

RESULTADOS

6.1. Introducción

En este capítulo se mostrarán diferentes tipos de resultados para dos tipos de interfaz distintas. En primer lugar se representan las gráficas de evolución del daño de tres elementos representativos de la interfaz desde el punto de vista micromecánico, para ver la diferencia que existe entre los puntos pertenecientes al hueso y al cemento. A continuación se obtendrán los resultados de la homogeneización del material y se representará la evolución del daño global en el elemento junto con los mapas de tensiones y de daño para diferentes ciclos de carga. Por último se obtendrán unas curvas S-N representativas de la interfaz mediante los datos obtenidos en la homogeneización. Todos estos resultados se representarán para una carga aplicada en dirección normal y para otra carga aplicada en dirección tangencial al elemento.

6.2. Daño micromecánico de la interfaz hueso-cemento para un nivel de deformación constante

Por daño micromecánico nos referimos al daño que experimenta cada elemento de la interfaz. Cada uno de ellos presenta un comportamiento diferente ante las mismas cargas, dependiendo de su posición dentro de la interfaz o del material. Por ello se analizarán tres elementos que se consideren representativos de cada interfaz, como se verá a continuación.

6.2.1. Daño micromecánico en el modelo de interfaz tipo 1 para una carga aplicada en dirección normal

En primer lugar se mostrarán los resultados de la evolución del daño en función del número de ciclos para los tres elementos de la interfaz que se muestran en la figura 6.2. Se han escogido estos tres elementos porque cada uno tiene presenta un comportamiento representativo dentro de la zona de la interfaz en la que se encuentra. El elemento 4843 pertenece al cemento, el 2178 pertenece al hueso y el 4881, aunque pertenece al cemento, se encuentra justo en la zona de contacto de los dos materiales, que es donde se concentran las tensiones máximas y por tanto, donde más se daña el material, por lo que presenta un comportamiento diferente al del elemento de cemento que se encuentra más alejado de esa zona.

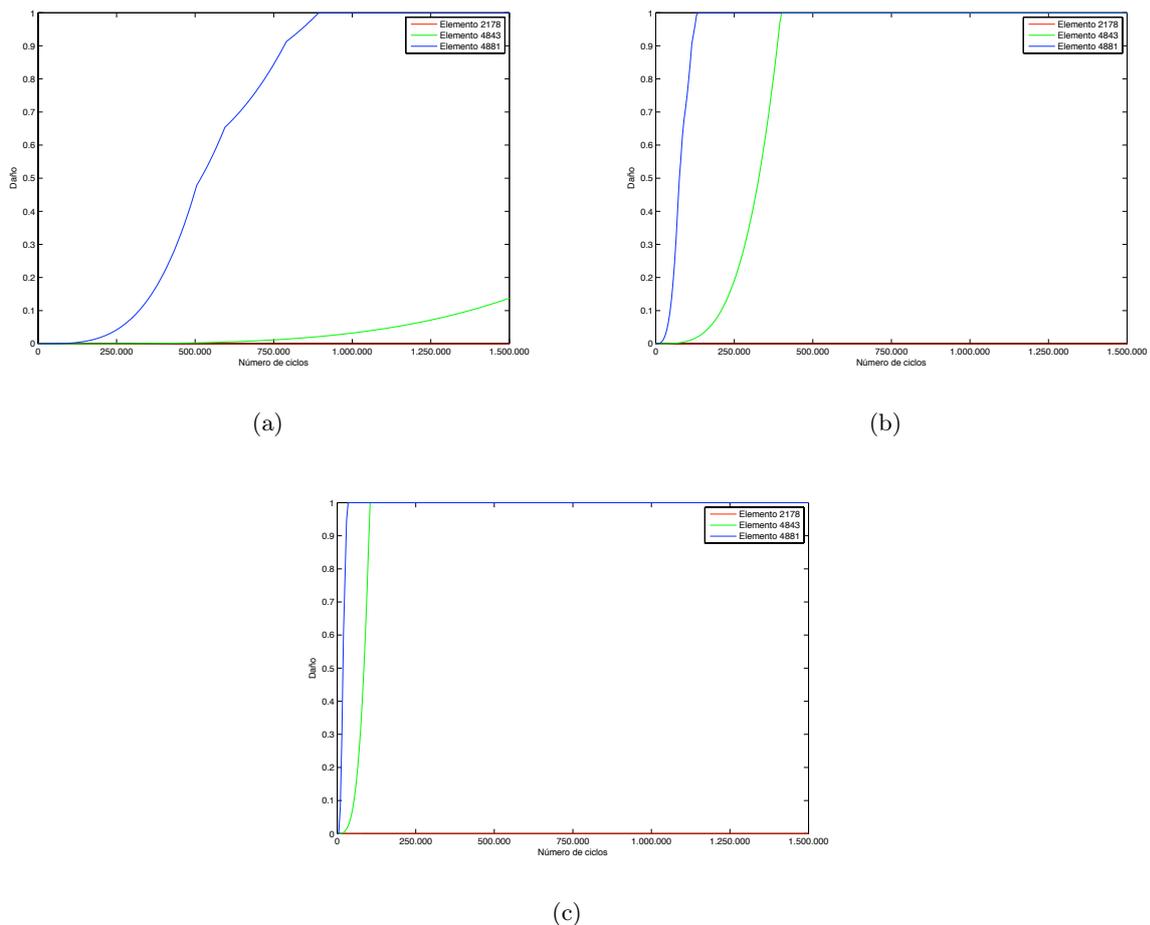


Figura 6.1: Evolución del daño en los elementos 2178, 4843 y 4881 para una deformación normal de 0.0005 (a), 0.00075 (b) y 0.001 (c).

En la figura 6.1 se puede ver la evolución del daño en estos 3 elementos durante 1.500.000 de ciclos de carga para tres deformaciones distintas.

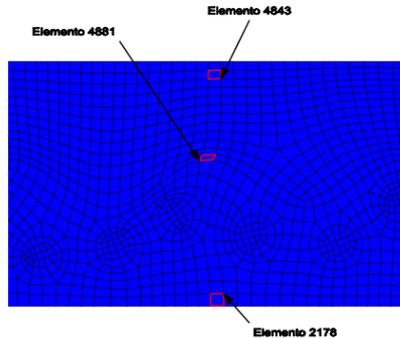


Figura 6.2: Representación de los elementos 2178, 4843 y 4881 en el modelo de interfaz tipo 1.

Como se ha comentado antes, el elemento 4881, situado en la zona de contacto del hueso con el cemento, es el que falla primero, ya que las tensiones se concentran en esa zona, mientras que el elemento de cemento que está más alejado de la zona central de la interfaz se ve menos afectado debido a que las tensiones en esa zona son menores. El elemento perteneciente al hueso no daña, ya que el hueso es un material cuyo módulo elástico es de un orden de magnitud mayor que el del cemento y ese nivel de tensiones no provoca el fallo del material.

6.2.2. Daño micromecánico en el modelo de interfaz tipo 1 para una carga aplicada en dirección tangencial

En este caso se vuelven a aplicar los mismos valores de deformación que en el caso anterior pero en dirección tangencial, obteniéndose las curvas de la figura 6.3.

Se puede observar que para el mismo nivel de deformación, las deformaciones normales provocan el fallo del cemento para un número de ciclos menor que las tangenciales. En concreto, para el caso de la deformación tangencial de 0.0005 el cemento apenas daña.

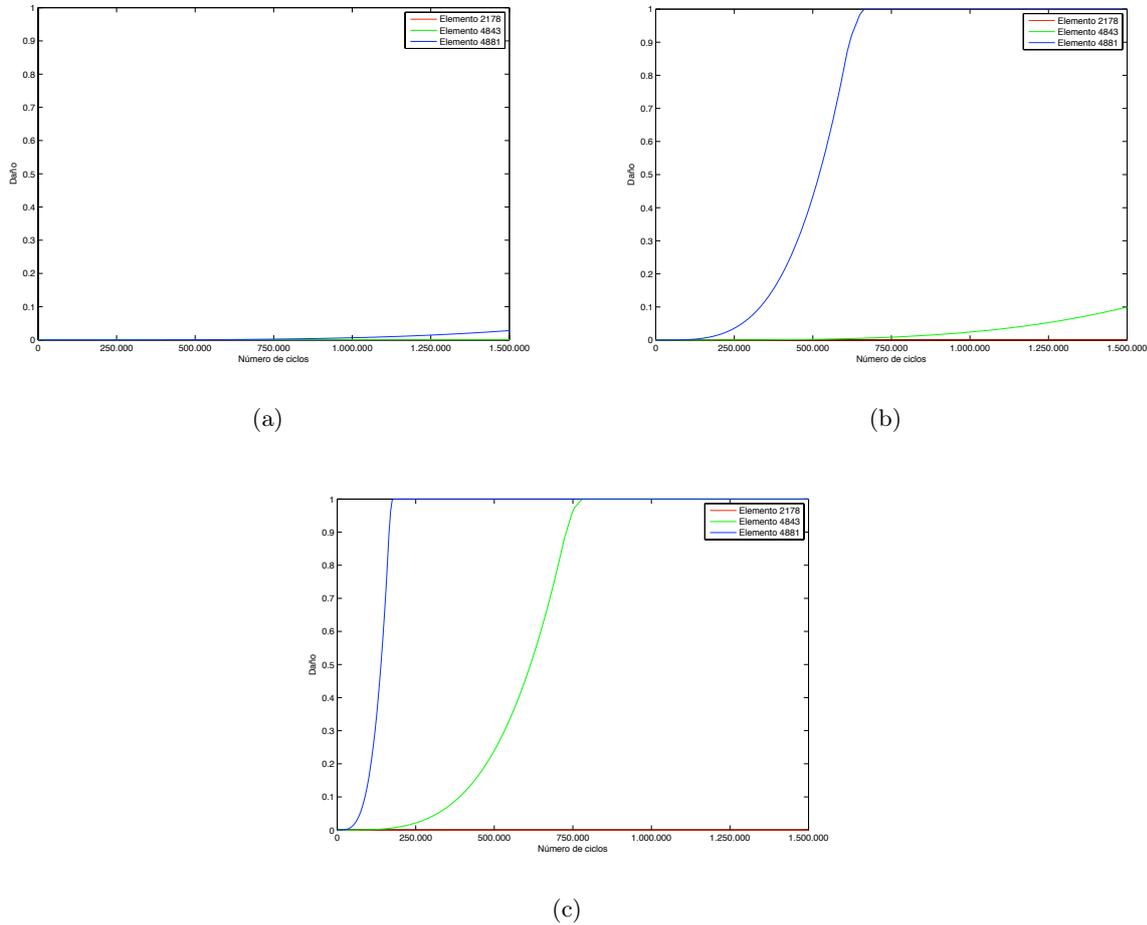


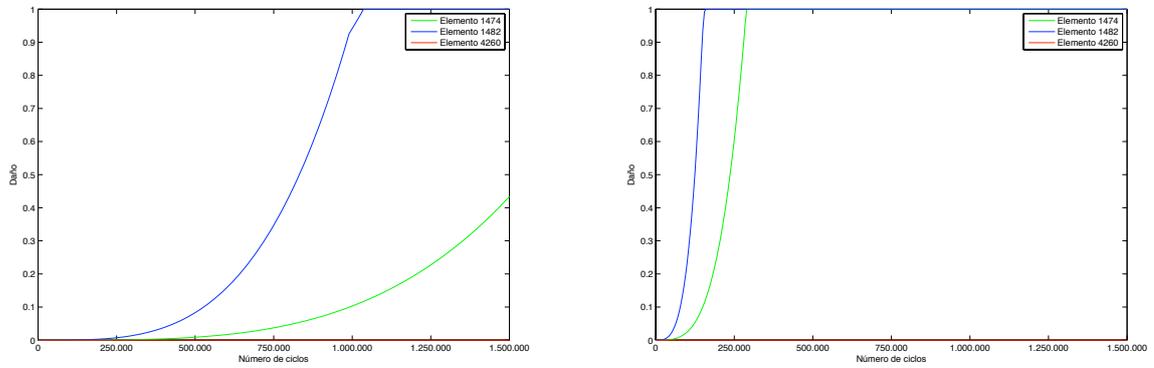
Figura 6.3: Evolución del daño en los elementos 2178, 4843 y 4881 para una deformación tangencial impuesta de 0.0005 (a), 0.00075 (b) y 0.001 (c).

6.2.3. Daño micromecánico en el modelo de interfaz tipo 2 para una carga aplicada en dirección normal

En este caso se analizará el comportamiento de tres elementos de la interfaz de tipo 2, siguiendo el mismo criterio que para el caso de la interfaz de tipo 1. Los elementos aparecen representados en la figura 6.5. En primer lugar se aplica la carga en dirección normal, obteniéndose los resultados de la figura 6.4.

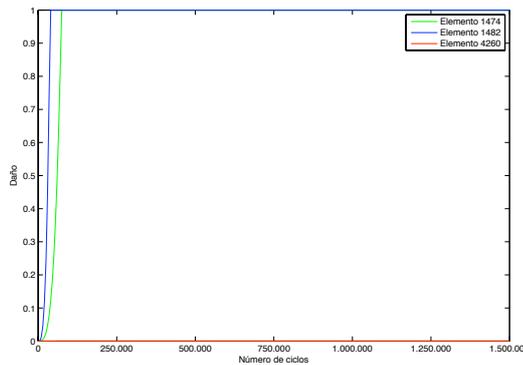
Estos resultados son muy similares a los obtenidos para la interfaz tipo 1, pero al tratarse de datos obtenidos para elementos individuales no se puede comparar el comportamiento de ambas interfaces. La comparación cualitativa de las dos interfaces se realizará en la sección 6.3, en la que se muestran las curvas del daño homogeneizado, que representa el comportamiento global

de toda la interfaz.



(a)

(b)



(c)

Figura 6.4: Evolución del daño en los elementos 1474, 1482 y 4260 para una deformación normal de 0.0005 (a), 0.00075 (b) y 0.001 (c).

6.2.4. Daño micromecánico en el modelo de interfaz tipo 2 para una carga aplicada en dirección tangencial

Ahora se analizará de nuevo el comportamiento de la interfaz tipo 2 con los mismos valores de deformación que en los casos anteriores, para una deformación tangencial. En este caso, los resultados que se muestran en la figura 6.6, sí difieren un poco de los resultados obtenidos para la interfaz tipo 1 con las mismas condiciones. En la interfaz tipo 2, el daño en el cemento tarda más en aparecer que en la interfaz tipo 1, siendo prácticamente nulo en todos los elementos en el caso de la deformación de 0.0005 (figura 6.6a).

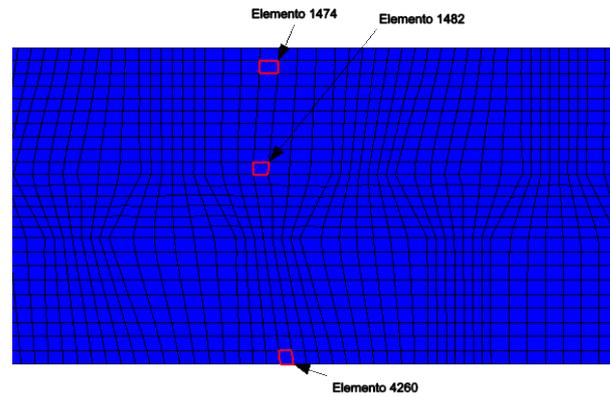


Figura 6.5: Representación de los elementos 1474, 1482 y 4260 en el modelo de interfaz tipo 2.

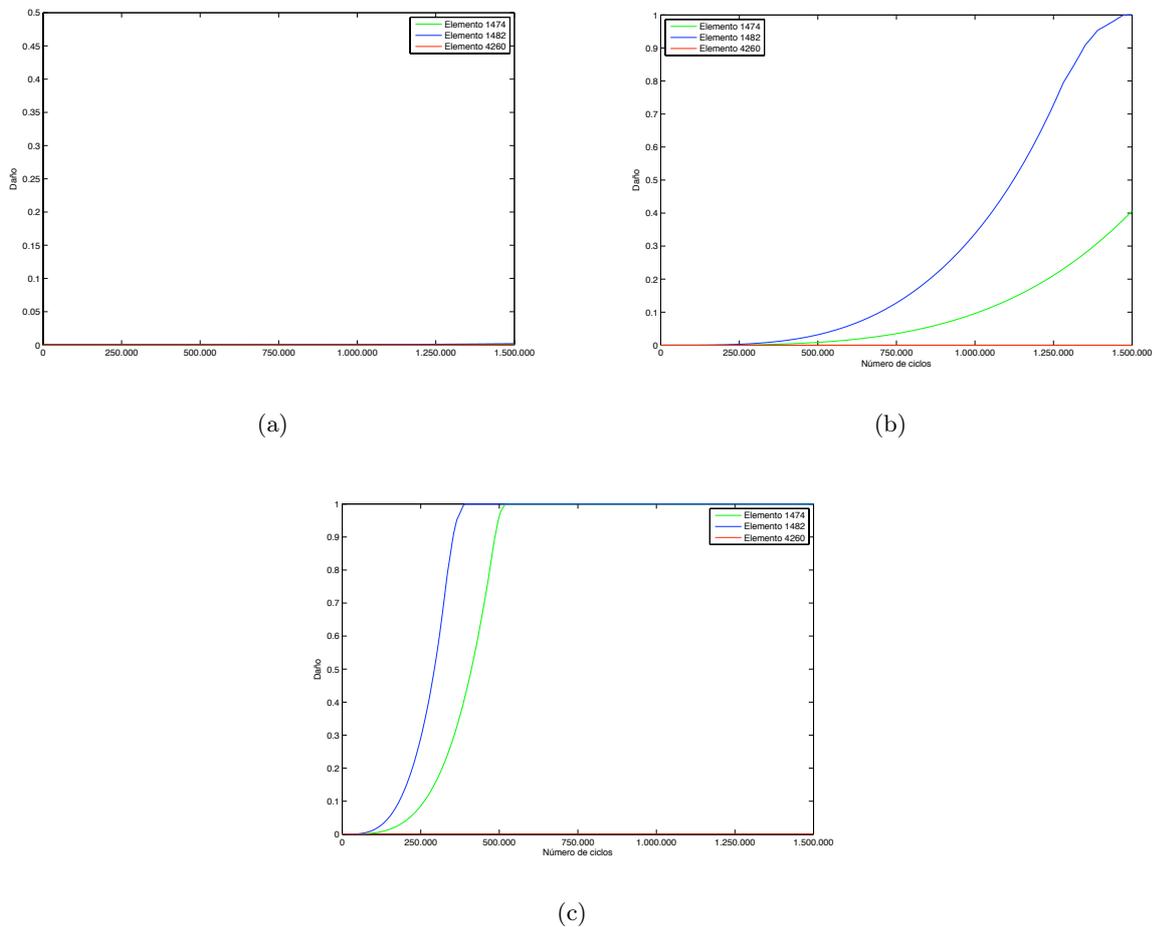


Figura 6.6: Evolución del daño en los elementos 1474, 1482 y 4260 para una deformación tangencial impuesta de 0.0005 (a), 0.00075 (b) y 0.001 (c).

6.3. Daño homogeneizado de la interfaz hueso-cemento

En esta sección se presentan las gráficas del daño homogeneizado en los dos tipos de interfaz para diferentes deformaciones aplicadas. Junto a ellas se muestran los mapas de daño de la interfaz para diferentes números de ciclos y el mapa de tensiones principales máximas de la interfaz. El mapa de tensiones representado es el correspondiente a 1.500.000 de ciclos. No se han representado otros mapas de tensiones en otros instantes porque el aumento que sufren las tensiones con el número de ciclos no es perceptible, ya que es del orden de 10^{-3} . Tampoco se han tenido en cuenta en este caso las deformaciones de 0.0005, porque como se vio en la sección anterior, para el caso de deformación tangencial, ninguna de las interfaces se daña, y es más interesante poder comparar el comportamiento de la interfaz dañada. Por ello solo aparecen resultados para las deformaciones de 0.00075 y 0.001. Por otra parte, el daño varía entre 0 y 0.5, ya que cuando el cemento está totalmente dañado, el hueso sigue resistiendo sin dañarse, por lo que al hacer la homogeneización, que tiene en cuenta el volumen de ambos materiales, el resultado es una media entre estos dos, cuyo máximo por lo tanto es 0.5.

6.3.1. Daño homogeneizado en el modelo de interfaz tipo 1 para una carga aplicada en dirección normal

En las figuras 6.7 y 6.8 se muestran los resultados obtenidos al aplicar una deformación normal de 0.00075 y 0.001, respectivamente, al modelo de interfaz tipo 1.

En el primer caso, se puede observar como el daño crece progresivamente hasta alcanzar el valor de 0.5 cuando se han aplicado 1.500.000 de ciclos de carga. En el mapa de tensiones se puede ver que las zonas de cemento que presentan las tensiones máximas son las que primero se dañan. En el punto A, es decir, después de 500.000 ciclos de carga, el cemento presenta zonas completamente dañadas, y se puede ver como las zonas menos dañadas van disminuyendo a medida que aumenta el número de ciclos (punto B), encontrándose el cemento dañado prácticamente en su totalidad en el punto C, correspondiente a 1.500.000 ciclos. Cabe destacar que las inclusiones de cemento en el hueso presentan tensiones considerablemente menores que el resto de la interfaz, y no se encuentran dañadas en ningún momento.

En el segundo caso, la curva crece rápidamente hasta alcanzar el valor de 0.5 después de 750.000 ciclos de carga, por lo que en los mapas de daño, la zona del cemento se encuentra completamente dañada tanto en el punto B como en el C. La tensión máxima en el cemento es

de aproximadamente 6 MPa. Este valor nos puede dar una idea de cual es la tensión máxima para la cual el cemento fallaría casi de inmediato.

6.3.2. Daño homogeneizado en el modelo de interfaz tipo 1 para una carga aplicada en dirección tangencial

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de aplicar una deformación tangencial de 0.00075 (figura 6.9) y 0.001 (figura 6.10) al modelo de interfaz tipo 1.

En el primer caso, el daño alcanza el valor de 0.12 al cabo de 1.500.000 ciclos de carga. Esto implica que la interfaz solo daña en ciertas zonas del cemento donde se concentran las tensiones máximas y que el resto de la interfaz permanece inalterada.

En el segundo caso, el daño crece hasta alcanzar el valor de 0.45 en el punto C, que muestra el cemento dañado por completo exceptuando las zonas en las que las tensiones son mínimas. En los mapas de daño de los puntos A y B se puede observar la evolución que va sufriendo el daño en la interfaz.

Como se comentó en la sección anterior, se puede comprobar que las deformaciones normales provocan en la interfaz unas tensiones principales máximas mayores que en el caso de las deformaciones tangenciales, y como consecuencia el cemento daña de forma mucho más rápida para un mismo nivel de deformación si se somete a deformaciones normales.

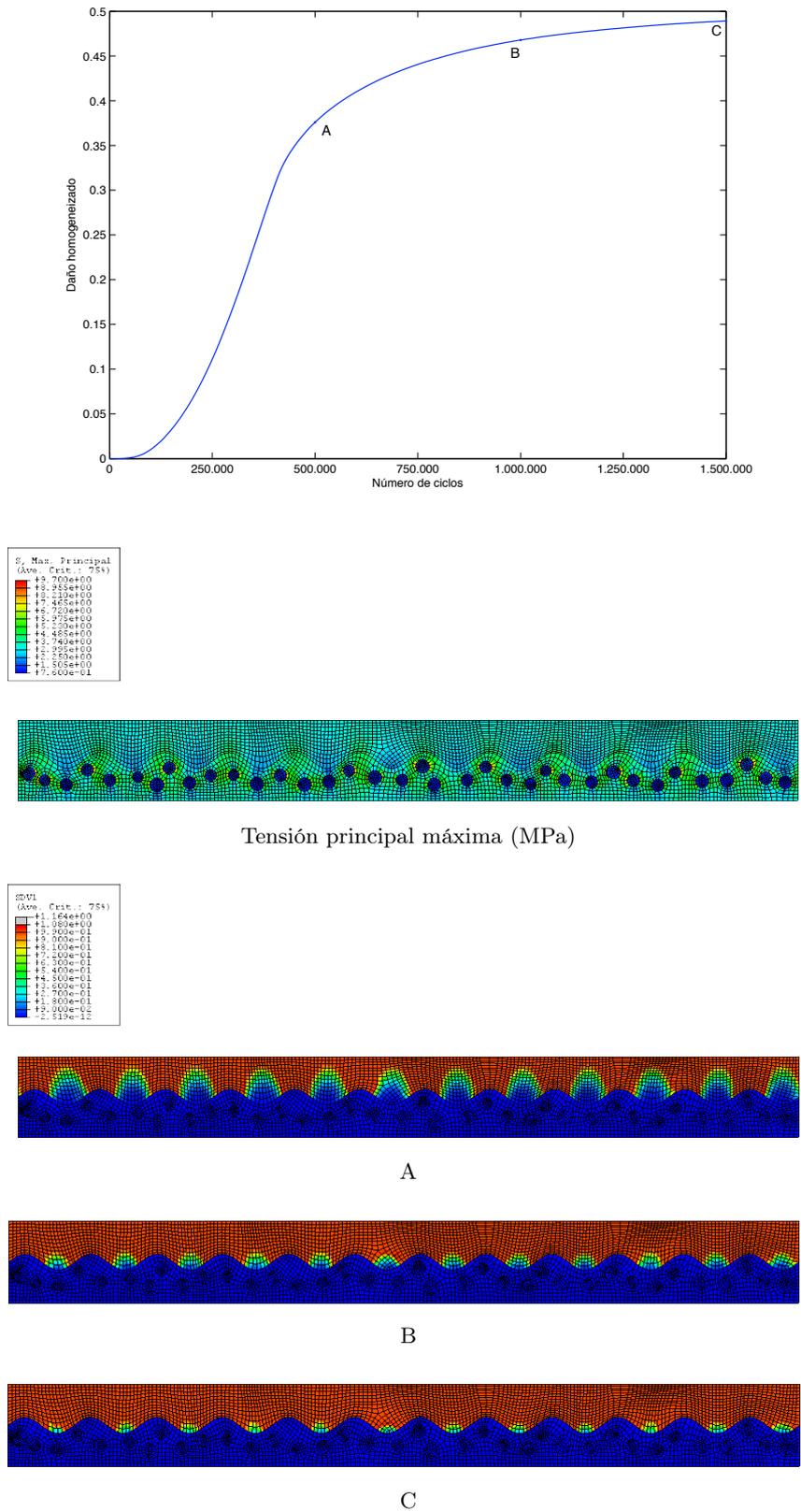


Figura 6.7: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación normal de 0.00075, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

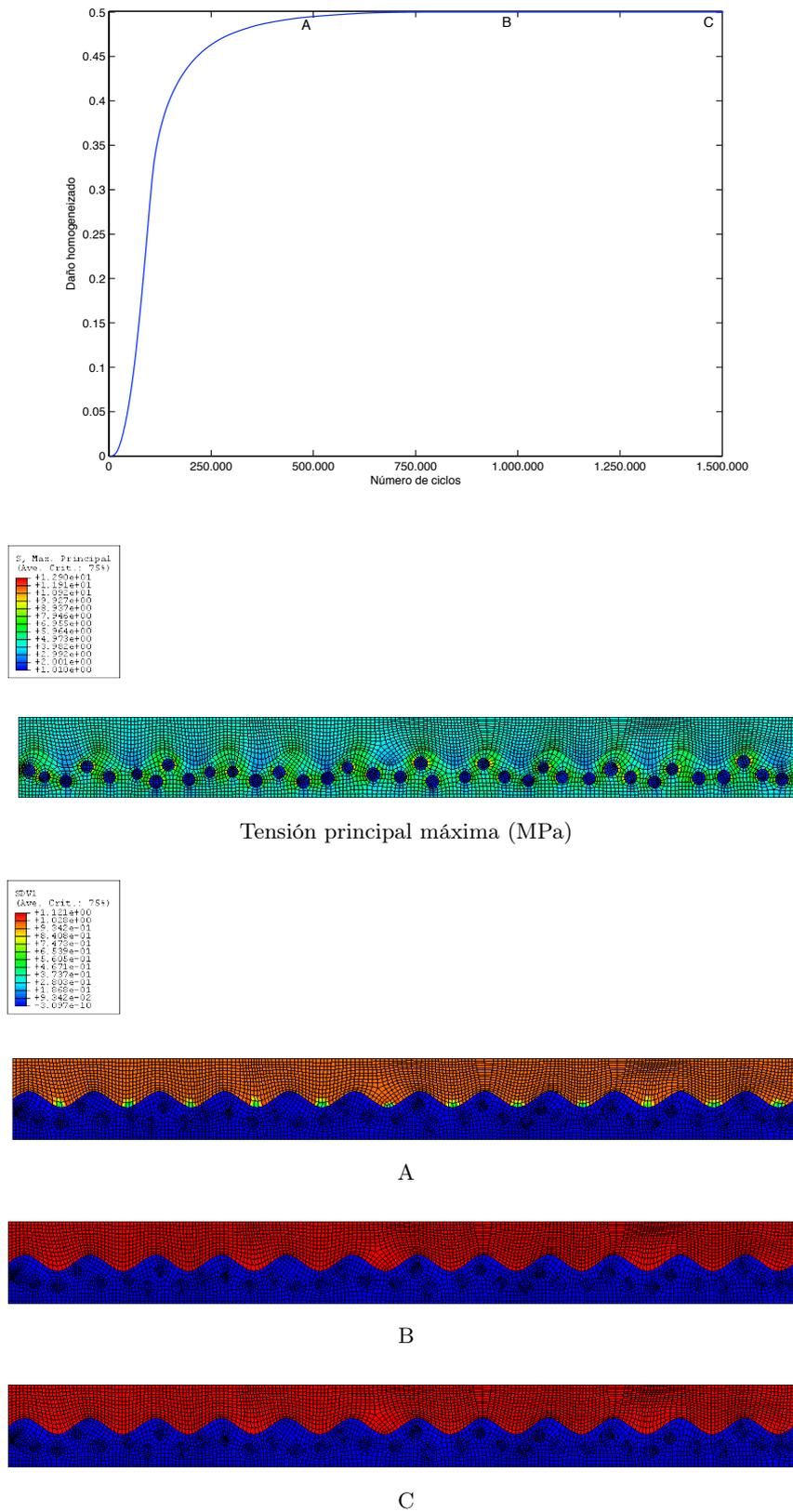


Figura 6.8: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación normal de 0.001, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

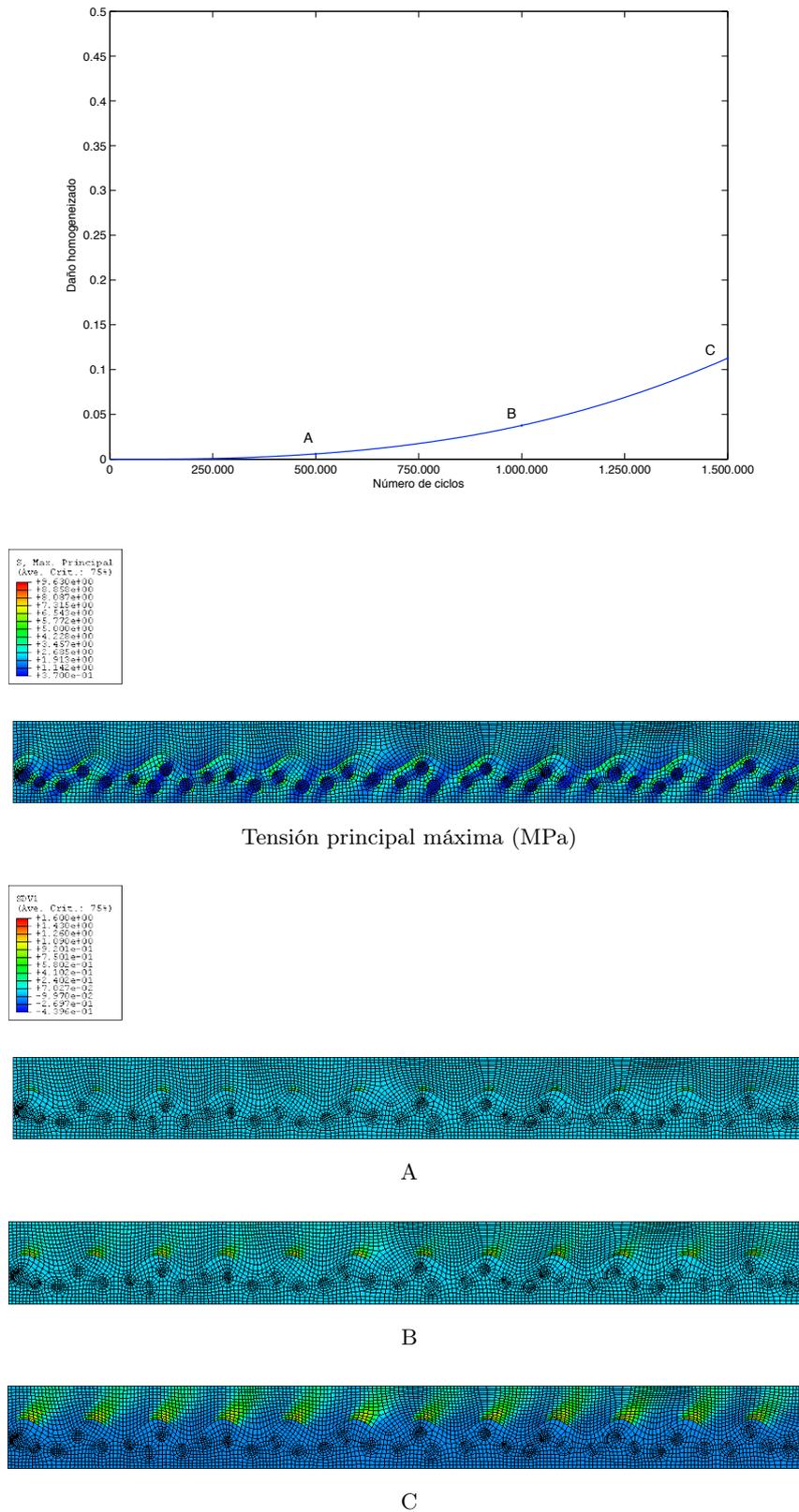


Figura 6.9: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación tangencial de 0.00075, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

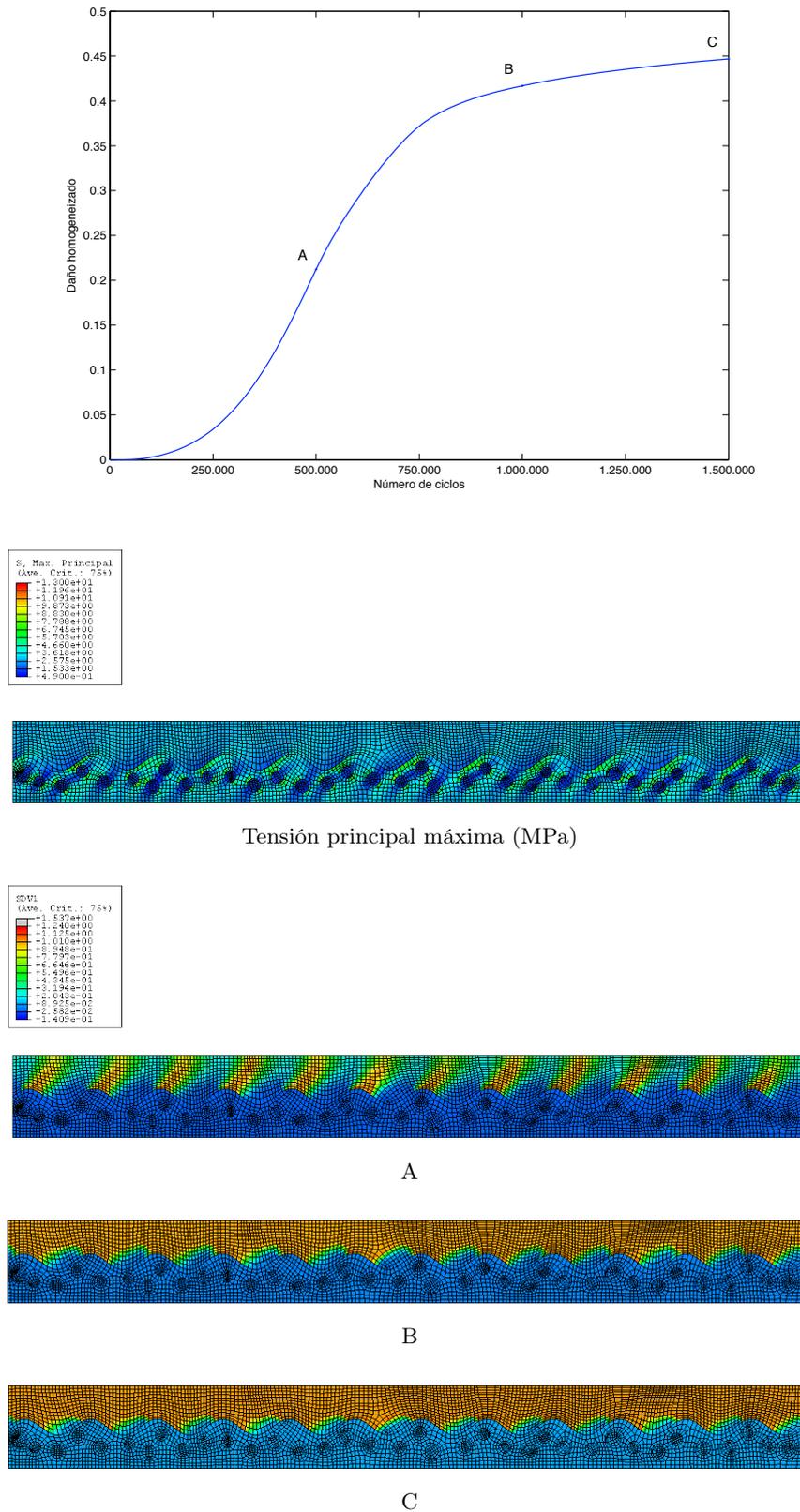


Figura 6.10: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación tangencial de 0.001, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

6.3.3. Daño homogeneizado en el modelo de interfaz tipo 2 para una carga aplicada en dirección normal

Ahora se obtendrán las gráficas del daño homogeneizado y mapas de tensiones y daño para el modelo de interfaz tipo 2 cuando se le aplica una deformación en dirección normal de 0.00075 (figura 6.11) y de 0.001 (figura 6.12).

Para la deformación de 0.00075 el daño crece rápidamente hasta 0.37 para 250.000 ciclos de carga, donde comienza a crecer de forma más suave hasta llegar al valor de 0.41 después de 1.500.000 ciclos. Este rápido crecimiento inicial provoca que el cemento se encuentre dañado casi en su totalidad a partir de un número de ciclos muy bajo en comparación con el número de ciclos simulados, como se puede ver en los mapas de daño para los instantes A, B y C.

Lo mismo ocurre para la deformación de 0.001, pero alcanzándose el valor de 0.35 a los 75.000 ciclos de carga, y creciendo suavemente hasta 0.48 en el instante final. En los mapas de daño para los instantes A, B y C se puede observar como el cemento se encuentra dañado incluso en la zona que penetra dentro del hueso, donde las tensiones son mínimas.

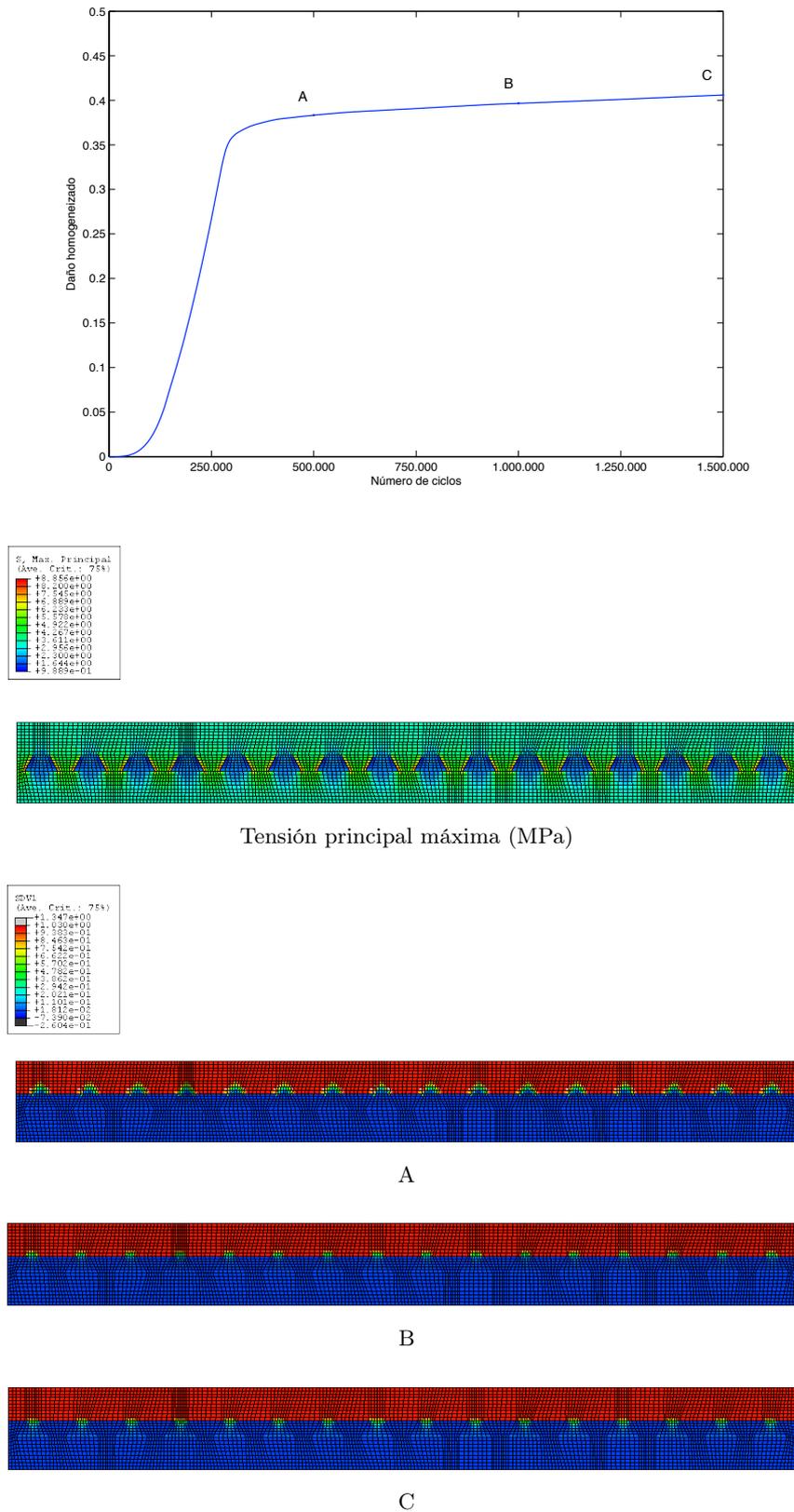


Figura 6.11: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación normal de 0.00075, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

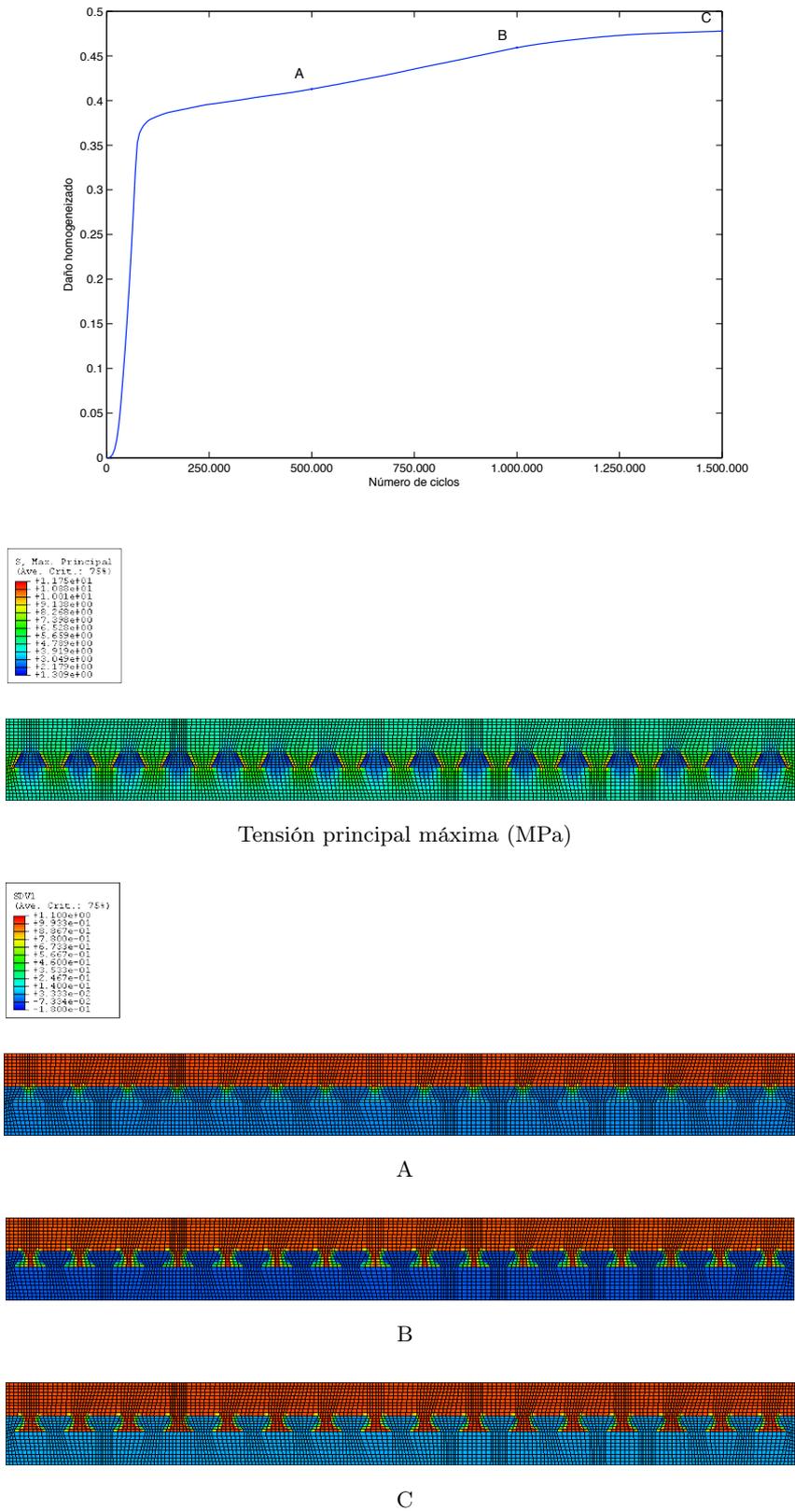


Figura 6.12: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación normal de 0.001, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

6.3.4. Daño homogeneizado en el modelo de interfaz tipo 2 para una carga aplicada en dirección tangencial

En este caso se vuelve a analizar el comportamiento del modelo de interfaz tipo 2, pero aplicándole una deformación tangencial de 0.00075 y de 0.001, como se muestra en las figuras 6.13 y 6.14, respectivamente.

En el primer caso, el daño que se alcanza después de 1.500.000 ciclos es de 0.21, y como ocurría con el modelo de interfaz tipo 1, el cemento solo se encuentra dañado en las zonas en las que las tensiones son máximas, situadas en la zona de contacto del cemento con el hueso, concretamente en las esquinas superiores del hueso.

Para el segundo caso también se obtienen resultados similares a los obtenidos para la interfaz tipo 1, alcanzando el daño el valor de 0.43 después de 1.500.000 ciclos de carga. El crecimiento inicial de la función daño es más suave que en el caso de las deformaciones normales, pero también presenta un punto de inflexión alrededor de 500.000 ciclos, a partir del cual el daño sigue creciendo pero aumenta muy poco entre los instantes B y C. En el instante A la interfaz todavía no está completamente dañada y se puede observar como evoluciona el daño en el cemento. En este caso, al contrario de lo que sucedía en el caso de deformaciones normales, sí se producen tensiones máximas en la zona de cemento que penetra dentro del hueso, y por tanto, el material comienza a fallar también por esa zona, como se muestra en los mapas de daño para los tres instantes.

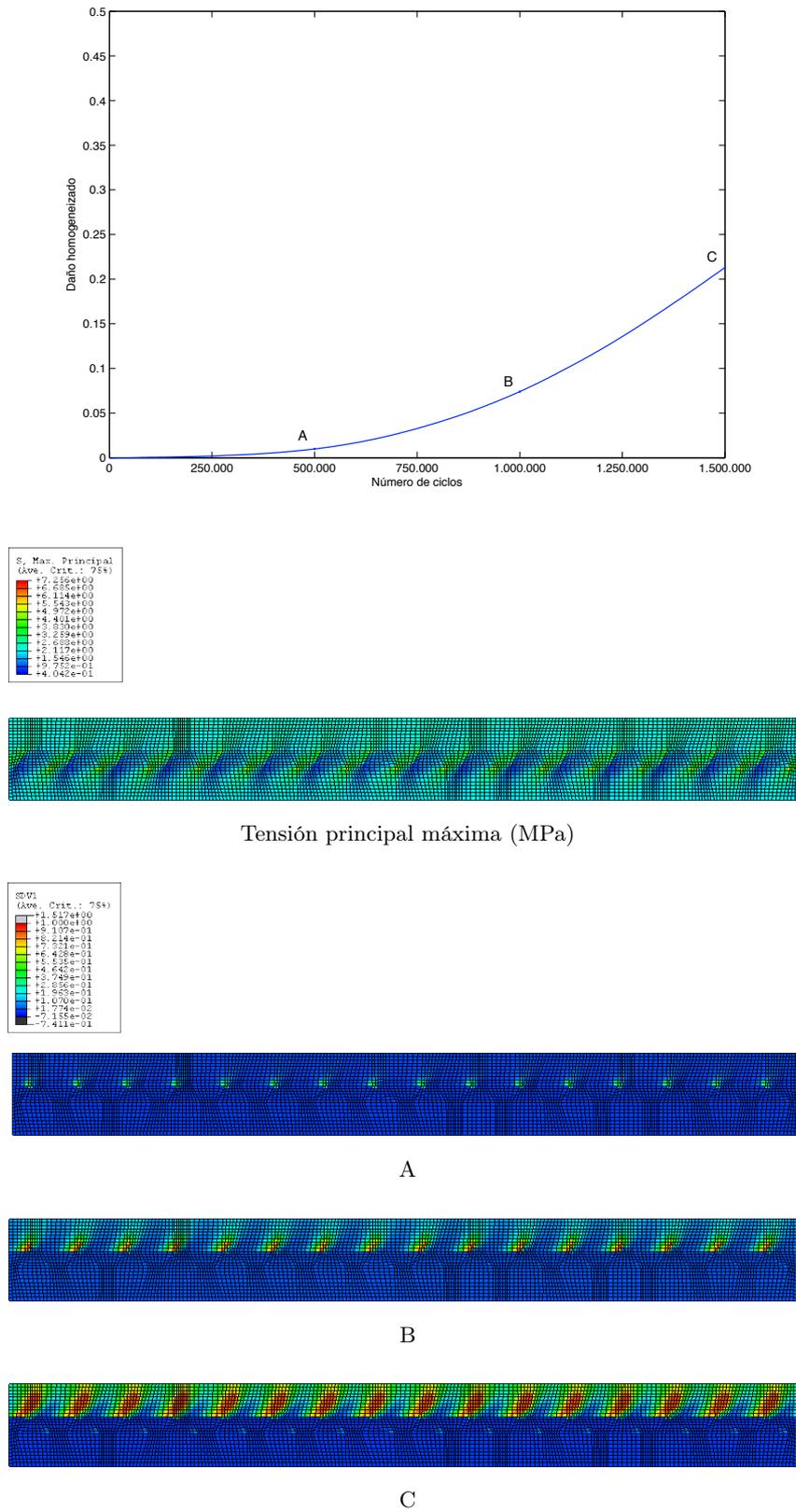


Figura 6.13: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación tangencial de 0.00075, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

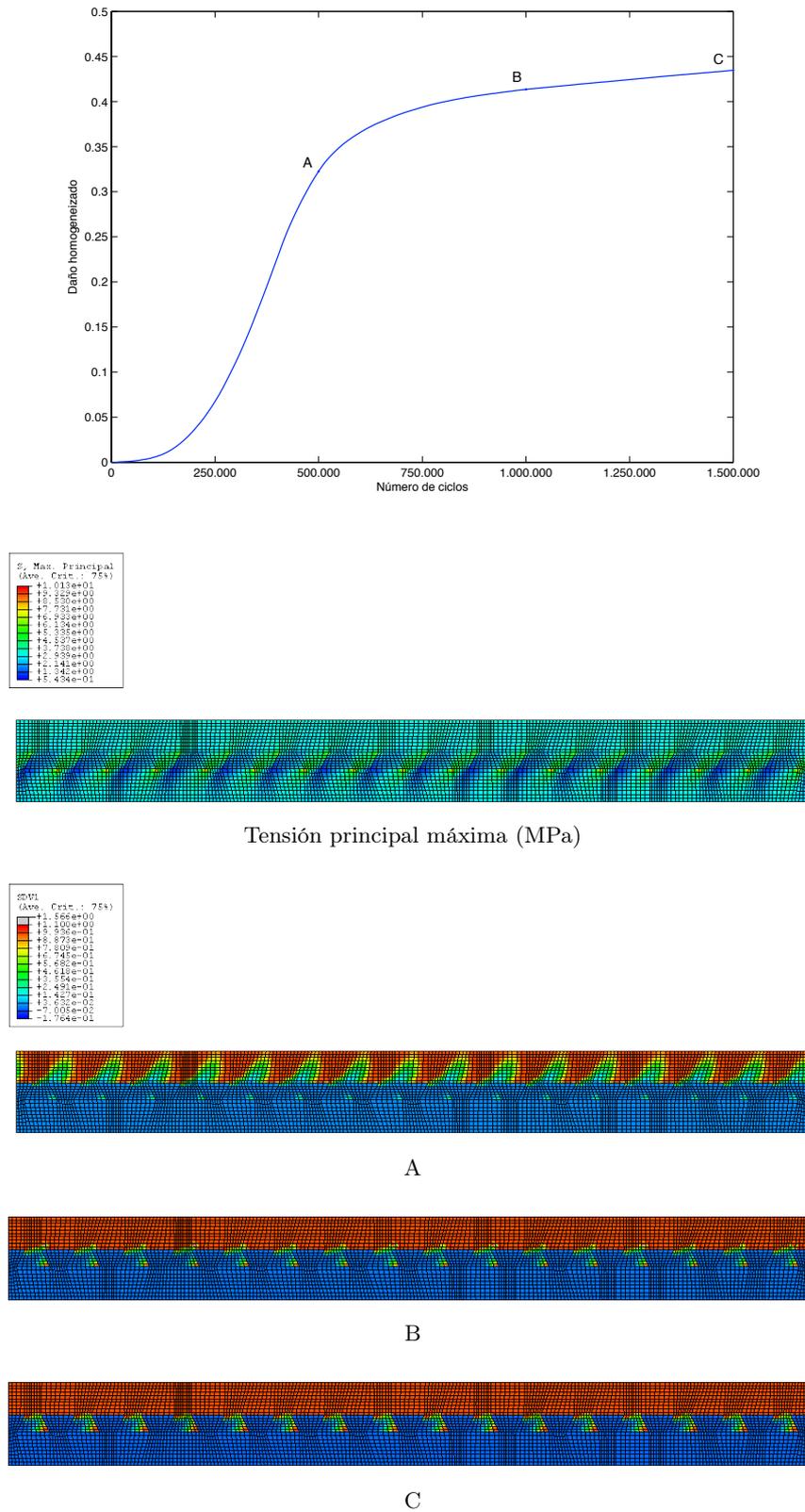


Figura 6.14: Representación de la función daño homogeneizada para una deformación tangencial de 0.001, mapa de tensiones y mapas de daño para 500.000 ciclos (A), 1.000.000 (B) y 1.500.000 (C).

6.4. Curvas S-N de la interfaz hueso-cemento

En esta última sección se obtendrán unas curvas S-N de cada tipo de interfaz en función del tipo de deformación aplicada. Para obtener estas curvas se parte de la idea de que la función daño es una función que se puede definir como la relación entre el número de ciclos de carga en ese instante (n) y el número de ciclos de carga para los que fallaría el material (N_F), como se muestra en la ecuación (6.1):

$$d = \frac{n}{N_F} \quad (6.1)$$

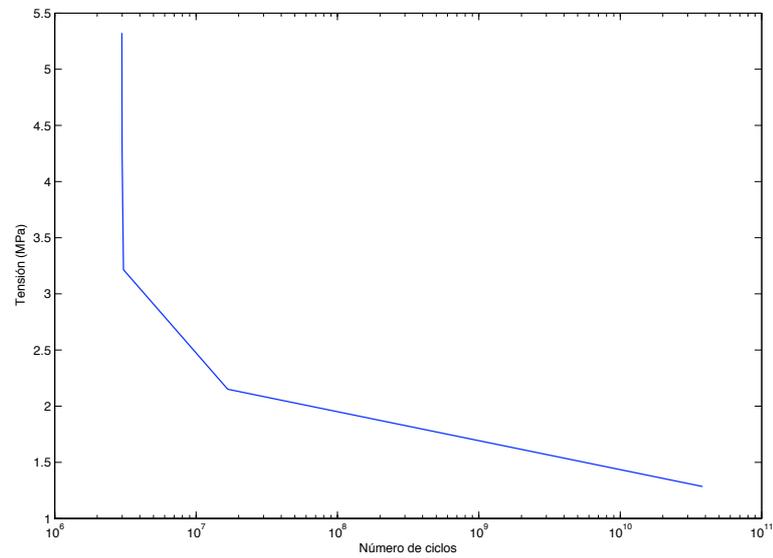
Ya que disponemos de los valores de daño homogeneizado para diferentes números de ciclos y sus correspondientes tensiones homogeneizadas, se ha calculado el número de ciclos de fallo global de la interfaz hueso-cemento para cada tensión, mediante la fórmula anterior, y se han obtenido unas curvas S-N representativas para cada tipo de interfaz y de carga, como se muestra en las figuras 6.15 y 6.16.

En la gráfica 6.15a se puede observar como para tensiones inferiores a 1.5MPa la interfaz fallaría para un número de ciclos superior a 10^{10} , mientras que para valores de tensión superiores a 3.5MPa el número de ciclos de fallo es de 5.000.000.

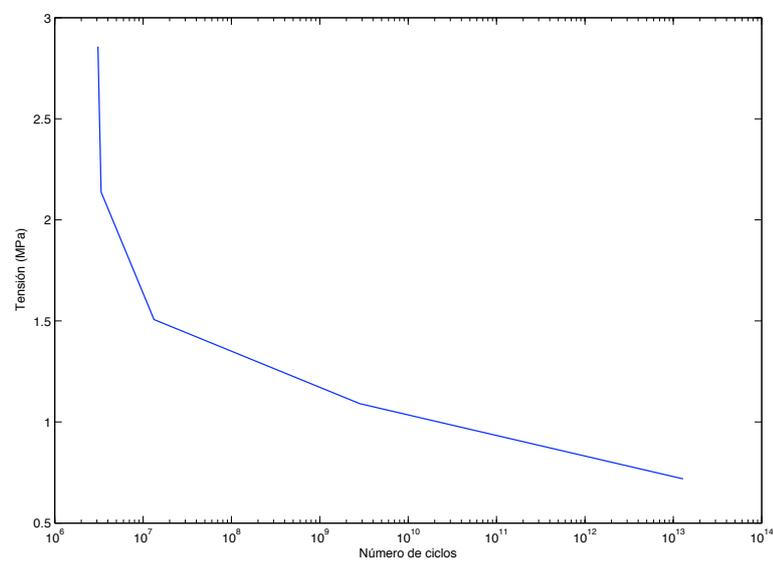
Para el caso de deformación tangencial (figura 6.15b), a partir de 2.5MPa la interfaz falla cuando se alcanzan los 5.000.000 ciclos, y para valores de tensión menores de 1Mpa se podría considerar que no falla nunca, ya que el número de ciclos de fallo es superior a 10^{13} .

En el tercer caso, deformación normal en la interfaz tipo 2 (figura 6.16a), se obtienen resultados similares al primero. Para valores de tensión superiores a 3.5MPa, el número de ciclos de fallo es de 5.000.000, mientras que para valores inferiores a 1.5MPa, fallaría una vez alcanzados 10^{10} ciclos.

Y por último, en el caso de deformación tangencial de la interfaz tipo 2 (figura 6.16b), los resultados son equiparables al segundo caso, con un número de ciclos de fallo de 5.000.000 para tensiones superiores a 2.5MPa. Sin embargo, para tensiones inferiores a 1.5MPa el número de ciclos de fallo es de 10^9 , siendo este valor en el caso de la interfaz tipo 1 mucho mayor.

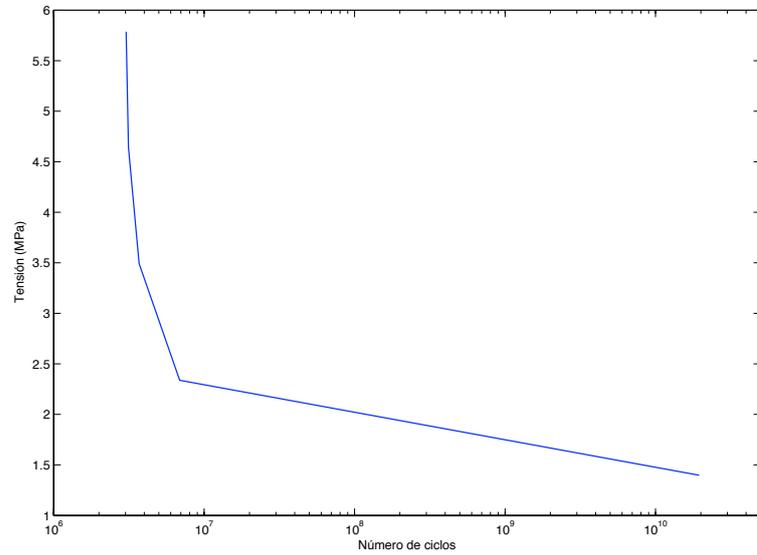


(a) Curva S-N de la interfaz tipo 1 para tensión en dirección normal.

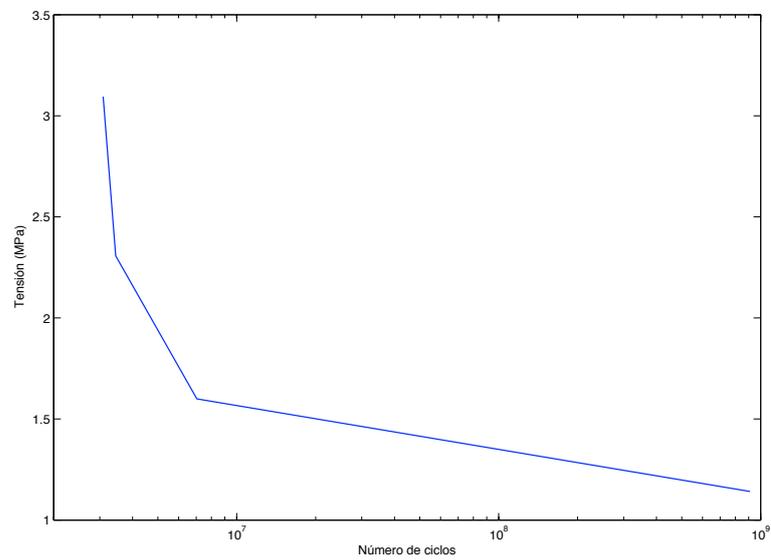


(b) Curva S-N de la interfaz tipo 1 para tensión en dirección tangencial.

Figura 6.15: Curvas S-N de la interfaz tipo 1.



(a) Curva S-N de la interfaz tipo 2 para tensión en dirección normal.



(b) Curva S-N de la interfaz tipo 2 para tensión en dirección tangencial.

Figura 6.16: Curvas S-N de la interfaz tipo 2.