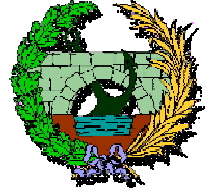




UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos
Canales y Puertos**



TESIS DOCTORAL



**DESARROLLO Y ANÁLISIS DE PAVIMENTOS
INDUSTRIALES DESDE EL PUNTO DE VISTA
DEL ACABADO SUPERFICIAL**



Autor

ÁLVARO GARCÍA HERNÁNDEZ

Directores

DANIEL CASTRO FRESNO

JUAN ANTONIO POLANCO MADRAZO

Santander, Noviembre 2007

6. RESISTENCIA AL IMPACTO DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN DOTADOS DE ACABADO SUPERFICIAL

Este estudio se ha llevado a cabo con el fin de profundizar en el conocimiento de las formas de rotura de los pavimentos de hormigón por daño de impacto acumulado, para lo que actualmente no existe apenas investigación. El daño en el pavimento se mide a partir del conocimiento del número de impactos hasta rotura en testigos cilíndricos, del crecimiento de la profundidad del cráter con el número de impactos y la disminución en la capacidad de absorción de energía del pavimento. Para simular el pavimento sujeto a procesos de carga y efectos dinámicos se ha utilizado el programa de elementos finitos LS-DYNA. En todos los ensayos de impacto se ha aplicado la misma energía a las probetas. El crecimiento de la profundidad del cráter o la disminución de la absorción de energía causadas por las cargas cuasiestáticas y de fatiga se describen en términos de mecánica de la fractura. El cambio de velocidad de daño acumulado por impacto sigue un proceso de tres etapas: una etapa de deceleración, seguida por otra de formación del cono de rotura y otra de aceleración hasta rotura. Se ha encontrado una relación basada en el ratio de crecimiento de la profundidad del cráter en cuanto al daño acumulado por impacto entre los distintos tipos de acabados para los pavimentos estudiados. Por último, en este Capítulo se demuestra la necesidad de colocar disipadores de energía en el acabado superficial con el fin de aumentar la resistencia a impacto del pavimento.

6.1. INTRODUCCIÓN

Bajo una carga de impacto en el hormigón, la mecánica de fractura tradicional no ofrece mucha ayuda a la hora de modelizar la acción de las microfisuras que se producen. Las grandes cargas dinámicas tienen la capacidad de transmitir una gran cantidad de energía en microsegundos. En estas circunstancias, el hormigón sufre grandes tensiones que pueden llegar a ser del orden de gigapascales, incluyendo efectos termodinámicos, lo que causa ondas de impacto que se propagan a lo largo de todo el sólido. Los modelos constitutivos del material tratan de representar estos fenómenos ahorrando tiempo y dinero y sustituyendo la ardua labor experimental en los casos en que ésta sea especialmente costosa.

La complejidad del comportamiento del hormigón es debida a que éste es un material multifase, compuesto por granos sólidos, cemento y aire, con lo que es muy difícil ajustarlo a un determinado modelo constitutivo. Knab y Clifton [102] realizaron un estudio en el que desarrollaron métodos para conocer el daño acumulado en losas reforzadas de hormigón sujetas a impactos repetidos. El daño acumulado lo monitorizaron midiendo la profundidad del cráter y la reducción de la velocidad ultrasónica a través de la zona impactada. La profundidad de penetración se incrementaba con el número de impactos, con lo que, según estos autores, este es un buen indicador del daño acumulado del hormigón.

Otra de sus conclusiones fue que el método de ensayo estudiado podía ser usado para comparar la resistencia a la penetración de diferentes tipos de pavimentos de hormigón sujetos a impactos repetidos. La resistencia a la penetración se define como el número total de impactos requeridos para causar una perforación que sea visualmente aparente.

Estos autores desarrollaron un modelo de fallo en el que se planteaba la hipótesis de que existen tres etapas hasta el colapso de la losa por impacto: en primer lugar una compactación local y la formación de un cráter inicial allí donde golpea el proyectil. El desarrollo de una interfaz de grietas entre el cono de impacto y el resto de la losa y finalmente el desplazamiento del cono con respecto al resto de la losa (Figura 6.8).

Jeng y Shah [91] describieron cómo las microrroturas se inician en el punto más débil, donde las concentraciones de tensiones son mayores y se propagarán, juntándose conforme las tensiones crecen. Sin embargo, algunas de las microgrietas se verán detenidas por los áridos y por los huecos. Si las tensiones aumentan, puede ocurrir incluso que las microgrietas se bifurquen. Cuando las tensiones alcanzan un nivel crítico, las microgrietas comienzan a propagarse, rompiendo finalmente el hormigón.

Shum y Hutchinson [162] afirmaron que la desviación de las grietas ocurre cuando una parte de poca resistencia se encuentra alrededor de una partícula relativamente resistente o pasa cerca de una zona más débil. El puenteo a través de los granos ocurre cuando la grieta ha avanzado a través de un árido que continúa transmitiendo tensiones a través de la rotura hasta que se rompe o es expulsado. Esto provoca la disipación de la energía por fricción y mayores resistencias. Otro mecanismo en el proceso de fractura es la ramificación de las grietas. Éstas pueden propagarse en numerosas ramas debido a la heterogeneidad del hormigón. Más energía se consumirá en la formación de nuevas ramas.

Bajo carga, pueden ocurrir dos tipos de rotura: pérdidas de unión y grietas combinadas, (Figura 6.1). Las grietas simples de unión se refieren a la rotura de la interfaz mortero-árido. Estas grietas ocurren en las primeras etapas de carga, como resultado del deslizamiento entre los áridos y la matriz cementosa. Además, son aisladas y estables a carga constante. Cuando la carga se incrementa, las grietas pueden iniciarse y propagarse a través el mortero, y eventualmente conectarse con las grietas de unión, formando grietas combinadas, que pueden ser agrupadas en Tipo I y Tipo II [80]. Las grietas de Tipo I consisten en una pérdida de unión y en una rotura de mortero, o en la combinación de dos

grietas de unión conectadas por una grieta en el mortero. Este tipo de grietas se extiende de una manera estable, lo que significa que si la carga aplicada permanece constante, las roturas dejan de propagarse. Las roturas de Tipo II contienen dos pérdidas de unión y dos grietas de mortero. Este tipo de grietas se propaga espontáneamente incluso bajo carga constante.

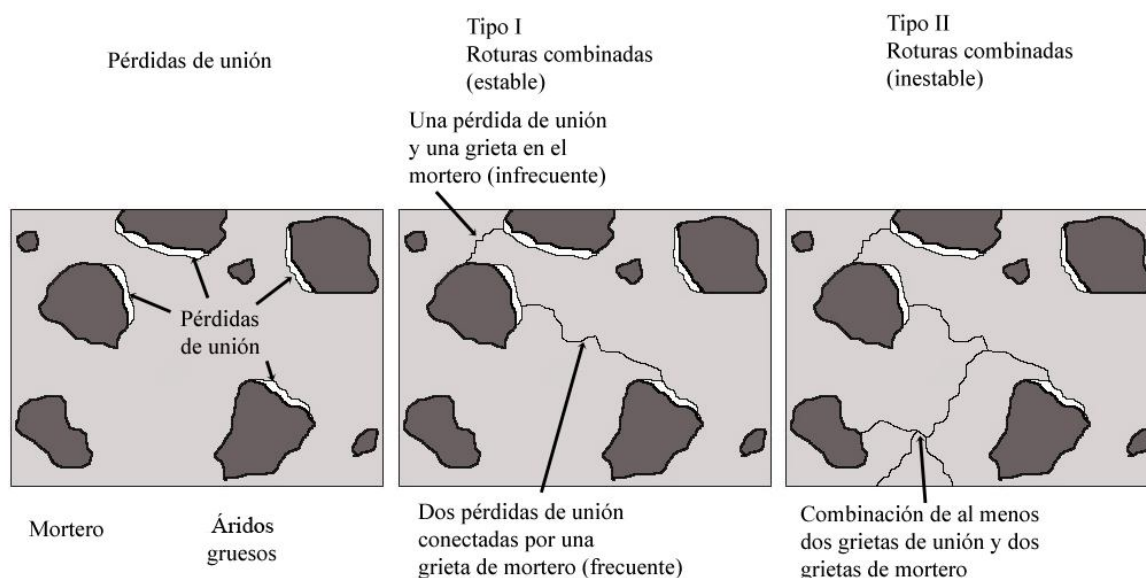


Figura 6.1: Tipos de roturas bajo carga [80].

Las microrroturas creadas por cargas de compresión tienen formas y longitudes variadas. Esto es debido a la heterogeneidad del material. Shah y Sankar [159] observaron al microscopio que cuando las cargas de compresión se incrementan hasta un 85% de la carga última, las microgrietas ocurren principalmente en la interfaz entre los áridos gruesos y el mortero. Estas grietas se encuentran distribuidas uniformemente tanto en las direcciones transversales como en las longitudinales. Cuando las tensiones alcanzan el 95% de la resistencia última, las pérdidas de unión estarán conectadas por grietas a través del mortero. De este modo se producen grietas continuas, que son esencialmente paralelas a las direcciones de carga. Hsu et al. [85] averiguaron que se produce un incremento significativo en la pérdida de unión al 30% de la resistencia última, y que las grietas en el mortero comienzan cuando los niveles de tensiones se encuentran entre el 70 y el 90% de las tensiones últimas.

Aunque la deformación en el hormigón ocurre a la par que la propagación de grietas, un hormigón de densidad y resistencia normal no es un material frágil [56]. Considerando la estructura específica del hormigón, sus patrones de rotura y la manera en que estos se

forman, el hormigón puede ser clasificado como semifrágil. Los efectos que reducen la fragilidad del hormigón son la consumición de energía en la formación de una red de grietas, en lugar de la propagación de una sola.

6.1.1. Características de los impactos sobre el hormigón

La mayor parte de los hormigones comunes se caracterizan por un solo parámetro, la resistencia a compresión uniaxial que habitualmente, en la literatura especializada, es conocido como f_c' . Mainstone [122] indica que la misma aumenta linealmente al aumentar de forma logarítmica el ratio de aplicación de la carga (Figura 6.2).

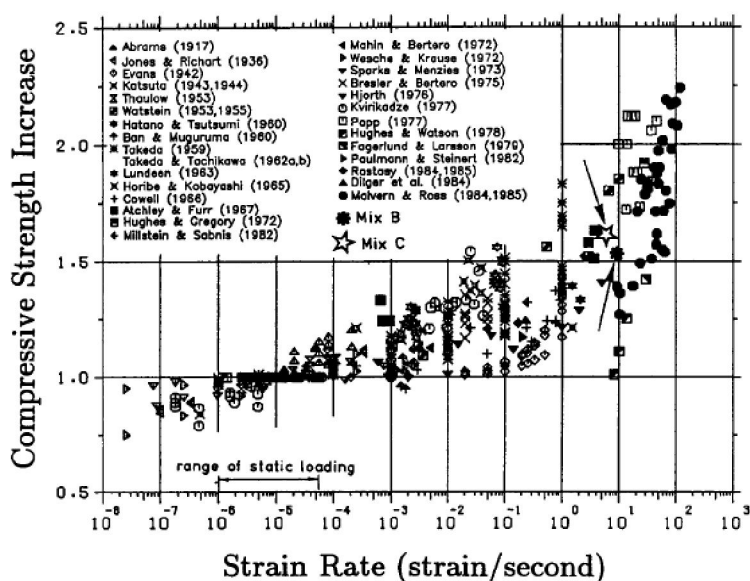


Figura 6.2: Variación de la resistencia a compresión con la velocidad de aplicación de la carga [36].

Ensayos llevados a cabo por Bischoff et al. [36, 35] concluyen que, frente a impacto, tanto la resistencia a compresión como la resistencia a tracción aumentan en un determinado porcentaje (entre el 50 y el 100%), con respecto a la resistencia a compresión estática del material, de forma independiente a la calidad del hormigón.

Por otra parte, diversos autores [18, 36, 35] han reportado que al realizar ensayos de compactación del hormigón a una velocidad mayor, su deformación transversal, así como su deformación volumétrica aumentan entre un 10 y un 30%, independientemente del modo de fallo. También se mejora la capacidad de absorción de energía del hormigón.

De todo esto se deduce que un solo parámetro no puede caracterizar apropiadamente todas

las características del hormigón. Sin embargo, la mayoría de las veces, los ingenieros realizan análisis donde no hay mucha más información que f'_c . Es por eso que conviene disponer de un modelo que requiera la mínima cantidad de datos, pero que sea una buena representación de la mayoría de las respuestas del material, incluyendo daño y fractura.

Los modelos de daño por impacto del hormigón se basan normalmente en una descripción de sus propiedades macroscópicas. La formulación del material a nivel macroscópico puede ser desarrollada usando la teoría clásica de la termodinámica. Para esto, las relaciones independientes del material se dan mediante las ecuaciones de balance, medidas a partir de un volumen de control de un cuerpo en el espacio.

De esta manera, se deduce la forma diferencial de las ecuaciones de equilibrio, que se han de cumplir para cada espacio infinitesimal del material [129]. En la ecuación (6.1) se muestran las ecuaciones de masa, de momento y de energía:

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\rho v) + \frac{D\rho}{Dt} &= 0 && \text{(Balance de masa)} \\ \operatorname{div}T + \rho \left(b - \frac{Dv}{Dt} \right) &= 0 && \text{(Balance de momento)} \\ \frac{De}{Dt} &= r - \frac{1}{\rho} (\operatorname{div}q + T : \operatorname{grad}v) && \text{(Balance de energía)} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Resolviendo el problema en un espacio euclidiano, aparecen once variables de estado: tres correspondientes al ratio de cambio de las velocidades, (v), una correspondiente a la energía interna (e), seis velocidades de cambio del tensor de tensiones de Cauchy (T) y una velocidad de cambio de la densidad del sistema (ρ), mientras que las fuerzas externas (b), se suponen conocidas. Debido a la poca duración del impacto, el flujo de calor (q) y la fuente interna de calor (r), se pueden despreciar en los modelos para el hormigón [1]. Sin embargo, sólo se dispone de tres ecuaciones de balance de momento, una ecuación de balance de masa y una ecuación de balance de energía. Por lo tanto, se requieren dos ecuaciones más para completar las ecuaciones necesarias: por un lado una ecuación de estado (EOS), para calcular la parte esférica de las tensiones y por otra parte un modelo constitutivo $T=f(E,D,e,D)$, función del tensor de deformaciones de Green (E), del tensor de variación de tensiones, de la energía interna (e) y de una variable de daño (D). Estas variables dependen del material analizado.

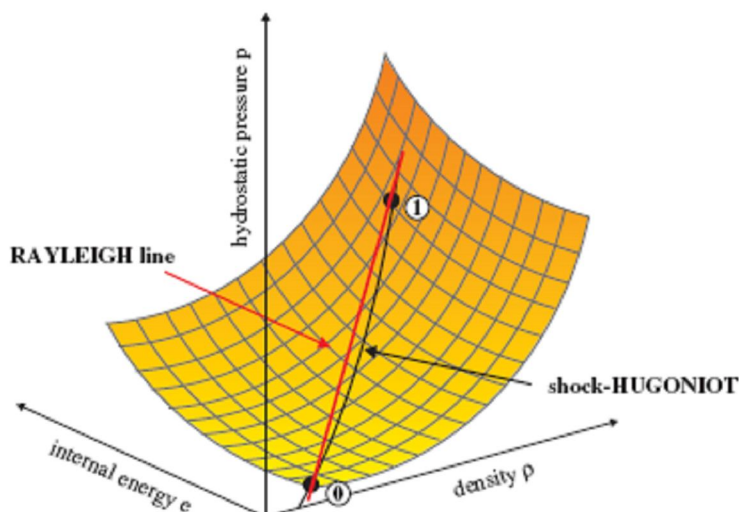


Figura 6.3: Ecuación de estado de Hugoniot: relación presión-densidad-energía [70].

La ecuación de estado que proporciona una caracterización termodinámica del material es un conjunto de datos tridimensionales correspondientes a dos variables de las ecuaciones de conservación y de la energía. El conjunto de todos estos datos permite construir una superficie en el espacio como la mostrada en la Figura 6.3 mediante la relación presión-densidad-energía.

Un punto en la superficie de Hugoniot se define como un estado simple de choque a una cierta presión p_1 en el material. La presión en un choque de onda no sigue la superficie p - ρ - e , sino una línea recta desde el estado inicial 0 en (p_0, ρ_0, e_0) al estado de choque 1 en (p_1, ρ_1, e_1) , conocida como línea de Rayleigh. Esto causa una discontinuidad en la presión, densidad y energía.

La pendiente de la línea de Rayleigh se puede determinar a partir de las ecuaciones de conservación (6.1) como:

$$\frac{p_1 - p_0}{1 - \rho_0 / \rho_1} = -\rho_0 \mu_s^2, \text{ sabiendo que: } \frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{V_1}{V_0} \text{ (conservación de la masa)} \quad (6.2)$$

Donde p es la presión, ρ es la densidad, V el volumen y μ la velocidad de choque.

De este modo, el conjunto de los datos de Hugoniot dan lugar a la ecuación de estado. Para el hormigón, ésta se presenta en la Figura 6.4. En ella, la presión es positiva en compresión, y la deformación volumétrica ε_v es positiva en tensión. El modelo de

compactación es lineal en energía interna por unidad de volumen. El manual de LS-DYNA, versión 960 [115] especifica que, durante el proceso de carga (compresión), la presión está definida por:

$$p = C(\varepsilon_v) + \gamma T(\varepsilon_v)E \quad (6.3)$$

La descarga ocurre con una pendiente correspondiente al módulo de elasticidad en el punto de mayor deformación volumétrica. La recarga seguirá el camino de descarga hasta el punto donde ésta comenzó y, después, continuará la curva de carga descrita en la ecuación (6.3).

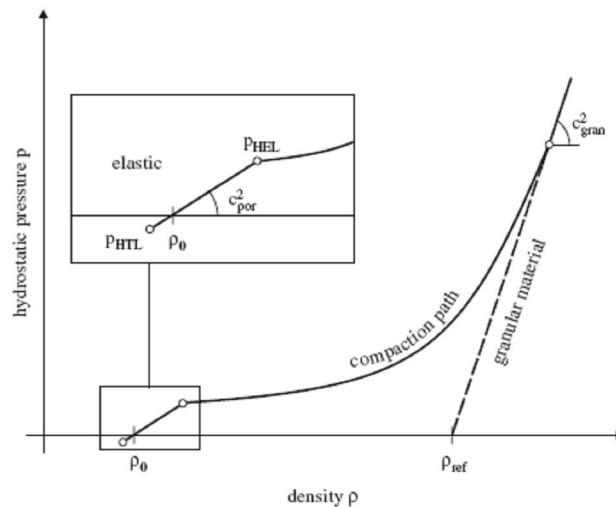


Figura 6.4: Ecuación de estado de Hugoniot para el hormigón [70].

La porosidad del hormigón da lugar a una respuesta a la compactación no lineal (por ejemplo, en el caso de la presión frente a la deformación volumétrica), en contraste con los metales, donde la pendiente de la presión aplicada frente a las deformaciones es una constante, llamada módulo de elasticidad. La naturaleza frágil del hormigón propicia diferentes valores de la resistencia a la tensión y a la compresión; no como en el caso de los metales, donde se asume que el módulo de elasticidad es el mismo tanto en compresión como en tracción. Por último, otra diferencia entre los hormigones y los metales es que la resistencia a cortante de los hormigones crece al incrementar el confinamiento.

Al producirse el contacto, cuando comienza la carga de compresión, la respuesta al impacto no difiere mucho del caso estático. Esta parte elástica, que va desde el límite de tensiones hidrostático (pHTL) hasta el límite elástico de Hugoniot (pHEL), se caracteriza porque la densidad es igual a la inicial, ρ_0 , y porque la pendiente es igual al cuadrado de la velocidad inicial de la onda elástica. Las diferencias entre ambos casos se establecen una

vez que el nivel de rotura es suficiente para que la relación tensión-deformación deje de ser lineal. La falta de linealidad se debe principalmente a cambios estructurales en forma de microgrietas. De este modo, el comportamiento del hormigón no está controlado sólo por las propiedades elásticas del material, sino por la velocidad de proliferación, extensión y propagación de las microgrietas [36, 35]. Estas no se extienden instantáneamente y, por lo tanto, el nivel de tensiones es creciente en el tiempo, las grietas tardarán un cierto tiempo en propagarse a cada nueva posición de equilibrio correspondiente al estado de tensiones. Por cada cambio en el nivel de tensiones durante un impacto, el tiempo necesario para alcanzar el nuevo estado de equilibrio depende de la velocidad de propagación de las grietas. De este modo, habrá un retraso aparente en el proceso de rotura, mientras que las tensiones crecen más rápido que el tiempo necesario para que las grietas alcancen la nueva posición de equilibrio. Es decir, en el caso de un impacto, para un mismo nivel de agrietamiento, las tensiones en el caso estático serán menores que en el caso dinámico. En el estado de compactación, la rigidez es el cuadrado de la velocidad de onda en el material granular [70]:

$$c_{\text{gran}}^2 = \Delta p / \Delta \rho \quad (6.4)$$

Esto provoca una respuesta inelástica del hormigón, lo que hace que éste se comporte como un material granular, en el que las deformaciones laterales crecen a mayor velocidad que las deformaciones normales debido a una disminución en la cantidad de grietas con respecto a las tensiones aplicadas. Además, una vez que la respuesta del material es no lineal, el módulo de Poisson será menor que su valor en el caso estático para cada nivel de tensiones axiales. En el momento en que la carga alcanza un nivel entre el 40 y el 60 % de f_c , el módulo de Poisson comenzará a crecer rápidamente [35].

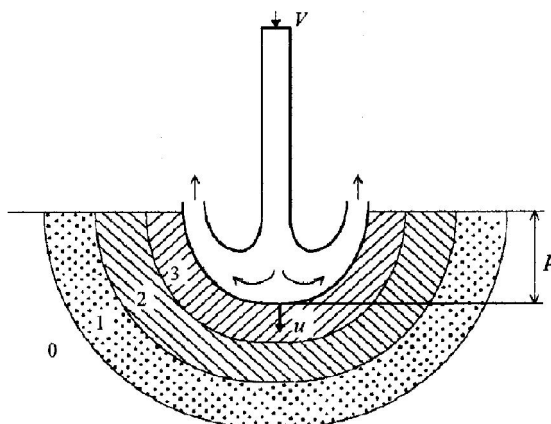


Figura 6.5: Esquema de penetración en el hormigón endurecido [98].

En la Figura 6.5 [98], se muestra el esquema de penetración de un objeto en un material semifrágil como el hormigón en el que se forma una onda de choque con una estructura de tres frentes. Éstos dividen al material en tres zonas con diferentes estados entre ellas: la zona “0” o de material sin perturbar; la zona “1”, de material elásticamente deformado; la zona “2”, de material fracturado por grietas radiales; y la zona 3 de material pulverizado con grietas de cortante.

6.1.2. Daño ocasionado al hormigón debido a impactos repetidos (fatiga)

La fatiga es un proceso de daño progresivo y permanente del material bajo cargas repetidas. Convencionalmente, se hace una distinción entre fatiga de baja y alta amplitud. Ciclos repetidos de gran amplitud (impactos), donde la respuesta del material es no lineal, dan lugar a un gran daño del hormigón en un número relativamente pequeño de ciclos. Este caso de carga se produce en situaciones como pavimentos aeroportuarios, donde el hormigón se ve sometido a cargas repetidas de alta amplitud debidas al paso de los aviones.

Cada carga cíclica actúa cambiando un poco la estructura interna del material. Las concentraciones de tensiones en la punta de las grietas son, por lo tanto, la base para el daño en cada nuevo ciclo de carga. Las cargas repetidas causan un desarrollo de las grietas existentes, creando conjunciones de las mismas, lo que finalmente resultará en una ampliación de las grietas a través del espécimen incluso aunque las tensiones aplicadas sean inferiores a las del caso estático [56].

Antes del desarrollo de la mecánica de la fractura, que permitió estudiar la fatiga en metales como un problema de crecimiento de grieta, la única información de la que se disponía para los diseños sometidos a fatiga era la curva S-N, que relaciona la tensión aplicada con el logaritmo del número de ciclos hasta la rotura. Esta curva no proporciona indicación alguna sobre la disminución de la rigidez, el mecanismo de daño, la presencia de grietas o el cambio en las características de los materiales como consecuencia del proceso de degradación [126]. Además, su implementación requiere un gran número de datos experimentales seguidos de un análisis estadístico. Los resultados no se aplican a otros casos de diseño con diferentes configuraciones de carga o condiciones de contorno [165].

La explicación mecánica de la evolución del daño debido a cargas repetidas está todavía desarrollándose [131]. Las aproximaciones mecanicistas se basan en aplicar los conceptos de daño o fractura para modelizar el daño en el material por impactos repetidos. Una aproximación básica en la que se relaciona el incremento de la longitud de grieta por ciclo de carga con la amplitud del factor de intensidad de tensiones se encuentra en los trabajos de Irwin [88], que se refieren a los fenómenos de fatiga en metales con la fractura a través de los factores de intensidad de tensiones. Más tarde Paris [139] propuso una relación matemática entre los ciclos y la longitud de la grieta, donde era necesario determinar experimentalmente los parámetros a través de los cuales se puede estimar el tamaño de la grieta. La expresión de crecimiento de la grieta para amplitud constante es:

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^c \quad (6.5)$$

Donde:

a = Tamaño de la grieta (o la variable que se estudie en cada caso)

ΔK = Es el factor de intensidad

A y c = Constantes del material

En la práctica estas teorías han resultado tan sólo eficaces en problemas cíclicos con amplitudes de carga constantes y en materiales homogéneos. Además, a pesar de que en muchos estudios [25, 26, 165] se realiza un estudio exhaustivo de la propagación de grieta en el hormigón por fatiga por medio de la ecuación de Paris, partiendo de que las constantes dependen de las características del material, en ninguno de ellos queda claro si estas son independientes o no del rango de cargas aplicadas.

También se han propuesto aproximaciones mecánicas que utilizan el concepto de mecánica de la fractura para estudiar la propagación de grietas. Subramaniam et al. [165] demostraron que las diferentes etapas en la respuesta del hormigón a las cargas repetidas pueden ser interpretadas en términos de los diferentes mecanismos que influyen en la respuesta estática.

Mu et al. [131] especificaron que el cambio de rigidez durante la fatiga sigue una curva en forma de S (Figura 6.6) con tres partes claramente diferenciadas: durante los primeros ciclos existe una rápida caída de la rigidez (Región I), que es seguida por una región en la que se produce un cambio gradual, casi lineal (Región II). La pendiente lineal de descenso sugiere que el daño aumenta a velocidad constante en el material en esta etapa. Ésta deriva

a un descenso rápido de la rigidez previo al fallo (Región III).

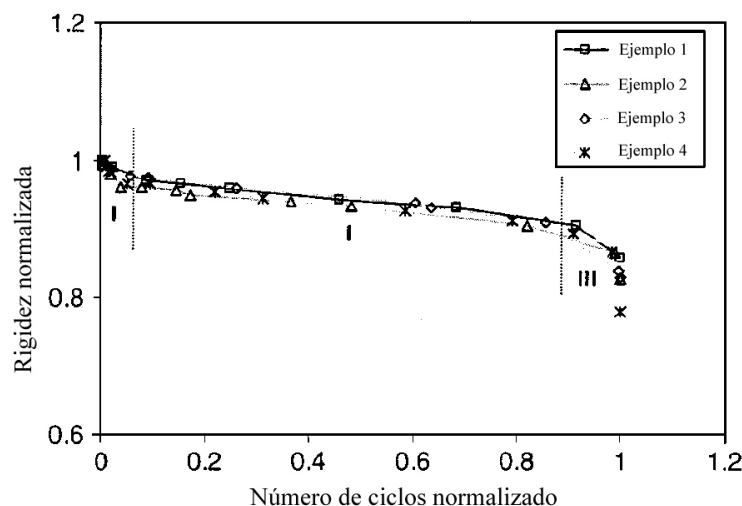


Figura 6.6: Relación entre la rigidez normalizada y el número de ciclos normalizado con la carga aplicada al 75% de la resistencia estática [131].

Otros investigadores han obtenido también conclusiones similares en ensayos de fatiga por resistencia a flexión. Stang y Zhang [163] presentaron evidencias de que la relación entre la longitud de las grietas por fatiga y el número de ciclos tiene forma de S. Sus conclusiones fueron verificadas por los experimentos de fatiga por flexión dirigidos por Subramaniam et al. [165], que encontró que la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga en el hormigón exhibe una etapa de deceleración seguida por una etapa de aceleración. En la etapa de deceleración, el ratio de crecimiento de grietas decrece con el incremento de la longitud de éstas, mientras que en la etapa de aceleración, hay un crecimiento constante de la grieta hasta el fallo. El punto de inflexión entre estas dos etapas se encuentra alrededor del 40% de la vida por fatiga del espécimen.

En compresión estática, la zona dañada de las probetas presenta una distribución no uniforme del mapa de grietas [131] (Figura 6.7 (a)). Esta zona se puede modelizar como una banda dañada (Figura 6.7 (b)). Usando esta simplificación, aparecen dos zonas distintas en el modelo: Una zona de deformación volumétrica y una zona dañada, que empieza a producirse justo en el momento de recibir la tensión máxima. En los dos casos, la pendiente de la curva tensión-deformación antes del máximo es la misma tanto en el hormigón sin dañar como en el hormigón dañado. Antes del período de tensión máxima, se disipará la misma cantidad de energía en la zona dañada y en la zona que simplemente sufre compresión debido a las microrroturas (Figura 6.7 (c)). Durante la etapa posterior a la

tensión máxima, la zona sometida a compresión se descarga y la zona dañada disipa más energía. Si se asume que la deformación total en la zona dañada se compone de dos partes: una similar a la de deformación volumétrica del hormigón y otra debida a la deformación inelástica en la zona dañada, se puede afirmar que:

$$\varepsilon_z = \varepsilon_b + \delta / l \quad (6.6)$$

Donde la longitud de la zona dañada (l) es independiente de la longitud de la probeta (L) y la deformación que tiene lugar después de la tensión máxima (δ) puede describir aproximadamente, el comportamiento inelástico durante la relajación. Esto significa que la respuesta del material tras la aplicación de la tensión máxima es la misma, independientemente de la longitud de la probeta. La energía absorbida después de alcanzar el máximo de tensiones es independiente de la longitud del espécimen.

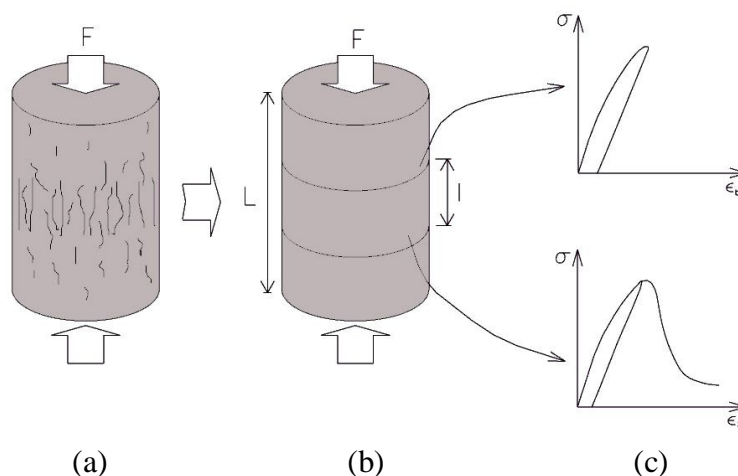


Figura 6.7: Modelo de daño localizado para el caso de rotura en compresión. (a) Distribución del daño. (b) Distribución de la banda dañada. (c) Comportamiento antes de la tensión máxima y comportamiento después de la misma[131].

Este modelo de daño localizado se emplea especialmente para explicar el mecanismo de fallo por fatiga de los pavimentos de hormigón para aeropuertos. Según averiguaron Mu et al. [131], los desplazamientos inelásticos posteriores a la tensión máxima obtenidos mediante ensayos estáticos, actuarían como envolvente de los puntos de desplazamiento inelástico obtenidos por ensayos de fatiga a una cierta carga, con lo que se llega a la conclusión de que los desplazamientos inelásticos obtenidos por medios estáticos gobiernan los mecanismos de fallo por fatiga. Además, el fallo por fatiga por compresión es también un fenómeno localizado.

6.2. MEDICIÓN DEL DAÑO ACUMULADO DEL PAVIMENTO SUJETO A IMPACTOS REPETIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL CRÁTER PRODUCIDO.

La atenuación de las ondas tras el impacto se debe a dos mecanismos separados: la atenuación geométrica y la atenuación del material. La primera es un efecto extrínseco, que incluye la geometría de las muestras y la apertura de difracción de los disipadores (áridos o todo material incluido a la pasta de cemento y extraño a ésta). En el caso ideal de una fuente y un detector, la amplitud de una onda de Rayleigh, que se propaga a lo largo de un frente de onda cilíndrico, disminuye como una función de la inversa del cuadrado de su distancia de propagación [57]. La atenuación del material es un efecto intrínseco causado tanto por la absorción como por la dispersión. Las pérdidas por absorción son efectos materiales como el comportamiento viscoelástico o la fricción interna debida al trabajo entre dos materiales cuando éstos no están elásticamente unidos. Las pérdidas por dispersión son debidas a la heterogeneidad del material y dependen tanto del tamaño del disipador como del número de disipadores por unidad de volumen, su distribución, y sus propiedades acústicas en relación a los otros materiales. Por otra parte, puede darse una atenuación extra en el caso de que algo distorsione el frente de onda.

La atenuación del material causa una disminución exponencial en la amplitud de onda ($e^{-r\alpha}$), donde r es la distancia de propagación y α es el coeficiente de atenuación de la frecuencia del material. Debido a que las pérdidas por absorción y por dispersión se producen al mismo tiempo, el coeficiente α es la suma de los dos efectos. La absorción se incrementa linealmente con la frecuencia, mientras que la dispersión se divide en tres regiones distintas, dependiendo tanto del diámetro de los disipadores (\overline{D}), como de la longitud de onda (λ) [89]. En la primera región (Figura 6.5), que se encuentra en régimen de Rayleigh, el diámetro principal de los elementos disipadores es muy pequeño en comparación con la longitud de onda λ y el coeficiente de disipación es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia f :

$$\alpha(f) = a_1 f + a_2 \overline{D}^3 f^4 \quad (6.7)$$

Donde a_1 es el coeficiente de absorción y a_2 es el coeficiente de disipación. En la segunda región (régimen estocástico), donde la longitud de onda es del mismo orden que el

diámetro de los principales disipadores \bar{D} , el coeficiente de absorción varía con el cuadrado de la frecuencia:

$$\alpha(f) = b_1 f + b_2 \bar{D} f^2 \quad (6.8)$$

Donde b_1 es el coeficiente de absorción y b_2 el coeficiente de disipación. En la tercera región, la longitud de onda es pequeña en comparación con el tamaño medio del disipador.

Jacobs et al. [89] observaron que, para un material cementoso dado, existe una gran variabilidad en la atenuación de onda tras un impacto. Estos autores atribuyeron esta variabilidad a la aleatoriedad y heterogeneidad presentes en los materiales con base cementosa. Según ellos, las pérdidas por dispersión son prácticamente despreciables al ser comparadas con las pérdidas por absorción. De esta manera, el tamaño de los áridos no es el factor limitante en la atenuación de energía de un impacto.

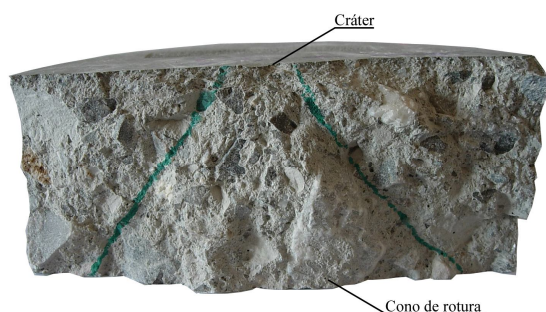


Figura 6.8: Ejemplo real del modo de fallo de la losa de hormigón por impacto.

Knab y Clifton [102] investigaron la variación de la velocidad de propagación de onda en el hormigón tras múltiples impactos. Encontraron que, en pavimentos de hormigón reforzados con fibras, para la geometría del material estudiada, se producía una reducción de hasta el 40% en la velocidad de pulso hasta la rotura de los especímenes ensayados. Estos autores apuntaron que el porcentaje de reducción en la velocidad de pulso podía ser debido al movimiento del cono de rotura (Figura 6.8), en que las ondas de sonido viajan por su periferia.

Estos autores encontraron que existe una relación lineal entre la reducción en la velocidad del sonido a lo largo del hormigón y la profundidad del cráter que se produciría en el mismo debido a impactos repetidos, la cual se ve lógicamente incrementada con el número de impactos. De esta forma, la profundidad del cráter será una buena medida para calcular

el daño acumulado en el hormigón y conocer, de esta manera, el efecto del acabado superficial mediante la comparación de distintos tipos de pavimentos. En la Figura 6.9 se muestra el efecto de la huella tras varios impactos sobre el pavimento. En la Figura 6.9 (a) se muestra la plastificación del acabado superficial del hormigón tras un cierto número de impactos. En la Figura 6.9 (b) se muestra la rotura del acabado superficial sin que se haya producido la rotura del pavimento.

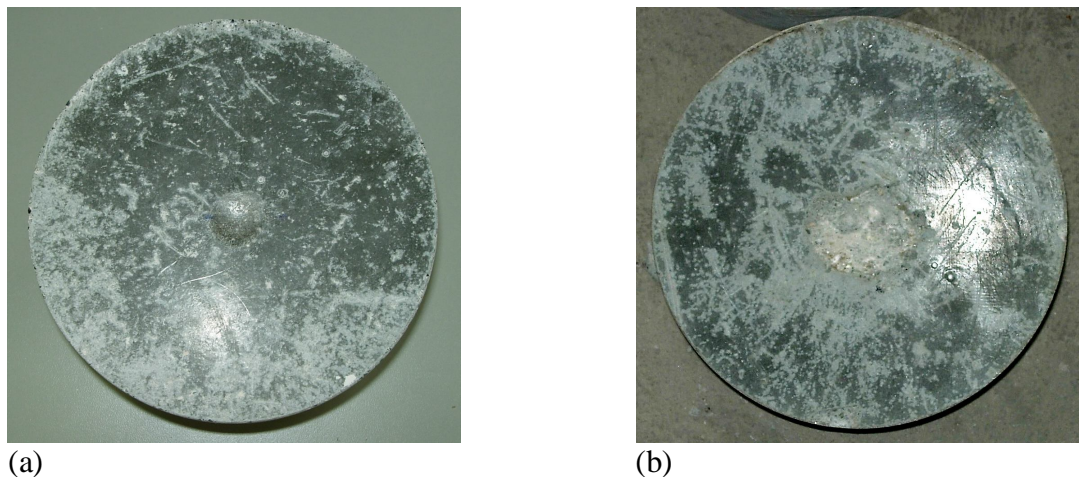


Figura 6.9: Huellas en el hormigón causadas por los impactos. (a) Huella en una probeta de acabado de corindón (pocos impactos). (b) Caso de rotura del acabado superficial

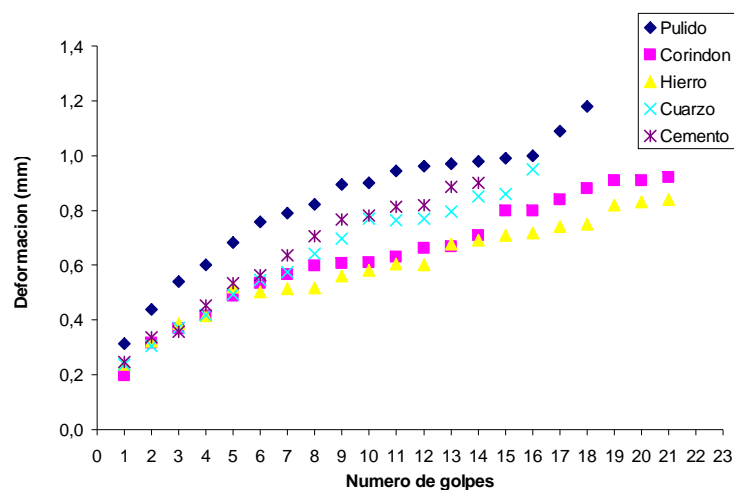


Figura 6.10: Evolución de las huellas en el hormigón causadas por impactos repetidos sobre probetas tomadas de pavimentos con diferentes tipos de acabados.

De este modo, teniendo en cuenta los cambios de rigidez durante la fatiga que Mu et al. [131] especificaron, así como las etapas que estos autores [102, 131] determinaron para la profundidad del cráter para impactos repetidos se tiene que las etapas en las curvas representadas en la Figura 6.10 y en la Figura 6.11 serán:

- Etapa 1: Se produce la rotura inicial y la formación inicial del cráter debajo del proyectil. Comienza a formarse la interfaz entre el cono de rotura y el resto de la probeta. Esta etapa corresponde al crecimiento inicial y, por lo tanto, a la parte más baja de las curvas. En la práctica, la etapa 1 representará los primeros meses de vida del pavimento
- Etapa 2: En esta etapa ocurre la formación de la interfaz de grietas entre el cono de rotura (Figura 6.8) y el resto de la probeta. A pesar de todo, durante esta etapa el cono y la interfaz todavía tienen una cierta resistencia a cortante, actuando como un solo cuerpo. Esta etapa se corresponde a la etapa intermedia de las curvas de fatiga, en la que la pendiente no es tan grande como en la anterior o en la siguiente. En la práctica, esta etapa representará el tiempo de vida del pavimento antes de que este tenga que ser reparado.
- Etapa 3: En ella etapa se ha completado la formación de la interfaz de grietas entre el cono y el resto de la probeta y el cono comienza a moverse. En este momento ocurre un descenso de la rigidez del hormigón (Figura 6.6) con una reducción significativa de la transmisión de esfuerzos a cortante entre el cono y la probeta.

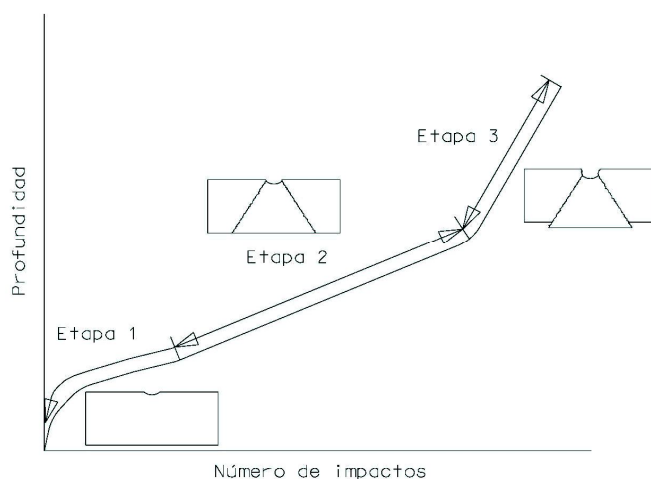


Figura 6.11: Representación de las etapas de fallo en las probetas sometidas a sucesivos impactos [102].

Por último, en la Figura 6.10 puede observarse cómo se ven influenciadas las curvas de profundidad de huella por las características del acabado en el pavimento. A primera vista se destaca que la etapa más afectada es la primera. Esto es lógico, ya que en este momento todavía no se ha producido la formación de la interfaz de grietas entre el cono y el resto de

la probeta. Esta etapa se ajusta fácilmente a una parábola. En principio, los parámetros de los que dependerá son la rigidez del material y la energía de los impactos, que variarán el ratio de crecimiento del cráter por ciclo. Además, se observa cómo la pendiente de la etapa 2 es distinta en los distintos tipos de pavimento. Esta pendiente no depende de la energía del impacto [131]. De este modo sólo dependerá de las características del material.

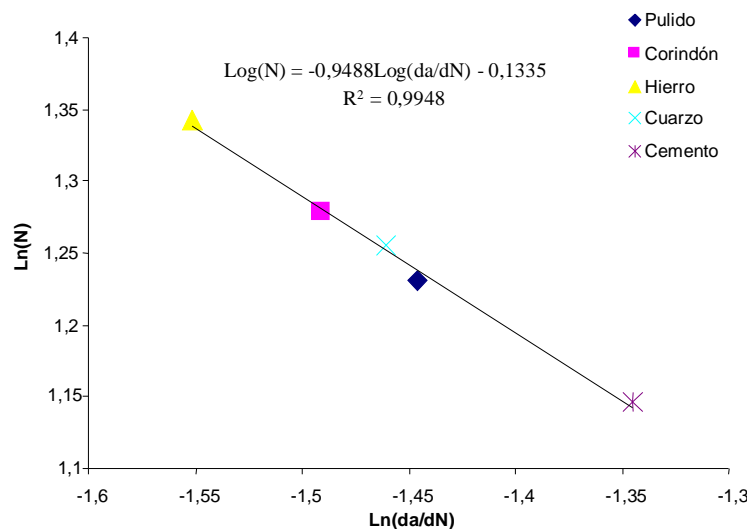


Figura 6.12: Relación entre el ratio de crecimiento de la etapa 2 y el número de ciclos hasta rotura en función del tipo de acabado en el pavimento

La pendiente de la Etapa 2 obtenida ajustando una recta de regresión a partir de los datos es:

$$\text{Log}(N) = -0,9488\text{Log}(da/dN) - 0,1335 \quad (6.9)$$

Esta ecuación, en la que se encuentran representadas las constantes de la ley de crecimiento del cráter es muy similar a la averiguada por Mu et al. [131], e indica que, en un pavimento, la pendiente de la Etapa 2 será función de la capacidad de absorción de energía del mismo. De este modo, a partir de la ecuación (6.9), se puede predecir la vida útil por fatiga de un pavimento industrial con tan sólo realizar una serie de ensayos de fatiga con unos pocos ciclos de carga y conociendo el tráfico sobre el pavimento. En la ecuación (6.9) el segundo miembro es función del tipo de ensayo realizado.

En el caso de un acabado muy rígido, la pendiente de la Etapa 2 crecerá, pero al añadirle disipadores, como en el caso del hierro o el corindón, se conseguirá que el daño transmitido sea más pequeño y, por lo tanto, el crecimiento más lento, logrando además, un efecto beneficioso por la disminución de la huella en el pavimento de hormigón. Por otra

parte, si el acabado es muy deformable absorberá más energía, con lo que la pendiente de la segunda etapa disminuirá. Así, en la Figura 6.12 se observa cómo en aquellos pavimentos en los que se añade algún tipo de disipador al árido la pendiente de la segunda etapa disminuye, así como aumenta el número de ciclos máximo que resiste el pavimento. De esto se deduce que los endurecedores superficiales actúan rigidizando la capa superficial, es decir, impidiendo que en las primeras etapas la profundidad del cráter crezca muy deprisa. Como contrapartida, el pavimento al que se le ha añadido cemento como endurecedor superficial presenta la pendiente mayor de todas. Es decir, colocar una capa más rígida al pavimento podría ser perjudicial para el mismo.

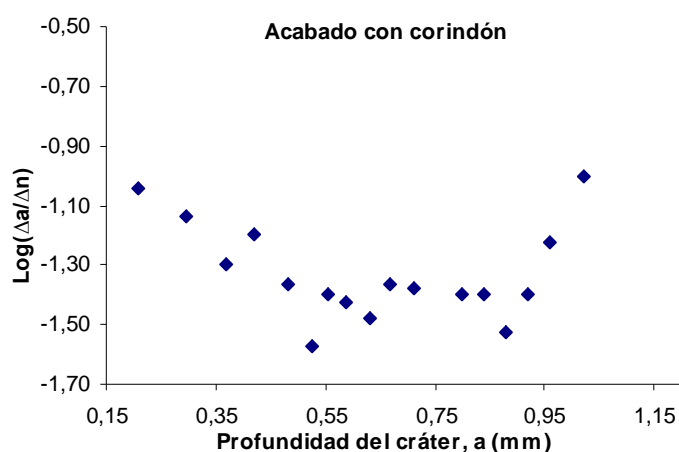
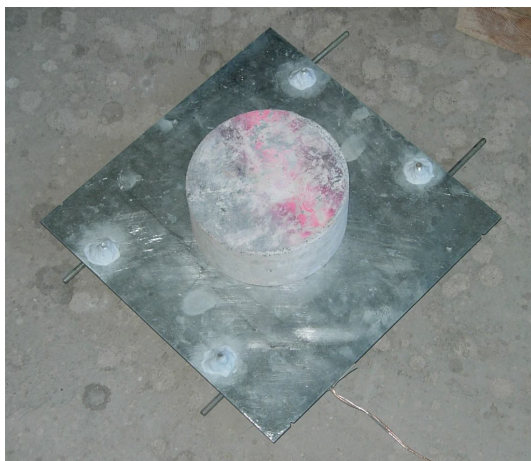


Figura 6.13: Ejemplo de ratio de crecimiento del cráter en un ejemplo de pavimento acabado con corindón tras una serie de impactos repetidos.

En la Figura 6.13, se muestra el ratio de crecimiento de la profundidad del cráter por impacto como función de su profundidad. El ratio de crecimiento entre los impactos m y n ha sido calculado como $\Delta a = (a_n - a_m)/(n - m)$ donde a_n y a_m son la profundidad de cráter al realizar los impactos n y m , respectivamente. El ratio de crecimiento de cráter sigue un proceso de dos etapas; una de deceleración, seguida por otra de aceleración hasta el fallo. Existe un punto claro de inflexión donde el ratio de crecimiento de la profundidad del cráter cambia de la deceleración a la aceleración. Este punto tiene lugar en la misma profundidad de cráter que el punto de inflexión en la gráfica donde se representa la profundidad frente al número de ciclos. En todos los casos se obtuvo que la etapa recta tuvo lugar aproximadamente al 40 % de los ciclos hasta rotura representados en la Figura 5.10, lo cual coincide de nuevo con lo indicado por Subramaniam et al. [165].

6.3. MEDICION DEL DAÑO ACUMULADO POR IMPACTOS EN UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN MEDIANTE EL USO DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Para la medición del daño acumulado se ha preparado el dispositivo mostrado en la Figura 6.14. Éste consiste en una placa de carga instrumentada sobre dos apoyos, de manera que su movimiento quedaba restringido por cuatro tornillos, empotrados en los apoyos y sujetos a la placa por masilla epoxi.



(a)



(b)



(c)

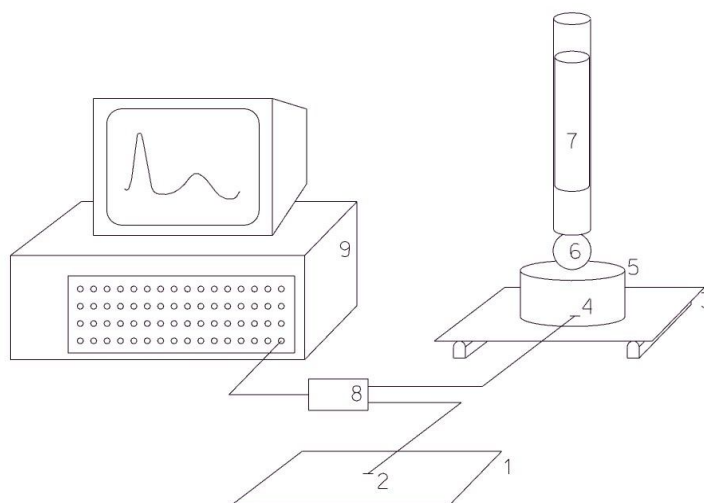


(d)

Figura 6.14: Aparato usado para medir el daño acumulado por impacto en el hormigón mediante el uso de galgas extensométricas. (a) Placa de carga y probeta usada en el ensayo. (b) Placa de carga y marco usado para retener la esfera. (c) Bola de acero usada para transmitir las cargas al hormigón. (d) Guía tubular de diámetro suficiente para permitir la caída libre de la maza metálica.

El dispositivo consta de los siguientes elementos (Figura 6.15):

- Dos chapas de acero galvanizado de 300x300x2 mm. Este material tiene un módulo de elasticidad 1.3 GPa y f_{cm} 250 MPa. La primera de estas chapas es utilizada para colocar la galga activa; la segunda para colocar la galga pasiva.
- Dos apoyos de acero.
- Bola transmisora de cargas de acero, con dureza HV 400 y 65 mm de diámetro.
- Marco de madera, hecho de este material por su bajo coste y relativa ligereza que restrinja los movimientos de la bola en la horizontal y la permitía deslizar sin rozamiento en la vertical.
- Tubo guía que permite la caída libre de la maza a través de él.
- Maza metálica cilíndrica de 4.53 kg que cae desde una altura de 427 mm y con un diámetro en la base de 50 mm.



- 1 = Chapa de acero galvanizado
 2 = Galga pasiva
 3 = Chapa de acero galvanizado para controlar las deformaciones por impacto
 4 = Galga activa
 5 = Probeta de hormigón
 6 = Bola transmisora de cargas
 7 = Maza metálica
 8 = Puente de Wheatstone
 9 = Aparato de toma de datos

Figura 6.15: Esquema del sistema usado para medir el daño acumulado en el hormigón.

En el centro de la chapa de carga se coloca una galga para medir las deformaciones durante el impacto. La galga utilizada es una Tokyo System FLA-6-11 L de 120 Ω y factor de galga 2.11, pegada con un adhesivo M Bond 200 (Figura 6.16). Para asegurar el correcto

pegado, la superficie de la placa se lija con carburo de silicio (400 y 600) y se limpia con acetona. Tras ello, para cubrir la instalación con el fin de aislarla del ambiente se usa aislante SB Tape.



Figura 6.16: Galga Extensométrica FLA-6-11L de Tokyo Sistem de 120 Ω para ensayos de poca deformación [113].

El equipo utilizado en la toma de datos es un DEWETRON DEWE 801, con 32 canales de entrada con filtrado de señal, amplificador y software. Permite montar galgas extensométricas en cada canal configuradas a medio puente de Wheatstone y a puente completo.

Además, el equipo de adquisición cuenta con elementos que permiten registrar de manera óptima la señal de deformación; es decir, placas de amplificación de la señal (DW-MDAQ-BASE-5) y placas de filtrado de la señal que permitía eliminar el ruido producido por las conexiones (DW-MDAQ-FILT-5-BU). La cantidad de datos adquiridos por segundo puede variar entre 300 y 10000 Hz según la configuración del software.

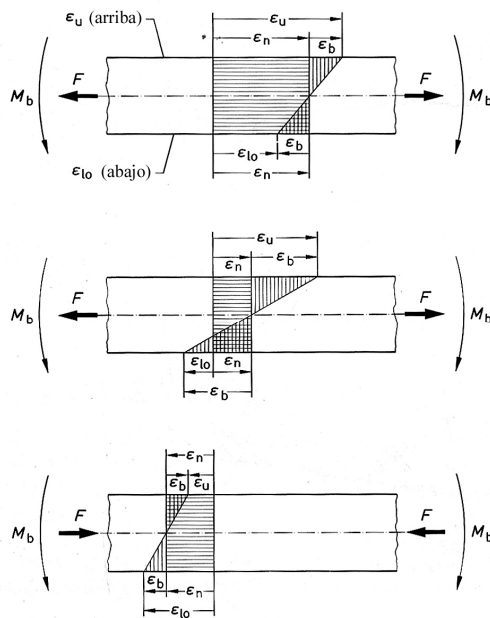
Como configuración de partida se elige una excitación de 10 voltios para las galgas y una velocidad de toma de datos de 10000 d/s (Hz). A fin de mejorar la calidad de la señal, se filtraba durante la realización del ensayo con un filtro de 30 Hz.

El esquema eléctrico empleado corresponde con el denominado medio Puente de Wheatstone, que permite la compensación de la temperatura.

6.3.1. Medidas en la chapa de carga

En una barra sometida a tracción, las deformaciones longitudinales positivas ocurren en la dirección activa de la fuerza, mientras que en la dirección transversal las deformaciones

son negativas. En las barras de compresión, las deformaciones longitudinales son negativas, mientras que las deformaciones transversales son positivas.



Caso a: $\varepsilon_n > \varepsilon_b$

ε_u y ε_{lo} son ambos positivos

Caso b: $\varepsilon_n < |\varepsilon_b|$

ε_u positivo,

ε_{lo} negativo

Caso c: $-\varepsilon_n > |\varepsilon_b|$

ε_u y ε_{lo} son ambos negativos

ε_n = Deformación causada por la fuerza F

ε_b = Deformación debida al momento

ε_u = $\varepsilon_n + \varepsilon_b$

ε_{lo} = $\varepsilon_n - \varepsilon_b$

M_b = Momento aplicado en la placa

F = Fuerza aplicada en la placa

Figura 6.17: Distribución de tensiones en un objeto con cargas normales y momentos aplicados [82].

Las siguientes relaciones se aplican a las deformaciones longitudinales ε_1 [82]:

$$\varepsilon_1 = \frac{F}{A \cdot E} \quad (\text{En el caso en que haya una única fuerza normal: } \varepsilon_1 = \varepsilon_n) \quad (6.10)$$

Para las deformaciones transversales:

$$\varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_1 = -\nu \frac{F}{A \cdot E} \quad (6.11)$$

Las tensiones normales están dadas por las siguientes relaciones:

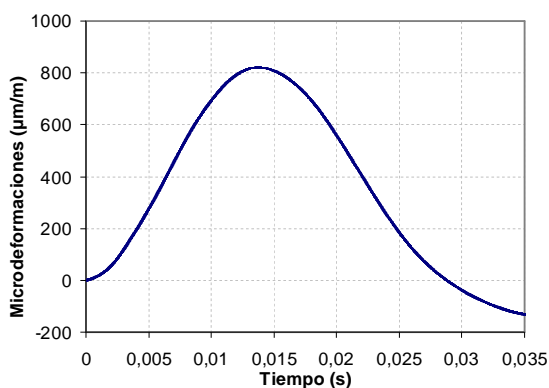
$$\sigma_n = \frac{F}{A} = \varepsilon_n \cdot E \quad (6.12)$$

En el caso de un elemento en que se aplica un momento, como ocurre a la chapa, una de sus caras tendrá una deformación positiva, mientras que en la otra, la deformación será negativa. Sin embargo, podría ocurrir en el caso en que las deformaciones normales sobrepuestas sean mayores que las debidas a los momentos que tuvieran el mismo signo en ambas caras (Figura 6.17).

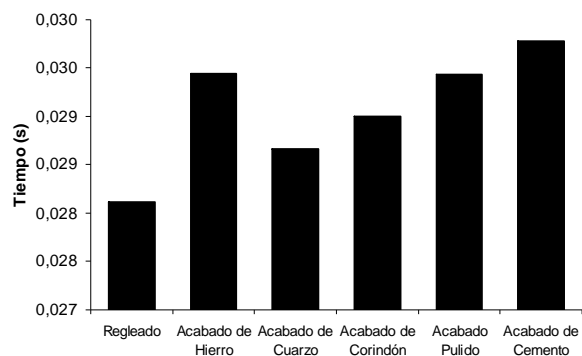
De este modo, para conocer la tensión en la placa a partir de las deformaciones medidas por el instrumento de adquisición de datos habrá que multiplicar, simplemente, las microdeformaciones obtenidas por el módulo de elasticidad del material que conforma la placa.

6.3.2. Resultados experimentales

Para cada impacto se obtiene una curva como la representada en la Figura 6.18 (a). Los tiempos de duración media del primer impacto para cada tipo de pavimento se representan en la Figura 6.18 (b). Tomando el máximo de cada una de las curvas en la Figura 6.18 (a) se obtienen los datos de la Figura 6.19 donde, con el fin de comprobar que el ensayo registra diferencias entre los distintos acabados, se han ensayado nueve probetas para cada tipo de pavimento. En la Figura 6.20 se muestra el daño acumulado tras impactos sucesivos.



(a)



(b)

Figura 6.18: (a) Microdeformaciones registradas el aparato para medir el daño acumulado por impacto. (b) Duración media del impacto para los diferentes acabados estudiados.

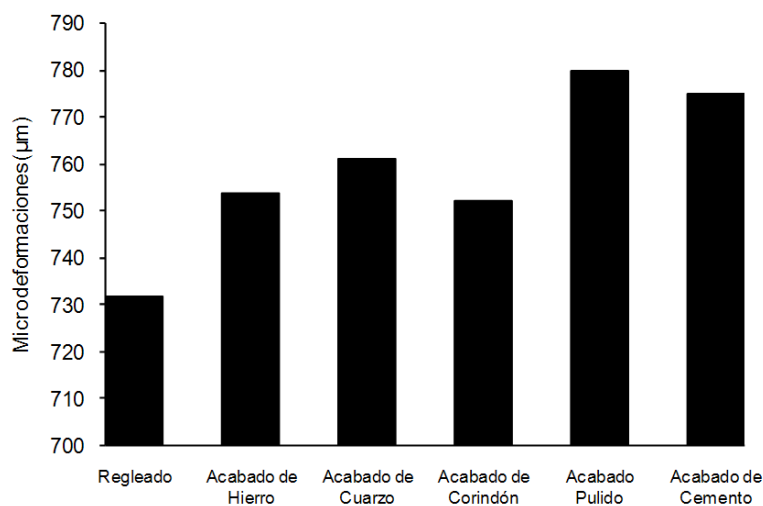
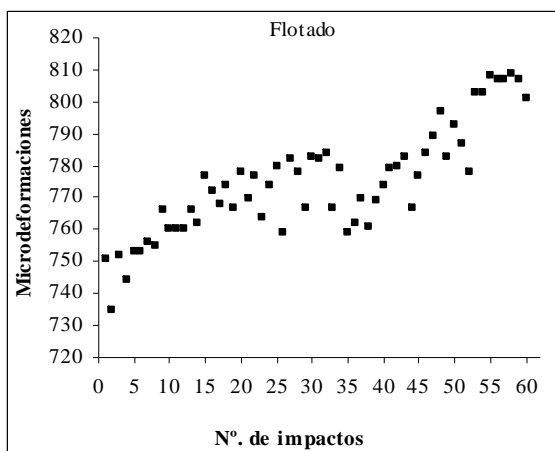
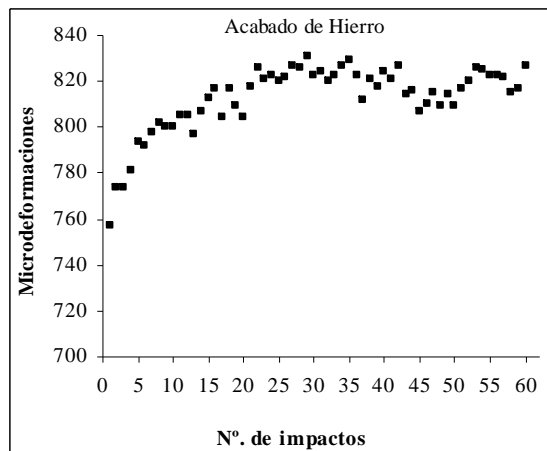


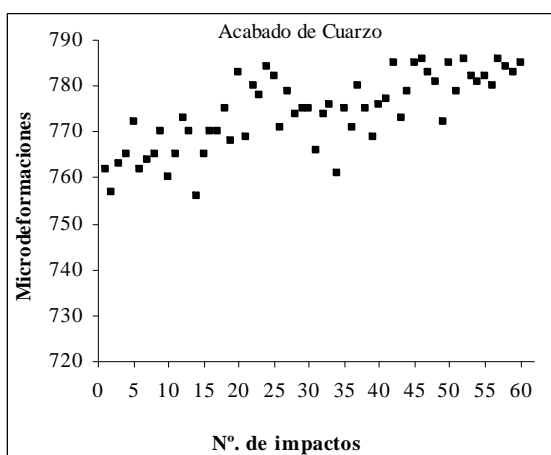
Figura 6.19: Microdeformaciones debidas al primer impacto medidas por el equipo de toma de datos.



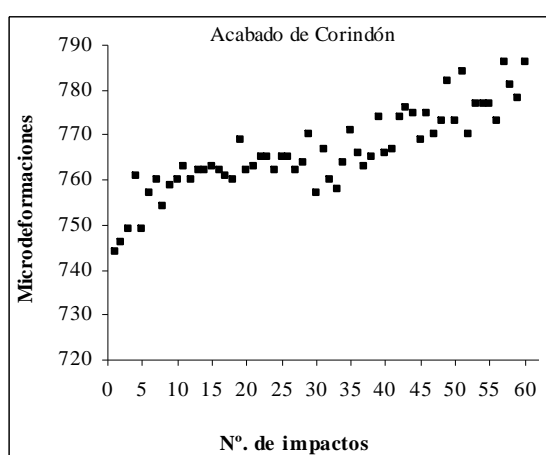
(a)



(b)



(c)



(d)

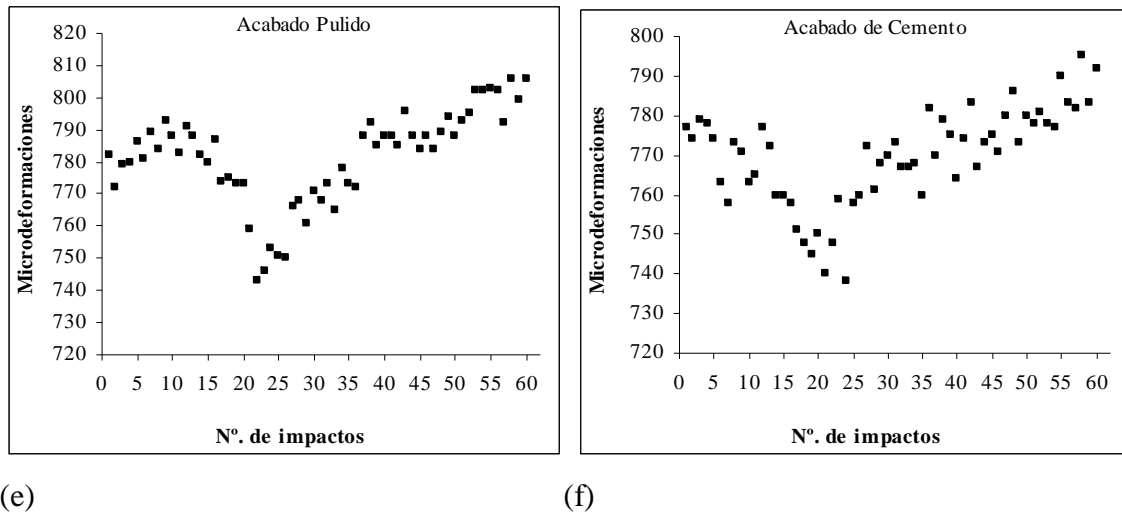


Figura 6.20: Microdeformaciones registradas en la chapa debidas al daño acumulado. (a) Pavimento flotado. (b) Pavimento con un acabado de hierro. (c) Pavimento con un acabado de cuarzo. (d) Pavimento con un acabado de corindón. (e) Pavimento con un acabado pulido. (f) Pavimento con un acabado de cemento.

6.3.3. Discusión de los resultados experimentales

En el ensayo donde se colocan las probetas sobre una chapa de carga, la distribución de cargas será distinta que en el caso en que la probeta se coloque sobre una superficie rígida: al deformarse la chapa de carga por causa del impacto, la mayor parte de las tensiones se acumulan en los bordes de la probeta, que se encuentran en contacto con la chapa, ocurriendo en muchos casos la rotura de los mismos y disminuyendo de esta manera la energía absorbida por el resto del hormigón (Figura 6.21).

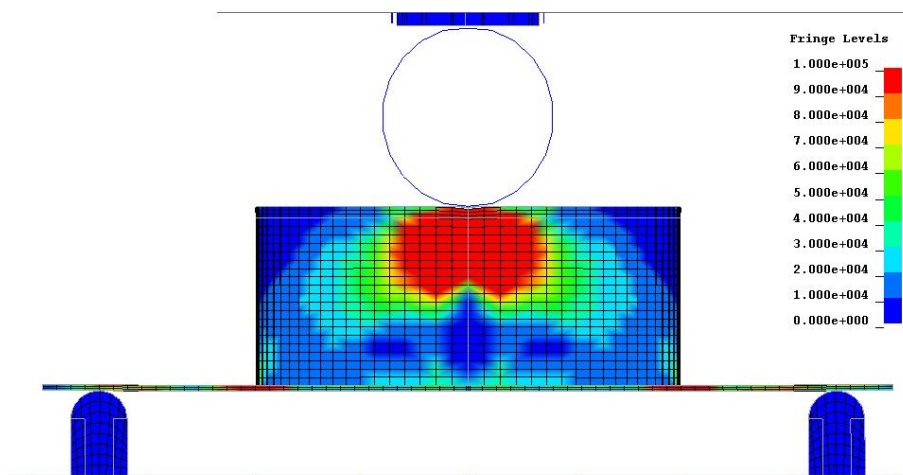


Figura 6.21: Vista de la distribución de tensiones mediante un programa de elementos finitos debido al impacto en las probetas de hormigón.

Además, de este modo, el área del cono de rotura del hormigón es mayor que en el caso en que las probetas se encuentren apoyadas sobre una superficie rígida, ya que como se observa en la Figura 6.21, éste parte desde el punto del impacto hasta el borde de las probetas, con lo que la misma energía se distribuye entre un área mayor. Es por esto que las probetas resisten más impactos. Por último, en este ensayo se observó que la mayor parte de las probetas rompían de la forma mostrada en la Figura 6.9 (b), mientras que en el caso en que la probeta se encuentre apoyada sobre una base rígida, las probetas romperán de la forma mostrada en la Figura 6.39 (a).

Podría entenderse que, cuando las microdeformaciones medidas por la galga son pequeñas, el pavimento será capaz de absorber más energía que en el caso en que sean grandes. Esto es porque una buena parte de la energía, que de otra manera se destinaría a deformar la chapa, se dedicará a la compactación y rotura del pavimento. En cualquier caso, en la Figura 6.19, al compararla con Figura 5.10 se observa cómo el pavimento que más resiste a impacto es aquel en el que el acabado absorbe más energía; es decir, el pavimento que ha sido simplemente regleteado.

Así, en la Figura 6.19 se observa que la mayor absorción de energía ocurre en el caso en que el acabado superficial es más deformable, como en el pavimento que ha sido simplemente regleteado, que tiene una densidad menor y una porosidad mayor (Apartado 5.2.4), y en el caso en que el endurecedor empleado sea corindón, que es un material muy frágil en el que una buena parte de la energía se emplea para romperlo. Por el contrario, ocurre que en los casos en que no se han empleado amortiguadores de energía en el acabado superficial (pavimento simplemente pulido y endurecido con cemento), se observa cómo las microdeformaciones crecen con respecto al resto de los acabados estudiados.

En la Figura 6.22 se muestra la relación que existe entre las microdeformaciones máximas producidas en la chapa por el primer impacto en el hormigón y el número máximo de impactos resistido por cada tipo de pavimento. En esta figura se observa una clara tendencia lineal en las características de absorción de energía con respecto a la vida útil del pavimento. Es decir, cuanto más energía absorbe el pavimento, más resistente será el mismo. De esta figura puede deducirse que realizar un acabado al que no se le añadan amortiguadores de energía (corindón, cuarzo, virutas de hierro, etc.) puede ser muy perjudicial [57], como se muestra en la Figura 5.10, donde se ve que el pavimento que

simplemente fue pulido o al que se le añadió cemento como endurecedor superficial son los que peor resistencia a impacto presentan.

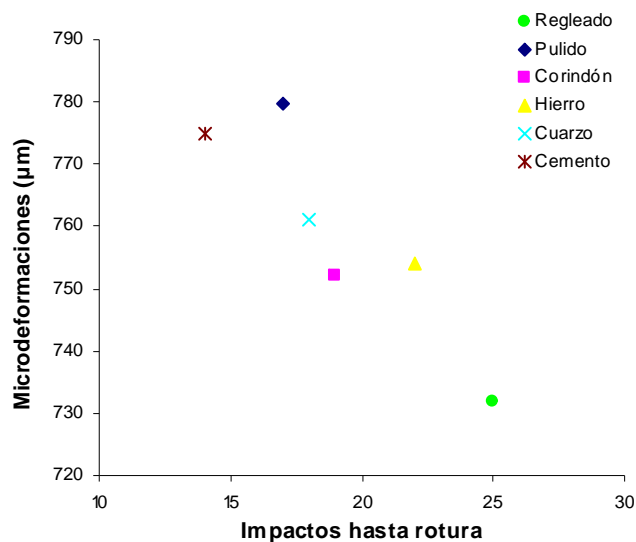


Figura 6.22: Relación entre las microdeformaciones al primer impacto y el número de impactos hasta rotura para cada tipo de acabado del pavimento.

En la Figura 6.20 se muestra la evolución de las microdeformaciones de la chapa al aplicarse sucesivos impactos sobre pavimentos con diferentes tipos de acabado. Se observa que las curvas se componen de tres partes (Figura 6.23). Las etapas de rotura del pavimento son:

- Etapa 1: Se produce la formación inicial del cráter y empieza dañarse el acabado. Al igual que en el Apartado 6.2 esta etapa se corresponde con el crecimiento inicial de las curvas.
- Etapa 2: En esta etapa ocurre la formación de la interfaz de grietas que provoca la desaparición del acabado en la zona donde las probetas están recibiendo los impactos. Durante esta etapa la probeta no está todavía completamente rota, con lo que un pavimento en esta etapa todavía podría seguir cumpliendo su función, aunque probablemente, el efecto combinado de la abrasión y los impactos acelerarían su destrucción.
- Etapa 3: Esta etapa corresponde con la desaparición del acabado superficial (Figura 6.9 (b)). En las gráficas de la Figura 6.20 se produce el aumento de la energía

absorbida por las probetas. Este efecto se corresponde con la pulverización del acabado, que desaparece dejando al descubierto la parte superior de la probeta sin pulir, no tan rígida ni tan compactada como la anterior y que por lo tanto no absorbe tanta energía como ésta.

Etapa 4: Esta última etapa corresponde con la absorción de energía por parte del hormigón del pavimento, que es el que recibe los impactos una vez que el acabado superficial ha desaparecido.

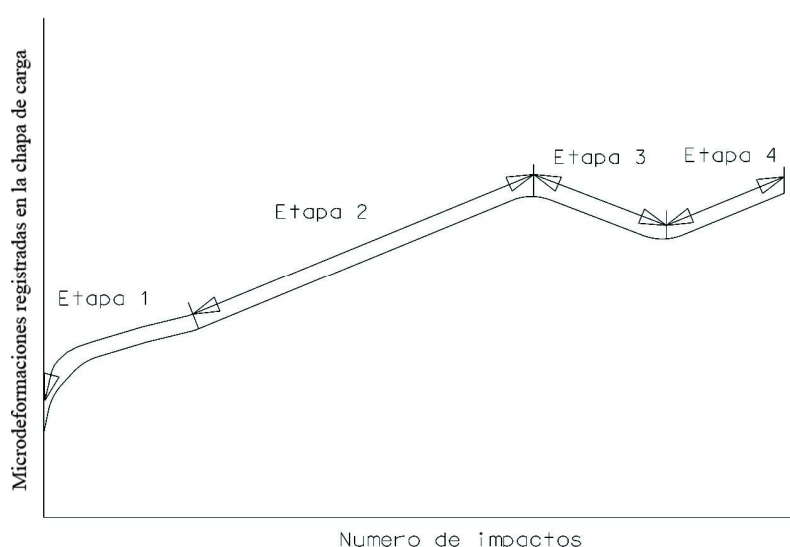


Figura 6.23: Esquema de la profundidad de las etapas de fallo de las probetas por impacto.

En la Figura 6.20 se observan también algunas diferencias entre las capacidades de absorción de energía de los diferentes pavimentos estudiados. Un caso que ha llamado especialmente la atención es el del pavimento acabado con virutas de hierro (Figura 6.20 (b)), donde se observa que la energía de impacto que absorbe es menor que en el resto de los pavimentos. Del mismo modo, en la Figura 6.10 se observa cómo este tipo de acabado es el que menos deformaciones sufre por impactos sucesivos, con lo que cabe deducir que existe una relación entre las deformaciones y la capacidad de absorción de energía de un pavimento; es decir, cuanto más capacidad de deformación tiene el mismo, mayor será la energía absorbida.

Por otra parte, será interesante señalar que en el caso del pavimento acabado con hierro, éste actuará de manera similar al de una viga armada; es decir, el hierro aporta mayor elasticidad al acabado, retrasando la aparición del cono de rotura haciendo un efecto de

“cosido” de las grietas e impidiendo en gran medida su propagación (Figura 6.24). Esto indica que uno de los factores limitantes a la hora de la ruptura de la probeta es su elasticidad.

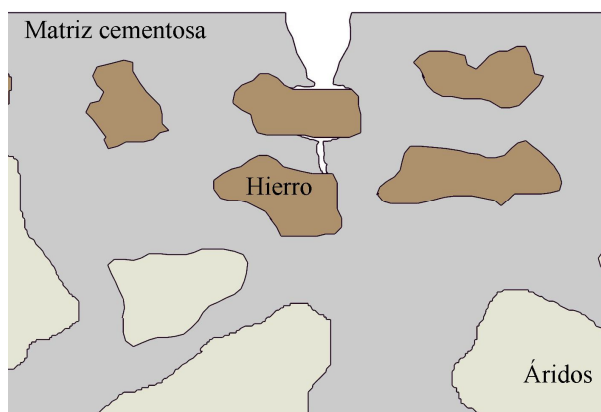


Figura 6.24: Esquema de crecimiento de grieta en el pavimento.

Por último, es importante destacar también la fragilidad que se observa en los gráficos correspondientes al acabado de cemento y simplemente pulido en la Figura 6.20. Como se indicó, en estos pavimentos, al no añadir ningún disipador de energía, ésta es absorbida por el acabado. De hecho, en la Figura 6.20 (f), correspondiente al acabado al que se le agregó cemento, apenas existen etapas 1 y 2 (Figura 6.23).

6.4. MODELIZACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ELEMENTOS FINITOS DE LA RESISTENCIA A IMPACTO DE UN PAVIMENTO DE HORMIGÓN

El método de elementos finitos es uno de los más poderosos que existen en el análisis estructural. Esto es debido a su versatilidad. El método puede ser aplicado a muy distintos sistemas físicos y al problema analizado se le pueden aplicar diversas cargas y condiciones de contorno [48]. Además, en este método pueden mezclarse diversos tipos de elementos con diferentes propiedades físicas. Este procedimiento numérico es típicamente usado cuando el problema es demasiado complicado para ser resuelto satisfactoriamente por los métodos analíticos clásicos. Existen muchos programas en el mercado que trabajan en elementos finitos. En el presente estudio se usó el LS-DYNA en los cálculos. Este método se ha comprobado en numerosas ocasiones como una buena manera herramienta, especialmente en el caso de análisis trascientes de impactos.

6.4.1. Análisis explícito de elementos finitos

Los métodos explícitos de elementos finitos se desarrollaron originalmente para resolver problemas de propagación de onda y energía de impacto, aunque se usan para muchas otras aplicaciones como ingeniería de terremotos o diseño de pavimentos entre otras.

Los métodos implícitos de elementos finitos son difíciles de aplicar cuando deben hacerse miles de pasos de tiempo para resolver un problema dinámico, a causa del costo que conlleva invertir las matrices de rigidez para resolver los grandes sistemas de ecuaciones no lineales, especialmente en modelos con miles de grados de libertad o en el caso en que haya casos de no linealidad. En un método de elementos finitos explícito, la solución puede alcanzarse sin formar una matriz de rigidez global, ya que ésta se obtiene en un análisis elemento a elemento. Como resultado, los métodos explícitos pueden analizar grandes modelos tridimensionales con miles de grados de libertad con unos requerimientos computacionales menores. Sin embargo, la estabilidad de los métodos explícitos está condicionada al uso de pequeños pasos de tiempo. Para cálculos estables, el paso de tiempo es seleccionado por el programa de forma que sea menor que el tiempo requerido para que una onda pase a través del elemento más pequeño y, por lo tanto, esto podría resultar en un número excesivo de pasos cuando crece el nivel de discretización. La interpretación física de este hecho es que el paso de tiempo debe ser suficientemente pequeño para que la información no se propague a través de más de un elemento en un paso de tiempo [49].

El programa de elementos finitos LS-DYNA usa el método de las diferencias centrales, que es característico de los métodos explícitos en general. En este método, la solución se determina en términos de información histórica consistente en desplazamientos y derivadas temporales de los desplazamientos. Al usar este método, la solución en elementos finitos se obtiene por medio de las siguientes ecuaciones que deben ser actualizadas en cada paso de tiempo [171] (sin amortiguamiento):

$$\dot{u}^{n+1/2} = \dot{u}^{n-1/2} + \Delta t \cdot M^{-1} \left(F^{externa} - \int B^T \sigma dV \right) \quad (6.13)$$

$$u^{n+1} = u^{n-1} + \Delta t \cdot \dot{u}^{n+1/2} \quad (6.14)$$

Donde:

u = Vector de desplazamientos.

$F^{externa}$ = Es el vector de fuerzas aplicadas asociada con las condiciones de contorno

y las fuerzas actuando en el cuerpo.

M = Es la matriz de masas.

$B^T \sigma dV$ = Es el vector de fuerzas internas.

Por otra parte, los métodos implícitos tienen en general, la forma:

$$u^{n+1} = f(\dot{u}^{n+1}, \dot{u}^{n+1}, u, \dots) \quad (6.15)$$

Y, por lo tanto, el cálculo de los desplazamientos nodales requiere el conocimiento de las derivadas en función del tiempo \dot{u}^{n+1} que son desconocidas. Consecuentemente, se necesita resolver un sistema de ecuaciones para calcular los desplazamientos. Por otra parte, los métodos explícitos presentan la forma:

$$u^{n+1} = f(u^n, \dot{u}^n, \ddot{u}^n, u^{n-1}, \dots) \quad (6.16)$$

Es decir, los desplazamientos nodales se pueden conocer en términos de la información de los desplazamientos y de las derivadas temporales de los desplazamientos de pasos de tiempo previos.

6.4.2. Modelos de elementos finitos desarrollados

Uno de los principales problemas que se presenta al diseñar un modelo de elementos finitos es que puede darse el caso de que, con el fin de lograr una mayor aproximación haciendo elementos pequeños, se provoque un número excesivo de pasos. Por lo tanto, ya que el paso de tiempo dependerá del elemento más pequeño, debe llegarse a un equilibrio entre el tamaño de la malla y la eficiencia de la solución.

Ordenador	Fujitsu Siemens Amilo
Procesador	2 Gh / Intel Core Duo 2500
Memoria RAM	1024 Mb
Sistema operativo	Windows XP
Software de pre-procesador	Finite Element Model Builder 1.2
Software de análisis de elementos finitos	LS-DYNA, versión 960
Software Post-Procesor	LSTC/LSPPOST ver. 2.0

Tabla 6.1: Características del sistema

En el estudio abordado, el problema se ha analizado numéricamente mediante el programa de elementos finitos LS-DYNA versión 960 [115]. El sistema informático utilizado para realizar estos cálculos es el especificado en la Tabla 6.1.

El modelo consiste en elementos sólidos tanto para representar el hormigón como la placa. La Figura 6.25 muestra los dos modelos usados en la simulación de los ensayos de impacto en un pavimento de hormigón. Como se muestra en esta figura, se ha modelizado el caso de la probeta apoyada sobre una base rígida y el sistema chapa de carga-probeta. Este último se hizo con el fin añadido de comprobar si los resultados obtenidos mediante el programa se ajustaban a la realidad. Los datos obtenidos con el programa LS-DYNA fueron filtrados con un filtro SAE clase 30.

La definición de las condiciones de contorno es, a menudo, uno de los aspectos que más afectan a la sensibilidad de un modelo de elementos finitos [20]. Para asegurar una buena representación de las condiciones físicas se usaron una serie de herramientas, como en el caso del contacto de los apoyos con el suelo o el contacto de la probeta con la chapa.

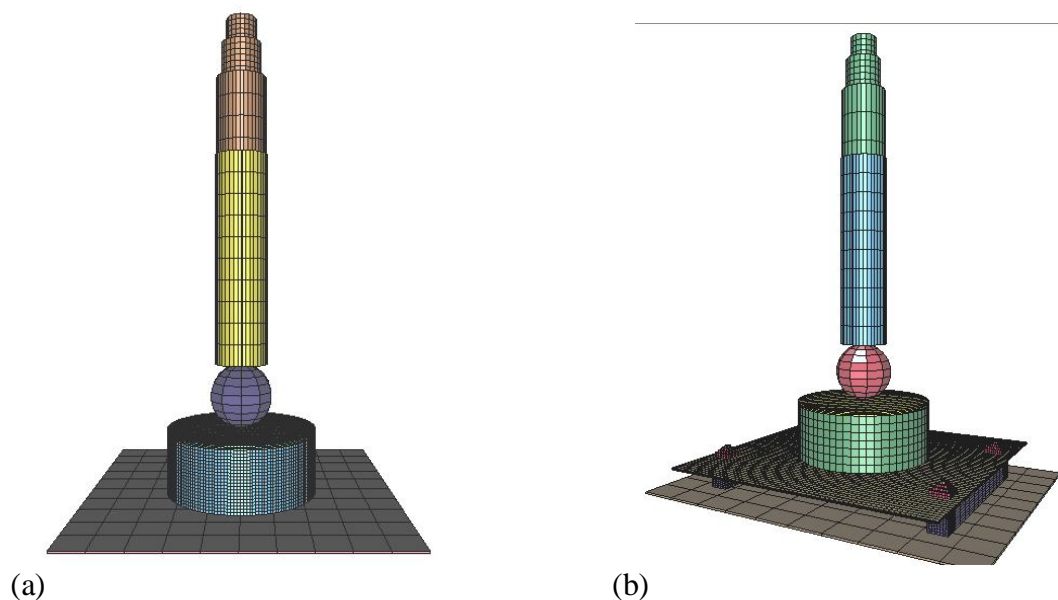


Figura 6.25: Modelos hechos en LS-DYNA para el impacto sobre probetas de hormigón. (a)

Tanto la probeta como la maza se discretizaron en coordenadas Lagrangianas. Para simular el contacto entre el hormigón, la bola, la maza, la chapa, los apoyos y el suelo, se ha elegido el algoritmo en LS-DYNA CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE [115]. Este algoritmo usa un método de penalización para modelizar la interfaz de contacto entre las diferentes partes. En esta aproximación, las superficies maestra y esclava se

generan automáticamente con el código. Cuando un nodo esclavo penetra en una superficie en un paso de tiempo, se aplica una fuerza interna al nodo que resiste la penetración y lo mantiene fuera de la superficie. Las fuerzas internas añadidas a los nodos esclavos son función de la distancia penetrada y de la rigidez calculada de la superficie maestra. La rigidez se calcula como una función del módulo de elasticidad, el volumen y el área de los elementos en la superficie maestra. Para las partes que en la realidad están unidas, se supone un contacto perfecto, y se diseñan de manera que sus nodos fueran coincidentes. Entre las diferentes partes se aplica un coeficiente dinámico de fricción de 0.5.

El mallado del modelo usado para todas las simulaciones es el mostrado en la Tabla 6.2 y Tabla 6.3. Todas las partes metálicas fueron asociadas al material tipo 3 MAT_PLASTIC_KINEMATIC, idóneo para modelar plasticidad isotrópica y cinemática.

	Nodos	Elementos sólidos	Tamaño característico del elemento	Tipo de elementos
Maza	852	532	6.0 mm	Hexágonos
Hormigón	37043	33620	2.7 mm	Hexágonos
Acabado	7055	5043	2.2 mm	Hexágonos

Tabla 6.2: Datos de mallado para el modelo representado en la Figura 6.25 (a)

	Nodos	Elementos sólidos	Tamaño característico del elemento	Tipo de elementos
Maza	852	532	6.0 mm	Hexágonos
Hormigón	2047	1575	7.5 mm	Hexágonos
Top	1023	675	4.4 mm	Hexágonos
Placa	36614	10752	2.5 mm	Hexágonos
Apoyos	1026	3584	3.0 mm	Hexágonos
Unión entre los tornillos y la chapa	7882	1104	2.5 mm	Hexágonos
Tornillo	7244	256	1.5 mm	Hexágonos

Tabla 6.3: Datos de mallado para el modelo representado en la Figura 6.25 (b)

Para simular la bola se ha optado por el algoritmo CONTACT_ENTITY [115]. Este comando relaciona el impacto entre un cuerpo definido por un conjunto de nodos esclavos y un cuerpo rígido. La forma del cuerpo rígido está determinada mediante la unión de entidades geométricas. El contacto se trata entre estas entidades geométricas y los nodos mediante una formulación de penalización.

Los apoyos del modelo de la Figura 6.25 (b) se simplificaron, aunque se procuró que fueran lo más parecidos posible al modelo real. De este modo los mismos se han diseñado con elementos hexagonales sólidos con un punto de integración (Figura 6.26) de forma que coincidieran los nodos de las partes implicadas (Figura 6.27 (a)); es decir asumiendo una unión perfecta.

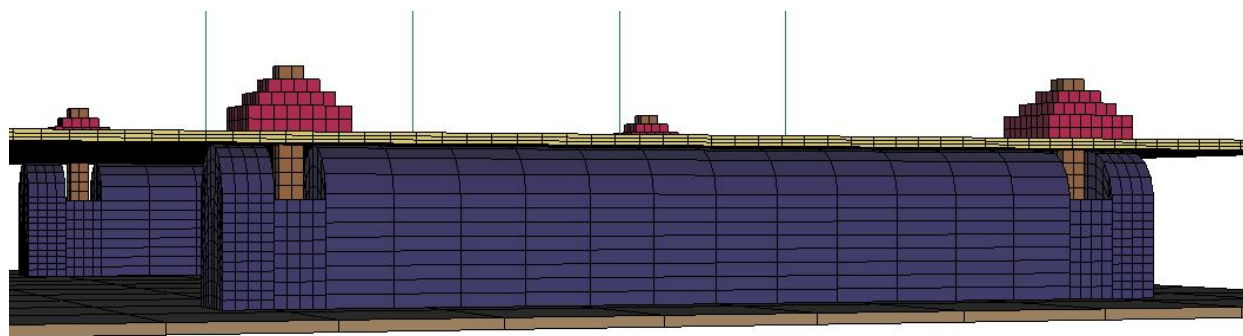
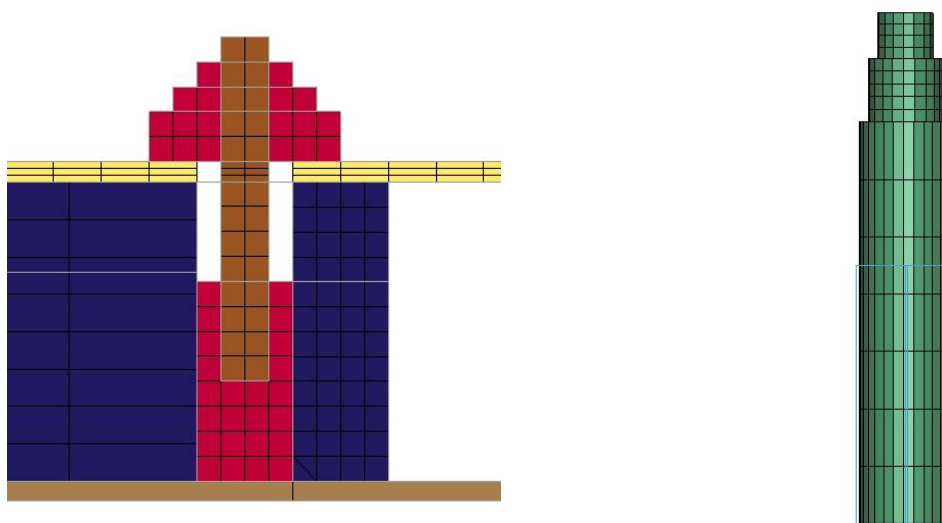


Figura 6.26: Apoyos del modelo representado en la Figura 6.25 (b).



(a)

(b)

Figura 6.27: Detalles de los modelos. (a) Detalle de sujeción de la chapa a los apoyos en la Figura 6.26.
(b) Maza que impacta la bola.

Por último, la maza (Figura 6.27 (b)) también se modelizó con elementos sólidos hexagonales. En esta pieza se eligió una densidad del mallado que se consideró suficiente para obtener resultados razonables.

6.4.2.1. Elementos de hormigón

Para representar el hormigón en los modelos se definieron elementos sólidos de 8 nodos con 1 punto de integración. En la Figura 6.28 se muestra una figura tridimensional de las probetas de hormigón utilizadas en la experimentación.

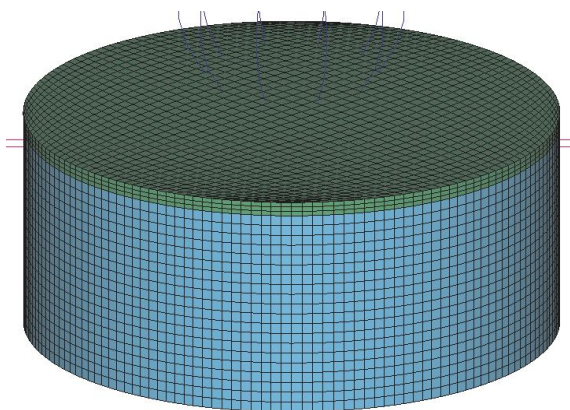


Figura 6.28: Vista tridimensional del modelo de probeta de hormigón.

El mallado de la probeta de hormigón se hizo de tal manera que los nodos del acabado superficial coincidieran con los nodos del hormigón y se hicieron lo suficientemente pequeños para obtener resultados razonables. Sólo se usó un nivel de discretización para todos los análisis llevados a cabo.

Una desventaja de que cada elemento tenga un solo punto de integración es que de esta manera será necesario controlar los modos de energía cero que se produzcan, ya que esto puede dar lugar a modos de deformación que no provoquen deformación en los puntos de integración, o “modos de efecto de reloj de arena” [72], que derivan su nombre del hecho de que en realidad el elemento deformado recuerda a un reloj de arena. Para controlar estos efectos se añade un valor de rigidez a los elementos para resistir los modos de energía cero sin que estos tengan un valor apreciable en los modos globales de estabilidad [77]. LS-DYNA tiene numerosos métodos de control del efecto de reloj de arena. En este estudio, el método empleado ha sido el de Flanagan-Belytschko, que se basa en el tiempo necesario que tarda una onda de presión en atravesar el menor elemento. Este modo es a menudo preferible para velocidades bajas de simulación [171].

El tamaño mínimo de los elementos en el modelo de la Figura 6.28 es de 0.9 mm x 0.9 mm x 0.2 mm. Lógicamente, cuanto más pequeño sea el tamaño de los elementos usados,

mayor será la precisión obtenida en los resultados. Sin embargo, no es el objetivo de este trabajo determinar la influencia del tamaño del mallado en los resultados finales, sino conocer, de manera aproximada, la influencia del acabado superficial en la distribución de tensiones del impacto.

6.4.3. Elección del material hormigón

Una gran cantidad de estudios durante los últimos veinte años ha dado lugar a una importante variedad en los modelos constitutivos capaces de representar los aspectos del hormigón [21, 24, 51, 53, 61, 100, 105]. Dada la complejidad de este material, es lógico que se hayan desarrollado tantos modelos constitutivos. Sin embargo, no entra dentro del propósito de este estudio desarrollarlos, y sólo el modelo de material se discutirá con detalle. Los modelos de hormigón se clasifican en modelos elásticos, plásticos, modelos plásticos de fractura, modelos elastoplásticos de daño y modelos endocrónicos. A pesar de todo, todavía no hay un modelo capaz de representar perfectamente el comportamiento de las estructuras de hormigón [171].

Cada modelo de material en LS-DYNA es representado por un número. El programa contiene numerosos modelos de material capaces de representar el hormigón (por ejemplo 5, 16, 17, 25, 72). Los materiales 5, 17 y 25 exhiben grandes limitaciones para modelar el comportamiento del hormigón [171]. El material 16 (MAT_PSEUDO_TENSOR) es un modelo pseudotensor geológico, que ofrece la opción de modelizar las armaduras. El modelo tiene dos modos principales: una función de Mohr-Coulomb dependiente de la presión con un límite de Tresca, y dos tensiones últimas representadas frente a presiones. Se usa la ecuación de estado (EOS) tipo 8, que describe la respuesta volumétrica del material. El Modelo de Material 72 (MAT_CONCRETE_DAMAGE), es similar al Modelo de Material 16 con parámetros adicionales para incluir las características del daño. Estos modelos se han usado con éxito para predecir las tensiones uniaxiales, biaxiales y triaxiales en ensayos de hormigón, tanto en tracción como en compresión, así como para modelizar el comportamiento del hormigón reforzado sujeto a cargas de impacto [123].

Finalmente, se ha elegido el modelo de material 16, por su bajo coste y pocos requerimientos de aplicación. No se optó por el modelo de material 72 porque no se pretendía averiguar las características de rotura del hormigón por impacto sino, simplemente, la distribución de tensiones originadas tras el choque.

6.4.3.1. Superficies de fallo

Generalmente, el comportamiento de un elemento de hormigón no puede ser modelado satisfactoriamente a través de sus características uniaxiales de tensión-deformación. De este modo, es importante considerar las tensiones triaxiales para tener una mejor comprensión de su comportamiento [14]. Los límites de fallo del hormigón se pueden representar como superficies en un espacio tridimensional de tensiones principales (Figura 6.29). Un criterio de fallo para materiales isotrópicos basados en el estado de tensiones será una función de invariantes del estado de tensiones, independiente del sistema de coordenadas por el que está representado el material. Por lo tanto, el criterio de fallo se define normalmente mediante invariantes de tensiones, que es el usado en el presente análisis.

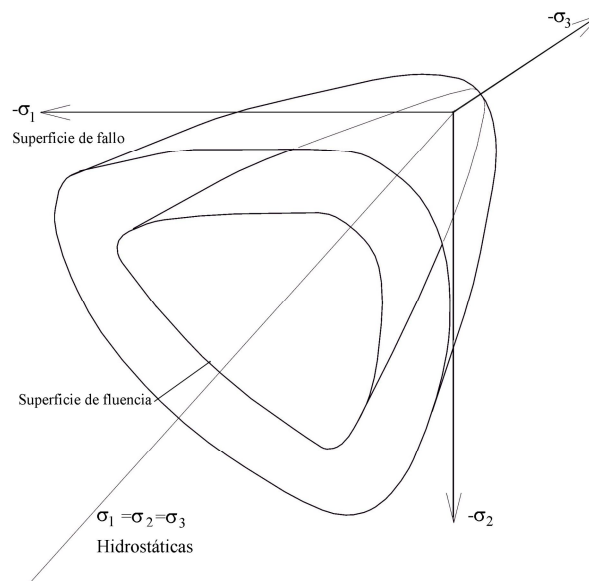


Figura 6.29: Superficie de fallo esquemática del hormigón en el espacio tridimensional de tensiones [53].

El tensor de tensiones σ_{ij} se puede expresar como la suma de tensiones hidrostáticas σ_m y desviadoras s_{ij} del estado hidrostático:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \quad (6.17)$$

Donde:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \quad (\text{Tensor de tensiones desviadoras, que representa el estado de cortante puro})$$

La representación geométrica más simple del estado de tensiones de un punto en una superficie se muestra en la Figura 6.30. En esta figura, las tres tensiones principales se tratan como coordenadas de un punto en un espacio tridimensional de tensiones. El vector OP representa el estado de tensiones. Este vector se puede descomponer en dos: el componente ON (a lo largo de los ejes hidrostáticos) y el componente NP , en el plano perpendicular a los ejes hidrostáticos (plano desviador). El eje hidrostático se define como la diagonal d en la Figura 6.30, que se encuentra a igual distancia de los tres ejes. Los planos perpendiculares a “ d ” se llaman planos desviadores. Por lo tanto, puede verse que ON define la parte hidrostática del estado de tensiones y que NP define la parte desviadora del estado de tensiones.

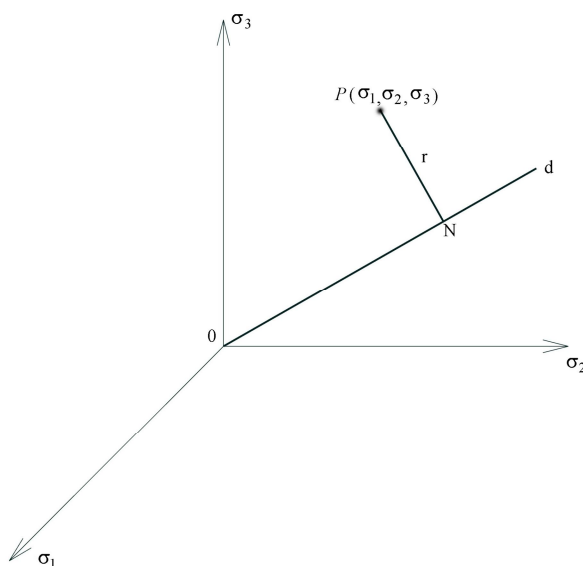


Figura 6.30: Superficie de fallo esquemática del hormigón en el espacio tridimensional de tensiones [170].

La forma general de la superficie de fallo en el espacio tridimensional de tensiones se describe por las curvas de intersección entre la superficie de fallo y un plano desviador y por los meridianos de la superficie de fallo, que son las curvas de intersección entre la superficie de fallo y un plano. La Figura 6.31 muestra un ejemplo de una sección de la superficie de fallo. En esta figura, el plano de la hoja es el plano desviador y los ejes de coordenadas $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ se proyectan sobre este plano. Los dos meridianos extremos, que son los puntos más alejados del eje hidrostático, se denominan meridiano de compresión y de tensión, respectivamente. Como se muestra en esta figura, la sección transversal tiene forma triangular y se puede definir por un punto en el meridiano de compresiones y por un punto en el meridiano de tracciones. La figura de la superficie de fallo en 3D fue propuesta por William y Warnke [195] y se corresponde a la siguiente expresión para la distancia

desde los ejes de presión hidrostática a un punto arbitrario sobre el espacio de tensiones proyectado sobre la superficie resistente.

$$\frac{1}{r_c} = \frac{2(1-\psi^2)\cos\theta + (2\psi-1)\sqrt{4(1-\psi^2)\cos^2\theta + 5\psi^2 - 4\psi}}{4(1-\psi^2)\cos^2\theta + (1-2\psi)^2} \quad (6.18)$$

Donde:

$\psi(p)$ = Distancia relativa entre los meridianos de tensión y compresión

$$\cos 3\theta = (3\sqrt{3}J_3)/(2J_2^{3/2})$$

J_2 = Segundo invariante de tensiones desviadoras

J_3 = Tercer invariante de tensiones desviadoras

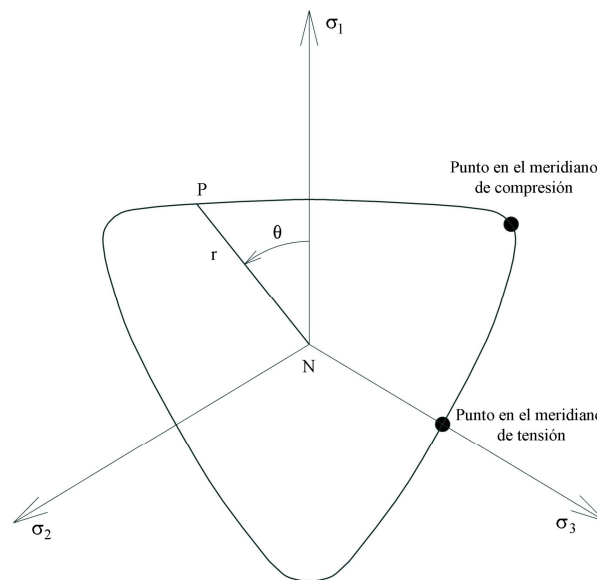


Figura 6.31: Superficie de fallo esquemática del hormigón en el espacio tridimensional de tensiones [53].

Las superficies de fallo se pueden combinar con modelos constitutivos basados en plasticidad para el análisis tridimensional de las estructuras de hormigón. Las superficies tridimensionales se usan para construir superficies de rotura y, por lo tanto, superficies de carga a partir de las cuales pueden construirse, a su vez, las relaciones tensión-deformación del hormigón [53]. El desarrollo de resistencias se define en el espacio de tensiones como aquel en el que cuando las tensiones actuales alcanzan una superficie definida, el material se romperá.

Como se ha mencionado, la representación más simple del estado de tensiones en un punto se obtiene descomponiendo el estado de tensiones en dos componentes: hidrostático y desviador. La presión hidrostática tiene una gran influencia en el fallo del hormigón. Bajo presión hidrostática, el hormigón se puede consolidar más allá de su límite de elasticidad, aunque no alcanzará la rotura hasta el fallo [109, 170]. Por lo tanto, la rotura por compresión del hormigón está gobernada por los componentes desviadores (o de cortante) del estado de tensiones.

La superficie última de rotura marca la disminución de la rigidez del material al incrementar la carga. Como se observa en la Figura 6.29, la superficie de plastificación tiene una forma similar a la de la superficie máxima, pero con un tamaño inferior. La superficie máxima (o superficie de fallo) está fijada en el espacio de tensiones principales a cierta distancia de la superficie de fluencia. Cuando el estado de tensiones del hormigón satisface el criterio de fallo; es decir, cuando la superficie de carga intercepta a la superficie de fallo, se pueden identificar tres modos de fallo: la rotura, el colapso y una combinación de ambos [173]. Durante la carga inicial o la recarga, las tensiones desviadoras permanecen elásticas hasta que las tensiones alcanzan la superficie de fluencia. Las tensiones desviadoras pueden entonces incrementarse más allá de la superficie de fluencia máxima. Más allá, la respuesta del hormigón puede ser perfectamente plástica o reducirse hasta una superficie residual.

El modelo de hormigón usado en este estudio es una formulación plástica con tres superficies independientes de fallo (Figura 6.32 (a)), cuyos contornos dependen de los niveles de presión (Ecuación (6.19)).

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (\text{Presiones y tensiones positivas en compresión}) \quad (6.19)$$

Las curvas por encima y por debajo del eje p , corresponden a los meridianos de compresión y tracción, respectivamente. Estas superficies de fallo se definen como sigue [123]:

$$\Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (\text{máxima superficie de fallo}) \quad (6.20)$$

$$\Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (\text{superficie de fallo residual}) \quad (6.21)$$

$$\Delta\sigma_f = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y} p} \quad (\text{superficie de fluencia}) \quad (6.22)$$

Donde:

$$\Delta\sigma = \sqrt{3J_2}$$

$$J_2 = \text{Segundo invariante del tensor de tensiones desviador}$$

Los parámetros usados para determinar estas superficies de fallo (a_0 , a_1 y a_2) provienen de datos de laboratorio a partir de ensayos de compresión no confinada.

Este modelo de material tiene herramientas para la obtención de una solución simple para el hormigón, con tan sólo introducir en los parámetros del modelo $-a_0$ como un factor de conversión entre las unidades de presión usadas en LS-DYNA a psi. En este caso, los valores de los parámetros son:

$$\sigma_{\max} = 1.7 \left(\frac{f_c'^2}{-a_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6.23)$$

$$a_0 = \frac{f_c'}{4} \quad (6.24)$$

$$a_1 = \frac{1}{3} \quad (6.25)$$

$$a_2 = \frac{1}{3f_c'} \quad (6.26)$$

$$a_{0f} = 0 \quad (6.27)$$

$$a_{1f} = 0.385 \quad (6.28)$$

De este modo, cuando a_0 se indica como una cantidad negativa, la ecuación de estado en el programa puede escribirse como cero y una EOS (EOS_TABULATED_COMPACTIION) trilinear se genera automáticamente a partir de la resistencia a compresión no confinada y el módulo de Poisson [77].

En este modelo, durante la carga, la superficie resistente se mueve entre las tres superficies

de fallo usando las siguientes relaciones [192] (Figura 6.32 (a)):

$$\Delta\sigma = \eta(\Delta\sigma_{\max} - \Delta\sigma_{\min})\Delta\sigma_{\min} \quad (6.29)$$

Donde:

η = Es la función de migración, que varía entre 0 y 1 dependiendo de la deformación plástica acumulada.

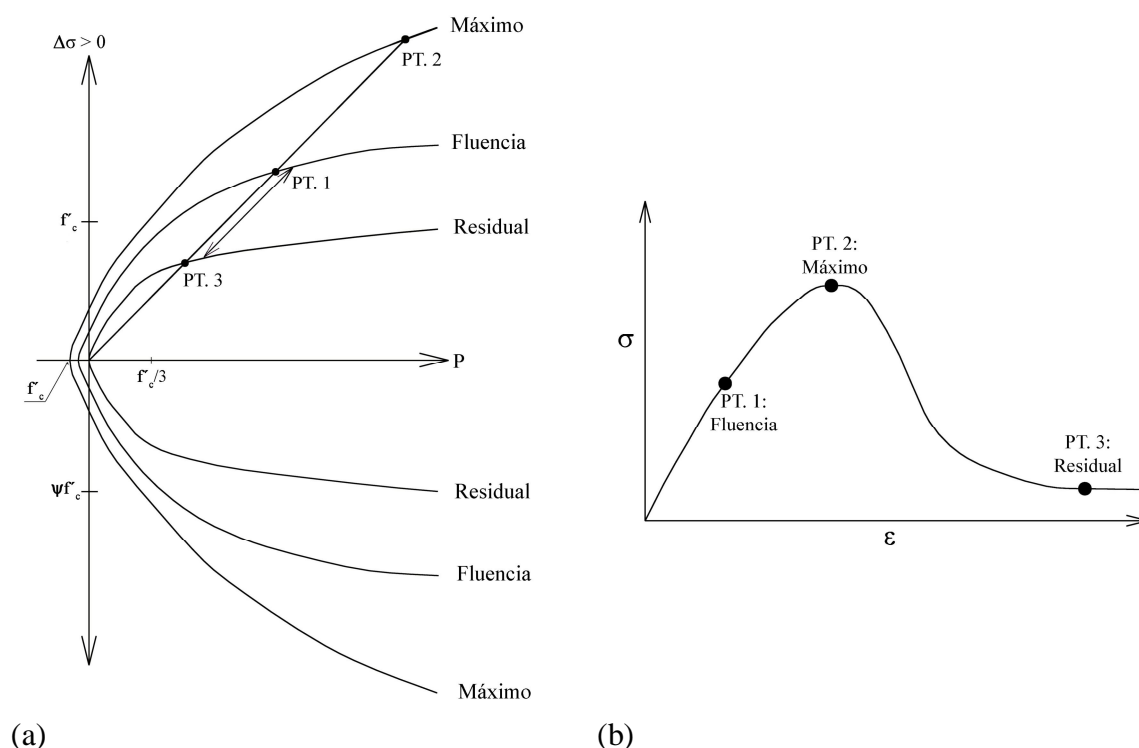


Figura 6.32: (a) Superficies de fallo en el modelo de material elegido para el hormigón. (b) Comportamiento constitutivo del hormigón [170].

El comportamiento tensodeformacional del hormigón será como el descrito en la Figura 6.32 (b). En LS-DYNA, este modelo de material se usa junto con una ecuación de estado (EOS_TABULATED_COMPACTION), que da la presión p como una función de la deformación volumétrica anterior y posterior. En este modelo de compactación, la presión se encuentra definida por la fórmula:

$$p = C(\epsilon_v) \quad (6.30)$$

Una vez conocida la presión, se puede determinar el tensor de tensiones como un punto de una superficie móvil que se traslada entre las tres superficies de fallo. Los valores usados en el archivo de datos son de un hormigón de 22,4 MPa, con un módulo de Poisson

de 0.25. Todos los otros datos se muestran en el ANEXO VI, donde se recoge un típico archivo de datos para el modelo de elementos finitos.

6.4.4. Resultados y discusión del modelo de elementos finitos

Para validar los resultados calculados con LS-DYNA, se realizó una comparación entre las curvas de deformación de la chapa de carga (Figura 6.14 (a)) registradas con el sistema de toma de datos (Figura 6.15 (b)) y las curvas obtenidas del programa de elementos finitos a partir de la simulación mostrada en la Figura 6.25 (b). El programa de elementos finitos LS-DYNA aporta una duración del impacto de 0.03 segundos (Figura 6.33), que parece coincidir con la media de la duración del primer impacto registrada experimentalmente. (Figura 6.18 (b)).

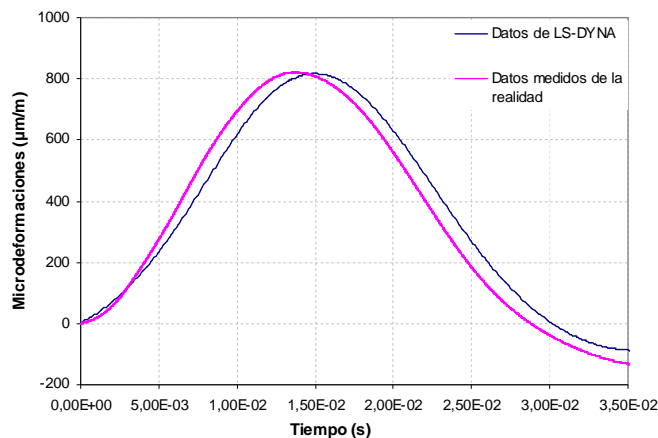


Figura 6.33: Comparación entre las microdeformaciones producidas en la chapa de carga, calculadas con LS-DYNA y las registradas con el sistema de toma de datos.

Cuando el hormigón está sometido a cargas dinámicas, se producen en él varios estados de tensiones que producen diferentes modos de fallo. Cerca del área de impacto, se observan grandes compresiones y el estado de tensiones compacta irreversiblemente el material. Más allá de la zona de impacto se reducen las tensiones de confinamiento y el material experimenta la compresión con un nivel de tensiones menor. Por otra parte, al producirse el impacto y la penetración subsiguiente, la energía cinética del proyectil se convierte en energía de deformación (energía interna) [167]. En ese momento, la energía cinética del proyectil se reduce gradualmente y la energía de deformación se incrementa (Figura 6.34 (a)). El hormigón se comportará elásticamente si este incremento de energía puede realizarse de forma reversible, en este caso se dice que el comportamiento es elástico, si no, el comportamiento del hormigón es plástico.

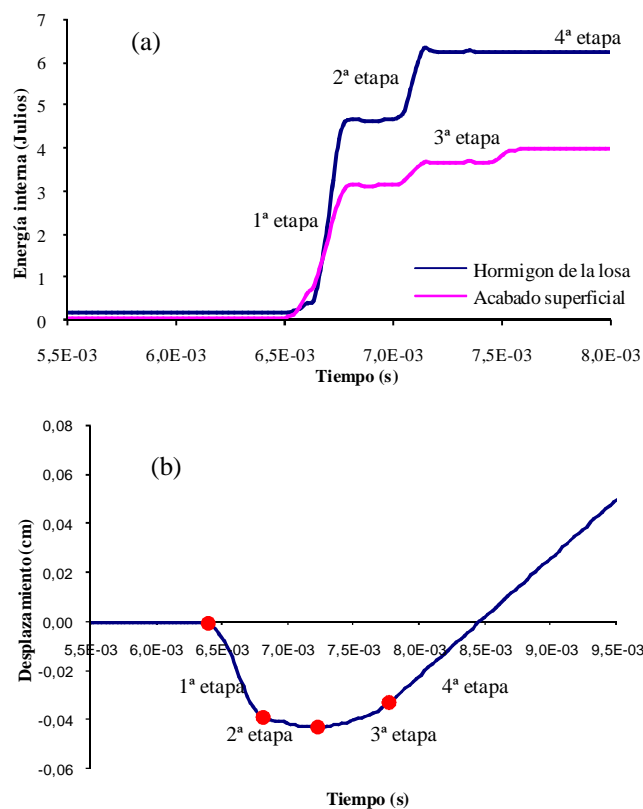


Figura 6.34: (a) Historias de energía interna tras el impacto en el pavimento. (b) Desplazamiento de la esfera durante el impacto.

Cuando se produce el impacto sobre una losa de hormigón suceden una serie de etapas (Figura 6.35). La primera, de duración 0.00034 s, transcurre desde el momento del impacto hasta que ocurre la mayor parte de la compactación del hormigón. Posteriormente, como se observa en la Figura 6.35 (0.0004 y 0.0005 s), donde se muestra la evolución de las superficies isotensionales variando entre 2 y 20 MPa tras un impacto en un pavimento con una resistencia a compresión del acabado de 5 MPa y una resistencia a compresión de la losa de 21.73 MPa, la onda se ve reflejada al rebotar contra el fondo de la probeta, con lo que se llega a la segunda etapa, que con una duración de 0.00042 s (hasta los 0.00076 s desde el inicio del impacto), en la que por efecto de la reflexión del frente de onda no existe un incremento de la energía interna del hormigón. Una vez que el frente de onda rebota de nuevo contra el acabado superficial, la inercia de la maza hace que siga aumentando la energía de deformación (en la Figura 6.35 (0.0008 s, cuando se produce un nuevo rebote del frente de onda)). Por último, en la tercera etapa, que dura aproximadamente 0,00057 s. se produce la recuperación elástica del hormigón del pavimento. En la Figura 6.34 (a) se observa cómo la recuperación elástica al inicio de esta

etapa tiene lugar sobre todo en el hormigón de la losa y las deformaciones plásticas que ocurren afectan principalmente al acabado superficial del pavimento; es decir, aumenta la energía interna del mismo. En la Figura 6.34 (b) se observa cómo la recuperación elástica del pavimento es de aproximadamente 0.1mm. Posteriormente, la bola y la maza rebotan, con lo que no se sigue incrementando la energía interna en el pavimento. En total, la onda de impacto rebotó 6 veces y el tiempo de contacto de la esfera con el hormigón fue de 0.00133 s.

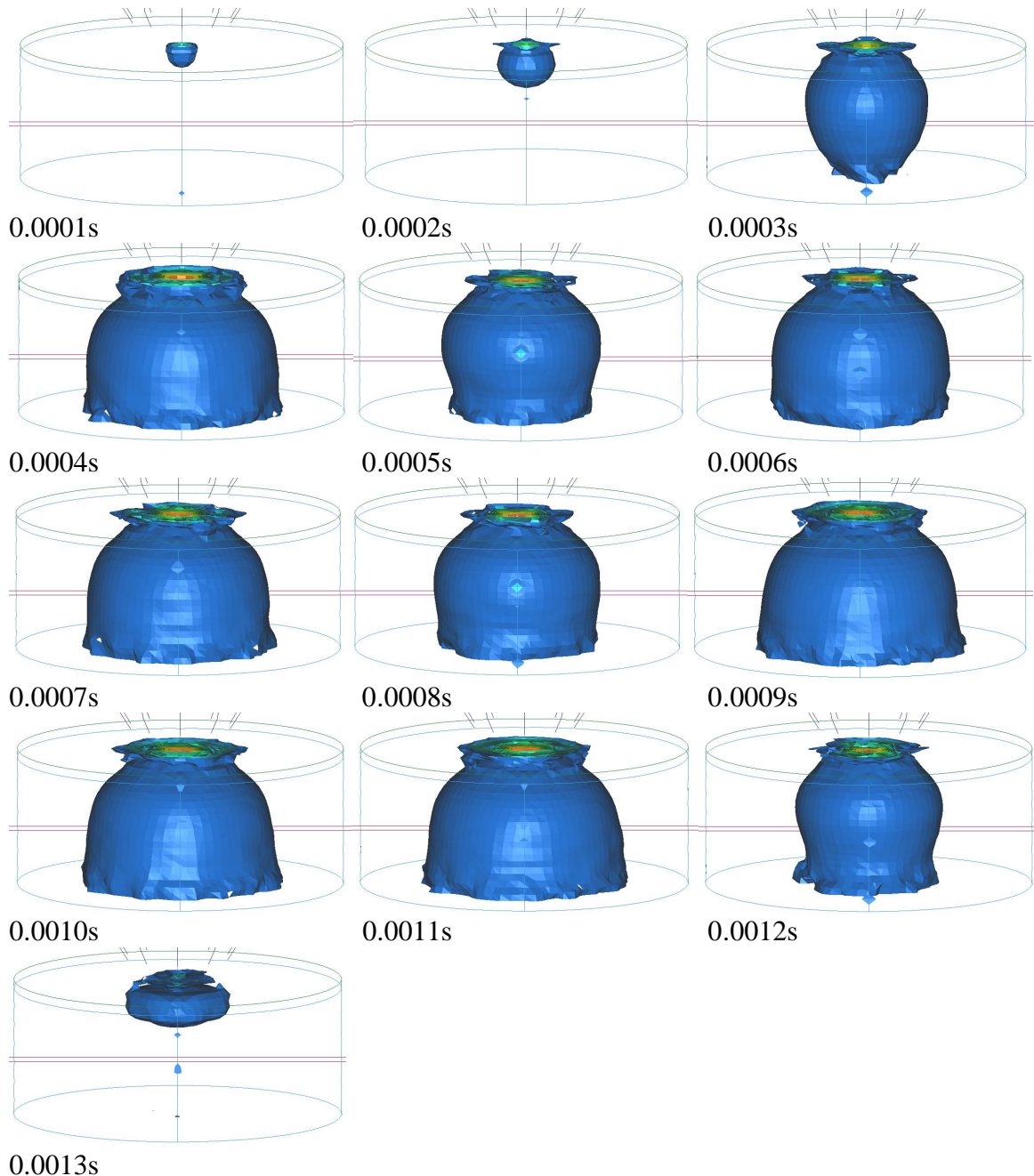


Figura 6.35: Evolución de las tensiones máximas de Von Mises en las probetas de hormigón a lo largo del tiempo del impacto según el programa LS-DYNA.

En cuanto a las probetas colocadas sobre la chapa de carga, en la Figura 6.21 se mostró cómo las tensiones se acumulaban especialmente en los puntos de contacto entre la chapa y el hormigón. En la Figura 6.36 puede observarse cómo la energía interna de estas es aproximadamente la mitad que en el caso de que las probetas se encuentren apoyadas sobre una superficie rígida (Figura 6.34 (a)). En este caso, el conjunto de la placa y los apoyos absorbe la energía restante.

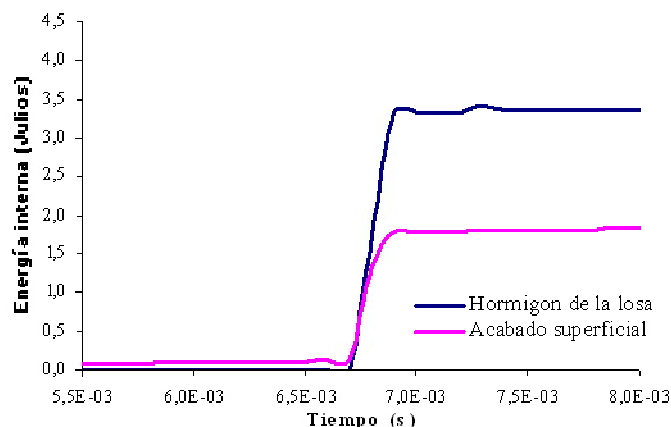


Figura 6.36: Historias de energía interna en el pavimento colocado sobre la chapa de carga (Figura 6.25 (b)).

Para evaluar la influencia de la capa de acabado en la transmisión de esfuerzos al pavimento se han considerado variaciones en su resistencia a compresión uniaxial, manteniendo constante la resistencia a compresión de la losa, obteniéndose los resultados de la Figura 6.38, donde se contemplan las superficies isotensionales de Von Mises, con la tensión variando entre 2 y 20 MPa. En la Figura 6.37 (a), se muestra la evolución de la energía interna del material en función de la resistencia a compresión del acabado superficial. En esta figura, se observa cómo la losa absorbe más energía cuanto menor es la resistencia a compresión del acabado superficial. Es decir, cuanto más deformable es el acabado superficial, más energía absorbe éste en deformaciones y menos absorberá la losa, con lo que habrá un peligro de rotura menor. Este resultado parece coincidir con el mostrado en el Capítulo 5 para la resistencia a impacto del pavimento regleado. En la Figura 6.37 (b) se muestra la influencia de la resistencia a compresión uniaxial del acabado superficial en las tensiones máximas que afectan a la parte inferior de la probeta y a uno de sus laterales. En esta figura, especialmente en la base de la probeta, se observa cómo existe un máximo de tensiones cuando las resistencias del acabado coinciden con las del hormigón del pavimento o son algo mayores. Comparando esta figura con la Figura 6.37 (a), se constata que el punto de intersección de las energías internas coincide en el eje de

abscisas (resistencia a compresión del acabado) con el punto máximo de tensiones en el punto central; es decir, en el instante en que las características físicas del acabado superficial coinciden con las del hormigón del pavimento, las energías de deformación se reparten por igual. A partir de ese instante, alrededor del 60% de la energía interna o de deformación será absorbida por el hormigón de la base, independientemente de la resistencia del acabado. Es por esto que será muy importante añadir amortiguadores de energía al acabado. Por otra parte, esto significa que el peor caso para un pavimento es aquél en que éste se encuentra pulido y en el caso de resistencia al impacto será indiferente añadirle cemento como endurecedor superficial, pues las energías internas alcanzan rápidamente un valor asintótico desde el momento en que el acabado supera las características de la base.

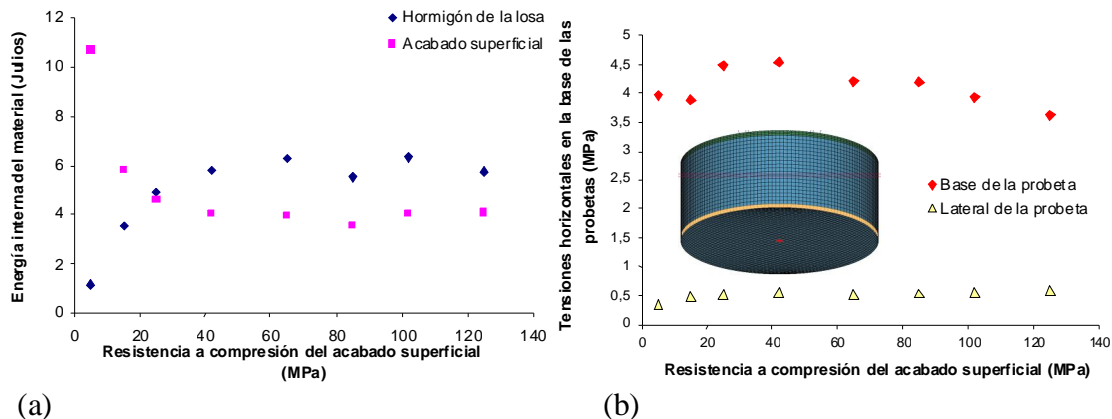


Figura 6.37: (a) Energía interna del material frente a resistencia a compresión del acabado superficial. (b) Tensiones de cortante máximas en la probeta en la base y en uno de los laterales.

Por otra parte, en la Figura 6.38, se muestra la influencia de la resistencia a compresión uniaxial del acabado del hormigón sobre el pavimento. En esta figura puede observarse cómo afecta al hormigón del pavimento una mayor rigidez de la capa superior, y cómo van variando las superficies de los conos de rotura en función de ésta. La fuerza resistente total en la superficie de cortante del cono de rotura del hormigón se encuentra determinada por [110]:

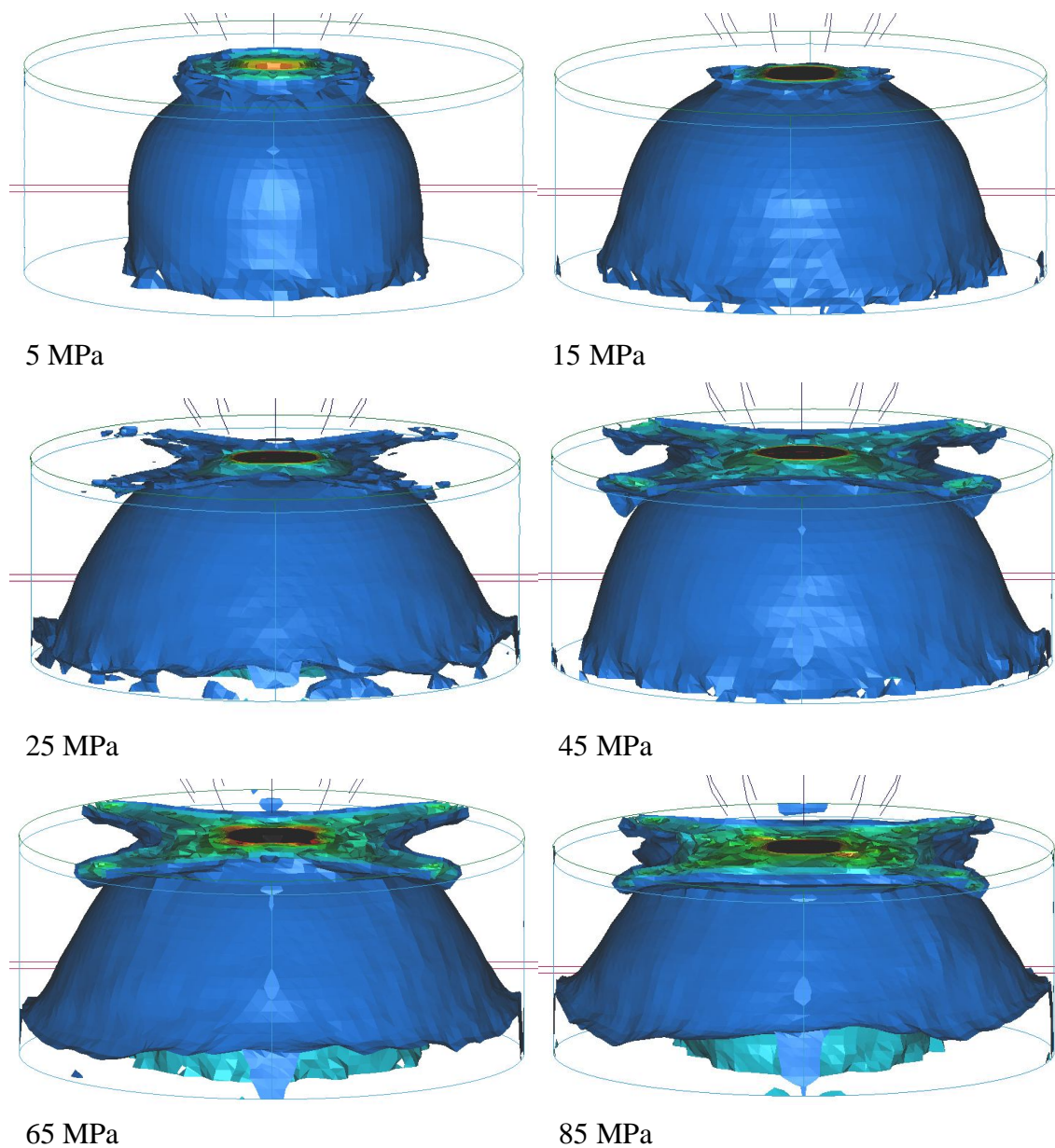
$$F_s = \tau_f A_s \cos \alpha \quad (6.31)$$

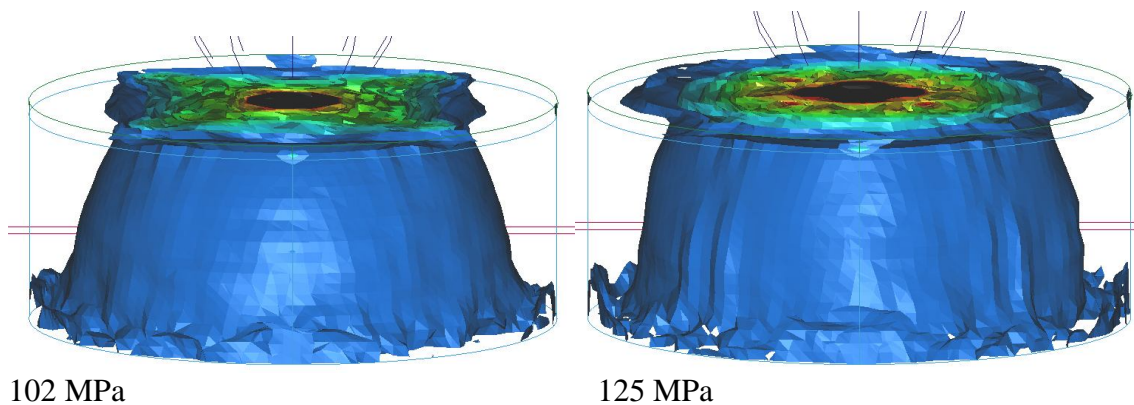
Donde:

τ_f = Resistencia máxima a cortante bajo compresión triaxial.

A_s = Área de la superficie del cono de rotura.

Comparando los datos de la Figura 6.38 con los de la Figura 6.37(a) se observa cómo en aquéllos en que la absorción de energía por parte del acabado es menor, el área del cono de rotura es también menor; es decir, la misma energía se concentra en una zona más pequeña, produciéndose una gran compactación.



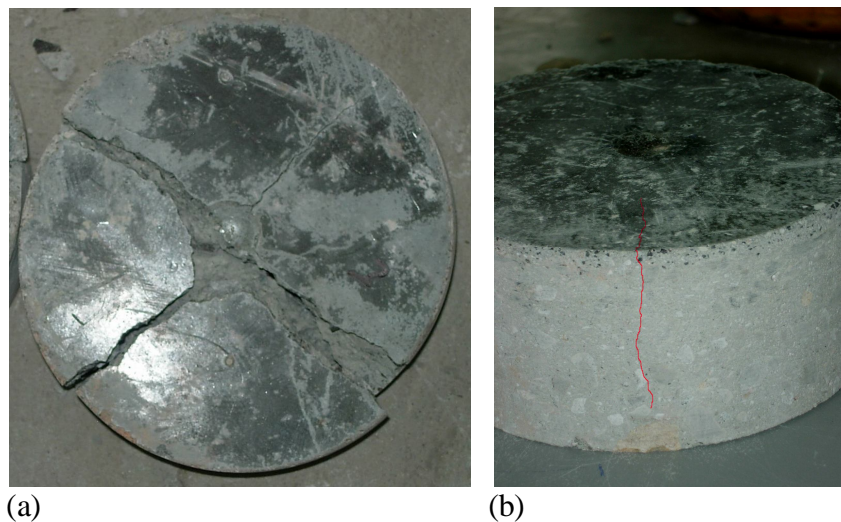


102 MPa

125 MPa

Figura 6.38: Efecto de la resistencia a compresión del acabado superficial en las tensiones máximas de Von Mises en un instante dado.

Sin embargo, se observa también, cómo el área del cono más desfavorable se produce en el caso en que el acabado tenga la misma resistencia que el hormigón de la losa. Es bien sabido que las tensiones se transmiten mejor por los medios más rígidos. De esta forma, en la Figura 6.38 puede observarse cómo las tensiones se distribuyen en un área mayor en el acabado cuanto más resistencia a compresión presenta, con lo que el cono de rotura en el hormigón de la losa se trunca y, por lo tanto, el área resistente indicada en (6.31) aumenta también, de manera que el hormigón resiste más.



(a)

(b)

Figura 6.39: (a) Forma de rotura de las probetas por impacto.

En la Figura 6.39 se muestra un ejemplo de rotura de la probeta junto a una de las superficies máximas isotensionales de Von Misses. Comparando los resultados de la Figura 6.38, en los que las tensiones se distribuyen en dos direcciones principales en los casos en que el acabado es más resistente que el hormigón de la base, con los mostrados en la Figura 6.39 se observa cómo la rotura comienza a aparecer en la zona de borde de la probeta, en el acabado superficial, donde se acumulan las tensiones.

En la Figura 6.40 se muestra una fotografía del cono de rotura de la probeta junto con un esquema de distribución de tensiones en la misma (azul: mayores tensiones; rojo: menores). Diferentes autores han postulado que el cono tiene una forma curva [198] (Figura 6.38, por ejemplo en el caso en que la resistencia a compresión del acabado superficial sea de 15 MPa), aunque de forma general podrá considerarse como un cono definido por su pendiente; es decir, el ángulo α entre la dirección en la que se mueve el proyectil y las paredes del cono (Figura 6.40 (a), donde se muestra la forma de la rotura de las probetas por múltiples impactos y Figura 6.40 (b), donde se muestra la forma de la distribución de las tensiones durante el impacto). Dancygier [54] comprobó que la pendiente del cono toma diferentes valores para diferentes resistencias a compresión del hormigón. Por ejemplo, para las resistencias habituales del hormigón el ángulo es de alrededor de 66° . Por otra parte, para hormigones de alta resistencia, el ángulo será aproximadamente de 76° .

Sin embargo, el ángulo mostrado en la Figura 6.40 (a) es de 40° , lo que puede ser debido tanto a la poca resistencia del hormigón utilizado en este estudio experimental como al efecto que tienen los múltiples impactos sobre el hormigón, ya que a diferencia de los experimentos hechos por Dancygier [54], al romper por fatiga se irá debilitando su estructura interna durante las etapas 1 y 2 de la formación del cono de rotura; además, la acumulación de tensiones en los bordes de la probeta favorecerá la aparición de grietas en las direcciones principales ya señaladas, con lo que la resistencia del hormigón se verá considerablemente reducida.

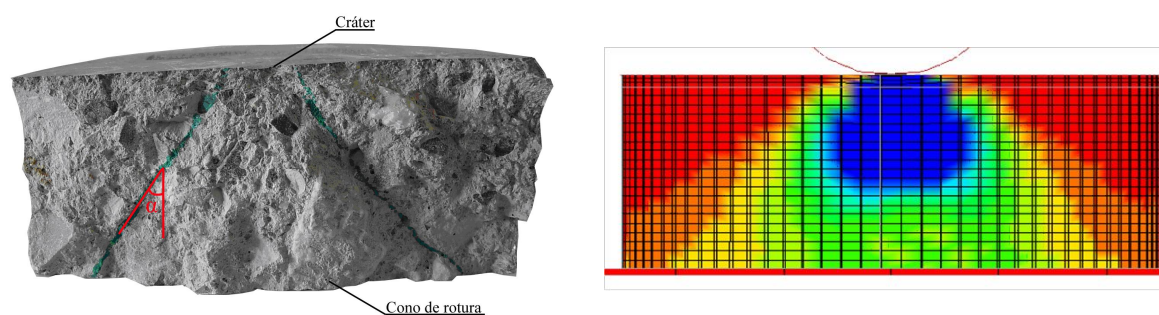


Figura 6.40: (a) Modo de rotura de las probetas de hormigón por impacto. (b) Distribución de las tensiones tras impacto.

6.5. CONCLUSIONES

En este Capítulo se ha abierto un campo de estudio que apenas estaba explorado, como es el de la influencia del acabado en la resistencia a impacto de un pavimento de hormigón. Para ello se han empleado dos métodos que permiten evaluar la resistencia a impacto entre los distintos tipos de pavimento estudiados.

Conforme aumenta el daño del pavimento disminuye su capacidad de absorber energía, con lo que es más fácil que se rompa; en el caso en que no se hayan colocado áridos en la capa pulida del pavimento, toda la energía será transmitida al hormigón de la losa, con lo que para aumentar la resistencia a impacto del pavimento, será importante añadir endurecedores al acabado superficial, de forma que sirvan como amortiguadores de energía frente al impacto.

La profundidad del cráter se incrementa con el número de impactos y, por lo tanto, será un buen indicador del daño acumulado en el hormigón. El crecimiento del cráter por impactos repetidos se puede modelar de manera apropiada mediante la ley de crecimiento del cráter, encontrándose relacionados los diferentes acabados en un pavimento de hormigón mediante ésta.

Se postula la existencia de tres períodos claramente diferenciados en la rotura por impactos repetidos del hormigón: en primer lugar la formación del cráter debajo del proyectil, que se corresponde con una etapa de deceleración en el crecimiento del cráter y en el ratio de variación de la absorción de energía por impactos repetidos. En segundo lugar, la formación de una interfaz de grietas entre el cono de rotura y el resto de la probeta, en la que el ratio de variación de absorción de energía permanece constante y, por último, el movimiento del cono de rotura y la subsiguiente rotura del pavimento, que se corresponde con una aceleración del crecimiento del cráter y de la absorción de energía por parte de la probeta.

En este trabajo se usó el código de elementos finitos LS-DYNA para estudiar el pavimento de hormigón sujeto a un proceso de carga y efectos dinámicos. Los datos obtenidos demostraron una correlación razonable con los resultados experimentales. Por lo tanto, podrá concluirse que el modelo de material para hormigón MAT_PSEUDO_TENSOR es apropiado para el estudio del comportamiento a impacto del hormigón en un pavimento con acabado superficial. En las simulaciones numéricas se presentaron los detalles del

proceso de daño en la probeta por impacto, variación de la energía y tiempos de contacto para el ensayo descrito en la norma UNE 83514, encontrándose que, por efecto del acabado superficial las tensiones se acumulan en el mismo, provocando grietas en la superficie que podrán permitir la entrada de agresivos químicos en el hormigón. Además se demostró numéricamente la necesidad de colocación de amortiguadores de energía en el acabado superficial.