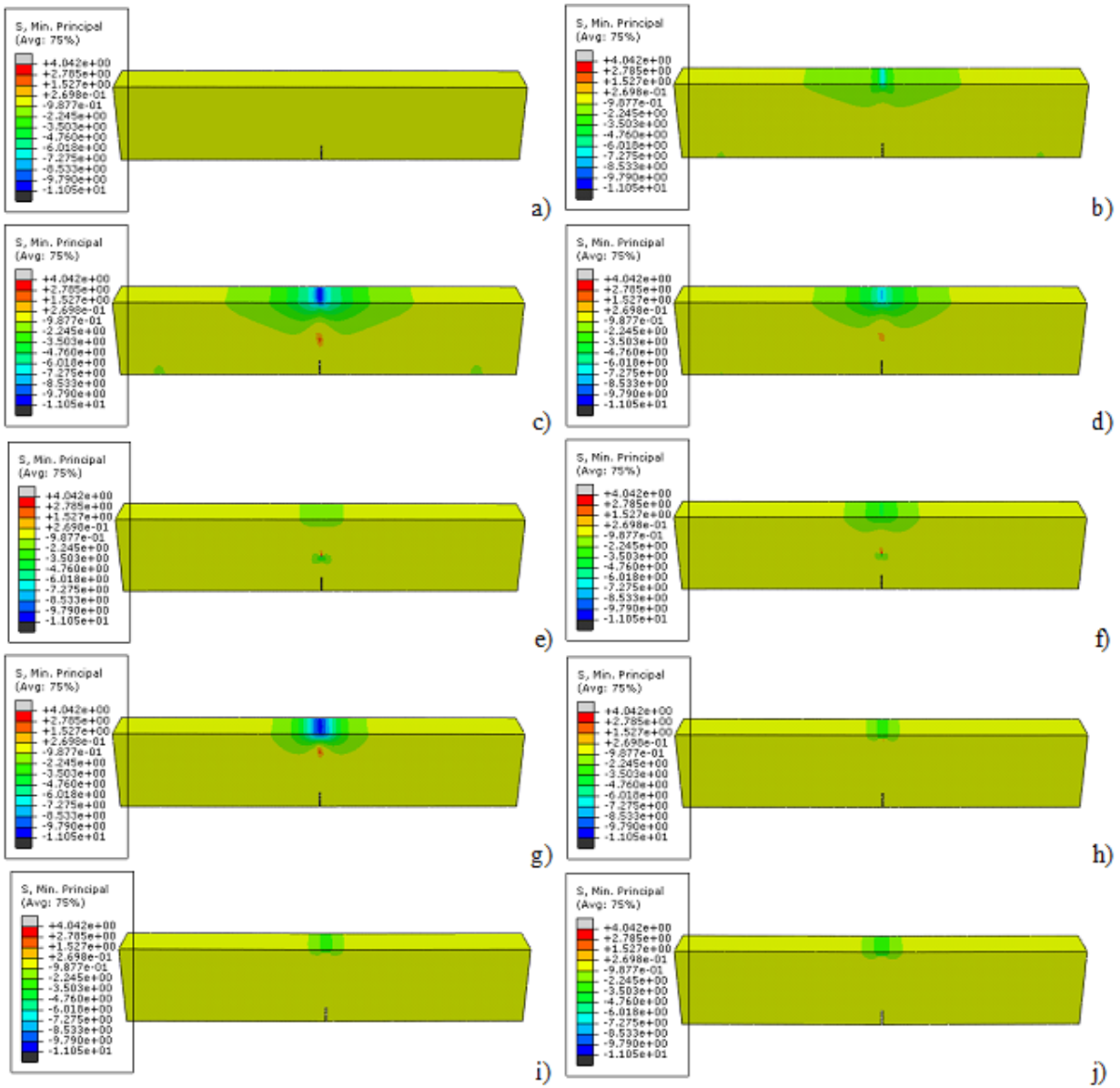


Figura 6-18. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 4 \text{ mm}$.

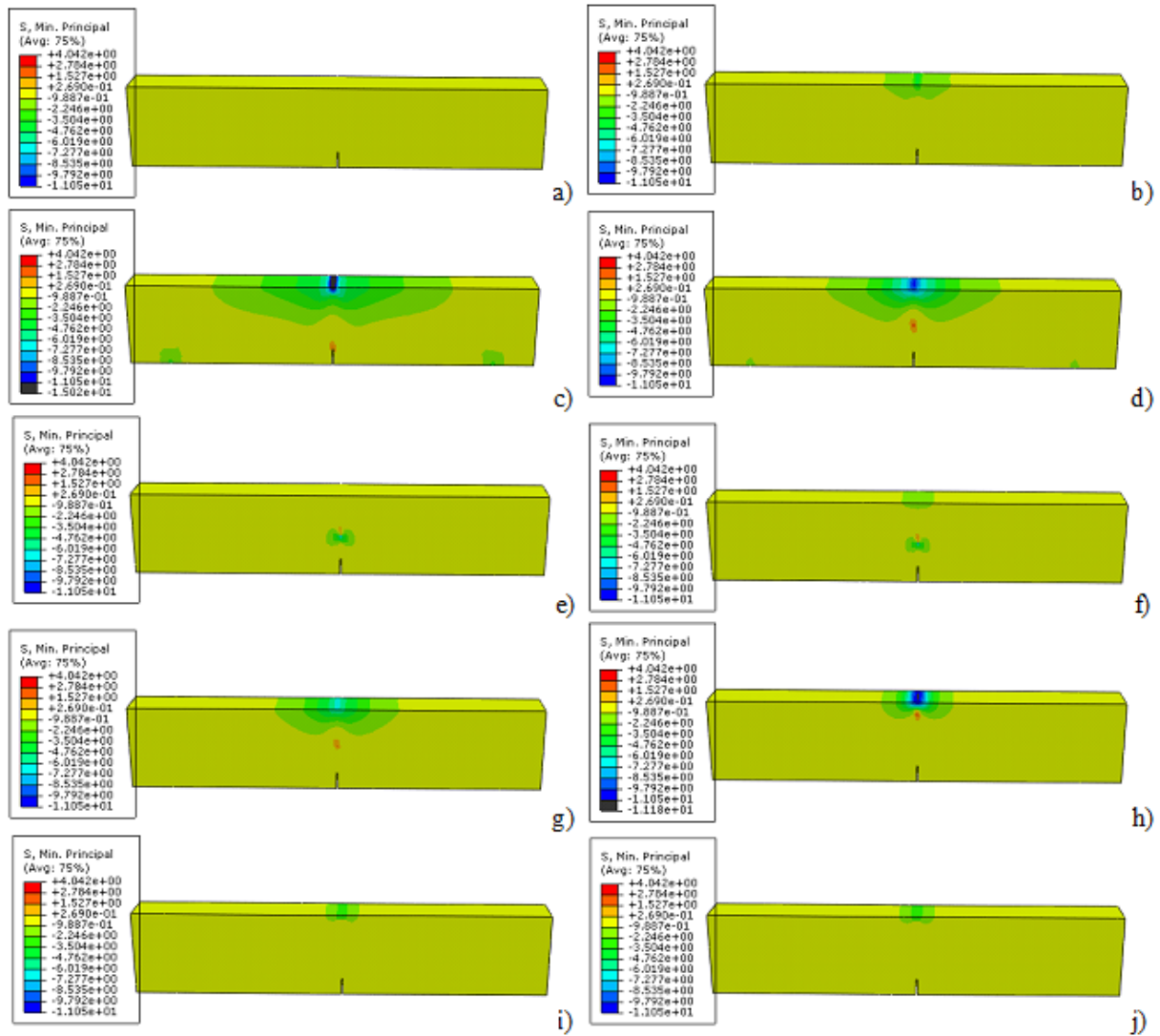


Figura 6-19. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 2 \text{ mm}$.

En este caso se observa cómo las tensiones mínimas se tardan más en alcanzar, al ser la deflexión máxima impuesta menor que el caso base, mientras que para el caso de un valor mayor de la misma se tarda menos en alcanzar tensiones principales mínimas más marcadas, como muestra la *Figura 6-20*. Del mismo modo que se explicó anteriormente, se puede ver cómo se tienen tensiones residuales menores que en el caso base.

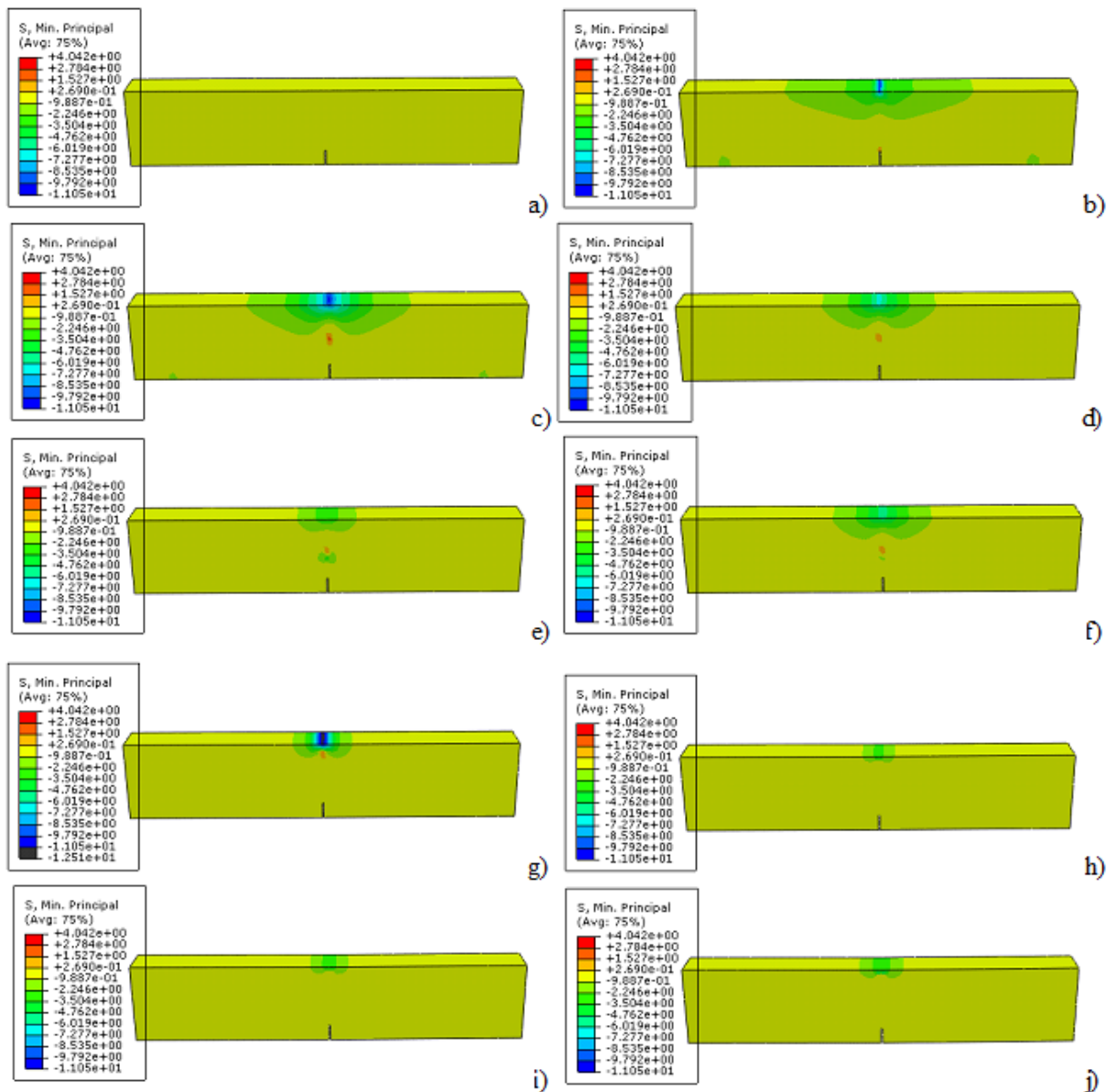


Figura 6-20. Tensiones mínimas principales (MPa) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 6 \text{ mm}$.

En este caso se aprecian tensiones residuales mayores que en el caso base, aunque no existe una gran diferencia. Por otro lado, también se ve cómo los valores máximos de tensiones se alcanzan antes que en los casos anteriores, lo que se debe al mayor valor de los desplazamientos máximos.

Finalmente, se analiza para un caso general las implicaciones de estos mapas de tensiones. Se resalta que el "Time Step" es 1, de manera que los resultados se han desarrollado solo hasta el 45% de este tiempo, es decir $t = 0.45$. Esto es debido a que los resultados interesantes se producen para tiempos menores que este, por lo que no se considera necesario llegar a tiempos mayores.

En cuanto a las **tensiones principales máximas** se refiere, se puede ver cómo sus valores máximos se obtienen en el entorno al borde de grieta. Esto es fácil de entender recordando que en el borde de grieta se tenían tensiones que tendían a infinito. Por otro lado, se aprecia una zona con tensiones de tracción considerables en el entorno del borde de grieta, de manera que mientras más lejos se esté de este, menores serán estos valores, hasta llegar a ser prácticamente nulos. Se observa también cómo va avanzando el borde de grieta, resultado que casa con los anteriormente obtenidos para el daño, en los que se podía ver cómo iba creciendo la grieta. Finalmente, puede observarse como en la parte superior existe una pequeña zona a compresión cuya traducción física resulta en la

pequeña compresión del material presente en esa zona al doblarse o flexionarse la probeta.

En lo referido a las **tensiones principales mínimas** se puede ver cómo, en correlación con los resultados obtenidos para las tensiones máximas principales, se tienen sus valores más grandes en la pequeña zona de compresión de la parte superior anteriormente comentada. Se observa cómo, a medida que avanza el ensayo, mayor es la flexión de la probeta y por tanto mayor será el valor de la compresión en esas zonas. Por otro lado se tiene también una pequeña zona en la que el valor mínimo de las tensiones principales es de tracción, que será la correspondiente al borde de la grieta. Llegados un determinado punto se reducen de nuevo los valores de compresión. Finalmente, se observan valores de compresión en las zonas de los apoyos, lo cual se entiende debido a que al aumentar la carga en la parte superior se empuja la probeta contra los propios apoyos, comprimiendo la zona de unión con ellos.

6.2.4.3 Desplazamientos verticales y horizontales.

Al igual que en los casos anteriormente considerados, el esquema que se va a seguir consiste en mostrar los resultados correspondientes con el caso entendido como base, para posteriormente mostrar aquellos obtenidos para valores menores y mayores de la deflexión máxima impuesta.

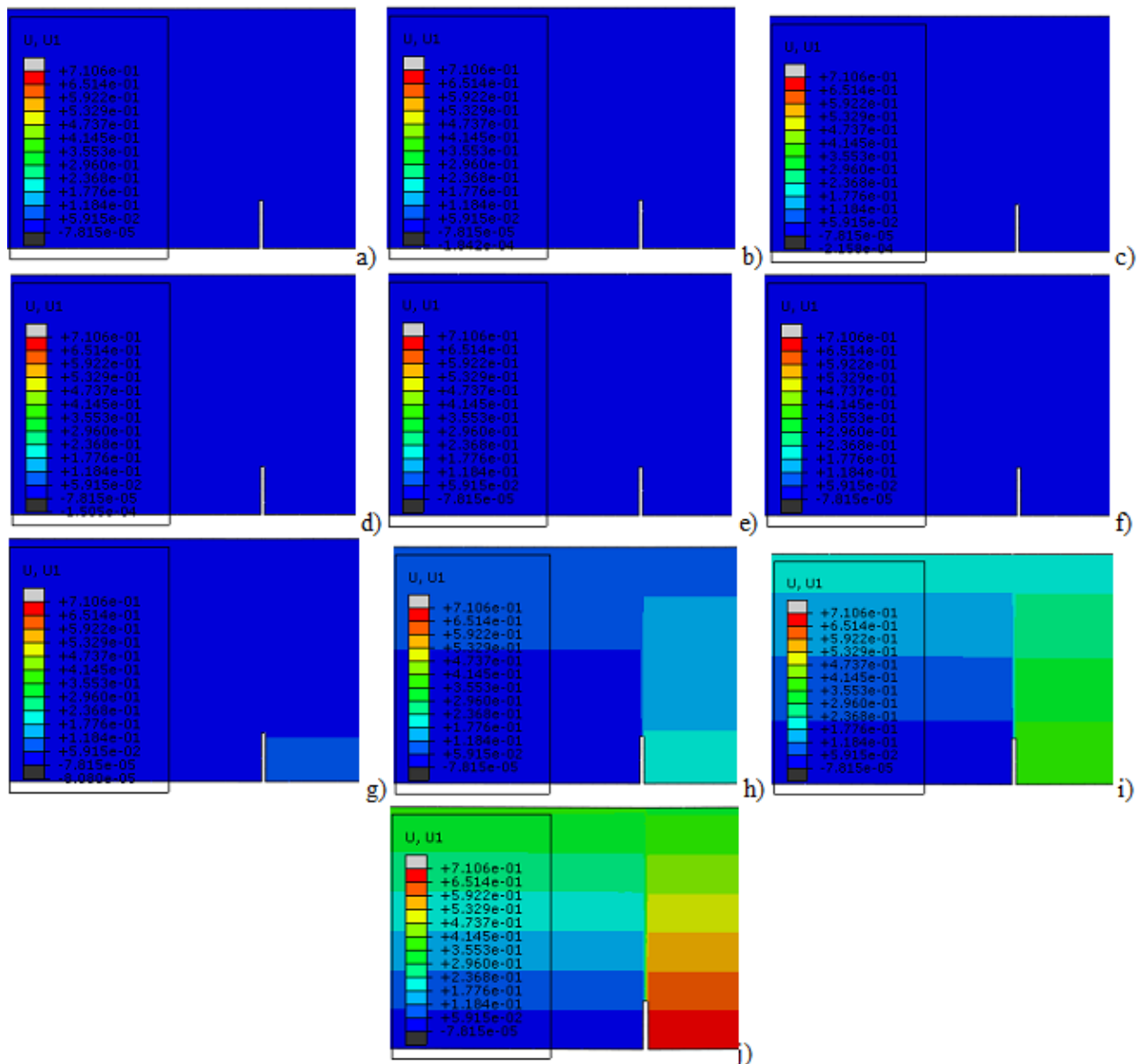


Figura 6-21. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 4$ mm.

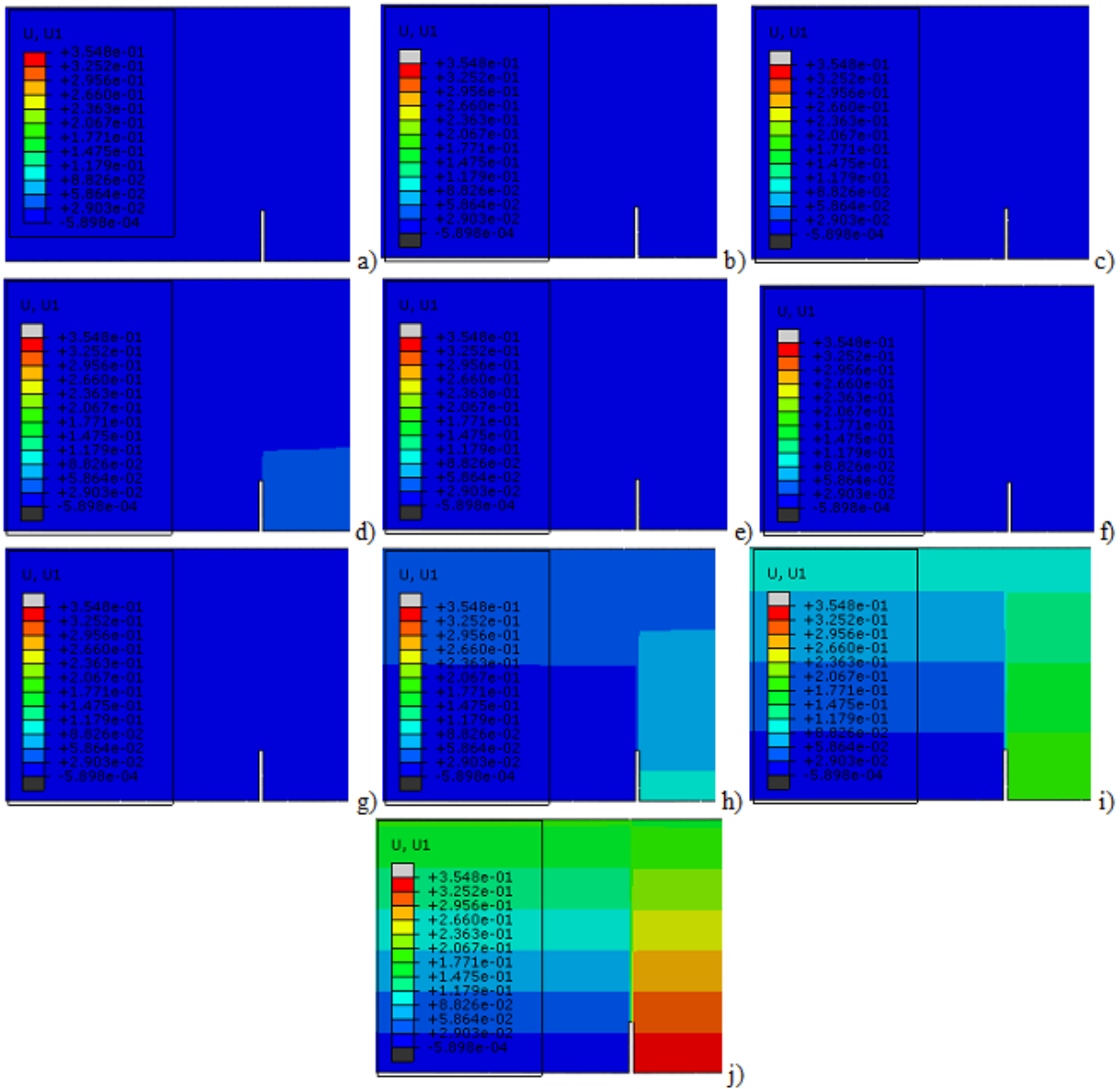


Figura 6-22. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 2$ mm.

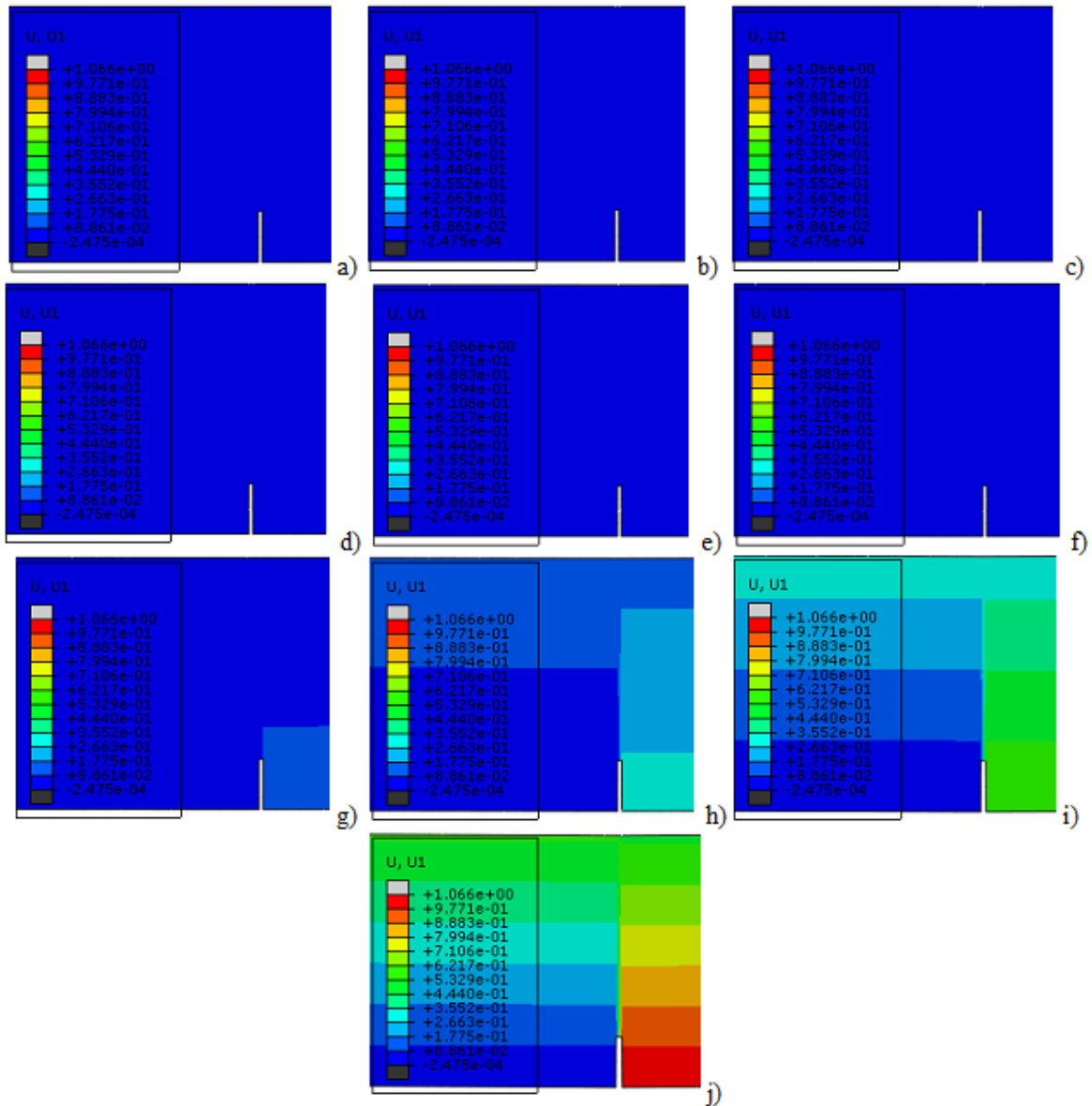


Figura 6-23. Desplazamientos horizontales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 6 \text{ mm}$.

En estas Figura 6-21, Figura 6-22 y Figura 6-23 se puede apreciar el desplazamiento horizontal en dirección perpendicular a la grieta que se experimenta durante el análisis. Como se comentó en secciones anteriores, uno de los parámetros de los que se quiere obtener medida es la apertura de grieta o CMOD experimentada. La forma de obtener este valor es mediante la consideración de estos desplazamientos horizontales, restando al desplazamiento del nodo derecho inferior de la grieta el del nodo izquierdo inferior de la misma.

Como puede extraerse de las condiciones de contorno que se imponían en el análisis, en la parte izquierda a la grieta se tenían restringidos todos los desplazamientos en los apoyos, mientras que en la parte derecha de la misma solo se restringían el desplazamiento vertical y el que va en la dirección de la profundidad de la probeta. Por ello, pueden observarse mayores desplazamientos en la parte derecha que en la parte izquierda.

Por otro lado, se observa cómo durante la mayor parte del tiempo considerado en el análisis los desplazamientos son muy pequeños, alcanzándose valores significativos de los mismos en los instantes finales considerados. Se observa también cómo los máximos desplazamientos se alcanzan en la parte inferior de la probeta, lo cual está relacionado con que es la parte en la que se encuentra situada la grieta, y a medida que esta va avanzando, se va abriendo y se van obteniendo desplazamientos horizontales en zonas superiores de la misma.

Por último, se van a mostrar también los desplazamientos verticales experimentados en la probeta analizada.

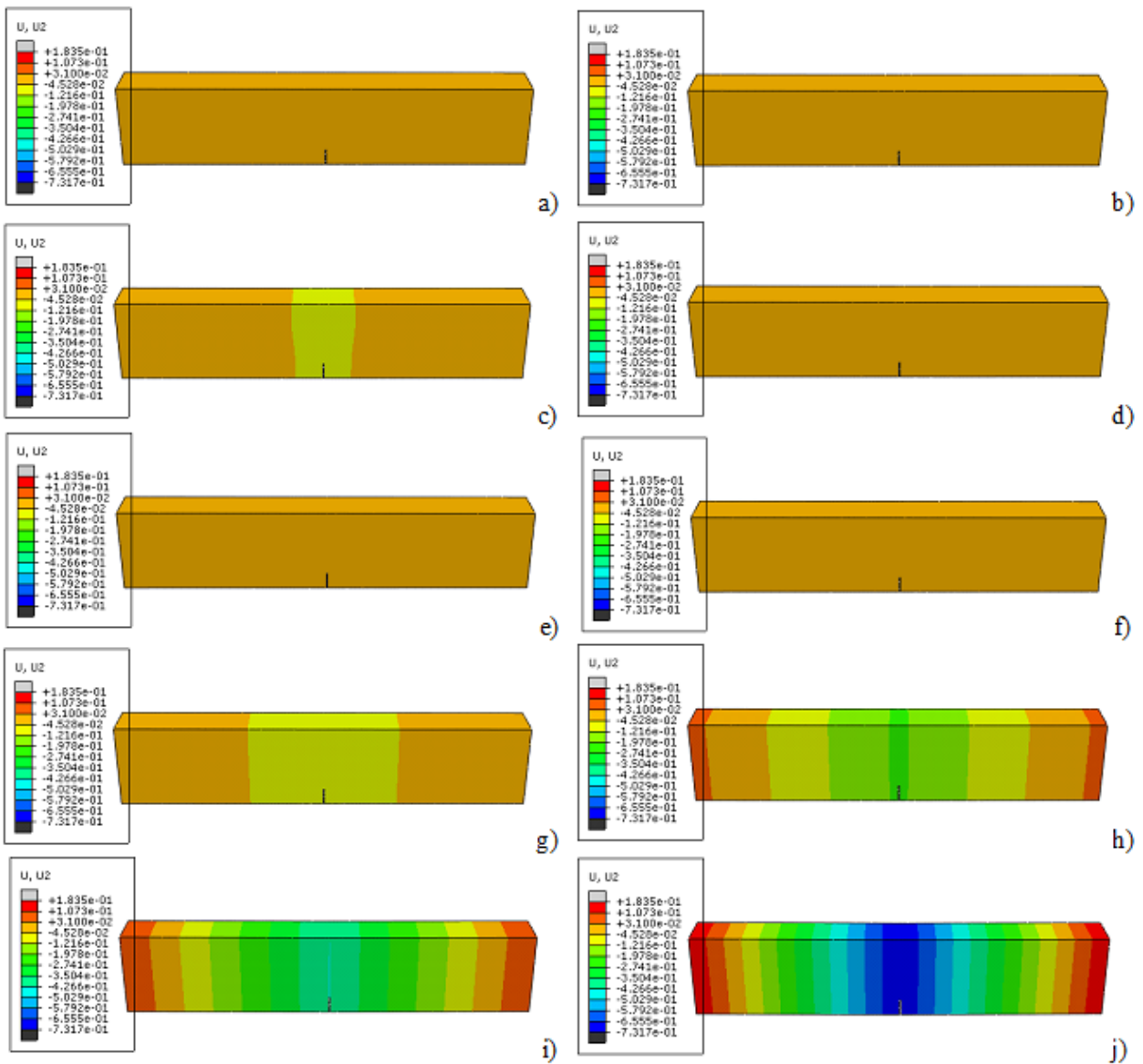


Figura 6-24. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 4$ mm.

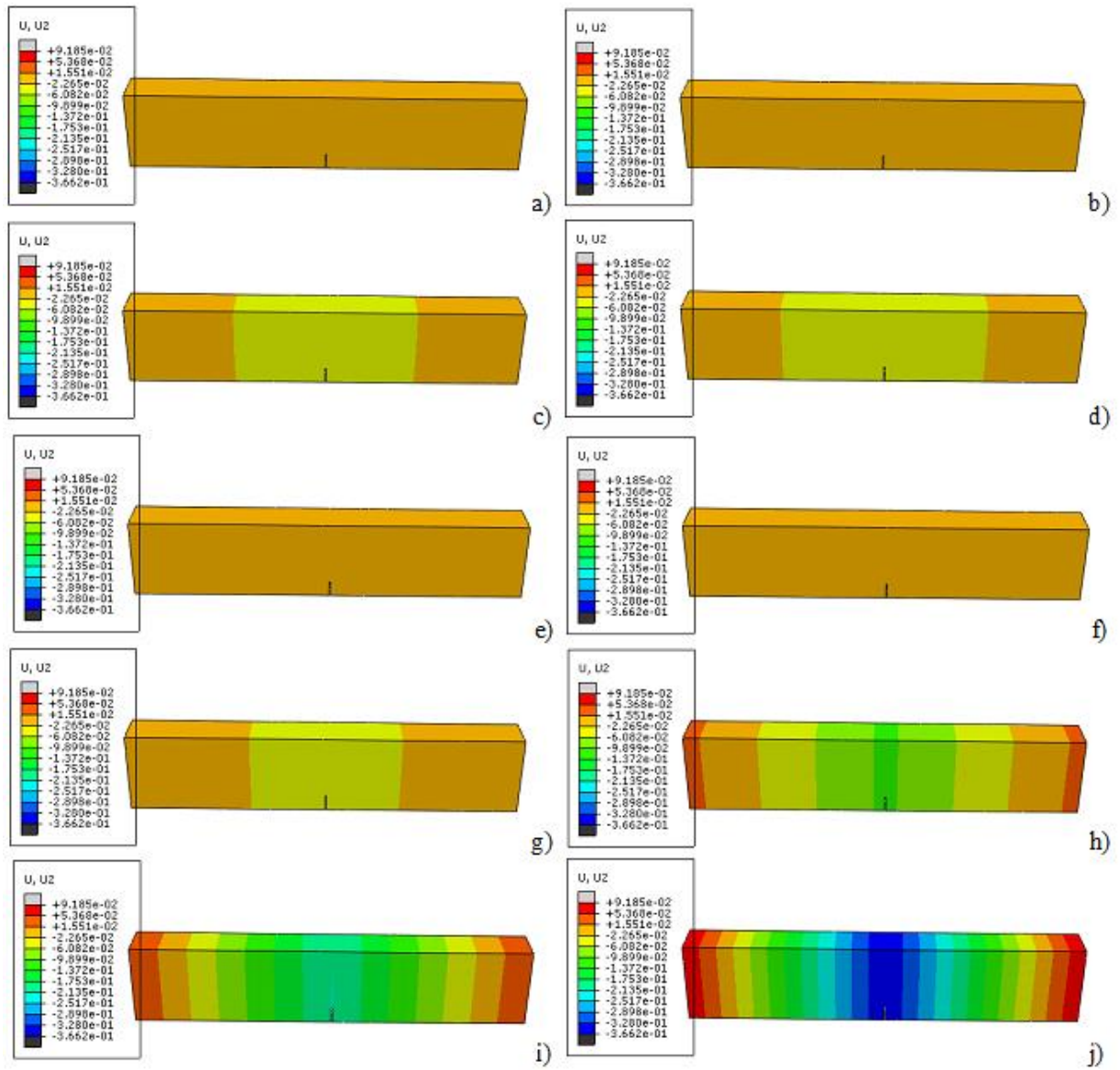


Figura 6-25. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t=0.05$, c) $t=0.1$, d) $t=0.15$, e) $t=0.2$, f) $t=0.25$, g) $t=0.3$, h) $t=0.35$, i) $t=0.4$, j) $t=0.45$, para $|v| = 2$ mm.

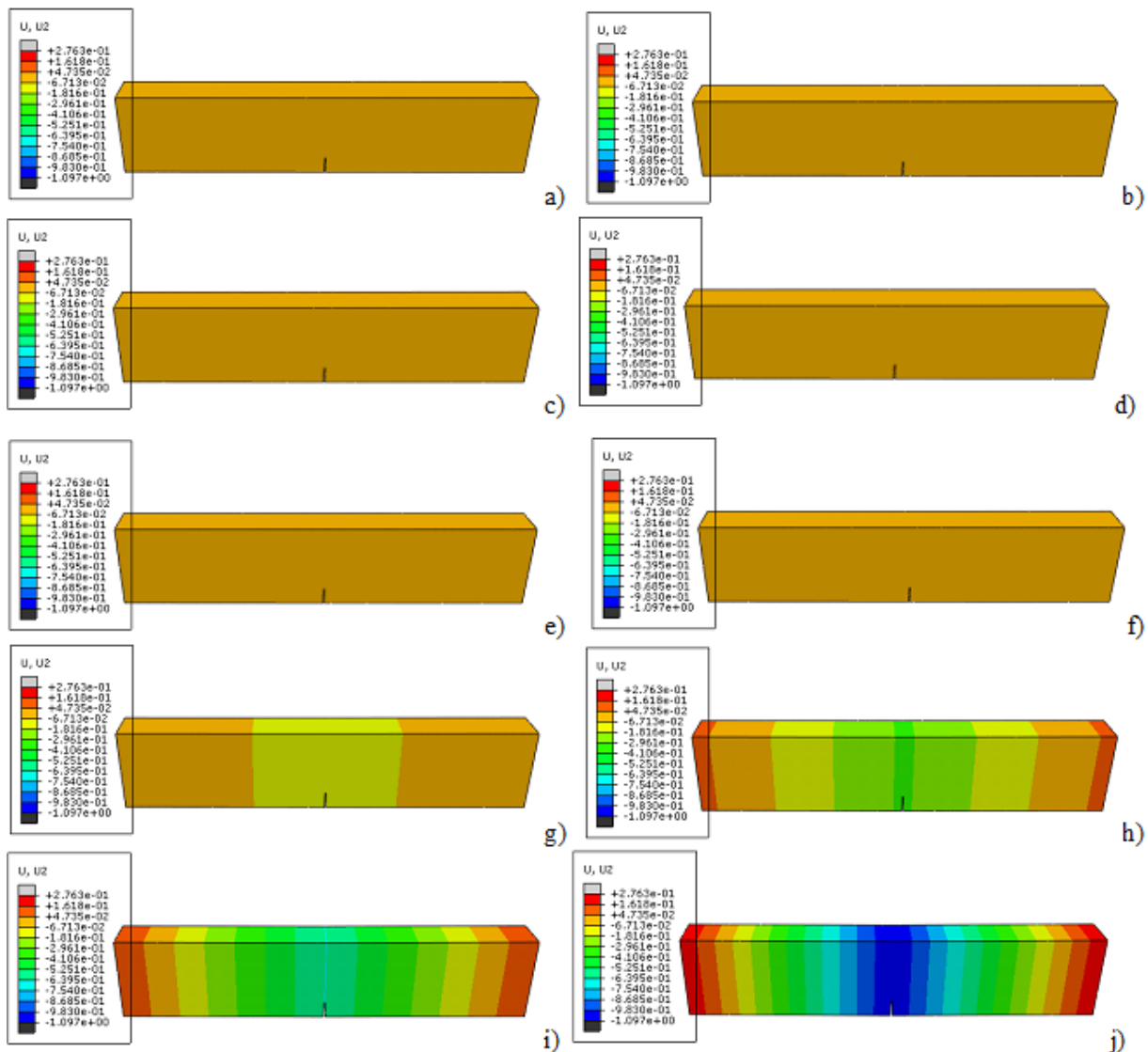


Figura 6-26. Desplazamientos verticales (mm) para a) $t = 0$, b) $t = 0.05$, c) $t = 0.1$, d) $t = 0.15$, e) $t = 0.2$, f) $t = 0.25$, g) $t = 0.3$, h) $t = 0.35$, i) $t = 0.4$, j) $t = 0.45$, para $|v| = 6 \text{ mm}$.

En las imágenes anteriores, pueden apreciarse varios aspectos a tener en cuenta. En primer lugar, puede verse cómo en un determinado punto del análisis se tienen unos pequeños desplazamientos verticales en el centro de la pieza, correspondiéndose en el caso de $|v| = 4 \text{ mm}$ a la Figura 6-24 c), en el caso $|v| = 2 \text{ mm}$ a la Figura 6-25 c) y d), y en el caso de $|v| = 6 \text{ mm}$ no se aprecia este efecto debido a que los desplazamientos alcanzados son menores, como se puede ver en la Tabla 6-8. Estos valores de desplazamiento vertical se corresponden con el instante en el que se lleva a cabo la descarga, de manera que están seguidos por una disminución de estos desplazamientos, que es lo que se corresponde con la descarga en sí. Finalmente, se vuelve a cargar la probeta, observando aumento de los valores.

Las zonas en las que se experimentan los mayores desplazamientos es la zona central del espécimen, lo cual casa con el hecho de que es la zona donde se imponen los desplazamientos. Finalmente, se aprecian ciertos desplazamientos en sentido contrario a los impuestos, lo cuales se deben a la flexión de la propia probeta, dándose por tanto en las partes que quedarían al otro lado de los apoyos respecto al centro.

7 CONCLUSIONES

Como se ha ido comentando y exponiendo a lo largo de este documento, el objetivo perseguido no ha sido otro que el establecimiento de un modelo de autorreparación en materiales estructurales de base pétreo, como puede ser el hormigón. Para ello, se ha partido de los trabajos previos realizados en el ámbito de la ingeniería de los materiales, en los que se han estudiado diversos mecanismos de autorreparación, así como las condiciones a las que tienen que encontrarse expuestos los materiales para poder llevar a cabo su autorreparación.

Más concretamente, se pretendía simular el comportamiento establecido en los trabajos realizados por Granger, Loukili, Pijaudier-Cabot y Chanvillard, en los que se muestran diversos resultados experimentales relacionados con distintas condiciones de conservación del material las cuales afectan enormemente a la capacidad autorreparadora del material.

A lo largo del trabajo, se han expuesto diversos aspectos fundamentales de la mecánica del daño continuo, ampliamente conocida en el campo de la ciencia de los materiales, así como se ha introducido el modelo de daño y plasticidad implementado en este documento. Por otro lado, se ha comentado el modelo de “healing” escogido para simular la autorreparación del material. Este proceso de “healing” se deja como una posible y necesaria línea futura de trabajo.

En aras de simplificar la teoría mostrada a lo largo del trabajo lo máximo posible, de manera que esta sea suficientemente exacta y sin faltar a la realidad, se han realizado diversas simplificaciones, ampliamente aceptadas en la teoría del daño. Estas están sólidamente respaldadas y basadas en los conocimientos existentes en este campo, como se puede constatar en las diversas secciones.

Debido a la gran complejidad del modelo plástico y de daño implementado, “Concrete Damage Plasticity”, en el cual se tienen fuertes no linealidades, complicando por tanto su resolución, se han llevado a cabo distintos intentos de alcanzar la solución final. La forma en la que se pretendía replicar el comportamiento observado en el material de referencia, era mediante el ajuste de los parámetros característicos de este modelo recién comentado, observando durante el desarrollo del trabajo la existencia de varias alternativas para encarar este proceso.

Al comienzo se optó por la que parecía la forma más utilizada y común de llevar a cabo este tipo de análisis, que es el ajuste a través de las deformaciones en el modelo. Este método está ampliamente comentado en la *Sección 2* de la memoria al igual que en algunos artículos referenciados. Durante la realización de este tipo de análisis se comprobaba su poca estabilidad, siendo difícil obtener una respuesta convergente y suave del mismo. Se comprueba pues que la forma más estable de realizar este tipo de cálculos es mediante el otro enfoque, que se corresponde con la Energía de Fractura. Esta apreciación ha sido posteriormente corroborada en diversos artículos así como en la Guía oficial del software utilizado, como se ha comentado a lo largo del documento, en los que se indica cómo, para hormigones no reforzados, como es el caso, el método más eficiente es el recién mencionado.

Se concluye que la respuesta del material es fuertemente dependiente de los parámetros constituyentes de la zona plástica así como de los parámetros que definen el daño en el mismo. Por otro lado, se puede ver cómo también se ve fuertemente influenciada por el módulo de Rigidez elástica, la cual no afecta únicamente a la zona elástica, sino que también toma un papel importante en la descarga y posterior carga del material. También se puede observar cómo, los parámetros de las superficies plásticas considerados como estándares en el software, aproximan de manera suficientemente cercana el comportamiento deseado.

Finalmente, se tienen otros parámetros propios del modelo de Abaqus para los que se observa la gran importancia que toman en el ajuste a realizar. Estos no son más que los factores de peso que se comentaron, y cuyo valor será necesario especificar para poder tener una descarga efectiva y realista. Se observa igualmente la dependencia de las tensiones máximas y mínimas alcanzadas, así como del daño y los desplazamientos experimentados en la probeta durante el análisis, con la deflexión máxima que se imponga como condición de carga.

En cuanto al “healing”, se ha concluido gracias a estudios previos la necesidad de la existencia de ciclos de carga para su viabilidad, así como la necesidad de que el material esté expuesto a unas condiciones mínimas de humedad para que se pueda llevar a cabo, al menos con el mecanismo de precipitación de partículas de carbonato

de calcio, que ha sido escogido en este estudio.

Como puede observarse, el ámbito de la autorreparabilidad de los materiales es uno de los más prometedores dentro de la ciencia de los materiales, pues permitiría generar una nueva clase de materiales que podrían ser considerados como inteligentes y que se asimilarían fuertemente con aquellos que podemos observar en la naturaleza. Esto permitiría un enorme ahorro económico y de tiempo en el mantenimiento y reparación de las estructuras, que como se puede deducir, implica unas cantidades económicas en todos los países de dimensiones gigantescas.

La utilidad de este tipo de reparación salta a la vista al observar la gran cantidad de estructuras civiles que existen sumergidas en agua o sometidas a grados de humedad lo suficientemente elevados, y que por tanto cumplirían con las condiciones necesarias para poder desarrollarlas con este tipo de materiales. No obstante, con las tecnologías hoy en día disponibles no resulta posible la aplicación de estos métodos, pese a que resulta esperanzador la gran evolución de las mismas que se experimenta actualmente, dejando la puerta abierta a que no dentro de mucho tiempo puedan implementarse.

8 LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

Dado que con este trabajo se ha iniciado una intensa línea de trabajo, la cual tiene mucho potencial, se incluyen posibles vías con las que se podría terminar de desarrollar este proyecto. La finalidad pues de este documento, es servir como guía a futuros desarrollos de este modelo, faltando únicamente por implementar el modelo de “*healing*”.

Dado que los resultados tras la aplicación del proceso de reparación no han sido incorporados, no se ha considerado oportuno incluir la teoría de este modelo, pese a que sí se han indicado sus bases. Por esto, el posible futuro camino para terminar de avalar el efecto de la autorreparación, sería incluir el modelo de daño, junto con el acoplamiento de este con el modelo plástico y de daño que se ha implementado. Posteriormente se tendrían que incluir nuevos análisis tanto de las tensiones como de los desplazamientos y daño experimentados.

Otra de las posibilidades existentes para continuar con el desarrollo de este proyecto, sería refinar el ajuste de la curva carga-apertura de grieta que se ha llevado a cabo. Como se comentó anteriormente, determinados efectos de las curvas de las que se partían, como podría ser la acumulación de tensiones inelásticas que generaban una pendiente distinta en la descarga y en la carga, no han podido ser ajustados con total precisión debido a la falta de datos. Debido a esto, se podría plantear la captura de estos detalles en trabajos posteriores.

Dada la teoría que se posee, y tras llevar a cabo la implementación del proceso de “*healing*”, cabe esperar obtener un aumento de la pendiente de descarga, lo cual indicaría una reducción de la pérdida de Rigidez que se experimenta al sufrir daño, y que sería un indicativo directo del fenómeno de autorreparación. Por otro lado, y como consecuencia de esta reparación, se esperaría obtener una reducción de las tensiones y el daño experimentado en la grieta respecto a los mostrados en este documento, y la consecuente reducción de los desplazamientos horizontales y, por tanto, de la apertura de grieta.

REFERENCIAS

- Alfredsson, K. & Stigh, U., 2004. Continuum damage mechanics revised: A principle for mechanical and thermal equivalence. *International Journal of Solids and Structures*, 41(15), pp. 4025-4045.
- Aliko-Benítez, A., 2017. *Modelo mecano-químico difusivo fenomenológico de autorreparación: implementación numérica y simulación con aplicación a materiales estructurales*. Universidad de Sevilla. Departamento Mecánica de medios Continuos y Teoría de Estructuras: s.n.
- Aliko-Benítez, A., Doblaré, M. & Sanz-Herrera, J., 2015. Chemical-diffusive modeling of the self-healing behavior in concrete. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 69-70, pp. 392-402.
- Anupoj, S., 2016. *The Constructor, Civil Engineering Home*. [Online] Available at: <https://theconstructor.org/building/properties-of-building-materials-construction/14891/> [Accessed 14 05 2019].
- Bathe, K., 1996. *Finite Element Procedures Prentice-Hall*. New Jersey : s.n.
- Bhasin, A., Little, D. N., Bommavaram, R. & Vasconcelos, K., 2009. A Framework to Quantify the Effect of Healing in Bituminous Materials using Material Properties. *Road Materials and Pavement Design*, 9(1), pp. 219-242.
- Brown, E. N., Sottos, N. R. & White, S. R., 2002. Fracture testing of a self-healing polymer composite. *Experimental Mechanics*, 42(4), pp. 372-379.
- Cowie, J. & Glassert, F., 1992. The reaction between cement and natural waters containing dissolved carbon dioxide. *Advances in Cement Research*, 4(5), pp. 119-134.
- Darabi, M. k., Al-Rub, R. K. & N.Little, D., 2012. A continuum damage mechanics framework for modeling micro-damage healing. *International Journal of Solid and Structures*, 49(3-4), pp. 492-513.
- Davies, J., 1996. Observation of the fracture path development in mortar beam specimens. *Advanced Cement Based Materials*, 3(1), pp. 31-36.
- Edvardsen, C., 1999. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *Materials Journal*, 96(4), pp. 448-454.
- Fadrigue Contreras, A. M., 2017. *Simulación Computacional de Materiales Autorreparables*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.
- Gheitanbaf, E. H., 2011. *Fracture toughness of ultra high performance concrete..* s.l.:s.n.
- Ghosh, D. S. K., 2006. Functional coatings and microencapsulation: a general perspective. In: *Functional Coatings*. s.l.:s.n.
- Glanville, W., 1993. The permeability of Portland cement concrete.. *Build Res*, Volume 3, pp. 1-61.
- González-Viñas, W. & Mancini, H. L., 2005. *Ciencia de los materiales*. s.l.:Editorial Ariel.
- Granger, S., Loukili, A., Pijaudier-Cabot, G. & Chanvillard, G., 2007. Experimental characterization of the self-healing of cracks in an ultra high performance cementitious material: Mechanical tests and acoustic emission analysis. *Cement and Concrete Research*, Volume 37, pp. 519-527.
- Guía de Abaqus, n.d. *Concrete Damage Plasticity*. [Online] Available at: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEMATRefMap/simamat-concretedamaged.htm> [Accessed 2019].
- Guo, Y. & Guo, W., 2006. Self-healing properties of flaws in nanoscale materials: Effects of soft and hard molecular dynamics simulations and boundaries studied using a continuum mechanical model. *Physical Review B*, Volume 73, pp. 1-7.

- Heide, N. T., 2005. *Crack healing in hydrating concrete*. s.l.:Delft University of Technology.
- Hillerborg, A., 1978. A model for fracture analysis. *Division of Building Materials, LTH, Lund University*, Volume 3005, p. 8.
- Hillerborg, A., M.Mod er & P.-E.Petersson, 1976. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, 6(6), pp. 773-781.
- Hughes, T., 2000. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. 2 ed. New York: McGraw-Hill.
- Jacobsen, S. & Sellevold, E., 1996. Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. *Cement and Concrete Research*, 26(1), pp. 55-62.
- Jankowiak, T. & Lodygowski, T., 2005. Identification of parameters of concrete damage plasticity constitutive model. *Foundations of civil and environmental engineering*, Issue 6.
- Kachanov, M. L., 1958. On the creep fracture time. *Izv. Acad. Nauk SSSR, Otd. Techn. Nauk*, Volume 8, pp. 26-31.
- Kakani, S., 2004. *Material Science*. 1 ed. s.l.:New Age International Ltd.
- Kessler, M., 2007. Self-healing: A new paradigm in materials design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4), pp. 479-495.
- Kessler, M. & White, S., 2001. Self-activated healing of delamination damage in woven composites. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. s.l.:s.n., pp. 683-699.
- Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. & Rusch, H., 1969. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses. *Journal Proceedings*, 66(8), pp. 656-666.
- Kusumawardaningsih, Y., Fehling, E., Ismail, M. & Aboubakr, A. A. M., 2015. Tensile Strength Behavior of UHPC and UHPFRC. *Procedia Engineering*, Volume 125, pp. 1081-1086.
- Lee, J. & Fenves, G. L., 1998. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), pp. 892-900.
- Lemaitre, J. & Chaboche, J., 1990. *Mechanics of Solid Materials*. s.l.:Cambridge University Press.
- Lubliner, J., J.Oliver, Oller, S. & Oñate, E., 1989. A Plastic-Damage Model for Concrete. *Int. J. Solids Structures*, 25(3), pp. 229-326.
- Luccioni, B., 2003. *Mec nica de da o continuo*. 1 ed. Barcelona: Centro Internacional de M todos Num ricos en Ingenier a.
- Miao, S., L.Wang, M. & L.Scheyer, H., 1995. Constitutive Models for Healing of Materials with Application to Compaction of Crushed Rock Salt. *Engineering Mechanics*, 121(10).
- Neville, A., 2002. Autogenous Healing—A Concrete Miracle?. *Concrete International*, 24(11), pp. 76-82.
- Noorden, T. L. v. & Pop, I. S., 2008. A Stefan problem modelling crystal dissolution and precipitation. *IMA Journal of Applied Mathematics*, 73(2), pp. 393-411.
- Petersson, P. E., 1981. *Crack growth and development of fracture zone in plain concrete and similar materials*. Division of building materials ed. Lund institute of technology TVBM-1006: s.n.
- Pimienta, P. & Chanvillard, G., 2004. *Retention of the mechanical performances of Ductal® specimens kept in various aggressive environments*. Avignon: Fib —Symposium.
- Rabotnov, Y. N., 1969. *Creep problems in structural members*. Amsterdam : North-Holland: s.n.
- Ramm, W. & Biscopig, M., 1998. Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 179(2), pp. 191-200.
- Reddy, J., 1993. *An Introductory Course to the Finite Element Method*. 2 ed. Boston: McGraw-Hill.
- Reinhardt, H.-W. & Jooss, M., 2003. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*, 33(7), pp. 981-985.

- Remmers, J., 2006. *Discontinuities in materials and structures: A unifying computational approach*. s.l.:Delft University of Technology.
- Sanz-Herrera, J. & Boccaccini, A., 2011. Modelling bioactivity and degradation of bioactive glass based tissue engineering scaffolds. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 48, pp. 257-268.
- Schlangen, H., 1993. Experimental and Numerical Analysis of Fracture Processes in Concrete. 38(2).
- Spanos, N. & Koutsoukos, a. a. P. G., 1998. Kinetics of Precipitation of Calcium Carbonate in Alkaline pH at Constant Supersaturation. Spontaneous and Seeded Growth. *The Journal of Physical Chemistry*, 102(34), pp. 6679-6684.
- Van der Zwaag, S., 2007. *Self Healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries*. Delft: Springer.
- Voyiadjis, G. Z. & Kattan, P. I., 1990. A coupled theory of damage mechanics and finite strain elasto-plasticity—II. Damage and finite strain plasticity. *International Journal of Engineering Science*, 28(6), pp. 505-524.
- White, S. et al., 2001. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, Volume 409, pp. 794-797.
- Zienkiewicz, O. & Taylor, R., 2000. *The Finite Element Method*. 5 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.

