



Teoría y experiencias en el incremento de ductilidad de los hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de acero

Manuel Fernández Cánovas¹

¹Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Avda. Prof. Aranguren, s/n. 28040 Madrid (España).

Información del artículo

DOI:

<http://dx.doi.org/10.21041/ra.v2i3.33>

Artículo recibido el 02 de Mayo de 2012, revisado bajo las políticas de publicación de la Revista ALCONPAT y aceptado el 24 de Julio de 2012. Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores se publicará en el segundo número del año 2013 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del primer número del año 2013

© 2012 ALCONPAT Internacional

Información Legal

Revista ALCONPAT, Año 2, No. 3, Septiembre - Diciembre 2012, es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A.C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, Tel. 5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org
Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida Yucatán, C.P. 97310, fecha de publicación: 30 de septiembre de 2012.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor. Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

RESUMEN

Las acciones de impacto y cargas impulsivas provocadas por misiles o choque de aeronaves sobre edificios de contención de reactores nucleares o sobre grandes depósitos de almacenamiento de gas licuado, o de vehículos o buques contra pilas de puentes, plataformas petrolíferas marinas, etc., o de ondas explosivas sobre edificios civiles o militares, siempre han tenido una gran importancia en ingeniería, pero las tienen más en estos últimos tiempos debido a la proliferación de actos terroristas. Las estructuras sometidas a estas acciones deben presentar un comportamiento diferente a las tradicionales debido a las grandes cantidades de energía que tienen que absorber y disipar en tiempos muy cortos, de aquí que los elementos estructurales formados por hormigón y acero, tengan que poseer una ductilidad suficiente para que mediante grandes deformaciones anelásticas no llegue a colapsar. En experiencias realizadas frente a acciones dinámicas parecidas a las provocadas por los sismos o a la acción de explosivos o de impacto de proyectiles hemos podido comprobar como el confinamiento de los elementos estructurales conseguido con armadura tradicional y fibras de acero puede producir una ductilidad notable. Este artículo tiene por objeto presentar los resultados de algunos trabajos de investigación en los que se muestra el comportamiento de elementos de hormigón armado reforzado con fibras de acero frente a este tipo de acciones.

Palabras clave: ductilidad; impacto; cargas impulsivas; sismos; hormigón de alta resistencia; fibras de acero; cráter de salida.

ABSTRACT

Impact and impulsive loads such of those caused by missile and aircraft impact on nuclear containers or big liquated gas reservoirs, vehicles or ships in collision with bridges piles or offshore structures, or by blast waves on civil and military buildings or shelters, have played an important role in civil engineering, but today these actions reach a transcendental role because the proliferation of terrorist menaces. The behaviour of structures under these actions must be different of traditional ones, because of the big quantity of energy they must absorb and dissipate in a very short time, so structural elements formed by reinforced concrete must have ductility enough to reach large anelastic strains without failure. In tests carried out by us in high strength concrete structural elements under impact of projectiles or dynamic actions, similar to those produce by seismic movements, we have checked how with a confinement by means of steel stirrups with the complement of steel fibers is possible to reach a notable ductility. The goal of this article is to present the results of some research works carried out showing the behaviour of reinforced concrete with steel fibers elements against these type of actions.

Keywords: ductility; impact; impulsive loads; earthquake; high strength concrete; steel fibers; scabbing.

Autor de contacto: Manuel Fernández Cánovas (mfcanovas2@telefonica.net)

1. INTRODUCCION

Hasta hace muy pocos años el diseño de estructuras de hormigón armado sometidas a acciones de impacto y cargas impulsivas, especialmente con proyectiles o explosivos, se realizaba después de analizar los resultados experimentales llevados a cabo sobre elementos a escala natural, lo cual era, en general, bastante lento y siempre muy costoso.

La diversidad de riesgos de acciones dinámicas sobre las estructuras, como las consideradas anteriormente, más las producidas por sismos, y la necesidad de protegerlas adecuadamente ha dado lugar a potenciar cada vez más las investigaciones basadas en tratamientos analíticos, numéricos o computacionales, aunque esto no resta para que los resultados obtenidos deban contrastarse con la experimentación. Por otra parte, los conocimientos que se tienen de este tipo de problemas son mucho más reducidos que los que se tienen de estructuras convencionales sometidas a acciones estáticas.

Es cierto que la probabilidad de que existan acciones de impacto o de cargas impulsivas durante el desarrollo de la vida de una estructura es muy reducida, sin embargo también es verdad que las consecuencias de acciones de este tipo son en general tremendamente graves como lo demuestra el hecho de las acciones terroristas recientes sobre las Twin Towers del Trade World Center de N.Y., por poner un sólo ejemplo.

Actualmente, en algunos países, existe una psicosis de protección frente a acciones terroristas y no es de extrañar que los gobiernos traten no sólo de proteger a sus políticos con guardaespaldas, sino de proteger también a centros que son vitales para el funcionamiento de una nación (centros de transmisiones, de procesos de datos, de seguridad nacional, etc.), mediante estructuras resistentes a determinadas amenazas. Igualmente muchas empresas importantes de capital propio o extranjero, bancos, etc., están cada vez más preocupadas por la seguridad de sus estructuras.

En las construcciones sometidas a estas acciones es necesario utilizar materiales con un buen comportamiento mecánico debido a que tienen que ser capaces de absorber una gran cantidad de energía dentro de un periodo de comportamiento inelástico, debiendo ser además económicos y seguros. El comportamiento no lineal difiere de la teoría elástica y plástica a la que está acostumbrado normalmente el ingeniero; este comportamiento no lineal del material, con efectos de grandes velocidades de deformación y en la mayor parte de los casos con geometrías no lineales dificulta enormemente el problema.

Al ser muchas las acciones a considerar nos vamos a referir en lo que sigue a analizar como el confinamiento de determinados elementos estructurales puede contribuir de una forma muy positiva a evitar daños en las mismos, especialmente en el caso de sismos, de ondas explosivas de choque, y de impactos de proyectiles, y como la adición de fibras de acero al hormigón potencia de una forma notable la acción de confinamiento producida por las armaduras.

2. MODELOS CONSIDERADOS

Las acciones dinámicas sobre las estructuras de hormigón armado, consideradas anteriormente, hacen que el comportamiento de los materiales (hormigón y acero) tenga que adaptarse a ellas para resistirlas. La complejidad del problema hace que exista una gran diversidad de modelos para explicar estos fenómenos de los cuales unos se adaptan mejor que otros a la realidad del problema (CEB, 1988).

Al diagrama clásico al que se está acostumbrado en ingeniería de tensión-deformación $\sigma = f(\epsilon)$, hay que adaptarle el de la velocidad de deformación $\epsilon = f(t)$, e incluso el del "historial de cargas" sobre la estructura, con lo cual el diagrama se complica ya que obedece a una función del tipo: $\sigma = f(\epsilon, \epsilon', \text{historial de cargas})$.

Los materiales (hormigón y acero) que cumplen con la relación anterior pueden agruparse en varios modelos que tienen en cuenta las teorías de elasticidad, plasticidad, viscoplasticidad, etc. Observando las investigaciones realizadas en este campo nos encontramos con:

- Modelos elásticos lineales o no-lineales (no muy apropiados para estas aplicaciones).
- Modelos viscoelásticos (más apropiados a fenómenos de fluencia y de relajación).
- Modelos viscoplásticos (utilizados durante muchos años en problemas de impacto).
- Modelos basados en plasticidad.
 - Materiales con comportamiento elásto-plástico perfecto.
 - Materiales con comportamiento elásto-plástico con endurecimiento.
- Teoría endocrónica (basada en la teoría viscoelástica complementada con la variable de tiempo intrínseco).
- Mecánica de fractura (teoría que simula las bases para producir la propagación inestable de grietas)
- Teoría de daño (basada en la idea de que un daño ocurre como una degradación de un material bajo deformación).
- Aproximaciones estocásticas.

Cualquiera que sea el modelo elegido, en las acciones dinámicas juega un papel importante las características mecánicas de los materiales que, en el caso que nos ocupa, son el hormigón y el acero, y dentro de ellas las resistencias mecánicas, el módulo de elasticidad y de forma muy especial la "ductilidad".

3. DIFERENCIA ENTRE DUCTILIDAD Y TENACIDAD

Es muy frecuente, como hemos podido observar a través de los años que llevamos enseñando Ciencia y Tecnología de Materiales de Construcción, que muchos alumnos confundan los términos de "ductilidad" y "tenacidad". Ambos conceptos, aunque están relacionados, son diferentes.

La ductilidad se puede considerar como la capacidad que tiene un material para deformarse permanentemente, antes de alcanzar su rotura, y se expresa por medio del alargamiento o por la reducción de sección, generalmente no en valores absolutos sino relativos. En este caso los valores de la longitud o de la sección iniciales tomadas son muy importantes. En ingeniería es muy importante conocer la ductilidad dado que ésta demuestra hasta que punto puede deformarse un material sin alcanzar la rotura.

La tenacidad, por su parte, indica la capacidad de absorber energía un material antes de llegar a su rotura y se expresa mediante el área comprendida entre la curva carga-deformación, el eje de abscisas y la vertical en el punto correspondiente a la rotura.

El consumo de energía necesario para llevar a la rotura al material viene dado, por tanto, por el valor de la fuerza realizada para alcanzar la rotura, que se desplaza a lo largo de la deformación que se tiene al llegar a la misma, durante el tiempo necesario. Se ve, por consiguiente, que para que un material sea tenaz debe poseer resistencia pero también ductilidad. Desde este punto de vista, el plomo tiene poca tenacidad pero mucha ductilidad dado que se deforma mucho antes de

alcanzar la rotura, mientras que un alambre de acero trefilado tiene una resistencia muy alta que le da cierta tenacidad y baja ductilidad dada su poca deformación plástica.

Por supuesto que observando la curva carga-deformación de un material, su rama de comportamiento elástico y la de comportamiento plástico o anelástico, nos podemos hacer a simple vista una idea de la tenacidad y ductilidad que tiene ese material.

4. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

Al “hormigón de alta resistencia” se le suele denominar también “hormigón de altas prestaciones”. Esta última denominación nunca nos ha parecido afortunada y en esto coincidimos con Adam Neville quién dice: “acepto el término de altas prestaciones debido a que todo el mundo parece aceptarlo, pero, sin embargo, no por eso dejo de considerarlo presuntuoso.

Los hormigones de alta resistencia se dice que además son de alta durabilidad (Cánova, 2011). Esta afirmación puede prestarse confusión. Es cierta en cuanto a que debido a su baja porosidad, la permeabilidad al agua y la velocidad de difusión de sustancias agresivas disminuye considerablemente, lo que repercute en una mayor durabilidad frente a medios químicos agresivos y a la corrosión de armaduras. Por este mismo motivo su resistencia a los ciclos hielo-deshielo es mayor que en los hormigones tradicionales lo cual no descarta el que en ocasiones haya que emplear agentes aireantes en condiciones ambientales extremas. No lo es cierta en cuanto estos hormigones utilizan un alto contenido de cemento con lo cual el peligro de fisuración por retracción es elevado a lo que contribuye también el que el contenido de agua de amasado no suele bajar con respecto a un hormigón tradicional aunque la relación a/c sea pequeña. El alto contenido de cemento obliga a una más cuidadosa selección de áridos por el mayor peligro de reacción árido álcali. Así mismo, este alto contenido de cemento hace que el peligro de retracción térmica en los mismos sea grande como se aprecia en la microfisuración que presentan la mayoría de ellos. Por último, hay que indicar que son más sensibles a la acción del fuego y que su falta de ductilidad es un factor muy negativo, o lo que es igual su fragilidad los hace peligrosos en algunas aplicaciones.

El comportamiento frágil de estos hormigones puede ser un grave inconveniente especialmente en zonas de elevado riesgo sísmico, de aquí el que estos hormigones encuentren mucha desconfianza en su utilización en pilares de edificios altos situados en zonas sometidas a sismos.

El Código Modelo CEB-FIP de 1990 indica como las curvas tensión-deformación del hormigón varían de acuerdo con la resistencia del mismo, observándose como la curva post-pico descende casi en vertical cuando la resistencia del hormigón supera los 60 N/mm², es decir, la deformación plástica prácticamente desaparece (Figura 1).

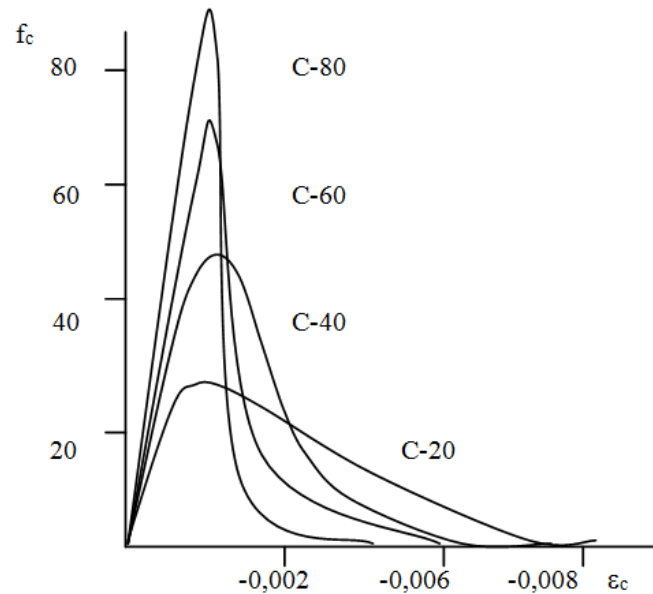


Figura 1. Diagramas de tensión-deformación de hormigones de diferentes resistencias a compresión.

La española Instrucción de Hormigón Estructural EHE 08(Comisión Permanente del Hormigón, 2008) tipifica los hormigones de acuerdo con su resistencia característica dentro de la gama comprendida entre 20 a 100 N/mm², si bien los utilizados en hormigón armado su resistencia mínima esta limitada en 25 N/mm². Desde el punto de vista de análisis estructural la Instrucción indica que son aplicables los principios y métodos de cálculo establecidos en la misma, recomendándose en el caso de realizar un análisis lineal con redistribución limitada, garantizar la ductilidad de las secciones críticas. El aumento de resistencia supone una pérdida de ductilidad para el hormigón y esta situación puede conducir a una pérdida de ductilidad a nivel seccional.

Con respecto al calculo de secciones y elementos estructurales, considera que en el diagrama parábola-rectángulo o en el diagrama rectangular, se tenga en cuenta la disminución progresiva de la deformación de rotura cuando aumenta la resistencia del hormigón, para lo cual para secciones en las que intervengan hormigones de resistencia superior a 50 N/mm² modifica, en el diagrama parábola rectángulo las deformaciones de rotura a compresión simple ϵ_{co} y la deformación última ϵ_{cu} de acuerdo con la resistencia característica del hormigón f_{ck} , y en el diagrama rectangular la altura del bloque comprimido de acuerdo con f_{ck} .

Este efecto de falta de ductilidad de los hormigones de resistencia alta se tiene en cuenta también al limitar, de acuerdo con el valor de f_{ck} , los valores a tomar del esfuerzo de cortante de agotamiento por compresión oblicua o del torsor de agotamiento en bielas comprimidas o en la tensión máxima resistente de punzonamiento en el perímetro crítico.

5. CONFINAMIENTO

El confinamiento consiste en impedir la deformación transversal a la dirección del esfuerzo en un elemento estructural. El confinamiento en un pilar en general, y en particular cuando éste sea de alta resistencia, da lugar a un buen aprovechamiento de la resistencia a compresión del hormigón al frenar la rotura por fragilidad del mismo.

El confinamiento del hormigón modifica de una forma notable la rama descendente post-pico de la curva tensión-deformación (Figura 1). La influencia de este confinamiento ha sido estudiada por muchos investigadores entre los que hay que destacar a Kent y Park, que consideran la rama post-pico descendente como rectilínea, y a Mander, Popovics y Diniz que basa, este último, sus estudios en los diagramas de Furfiti y Cusson, que consideran a esta rama descendente como curva.

Para ver el efecto de confinamiento del hormigón es recomendable elegir entre los muchos modelos existentes de curvas tensión-deformación los propuestos por Kent y Park en 1971 y el modelo propuesto en 1995 por Cusson y Paultre que es una perfección del de Popovics de 1973.

En el primero, de Kent y Park, el diagrama tiene la forma de la Figura 2. La parte ascendente de la curva es una parábola de segundo grado y en ella se supone que el acero de confinamiento no afecta a la curva ni a la deformación de pico. Se supone que la máxima resistencia f_{lc} se corresponde con la resistencia característica del hormigón y se desprecia el aumento que produce el confinamiento.

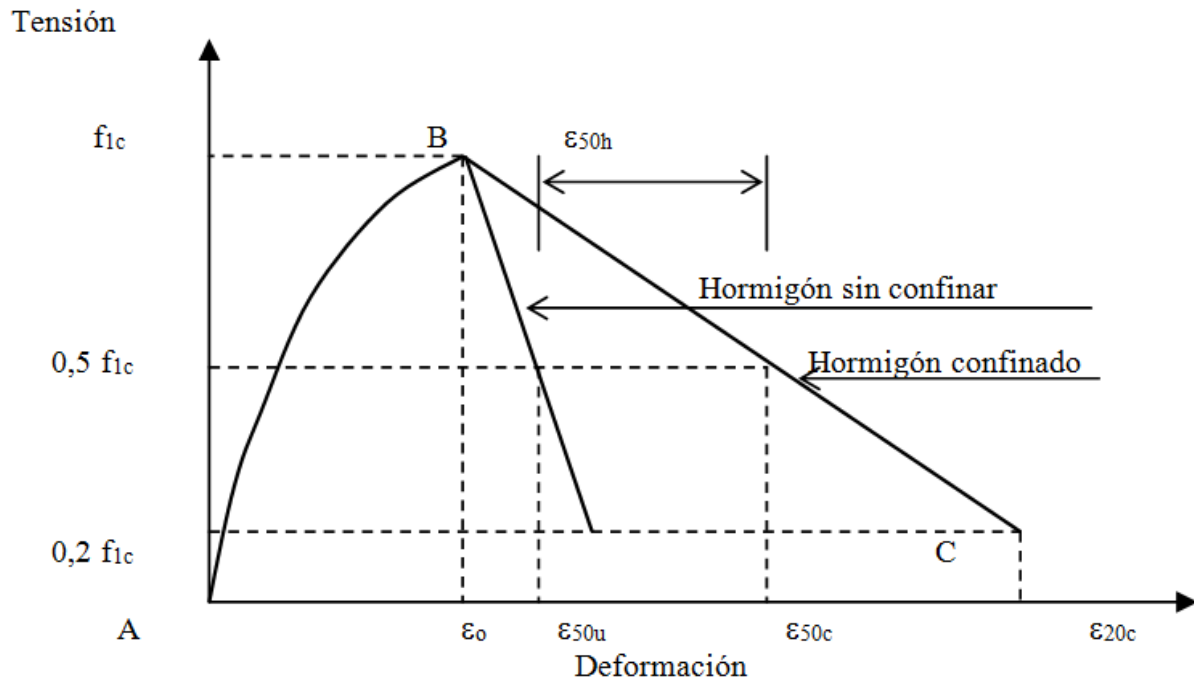


Figura 2. Diagramas de Kent y Park de tensión-deformación para hormigones confinados y sin confinar.

En el modelo de Cusson y Paultre el diagrama tensión-deformación toma una forma muy elocuente en la que se aprecia perfectamente el efecto del confinamiento según se ve en la Figura 3.

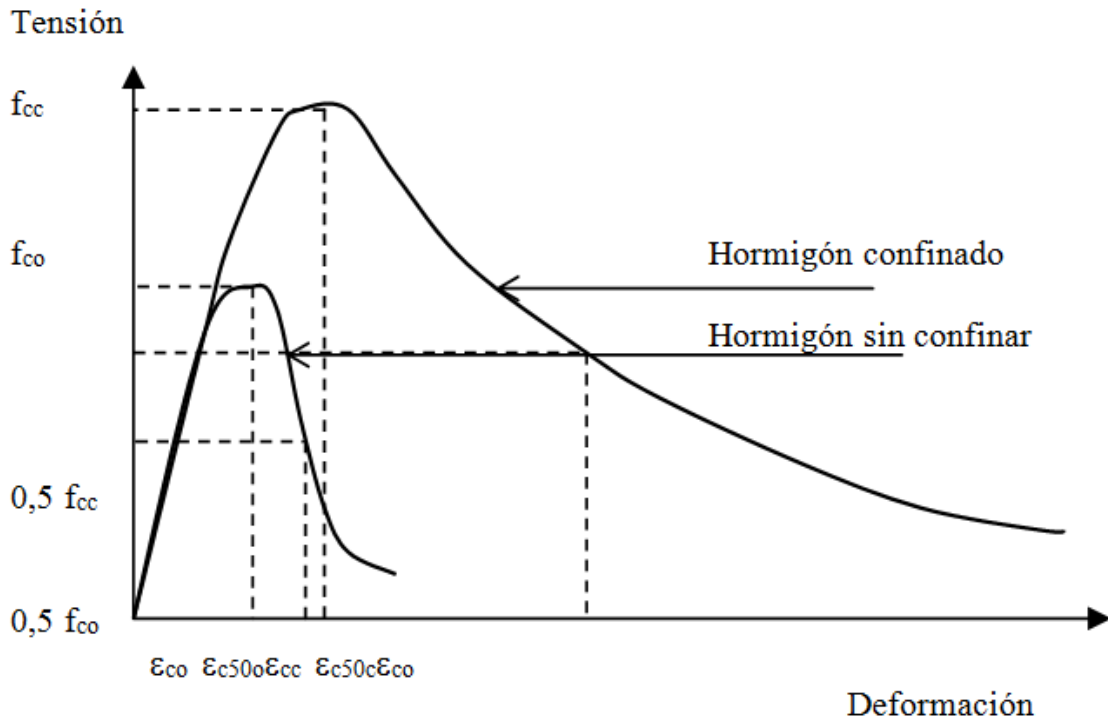


Figura 3. Diagramas de Cusson y Paultre de tensión-deformación para hormigones confinados y sin confinar.

Como se ve en el gráfico anterior, Kent y Park consideran que la deformación de pico es una constante para cualquier tipo de hormigón y la tensión de pico no se incrementa con la existencia del confinamiento. Cusson es más realista con su modelo viéndose como la deformación de pico y la resistencia del hormigón dependen del confinamiento del mismo.

Cualquiera que sea el caso, se aprecia en ambos gráficos como la ductilidad y la tenacidad crecen de una forma notable con el confinamiento.

Yazzar (Yazzar, 2000), ha realizado un estudio muy completo sobre confinamiento creando su propio modelo que se ajusta bastante bien a la experimentación. En sus trabajos utiliza probetas de sección cilíndrica y de sección cuadrada fabricadas con hormigones de 25, 50, 75 y 100 N/mm^2 , y con diferentes grados de confinamiento que oscilan entre 0 y 4,22 %. El modelo de curva tensión- deformación obtenido después de analizar los resultados del ensayo de 224 probetas se parece mucho al obtenido por Cusson según puede apreciarse en las Figuras 4 y 5.

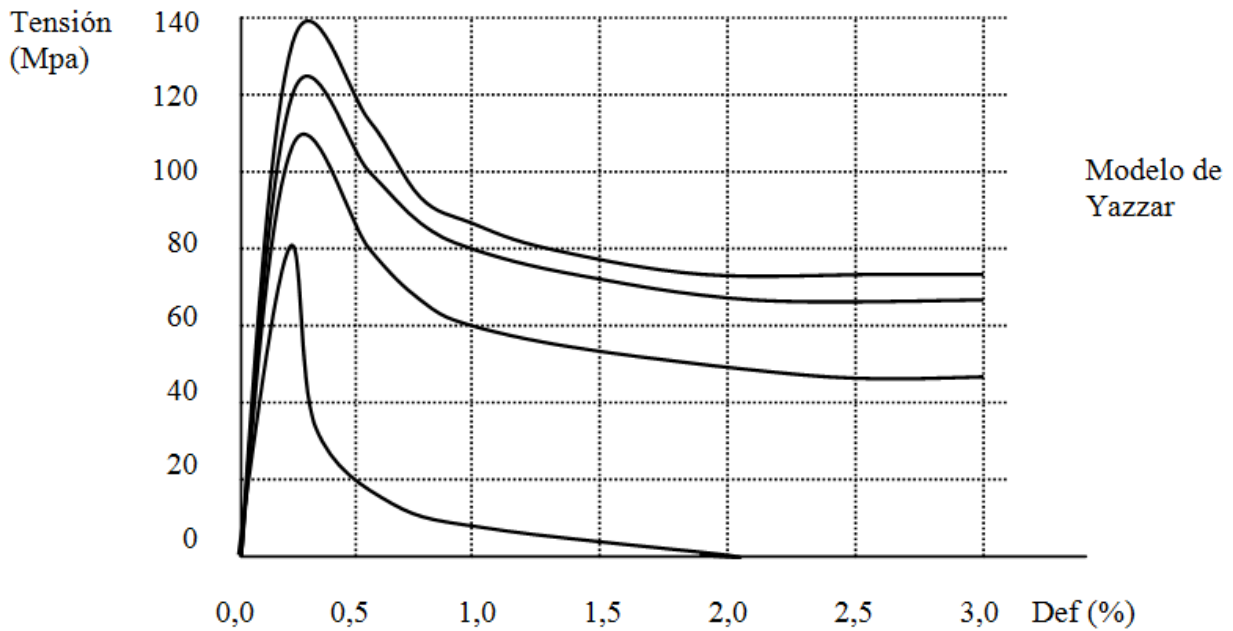


Figura 4. Diagramas de Yazzar de tensión-deformación para hormigones confinados de resistencias a compresión de 25, 50, 75 y 100 N/mm².

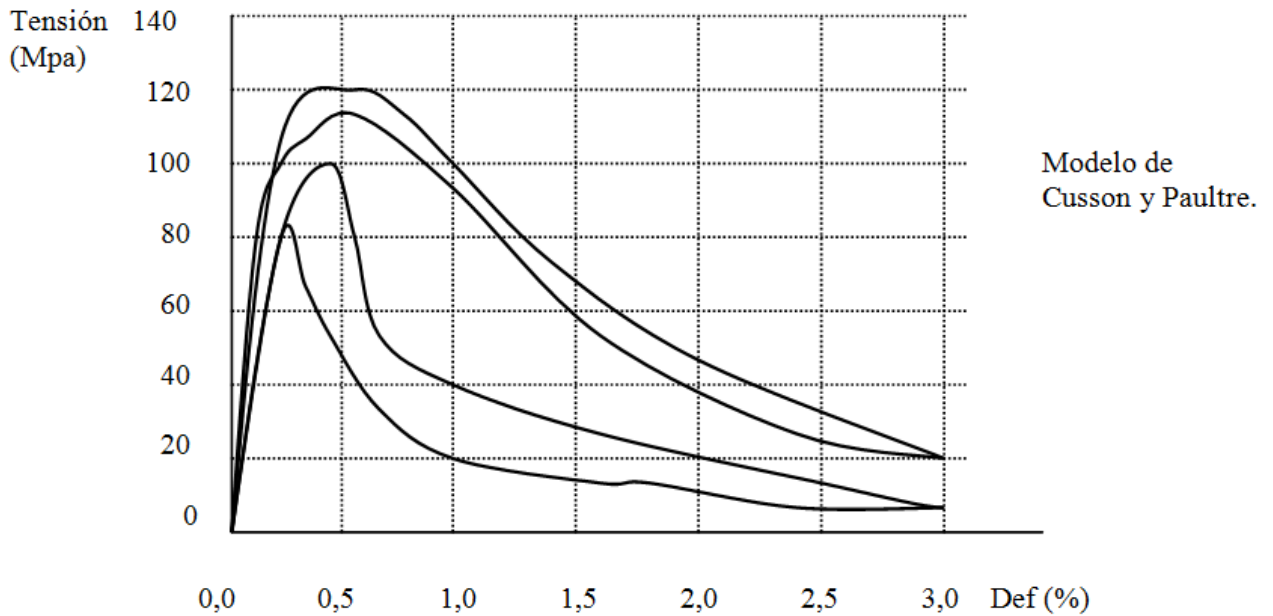


Figura 5. Diagramas de Cusson y Paultre de tensión-deformación para hormigones confinados de resistencias a compresión de 25, 50, 75 y 100 N/mm².

Los parámetros empleados en esta investigación se introdujeron en el modelo de Kent y Park obteniéndose el gráfico de la figura 6 en el que se puede apreciar perfectamente como en los hormigones tradicionales (25 N/mm^2) la influencia del grado de confinamiento sobre la ductilidad es muy pequeña y como, sin embargo, en los hormigones de alta resistencia (90 N/mm^2) el grado de confinamiento es fundamental para conseguir que estos sean dúctiles.

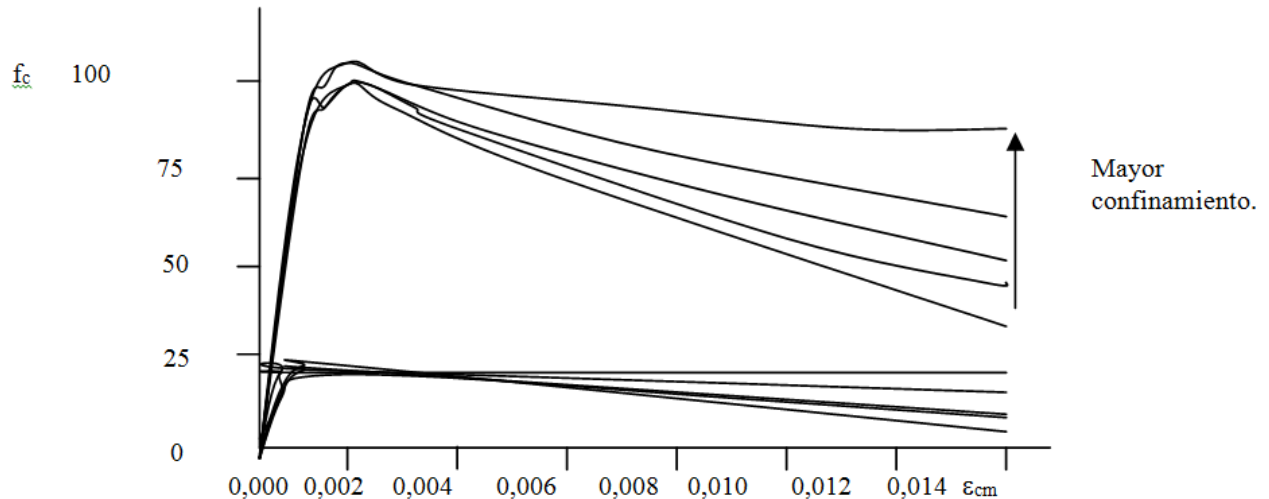


Figura 6. Diagramas de Kent y Park de tensión-deformación para valores de resistencia a compresión de 25 y 100 N/mm^2 y confinamientos de 0 y 4,22%.

En los ensayos de compresión con confinamiento se observa que antes de llegar a la tensión de pico se produce la rotura del recubrimiento de la armadura, lo cual es lógico dado las distintas tensiones a las que están sometidos el hormigón del núcleo y el de recubrimiento, el primero sometido a una compresión prácticamente triaxial por el efecto de la armadura transversal y el segundo a compresión simple. La rotura del hormigón de recubrimiento hace que se pierda un porcentaje de resistencia importante por este efecto. Empleando fibras de acero como adición al hormigón se ha podido comprobar que no sólo la ductilidad crece de una forma considerable sino que también se elimina la rotura y desprendimiento del hormigón del recubrimiento.

6. FORMA DE CONSEGUIR EL CONFINAMIENTO

Para corregir el efecto de la falta de ductilidad en pilares, y especialmente en las zonas críticas de éstos, los códigos especifican unas cuantías mínimas de refuerzo transversal en esas zonas, basándose esas cuantías en criterios experimentales y de resistencia. Cuando se trata de pilares contruidos con hormigón tradicional estas cuantías de refuerzo aseguran una ductilidad suficiente de los mismos, pero estos criterios son de dudosa aplicación a la hora de proyectar pilares contruidos con hormigones de alta en los que hay que tener en cuenta que para conseguir una buena resistencia frente a los sismos hay que tener estructuras que puedan disipar una gran cantidad de energía especialmente mediante deformación inelástica y el hormigón de alta resistencia carece de esta deformación.

Yazzar en sus ensayos de confinamiento sobre pilares ha empleado elementos estructurales a escala natural, estando formados éstos por dos medios pilares alineados que por su base se unen a un trozo de macizo muy rígido que simula el empotramiento perfecto de la cimentación. Los dos medios pilares se someten a la acción de una carga axial fija, mientras que la parte correspondiente al macizo central se somete a una carga cíclica creciente. Un esquema del sistema empleado por Yazzar en su investigación es el que aparece en la Figura 7.

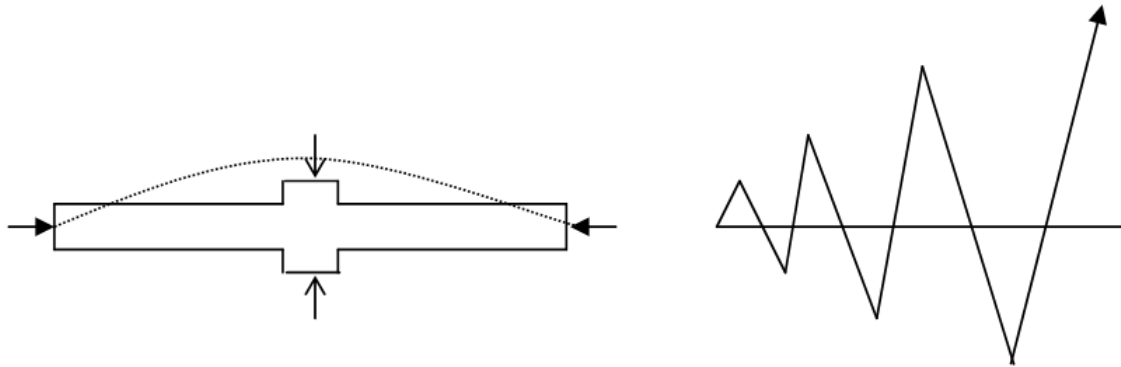


Figura 7. Elemento estructural formado por dos semipilares y losa de entrepiso para ensayar frente a la acción dinámica de una carga cíclica de intensidad creciente.

Al actuar así se tienen dos pilares unidos a la base que es el macizo.

En sus ensayos Yazzar emplea pilares con esbelteces por encima y por debajo de la esbeltez mecánica límite dada por la Instrucción española EHE que es de 35. Para cada esbeltez emplea un hormigón normal (HN) de 42 N/mm^2 , un hormigón de alta resistencia (HAR) de 90 N/mm^2 y el mismo HAR-90 con incorporación de 0,7% de fibras de acero (55 kg/m^3) de 30 mm de longitud y esbeltez 60. La cuantía de refuerzo transversal empleado es del 1,2 % en el caso de HN y de 1,9% en los dos casos de HAR.

En estos ensayos Yazzar determina los tres parámetros relacionados con la ductilidad: longitud de la rótula, la rama descendente de la curva tensión-deformación, y la capacidad de rotación de la rótula.

Después de los ensayos se pudo comprobar como los pilares de HN presentaban un nivel de daños muy inferior al que presentaban los de HAR, siendo en las proximidades del macizo, es decir en las zonas críticas donde se forman las rotulas, donde se produce un desprendimiento intenso de hormigón de recubrimiento. Los pilares de HAR reforzado con fibras de acero presentaban un aspecto mucho mejor no apreciándose desprendimiento del recubrimiento a pesar de haber soportado un momento flector máximo ligeramente superior y con curvaturas muy parecidas a las de los otros pilares.

El diagrama momento-curvatura para estos pilares de hormigón de alta resistencia reforzados con fibras de acero puede verse en la figura 8, apreciándose como el comportamiento experimental es notablemente mejor que el del modelo teórico propuesto y bastante mejor que el de la curva de Kent y Park.

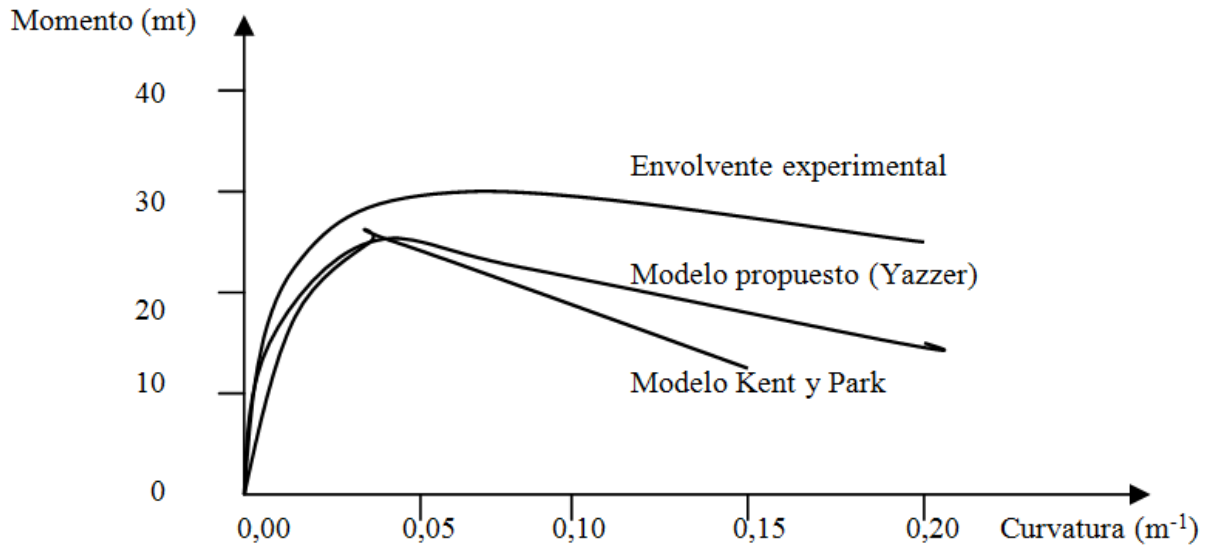


Figura 8. Comparación entre las curvas tensión-deformación obtenidas con el modelo de Kent y Park en el ensayo de viga de entrepiso, las obtenidas con el modelo de Yazzer y las obtenidas experimentalmente.

En el caso de pilares de hormigones de alta resistencia adecuadamente confinados se obtiene un comportamiento muy dúctil manteniendo grandes deformaciones, de aquí que el bloque rectangular de esfuerzos a compresión se pueda considerar como un parámetro importante para determinar la ductilidad de la sección. En caso de que el confinamiento no sea el adecuado los pilares terminan por fallar por rotura frágil y el comportamiento de los mismos es mucho peor que en el caso de pilares construidos con hormigón tradicional.

7. ACCION DE LOS EXPLOSIVOS

Cuando un explosivo sólido, líquido o gaseoso, explota en la proximidad de una pantalla de hormigón armado la onda de choque que incide sobre la misma (Figura 9) ocasiona deformaciones que pueden llegar a ser tan importantes como para que se produzca su destrucción y la fragmentación del hormigón de sus paramentos que pueden salir lanzados a gran velocidad impactando sobre personas y objetos más o menos próximos.

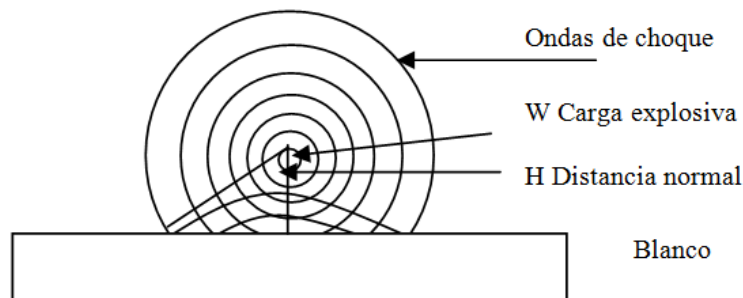


Figura 9. Ondas incidentes y reflejadas sobre un muro-blanco sometido a la acción de una carga explosiva de carga W situada a una distancia H del muro.

Cuando una pantalla se ha de proteger frente a explosiones, en su diseño, normalmente, se tiene como datos básicos la presión de la onda de choque y la duración de actuación de esta onda sobre el elemento. En las pantallas o los recintos protegidos la fragmentación puede adquirir una importancia grande en el diseño de la protección. Las propiedades físicas y químicas del explosivo determinan la magnitud de la presión de la onda de choque, mientras que la distribución de presiones sobre el recinto o edificio es función de la localización del explosivo con respecto a los componentes estructurales del mismo, contando en esta localización la distancia y el ángulo de incidencia de la onda con respecto al plano del elemento considerado. La magnitud y características de la onda de choque son las acciones que van a condicionar la respuesta dinámica de la estructura en función de sus dimensiones y de la cuantía de acero de armado que posea (Department of the Army).

La velocidad de los fragmentos es también función de las propiedades del explosivo, de su situación con respecto a la estructura y de la propia tenacidad del hormigón.

Por otra parte, los daños producidos por una misma cantidad de un explosivo determinado son dependientes de si la explosión es libre y exterior al edificio o recinto o, por el contrario, si ésta se encuentra confinada en el interior del mismo. Por supuesto que el segundo caso es el que mayor magnitud de daños ocasiona.

A veces los explosivos se encierran en contenedores de cierta rigidez dentro de los cuales se colocan elementos que actúan como metralla (tuercas, tornillos, remaches, etc.). Estos elementos, dependiendo de su masa y velocidad, conocidos como fragmentos primarios, pueden penetrar pantallas, generalmente no protegidas, causando daños importantes en el personal y en los equipos situados tras dichas pantallas.

El grado de protección dado por una estructura se elige de acuerdo con la cuantía de los daños que se trata de evitar. Así, generalmente para personal y equipos se suele exigir protección completa frente a un determinado tipo y cantidad de explosivo actuando a una distancia determinada.

La respuesta dinámica de una estructura frente a un explosivo depende de las propiedades (tipo, peso, forma, etc.) del mismo, la localización de éste, la ductilidad de la construcción protegida, y las propiedades físicas y configuración de la construcción. Para una estructura dada y explosivo determinado, la presión de cálculo es función de la localización del explosivo con respecto a la estructura protegida.

Los criterios de cálculo son de tres niveles (Escuela Politécnica Superior del Ejército, 1981). En el primer nivel que corresponde a alta presión, se tiene una onda de muy alta presión y corta duración; esta onda tan rápida no permite por falta de tiempo, el que la estructura alcance su flecha máxima. En este nivel la relación entre el tiempo de respuesta y el de duración de la onda es $t_m/t_o > 3$. Los niveles de presiones para los que ocurren estas condiciones son muy altos y siempre con presiones muy superiores a los 1,4 N/mm² (200 psi). En el nivel intermedio la onda de presión de choque tiene una presión muy baja pero la duración es más alta con lo cual la estructura tiene un tiempo de respuesta intermedio, de forma que $3 > t_m/t_o > 0,1$, y con niveles de presión de onda de valor inferior a 1,4 N/mm². El tercer nivel o de baja presión, es el inferior de los tres con ondas de choque de baja presión pero de larga duración, este nivel tiene lugar para presiones inferiores a 0,07 N/mm² (10 psi) y la relación entre el tiempo de respuesta y el de duración de la onda incidente es $t_m/t_o > 0,1$.

En el primer caso, el criterio de cálculo esta basado en la acción de un impulso, mientras que en el segundo en una función de la presión-tiempo y en el tercero en la amplitud de la onda de choque.

Cuando los elementos se encuentran sometidos a la acción de explosivos situados próximos a ellos y actuando perpendicularmente a la superficie principal el criterio de cálculo a seguir es el primero de los mencionados anteriormente, es decir de impulso, en el cual se tiene en cuenta el área comprendida dentro de la curva presión-tiempo (figura 10), en la que se observa como la onda ejerce un efecto positivo hasta un tiempo t_0 y luego lo hace negativo con presiones muy inferiores a las de la fase positiva.

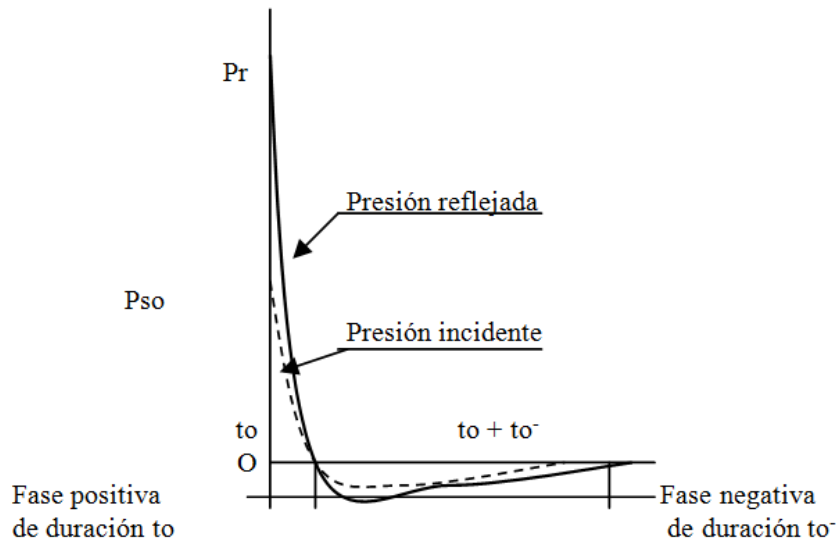


Figura 10. Curva de presiones incidente y reflejada sobre un muro provocadas por la explosión de una carga explosiva.

Siempre que una onda de presión incide sobre una estructura se produce una onda reflejada cuya presión puede llegar a ser varias veces superior a la de la onda incidente, dependiendo del ángulo de incidencia y de la propia presión de la incidente.

Las estructuras responden frente al impacto dinámico de las explosiones de acuerdo con dos comportamientos diferentes, uno dúctil en virtud del cual el elemento estructural adquiere una gran deformación inelástica que no llega a producir el colapso del mismo, y el otro de tipo frágil con el cual llega a producirse el colapso parcial o total del elemento. El que un elemento estructural se comporte en uno u otro sentido depende de la magnitud y duración de la explosión, de que se produzca fragmentación con facilidad y en definitiva de la ductilidad y de las características resistentes del mismo.

Cuando un elemento estructural muy armado se carga dinámicamente el elemento flexa y se fisura. El tiempo de deformación viene dado por la condición de que la energía de deformación sea igual a la energía cinética producida por la carga aplicada. Cuando esto ocurre, si el acero de las armaduras ha superado el límite elástico, el elemento quedará con una deformación remanente, se producirán proyecciones de fragmentos y el colapso parcial o total del mismo de acuerdo con la magnitud de la deformación experimentada que será función, para una carga dinámica dada, de la luz del elemento estructural (pantalla), del espesor del mismo, de la cuantía y tipo de acero empleado, de la disposición de la armadura, y de la forma y cuantía de fibras de acero utilizadas.

Si las cargas no son excesivamente grandes el límite elástico no se superará y el elemento estructural flexionará pero recuperará su forma primitiva con o sin fisuración del hormigón.

A fin de asegurar un comportamiento tenaz y optimizar el desarrollo de energía de deformación disponible en el hormigón armado es preciso disponer de una armadura con características de diseño diferentes a las del hormigón armado tradicional, especialmente para absorber los grandes esfuerzos de cortante que pueden producirse.

Los elementos hay que armarlos simétricamente haciendo que la armadura situada en la zona comprimida tenga la misma cuantía y disposición que la situada en la zona traccionada, es decir, las armaduras del paramento interior y exterior del muro deben ser simétricas con respecto al plano medio del mismo. Las barras horizontales deben estar enlazadas por medio de barras en diagonales continuas y dispuestas en forma de lazos.

Por último hay que indicar que dada la importancia que tiene el evitar desprendimiento de fragmentos que puedan ocasionar daños humanos o materiales, es conveniente reforzar al hormigón utilizado en las pantallas por medio de la incorporación a su masa de fibras de acero. Estas fibras, además de atar al hormigón impidiendo la proyección de fragmentos, tienen la ventaja de que, por el considerable aumento que producen en la ductilidad del hormigón, incrementan de forma considerable su resistencia al impacto provocado por los explosivos así como la penetración de fragmentos primarios procedentes de la metralla, e incluso la penetración de proyectiles de mediano calibre procedente del exterior.

En la figura 11 se representa la sección de uno de los muros de un "bunker", proyectado últimamente por el autor de este artículo, que encierra el centro de procesos de datos de la sede central un banco español de ámbito internacional, protegido frente a la amenaza de acciones terroristas con explosivos. Con anterioridad ya había proyectado, bajo la iniciativa de IBM, otro centro informático para la central en Madrid de una cadena de supermercados multinacional, situado debajo de un aparcamiento al aire libre y protegido por una losa capaz de resistir la acción de 50 kg de explosivo situado en una furgoneta que estuviese aparcada sobre ella.

En caso de explosión no debían de producirse el colapso de la losa ni proyección de fragmentos que pudiesen poner fuera de servicio los equipos de informática y electrónicos situado en el centro subterráneo.

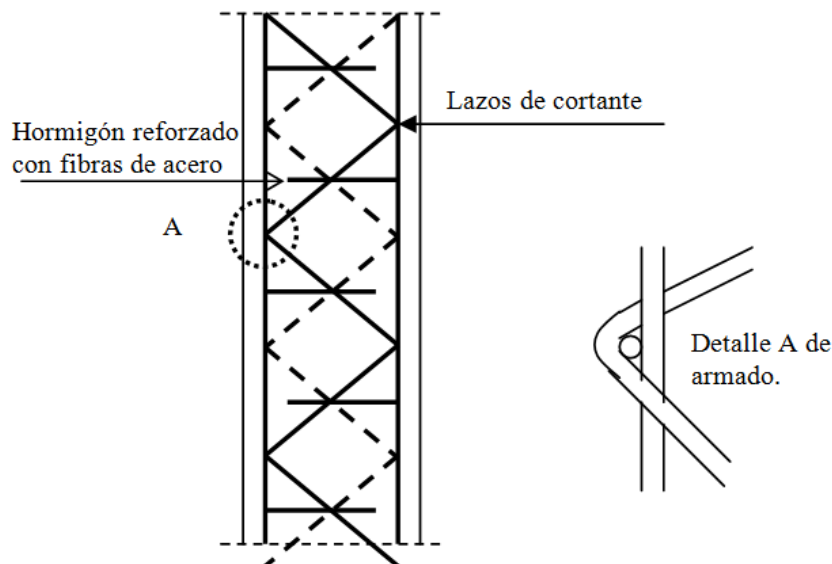


Figura 11. Diseño de armadura de acero para resistir las solicitaciones de flexión y cortante en muros sometidos a cargas explosivas.

8. IMPACTO DE PROYECTILES

El efecto del impacto de proyectiles sobre barreras de hormigón normal y reforzado con fibras homogéneamente en su masa ocurre en varias etapas evolutivas que reflejan los diferentes estadios en los que se descompone el proceso de perforación de un blanco.

El proyectil en vuelo libre tiene una velocidad mayor que las ondas de presión generadas por su movimiento. Por tanto, el blanco se ve sometido en primer lugar a la acción del proyectil cuando entra en contacto con él. La acción de las ondas de presión que llegan retrasadas es despreciable en comparación con la del impacto que es el efecto principal.

La energía transferida al blanco se disipa en la generación y propagación de ondas de presión, energía cinética de fragmentos y, fundamentalmente, en forma de calor por fricción en la penetración. Esto produce un gran aumento de temperatura en el entorno del proyectil puesto que, por la escasa duración del fenómeno, puede considerarse a éste como sometido a un proceso adiabático.

La fragmentación anterior o “spalling” es generada por ondas de presión superficiales (de Rayleigh) cuyo efecto es limitado en profundidad; a partir de cierto valor, el volumen de fragmentos no depende de la energía cinética del proyectil. Respecto al momento del impacto el lanzamiento de fragmentos se produce con cierto retraso según hemos podido comprobar con cámaras fotográficas ultrarrápidas (Almansa, 1999; Cánovas, 2000; Pamies, 2000).

Puesto que hasta que no llega el primer frente de onda, el material permanece íntegro, la velocidad de propagación del frente de onda longitudinal, transversal y de Rayleigh puede estimarse para el hormigón en régimen elástico en 3700, 2400 y 2100 m/s respectivamente, con lo que el frente de onda se propaga a una velocidad muy superior a la del proyectil en el interior del blanco; de modo que si la energía transferida es suficiente para fracturarlo éste se encontrará fuertemente dañado cuando entre en contacto con el proyectil, frenarlo y elevado su temperatura por generación de calor. Este aumento de temperatura repercute inevitablemente en las características mecánicas del blanco.

La fragmentación posterior o “scabbing” se atribuye a las ondas de Rayleigh y a la reflexión de las ondas de presión de la cara trasera; la onda reflejada pasa a ser de tracción, fracturando y lanzando fragmentos desde la cara posterior. Para que se produzca el “scabbing”, el proyectil debe acercarse suficientemente a la cara trasera.

Entre el cráter anterior, o “spalling”, y la perforación completa precedida del “scabbing”, se desarrolla un mecanismo distinto a la fragmentación del material, que es la perforación en forma de túnel cuyo diámetro coincide con el del núcleo rígido del proyectil. Las paredes de este túnel tienen una gran limpieza en el corte, por lo que no pueden deberse a la fragmentación o fractura del hormigón (Figura 12).

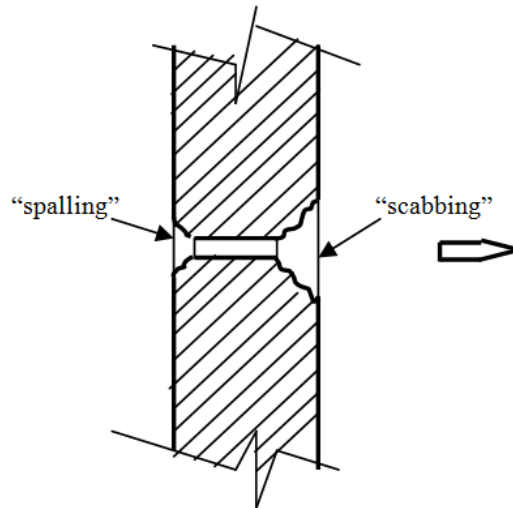


Figura 12. Perforación de un proyectil de núcleo duro en un blanco de hormigón.

En un blanco suficientemente grueso predomina la pérdida de energía cinética por generación de calor en régimen adiabático e irreversible. La pérdida de tensión debida al aumento de temperatura provoca la concentración de deformaciones en los bordes del proyectil, que es donde más calor se desprende por fricción, y donde se concentran tensiones de cizalladora. El material que se encuentra frente al proyectil es desplazado y comprimido hacia los lados; o bien si el proyectil está cerca de la cara posterior se produce el “scabbing”, saliendo lanzado el material hacia el exterior.

Es importante destacar el carácter irreversible del proceso porque incide o explica su carácter no determinista. Se comprende que hay muchas configuraciones finales posibles, equiprobables en principio, del sistema proyectil-blanco partiendo del mismo estado inicial, pero ninguna de ellas define al primero.

En el fenómeno de perforación de proyectiles interviene también el espesor del blanco. Cuando el blanco es “masivo”, es decir, con espesor superior a alguna de las características del proyectil, por ejemplo su calibre, se favorece el proceso de disipación de energía por generación de calor en régimen adiabático y el que el proyectil pueda modificar su estabilidad giroscópica dentro del banco. Si el blanco es “delgado” como ocurre normalmente con los metálicos, de materiales compuestos, e incluso de hormigones de alta resistencia reforzados con fibras de acero, la disipación de energía del proyectil se hace por deformación plástica en un área más o menos grande según la energía del material que impacta y la ductilidad del material, de aquí la importancia de la tenacidad y ductilidad en este caso. La deformación plástica supone generación de calor y por tanto, las ecuaciones constitutivas deben incluir una dependencia entre la velocidad de deformación y la temperatura, presumiblemente en régimen adiabático. Dado el pequeño espesor de estos blancos la pérdida de estabilidad giroscópica del proyectil es muy pequeña con lo cual el cálculo se centra en los campos de tensiones y deformaciones para determinar si el material de la barrera puede resistir al impacto.

En nuestros trabajos (Almansa, 1999; Cánovas, 2000; Pamies, 2000) hemos llegado a un modelo analítico que nos permite determinar el espesor que perfora un proyectil determinado de núcleo duro, así como el espesor preciso para que no llegue a producirse “scabbing” y por consiguiente desprendimiento de hormigón en el interior de edificios de hormigón dentro de los cuales pueda existir riesgo para el personal y equipos especiales que encierran.

En los cálculos partimos de la masa y momento de inercia transversal del proyectil supuesto éste perfectamente axilsimétrico, del factor de frenado del blanco “K”, en J/cm, que depende del tipo de proyectil (constitución y estructura interna) y del material contra el que impacta. En nuestro caso hemos utilizado dos hormigones uno de 40 N/mm² y otro de 100 N/mm² de resistencia característica, reforzados con cuantías de fibras de acero 0, 80, 120 kg/m³ de hormigón, siendo las fibras Dramix de 0,5 mm de diámetro y 50 mm de longitud. La determinación de “K” se hace experimentalmente en blancos “masivos” considerándolos masivos cuando el espesor del blanco es de al menos diez veces el calibre del proyectil. Experimentalmente hemos comprobado que en proyectiles homotéticos de la misma composición y estructura interna el factor “K” es proporcional al calibre.

Con todo esto, llegamos a establecer un gráfico, que en el caso de hormigón de 40 N/mm², es el representado en la figura 13 en el que aparece la relación entre la energía cinética inicial adimensionalizada, E_0/eK , siendo “e” el espesor del blanco y “K” el factor de frenado; y la penetración efectiva adimensionaliza, $t = x/e$.

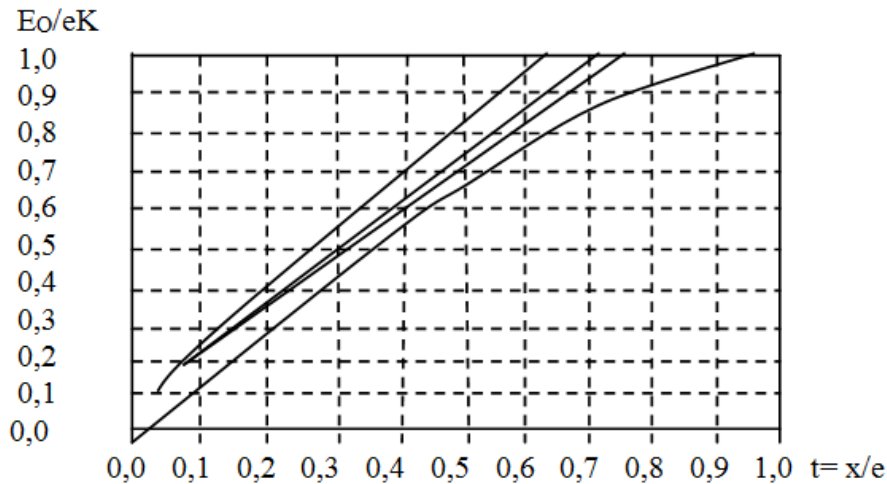


Figura 13. Curvas de energía cinética inicial/factor de frenado - penetración efectiva, ambas adimensionales, de un proyectil actuando sobre un blanco de hormigón de $f= 40 \text{ N/mm}^2$ y diferentes contenidos de fibras de acero.

Para el cálculo es preciso conocer el valor de “K” y ésta es una variable aleatoria de valor acotado que indica la posición media de la fuerza de frenado que se aplica al proyectil. Hemos podido comprobar que tomando valores medios de $K = 0, 0,25, 0,50$ y $0,75$ se consigue una aproximación bastante buena sin necesidad de integrar las ecuaciones diferenciales obtenidas en el modelo analítico.

Los resultados que obtenemos son conformes con la realidad experimental. El riesgo de “scabbing” depende de la cuantía de fibras de acero incorporadas al hormigón. Si se emplean sólo 40 kg/m³ de fibras el riesgo de “scabbing” es grande cuando el proyectil alcanza el 40% del espesor del blanco. Si se aumenta el contenido de fibras este umbral se eleva al 65% del espesor. Para producir “scabbing” en un hormigón con 80 ó 120 kg/m³ de fibras es precisa una energía cinética al impactar superior al 80% de la necesaria para perforar el blanco de hormigón ($E_0/eK=1$). El hormigón de 40 Kg/m³ precisa únicamente el 55% de aquella cantidad de energía que además es menos.

De todo lo anterior vemos la importancia de la incorporación de fibras de acero al hormigón para frenar la entrada de proyectiles pero especialmente para reducir el riesgo de “scabbing” y la rotura frágil del hormigón.

9. CONCLUSIONES

En elementos estructurales sometidos a acciones de tipo dinámico como pueden ser: sismos, ondas de choque procedentes de explosiones, impacto de vehículos, aeronaves o buques, impacto de proyectiles, etc., la ductilidad de estos elementos juega un papel importante en la reducción de daños y en un posible colapso de las estructuras. Si la mejora de la ductilidad es importante en estructuras construidas con hormigón convencional, aun lo es mucho más en estructuras construidas con hormigón de alta resistencia debido a la poca capacidad de deformación anelástica que presenta. En estos casos un confinamiento con la armadura adecuadamente diseñada (Department of the Army), mejorado con la adición de fibras de acero, puede ser una buena solución para evitar que aparezcan daños, o que en el caso de que estos se produzcan sus efectos no sean tan trágicos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Almansa, E. M.; Cánovas, M. F. (1999), *Behaviour of normal and steel reinforced concrete under impact of small projectiles*, Cement and Concrete Research 29: pp 1807-1814.
- Almansa, E. M.; Cánovas, M. F. (2000), *Discusión del impacto de proyectiles de pequeño calibre en hormigón. Exposición de un método de cálculo y diseño*, ASINTO n° 258: pp 42-54.
- Cánovas, M. F.; Pamies, R. G.; Simón, J. R.; Almansa, E. M. (2000), *An empirical equation for penetration depth of primary fragments into conventional and steel reinforced concrete targets, based on experimentation generated by the HE81 mortar grenade*. European Forum on Ballistics Projectiles EFBP2000, (Saint-Louis, France): pp. 409-415.
- Comité Euro-International du Béton. CEB (1988), *Concrete structures under impact and impulsive loads*, Bulletin D'Information n° 187 (Lausanne, Suiza): 160 pp.
- Cánovas M. F. (2011), *Hormigón*. (Madrid, España, Colegio Ingenieros Caminos, Canales y Puertos,) 670 pp.
- Comisión Permanente del Hormigón (2008), *Instrucción del Hormigón Estructural, EHE*, (Madrid, España, Ministerio de Fomento): 772 pp.
- Department of the Army, the Navy and Air Forces (USA): *Structures to resist the effects of accidental explosions*. TM 5-1300; NAVFAC P-397; AFM 88-22.
- Escuela Politécnica Superior del Ejército (1981), *Fortificación y dinámica de estructuras*, (Madrid, España, EPSE), 485 pp.
- Yazzar, S. A (2000), *Estudio de la ductilidad de elementos comprimidos fabricados con hormigón de alta resistencia sometidos a cargas cíclicas de flexión*. Tesis doctoral, (Universidad Politécnica de Valencia, España): 349 pp.