

## Capítulo 5. Aplicaciones

### 5.1. MODELO MECÁNICO DE UN MURO DE CONTENCIÓN.

#### 5.1.1. Descripción del modelo

A continuación se va a describir el modelado de un muro de contención de hormigón armado en ABAQUS. El objetivo principal de dicho modelo no es otro que realizar un análisis mecánico de dicho muro a edades tempranas. Para ello se van a emplear los resultados que anteriormente se han obtenido en la campaña experimental, los cuales han sido comprobados y verificados por los modelos numéricos que se expusieron a lo largo del cuarto capítulo del presente documento.

Para realizar el análisis mecánico del muro a edades tempranas van a realizar 9 modelos del muro, es decir, uno por cada edad (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 y 28 días) a la que se ha ensayado el hormigón en el laboratorio y, por tanto, conocemos las propiedades del mismo. Para cada modelo se obtendrá la curva carga-desplazamiento y, con estas curvas, posteriormente se obtendrá la evolución de la carga máxima que soporta el muro a edades tempranas.

Se va a considerar un 1 metro de longitud de muro con una sección de 3x0.6 metros y una armadura de barras de 20 milímetros con una separación tanto horizontal como vertical de 15 centímetros.

Además se hacen dos particiones para hacer un mallado más fino en la parte inferior del muro, ya que es la zona por la que el muro rompería en caso de que lo hiciera.

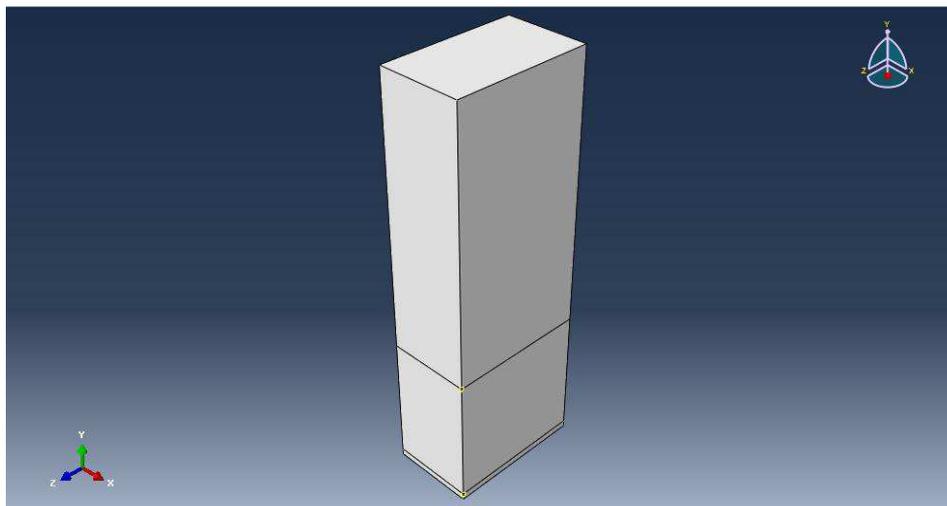


Figura 5.1.- Geometría del muro

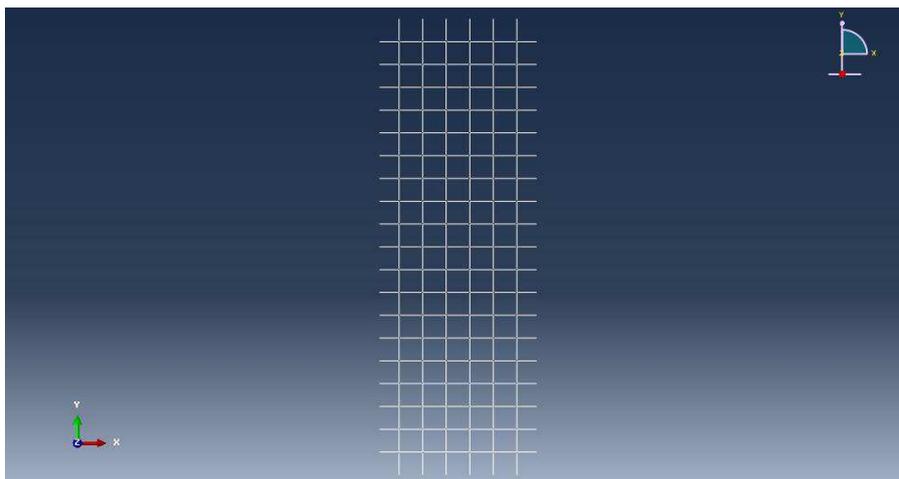


Figura 5.2.- Geometría de la armadura

Los materiales del modelo van a ser hormigón para el muro y acero para la armadura. Las propiedades que se introducen para el hormigón, como ya se ha comentado anteriormente, son las que se obtuvieron en la fase experimental del proyecto extrapoladas para el caso actual y se van a especificar a continuación.

### Propiedades del hormigón

- Densidad: 2240 Kg<sup>m</sup><sup>-3</sup>
- Coeficiente de Poisson: 0.2
- Módulo elástico:

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

Tabla 5.1.- Valores del módulo elástico en función del tiempo

Además, para introducir el comportamiento del hormigón tanto a tracción como a compresión, vamos a hacer uso del modelo de Abaqus “Concrete Damaged Plasticity”, en el cual se van a introducir los siguientes parámetros:

### 1 día

<b>Yield stress</b>	<b>Inelastic strain</b>
20	0
20	0.00194

Tabla 5.2 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 24 horas de edad

Yield stress	Displacement
2	0
0.1097	1.4478
0.01219	1.6168
0	2.1129

Tabla 5.3 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 24 horas de edad

## 2 días

Yield stress	Inelastic strain
26.7	0
26.7	0.00165

Tabla 5.4 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 48 horas de edad

Yield stress	Displacement
2.132	0
0.1557	1.899
0.001144	1.985
0	2.064

Tabla 5.5 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 48 horas de edad

## 3 días

Yield stress	Inelastic strain
28.941	0
28.941	0.0016

Tabla 5.6 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 3 días de edad

Yield stress	Displacement
2.265	0
0.137	1.55
0.03956	1.7025
0	1.9374

Tabla 5.7 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 3 días de edad

## 4 días

Yield stress	Inelastic strain
31.05	0
31.05	0.001566

*Tabla 5.8 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 4 días de edad*

Yield stress	Displacement
2.398	0
0.1153	1.3427
0.01875	1.4896
0	2.10107088

*Tabla 5.9 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 4 días de edad*

## 5 días

Yield stress	Inelastic strain
33.955	0
33.955	0.001497

*Tabla 5.10 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 5 días de edad*

Yield stress	Displacement
2.531	0
0.1137	1.199
0.00696	1.7704
0	2.414

*Tabla 5.11 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 5 días de edad*

## 6 días

Yield stress	Inelastic strain
35.286	0
35.286	0.0014999

*Tabla 5.12 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 6 días de edad*

Yield stress	Displacement
2.664	0
0.1302	1.3363
0.0192	1.6246
0	1.8561

*Tabla 5.13 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 6 días de edad*

## 7 días

Yield stress	Inelastic strain
36	0
36	0.001528

Tabla 5.14 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 7 días de edad

Yield stress	Displacement
2.8	0
0.16652737	1.5489
0.00516	1.956985
0	2.89047

Tabla 5.15 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 7 días de edad

## 14 días

Yield stress	Inelastic strain
38	0
38	0.001446

Tabla 5.16 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 14 días de edad

Yield stress	Displacement
3.2	0
0.116	1.1262
0.00773	1.4117
0	2.9112

Tabla 5.17 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 14 días de edad

## 28 días

Yield stress	Inelastic strain
52	0
52	0.00117

Tabla 5.18 .- Valores Yield stress/Inelastic stress para el comportamiento a compresión del hormigón de 28 días de edad

Yield stress	Displacement
4.3	0
0.191643	1.51868
0.0152	1.62737
0	3.43217

Tabla 5.19 .- Valores Yield stress/Displacement para el comportamiento a tracción del hormigón de 28 días de edad

## Propiedades del acero

- Densidad:  $7850 \text{ Kg m}^{-3}$
- Módulo elástico:  $199000 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de Poisson: 0.3

Límite elástico ( $\text{N/m}^2$ )	220e6	320e6	370e6	380e6
Deformación Plástica	0	0.25	0.5	1

Tabla 5.20.- Valores límite elástico/deformación plástica para el acero

Para el mallado se van a emplear elementos de tipo C3D8R para el muro y T3D2 para la armadura.

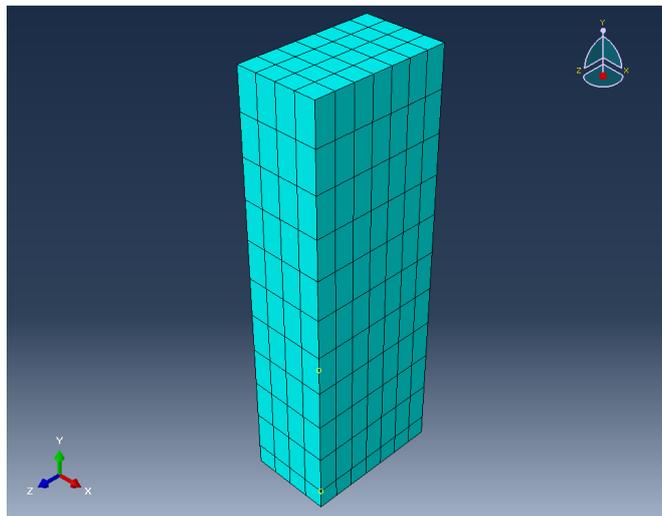


Figura 5.3.- Mallado muro

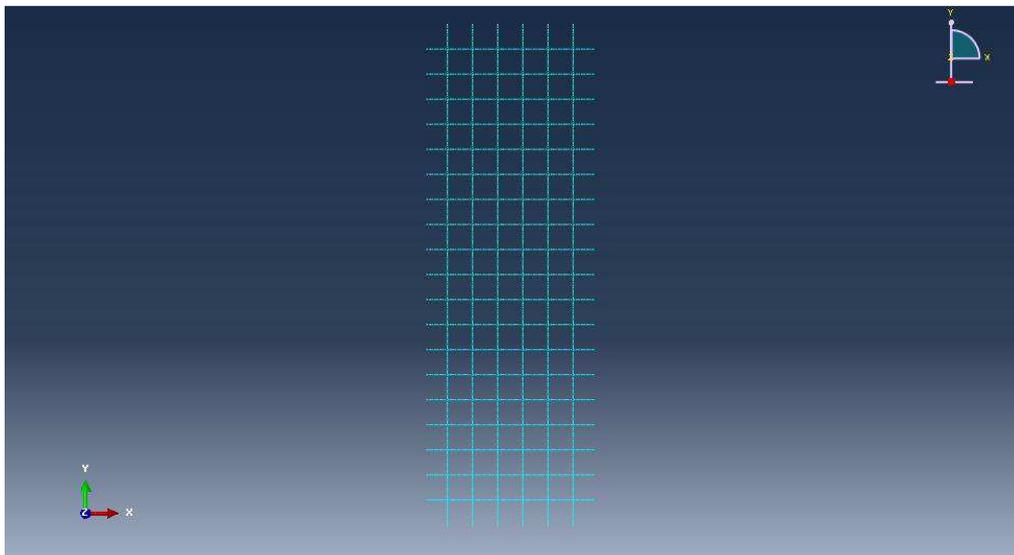
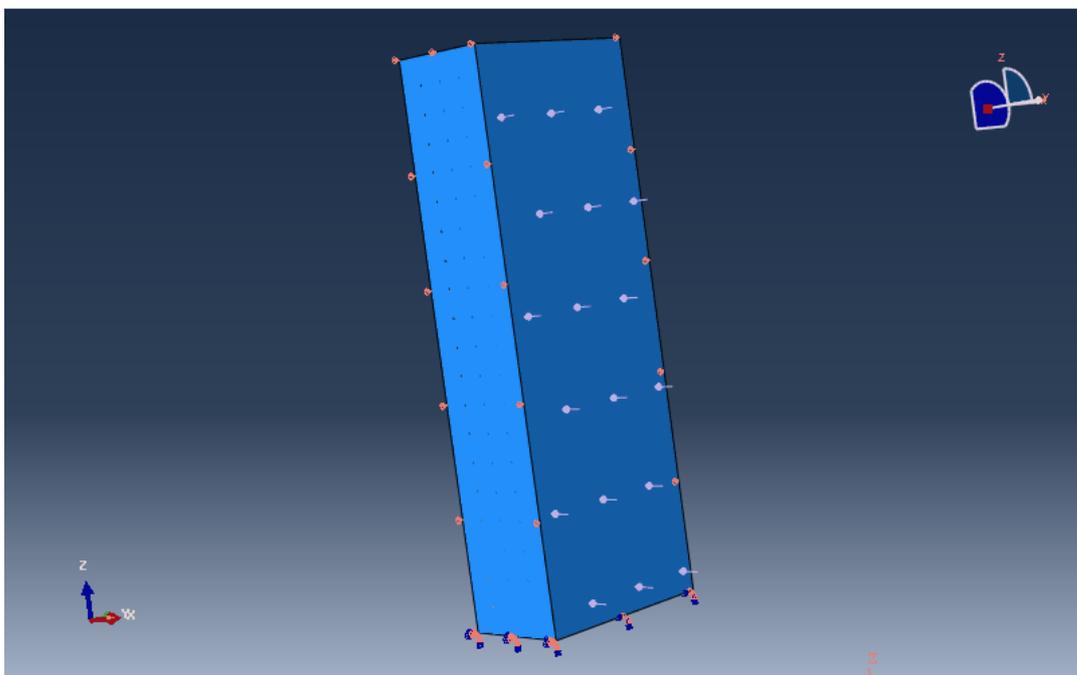


Figura 5.4.- Mallado armadura

Para introducir la carga del peso propio seleccionando Gravity (Types for selected step), e introducimos un valor de -9.8 en la componente número 3 (eje Z).

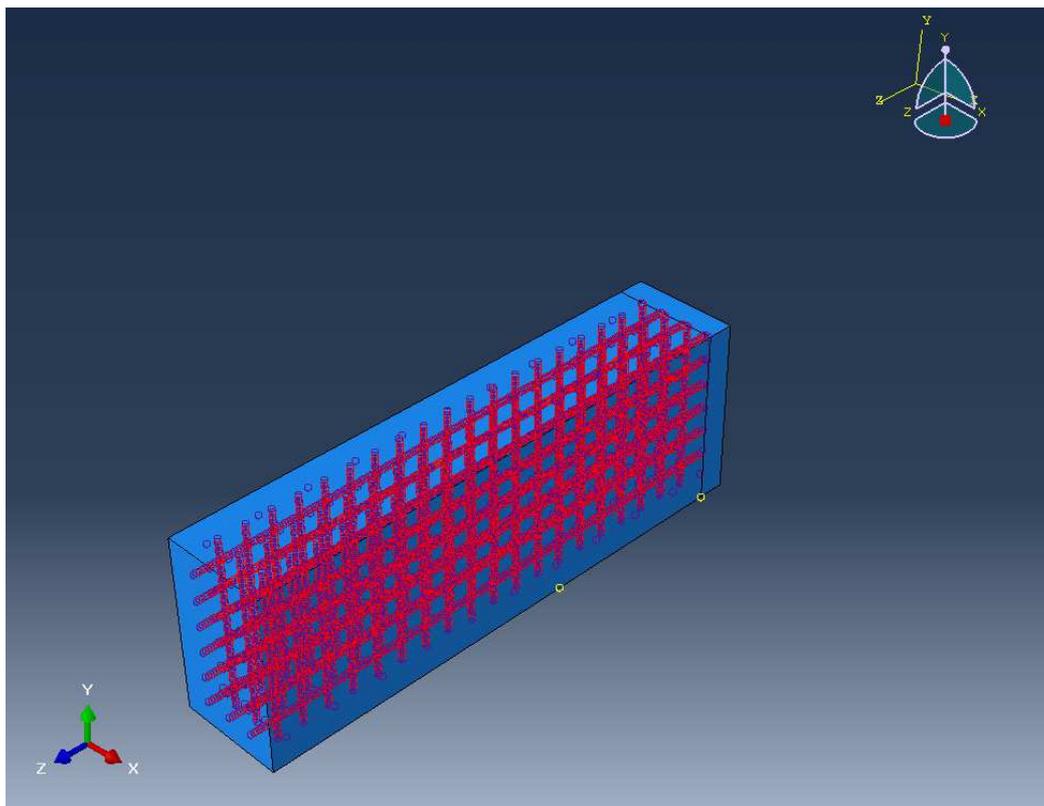
Además de la carga del peso propio del muro, para modelar el empuje que genera el terreno sobre el muro se van a introducir una carga de tipo presión hidrostática, con máximo en la base del muro y con valor nulo en la parte superior del mismo.

Las condiciones de contorno que se van a introducir en el modelo son la de empotramiento en la parte inferior del muro e impedir el desplazamiento a lo largo del eje Z en las caras perpendiculares a dicho eje, ya que se está tomando un tramo del muro (1 metro).



*Figura 5.5.- Modelo con cargas y condiciones de contorno introducidas*

Por último se va a proceder a la unión entre la armadura y el muro. Para ello se va a emplear la técnica “Embedded elements” que proporciona ABAQUS, la cual es idónea para lo que buscamos, que es armar el muro de hormigón. Ésta técnica consiste en que, al definir host elements (muro) y embedded elements (armadura), si un nodo del embedded element se encuentra dentro del host element, los grados de libertad traslacionales del nodo se eliminan y el nodo pasa a ser embedded node. Los grados de libertad del embedded node están limitados a los valores interpolados de los correspondientes grados de libertad del host element. Los embedded elements tienen permitidos los grados de libertad rotacionales, los cuales no están impedidos.



*Figura 5.6.- Modelo con la unión entre muro y armadura realizada*

### **5.1.2. Resultados**

Los resultados que se van a obtener son, por un lado, las curvas carga-desplazamiento para las distintas edades del hormigón y, por otro, la evolución de la carga máxima que se puede aplicar al muro a partir de las curvas anteriores.

A priori es lógico pensar que la carga máxima que va a soportar el hormigón va a ir aumentando a medida que la edad del mismo sea mayor, ya que las propiedades mecánicas del hormigón mejoran con la edad de curado, teniendo las mejores propiedades a los 28 días de edad.

La zona crítica del muro de contención en la cual es probable que se produzcan las fisuras y, por tanto, el fallo del mismo es la parte inferior del mismo, donde van a producirse los mayores momentos. Es por esto por lo que la carga máxima para cada edad va a ser la carga para la que no se produzca el fallo del muro para las distintas edades del hormigón.

A continuación se van a mostrar las curvas carga-desplazamiento para cada edad del hormigón para comprobar lo comentado en el párrafo anterior.

## Hormigón de 24 horas de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a las 24 horas es la siguiente.

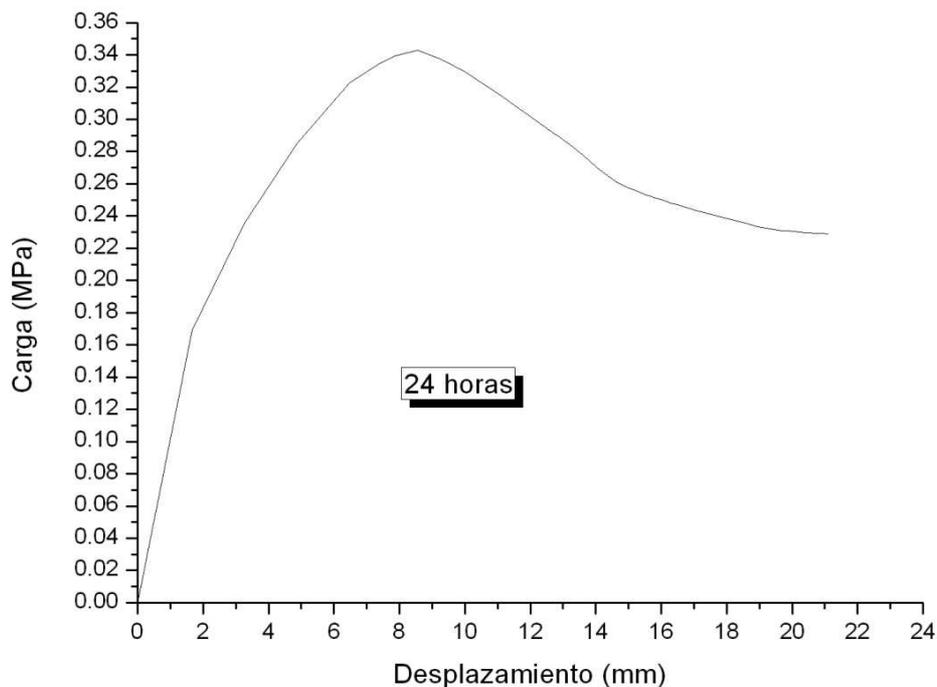


Figura 5.7.- Curva carga-desplazamiento 24 horas

Para las 24 horas se obtiene una carga máxima de 0.34293 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 8.57 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

## Hormigón de 48 horas de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a las 48 horas es la siguiente.

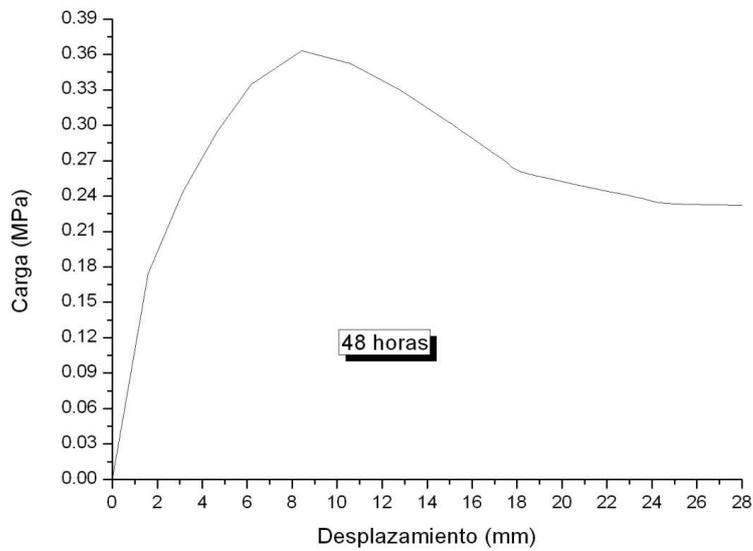


Figura 5.8.- Curva carga-desplazamiento 48 horas

Para las 48 horas se obtiene una carga máxima de 0.36311 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 8.42 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para la edad anterior.

### Hormigón de 3 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 3 días es la siguiente.

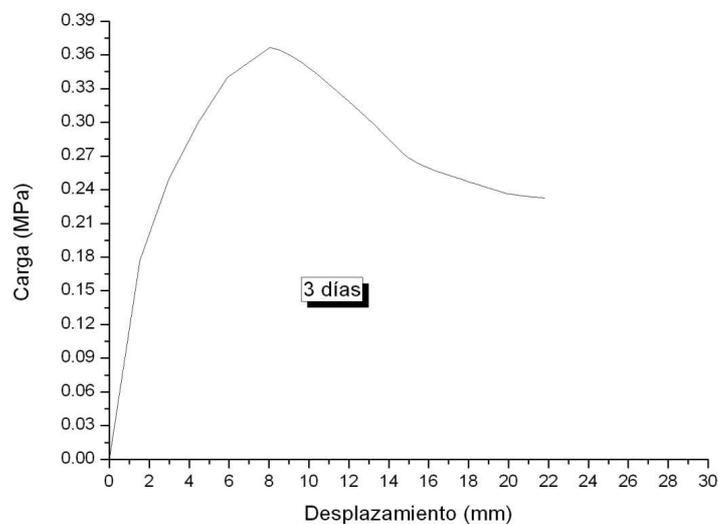


Figura 5.9.- Curva carga-desplazamiento 3 días

Para los 3 días se obtiene una carga máxima de 0.36678 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 8.06 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 4 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 4 días es la siguiente.

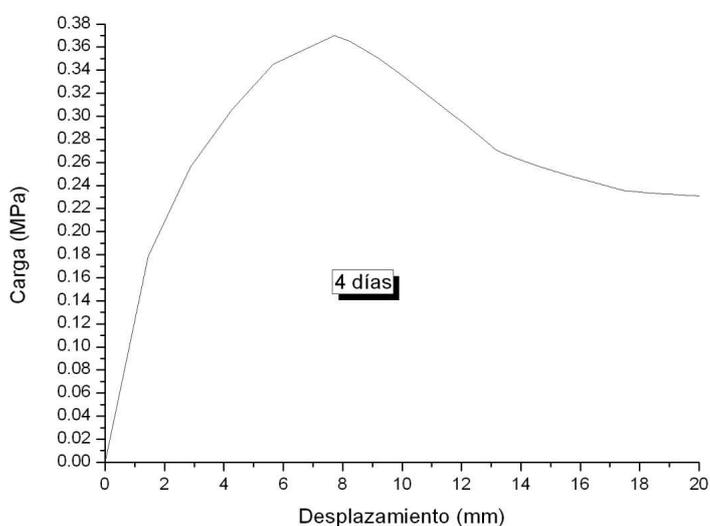


Figura 5.10.- Curva carga-desplazamiento 4 días

Para los 4 días se obtiene una carga máxima de 0.37023 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 7.72 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 5 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 5 días es la siguiente.

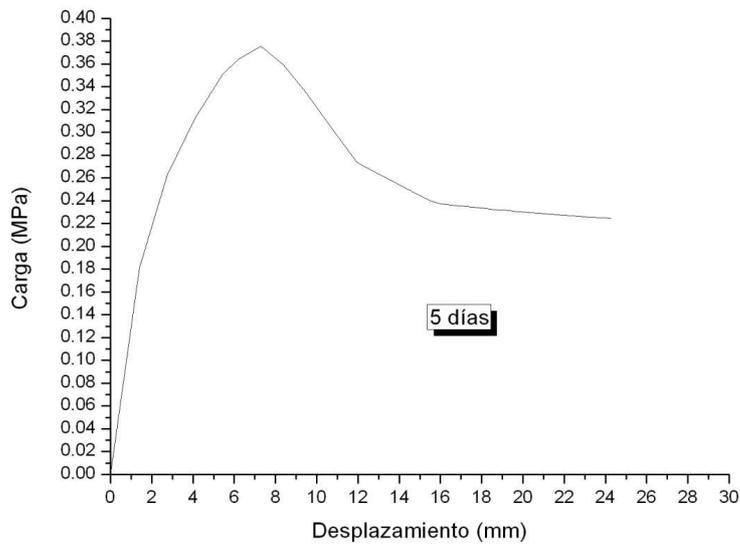


Figura 5.11.- Curva carga-desplazamiento 5 días

Para los 5 días se obtiene una carga máxima de 0.37573 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 7.29 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 6 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 6 días es la siguiente.

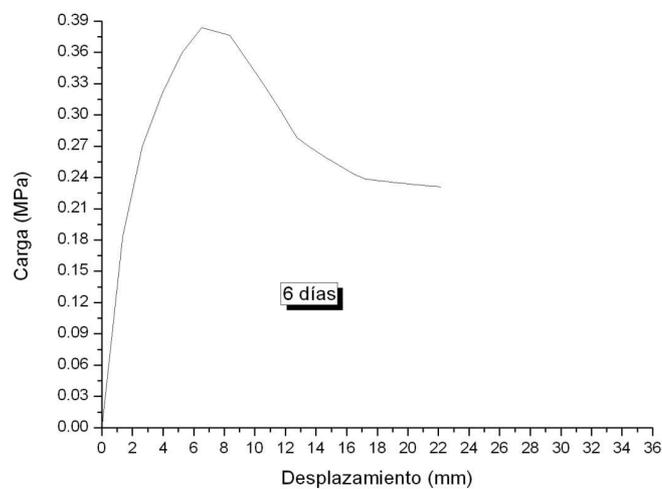


Figura 5.12.- Curva carga-desplazamiento 6 días

Para los 6 días se obtiene una carga máxima de 0.38349 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 6.51 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 7 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 7 días es la siguiente.

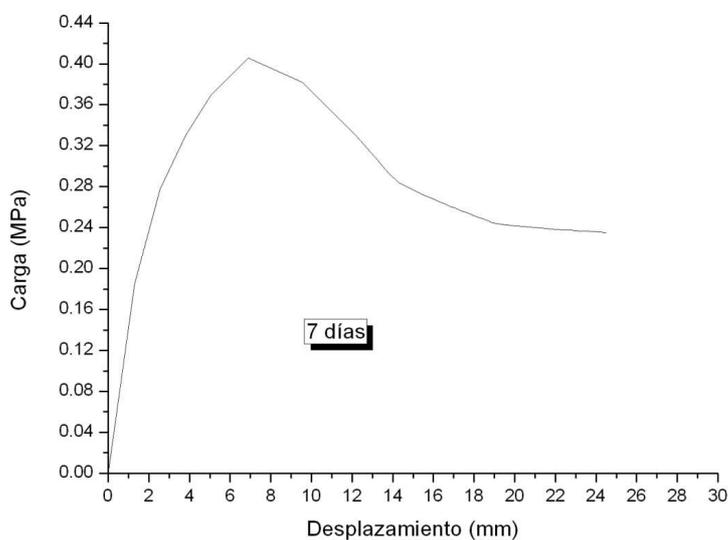


Figura 5.13.- Curva carga-desplazamiento 7 días

Para los 7 días se obtiene una carga máxima de 0.40561 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 6.88 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 14 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 14 días es la siguiente.

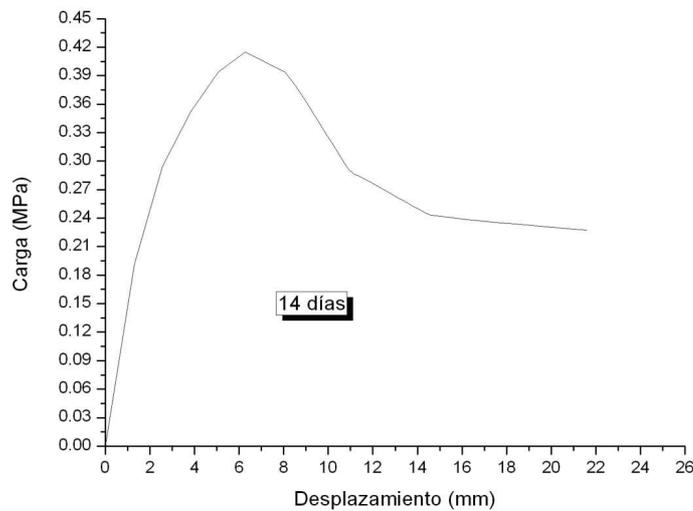


Figura 5.14.- Curva carga-desplazamiento 14 días

Para los 14 días se obtiene una carga máxima de 0.414748 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 6.27 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

## Hormigón de 28 días de edad

La curva carga-desplazamiento que se ha obtenido para el modelo a los 28 días es la siguiente.

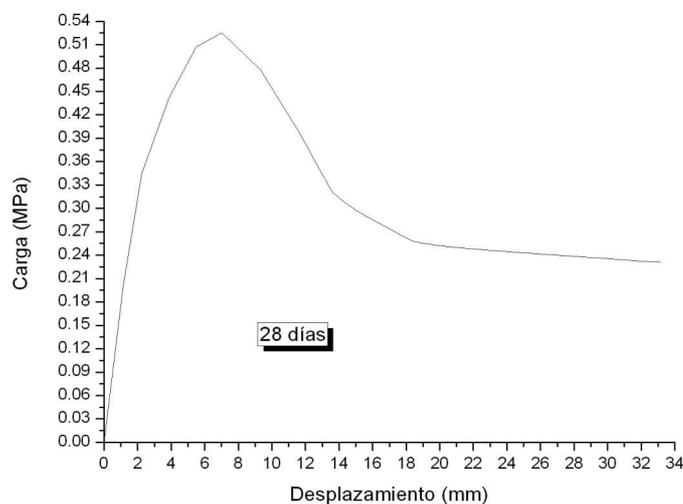


Figura 5.15.- Curva carga-desplazamiento 28 días

Para los 3 días se obtiene una carga máxima de 0.52507 MPa con un desplazamiento de la parte superior del muro de 7.03 mm.

A partir de ese instante se produce el ablandamiento de la curva carga-desplazamiento.

La carga máxima es tal y como preveíamos mayor que para las edades anteriores.

Por último se va a mostrar la evolución de la carga máxima que soporta el muro de contención con respecto a la edad de curado del hormigón.

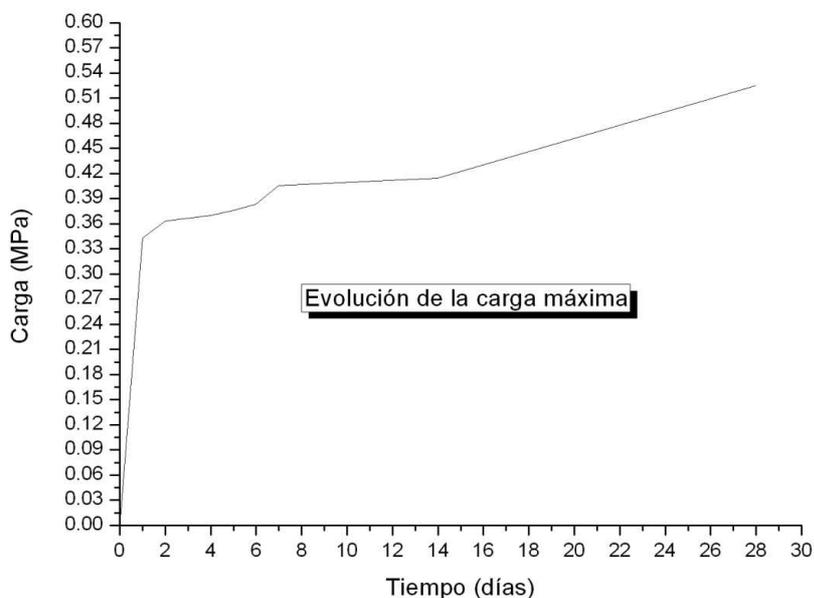


Figura 5.16.- Evolución de la carga máxima con la edad del hormigón

Se observa como la carga máxima que soporta el muro va aumentando a medida que aumenta la edad de curado del hormigón, ya que las características mecánicas del mismo van mejorando con la edad.

## **5.2. MODELO TERMO-MECÁNICO DE UN MURO DE CONTENCIÓN.**

### **5.2.1. Descripción del modelo**

Se va a proceder a la descripción del modelado de un muro de contención de hormigón armado en ABAQUS. El objetivo principal de dicho modelo es la realización de un análisis termo-mecánico de dicho muro a edades tempranas. Para ello se van a realizar varios modelos del muro en el que las propiedades del hormigón (tanto el módulo elástico como el comportamiento a tracción y compresión del mismo). Dichas propiedades son las que se

obtuvieron en la campaña experimental del proyecto, las cuales se han extrapolado para el presente modelo.

Además, para tener en cuenta las tensiones en el muro de origen térmico, se va a modelar el calor de hidratación que va a generar el cemento haciendo uso de los resultados que obtuvimos tanto en la campaña experimental como en el posterior modelado con Abaqus del cubo de hormigón.

En cada modelo se va a aplicar la carga al muro, es decir, se va a quitar el apuntalamiento del mismo para que pase a actuar la carga del terreno, en un instante de tiempo determinado y se van a analizar las tensiones y las deformaciones plásticas en el instante de antes y después de aplicar la carga.

Con esto, lo que realmente buscamos es, además de conocer el estado tensional del muro a las distintas edades antes y después de aplicar la carga del terreno, encontrar la edad del hormigón para la cual no se van a producir fisuras en el muro al quitar el apuntalamiento.

El modelo en sí es el mismo que el del capítulo anterior, realizando en este caso un análisis termo-mecánico, por lo que se le van a introducir propiedades, cargas y condiciones de contorno de temperatura y, además, hay que introducirle propiedades que varíen en el tiempo mediante una field variable tal y como se comentó en el modelo termo-mecánico del muro a edades tempranas.

Valor de la "field variable"	Edad del hormigón para cada propiedad
0.0	24 horas
1.0	48 horas
2.0	3 días
3.0	4 días
4.0	5 días
5.0	6 días

6.0	7 días
7.0	14 días
8.0	28 días

Tabla 5.21.- Valores de la "field variable" para cada edad del hormigón

Pasamos a comentar, además de la carga térmica que modela el calor de hidratación del hormigón, los cambios realizados con respecto al muro de contención desarrollado en el apartado anterior.

Para el mallado del muro se emplean elementos del tipo C3D8T.

Para modelar el intercambio de calor que se produce por convección entre las caras externas del muro y el entorno. Se hace distinción entre la caras que están durante todo el análisis en contacto con el encofrado (caras inferior y sobre la que se aplica la carga del terreno, las cuales van a tener una interfase hormigón-encofrado), la cara superior (la cual va a tener una interfase hormigón-aire), las caras laterales (interfase hormigón-hormigón) y la cara opuesta a la aplicación de la carga, la cual pasa de estar en contacto con el encofrado (interfase hormigón-encofrado) a estar en contacto con el aire (interfase hormigón-aire) en el momento que se comienza a aplicar la carga.

Dicho esto habrá que crear cuatro interacciones de forma separada para las caras laterales, la superior y la inferior.

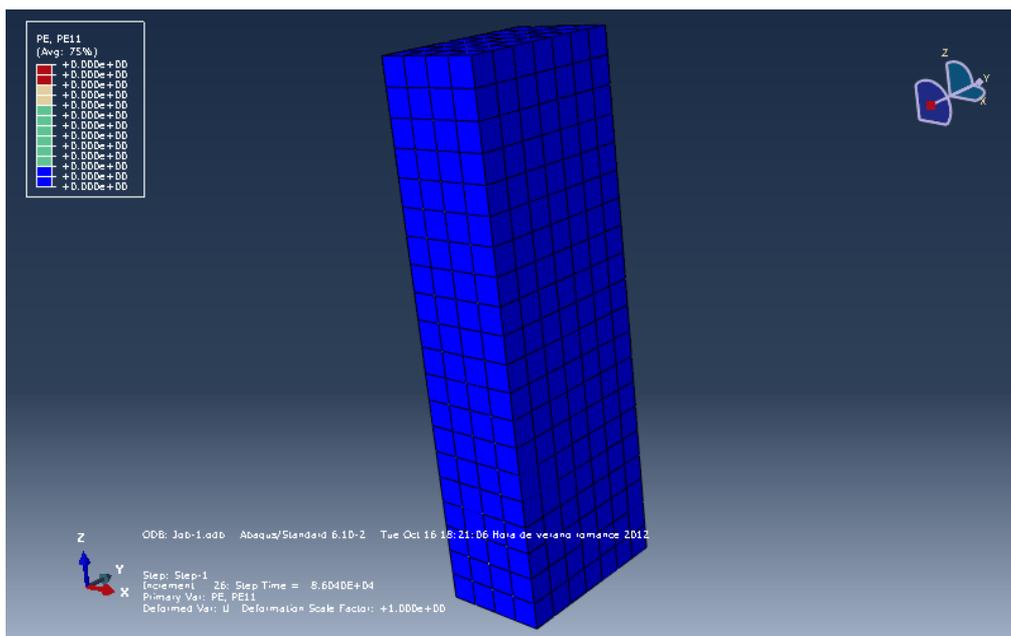
### **5.2.2. Resultados**

A continuación se van a discutir los resultados que se obtienen del modelo termo-mecánico del muro de hormigón armado que hemos definido.

Se va a analizar tanto el estado tensional como las deformaciones plásticas que se producen en el muro en los instantes previo y posterior a la aplicación de la carga del terreno sobre el mismo.

Asimismo se van a examinar las tensiones en la armadura en los instantes que se han comentado en el párrafo anterior.

Hay que tener en cuenta que en el instante anterior a la aplicación de la carga del terreno sólo está actuando la carga del peso propio y el flujo de calor que modela el calor de hidratación del hormigón. Dichas cargas son lo suficientemente leves como para que no se produzcan deformaciones plásticas en el muro, lo cual se comprueba en la siguiente imagen. Por esta razón no se van a mostrar dichas las deformaciones plásticas previas a la aplicación de la carga del terreno en los resultados que se van a pasar a analizar para cada edad.



*Figura 5.17.- Deformaciones plásticas en los instantes previos a la aplicación de la carga del terreno sobre el muro*

Con respecto a las deformaciones plásticas, a través de las cuales sabemos que se van a producir las grietas, se espera que vayan disminuyendo a medida que la carga del terreno se aplique en instantes posteriores, llegando un momento en el que dichas deformaciones sean nulas y, por tanto, el hormigón no sufra daños por la carga del terreno que se le está aplicando.

Para la armadura se espera que al retrasar el momento de aplicación de la carga del terreno presente unas tensiones menores, ya que el hormigón tendrá unas mejores propiedades mecánicas y, por tanto, la armadura sufrirá menos con la carga.

Pasamos a visualizar los resultados obtenidos para cada edad del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a las 24 horas de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga

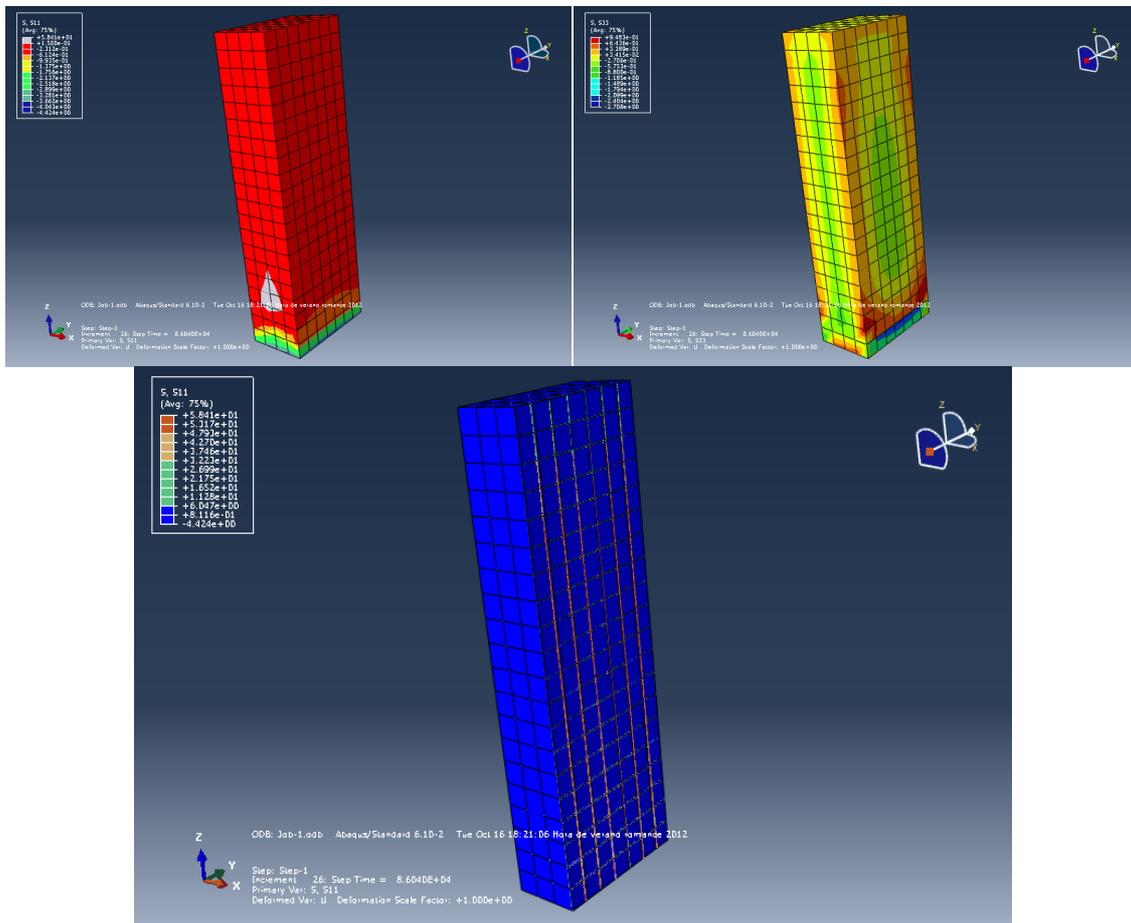


Figura 5.18.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a las 24 horas de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son en general de tracción, salvo en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide la libre dilatación del muro que se produce por el efecto del aumento de temperatura en el mismo por la acción del calor de hidratación del hormigón, produciéndose así compresiones en la parte inferior del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 58 Mpa de tracción.

Instantes posteriores a la aplicación de la carga

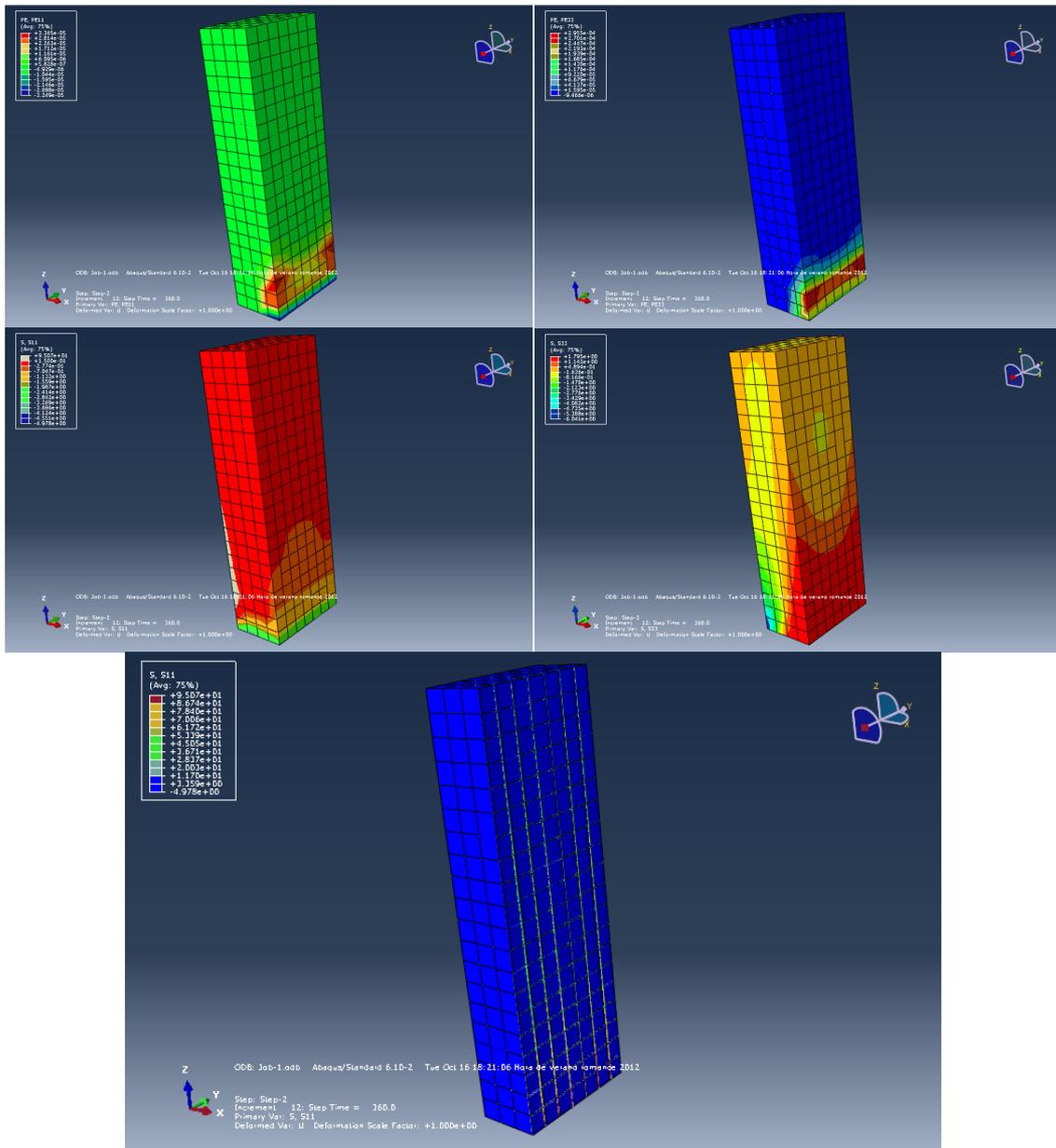


Figura 5.19.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a las 24 horas de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como cabía esperar. Los mayores valores tanto de tracción como de compresión se dan en la zona inferior del muro ya que es donde está el empotramiento y, por tanto, es la zona más afectada por la carga. Este hecho hace que las deformaciones plásticas se produzcan en la zona baja del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 95 Mpa de tracción en la zona inferior del muro.

Debido a que el hormigón tiene un comportamiento bastante peor a tracción que a compresión, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual, como hemos dicho anteriormente, está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a las 48 horas de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga

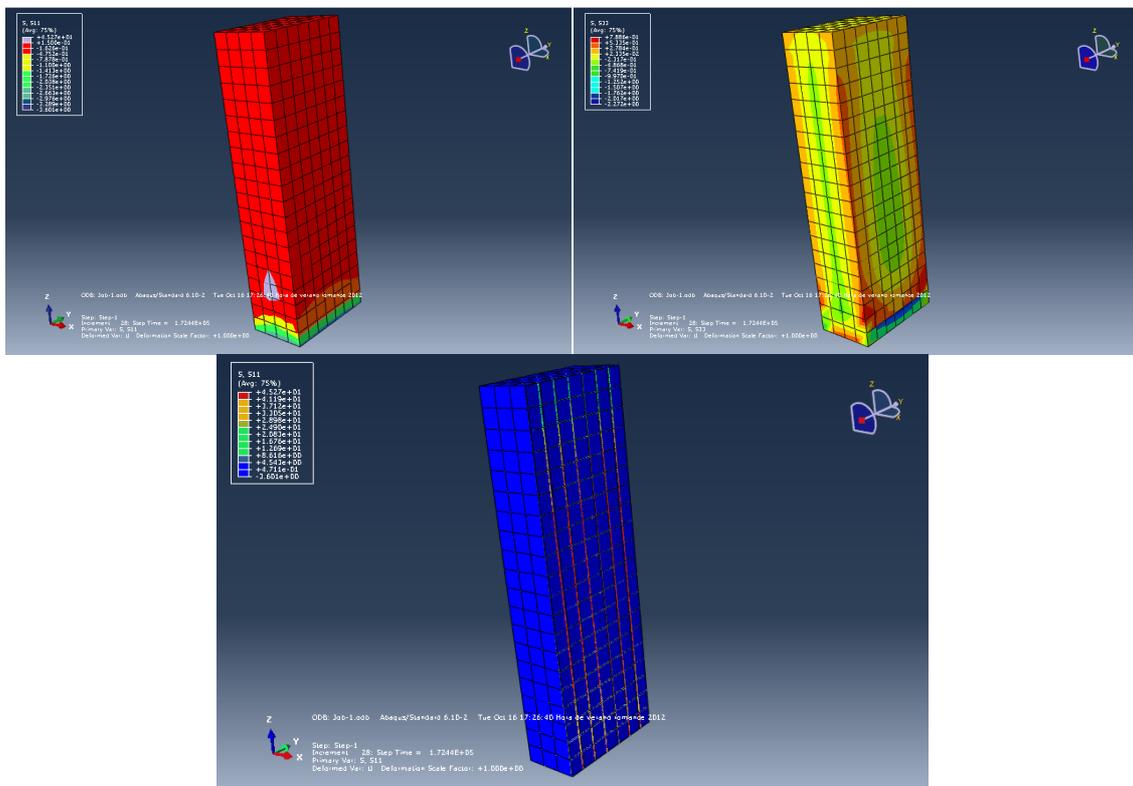


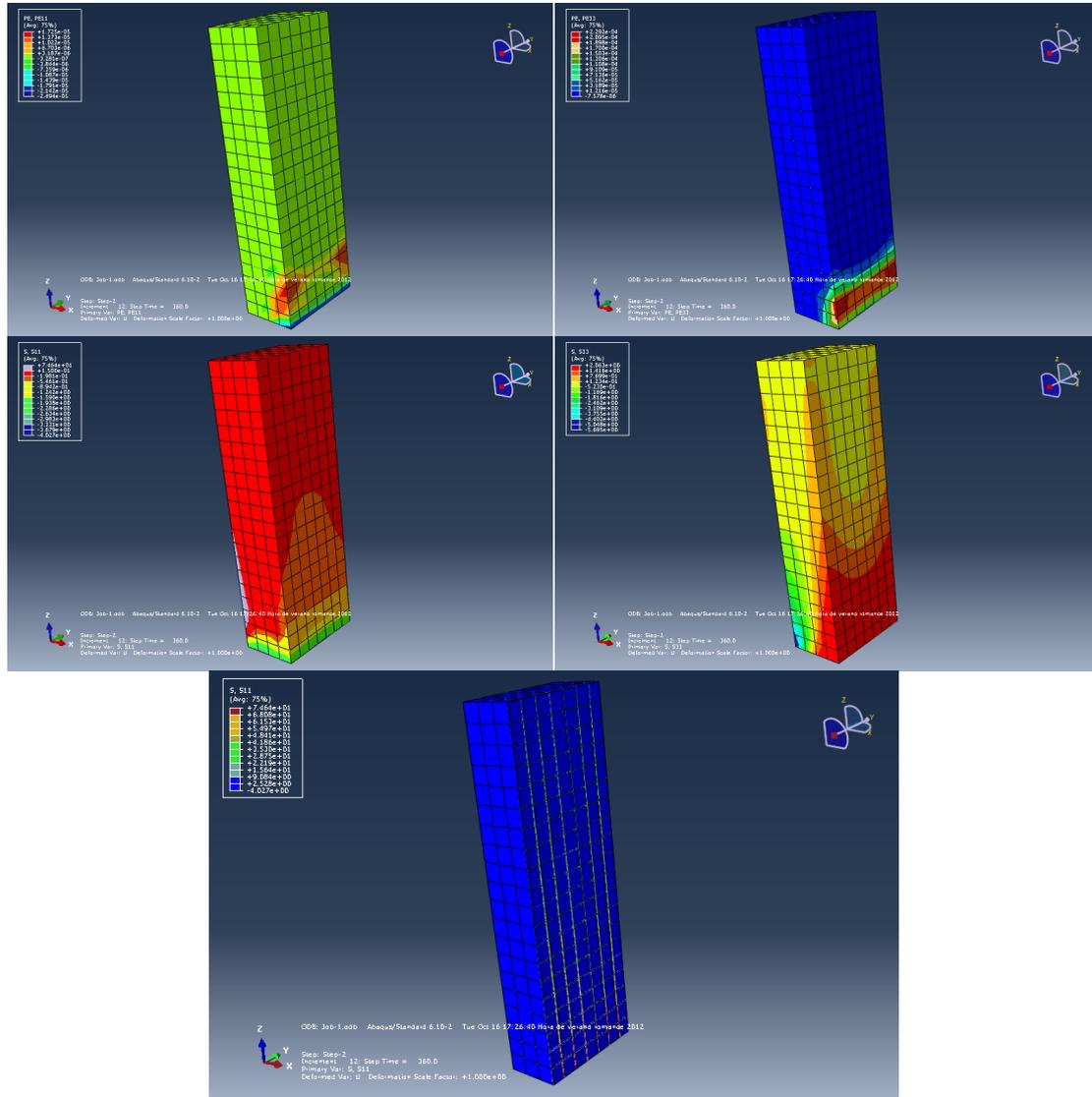
Figura 5.20.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a las 48 horas de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son en general de tracción, salvo en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide la libre dilatación del muro que se produce por el efecto del aumento de temperatura en el mismo por la acción del calor de hidratación del hormigón, produciéndose así compresiones en la parte inferior del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 45 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

### Instantes posteriores a la aplicación de la carga



*Figura 5.21.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a las 48 horas de edad tras la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

La máxima tensión en la armadura es de 74 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

Igual que para la edad previa, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 3 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga

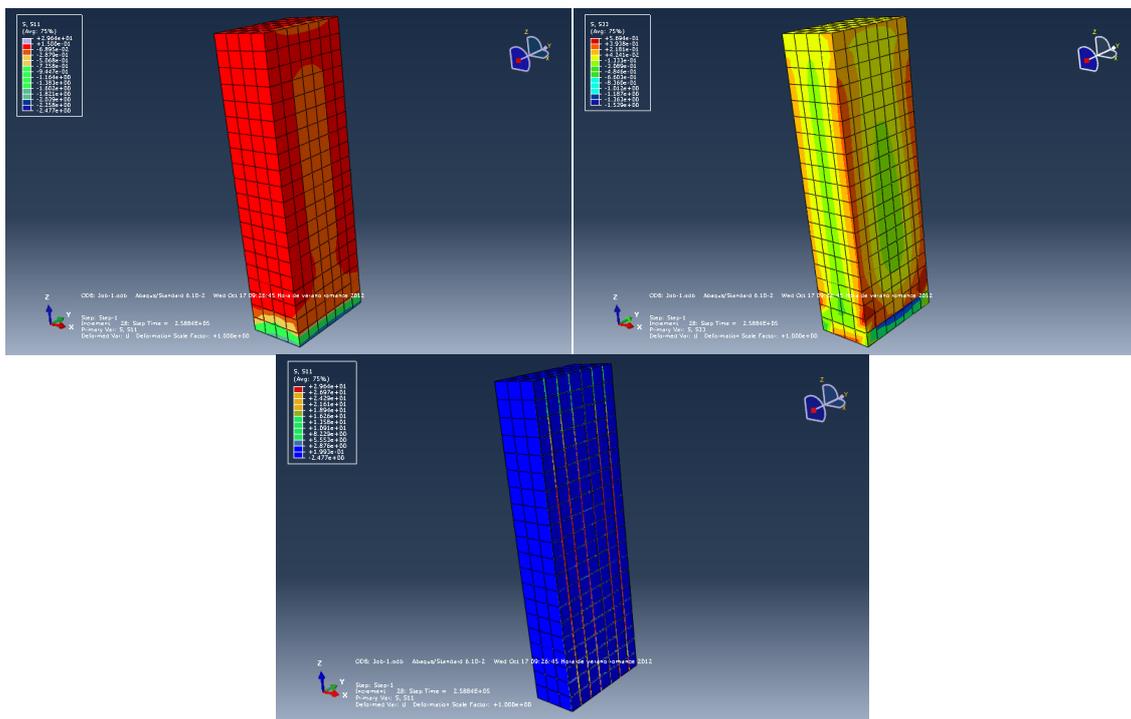


Figura 5.22.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 3 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 29 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

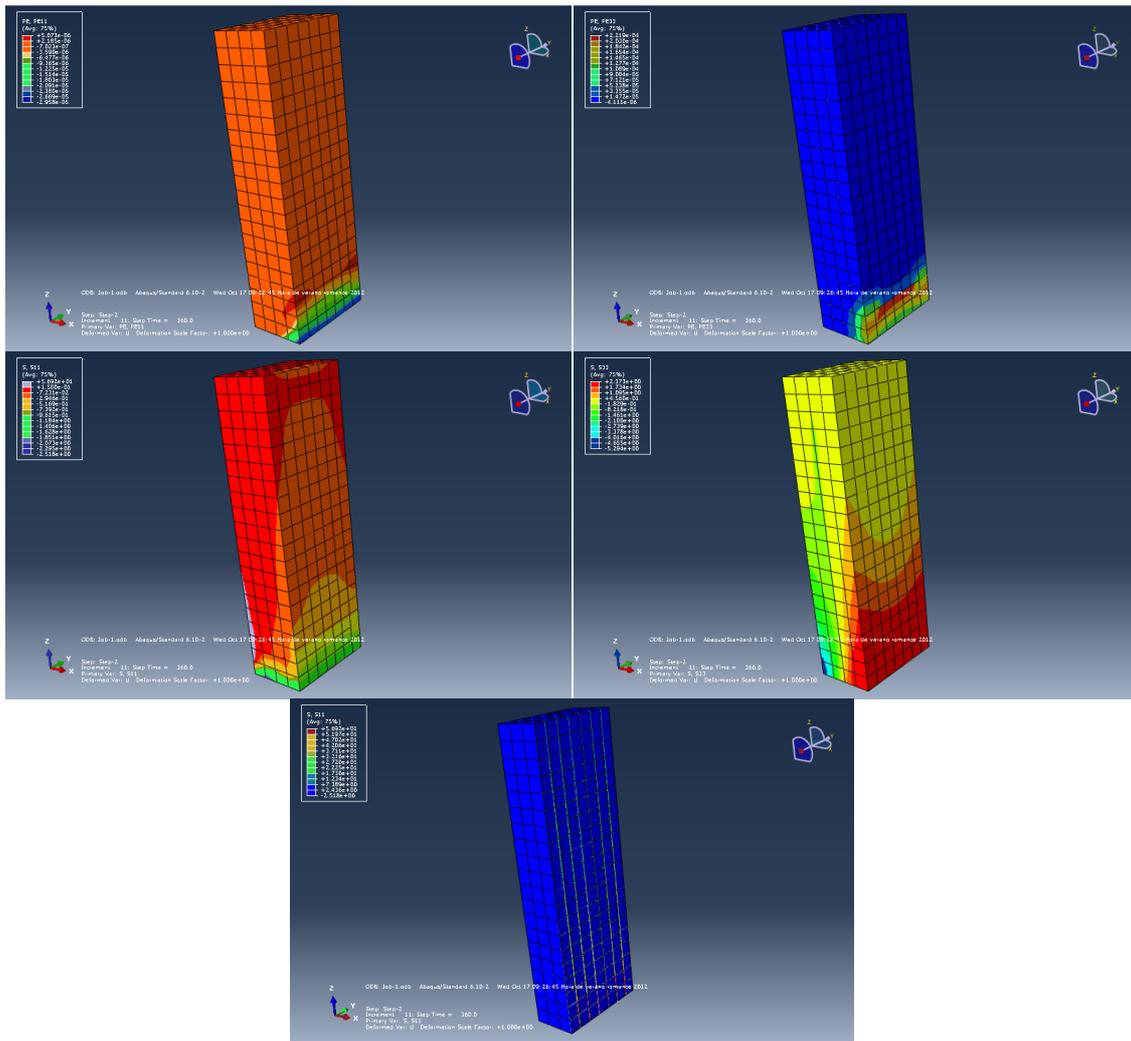


Figura 5.23.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 3 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

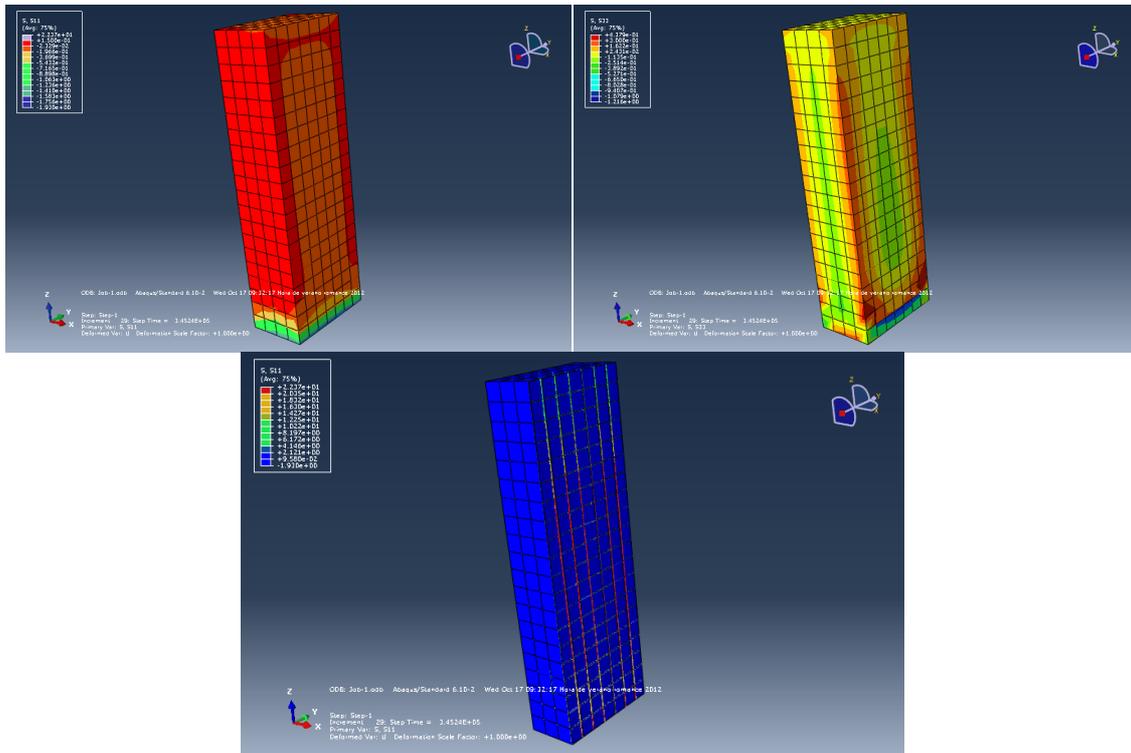
La máxima tensión en la armadura es de 56 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edad previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 4 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



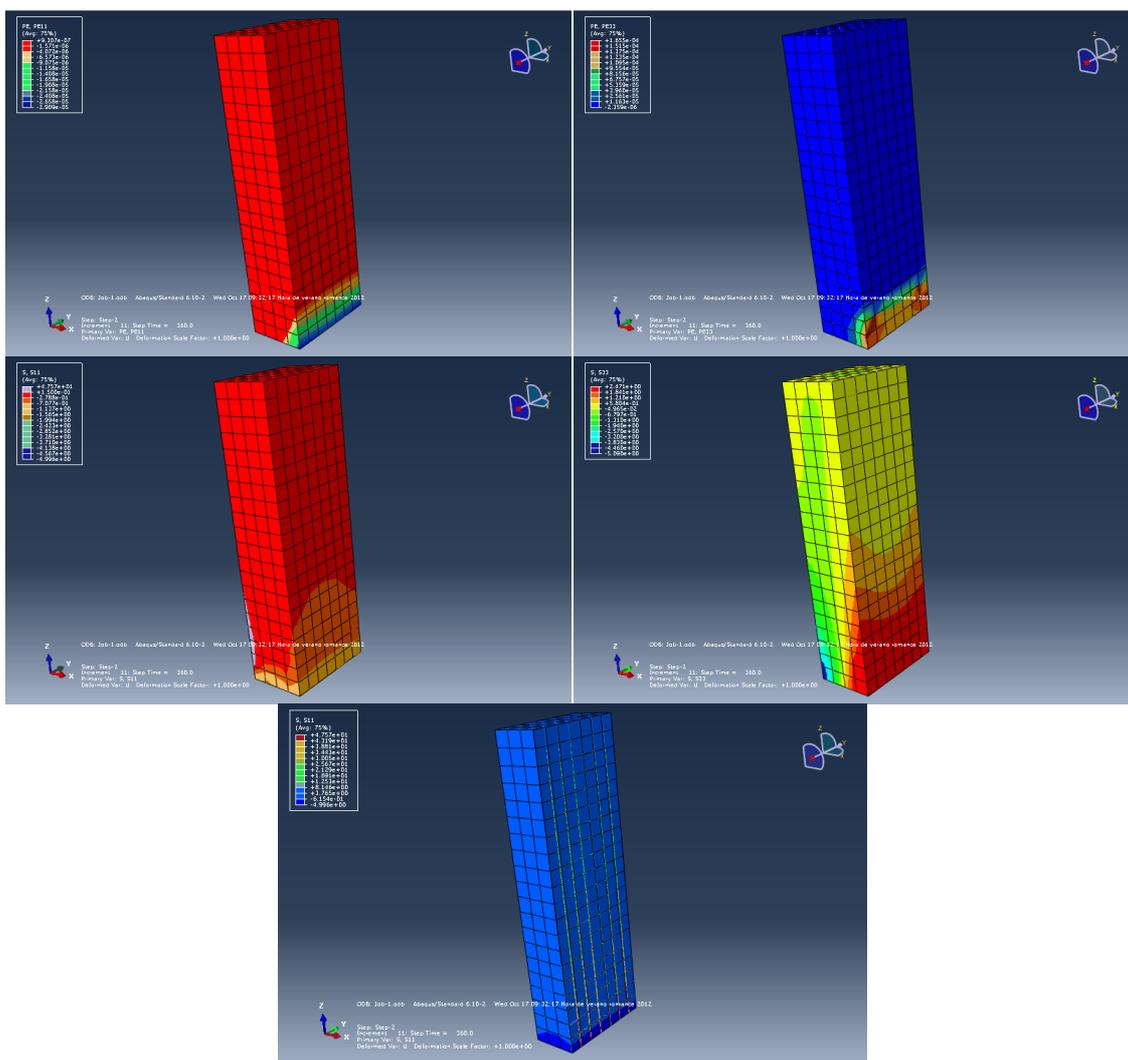
*Figura 5.24.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 4 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 22 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

**Instantes posteriores a la aplicación de la carga**



*Figura 5.25.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 4 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

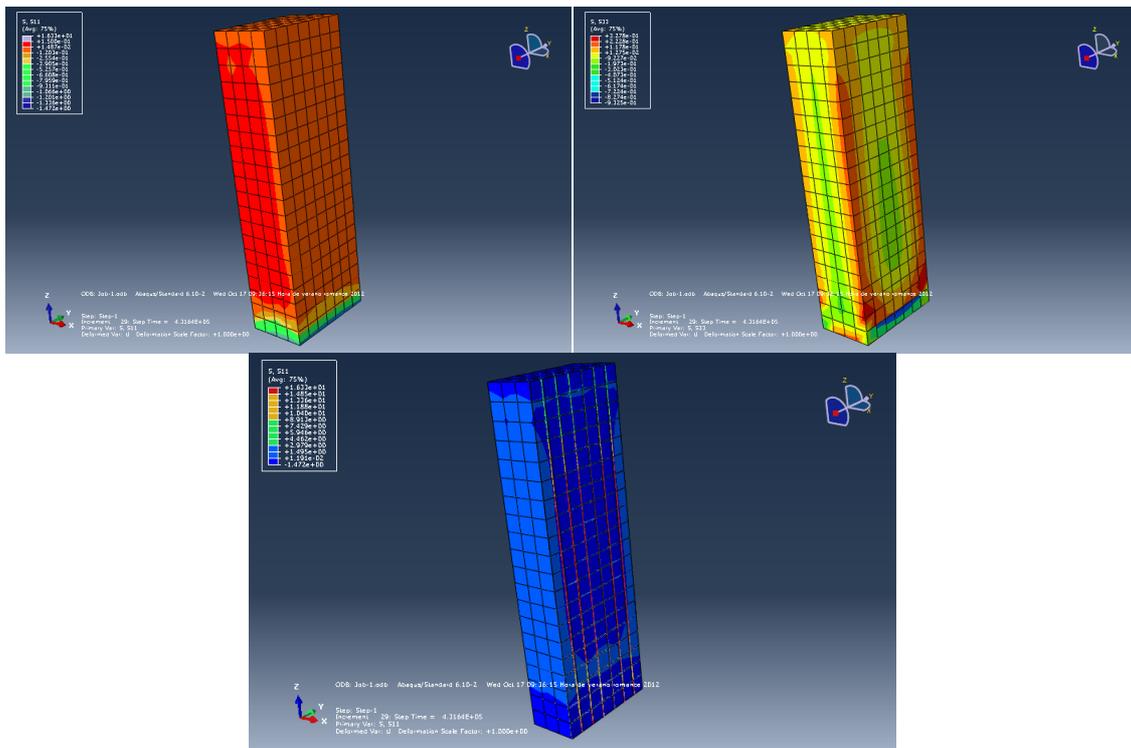
La máxima tensión en la armadura es de 47 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edad previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 5 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



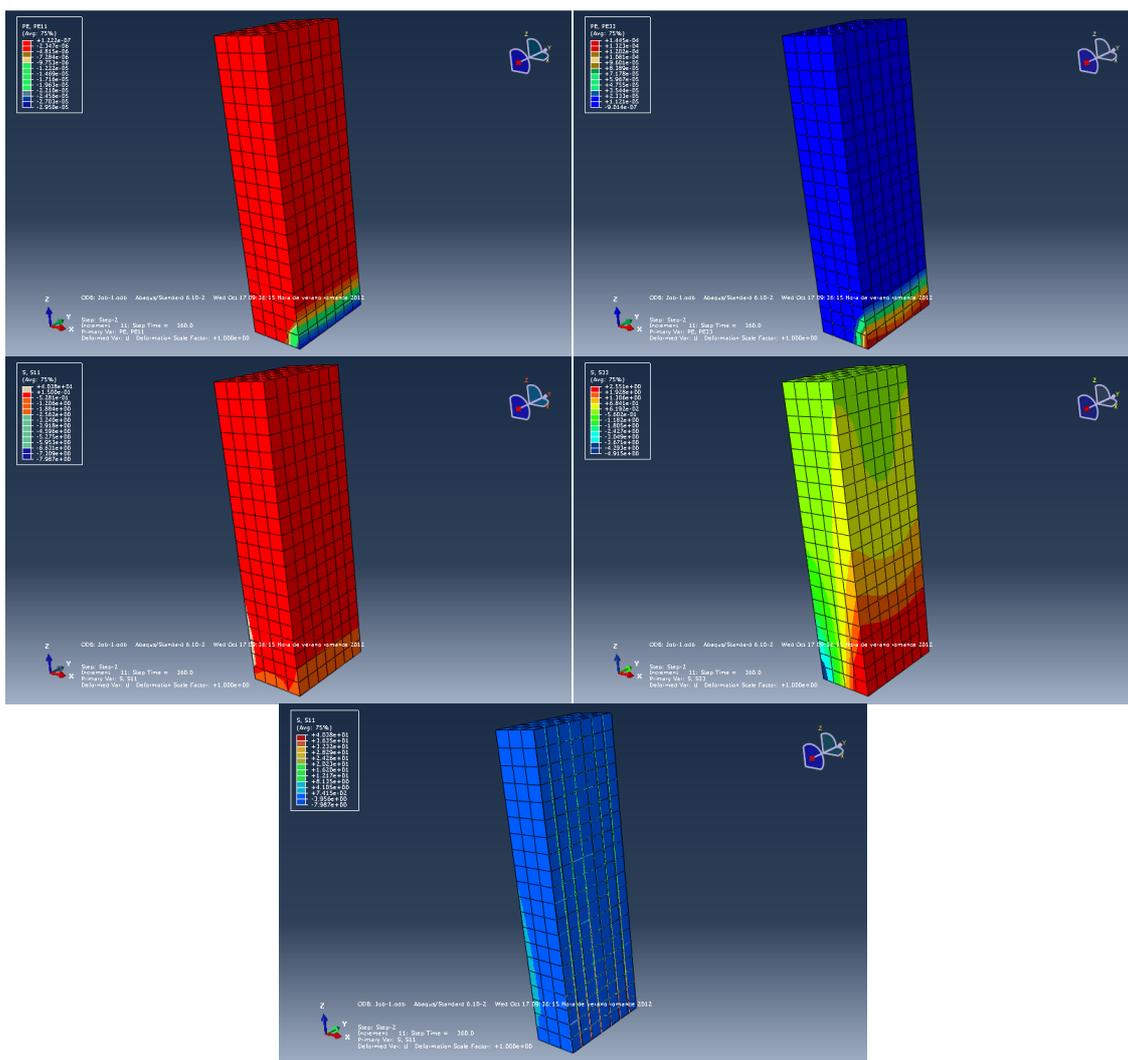
*Figura 5.26.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 5 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo en la parte superior del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 16 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

**Instantes posteriores a la aplicación de la carga**



*Figura 5.27.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 5 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

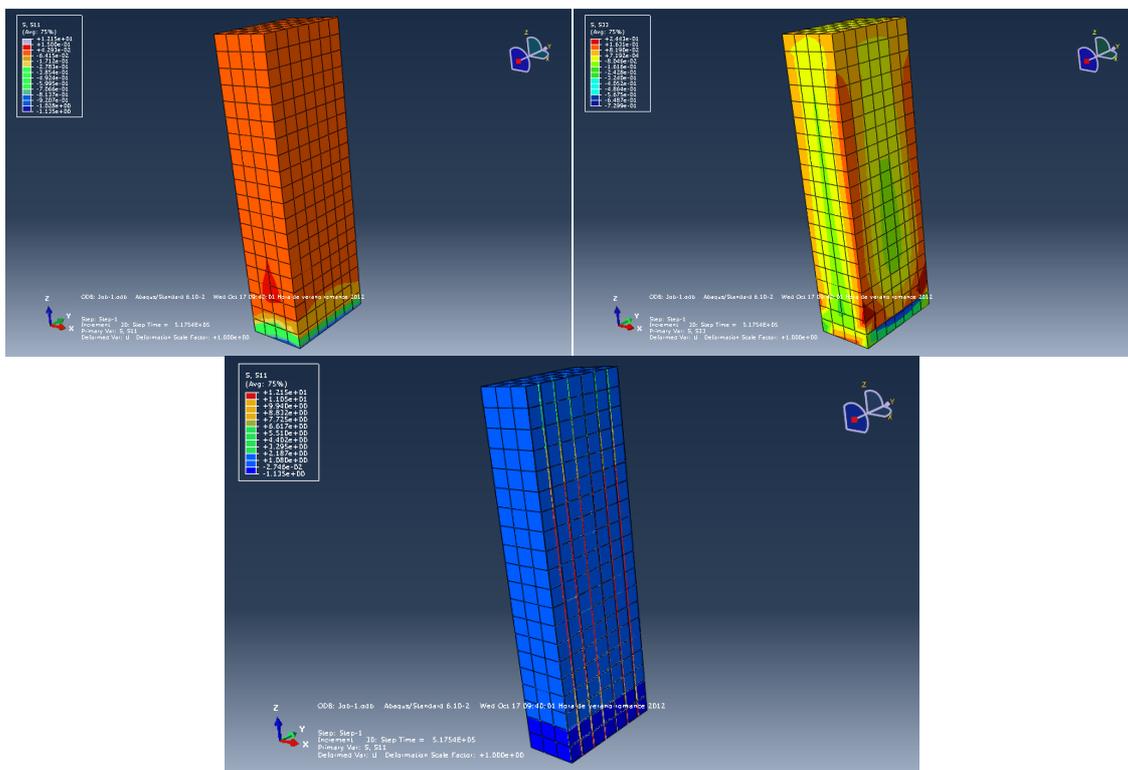
La máxima tensión en la armadura es de 40 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edad previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 6 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



*Figura 5.28.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 6 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo zonas del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 12 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

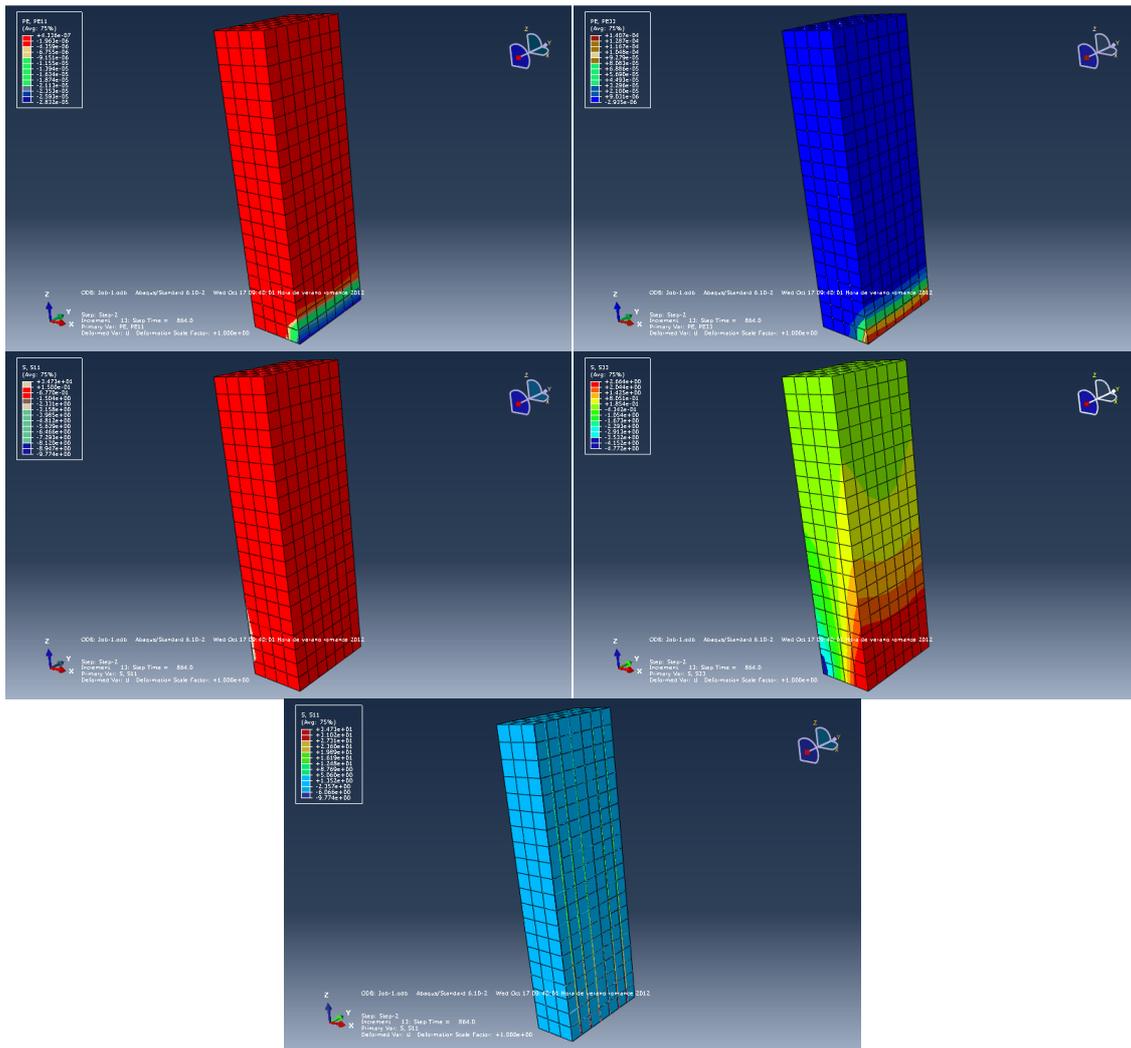


Figura 5.29.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 6 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

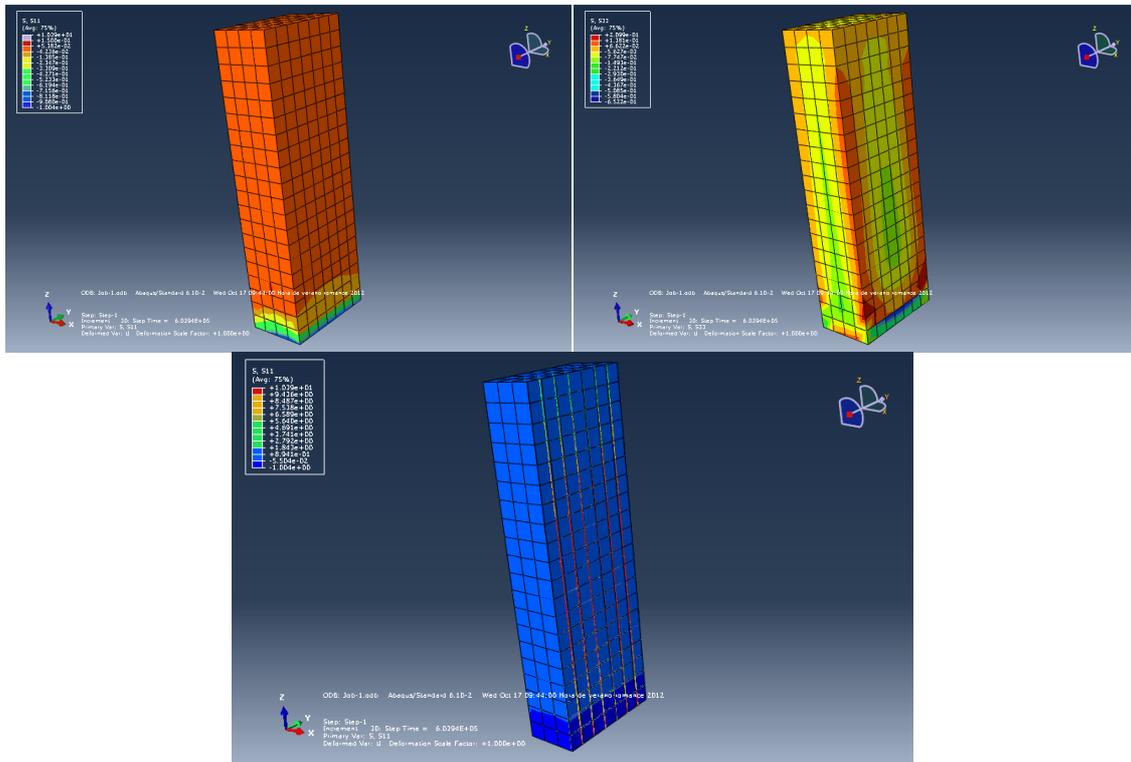
La máxima tensión en la armadura es de 34 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edades previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 7 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



*Figura 5.30.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 7 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo zonas del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 10 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

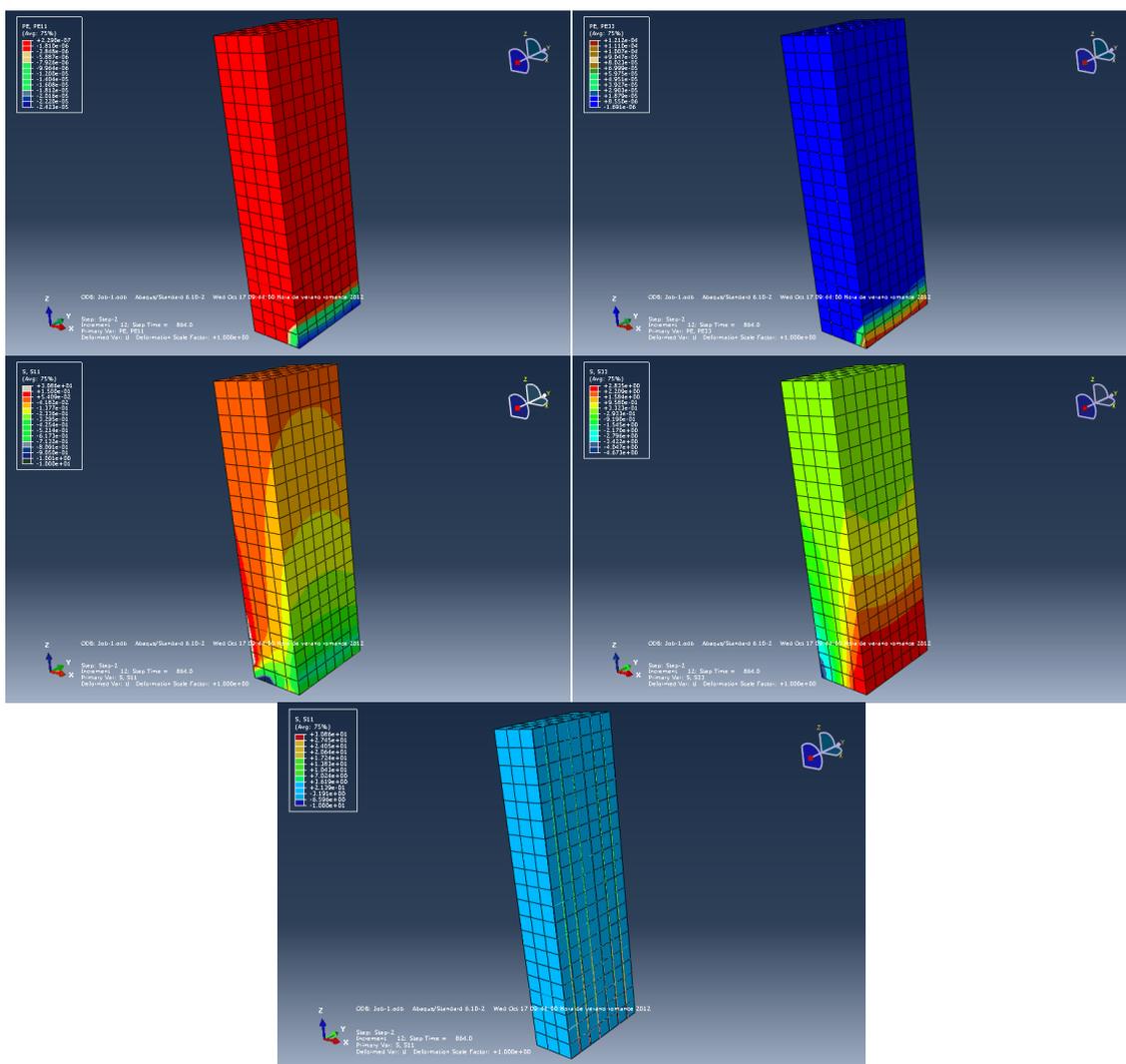


Figura 5.31.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 7 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

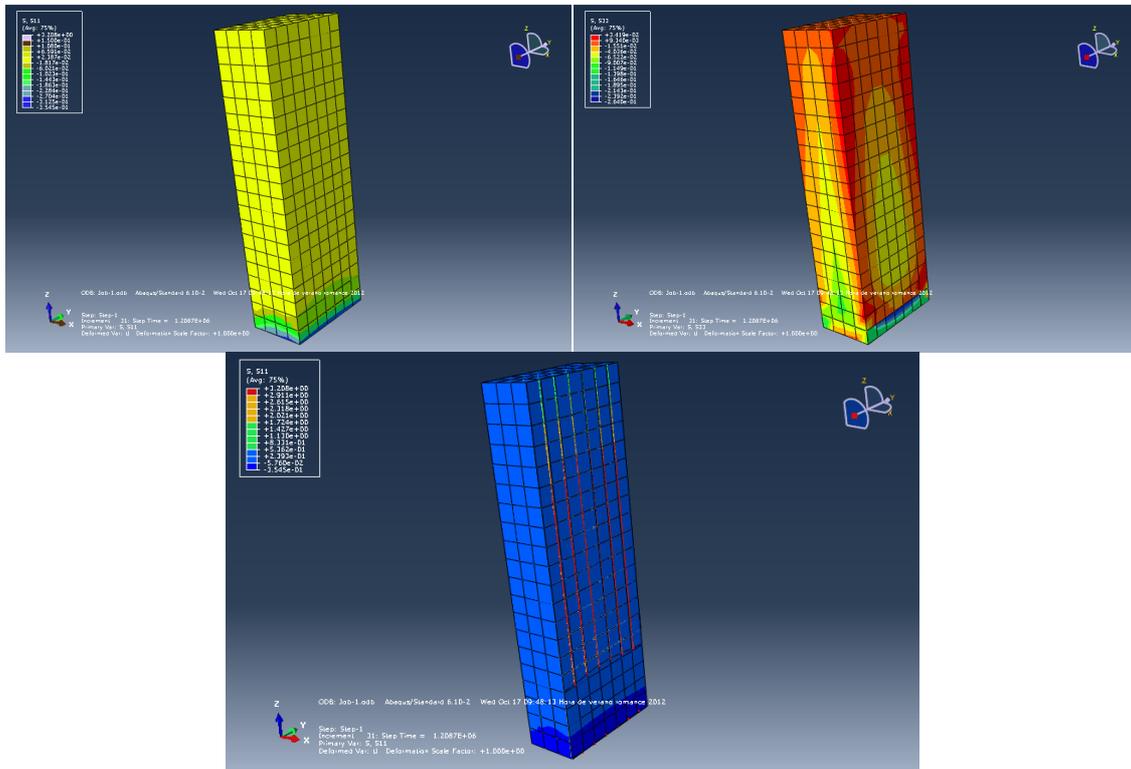
La máxima tensión en la armadura es de 30 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edades previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 14 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



*Figura 5.32.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 14 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo zonas del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 3.2 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

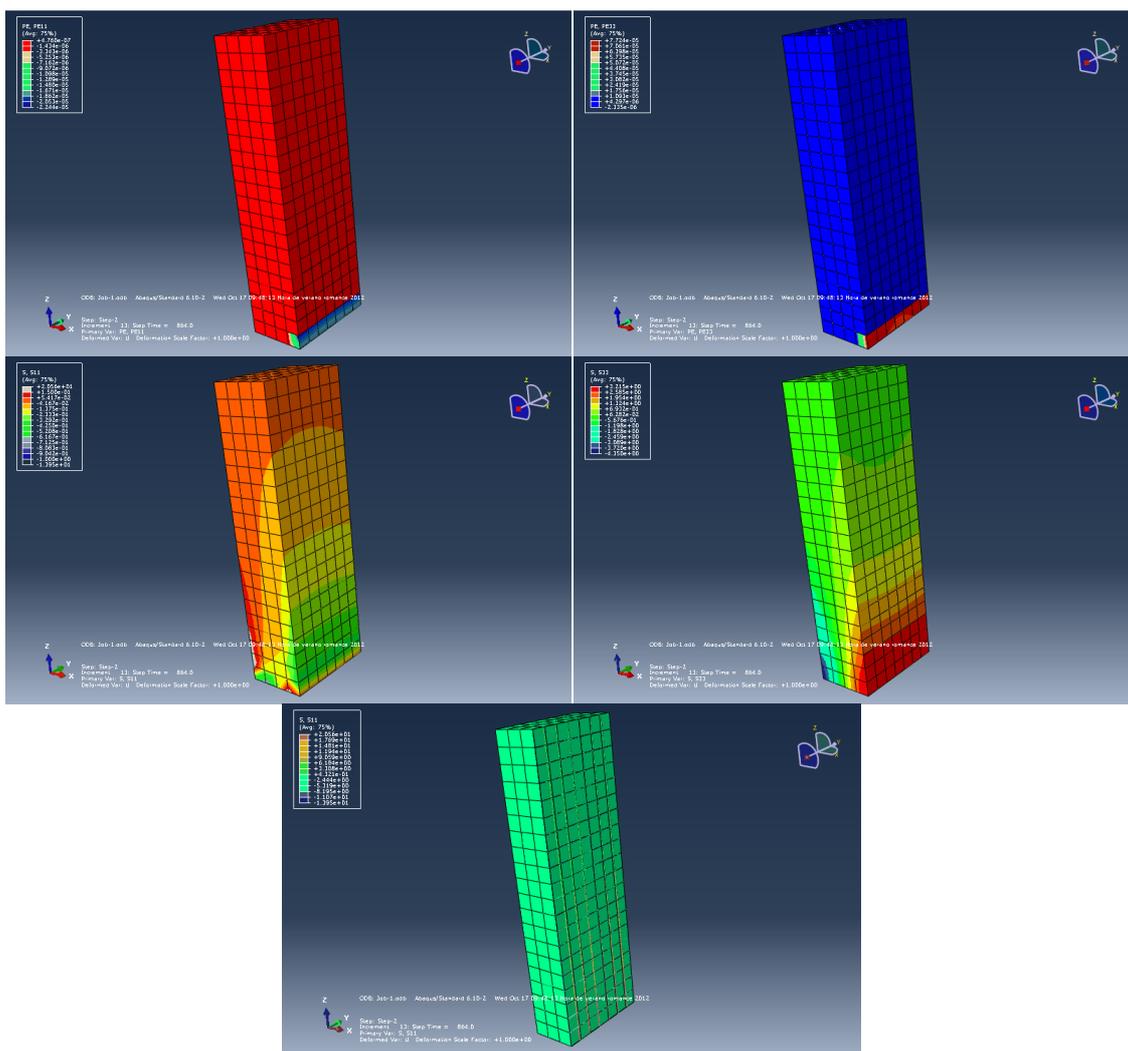


Figura 5.33.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 14 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

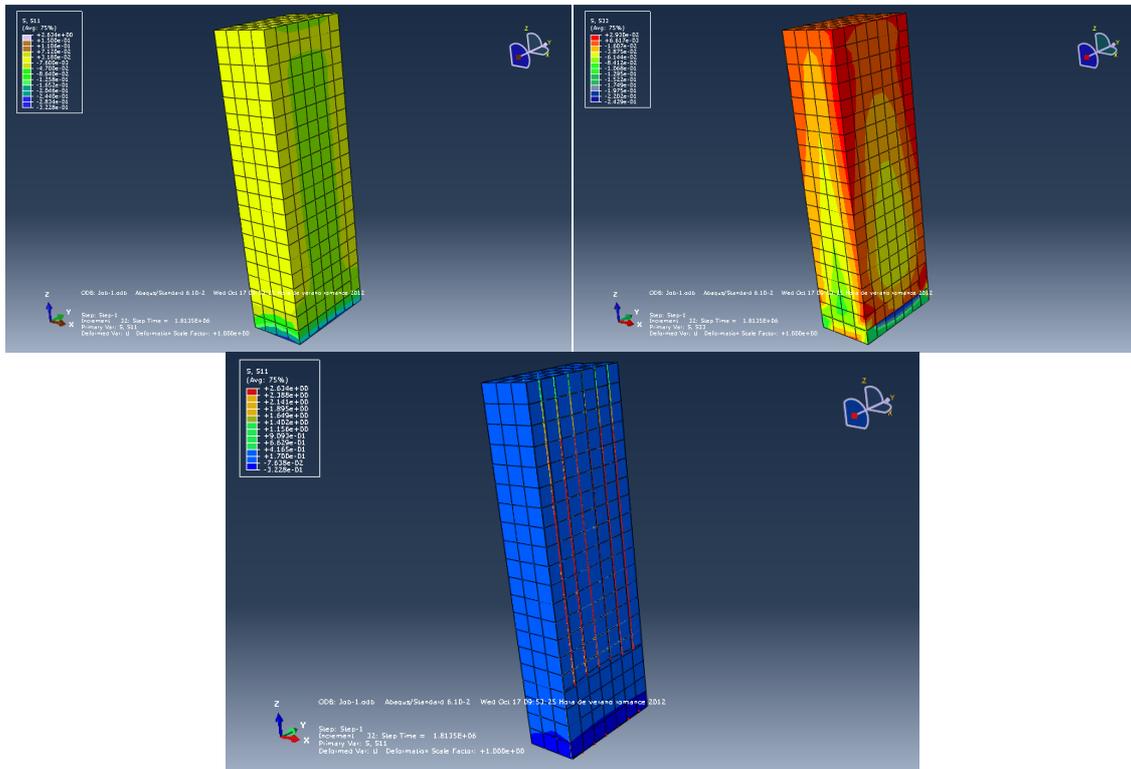
La máxima tensión en la armadura es de 20 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edad previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 21 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga



*Figura 5.34.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 21 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno*

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo zonas del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 2.6 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

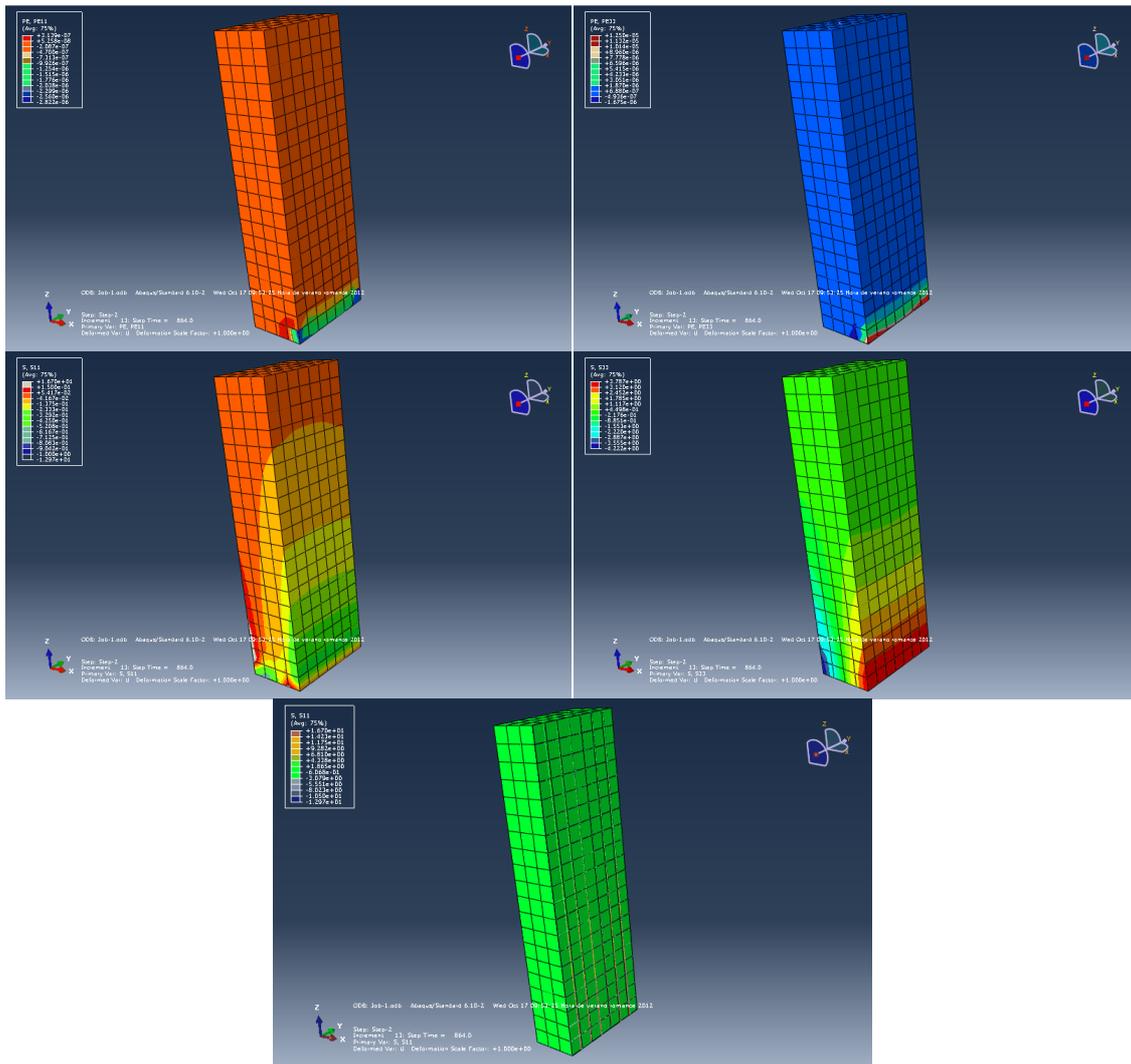


Figura 5.35.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 21 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

La máxima tensión en la armadura es de 16 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

De la misma forma que para las edades previas, las deformaciones plásticas se dan en la zona donde las tracciones son mayores, la cual está en la parte inferior de la cara del muro donde se aplica la carga del terreno. Es ahí donde se va a producir, por tanto, la fisuración del hormigón.

Asimismo, como se dijo anteriormente, las deformaciones plásticas son menores que para el caso anterior, donde la carga del terreno se aplicaba a una edad más joven del hormigón.

## Aplicación de la carga del terreno a los 28 días de curado

### Instantes previos a la aplicación de la carga

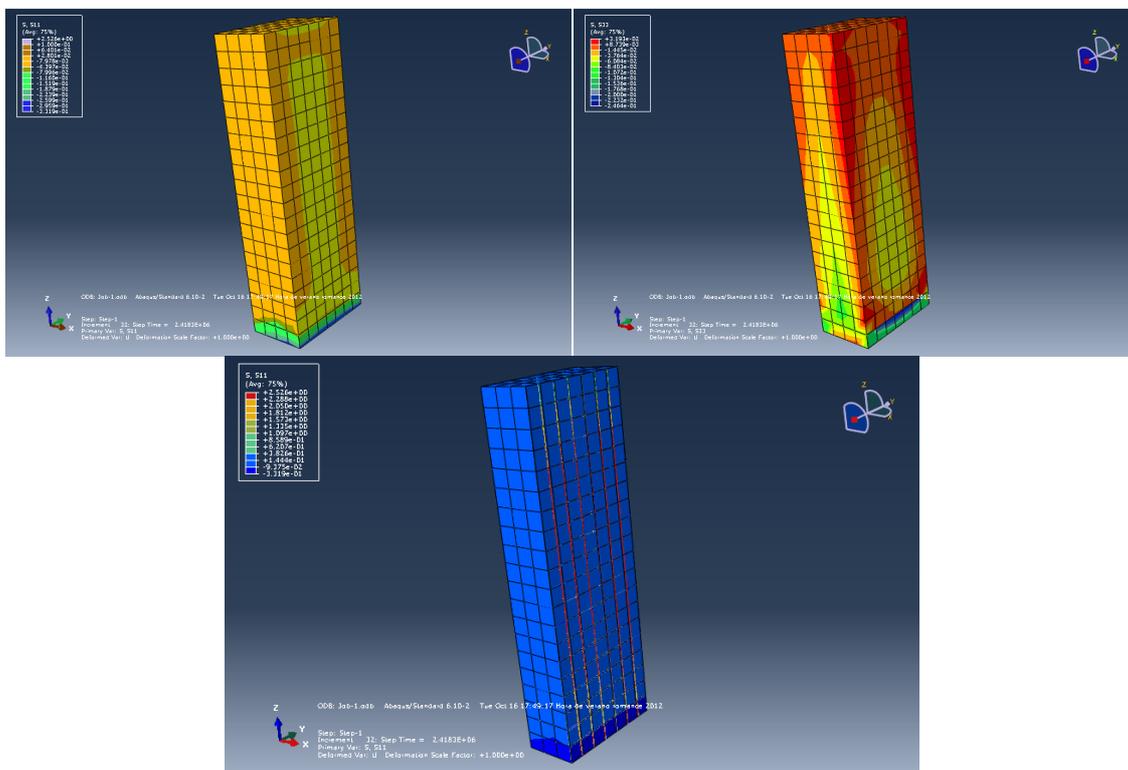


Figura 5.36.- Tensiones en el hormigón (arriba) y en la armadura (abajo) a los 28 días de edad instantes antes a la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo zonas del muro donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, a medida que aumenta la edad del hormigón y debido a que el flujo de calor debido al calor de hidratación del hormigón va disminuyendo, la zona traccionada de las tensiones S33 va reduciéndose, dándose igualmente las mayores compresiones en la zona inferior del muro donde el empotramiento impide el movimiento del muro.

La máxima tensión en la armadura es de 2.5 Mpa de tracción, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

## Instantes posteriores a la aplicación de la carga

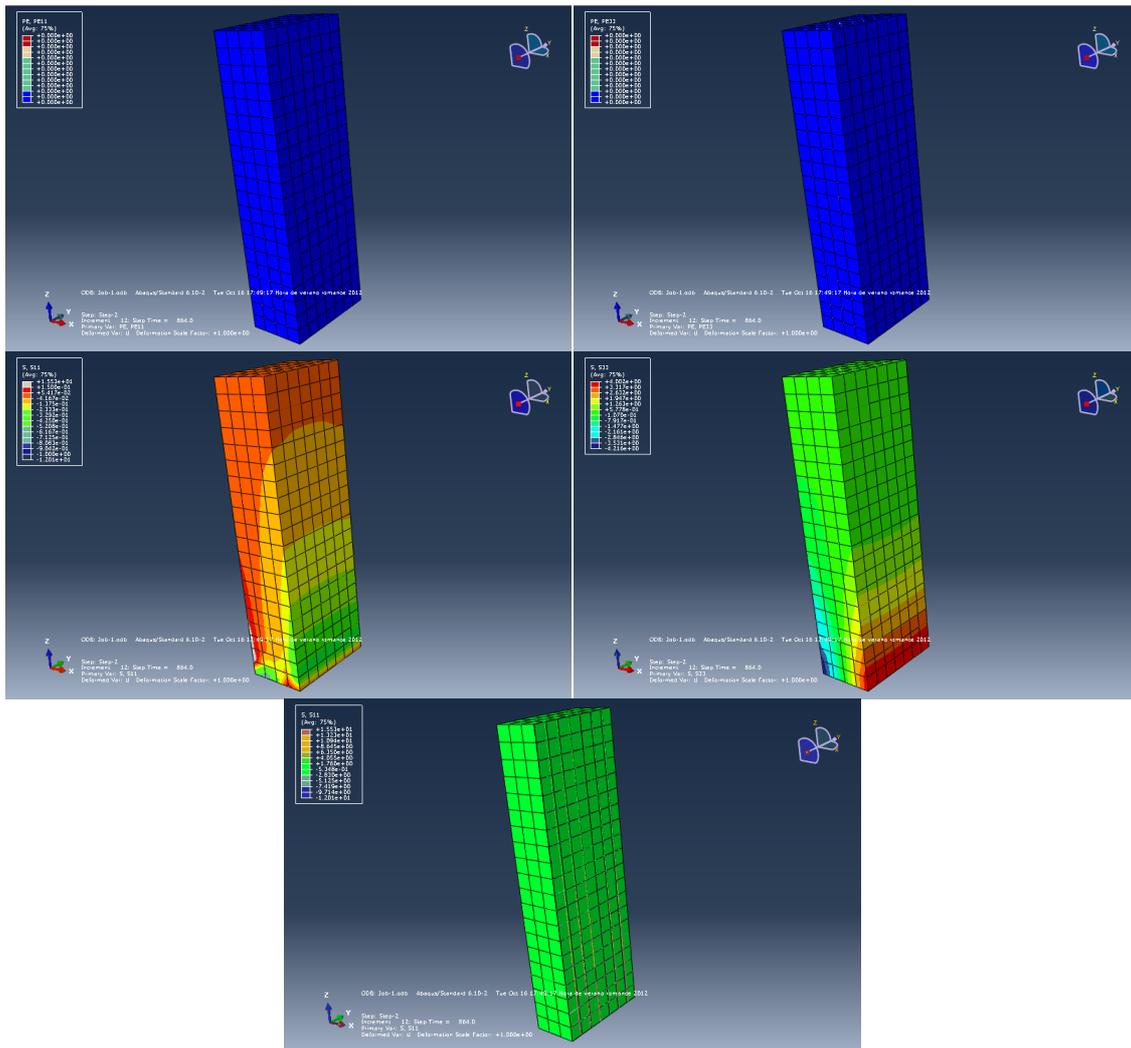


Figura 5.37.- Deformaciones plásticas (arriba) y tensiones en el hormigón (centro) y en la armadura (abajo) a los 28 días de edad tras la aplicación de la carga del terreno

Con respecto a las tensiones S11, se puede observar como son principalmente de compresión, salvo alguna pequeña zona donde la tracción que tenemos es insignificante.

Por otro lado, las tensiones S33 son de tracción en la cara donde se aplica la carga y de compresión en la cara opuesta como esperábamos.

La máxima tensión en la armadura es de 15 Mpa de tracción en la zona inferior del muro, la cual, tal y como se esperaba, es menor que para el caso anterior.

Para esta última edad de 28 días de curado del hormigón, como podemos observar las deformaciones plásticas han pasado a tener un valor nulo en todo nuestro modelo. Esto quiere decir que al aplicar la carga a los 28 días no se producen fisuras en el muro de hormigón.

A continuación se va a proceder a la descripción de los criterios de fallo que se van a establecer para comprobar la aptitud de la estructura frente al servicio, es decir, los estados límite de servicio.

Para compresión, el muro será apto frente al servicio si la tensión máxima de compresión multiplicada por un coeficiente de mayoración de cargas de 1.5 es menor que la resistencia del hormigón a esa edad dividida por un coeficiente de minoración de la resistencia del mismo de valor 1.35:

$$1.5 * \text{Tensión máxima de compresión} < \text{Resistencia compresión}/1.35$$

Este criterio se cumple de manera holgada para la aplicación de la carga a cualquier edad, ya que el valor que se obtiene de la tensión máxima de compresión mayorada es bastante menor que la resistencia a compresión minorada. Esto es debido a que el hormigón se comporta mucho mejor a compresión que a tracción y la armadura se ha dispuesto de la misma forma para las zonas traccionadas que para las comprimidas, por lo que la aptitud o no al servicio de la estructura va a estar condicionada al criterio de fallo para la tracción, el cual se explica en el siguiente párrafo.

Para la tracción se va a seguir el estado límite de fisuración por tracción (abertura de la grieta) propuesto por la EHE 08:

$$W_k \leq W_{k,max}$$

Donde  $W_{max}$  tiene un valor de 0.3 mm. para la clase de exposición a la que está sometido el muro.

La abertura característica de fisura  $W_k$  se calcula siguiendo la metodología expuesta en la EHE y tomando los datos y resultados obtenidos para nuestro muro, obteniendo los siguientes resultados para las cargas aplicadas a las distintas edades:

- Carga aplicada a las 24 horas:  $W_k=0.41 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a las 48 horas:  $W_k=0.40 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a los 3 días:  $W_k=0.39 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a los 4 días:  $W_k=0.38 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a los 5 días:  $W_k=0.37 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a los 6 días:  $W_k=0.34 \text{ mm.} \not\leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- **Carga aplicada a los 7 días:  $W_k=0.3 \text{ mm.} = W_{max}=0.3 \text{ mm.}$**
- Carga aplicada a los 14 días:  $W_k=0.27 \text{ mm.} \leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$
- Carga aplicada a los 21 días:  $W_k=0.2 \text{ mm.} \leq W_{max}=0.3 \text{ mm.}$

- Carga aplicada a los 28 días:  $W_k=0.15 \text{ mm.} \leq W_{\max}=0.3 \text{ mm.}$

Como se observa, antes de los 7 días la abertura característica de la fisura es menor que el valor máximo permitido de 0.3 mm., por lo que si quitamos los puntales antes de dicha edad no se va a cumplir el estado límite de servicio de la estructura. A partir de los 7 días, como se puede ver en los resultados mostrados, la abertura característica es inferior a la máxima permitida, por lo que se pueden retirar los puntales, siendo la estructura apta frente al servicio.

### **5.3. MODELO TERMO-MECÁNICO DE UN MURO DE CONTENCIÓN REAL.**

#### **5.3.1. Descripción del modelo**

A continuación se va a describir el modelado de un muro de contención de hormigón armado en ABAQUS. El objetivo principal de dicho modelo no es otro que realizar un análisis termo-mecánico de dicho muro a edades tempranas. Para ello se van a realizar varios modelos del muro en el que las propiedades del hormigón (tanto el módulo elástico como el comportamiento a tracción y compresión del mismo). Dichas propiedades son las que se obtuvieron en la campaña experimental del proyecto.

Además, para tener en cuenta las tensiones en el muro de origen térmico, se va a modelar el calor de hidratación que va a generar el cemento haciendo uso de los resultados que obtuvimos tanto en la campaña experimental como en el posterior modelado con Abaqus del cubo de hormigón.

El primer paso es crear la geometría y el tipo del modelo. Se va a considerar un 1 metro de longitud de muro con una sección como la que se observa en la siguiente figura:

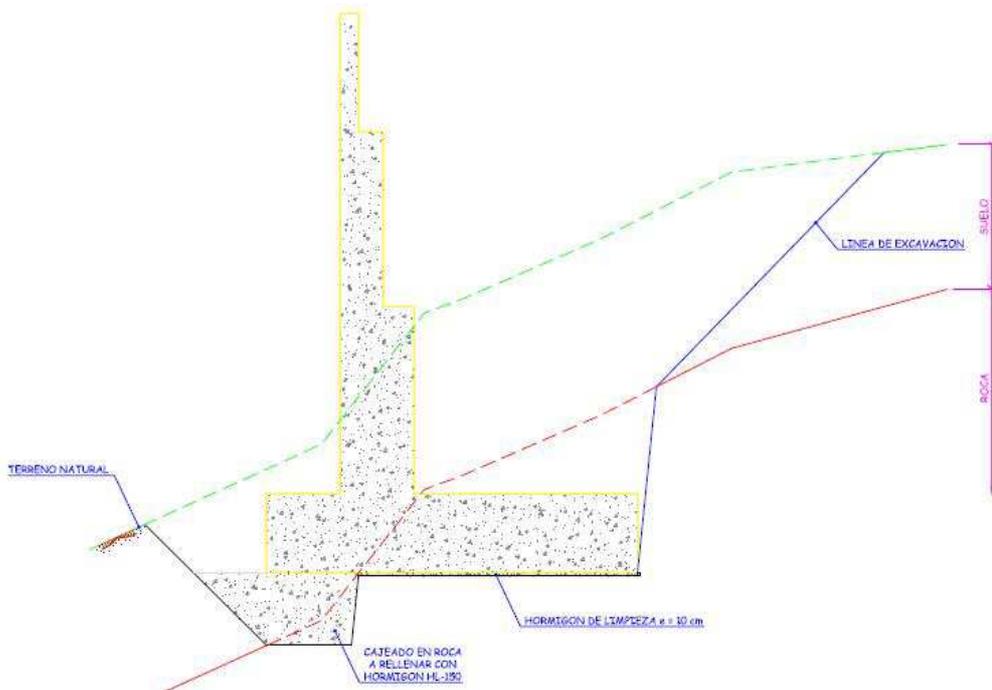


Figura 5.38.- Geometría del muro

Como se observa en la imagen, el muro presenta un canto variable, el cual va desde los sesenta centímetros en la cima hasta los dos metros y medio en la parte inferior del mismo, presentando un canto de un metro y cuarenta centímetros en la parte media del mismo.

La altura del muro sin contar la zapata es de diecisiete metros, presentando tres tramos de cuatro, seis y siete metros de arriba abajo.

Con respecto a la zapata inferior, comentar que tiene un canto de dos metros y setenta centímetros y un ancho de doce metros y medio.

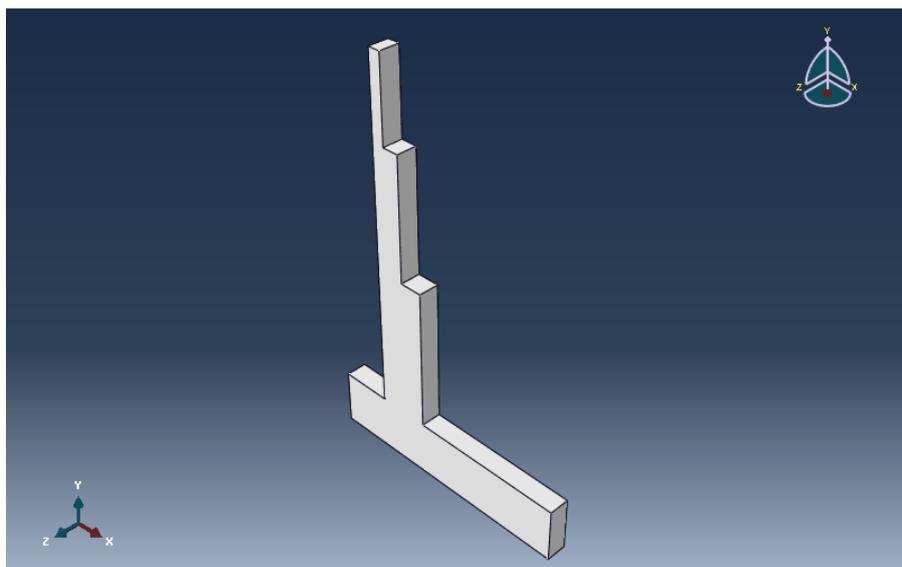


Figura 5.39.- Geometría del modelo

Para la armadura se van a hacer tres grandes grupos:

- Armadura en el plano XY
- Armadura en el plano XZ
- Armadura en el plano YZ

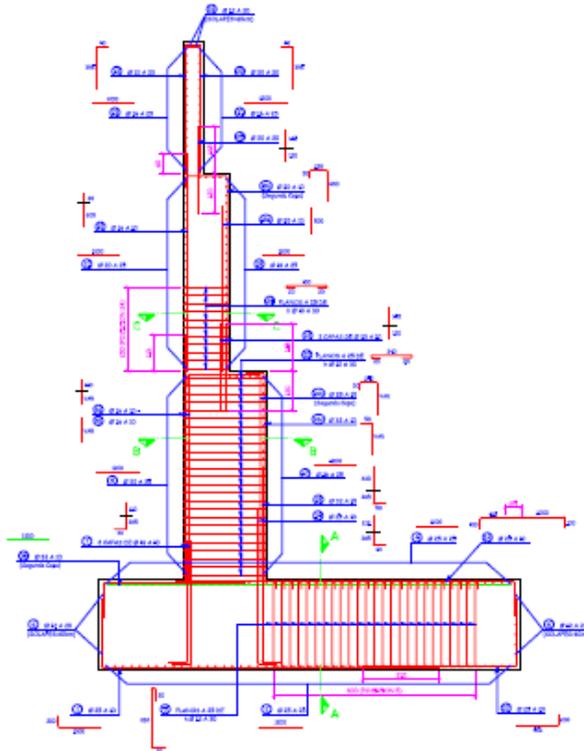


Figura 5.40.- Sección transversal armadura

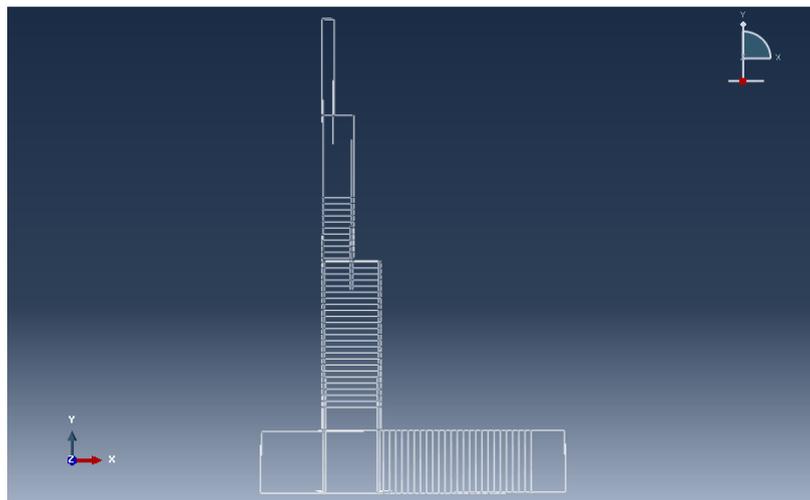
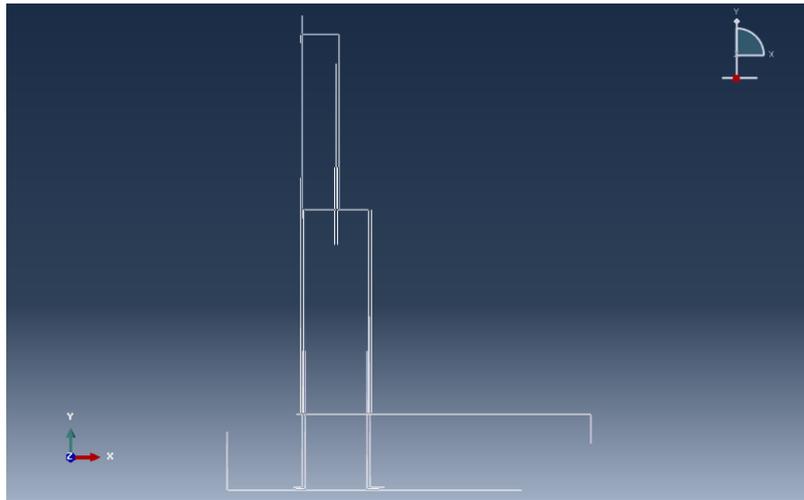
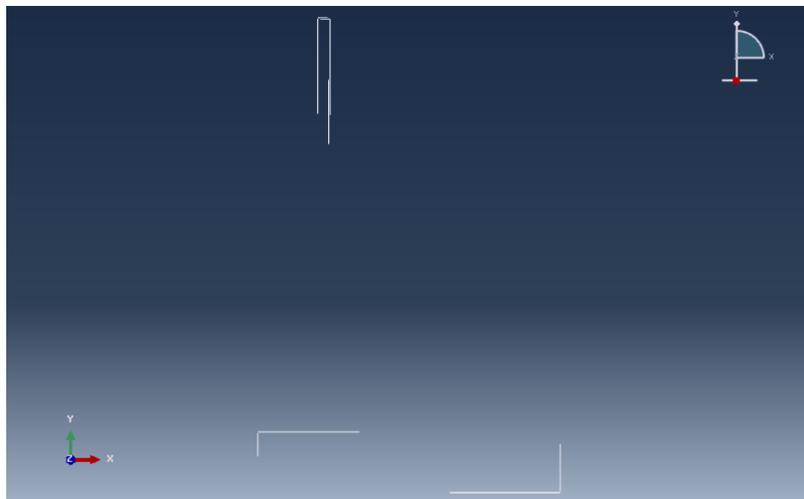


Figura 5.41.- Armadura en el plano XY del modelo

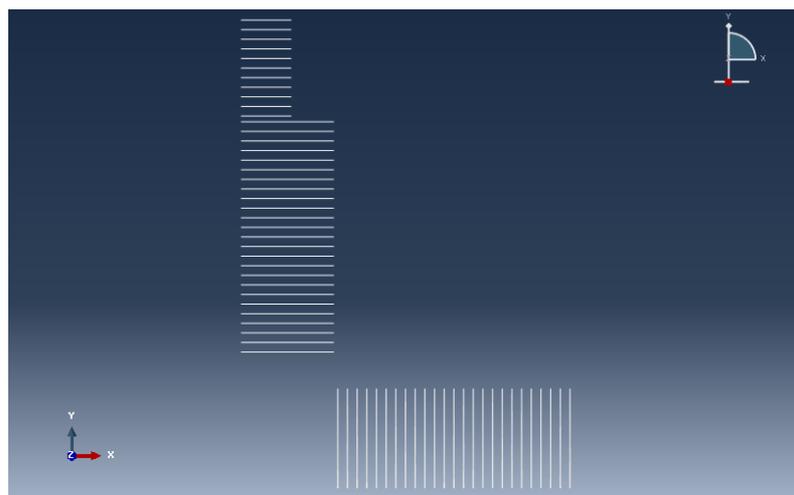
Dentro de la armadura en el plano XY se distingue la que se repite cada 10, 20 y 30 cm.



*Figura 5.42.- Armadura en el plano XY cada 10 cm.*

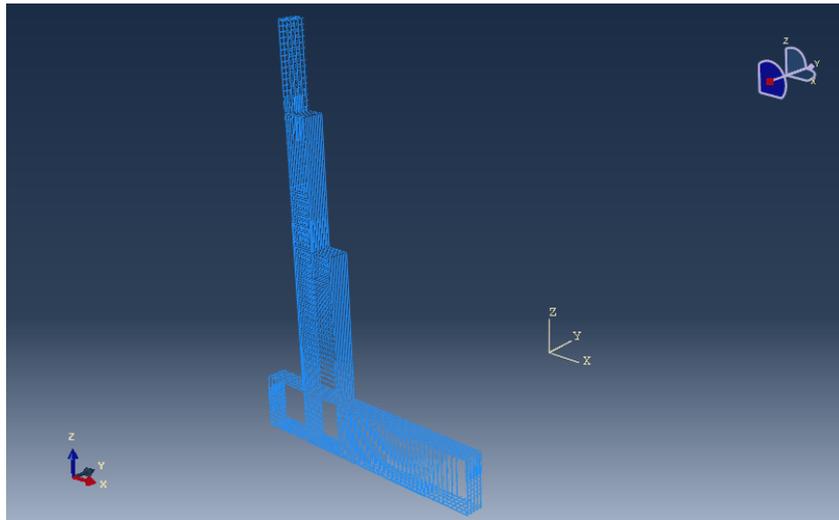


*Figura 5.43.- Armadura en el plano XY cada 20 cm*

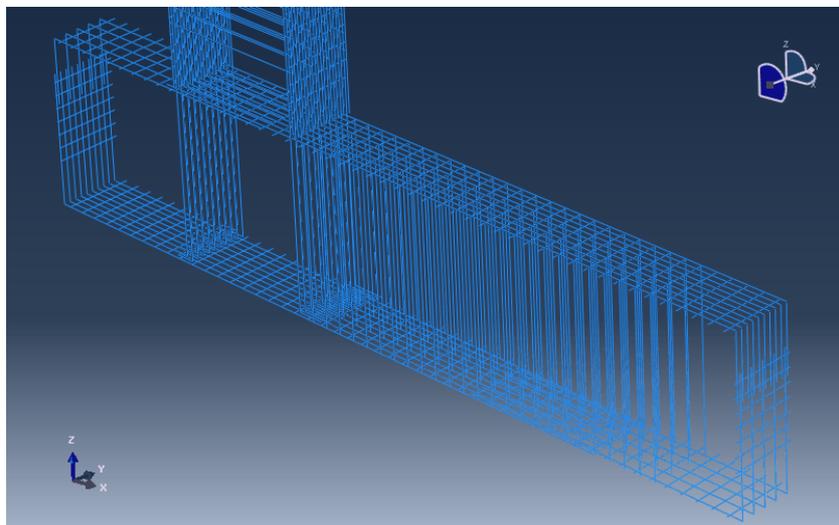


*Figura 5.44.- Armadura en el plano XY cada 30 cm*

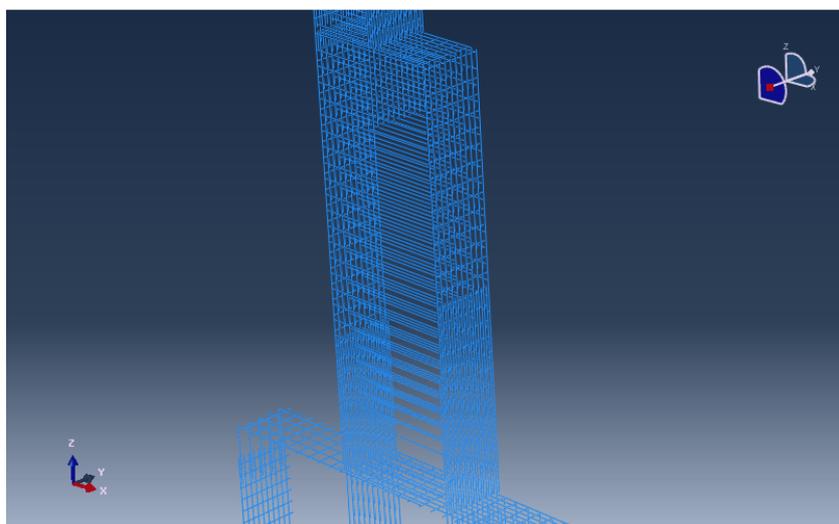
A su vez, para la armadura en los planos XZ e YZ se hace distinción de cuatro tipos de armadura dentro del mismo grupo.



*Figura 5.45.- Armadura del muro completo, incluyendo cimentación*



*Figura 5.46.- Vista de la armadura de la zapata*



*Figura 5.47.- Vista de la armadura en la zona inferior del alzado del muro*

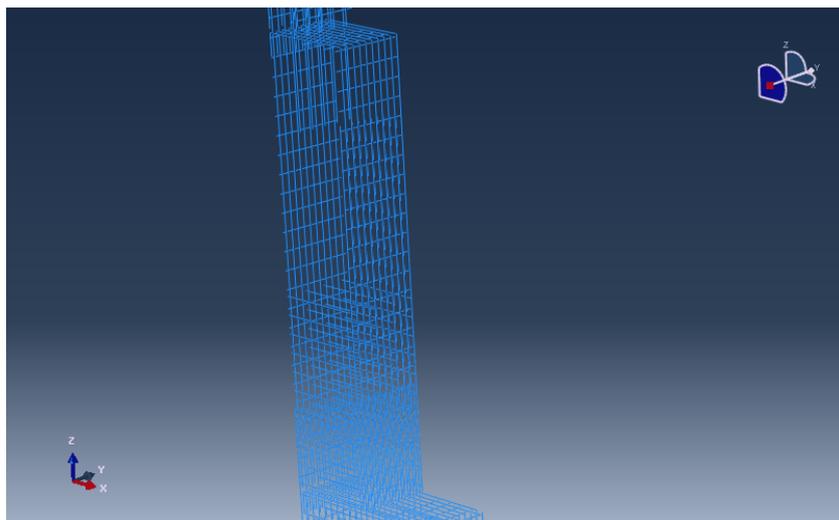


Figura 5.48.- Vista de la armadura en la zona media del alzado del muro

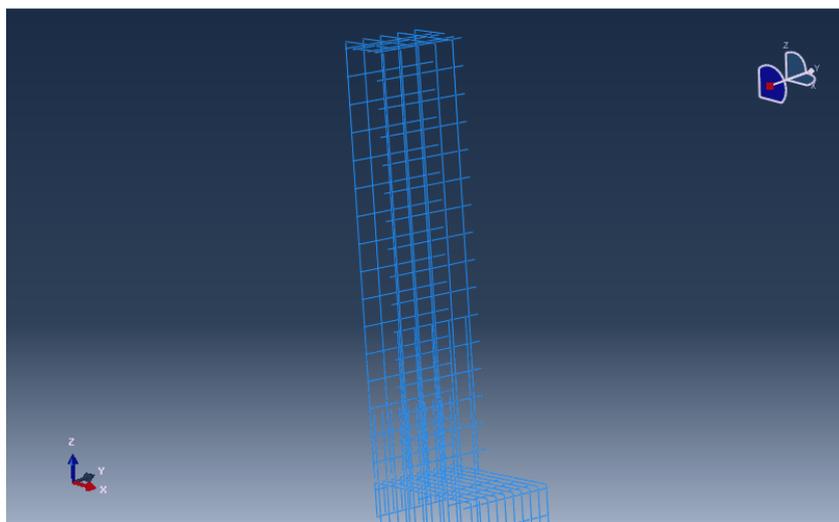


Figura 5.49.- Vista de la armadura en la zona superior del alzado del muro

El siguiente paso es la introducción de los materiales, los cuales van a ser hormigón para el muro y acero para la armadura. Las propiedades que vamos a introducir para el hormigón son las que se obtuvieron en la fase experimental del proyecto.

Para el acero de la armadura se van a crear un total de seis secciones, las cuales corresponden a un diámetro de barra de 10, 12, 16, 20, 25 y 32 mm. La sección de cada una de las barras se muestra en la siguiente tabla.

Diámetro	Sección (cm <sup>2</sup> )
Φ 10	0.785
Φ 12	1.13
Φ 16	2.01
Φ 20	3.14
Φ 25	4.91
Φ 32	8.04

Tabla 5.22.- Valores de la sección de las barras

El siguiente paso será el mallado del muro para el que se ha usado el elemento C3D8T de la familia “Coupled Temperature-Displacement”, la cual es la idónea para el análisis termo-mecánico que vamos a realizar.

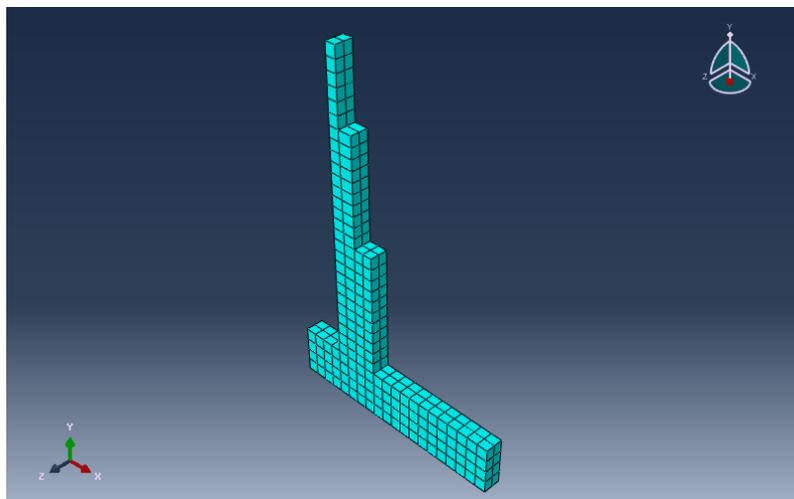


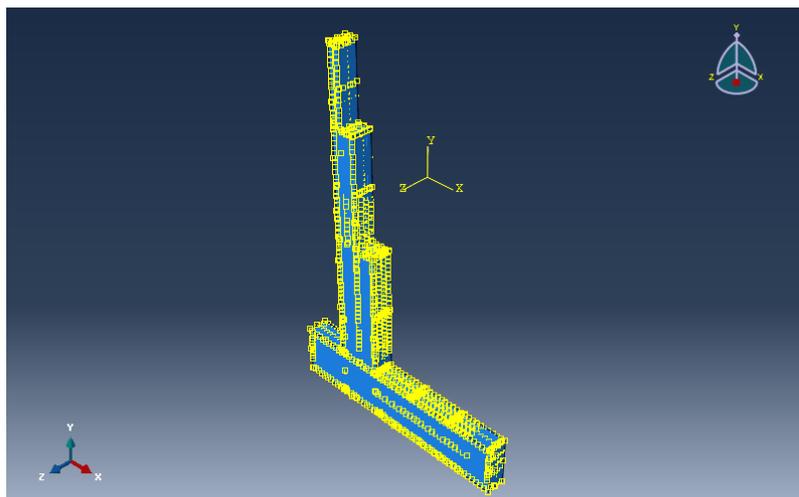
Figura 5.50.- Mallado muro

Para la armadura se emplean elementos T3D2 de la familia Truss.

A continuación se van a definir los steps a lo largo de los cuales se va a desarrollar el análisis del modelo, pero antes se va a pasar a comentar Con respecto al protocolo de hormigonado que se va a seguir, en primer lugar se procede al armado y hormigonado de la cimentación. Posteriormente, transcurridos tres días desde el hormigonado de la zapata, se procede a realizar el armado, encofrado y hormigonado de los alzados de forma también escalonada, con intervalos de tiempo de tres días entre alzado y alzado.

Debido a lo comentado anteriormente existe un desfase del tiempo de fraguado del hormigón de la cimentación y de los distintos alzados, razón por la cual se va a dividir el análisis en cinco steps. Los tres primeros steps corresponden al tiempo entre cero y nueve días, con intervalos de tres días y tres días. A partir del noveno día ya está hormigonado el tercer y último tramo del muro (el más alto). El cuarto step se corresponde con el intervalo de tiempo entre nueve y once días, momento en el cual se vierte el terreno (por lo que comienza a actuar la carga del terreno sobre el muro) y a partir del cual comienza el quinto step, el cual dura hasta el final del análisis (28 días).

Como condición inicial, todo el muro de hormigón armado se encuentra inicialmente a 23°C.



*Figura 5.51.- Muro con condición inicial de temperatura aplicada*

Queda por definir el intercambio de calor que se produce por convección entre las caras externas del muro y el entorno.

Las respecto a las caras inferior y laterales de la zapata van a estar durante todo el análisis en contacto con el terreno, por lo que van a tener siempre la misma interfase. La cara superior de la zapata va a tener en principio una interfase hormigón-aire hasta el momento en que el terreno descansa sobre ella.

En los distintos tramos del muro van a ir igualmente variando las condiciones de contorno en los bordes, ya que en principio las caras laterales van a estar en contacto con el encofrado, pero en el momento que se quite dicho encofrado las condiciones de contorno van a variar.

El siguiente paso es la definición de las cargas, pero antes se va a girar el modelo completo 90° alrededor del eje X de forma que la sección del muro quede en el plano XZ. Este giro se hace simplemente para facilitar la definición de la carga que el terreno ejerce sobre el muro. Además de la carga del peso propio y del flujo de calor asociado a la hidratación del hormigón hay que introducir la carga que el terreno produce sobre el muro.

El vertido de las tierras se produce en el día número 11, por lo que a partir de ese instante se van a introducir una serie de cargas sobre el muro, las cuales se van a pasar a explicar a continuación.

Por un lado el terreno, el cual tiene un peso específico de  $2 \text{ tn/m}^3$ , ejerce una presión uniforme sobre las caras superiores de cada tramo del muro y está provocada por el peso de las mismas. Dichas cargas se calculan multiplicando el peso específico del terreno por el volumen de terreno que hay sobre cada una de dichas caras.

Por otro lado, dichas tierras provocan un empuje sobre las caras verticales que están en contacto con el mismo y, a su vez, existe una sobrecarga adicional de los elementos que pasan o permanecen sobre dicho terreno. La distribución del empuje y de la sobrecarga que el terreno provoca sobre el muro tienen la siguiente distribución:

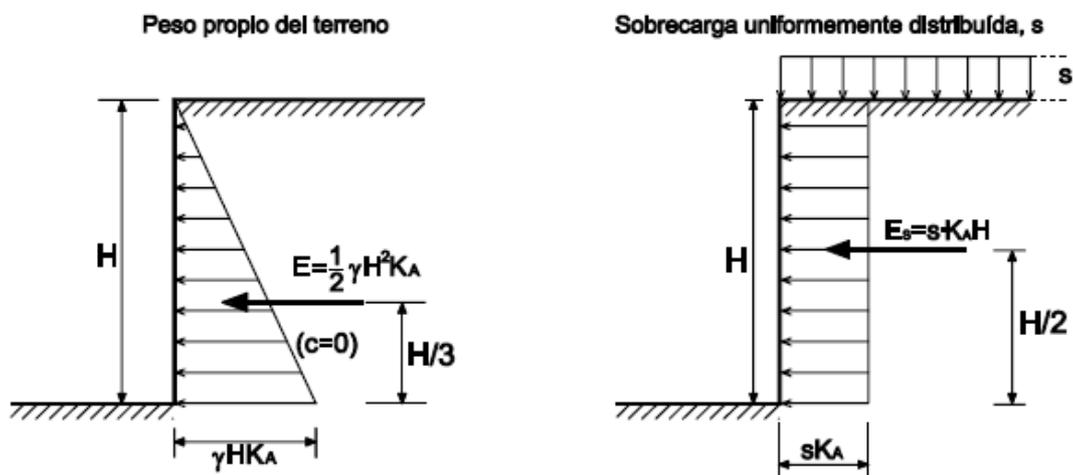


Figura 5.52.- Distribuciones del empuje y sobrecarga del terreno sobre el muro

Ambos tipos de carga van a ser presiones sobre la superficie del muro, teniendo en cuenta que se ha obtenido un valor del empuje del terreno de 129,234 toneladas (en un metro de longitud del terreno) y un valor de la sobrecarga de 24,076 toneladas (en un metro de longitud de terreno).

Las condiciones de contorno que se van a introducir en el modelo son desplazamiento en el eje vertical impedido para la base de la zapata, desplazamiento perpendicular a las caras que nos muestran la sección del muro y zapatas impedido en ambas caras y desplazamiento perpendicular a las otras dos caras laterales de la zapata también impedido.

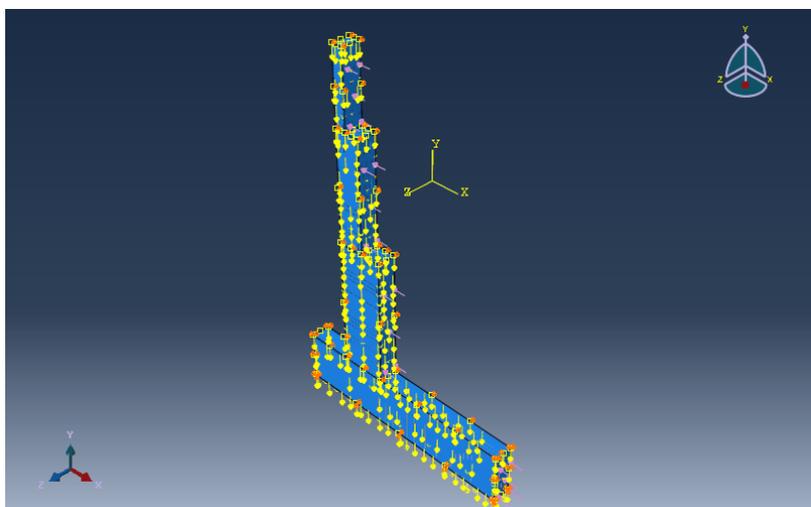
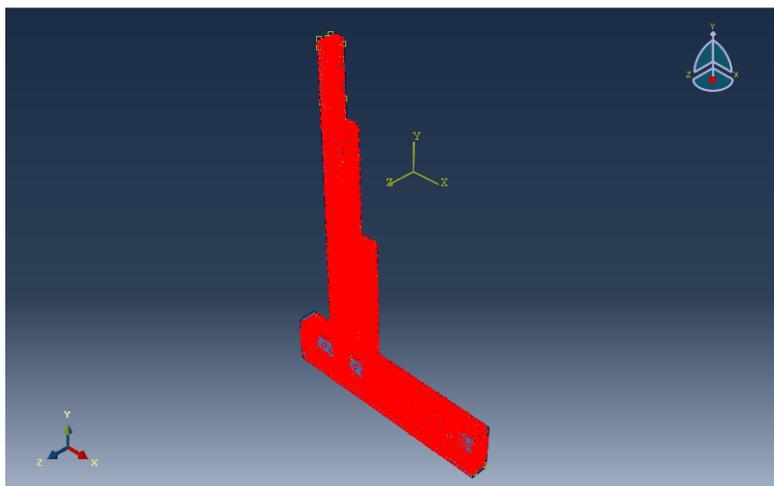


Figura 5.53.- Modelo con cargas y condiciones de contorno introducidas

Por último se va a proceder a la unión entre la armadura y el muro. Para ello se va a emplear la técnica “Embedded elements” que proporciona ABAQUS, la cual es idónea para lo que buscamos, que es armar el muro de hormigón. Ésta técnica consiste en que, al definir host elements (muro) y embedded elements (armadura), si un nodo del embedded element se encuentra dentro del host element, los grados de libertad traslacionales del nodo se eliminan y el nodo pasa a ser embedded node. Los grados de libertad del embedded node están limitados a los valores interpolados de los correspondientes grados de libertad del host element. Los embedded elements tienen permitidos los grados de libertad rotacionales, los cuales no están impedidos.



*Figura 5.54.- Modelo con la unión entre muro y armadura realizada*

### **5.3.2. Resultados**

Se va a pasar al estudio de los resultados obtenidos en el modelo termo-mecánico del muro de hormigón armado que se ha definido.

Se va a analizar tanto el estado tensional como la evolución de la temperatura en el muro de contención a lo largo del proceso constructivo hasta llegar a los 28 días desde el vertido del hormigón de la cimentación. Asimismo se van a examinar las tensiones en la armadura en los instantes que se han comentado en el párrafo anterior.

Como ya se ha comentado en la definición del modelo, en un principio sólo se hormigona la zapata. Una vez que se vierte el hormigón comienza a actuar el calor de hidratación que se produce al reaccionar el agua y el cemento del hormigón. A los tres días de curado el estado tensional en el hormigón y la armadura de la zapata es el siguiente.

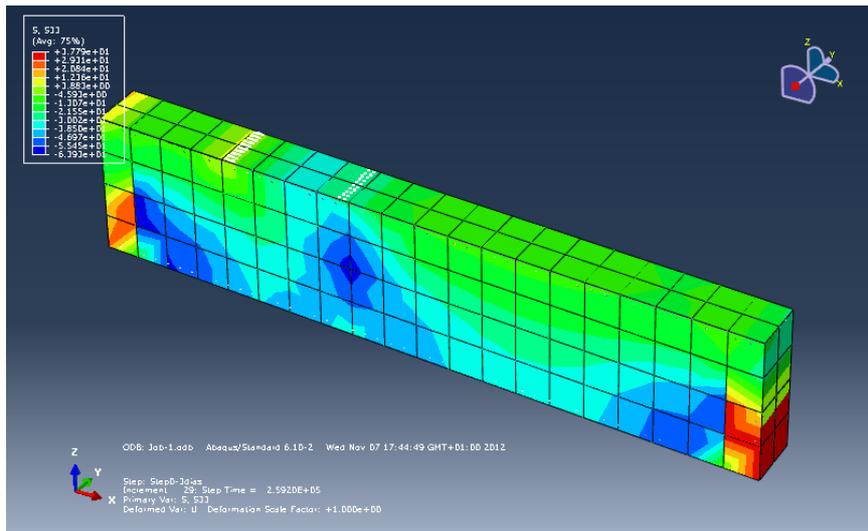


Figura 5.55.- Tensiones en el eje Z en la zapata (3 días)

El hormigón, debido a la acción del calor de hidratación, tiende a expandirse, pero las condiciones de contorno a las que está sometido le impiden dicha expansión. Por esta razón se observa que las caras externas de la zapata se encuentran principalmente comprimidas.

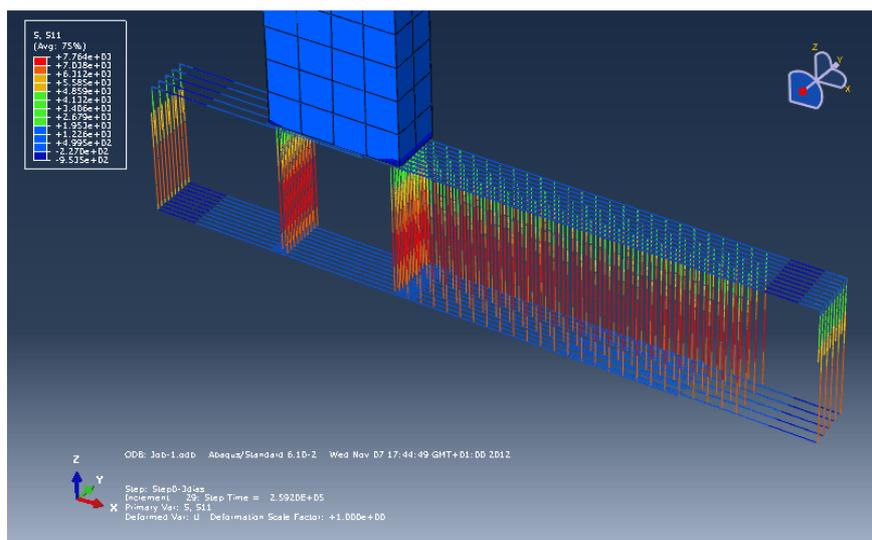


Figura 5.56.- Tensiones en el eje X en la armadura de la zapata (3 días)

En la imagen anterior se puede observar cómo al intento de expansión del hormigón por la acción del calor de hidratación genera tracciones en la armadura que se encuentra en el interior de la zapata, siendo máximas en el plano medio de la misma.

A continuación se va a mostrar la temperatura a la que se encuentra la zapata a los tres días de curado.

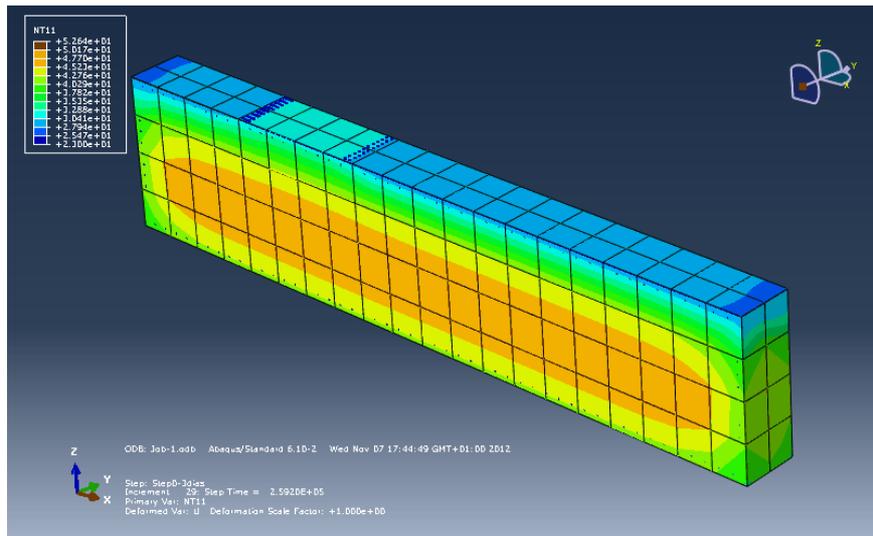


Figura 5.57.- Temperatura en las caras externas de la zapata (3 días)

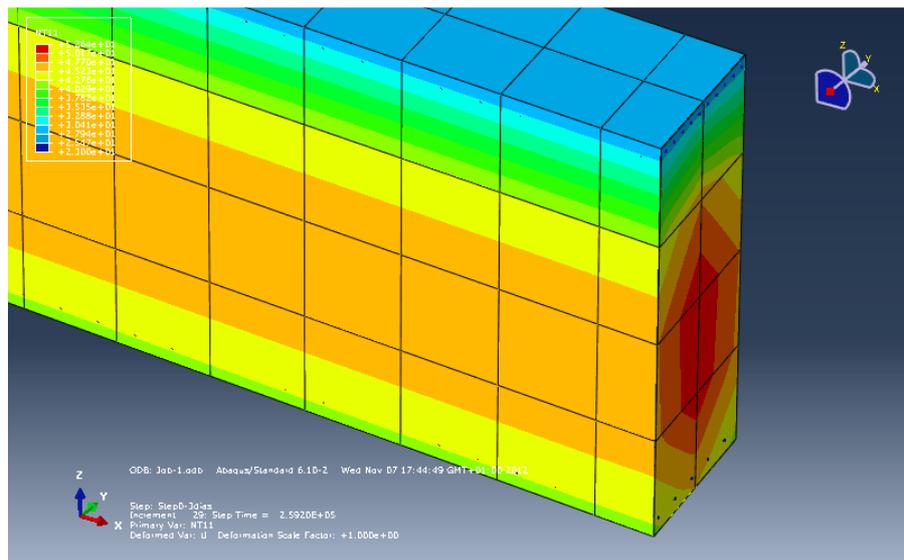
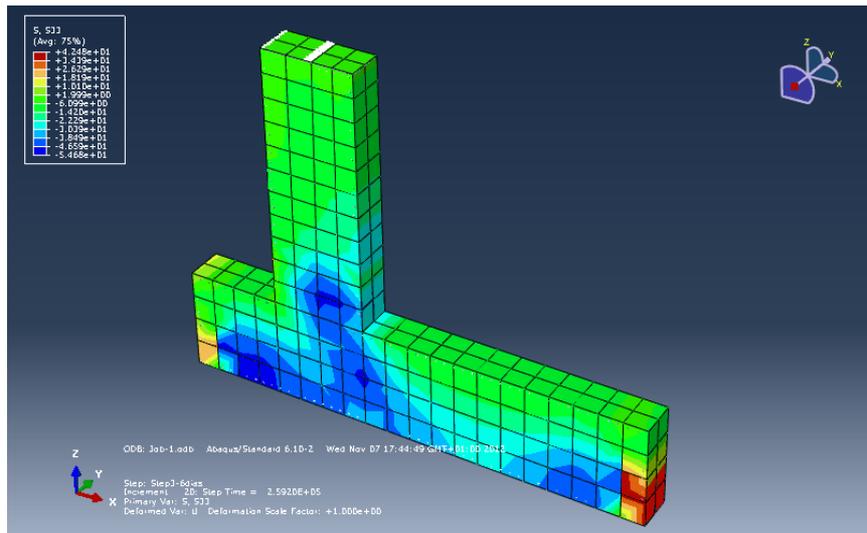


Figura 5.58.- Corte para apreciar la temperatura en el interior de la zapata (3 días)

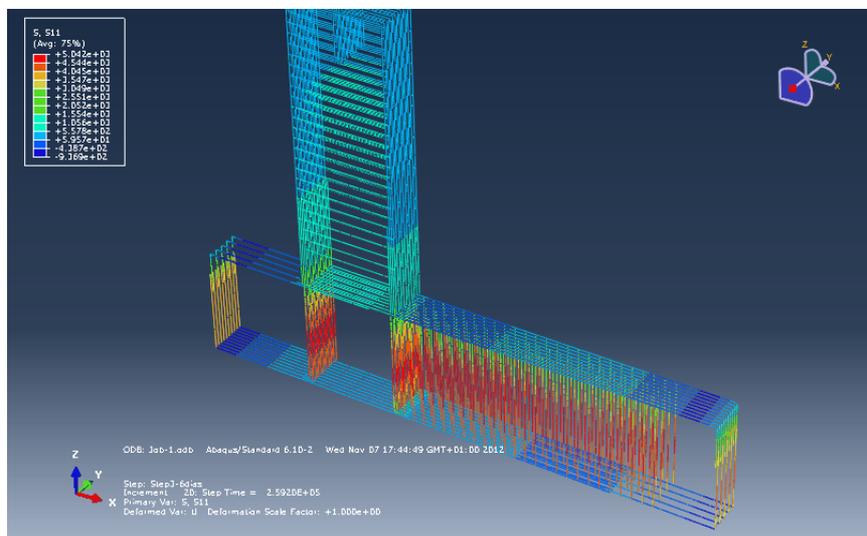
Se observa cómo el máximo de la temperatura se alcanza en la zona central del interior de la zapata y alcanza un valor de 52°C.

Llegados al tercer día desde que se hormigonó la cimentación se procede al hormigonado de la zona inferior del muro, es decir, los primeros siete metros de alzado.

A continuación se va a mostrar el estado tensional del muro y la armadura a los seis días del análisis.

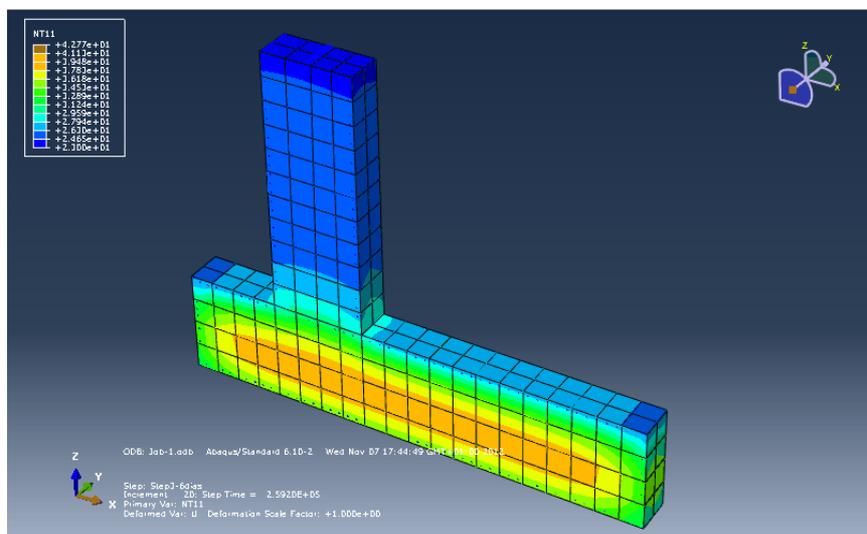


*Figura 5.59.- Tensiones en el eje Z (6 días)*



*Figura 5.60.- Tensiones en la armadura en el eje X (6 días)*

La temperatura de las caras externas del muro y la zapata a los seis días del análisis es la siguiente.



*Figura 5.61.- Temperatura en las caras externas del muro (6 días)*

A los seis días se procede al vertido del hormigón en de la zona media del alzado del muro, estos son los seis metros siguientes de muro.

A continuación se muestran las tensiones en el hormigón y en la armadura para los nueve días de análisis. Asimismo se muestra la temperatura de las caras externas del muro para dicho instante.

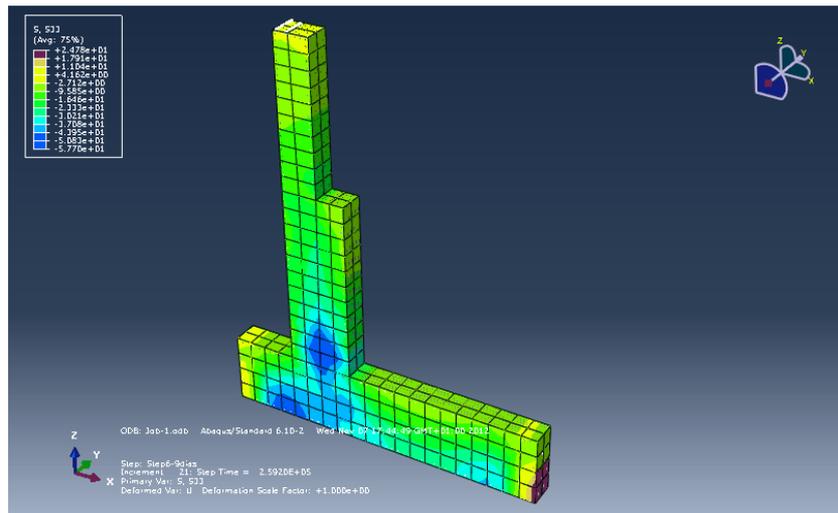


Figura 5.62.- Tensiones en el eje Z (9 días)

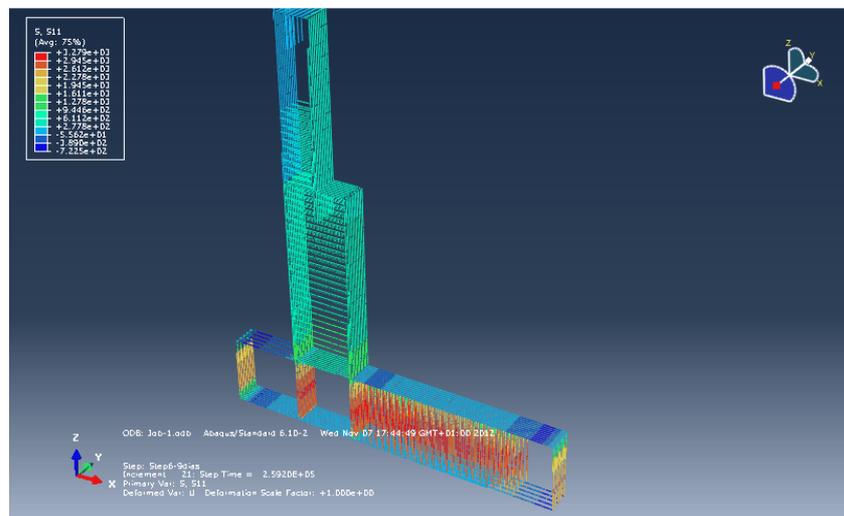


Figura 5.63.- Tensiones en la armadura en el eje X (9 días)

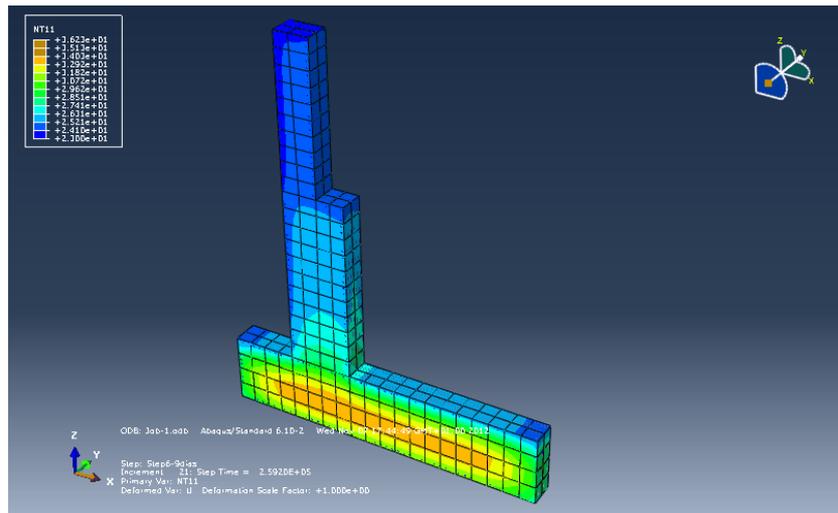


Figura 5.64.- Temperatura en las caras externas del muro (9 días)

Por último, a los seis días se procede al vertido del hormigón en de la zona más alta del muro, estos son los últimos cuatro metros de muro.

A continuación se muestran las tensiones en el hormigón y en la armadura para los instantes previos a los once días de análisis, es decir, a los dos días desde el vertido del hormigón en esta última zona. A los once días es el momento a partir del cual se va a verter el terreno y, por tanto, va a empezar a actuar la carga del terreno sobre el muro. Asimismo se va a mostrar la temperatura de las caras externas del muro para dicho instante.

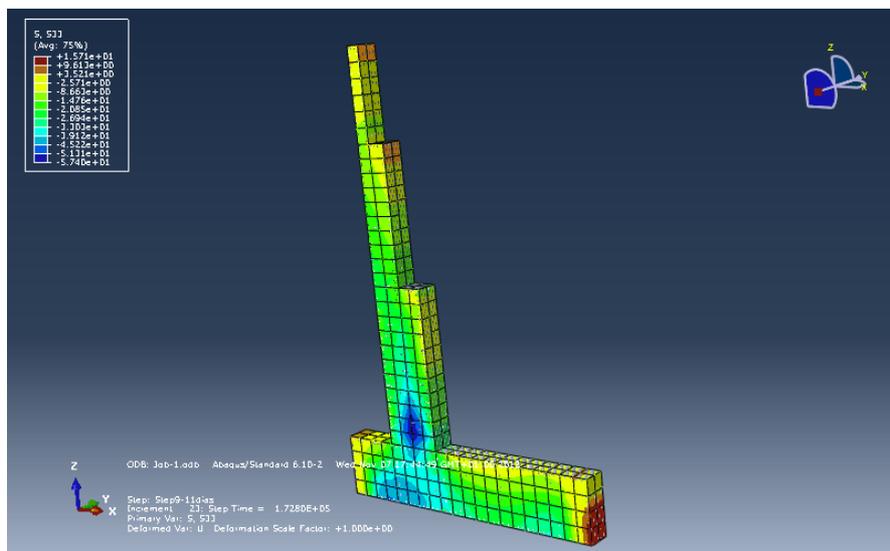


Figura 5.65.- Tensiones en el eje Z (11 días)

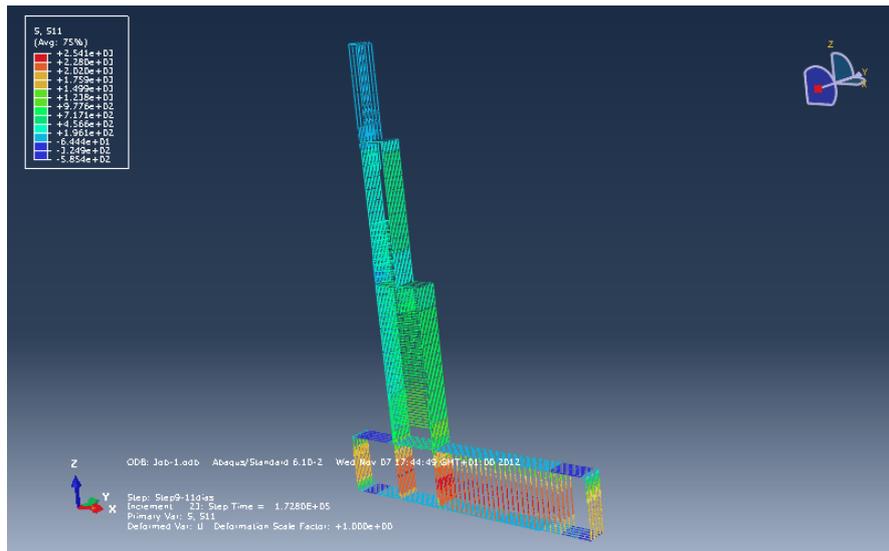


Figura 5.66.- Tensiones en la armadura en el eje X (11 días)

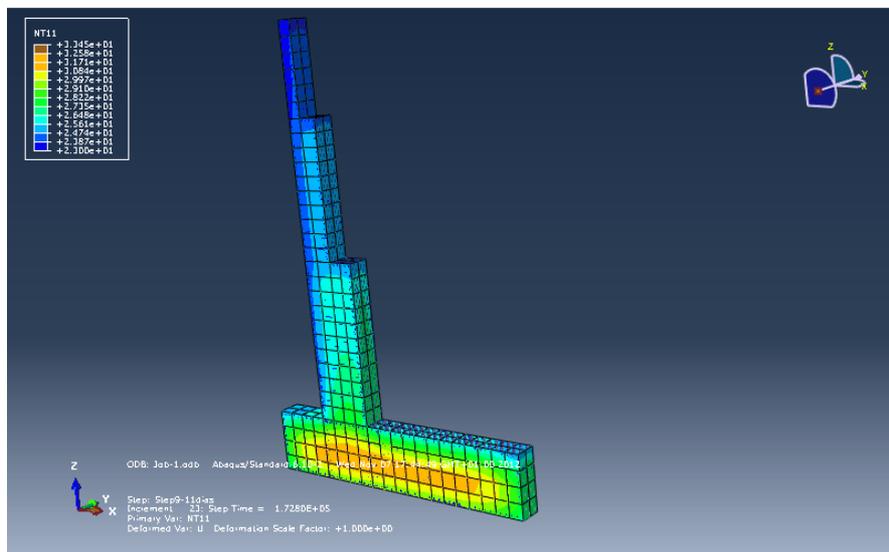
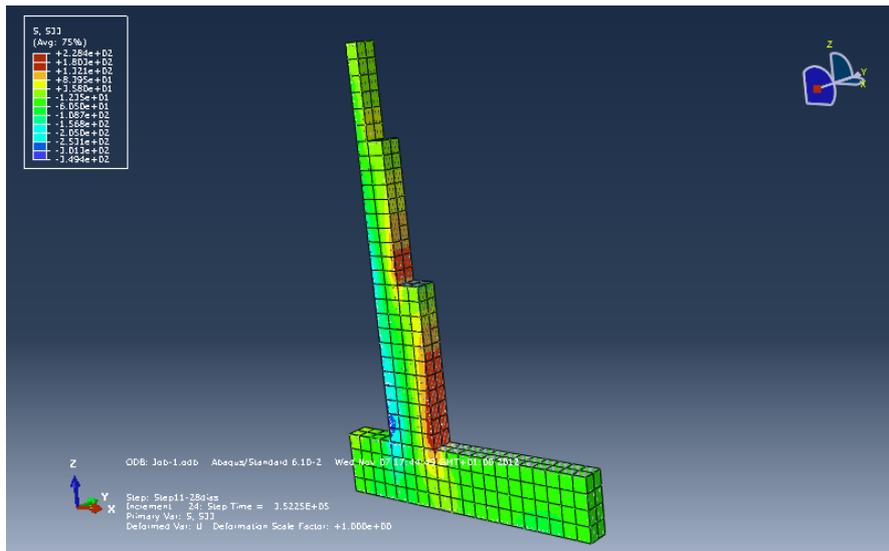


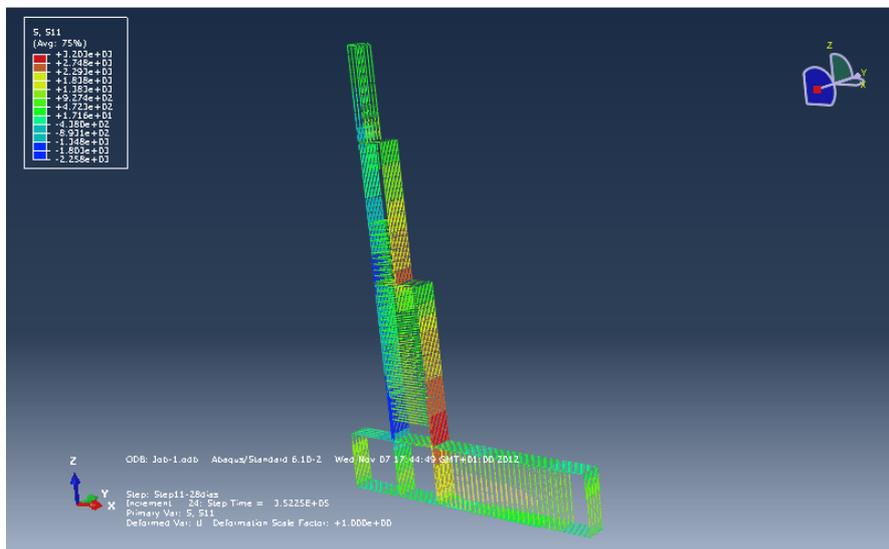
Figura 5.67.- Temperatura en las caras externas del muro (11 días)

Una vez llegados a los 11 días de análisis se procede al vertido de las tierras en la parte derecha del muro, por lo que comienzan a actuar cargas tanto de peso como de empuje sobre las caras horizontales y verticales, respectivamente del muro que están en contacto con el terreno vertido.

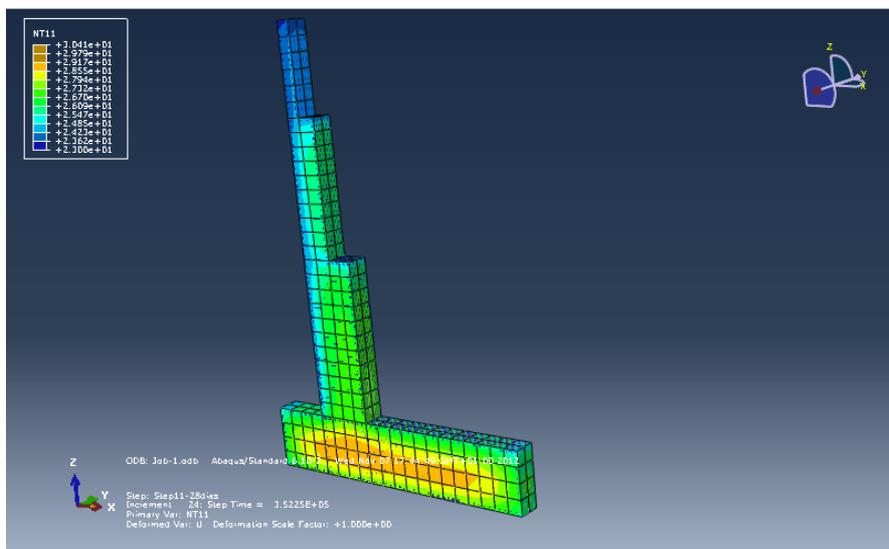
A continuación se van a mostrar la evolución tanto del estado tensional del hormigón y la armadura del muro como de la temperatura del mismo. Se van a realizar instantáneas a los 15, 20 y 28 días de análisis.



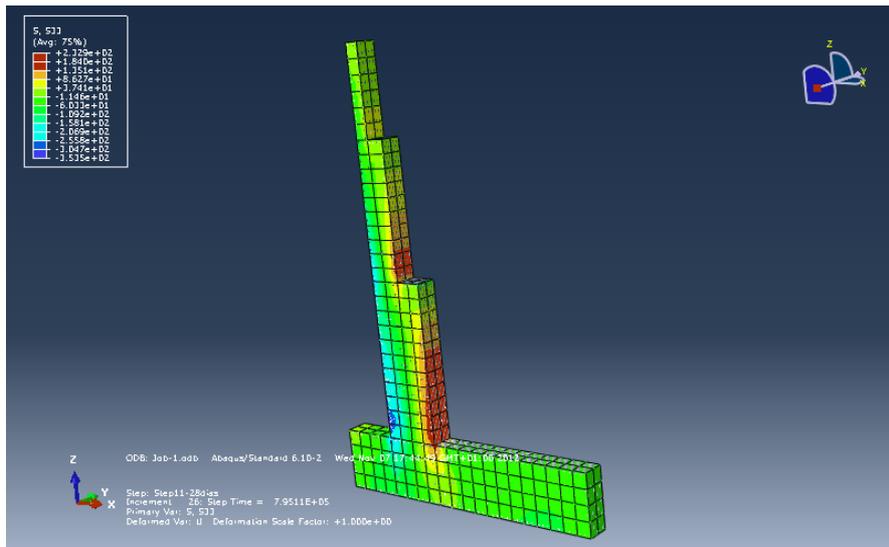
*Figura 5.68.- Tensiones en el eje Z (15 días)*



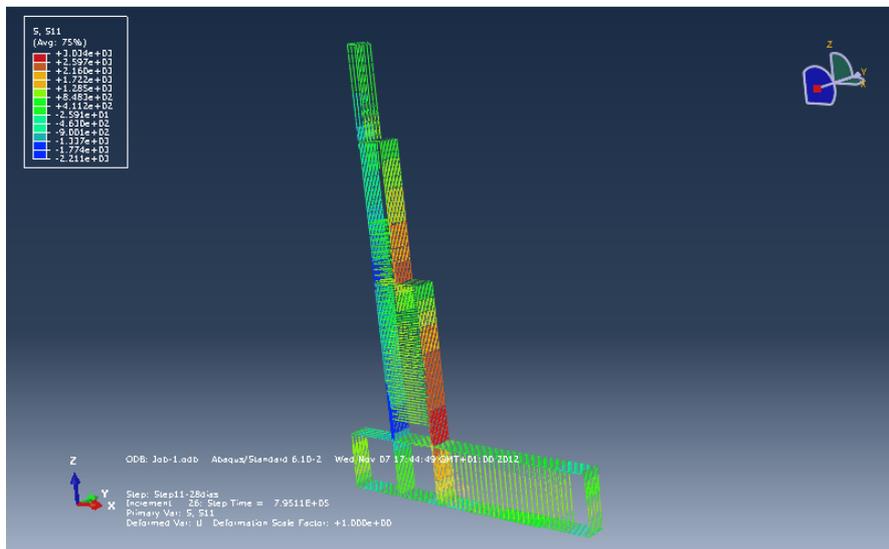
*Figura 5.69.- Tensiones en la armadura en el eje X (15 días)*



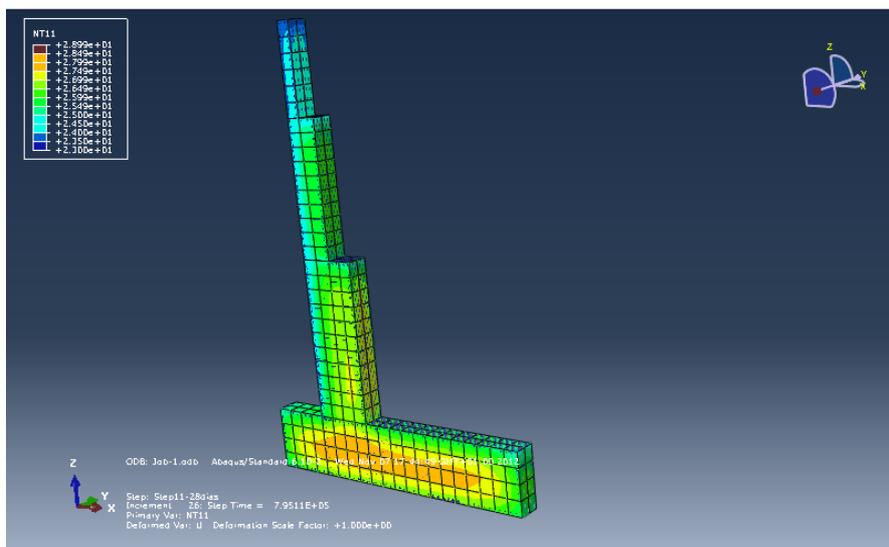
*Figura 5.70.- Temperatura en las caras externas del muro (15 días)*



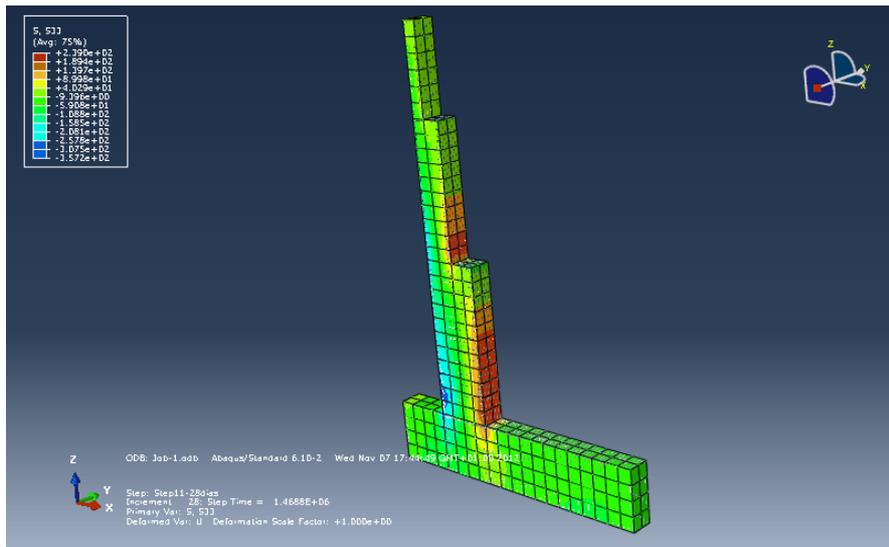
*Figura 5.71.- Tensiones en el eje Z (20 días)*



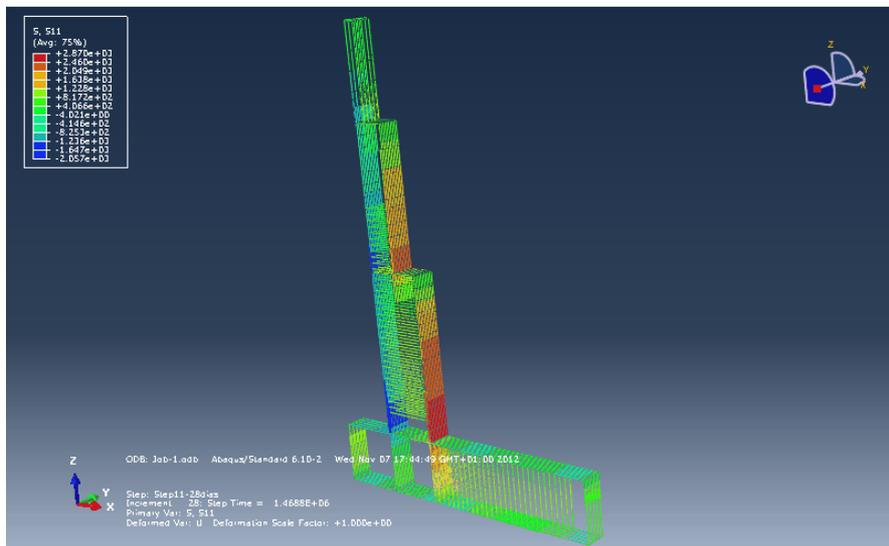
*Figura 5.72.- Tensiones en la armadura en el eje X (20 días)*



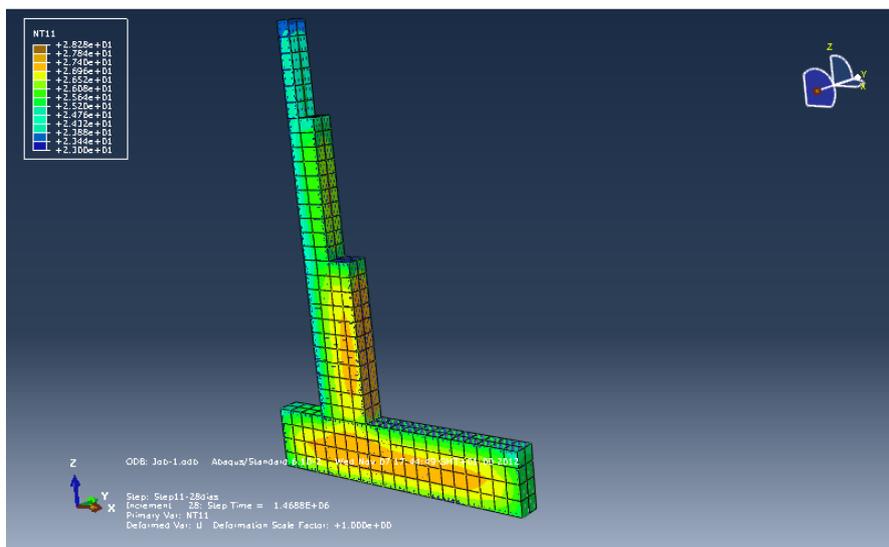
*Figura 5.73.- Temperatura en las caras externas del muro (20 días)*



*Figura 5.74.- Tensiones en el eje Z (28 días)*



*Figura 5.75.- Tensiones en la armadura en el eje X (28 días)*



*Figura 5.76.- Temperatura en las caras externas del muro (28 días)*

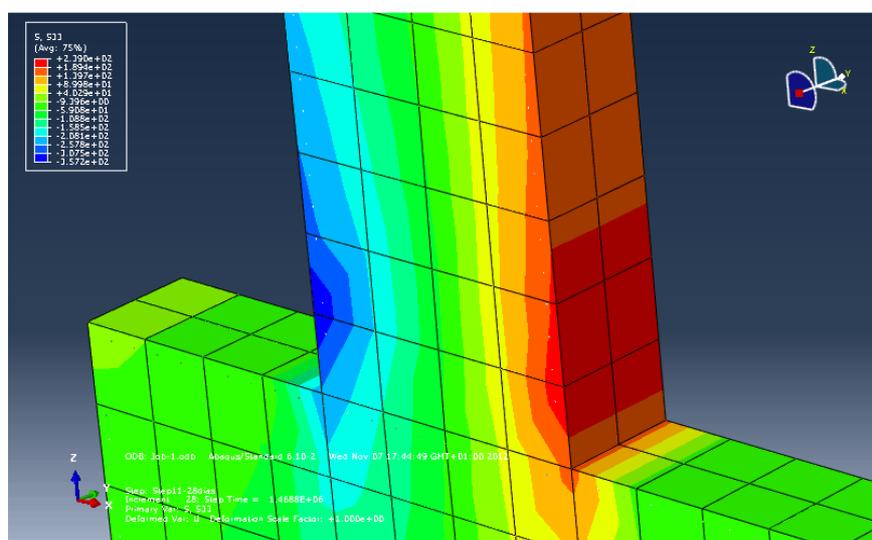
Como se puede observar la temperatura va disminuyendo a medida que avanza el tiempo de análisis, ya que el calor de hidratación va disminuyendo y a los 28 días pasa a tener un efecto casi insignificante.

Con respecto al estado tensional, se puede observar cómo la zona más desfavorable del muro es la base del mismo, justo antes de llegar a la zapata. La resultante del empuje del terreno provoca un momento importante en esta zona, generando tracciones en las caras donde se aplica la carga y compresiones en las caras opuestas. Este momento es mayor a medida que se va descendiendo, razón por la cual el espesor del muro es escalonado y mayor a medida que nos acercamos a la base.

A su vez, debido a la variación del espesor del muro, las máximas tensiones de tracción se dan en la zona inferior de cada escalón de cambio de sección ya que aunque el momento vaya disminuyendo a medida que ascendemos por el muro, al producirse el cambio de sección se provoca un ascenso de la tensión. Es por ello por lo que las zonas inferiores de cada tramo tienen una mayor densidad de armado.

Además, con respecto al armado también comentar que en la zona traccionada hay más armadura y las barras son de mayor diámetro que en la zona comprimida. Esto es porque como es bien sabido, el comportamiento del hormigón a tracción es mucho peor que a compresión, por lo que se compensa este peor comportamiento armando mejor la zona que va a trabajar a tracción.

En la siguiente figura se va a hacer un zoom en la zona que se ha comentado que se trata de la más desfavorable del muro de contención.



*Figura 5.77.- Tensiones en el eje Z (28 días) en la zona más desfavorable*

Vemos que en el hormigón la tensión máxima de tracción es de 2.39 MPa, mientras que la máxima de compresión es de 3.57 MPa.

En la siguiente imagen se puede apreciar el desplazamiento horizontal que sufre el muro por la acción del empuje del terreno.

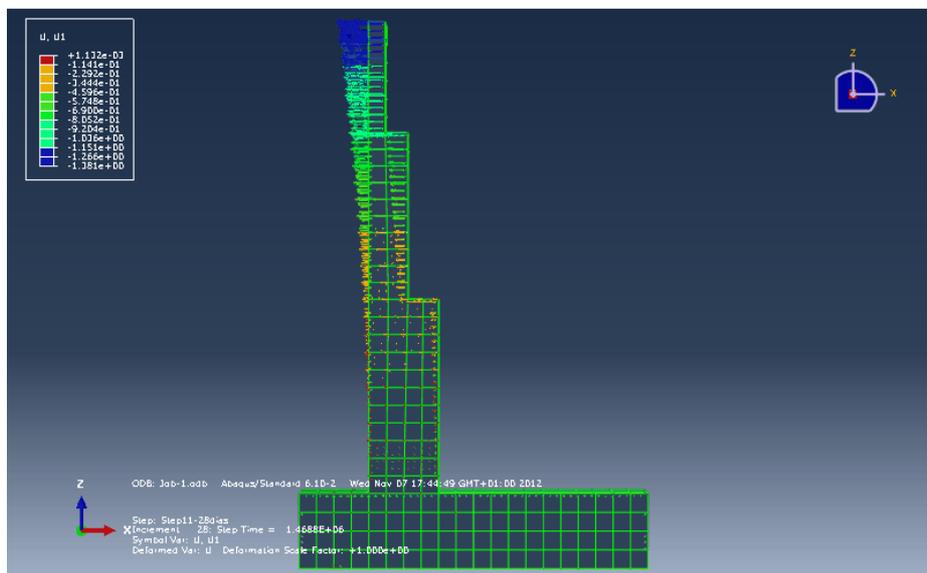


Figura 5.78.- Desplazamiento horizontal del muro a los 28 días

Como es lógico, el desplazamiento máximo se produce en la cima del muro y tiene un valor de 13.8 mm.

A continuación se va a proceder a la descripción de los criterios de fallo que se van a establecer para comprobar la aptitud de la estructura frente al servicio, es decir, los estados límite de servicio.

Para compresión, el muro será apto frente al servicio si la tensión máxima de compresión multiplicada por un coeficiente de mayoración de cargas de 1.5 es menor que la resistencia del hormigón a esa edad dividida por un coeficiente de minoración de la resistencia del mismo de valor 1.35:

$$1.5 * \text{Tensión máxima de compresión} < \text{Resistencia compresión}/1.35$$

Este criterio se cumple de manera holgada para la aplicación de la carga a cualquier edad, ya que el valor que se obtiene de la tensión máxima de compresión se produce a partir de los once días desde el comienzo del análisis, es decir, cuando se aplica la carga del terreno, alcanzando un valor de alrededor de 3.5 MPa, el cual es muy inferior a la resistencia a compresión del hormigón.

Para la tracción, debido a que en el momento de aplicación del empuje del terreno y la sobrecarga ferroviaria se produce a los 11 días de análisis y 8 días de curado de la zona que está más traccionada (ya que ésta es la zona inferior del muro, la cual se hormigonó a los 3 días), el hormigón tiene la resistencia suficiente como para que no se produzcan fisuras importantes en el mismo por tracción. Se ha comprobado que no se producen deformaciones plásticas debidas a la tracción por lo que no es necesario aplicar el criterio del estado límite de fisuración por tracción (abertura de la grieta) propuesto por la EHE 08.

Por último comentar que si las tierras se hubieran vertido antes sí habría sido necesario comprobar este criterio, ya que se habrían producido deformaciones plásticas debidas a la tracción, teniendo mayor probabilidad de no ser apta la estructura frente al servicio cuanto antes se hubieran vertido las tierras.