

CAPÍTULO 4. DESARROLLO DE MODELOS NUMÉRICOS

4.1. MODELOS DE COMPORTAMIENTO EN FRACTURA.

4.1.1. Modelo de grieta discreta

4.1.1.1. Descripción del modelo

A continuación se pasa a desarrollar un modelo que simula los ensayos a flexión en tres puntos que se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de la ETSI. Para la creación del modelo y el posterior análisis de los resultados se ha empleado el software Abaqus CAE.

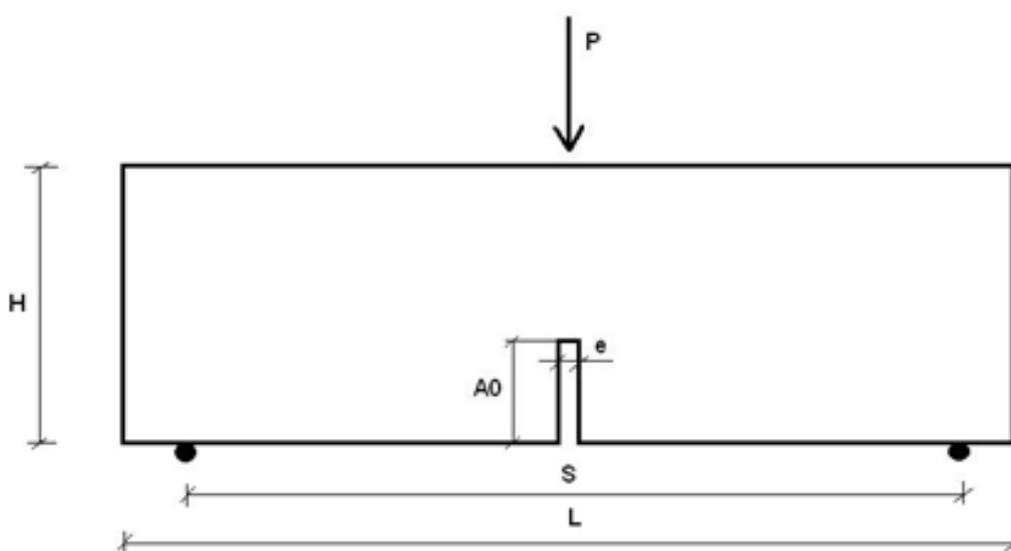


Figura 4.1.- Representación del ensayo a flexión en tres puntos

El modelo consiste en la mitad de la probeta de la figura 4.1, a la que se le ha aplicado simetría, representándose una semiprobeta. Los elementos cohesivos de la zona de ligamento del modelo son muelles elásticos con comportamiento no lineal. De esta forma se introduce el ablandamiento en tracción para la simulación del proceso de fractura en el hormigón. Las leyes de comportamiento de los muelles $F-\Delta l$ (Fuerza-incremento de longitud) quedan definidas mediante la ley de ablandamiento $\sigma-\omega$ del hormigón y el área de influencia de cada muelle.

El primer paso es crear la geometría y el tipo del modelo, el cual vamos a considerar bidimensional debido a que el comportamiento de la viga a lo largo del canto de la misma es idéntico.

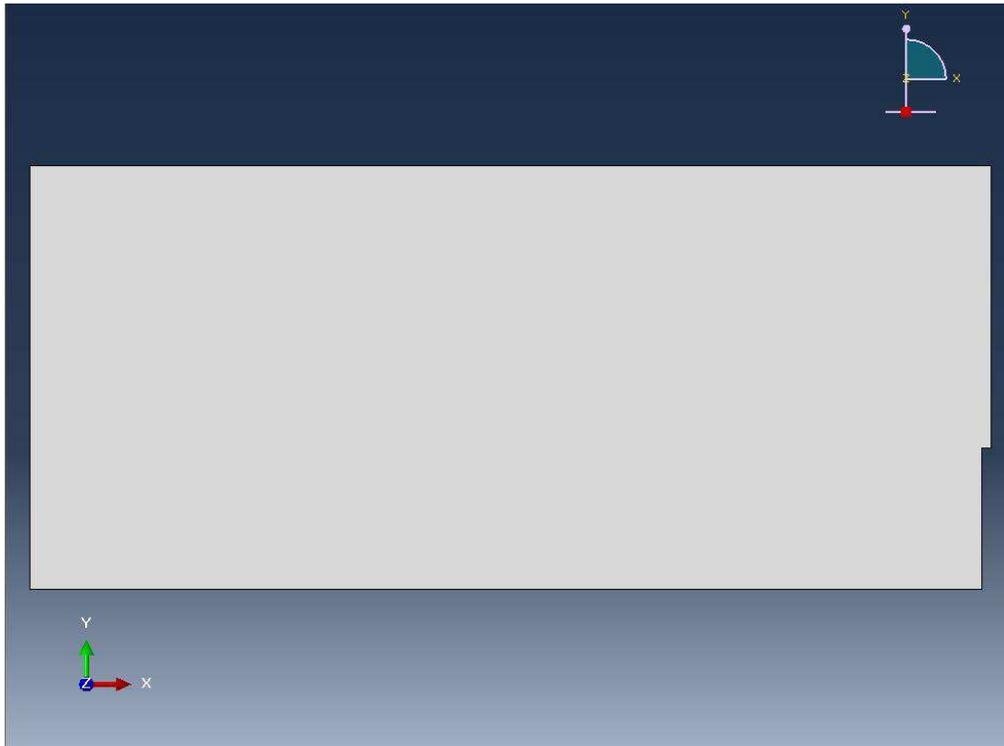


Figura 4.2.- Geometría del modelo

A continuación se va a dividir la geometría en tres partes tal y como se muestra en la siguiente figura.

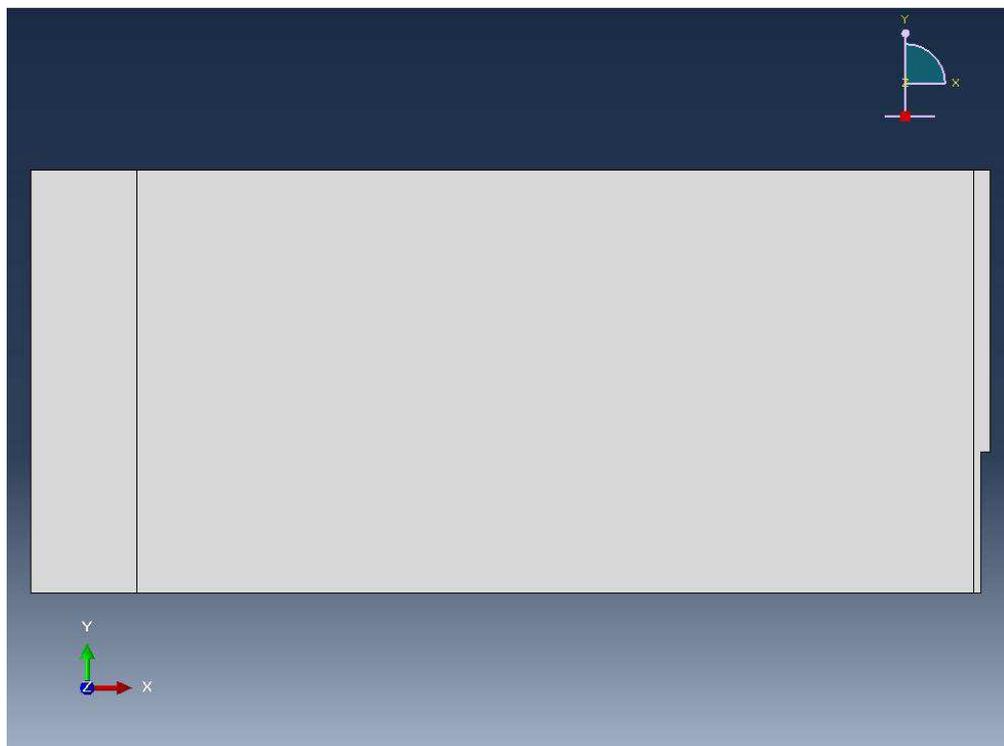


Figura 4.3.- Geometría del modelo con particiones

Estas particiones tienen el objetivo de situar tanto el punto de apoyo de la viga (en el caso de la primera línea) como los distintos muelles que vamos a introducir en los próximos pasos (en

el caso de la segunda), ya que los elementos de la malla de la parte de más a la derecha de la figura van a tener el tamaño de la separación entre los muelles.

A continuación se va a proceder al mallado, el cual se realiza utilizando el elemento CPS4R.

Seguidamente vamos a definir el tamaño de los elementos. Para ello vamos a distinguir dos zonas en nuestro modelo. La zona de las inmediaciones del centro de la viga (zona 1) la cual está formada por la parte que está más a la derecha de nuestra geometría, y el resto (zona 2) formada por las restantes dos partes. Los valores del tamaño de las divisiones para el mallado se muestran en la siguiente tabla:

	ET-1	ET-2	ET-3
ZONA 1	2.167	4.33	8.66
ZONA 2	5	7	15

Tabla 4.1.- Valores del tamaño de las divisiones para el mallado

Los valores para la zona 1 resultan de que se van a introducir 20 muelles en la zona de ligamento.

Para poder introducir los muelles en los puntos deseados, creamos una nueva geometría a partir del mallado.

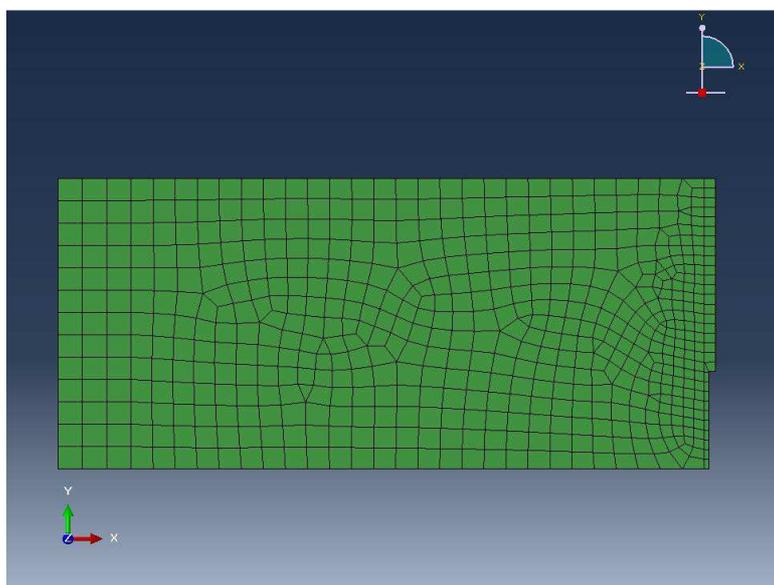


Figura 4.4.- Nueva geometría del modelo

El siguiente paso es la introducción del material y la sección de la viga. Nuestra viga es de hormigón (vamos a suponer un comportamiento elástico lineal) y tiene un canto de 65 milímetros para todos los tamaños. Se va a realizar un modelo para cada edad del hormigón, teniendo un mismo coeficiente de Poisson de 0.2 para todos los modelos, mientras que el

módulo de deformación longitudinal va a ir tomando los valores que se muestran en la siguiente tabla.

TIEMPO DE CURADO	MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL, EC (MPA)
24 horas	18851
2 días	19785.6
3 días	20719.9
4 días	21654.2
5 días	22588.5
6 días	23522.8
7 días	24457
14 días	24457
28 días	28472

Tabla 4.2.- Valores del módulo de deformación longitudinal del hormigón en función de la edad

A la hora de introducir las propiedades de los muelles hay que tener en cuenta el área de influencia de cada uno de los mismos. Las áreas de influencia para los tamaños ET-1, ET-2 y ET-3 son 140.855 mm^2 , 281.145 mm^2 y 562.9 mm^2 , respectivamente. Los valores introducidos para los distintos tamaños y distintas edades del hormigón se comentarán en el apartado correspondiente a los resultados ya que se han obtenido en función de los mismos por análisis inverso.

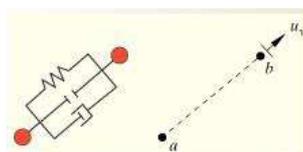


Figura 4.5.- Diagrama de la conexión (muelle)

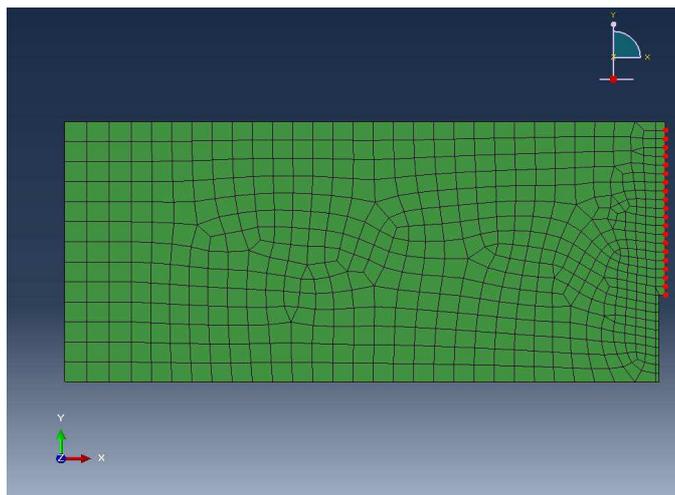


Figura 4.6.- Situación de los puntos de ubicación de los muelles

Se puede observar que el punto superior de la cara donde van a estar los muelles no está seleccionado porque no va a ser necesario, ya que el desplazamiento horizontal en dicho punto va a estar impedido por las condiciones de contorno.

Las condiciones de contorno son el apoyo izquierdo ($U_2=0$) y la condición de contorno en simetría en el nodo superior derecho ($U_1=0$). La carga que se introduce es una carga puntual vertical de valor -100 N., -200 N. y -400 N. para los tamaños ET-1, ET-2 y ET-3, respectivamente.

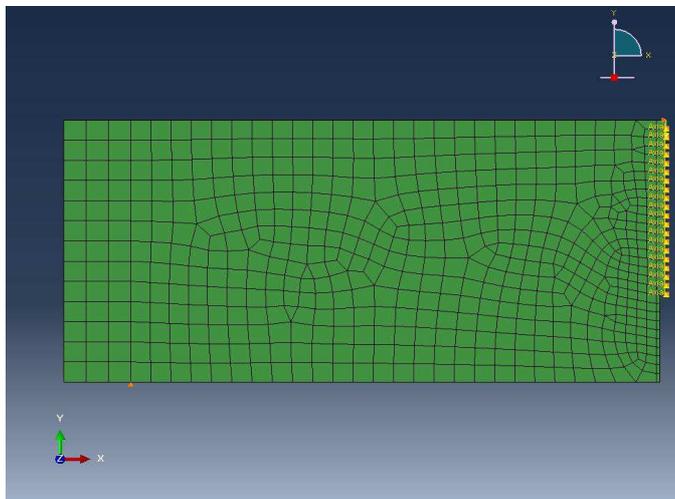


Figura 4.7.- Geometría con muelles, carga y condiciones de contorno

4.1.1.2. Resultados

A continuación se va a detallar el proceso de obtención de los resultados obtenidos con el modelo numérico que se ha implementado.

Se han obtenido las curvas carga-apertura de la boca de la grieta (P-CMOD) para cada probeta ensayada, es decir, para los tres tamaños y para las edades de hormigón de 24 horas, 2 días, 3

días, 4 días, 5 días, 6 días, 7 días, 14 días y 28 días. Dichas curvas se han obtenido mediante análisis inverso siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la siguiente figura.

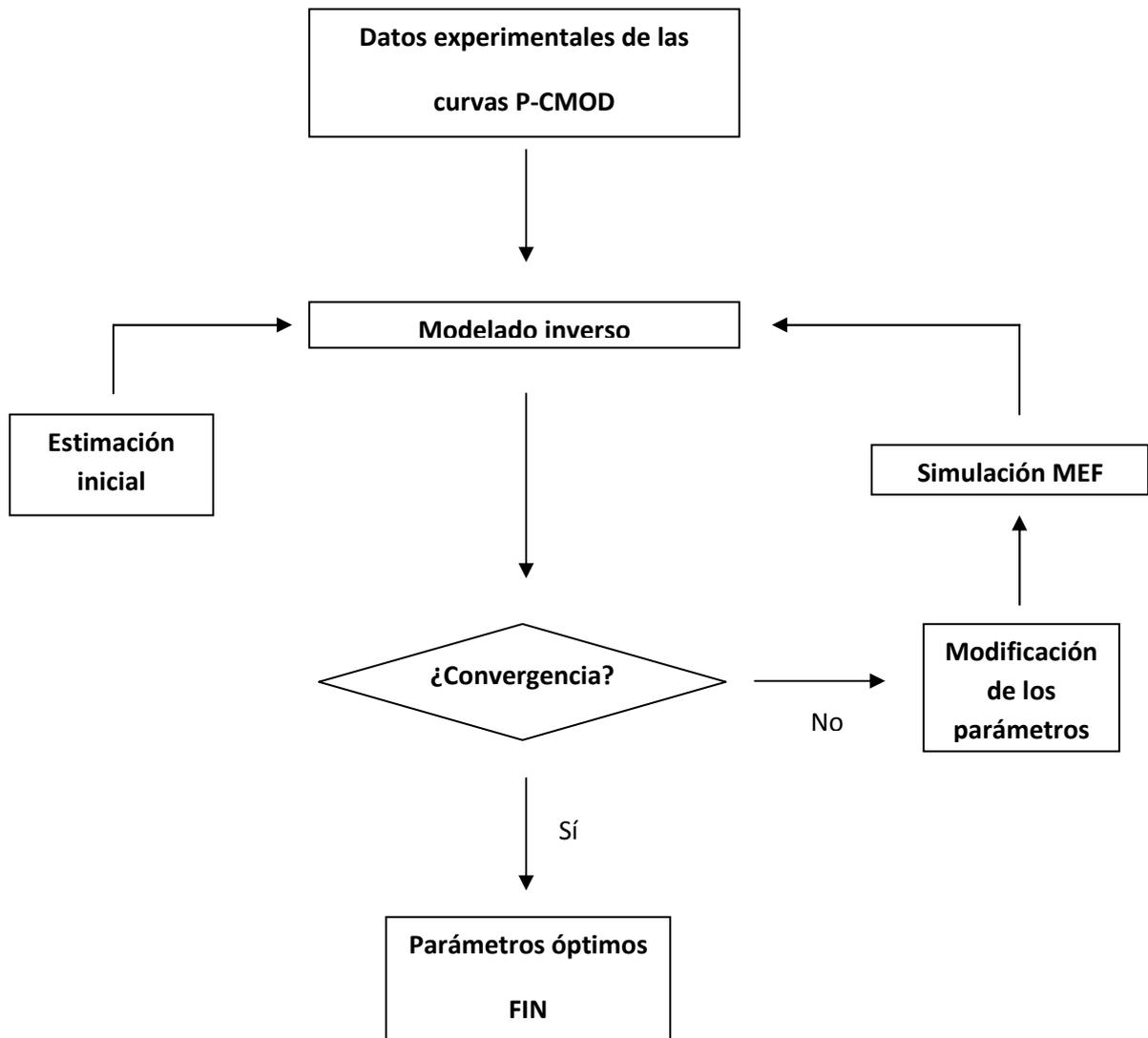


Figura 4.8.-Diagrama de flujo seguido en la aplicación del método inverso

Tal y como se explicó anteriormente, en el laboratorio se ensayaron tres especímenes idénticos para cada tamaño de probeta y edad del hormigón. Con las curvas experimentales carga-apertura de la boca de la grieta de los tres especímenes se representa la envolvente de los resultados experimentales, dentro de la cual se pretende que esté la curva que se obtienen mediante la simulación en elementos finitos.

Los muelles del modelo de Abaqus siguen una ley $F-\Delta l$ (fuerza-incremento de longitud) trilineal como la que se muestra en la siguiente figura.

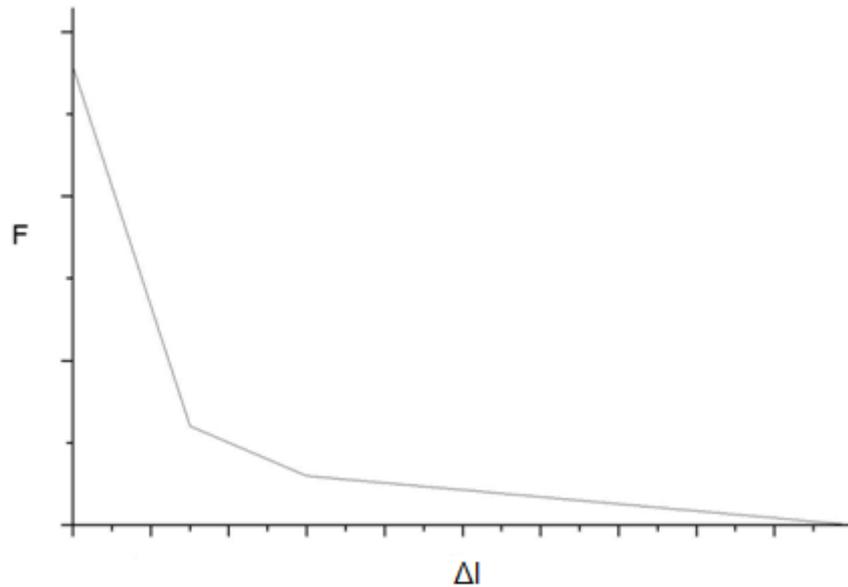


Figura 4.9.-Ley F- Δl de los muelles

El valor de la carga máxima de cada muelle se ha fijado como el producto de la resistencia a tracción del ensayo brasileño y el área de influencia de cada muelle. El resto de puntos se han ido modificando siguiendo la metodología expuesta en el diagrama de flujo de aplicación del método inverso.

Debido a los problemas numéricos que se producen en el modelo de Abaqus, la curva finalmente va a estar definida por seis puntos, que son los que se van a introducir en las propiedades de los muelles del modelo.

A continuación se van a mostrar los resultados para cada tamaño de probeta y edad del hormigón.

HORMIGÓN DE 28 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=28 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.7
-12	-0.28
-65.074305	-0.22

0	0
-605.6765	1E-050
9999999999999	1

Tabla 4.3.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=28 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

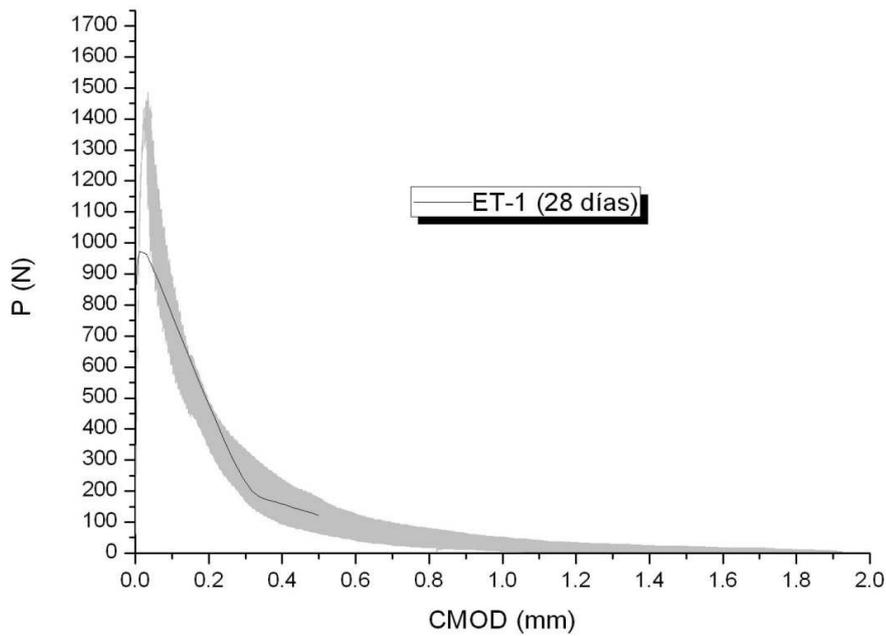


Figura 4.10.-Curva P-CMOD ET-1 (28 días)

TAMAÑO ET-2 (t=28 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1
-14	-0.47
-100	-0.37
0	0
-1208.9235	1E-050
9999999999999	1

Tabla 4.4.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=28 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

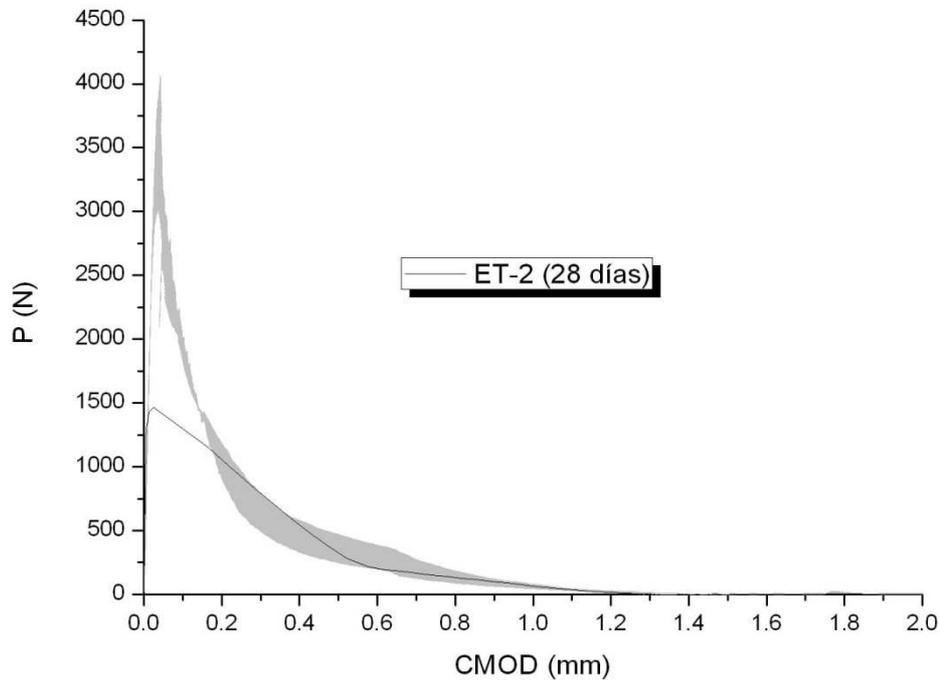


Figura 4.11.-Curva P-CMOD ET-2 (28 días)

TAMAÑO ET-3 (t=28 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.5
-20.8998	-0.65
-167.0939	-0.55
0	0
-2420.47	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.5.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=28 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

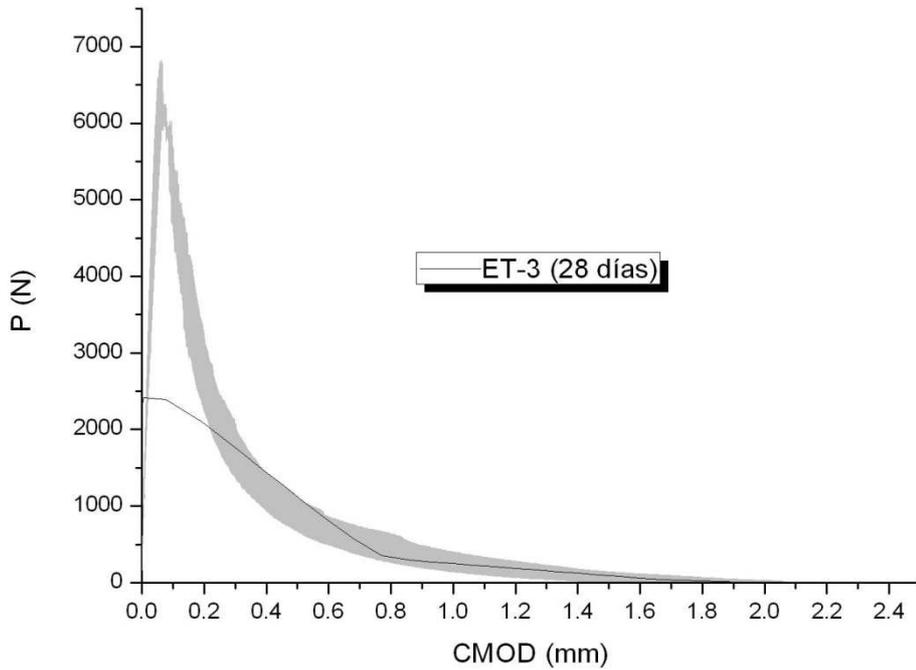


Figura 4.12.-Curva P-CMOD ET-3 (28 días)

HORMIGÓN DE 14 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=14 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-2.5
-12.43301	-0.417
-82.074305	-0.34
0	0
-450.736	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.6.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=14 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

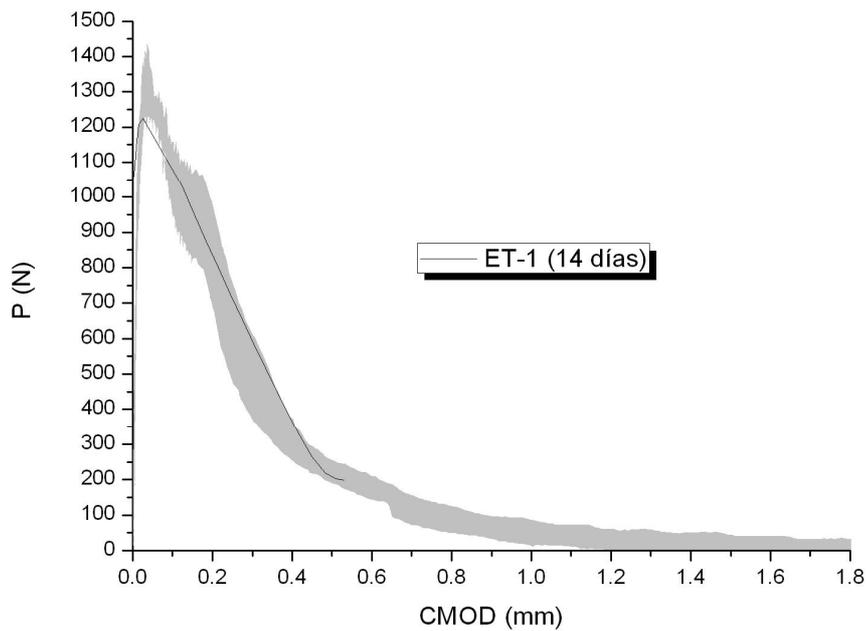


Figura 4.13.-Curva P-CMOD ET-1 (14 días)

TAMAÑO ET-2 (t=14 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.8
-12	-0.36
-60	-0.28
0	0
-899.664	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.7.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=14 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

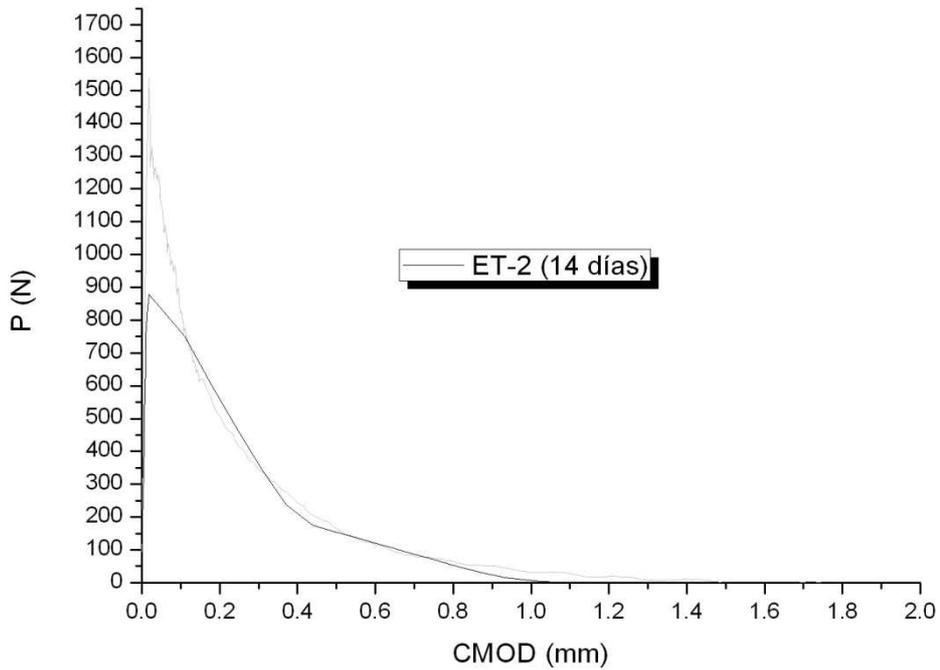


Figura 4.14.-Curva P-CMOD ET-2 (14 días)

TAMAÑO ET-3 (t=14 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.2
-15.8998	-0.805
-168.0939	-0.66
0	0
-1801.28	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.8.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=14 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

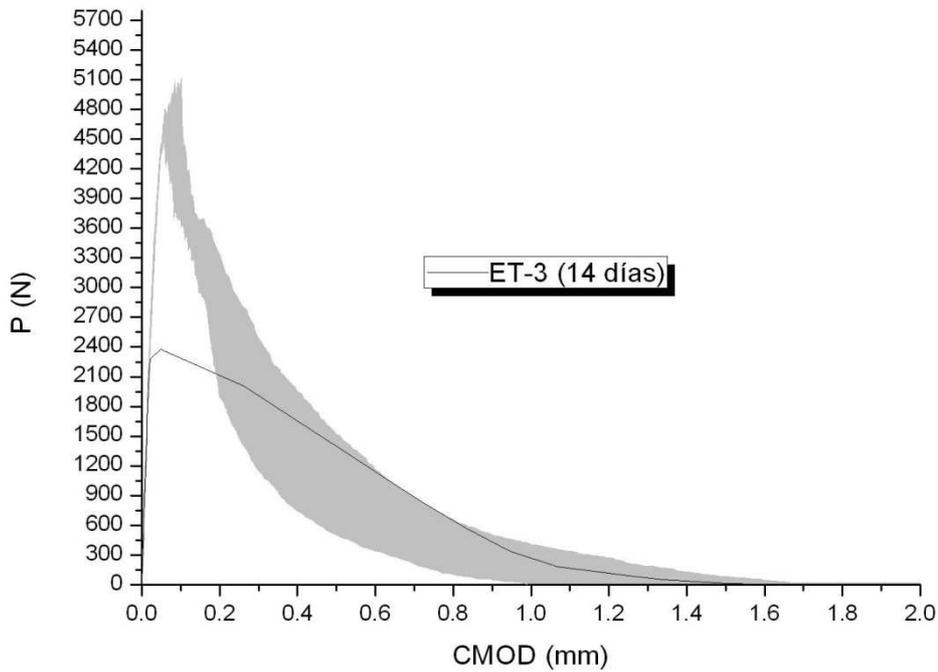


Figura 4.15.-Curva P-CMOD ET-3 (14 días)

HORMIGÓN DE 7 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=7 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.89
-10.73301	-0.34
-70.074305	-0.29
0	0
-394.394	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.9.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=7 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

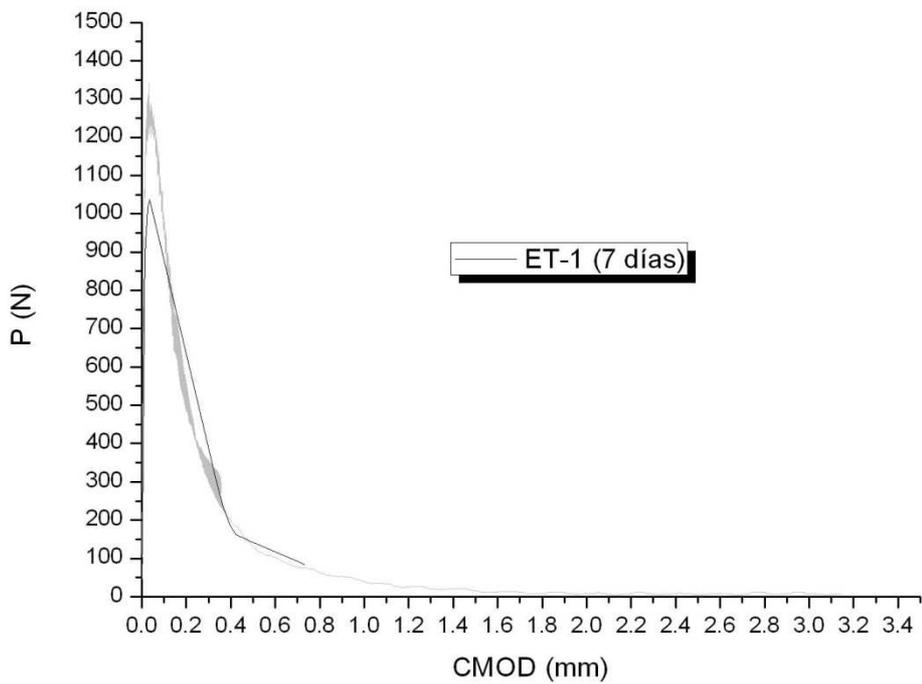


Figura 4.16.-Curva P-CMOD ET-1 (7 días)

TAMAÑO ET-2 (t=7 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.5
-16	-0.53
-100	-0.44
0	0
-787.206	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.10.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=7 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

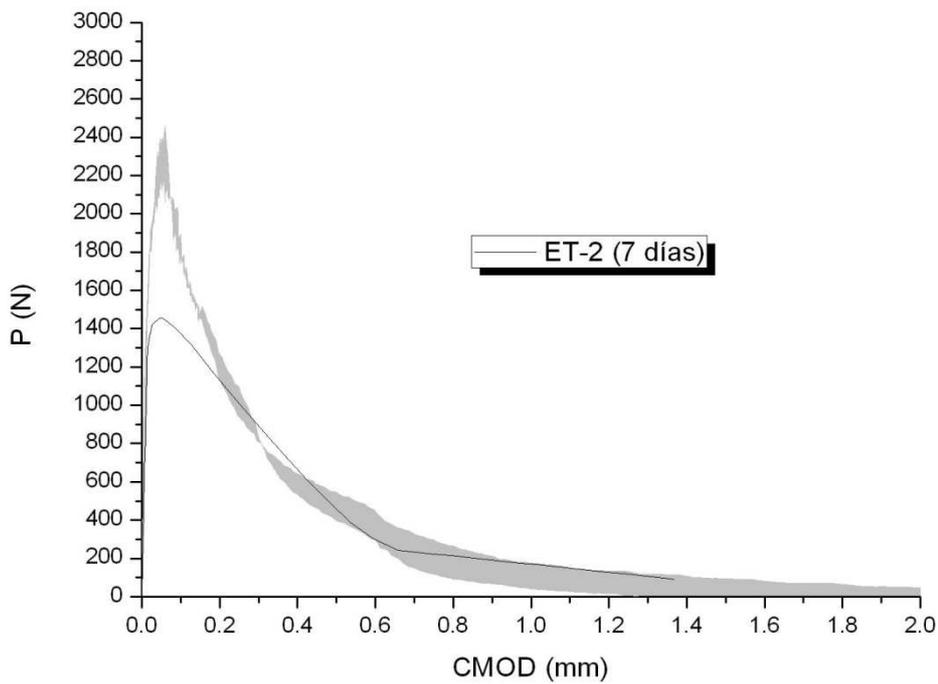


Figura 4.17.-Curva P-CMOD ET-2 (7 días)

TAMAÑO ET-3 (t=7 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm)
0	-1.5
-10.8998	-0.78
-167.0939	-0.65
0	0
-1576.12	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.11.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=7 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

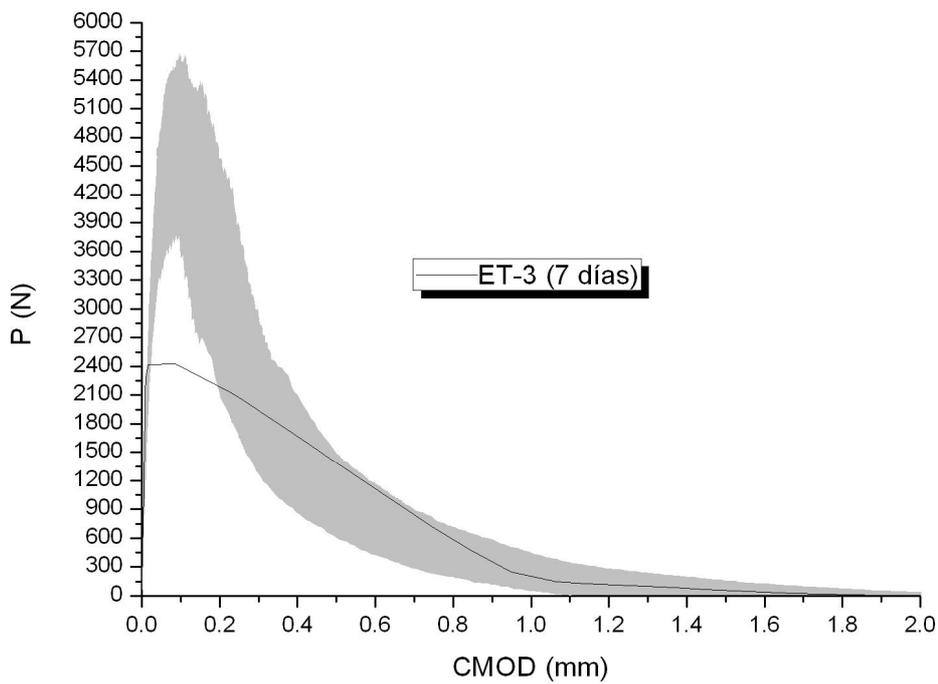


Figura 4.18.-Curva P-CMOD ET-3 (7 días)

HORMIGÓN DE 6 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=6 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1
-16.13301	-0.36
-75.074305	-0.31
0	0
-375.23772	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.12.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=6 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

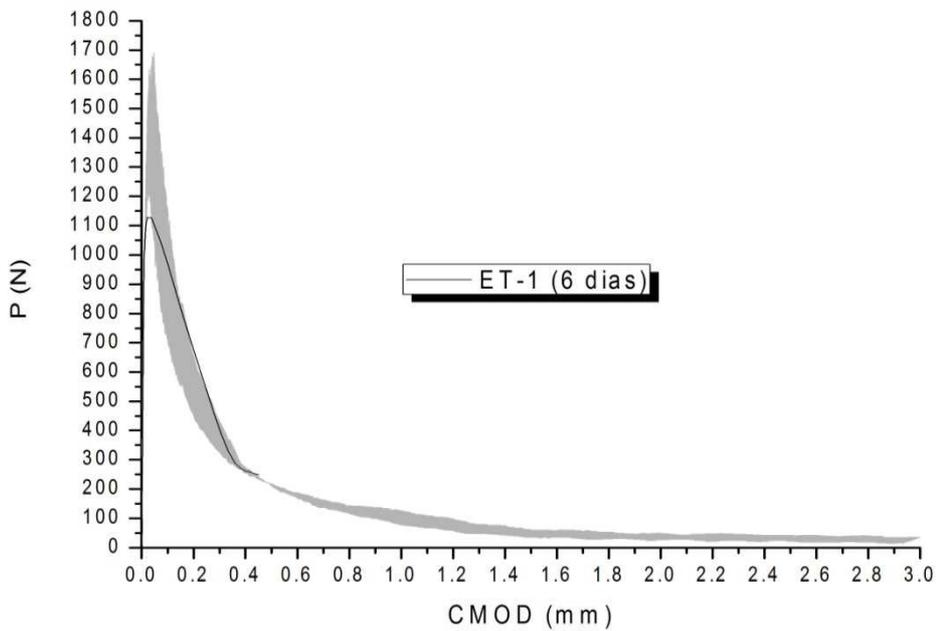


Figura 4.19.-Curva P-CMOD ET-1 (6 días)

TAMAÑO ET-2 (t=6 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.4
-22.43099	-0.57
-112.927695	-0.5
0	0
-748.97028	1E-050
99999999999999	1

Tabla 4.13.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=6 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

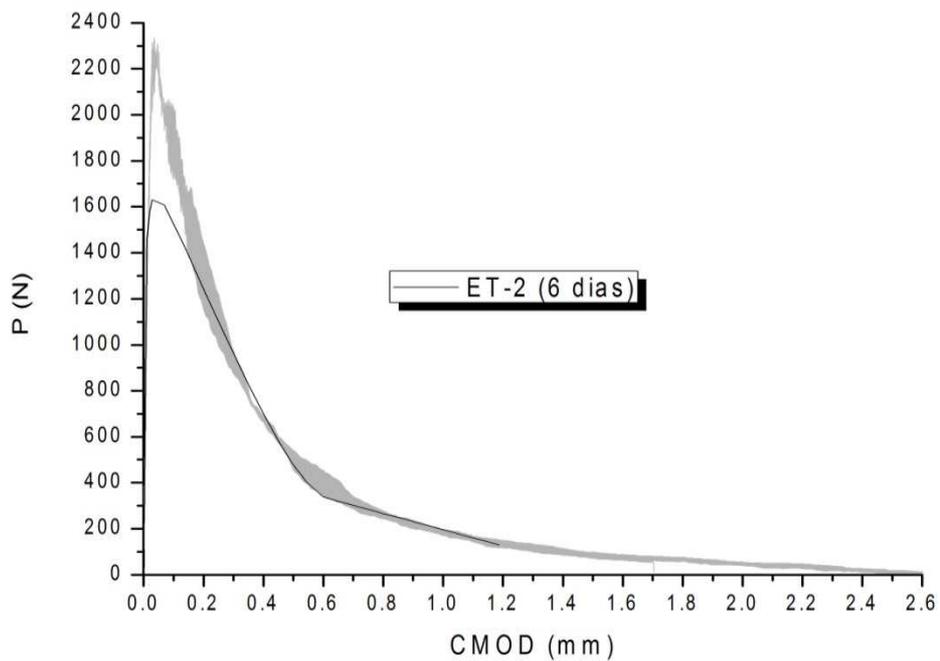


Figura 4.20.-Curva P-CMOD ET-2 (6 días)

TAMAÑO ET-3 (t=6 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.3
-27.8998	-0.73
-152.0939	-0.61
0	0
-1499.5656	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.14.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=6 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

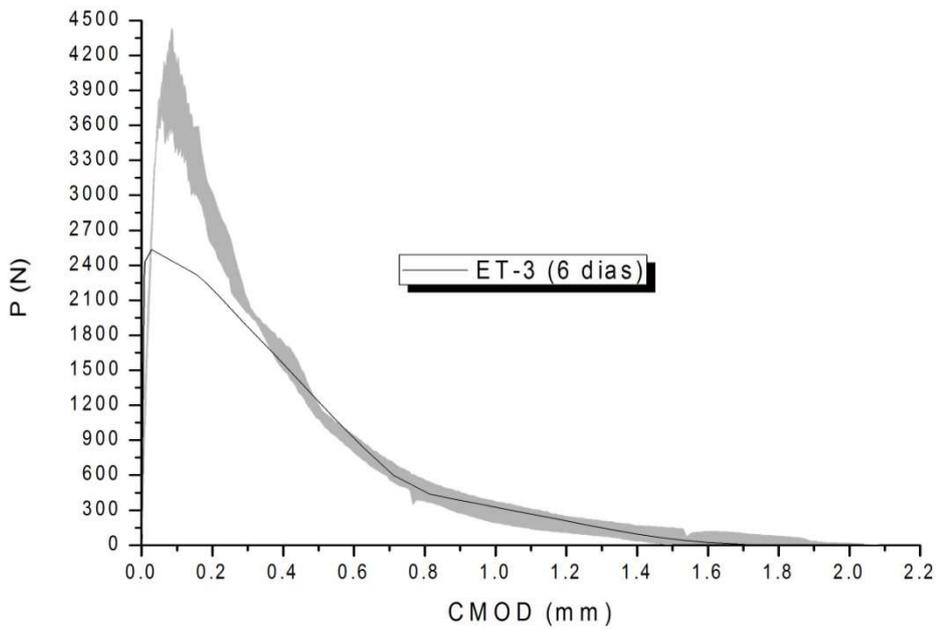


Figura 4.21.-Curva P-CMOD ET-3 (6 días)

HORMIGÓN DE 5 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=5 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.4
-8.73301	-0.36
-69.074305	-0.3
0	0
-356.504	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.15.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=5 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

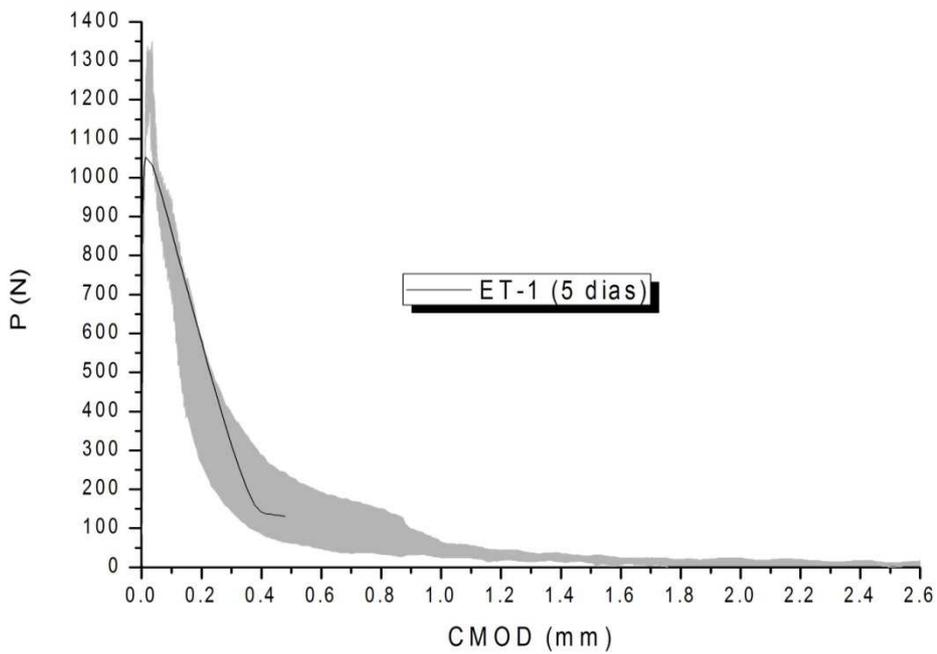


Figura 4.22.-Curva P-CMOD ET-1 (5 días)

TAMAÑO ET-2 (t=5 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.783
-17.43099	-0.57
-97.27695	-0.47
0	0
-711.577995	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.16.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=5 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

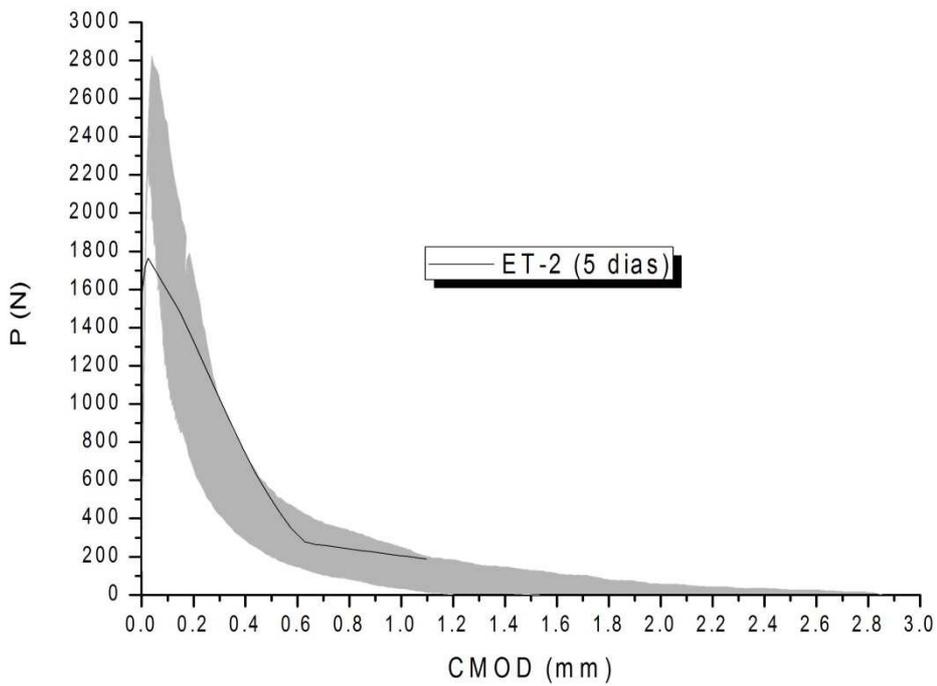


Figura 4.23.-Curva P-CMOD ET-2 (5 días)

TAMAÑO ET-3 (t=5 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.05
-10.8998	-0.68
-135.0939	-0.57
0	0
-1424.6999	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.17.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=5 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

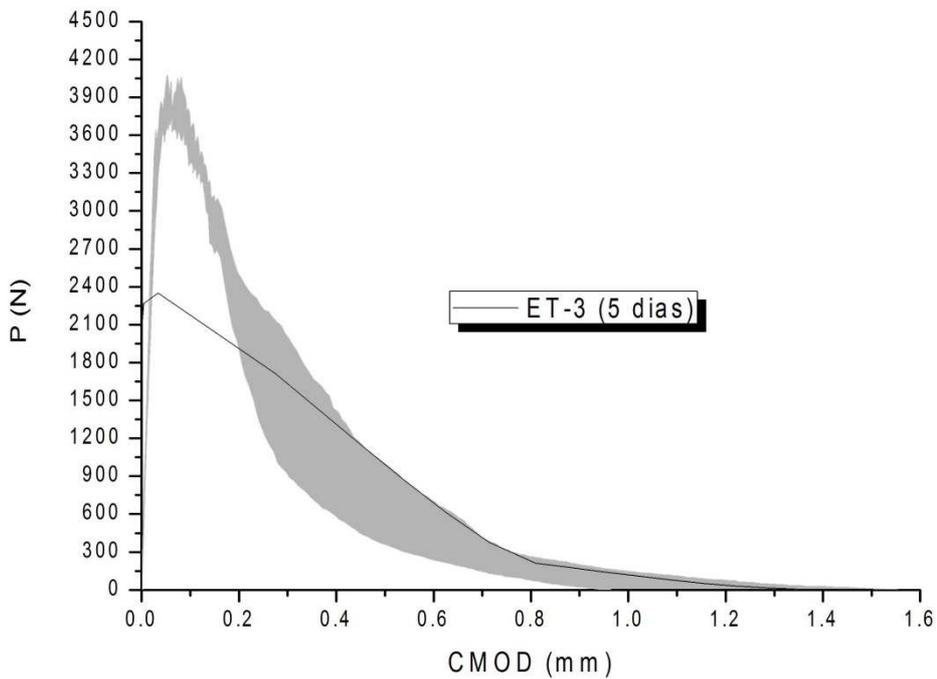


Figura 4.24.-Curva P-CMOD ET-3 (5 días)

HORMIGÓN DE 4 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=4 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.85
-16.73301	-0.35
-60.074305	-0.27
0	0
-337.77029	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.18.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=4 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

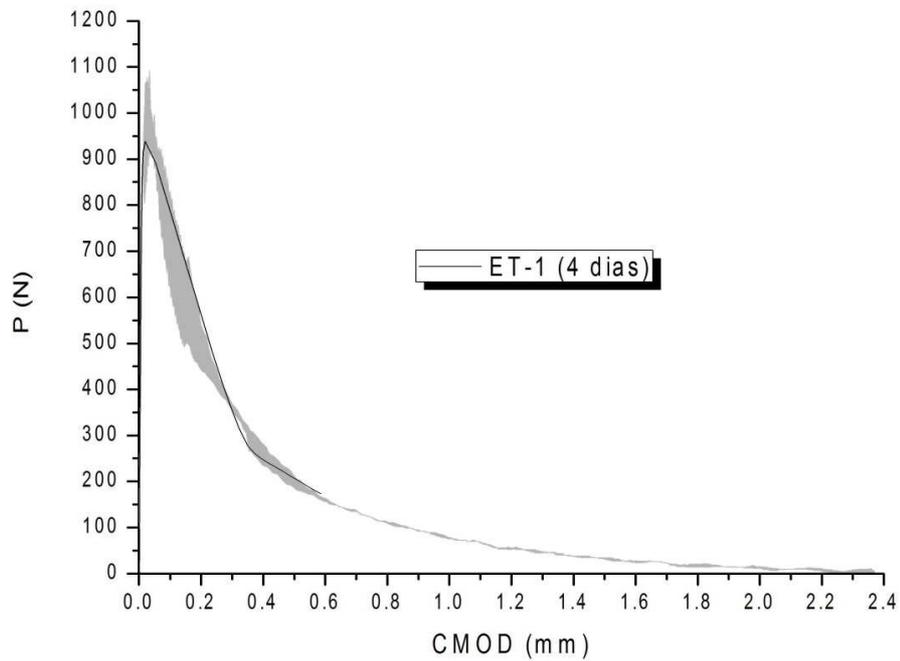


Figura 4.25.-Curva P-CMOD ET-1 (4 días)

TAMAÑO ET-2 (t=4 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.1
-15.43099	-0.5
-80	-0.4
0	0
-674.18571	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.19.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=4 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

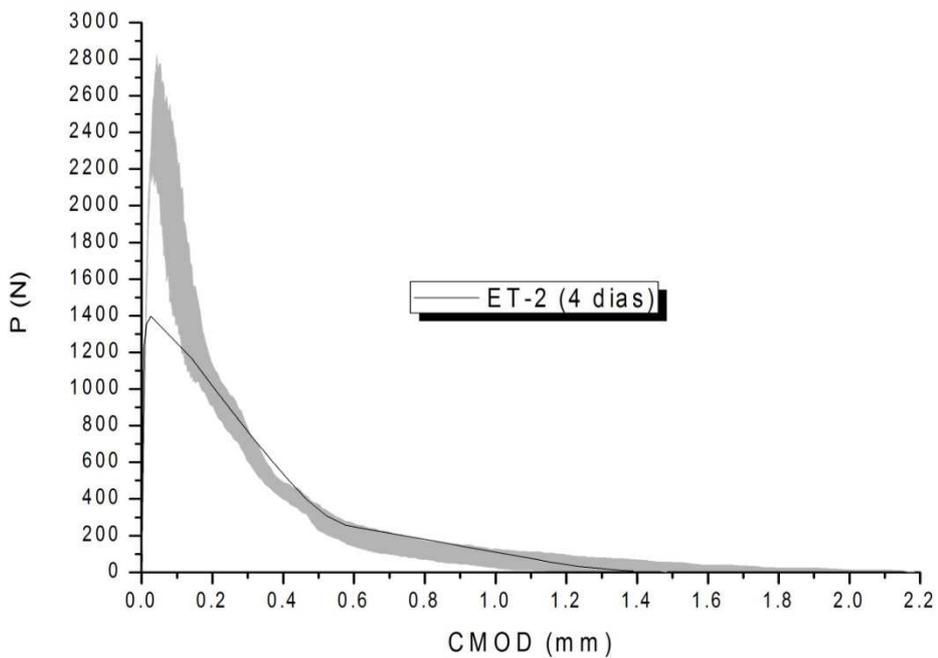


Figura 4.26.-Curva P-CMOD ET-2 (4 días)

TAMAÑO ET-3 (t=4 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.3
-28.8998	-0.7
-130.0939	-0.58
0	0
-1349.8342	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.20.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=4 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

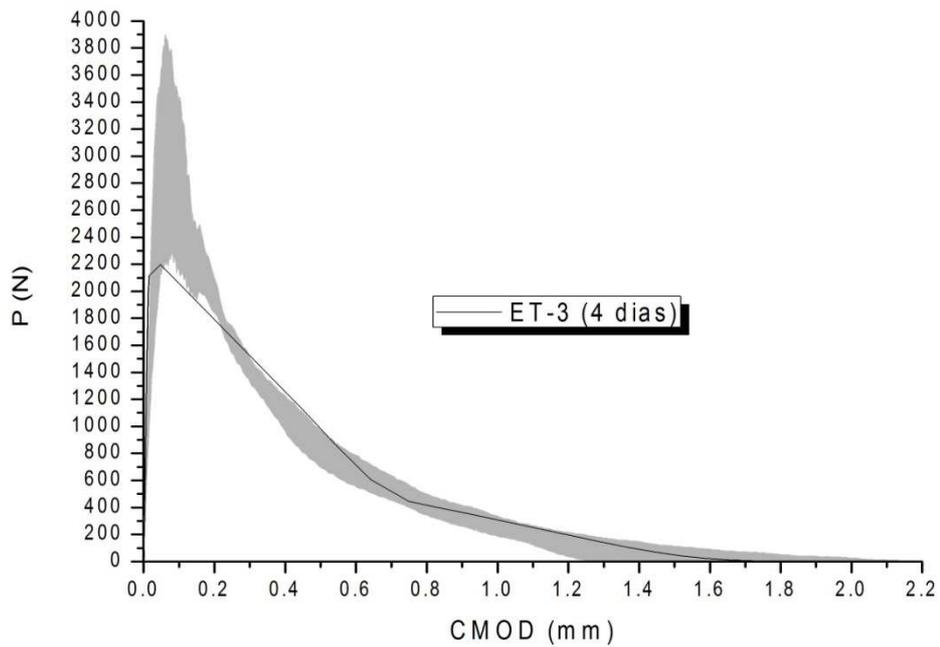


Figura 4.27.-Curva P-CMOD ET-3 (4 días)

HORMIGÓN DE 3 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=3 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.9
-8.73301	-0.315
-52.074305	-0.245
0	0
-319.036575	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.21.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=3 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

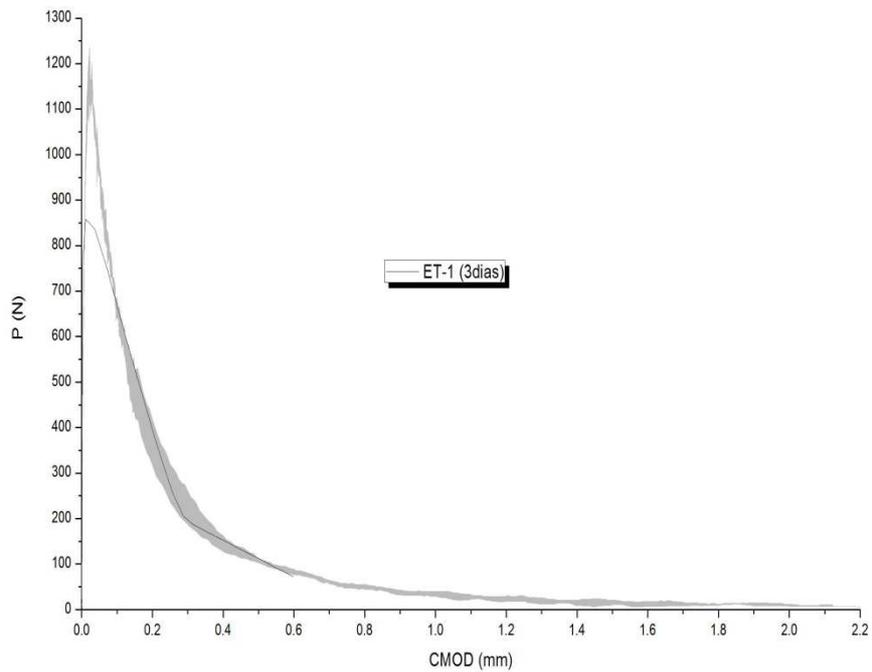


Figura 4.28.-Curva P-CMOD ET-1 (3 días)

TAMAÑO ET-2 (t=3 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.06
-16.43099	-0.55
-87.927695	-0.45
0	0
-636.793425	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.22.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=3 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

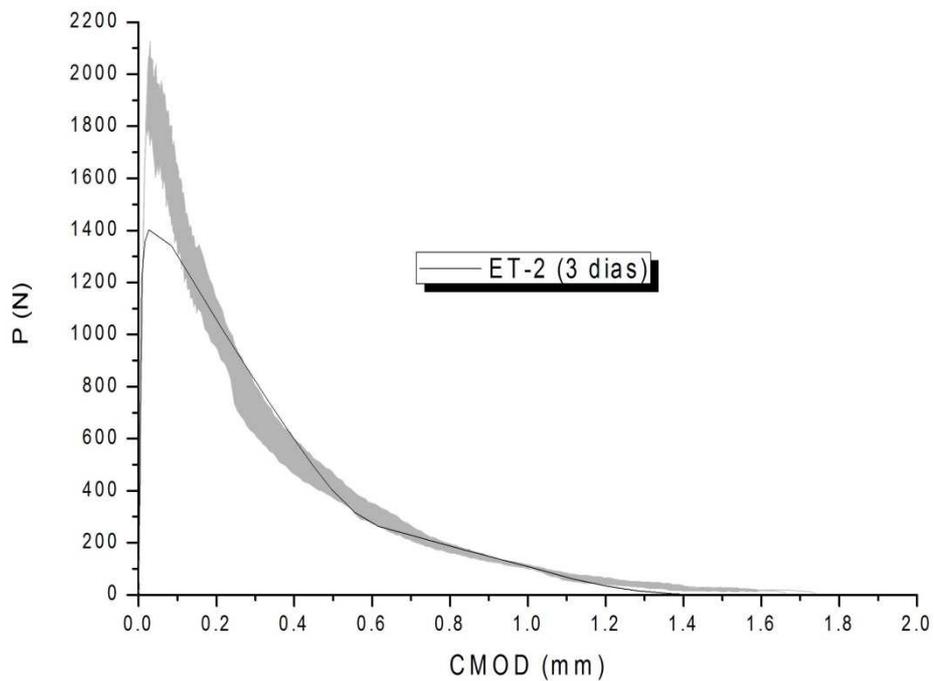


Figura 4.29.-Curva P-CMOD ET-2 (3 días)

TAMAÑO ET-3 (t=3 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.1
-27.8998	-0.69
-125.0939	-0.58
0	0
-1274.9685	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.23.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=3 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

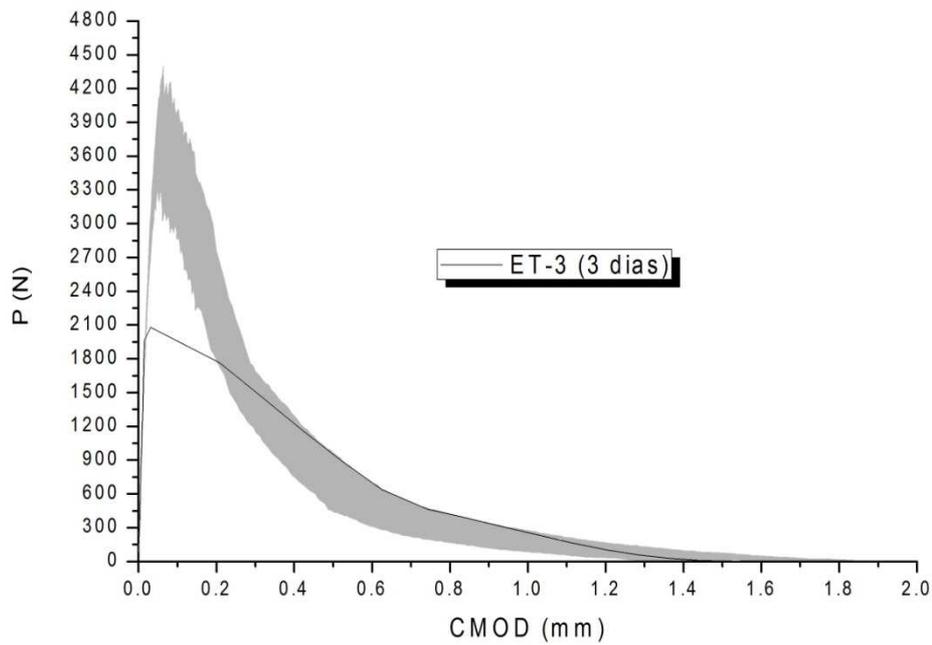


Figura 4.30.-Curva P-CMOD ET-3 (3 días)

HORMIGÓN DE 2 DÍAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=2 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.2
-10.73301	-0.31
-47.074305	-0.23
0	0
-300.30286	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.24.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=2 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

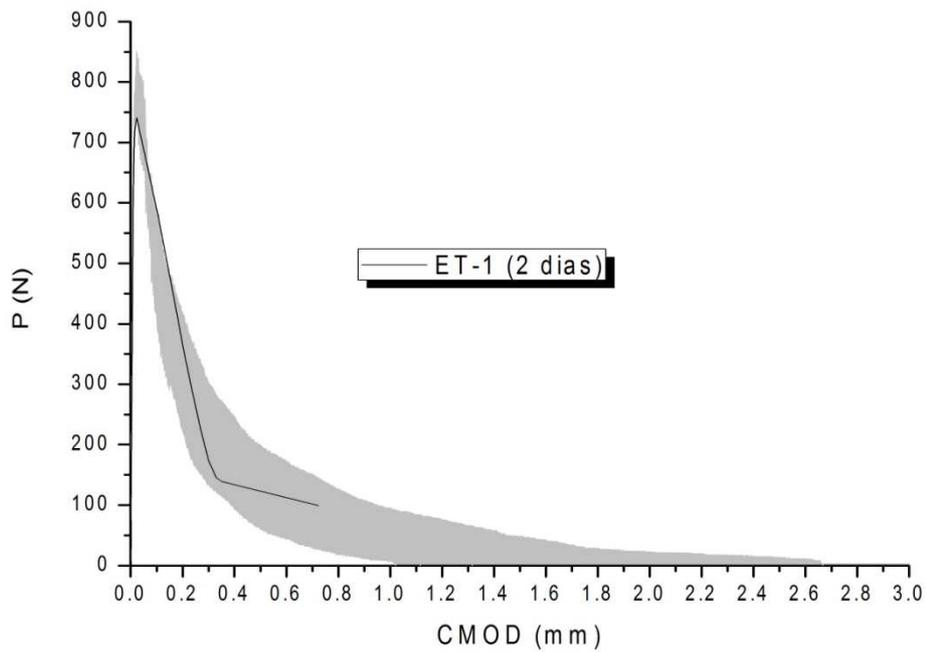


Figura 4.31.-Curva P-CMOD ET-1 (2 días)

TAMAÑO ET-2 (t=2 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.4
-20	-0.57
-92	-0.49
0	0
-599.40114	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.25.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=2 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

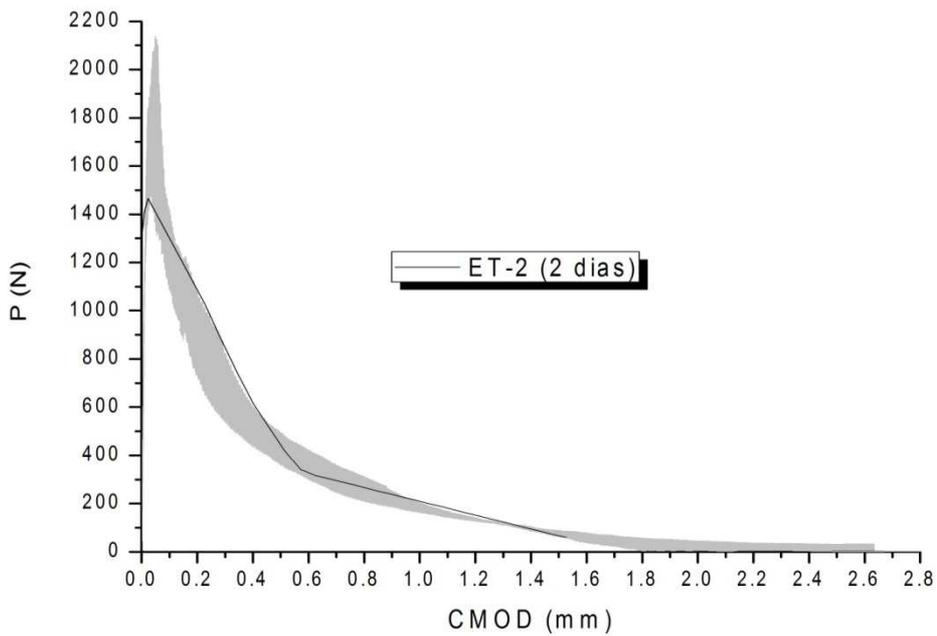


Figura 4.32.-Curva P-CMOD ET-2 (2 días)

TAMAÑO ET-3 (t=2 DÍAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.2
-15.8998	-0.73
-125.0939	-0.61
0	0
-1200.1028	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.26.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=2 días

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

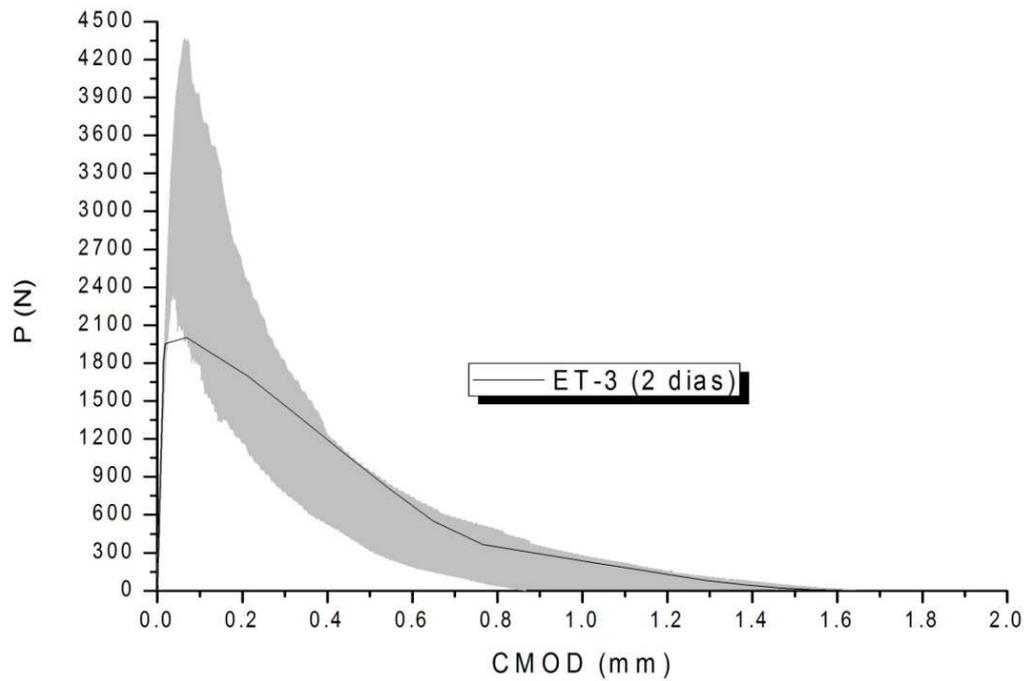


Figura 4.33.-Curva P-CMOD ET-3 (2 días)

HORMIGÓN DE 24 HORAS DE EDAD

TAMAÑO ET-1 (t=24 HORAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-0.75
-7.5	-0.235
-35.7	-0.188
0	0
-281.71	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.27.- Propiedades de los muelles tamaño ET-1 y t=24 horas

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

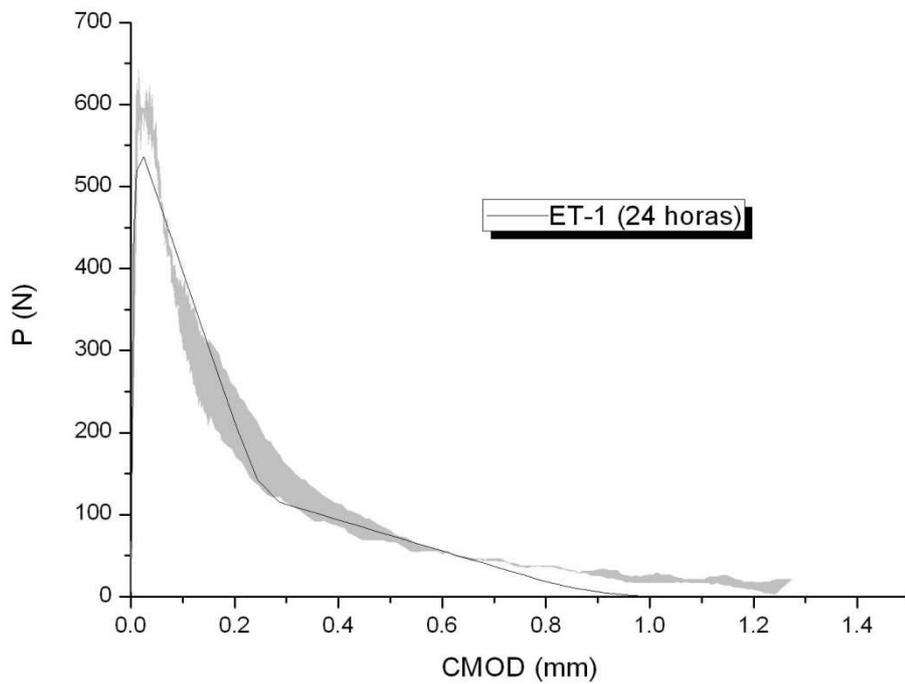


Figura 4.34.-Curva P-CMOD ET-1 (24 horas)

TAMAÑO ET-2 (t=24 HORAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.1
-10.43	-0.41
-60.927695	-0.35
0	0
-562.29	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.28.- Propiedades de los muelles tamaño ET-2 y t=24 horas

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

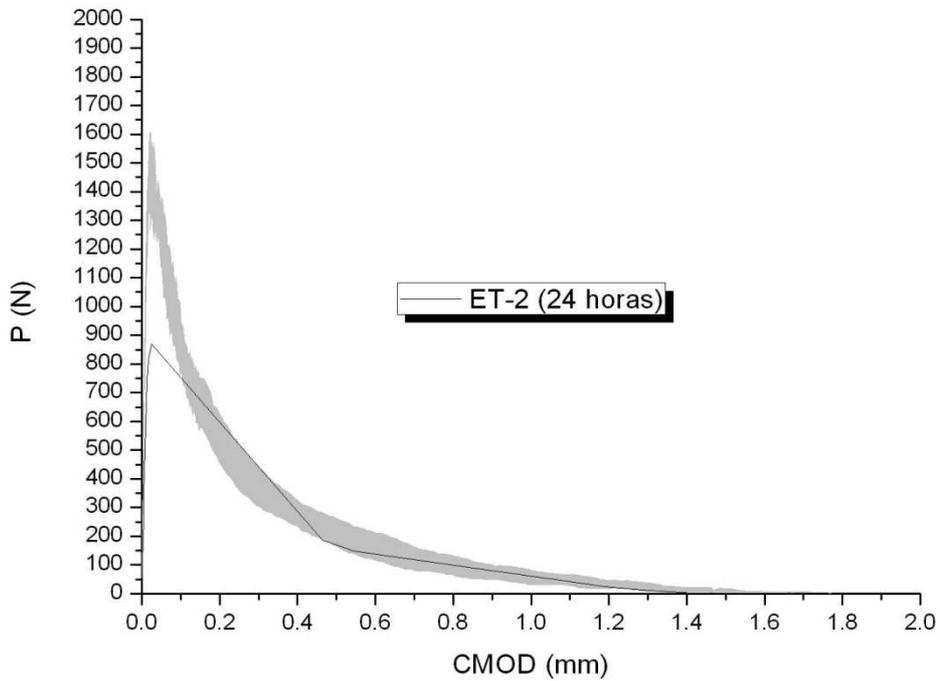


Figura 4.35.-Curva P-CMOD ET-2 (24 horas)

TAMAÑO ET-3 (t=24 HORAS)

Los puntos introducidos en las propiedades de los muelles se muestran en la siguiente tabla:

F (N)	δ (mm.)
0	-1.2
-14.8998	-0.58
-95.0939	-0.48
0	0
-1125.8	1E-050
999999999999	1

Tabla 4.29.- Propiedades de los muelles tamaño ET-3 y t=24 horas

Y la curva carga-apertura de la boca de la grieta obtenida es la siguiente:

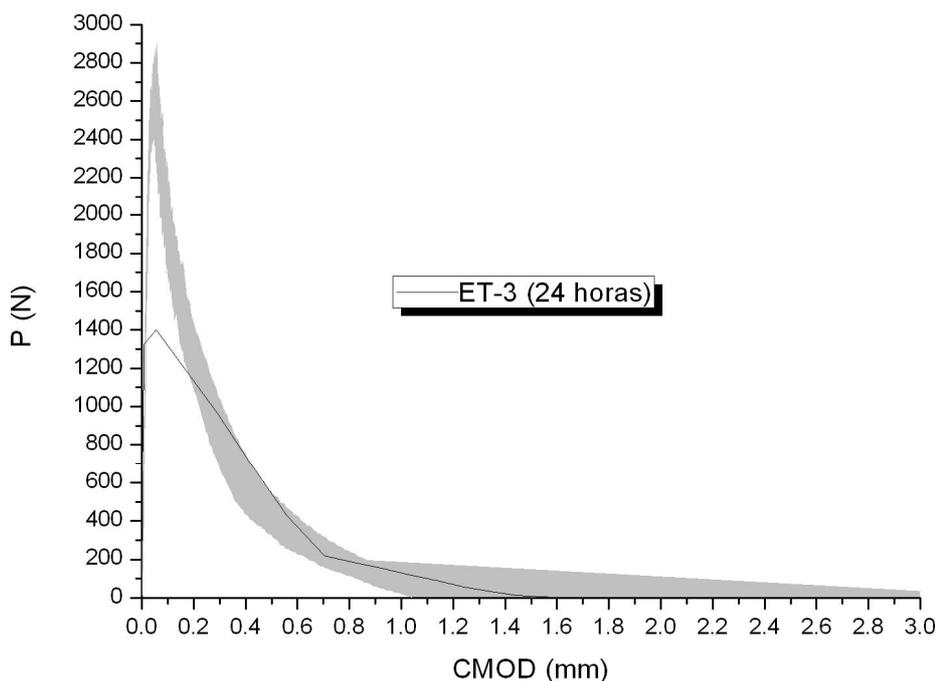


Figura 4.36.-Curva P-CMOD ET-3 (24 horas)

Si observamos los resultados obtenidos con el modelo numérico y los comparamos con los resultados experimentales se observa que la aproximación es bastante buena y es mejor a medida que disminuye el tamaño de la probeta. Esto es debido a que las probetas de menor tamaño tienen una menor pendiente inicial en el tramo de ablandamiento, ya que su comportamiento es más dúctil, por lo que la curva se aproxima mejor.

4.1.2. Modelo de fisuración difusa

4.1.2.1. *Descripción del modelo*

A continuación se detalla un modelo realizado con el software Abaqus/Standard y que tiene el objeto de poner de manifiesto la modelización del hormigón mediante el modelo “Concrete Smeared Cracking” disponible en la librería de materiales del programa.

El modelo consiste en una viga biapoyada con una pequeña entalla y una carga puntual aplicada en el centro de la misma, es decir, simula un ensayo a flexión en tres puntos.

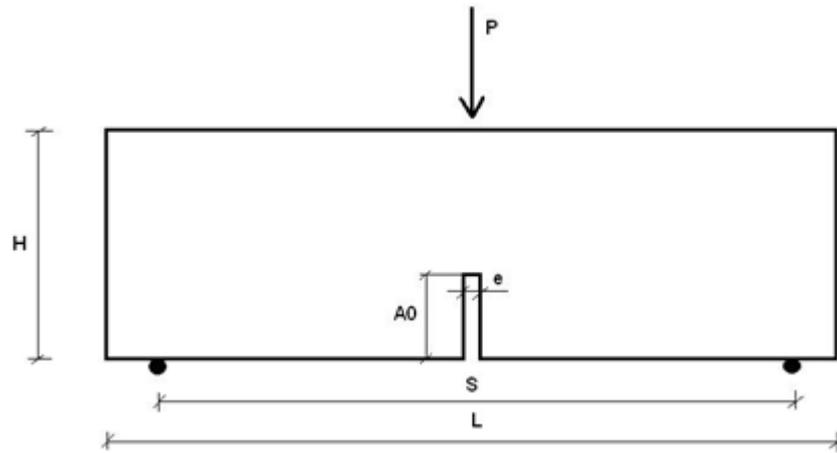


Figura 4.37.- Representación del ensayo a flexión en tres puntos

Donde los parámetros varían en función de los tres tamaños de viga existentes (todas las longitudes están en milímetros):

	H	S	L	A0
Tamaño 1 (ET-1)	65	260	292.5	21.7
Tamaño 2 (ET-2)	130	520	585	43.4
Tamaño 3 (ET-3)	260	1040	1170	86.8

Tabla 4.30.- Medidas de las probetas Efecto Tamaño

El espesor de la viga y el ancho de la entalla son los mismos para los tres tamaños de viga y tienen un valor de 65 y 3 milímetros, respectivamente.

La carga P aplicada en el centro de la parte superior de la viga es de 10KN.

Una vez creada la geometría del modelo, éste se divide en seis partes tal y como se muestra en la siguiente figura.

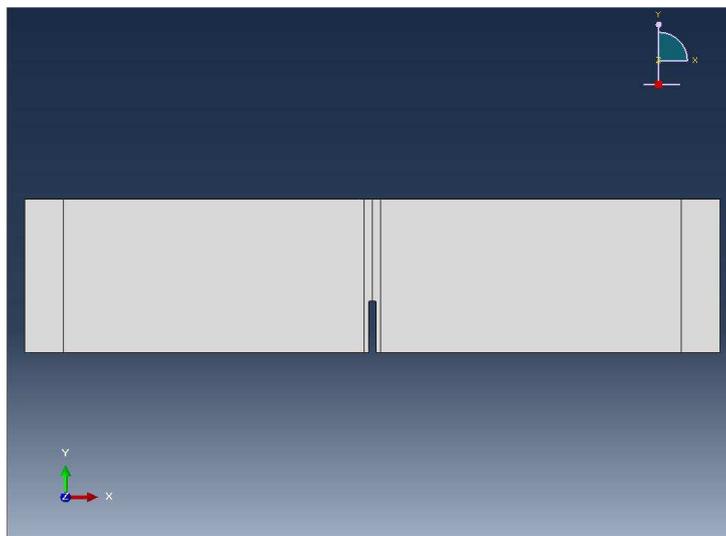


Figura 4.38.-Geometría del modelo con particiones

La línea central permite situar el punto de aplicación de la carga. La función de las dos líneas más alejadas del centro de la viga es fijar los puntos de apoyo de la viga, mientras que las dos líneas restantes delimitan la zona de las inmediaciones de la entalla, zona a la cual se va a aplicar el modelo “Smearred Cracked Concrete” que hemos comentado con anterioridad.

El siguiente paso es la introducción del material y la sección de la viga. Nuestra viga es de hormigón y tiene un canto de 65 milímetros para todos los tamaños.

Se van a distinguir dos zonas en el modelo de la viga: las inmediaciones de la entalla y el resto de la viga.

El material empleado en las inmediaciones de la entalla es hormigón con el modelo de comportamiento “Smearred Crack Model”, mientras que para el resto de la viga se usa un hormigón con comportamiento elástico-lineal.

Debido a las no linealidades que produce el comportamiento del hormigón “Smearred Crack Model” se va a emplear el método de Riks para el cálculo de la viga.

Las condiciones de contorno que se introducen son los apoyos y la restricción del desplazamiento horizontal en el punto de aplicación de la carga.

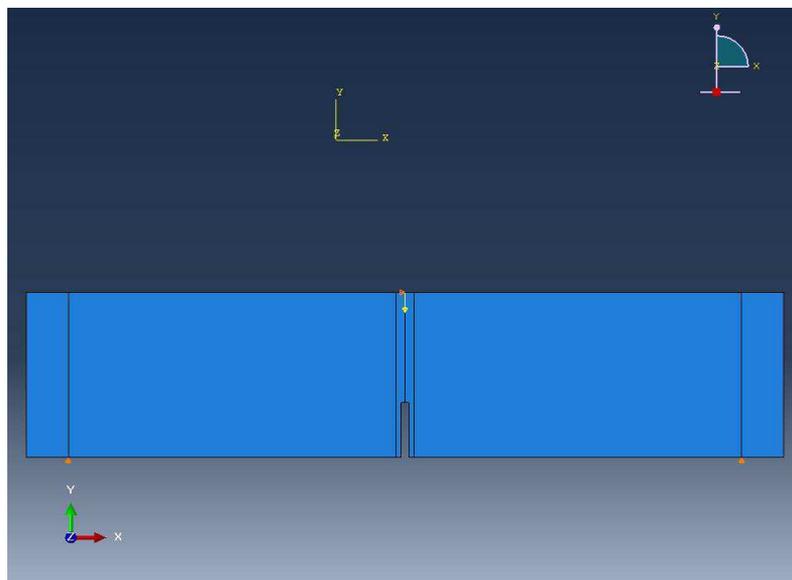


Figura 4.39.-Geometría del modelo con las cargas y condiciones de contorno introducidas

Para el mallado se ha empleado el elemento S4R

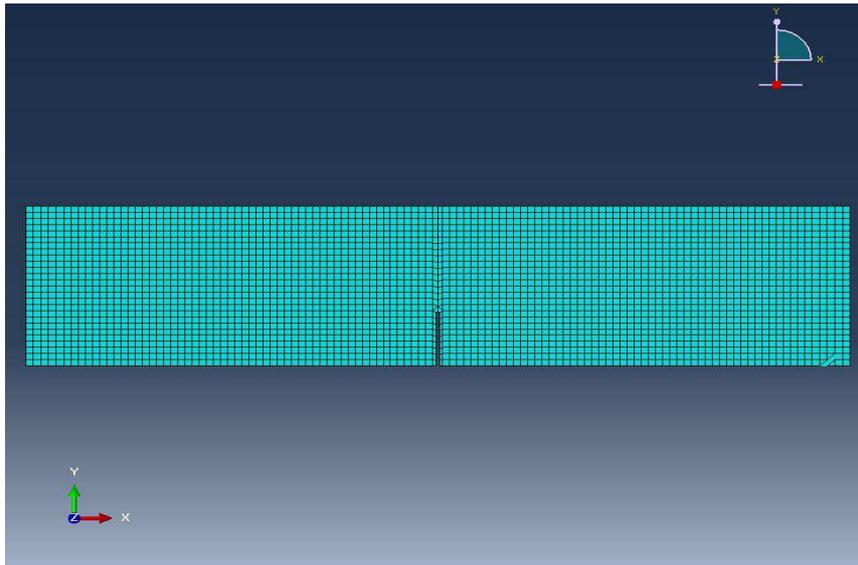


Figura 4.40.- Probeta mallada

4.1.2.2. Resultados

Los resultados del modelo que se van a mostrar a continuación son las curvas que nos relacionan la carga aplicada frente al desplazamiento vertical de la viga (δ) y frente a la apertura de la grieta (CMOD) para los tres tamaños de probetas Efecto Tamaño.

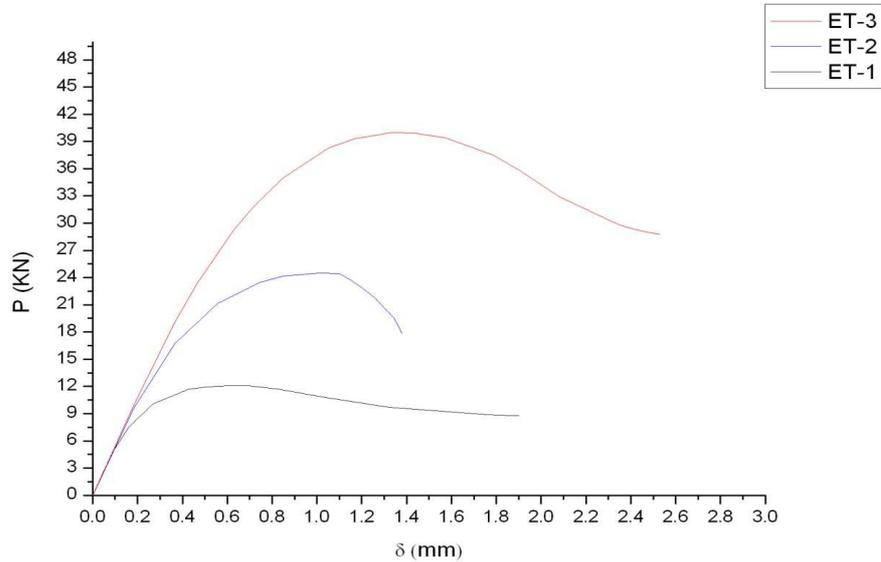


Figura 4.41.-Curvas carga-desplazamiento vertical

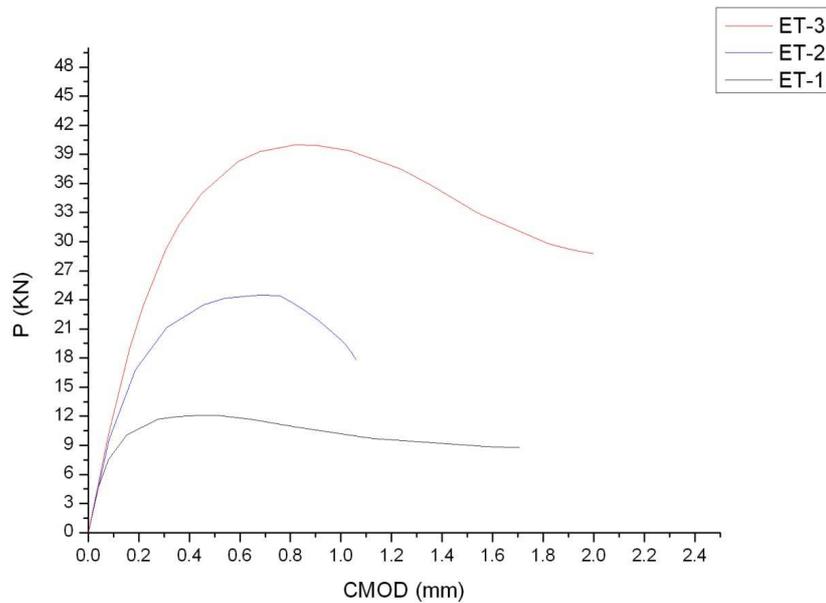


Figura 4.42.-Curvas carga-CMOD

Observamos que tanto para el desplazamiento vertical como para la apertura de la grieta el comportamiento es el esperado. Inicialmente hay que incrementar la carga aplicada para aumentar el desplazamiento hasta llegar al punto de carga máxima, a partir del cual la respuesta del hormigón se ablanda, de forma que el desplazamiento sigue aumentando aunque la carga aplicada disminuya.

A continuación se van a mostrar la evolución de las tensiones de tracción del modelo para los tres tamaños de probeta.

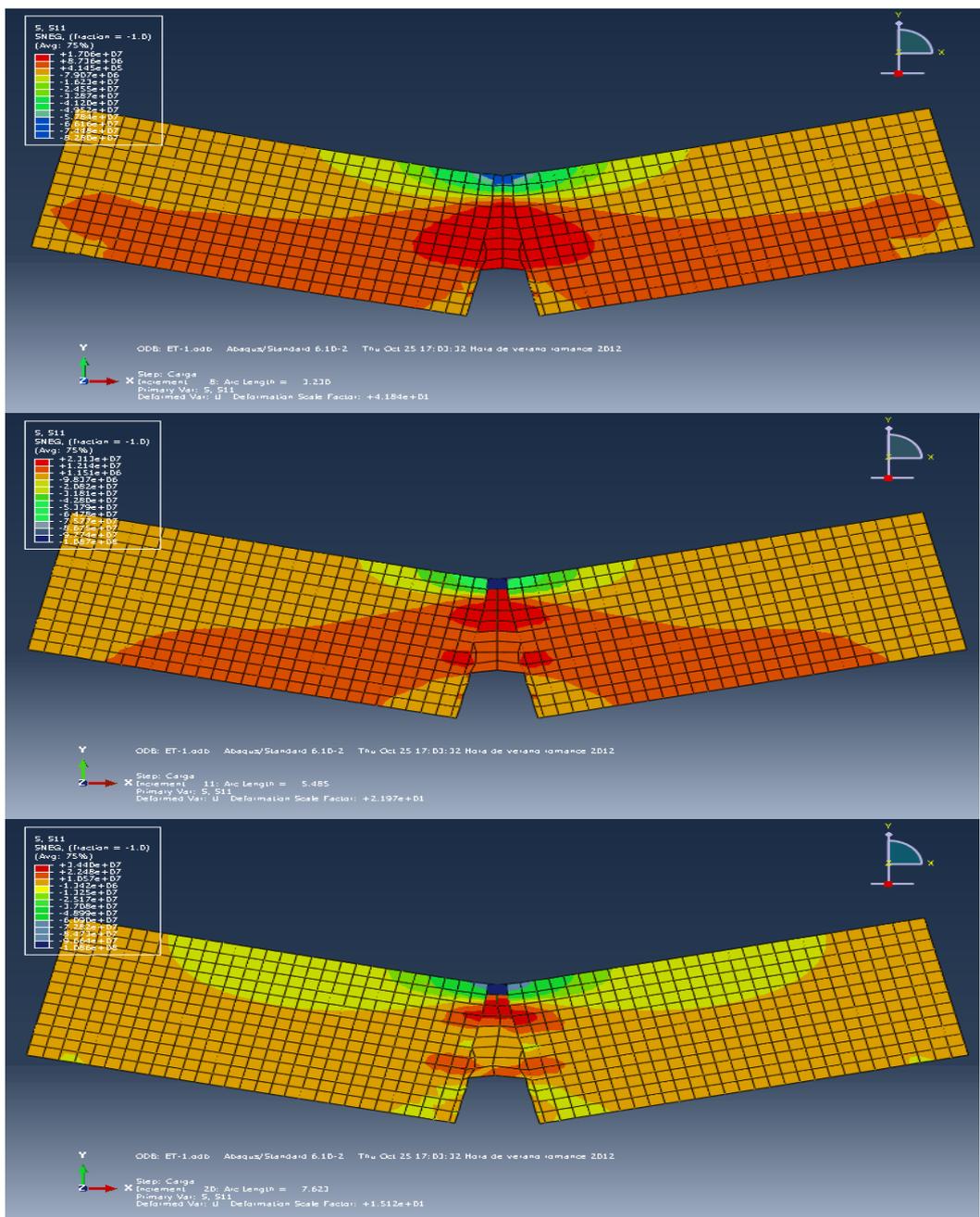


Figura 4.43.-Evolución de las tensiones de tracción (Pa) para la probeta ET-1, de arriba abajo, para la carga de pico, para un valor de la carga en la rama de ablandamiento y para el final del ensayo

Se observa como el máximo de la tensión de tracción, para el instante de la carga de pico está en la punta de la entalla y a medida que se va produciendo el ablandamiento del hormigón se va trasladando hacia la parte superior, ya que se está produciendo la rotura de la probeta, la cual empieza en las inmediaciones de la entalla y la grieta evoluciona hacia la parte superior.

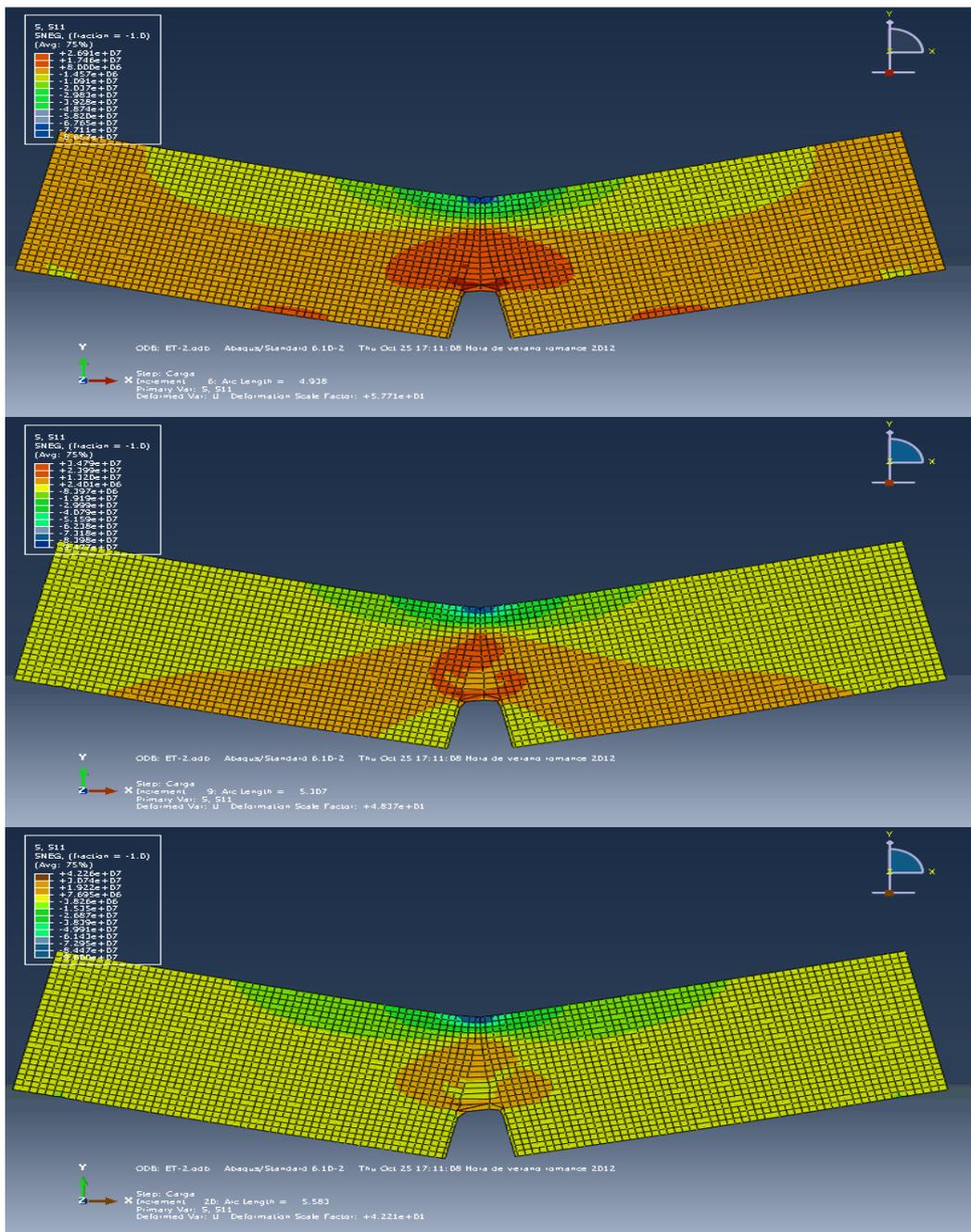


Figura 4.44.-Evolución de las tensiones de tracción (Pa) para la probeta ET-2, de arriba abajo, para la carga de pico, para un valor de la carga en la rama de ablandamiento y para el final del ensayo

Al igual que para ET-1, se observa como el máximo de la tensión de tracción, para el instante de la carga de pico está en la punta de la entalla y a medida que se va produciendo el ablandamiento del hormigón se va trasladando hacia la parte superior, ya que se está produciendo la rotura de la probeta, la cual empieza en las inmediaciones de la entalla y la grieta evoluciona hacia la parte superior.

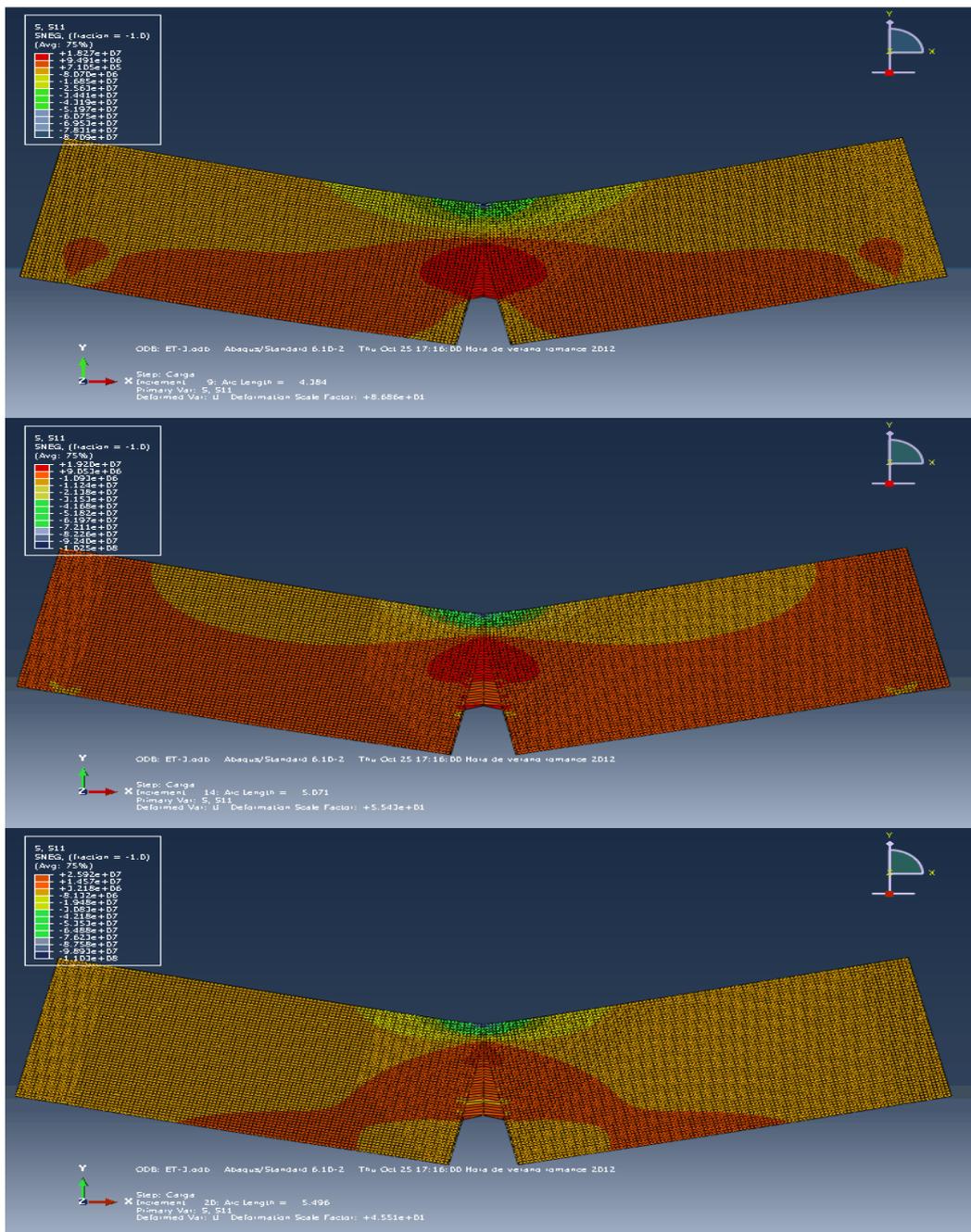


Figura 4.45.-Evolución de las tensiones de tracción (Pa) para la probeta ET-3, de arriba abajo, para la carga de pico, para un valor de la carga en la rama de ablandamiento y para el final del ensayo

Al igual que para los casos anteriores, se observa como el máximo de la tensión de tracción, para el instante de la carga de pico está en la punta de la entalla y a medida que se va produciendo el ablandamiento del hormigón se va trasladando hacia la parte superior, ya que se está produciendo la rotura de la probeta, la cual empieza en las inmediaciones de la entalla y la grieta evoluciona hacia la parte superior.

4.2. MODELO TÉRMICO DE HORMIGÓN A EDADES TEMPRANAS.

4.2.1. Descripción del modelo

En el presente capítulo se va a describir el modelado de un cubo de hormigón con un volumen de un metro cúbico en ABAQUS. El objetivo principal de dicho modelo no es otro que realizar un análisis térmico del cubo a edades tempranas y verificar los resultados experimentales que se obtuvieron en el Laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

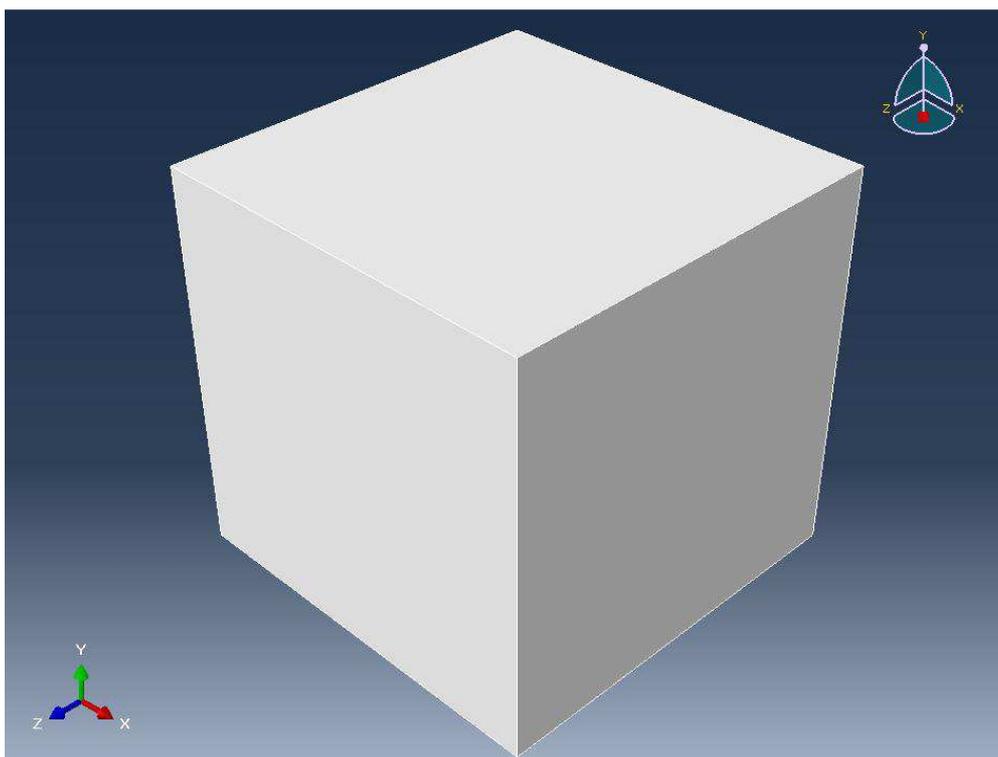


Figura 4.46.- Geometría del modelo

El material empleado es hormigón con las siguientes propiedades. Las propiedades mecánicas no van a ser introducidas ya que el análisis que se va a realizar es solamente térmico.

- Densidad: 2240 Kg m^{-3}
- Coeficiente de expansión térmica: $1\text{e-}5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Conductividad: $2.5 \text{ W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Calor específico: $922 \text{ J Kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

Para introducir en ABAQUS el efecto del calor de hidratación, el cual se produce por las reacciones químicas que tienen lugar entre el agua y el cemento, se va a introducir un flujo de calor en el cubo que va a ir evolucionando con la edad de curado. La distribución de dicho flujo

de calor se muestra en la siguiente figura y su obtención se detalla en el anexo número 1 del presente documento.

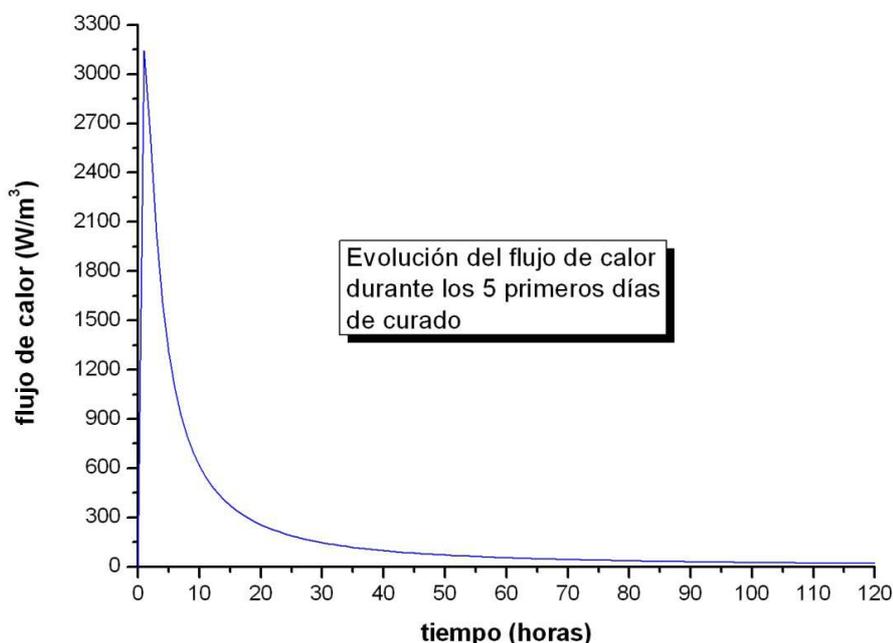


Figura 4.47.- Distribución del flujo de calor a introducir en el modelo

La condición inicial de temperatura consiste en que todo el cubo de hormigón se encuentre inicialmente a 26°C.

Asimismo se introduce el intercambio de calor que se produce por convección entre las caras externas del cubo de hormigón y el aire del entorno. Se va a hacer distinción entre la cara superior, la cual no está en contacto con nada (condición de contorno con una interfase hormigón-aire), las caras laterales, en las que inicialmente hay encofrado y pasado un tiempo en el que el hormigón alcanza la consistencia suficiente para no desmoronarse se retira, y la cara inferior, la cual está siempre en contacto con el encofrado (condición de contorno con interfase hormigón-encofrado), ya que se apoya sobre él. Esto implica que durante los dos primeros días la mayor pérdida del calor producido por la hidratación del cemento se producirá por la cara superior, mientras que a partir de los dos primeros días será tanto por las caras laterales como por la superior, produciéndose una menor pérdida por las caras que están en contacto con el encofrado.

También cabe mencionar que la temperatura que se ha introducido para definir esta condición de contorno de convección (sink temperature) es de 27°C, es decir, se ha tomado la media de

la evolución de la temperatura ambiente durante la realización del ensayo la cual, al haberse realizado en verano, es bastante alta como se puede observar.

El tipo de elemento que se va a emplear para el mallado del cubo es el DC3D8.

Seguidamente se va a definir el tamaño de los elementos. Para ello se va a tener en cuenta la ubicación de los sensores dentro del cubo. Los sensores presentan una disposición simétrica y están distribuidos en 5 planos horizontales equiespaciados, coincidiendo con las barras de acero corrugado que se introdujeron, las cuales son las que los sostienen. En cada plano tenemos 4 barras de acero y en cada barra de acero, a su vez, tenemos 4 sensores. En las siguientes imágenes se puede apreciar de forma más clara la situación de los 80 sensores dentro del cubo.

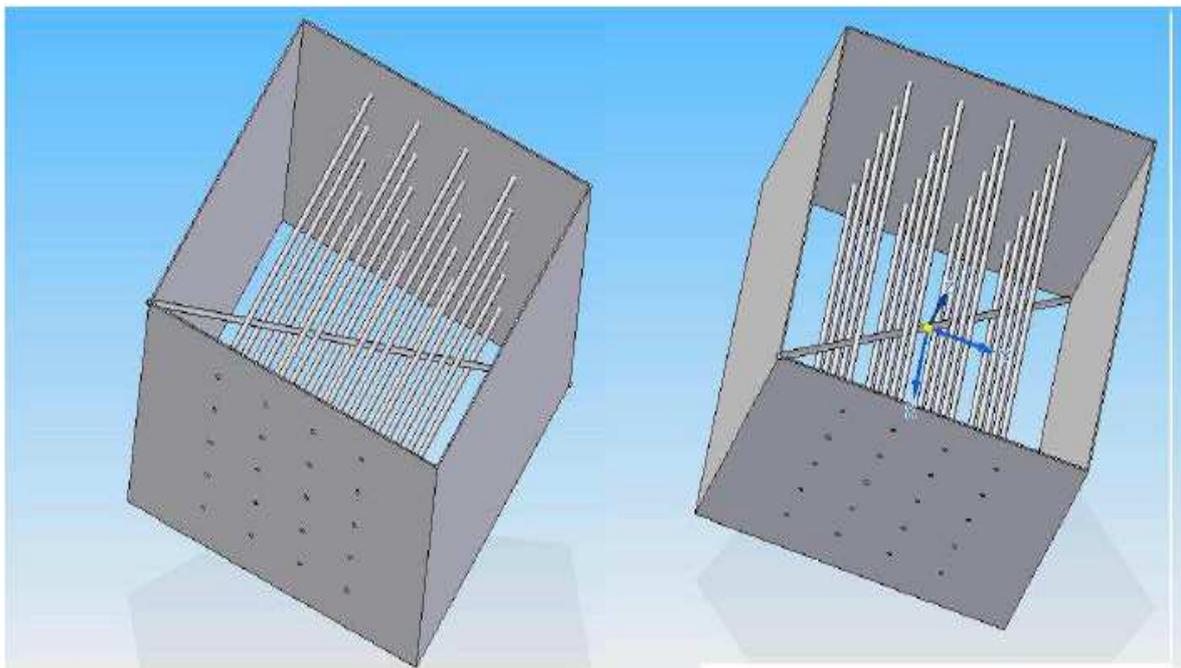


Figura 4.48.- Disposición de barras corrugadas dentro del cubo

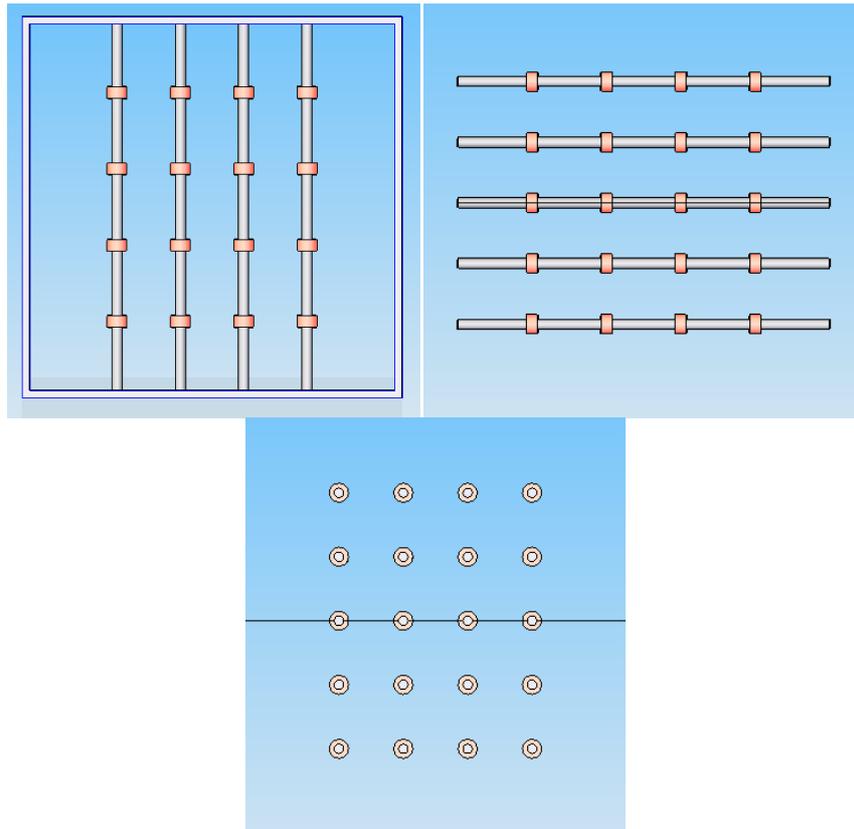


Figura 4.49.- Vista en planta (arriba-izquierda), lateral (arriba-derecha) y alzado (abajo) de los sensores de temperatura en el cubo

El cubo se va a mallar de forma que cada uno de los nodos interiores del mismo corresponda a un sensor de temperatura, de forma que podamos obtener la temperatura exactamente en los mismos puntos de la geometría del muro en los que se ha medido en la parte experimental.

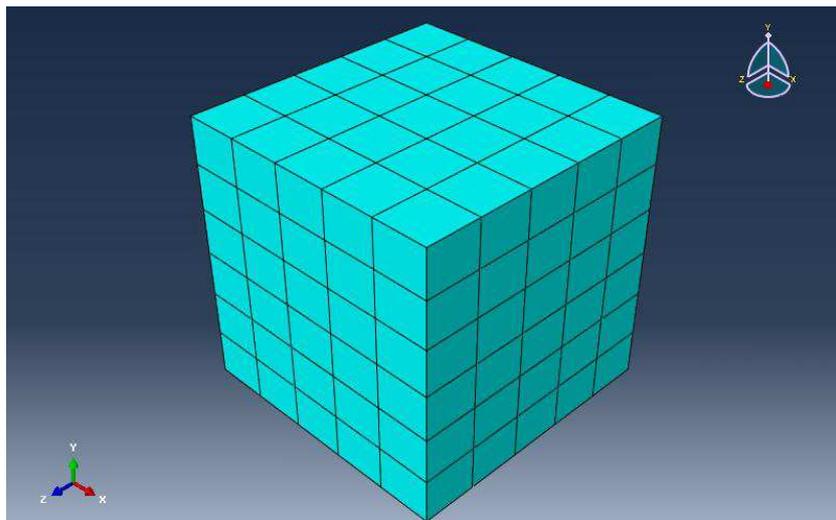


Figura 4.50.- Cubo mallado

4.2.2. Resultados

Antes de proceder al análisis de los resultados se van a comentar algunas de las características del modelo que se está realizando.

Como se puede observar tras la definición del modelo, el cubo presenta simetría total con respecto a la geometría y a las cargas y simetría con respecto a cualquier plano vertical que se defina que divida al cubo en dos partes iguales. Esto quiere decir que en cada uno de los cinco planos en los que se han colocado los sensores hay nodos en los que se van a obtener los mismos resultados.

Debido a esta situación de simetría, se pueden hacer tres agrupaciones de nodos, en los cuales los resultados que vamos a obtener, como se ha comentado anteriormente, van a ser idénticos.

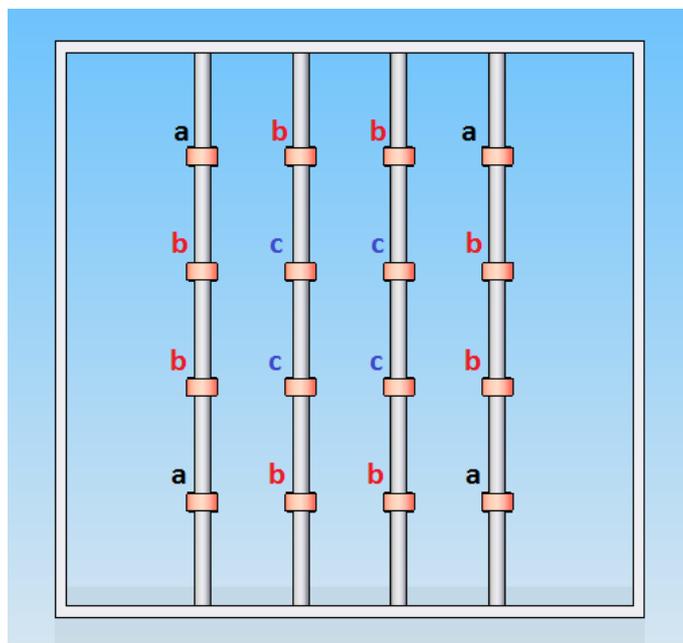


Figura 4.51.- Agrupación de los nodos simétricos

De esta forma se pueden definir tres agrupaciones de nodos:

- Nodos a: son los nodos que se sitúan en los vértices del cuadrado que forman los sensores en cada plano en los que se han ubicado los mismos. Se van a denominar de ahora en adelante nodos esquina.
- Nodos b: son los nodos que se sitúan en las aristas del cuadrado que forman los sensores en cada plano en los que se han ubicado los mismos. Se van a denominar de ahora en adelante nodos arista.

- Nodos c: son los nodos que se sitúan en la parte central del cuadrado que forman los sensores en cada plano en los que se han ubicado los mismos. Se van a denominar de ahora en adelante nodos centro.

Dicho esto, se ha simplificado la obtención de los resultados del modelo, ya que de los dieciséis nodos que en principio se tenían que analizar se ha pasado a la necesidad de obtener los resultados en tan sólo 3 nodos por cada plano, es decir, en un total de quince nodos de los ochenta que en un principio se tenían que analizar.

Debido al flujo de calor volumétrico que se le está aplicando al modelo y a las condiciones de contorno que tiene, sería lógico pensar que los nodos centro son los que van a presentar las temperaturas más altas, debido a que son los nodos que están más lejos de las interfases por las cuales se va a evacuar el calor del modelo. Por este mismo razonamiento se puede razonar que los nodos arista van a presentar una temperatura intermedia entre los nodos centro y los nodos esquina, siendo estos últimos los que van a presentar una temperatura menor.

Con respecto a los planos, parece razonable que al irse acercando al centro del cubo, tanto por la parte superior del mismo (plano 1 → plano 2 → plano 3) como por la inferior (plano 5 → plano 4 → plano 3), las temperaturas de los nodos van a ir siendo mayores, ya que se van alejando del contorno del cubo. Sin embargo no está muy claro si las temperaturas en el plano medio (plano 3) van a ser mayores que las temperaturas del plano 4, ya que por un lado está claro que al ir hacia el centro del cubo van a ir aumentando, pero también hay que tener en cuenta que el coeficiente de película de la base del cubo, la cual está en contacto con el encofrado, es bastante menor que el de las caras laterales y superior del cubo, donde hay una interfase hormigón-aire por la que se va a evacuar el calor de forma bastante más significativa. Es por esto por lo que no resulta trivial en qué plano de estos dos se van a dar unas temperaturas mayores.

Tras la muestra de los resultados se volverá a estos razonamientos para ver si se cumple lo que en principio se ha pensado.

Como ya se ha comentado, el calor de hidratación que se produce en la reacción química que se lleva a cabo entre el agua y el cemento del hormigón va a incrementar la temperatura del cubo, lo que va a provocar una dilatación del mismo y, por tanto, se van a originar unas tensiones de tracción de origen térmico.

En las siguientes imágenes se va a mostrar la temperatura del cubo, tanto en las caras externas como en el interior del cubo (realizando un corte para poder visualizar la temperatura interna), a la edad alrededor de la cual se ha analizado en la campaña experimental que se produce el máximo incremento de temperatura y al final del análisis, es decir, a las 120 horas de curado.

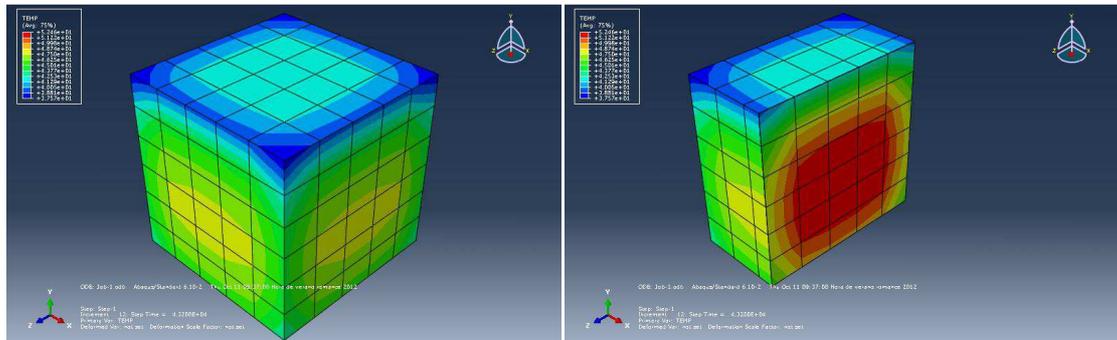


Figura 4.52.- Temperatura del cubo tras 12 horas de curado

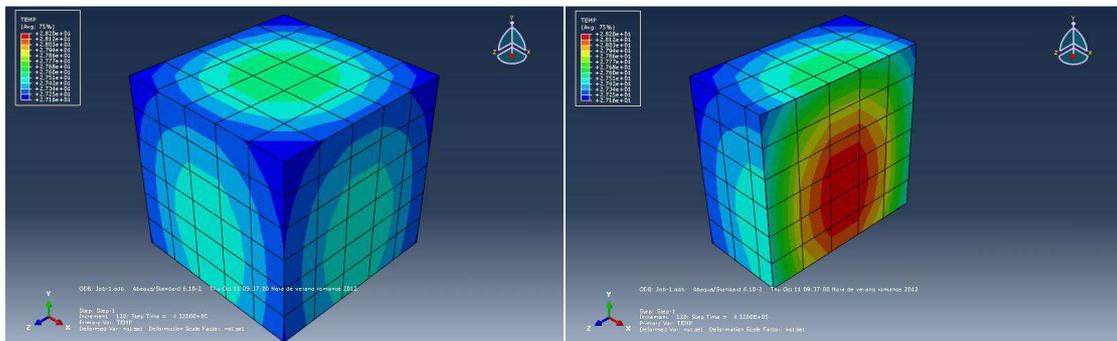


Figura 4.53.- Temperatura del cubo tras 120 horas de curado

Si se observa la evolución de la temperatura a lo largo del análisis que se está realizando, se puede observar un gran aumento de temperatura para todos los puntos en general hasta las edades cercanas a las doce horas. Asimismo se comprueba que la temperatura es mayor en los planos centrales tal y como dijimos con anterioridad, sin embargo no se puede apreciar con exactitud la duda que se planteó de si era mayor la temperatura en el plano 3 o en el plano 4. Dicha duda se disipará una vez que representemos las curvas de evolución de temperatura para cada uno de los nodos del modelo, las cuales se van a mostrar a continuación.

Como ya se ha comentado, debido a la geometría que presenta el modelo, basta con representar la evolución de la temperatura en tres de los dieciséis nodos que hay en cada plano. Dichos nodos son los que se denominaron nodos esquina (curva negra de las gráficas), nodos arista (curva roja de las gráficas) y nodos centro (curva azul de las gráficas). Las curvas grises que aparecen en las gráficas se corresponden con los resultados que se obtuvieron de los dieciséis sensores de cada plano, cada cual se representa en una gráfica.

Asimismo, como ya se comentó, se espera que la evolución de las temperaturas en los nodos esquina esté por encima de la de los nodos arista, y ésta, por encima de la de los nodos centro. Por último, antes de pasar a la visualización de las gráficas y aunque se deduce de todo lo anterior, decir que de las dieciséis curvas experimentales que se representan para cada plano, las curvas que muestran una evolución de temperatura más alta se corresponderán con los sensores situados más al centro del plano y las curvas más bajas se corresponderán con los sensores ubicados en la zona de las esquinas de cada plano, es decir, en la zona más cercana a la interfase con el aire. Las curvas intermedias, por tanto, se corresponderán con los sensores que se ubican en la zona de los lados del plano.

A continuación se van a representar las cinco gráficas en las que se van a mostrar las evoluciones de temperaturas en cada uno de los cinco planos del cubo de hormigón en los que se situaron los sensores de medición de temperatura.

Evolución de la temperatura en el plano 1

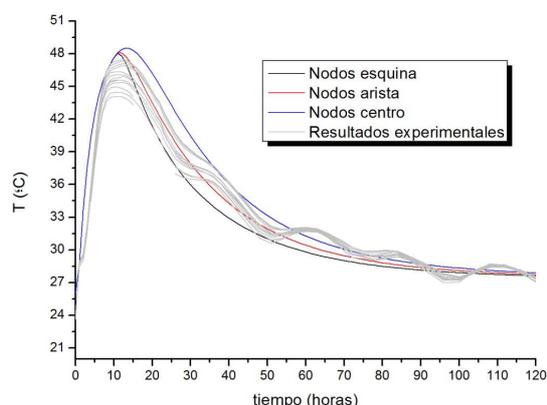


Figura 4.54.- Evolución de la temperatura en el plano 1

Como se puede observar, la evolución de las temperaturas en los nodos que se han representado como resultado del modelo de Abaqus se aproxima de manera clara a los resultados que se obtuvieron en el laboratorio (curvas grises).

Asimismo se verifica que la curva de los nodos centro está por encima de la de los nodos arista, y ésta, a su vez, queda por encima de la de los nodos esquina.

Las temperaturas máximas que se obtienen en este plano están en una franja comprendida entre los 43°C y los 49 °C, y ésta se alcanza, aproximadamente, entre las diez y las quince horas de curado del hormigón.

Evolución de la temperatura en el plano 2

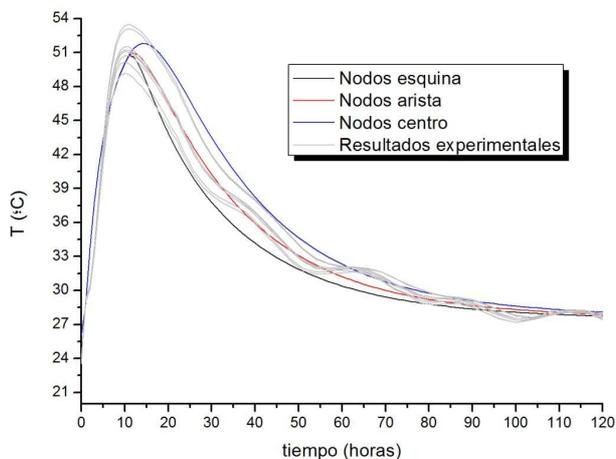


Figura 4.55.- Evolución de la temperatura en el plano 2

Como se puede observar, la evolución de las temperaturas en los nodos que se han representado como resultado de nuestro modelo de Abaqus se aproxima de manera clara a los resultados que se obtuvieron en el laboratorio (curvas grises).

Asimismo se verifica que la curva de los nodos centro está por encima de la de los nodos arista, y ésta, a su vez, queda por encima de la de los nodos esquina.

Las temperaturas máximas que se obtienen en este plano están en una franja comprendida entre los 49°C y los 54 °C, y ésta se alcanza, aproximadamente, entre las nueve y las quince horas de curado del hormigón.

Evolución de la temperatura en el plano 3

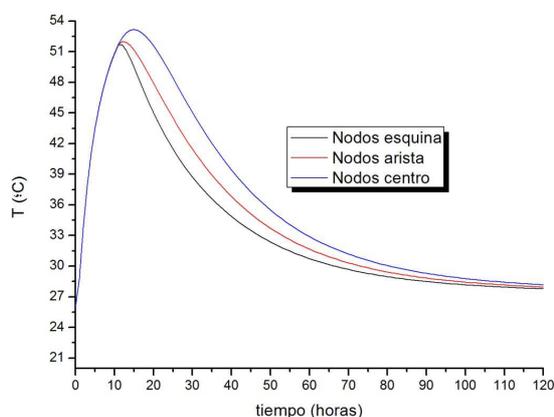


Figura 5.56.- Evolución de la temperatura en el plano 3

En la fase experimental, se tuvieron que desechar los resultados obtenidos entre los sensores número 33 y número 48, es decir, los correspondientes al plano número 3 debido a la escasez de datos y a la incoherencia de los pocos obtenidos.

Con respecto a los resultados del modelo numérico se verifica que la curva de los nodos centro está por encima de la de los nodos arista, y ésta, a su vez, queda por encima de la de los nodos esquina. Las temperaturas máximas que se obtienen en este plano están en una franja comprendida entre los 50°C y los 54 °C, y ésta se alcanza, aproximadamente, entre las diez y las quince horas de curado del hormigón.

Evolución de la temperatura en el plano 4

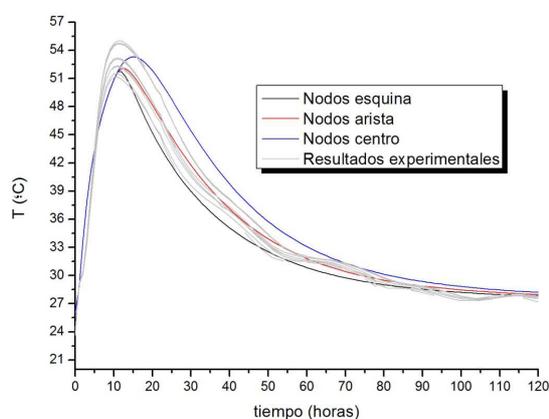


Figura 4.57.- Evolución de la temperatura en el plano 4

Como se puede observar, la evolución de las temperaturas en los nodos que se han representado como resultado de nuestro modelo de Abaqus se aproxima de manera clara a los resultados que se obtuvieron en el laboratorio (curvas grises).

Asimismo se verifica que la curva de los nodos centro está por encima de la de los nodos arista, y ésta, a su vez, queda por encima de la de los nodos esquina.

Las temperaturas máximas que se obtienen en este plano están en una franja comprendida entre los 51°C y los 56 °C, y ésta se alcanza entre las nueve y las quince horas de curado del hormigón.

Antes de pasar a la muestra de los resultados se comentó que parecía razonable que al irse acercando al centro del cubo, tanto por la parte superior del mismo (plano 1 → plano 2 → plano 3) como por la inferior (plano 5 → plano 4 → plano 3), las temperaturas de los nodos iban a ir siendo mayores, ya que se van alejando del contorno del cubo.

Sin embargo no estaba muy claro si las temperaturas en el plano medio (plano 3) van a ser mayores que las temperaturas del plano 4, ya que por un lado está claro que al ir hacia el centro del cubo van a ir aumentando, pero también había que tener en cuenta que el coeficiente de película de la base del cubo, la cual está en contacto con el encofrado, es bastante menor que el de las caras laterales y superior del cubo, donde hay una interfase hormigón-aire por la que se va a evacuar el calor de forma bastante más significativa. Es por esto por lo que no resultaba trivial en qué plano de estos dos se van a dar unas temperaturas mayores.

Tras ver los resultados correspondientes al plano 3 y al plano 4 se puede resolver dicha duda que se planteaba, pudiendo afirmar que las máximas temperaturas se alcanzan en el plano 4, siendo el hecho de estar el cubo más aislado por la parte inferior del cubo el factor determinante para que la temperatura en el plano 4 sea mayor que en el plano 3.

Este resultado resulta tremendamente importante en esta fase del proyecto, ya que en la campaña experimental no se obtuvieron datos suficientes ni fiables de la evolución de temperaturas en los sensores ubicados en la zona correspondiente al plano 4.

Evolución de la temperatura en el plano 5

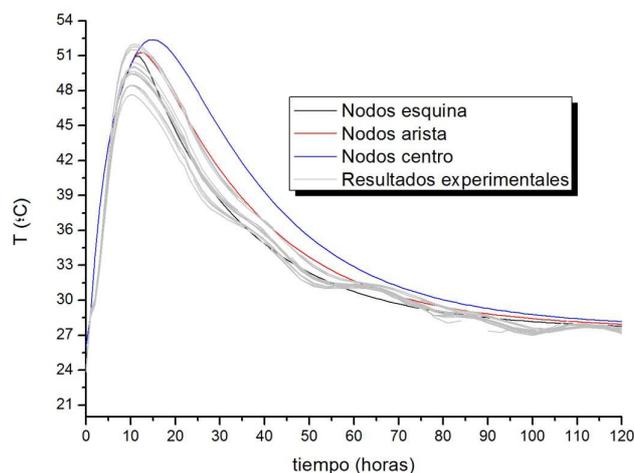


Figura 4.58.- Evolución de la temperatura en el plano 5

Como se puede observar, la evolución de las temperaturas en los nodos que se han representado como resultado de nuestro modelo de Abaqus se aproxima de manera clara a los resultados que se obtuvieron en el laboratorio (curvas grises).

Asimismo se verifica que la curva de los nodos centro está por encima de la de los nodos arista, y ésta, a su vez, queda por encima de la de los nodos esquina.

Las temperaturas máximas que se obtienen en este plano están en una franja comprendida entre los 48°C y los 53 °C, y ésta se alcanza entre las diez y las quince horas de curado del hormigón.

4.3. MODELO TERMO-MECÁNICO DE HORMIGÓN A EDADES TEMPRANAS.

4.3.1. Descripción del modelo

En el presente capítulo se va a describir el modelado de un cubo de hormigón de un metro cúbico en ABAQUS. El objetivo principal de dicho modelo no es otro que realizar un análisis termo-mecánico del cubo a edades tempranas, por lo que las propiedades del hormigón van a variar a lo largo del análisis debido al proceso de curado del hormigón.

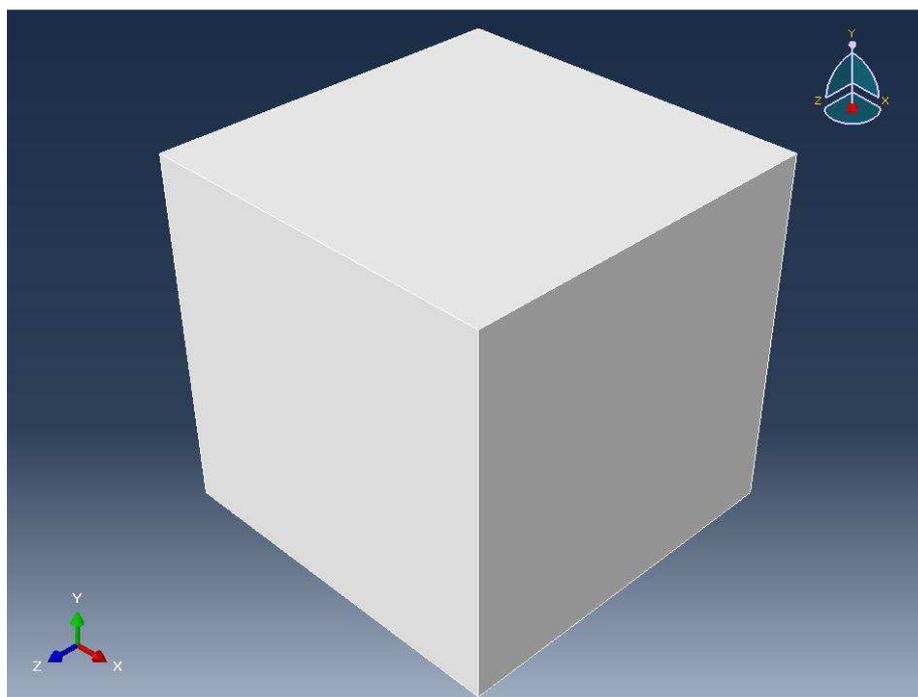


Figura 4.59.- Geometría del modelo

Para modelar el suelo sobre el que va apoyado el cubo durante la realización del ensayo se va a crear un cuerpo rígido cuadrado de 5 x 5 metros. A dicho cuerpo rígido no hay que asignarle ningún material ni nada por el estilo, simplemente la condición de contorno de empotramiento que más adelante se explicará.

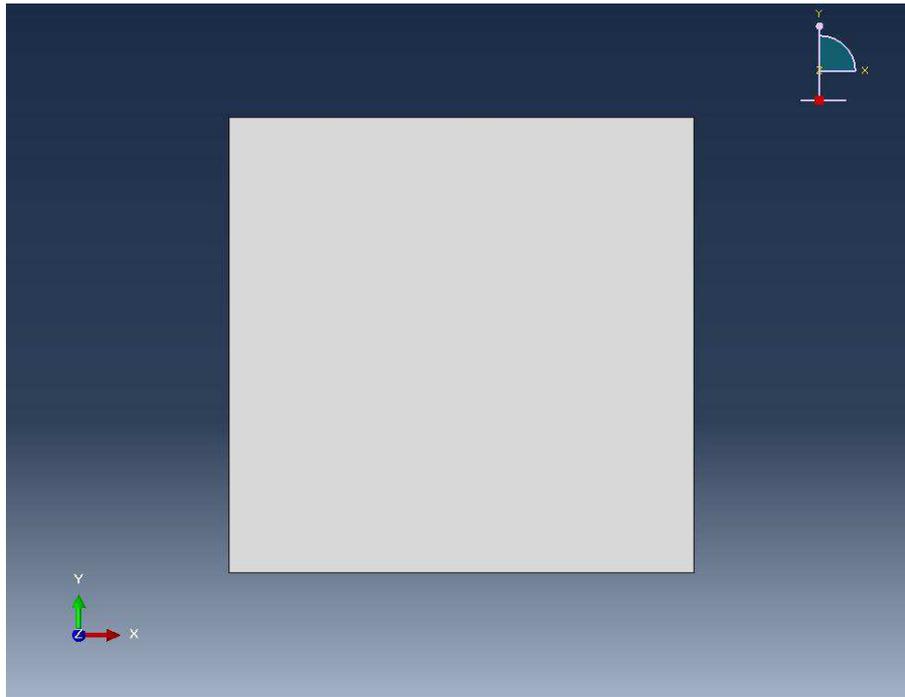


Figura 4.60.- Geometría del cuerpo rígido

El material del cubo es hormigón con propiedades que varían durante el proceso de curado, tal y como se comentó anteriormente. Las propiedades que van a ir evolucionando a lo largo del tiempo son el límite elástico y tanto el comportamiento a tracción como a compresión del hormigón.

- Densidad: 2240 Kg m^{-3}
- Coeficiente de expansión térmica: 1e-5 $^{\circ}C^{-1}$
- Conductividad: 2.5 Wm $^{-1}^{\circ}C^{-1}$
- Calor específico: 922 JKg $^{-1}^{\circ}C^{-1}$
- Coeficiente de Poisson: 0.2
- Módulo elástico y coeficiente de Poisson:

E (N/mm²)	18851	19786	20720	21654	22589	23523	24457	24457	28472
t (días)	1	2	3	4	5	6	7	14	28

Tabla 4.31.- Valores del módulo elástico en función del tiempo

Para hacer que la resistencia a tracción y la energía de fractura varíen en el tiempo se va a hacer uso de un modelo de Abaqus llamado “Concrete Damaged Plasticity”, introduciendo para el comportamiento a tracción y a compresión del hormigón los valores que se obtuvieron

en la campaña experimental y comprobados posteriormente, extrapolándose para el modelo actual.

Para introducir en ABAQUS el efecto de la reacción de hidratación del cemento se actúa igual que en el capítulo anterior donde se analizó el modelo térmico del cubo.

Además de la carga del flujo de calor para modelar el calor de hidratación, se introduce la carga del peso propio.

La condición inicial de temperatura es de 23°C y se tiene en cuenta el intercambio de calor por convección que se produce entre el entorno y el cubo a través de sus caras externas.

Para el mallado se emplea un elemento de tipo C3D8T.

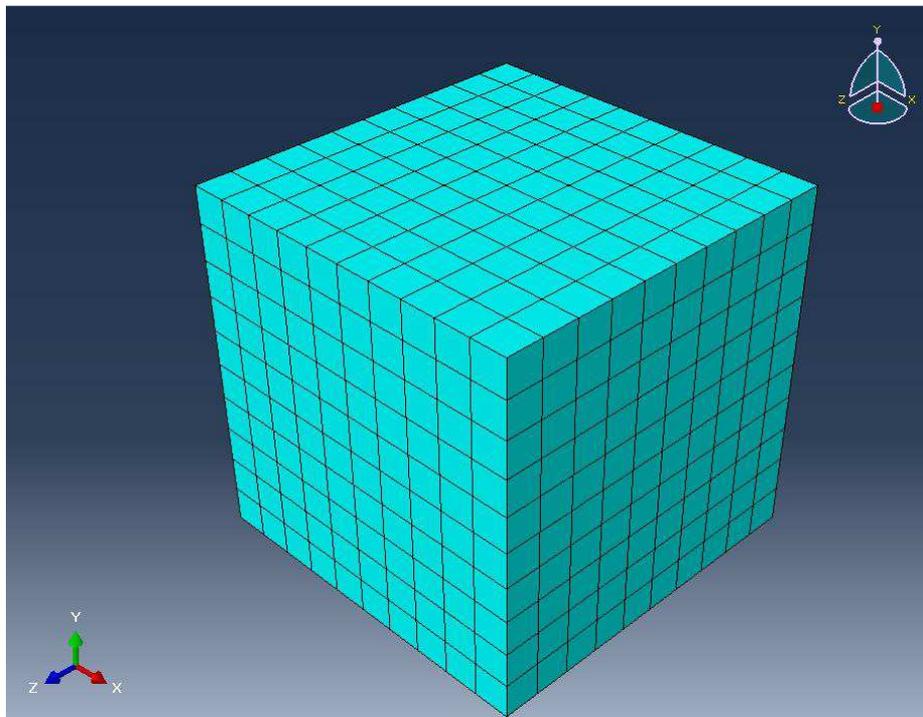


Figura 4.61.- Mallado del cubo

Para el mallado del cuerpo rígido usamos los elementos de tipo R3D4.

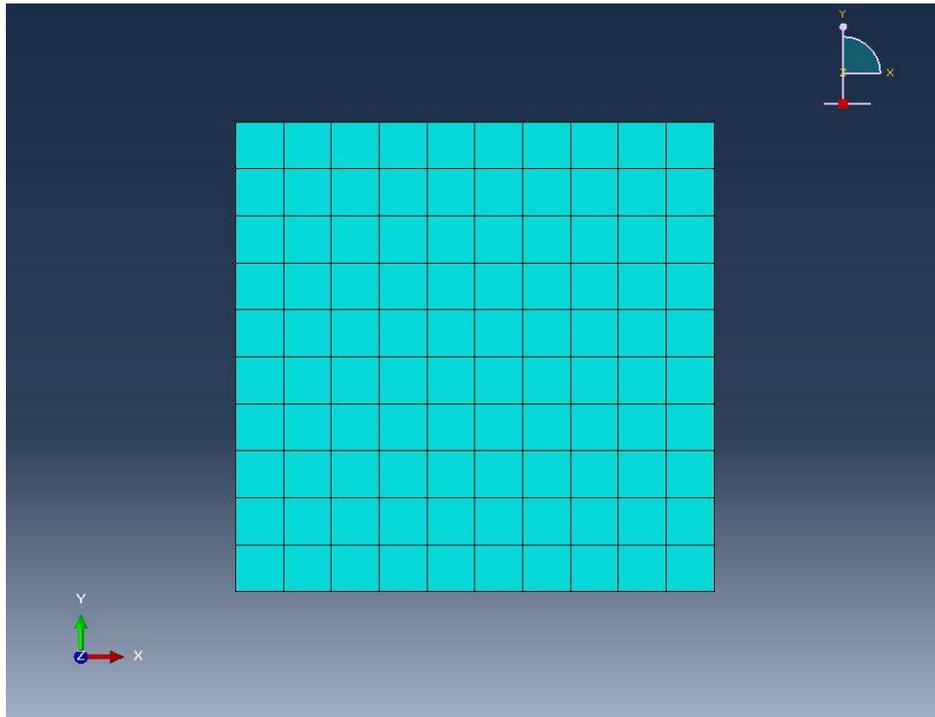


Figura 4.62.- Mallado del cuerpo rígido

Además comentar que se ha establecido contacto entre la cara inferior del cubo y el suelo, teniendo en cuenta el rozamiento que se produce entre el cubo y el suelo.

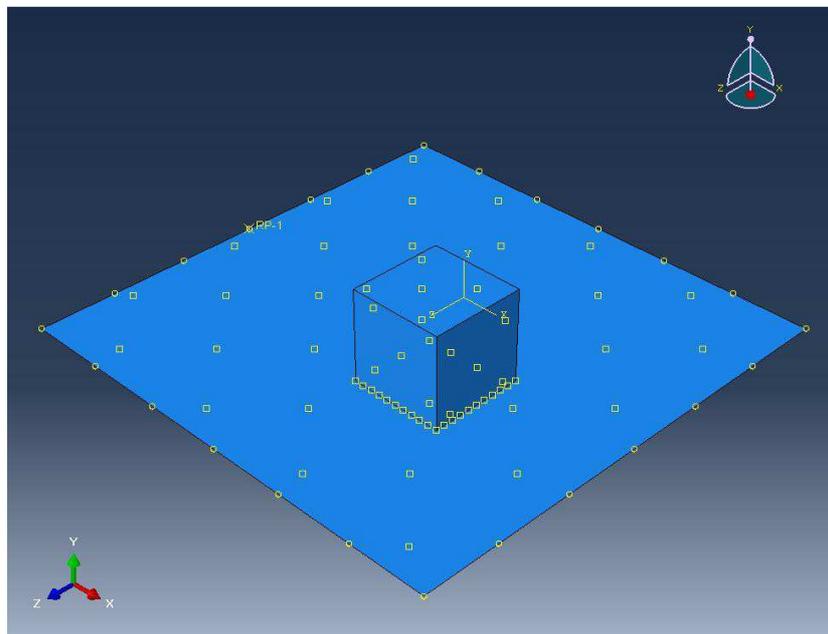


Figura 4.63.- Cubo y cuerpo rígido con el contacto aplicado

A continuación se va a detallar la forma de introducir en el modelo el módulo elástico variando en función del tiempo.

Para hacer que una propiedad del material no sea constante hay que crear una “field variable”, la cual hay que definir y asignar posteriormente a todos los nodos del modelo.

Seguidamente se introducen los siguientes valores en las propiedades elásticas del material:

Young's modulus	Poisson's ratio	Field 1
1.8851e10	0.2	0.0
1.97856e10	0.2	1.0
2.07199e10	0.2	2.0
2.16542e10	0.2	3.0
2.25885e10	0.2	4.0
2.35228e10	0.2	5.0
2.4457e10	0.2	6.0
2.4457e10	0.2	7.0
2.8472e10	0.2	8.0

Tabla 4.32.- Valores a introducir para las propiedades elásticas

A continuación hay que asignar la “field variable” que se ha creado a los valores del tiempo a los que corresponden las propiedades del material. Para ello se crea una amplitud tabular.

Time/Frequency	Amplitude
86400	0.0
172800	1.0
259200	2.0
345600	3.0
432000	4.0
518400	5.0
604800	6.0
1209600	7.0
2419200	8.0

Tabla 4.33.- Valores Tiempo-Amplitud

Y, por último, para definir la “field variable” a todos los nodos y con la amplitud anteriormente definida hay que crear un set donde se incluyan todos los nodos para, posteriormente, incluir el siguiente código en el archivo input que ABAQUS genera, ya que no se puede seleccionar en el menú de ABAQUS/CAE:

****definición de la field variable**

***FIELD,VARIABLE=1,AMPLITUDE=nombre amplitud creada**

nombre del set creado,1.0

4.3.2. Resultados

Haciendo uso del modelo explicado anteriormente se han obtenido las dos siguientes curvas de evolución de la temperatura en el tiempo.

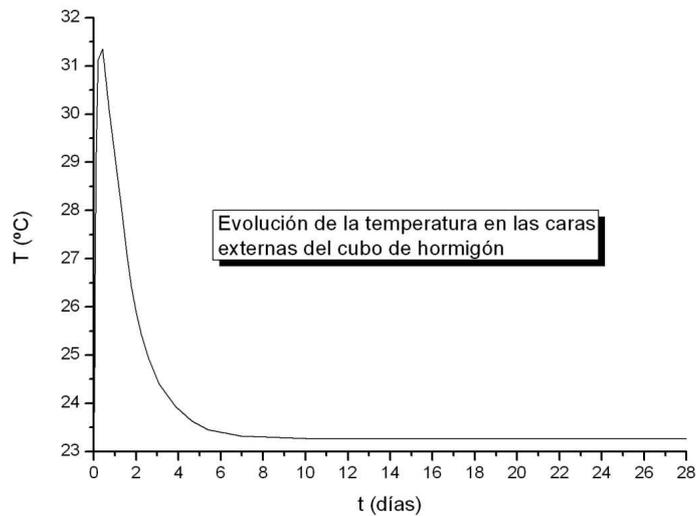


Figura 4.64.- Evolución de la temperatura en las caras externas del cubo

La temperatura máxima que se alcanza en las caras externas del cubo es de 31,35 °C y ésta se produce a pasadas las diez primeras horas de curado del hormigón.

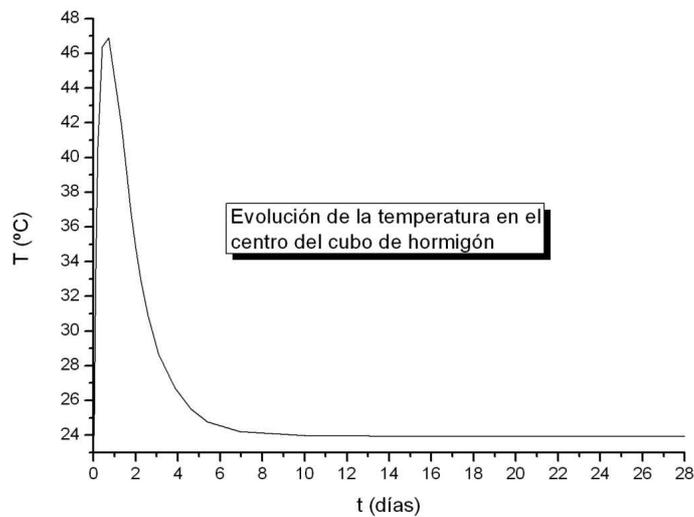


Figura 4.65.- Evolución de la temperatura en el centro del cubo

La temperatura máxima que se alcanza en el centro del cubo es de 46,9 °C y ésta se produce a pasadas las diecisiete primeras horas de curado del hormigón.

Se puede observar como el ascenso de la temperatura que se produce en el centro del cubo de hormigón es bastante mayor que en las caras externas del mismo.

La distribución de las máximas tensiones principales se muestra en las dos siguientes figuras:

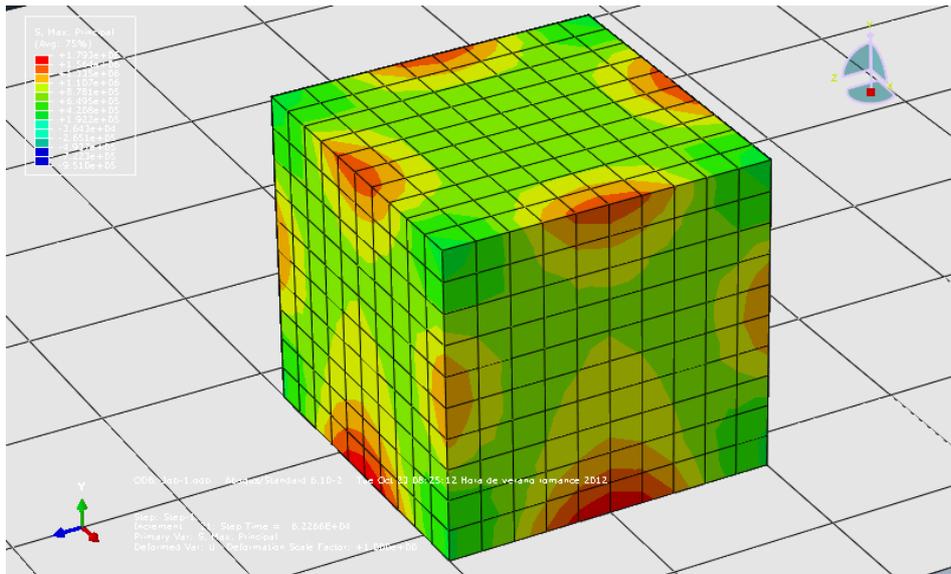


Figura 4.66.- Tensiones principales máximas a la edad en la que se producen las máximas temperaturas

Se observa como el cubo, durante los instantes en los que la temperatura es máxima está principalmente traccionado, debido al efecto que produce el calor de hidratación sobre el mismo, el cual se expande por la acción del flujo de calor.

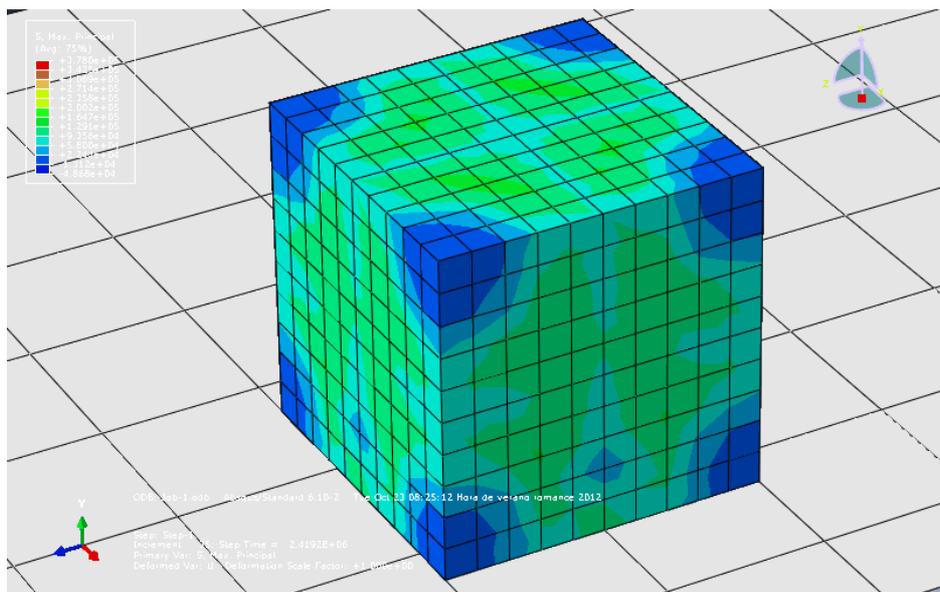


Figura 4.67.- Tensiones principales máximas en el instante final del análisis, es decir, a los 28 días.

Se observa que al final del análisis, es decir, a los 28 días la influencia del calor de hidratación es mínima, por lo que las temperaturas han disminuido de manera considerable estando ya cerca de la temperatura ambiente. Esta disminución de aporte de calor con la consiguiente reducción de temperaturas en el cubo, provoca la contracción del mismo, estando, tal y como se puede observar en la figura anterior, el cubo principalmente comprimido.