

CARGAS EXPLOSIVAS SOBRE PILARES Y FORJADOS MODELADOS CON ELEMENTOS TIPO VIGA Y LÁMINA

Mario Bermejo^{1*}, José M. Goicolea¹, Felipe Gabaldón¹ y Anastasio Santos²

1: Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras,
Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

2: Departamento de Ingeniería de Materiales
Universidad Politécnica de Madrid
C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid
e-mail: : mario.bermejo@upm.es

Palabras clave: Explosión, hormigón armado, losa reticulada, colapso progresivo

Resumen. *Los fenómenos de impacto y explosión sobre estructuras de hormigón tienen efectos en muchos casos catastróficos a pesar de su reducida probabilidad. Las estructuras de hormigón no suelen estar diseñadas para resistir este tipo de solicitaciones dinámicas. El análisis numérico mediante elementos finitos con integración explícita permite una aproximación suficiente a los efectos de la onda explosiva sobre pilares y forjados de estructuras reticuladas de hormigón.*

Los materiales recientemente implementados en LS-Dyna para hormigón como el CSCM [1], para elementos de continuo 3D, y la formulación que proporciona la debida compatibilidad con los elementos viga de acero dispuestos de forma segregada, permite estudiar de forma realista modelos detallados de pilares y forjados. Pero las limitaciones computacionales hacen inviable emplear estos métodos en estructuras completas. Como alternativa es posible usar modelos de elementos estructurales de vigas y láminas para el análisis de estas estructuras. Sin embargo es necesario un adecuado ajuste de parámetros y propiedades en estos modelos.

Este trabajo muestra un método con el que obtener modelos de elementos estructurales, elementos viga y lámina, usando modelos de material [2] adecuados para ellos, junto a un procedimiento para incluir la armadura de forma adecuada. Utilizando este método es posible representar con suficiente aproximación el comportamiento de modelos detallados realistas de forjados y pilares de estructuras reticuladas de hormigón frente a acciones explosivas, posibilitando el análisis de una estructura completa frente a explosión.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años varios edificios civiles en todo el mundo han sido objeto de ataques terroristas por medio de cargas explosivas. En el diseño de estos edificios, mayoritariamente contruidos en hormigón armado, no se ha considerado la posibilidad de acciones explosivas o de impacto, que son capaces de causar efectos catastróficos a pesar de su reducida probabilidad de suceso.

En España los atentados de la Terminal 4 de Barajas el 30 de diciembre de 2006, que con una carga entre 500 y 800 kg de explosivo produjo 2 muertos y 52 heridos y el colapso de una gran parte de uno de los seis módulos de aparcamiento [3], y el más reciente de Burgos contra un edificio de la Guardia Civil el 29 de julio de 2009, ocasionando 69 heridos y graves daños al edificio con una furgoneta con más de 300 kg de explosivos, dan muestra de la necesidad de contemplar en el diseño de estructuras civiles la posible acción de explosiones e impactos.

Recientemente se han realizado varios trabajos de investigación en este campo, con diferentes orientaciones tales como modelar pasados ataques terroristas [4], simular la acción explosiva en hormigón armado [5] o explicar el colapso progresivo en edificios civiles [6].

Este trabajo presenta una estrategia de modelización para edificios reticulares de hormigón armado mediante modelos de elementos finitos, utilizando la potencia de los últimos modelos de material y formulaciones implementadas en el código LS-Dyna, que proporciona una precisión suficiente para valorar los efectos de cargas explosivas sobre edificios, y permite comparar distintas propuestas de mejoras de diseño con el objeto de evitar o reducir, en la medida de lo posible, el colapso de la estructura.

Modelos numéricos para simulación y evaluación de alternativas estructurales: Los códigos de simulación numérica para cálculo dinámico permiten, mediante el uso de métodos de elementos finitos lagrangianos con integración explícita en el tiempo, el estudio de la acción explosiva en los tiempos muy cortos en los que dicha acción actúa. En este trabajo usamos el código LS-Dyna [2] para simular explosiones sobre estructuras reticuladas de hormigón, utilizando modelos de material recientemente implementados en dicho código para hormigón como el CSCM (Continuous Surface Cap Model) [1] para elementos de continuo 3D, junto con la formulación que proporciona la debida compatibilidad con los elementos viga de acero dispuestos de forma segregada. Esta modelización permite estudiar de forma realista modelos detallados de pilares y forjados, usando geometrías muy cercanas a las reales y modelos no lineales de materiales.

Pero el alto coste computacional hace inviable emplear estos métodos en estructuras completas. El coste computacional de estos modelos depende principalmente del número de elementos y del tamaño mínimo del elemento empleado; en los modelos detallados de elementos de continuo son necesarios una cantidad elevada de elementos de pequeño tamaño para conseguir una geometría realista, haciendo inviable el cálculo. Como alternativa es posible usar modelos de elementos estructurales de vigas y láminas para el análisis de estas estructuras. Sin embargo es necesario un adecuado ajuste de parámetros y propiedades en estos modelos.

Este trabajo muestra un método con el que obtener modelos de elementos estructurales, elementos viga y lámina, usando modelos de material adecuados para ellos, junto a un procedimiento para incluir la armadura de forma adecuada. Utilizando este método es posible reproducir con suficiente aproximación el comportamiento de modelos detallados realistas de forjados y pilares de estructuras reticuladas de hormigón frente a acciones explosivas, posibilitando el análisis de una estructura completa frente a explosión.

Características necesarias de los modelos: La modelización de la respuesta de la estructura frente a explosión presenta diversas dificultades en la modelización de la misma, tales como el fallo anisótropo del hormigón, la colocación de las diversas armaduras, la adecuación de la onda explosiva a geometrías complejas o el cálculo eficiente de un edificio completo.

La acción explosiva debe ser correctamente modelada, siendo un punto clave que el modelo sea capaz de recoger correctamente la presión ejercida sobre la estructura en un intervalo de tiempo muy pequeño, del orden de 0.1 a 0.01 milisegundos, que, dependiendo de la carga de explosivo y la distancia, puede producir valores muy elevados de presión. Así mismo el modelo debe representar correctamente el comportamiento global de la estructura, que incluye la transmisión de la onda explosiva a través de las columnas y losas, la redistribución de esfuerzos cuando partes de la estructura plastifican y cuando los elementos son erosionados y el proceso de colapso progresivo de la estructura completa o partes de ella.

En cuanto a los materiales, el hormigón tiene un comportamiento complejo siendo un material no lineal en varios sentidos. Como es bien conocido el hormigón presenta una resistencia mucho menor a tracción que a compresión, presenta fisuración a tracción y plastificación en compresión así como límites de rotura. Adicionalmente en hormigón se produce un efecto de aumento del límite elástico con la velocidad de deformación. Todo este comportamiento complejo que se va a producir en el caso de hormigón sometido a acción explosiva debe ser recogido por el modelo de material. Otros comportamientos como la retracción y la fatiga no van a ser necesarios en el caso que nos ocupa.

El acero por su parte también es un material no lineal que debe ser tratado como tal, considerando la plastificación y rotura del material a tracción y compresión y adicionalmente, al igual que en el hormigón, el efecto de aumento del límite elástico con la velocidad de deformación.

Además de las no linealidades propias de los materiales hay que considerar el efecto de trabajar con un material heterogéneo como es el hormigón armado, constituido por materiales con propiedades diferentes. Usar un modelo homogeneizado para el hormigón armado, aunque evita la necesidad de usar una formulación para tratar conjuntamente materiales segregados, presenta serias limitaciones en la evaluación de fenómenos de grandes deformaciones, plastificación y rotura de elementos estructurales. Por ello en este trabajo se usan materiales segregados.

Por tanto los modelos de material que se emplean en la modelización deben ser capaces de representar correctamente el comportamiento antes descrito y la formulación de unión de las barras de armado con el hormigón debe modelizar correctamente el comportamiento heterogéneo del hormigón armado.

2. COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES Y FORMULACIÓN DE ELEMENTOS

Este capítulo describe los modelos de material y las formulaciones empleadas para obtener una respuesta estructural aproximada a la acción explosiva sobre elementos de hormigón armado.

2.1. Hormigón

En la modelización del hormigón usamos dos modelos de material diferentes, el primero para elementos de continuo 3D y otro para elementos estructurales (vigas y láminas).

Modelo de elementos de continuo: El modelo de material usado para los elementos de continuo 3D es el material *CSCM* [1] implementado en LS-Dyna. Este material, que sólo está disponible para elementos de continuo y no para elementos viga o lámina, tiene las características necesarias indicadas anteriormente. Es un material isotrópico con diferente comportamiento

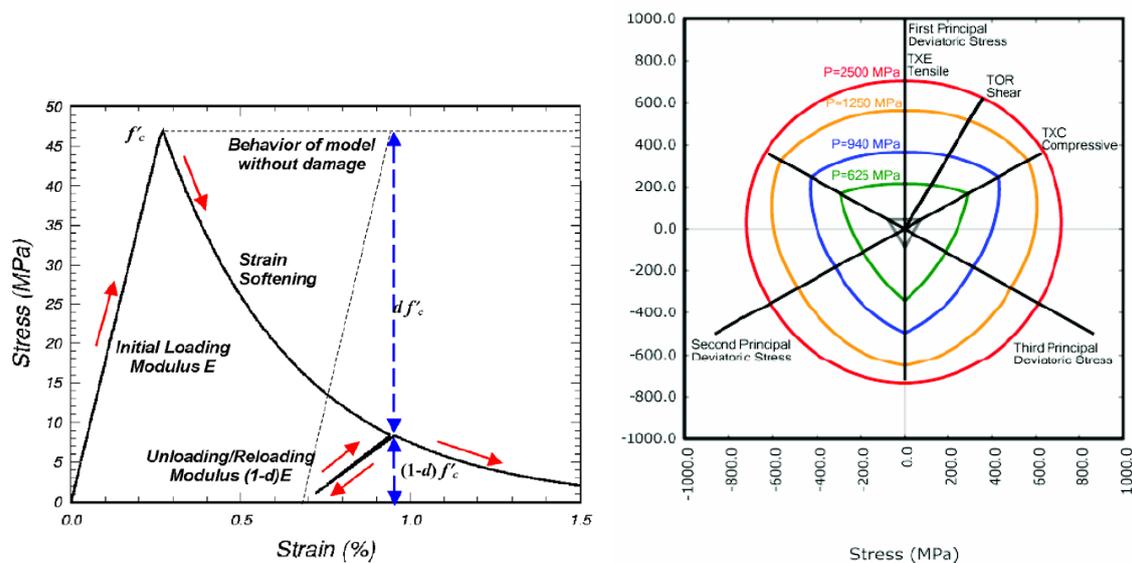


Figura 1: Propiedades del modelo de hormigón CSCM de LS-Dyna [1]

a tracción y a compresión, con tres superficies de plasticidad (tracción, compresión y cortante), con ablandamiento en compresión y con daño debido a fisuración en tracción, con efecto de aumento de la tensión de plasticificación con la velocidad de deformación y con la capacidad de erosionar para una deformación dada (ver figuras 1 y 2).

Modelo estructural. Modelo de vigas y láminas: En el caso de los modelos estructurales el material usado en este trabajo es el modelo de LS-Dyna *EC2* [7]. Este modelo de material puede

ser usado en la modelización de elementos viga y lámina, pero no en elementos de continuo. La figura 2 muestra el diagrama tensión-deformación de un hormigón de 30MPa modelado con este material. Este material tiene gran parte de las propiedades exigidas anteriormente: diferente comportamiento a tracción y a compresión, con ablandamiento en compresión y con daño debido a fisuración en tracción y con la capacidad de erosionar para una deformación dada gracias a una formulación adicional. Sin embargo no es capaz de reproducir el efecto de aumento de la tensión de plastificación con la velocidad de deformación, por lo que este efecto deberá ser estimado modificando los demás parámetros. Además incluye una formulación homogeneizada que permite incluir cuantías de acero en cada elemento. Esta última cualidad no se va emplear en el trabajo que se presenta para simular el armado longitudinal, pero sí en ciertos casos para tener en cuenta los cercos de armado.

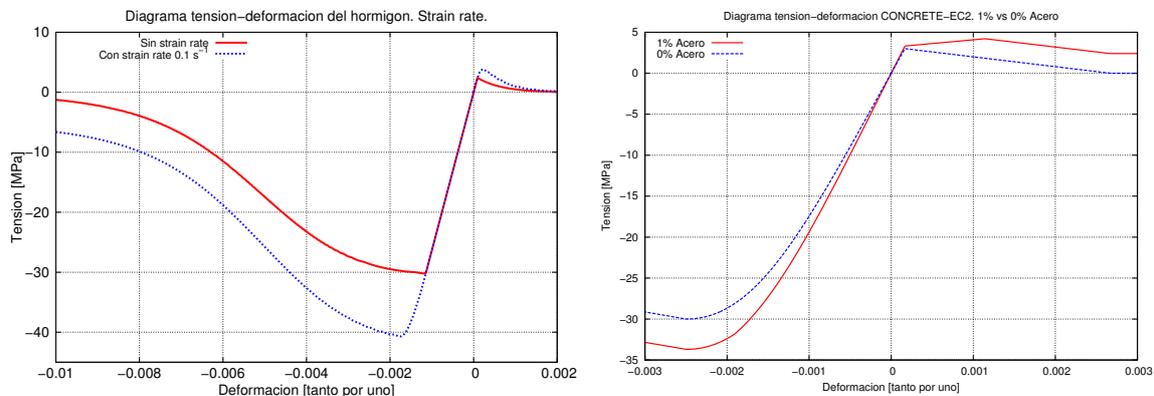


Figura 2: Diagramas tensión-deformación de los materiales de hormigón. A la izquierda para elementos de continuo material CSCM con y sin efectos por velocidad de deformación. A la derecha para elementos estructurales material EC2 sin cuantía de acero y con una cuantía de 1 %.

2.2. Armado de acero

Para la modelización del acero de armado usamos el modelo de material *piecewise linear plasticity* implementado en LS-Dyna. Este modelo representa correctamente el comportamiento que queremos del acero, a saber, deformación plástica al llegar al límite elástico, efecto de aumento de la tensión de plastificación con la velocidad de deformación y rotura. Este modelo de material puede ser usado en elementos de continuo, láminas y vigas, pero dadas las características físicas de las barras corrugadas de acero que se usan en armado basta para la modelización de las mismas el uso de elementos viga.

2.3. Conexión hormigón/acero

Una vez definidos los modelos de material que se van a usar en los modelos es necesario definir cómo se modeliza la conexión entre el hormigón y el acero.

Existen dos posibilidades: la primera es hacer coincidir los nodos de las mallas de hormigón y acero, de forma que al compartir nodos comunes los materiales responden conjuntamente a las solicitaciones; la otra posibilidad es usar la formulación *constrain lagrange in solid* de LS-Dyna [7] que permite emplazar los elementos viga de acero en cualquier parte de la malla de elementos de continuo de hormigón y utilizar los materiales de manera segregada.

La ventaja de usar la formulación para elementos segregados es que las mallas no deben coincidir, por lo que la malla de hormigón no va a depender de la geometría y posición del armado, que conduciría a elementos muy pequeños de hormigón, con el consiguiente coste computacional. La desventaja es que esta formulación no es válida cuando usamos elementos estructurales viga y lámina para el hormigón, por lo que en modelos estructurales es necesario hacer coincidir los nodos de las dos mallas.

La figura 3 muestra la malla de un ejemplo de validación para la formulación de materiales segregados con el que se puede comprobar el correcto funcionamiento del método.

La limitación de ambos métodos es que la adherencia no se contempla en ninguno de los dos casos, pero asumimos que el error generado comparado con el resto de la formulación es pequeño.

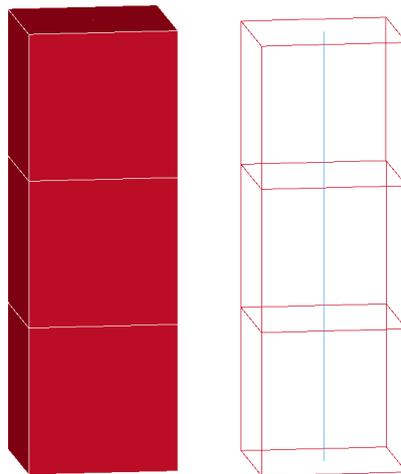


Figura 3: Malla de ejemplo de validación de la formulación *constrain lagrange in solid*

2.4. Formulación de vigas excéntricas

Hemos visto que en los modelos de continuo es posible incluir la armadura en cualquier posición gracias a la formulación *constrain lagrange in solid*, pero en los modelos estructurales, al tener nodos comunes las armaduras quedan colocadas en el mismo plano que las láminas de hormigón, lo que produce que el efecto de la excentricidad de las armaduras no sea computado. Para solucionar este problema es posible usar la formulación de LS-Dyna, *beam offset* [7] que permite considerar la excentricidad de las armaduras respecto al plano en el que son definidas.

Esto nos permite modelar una estructura de láminas con la geometría del armado en su excentricidad real. El cuadro 1 muestra la validación de esta formulación en un test de flexión en una viga simplemente apoyada.

Armado excéntrico		
Caso	Reacción	Descripción
Theoría B	25,9 kN	Viga de Bernoulli
Theoría T	22,1 kN	Viga de Timoshenko
Vigas	26,9 kN	Elementos viga
Láminas	25,5 kN	Elementos lámina y viga

Cuadro 1: Validación de la formulación de vigas excéntricas.

2.5. Formulación de la carga explosiva

Por último, la formulación que nos permite estimar la presión que produce la acción explosiva sobre la estructura es modelada mediante la formulación *blast* [8] recogida en LS-Dyna que es una implementación de la formulación CONWEP del manual del U.S. Department of the Army TM-855-1 [9].

3. APLICACIÓN: CARGAS EXPLOSIVAS APLICADAS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Los modelos de material y las formulaciones comentadas en el apartado anterior hacen posible analizar elementos estructurales de una estructura reticulada real. El objetivo de esta sección es analizar elementos estructurales como columnas y losas, en primer lugar con modelos basados en elementos de continuo y armaduras segregadas que son usados para ajustar los modelos basados en elementos estructurales de láminas y vigas excéntricas de forma que tengan una respuesta estructural similar.

3.1. Columna

Con el objetivo de analizar estructuras reticulares de edificios de hormigón armado elegimos una columna representativa que vamos a estudiar frente a dos tipos de sollicitaciones, la primera frente a flexión cuasiestática y la segunda frente a cargas explosivas con diferentes cuantías de explosivo.

Escegemos una viga simplemente apoyada de hormigón de 40 MPa con doce barras corrugadas longitudinales de 20 mm de diámetro con cercos transversales de 8 mm de diámetro cada 15 cm de acero B500S. Las dimensiones de la columna son de 3,15 metros de longitud y 45×45 cm de sección y la malla y el armado se pueden ver en la figura 4.

De este elemento estructural realizamos dos modelos, uno con una malla fina, de forma que los nodos de la malla de hormigón y la malla de armadura coincidan y queden unidos, y otro modelo

en el que usamos un malla más gruesa con la formulación *constrain lagrange in solid* para unir los materiales segregados. Comprobamos que ambos modelos tienen la misma respuesta estructural, validando así la formulación de materiales segregados. En lo sucesivo se usa esta formulación debido a su menor coste computacional.

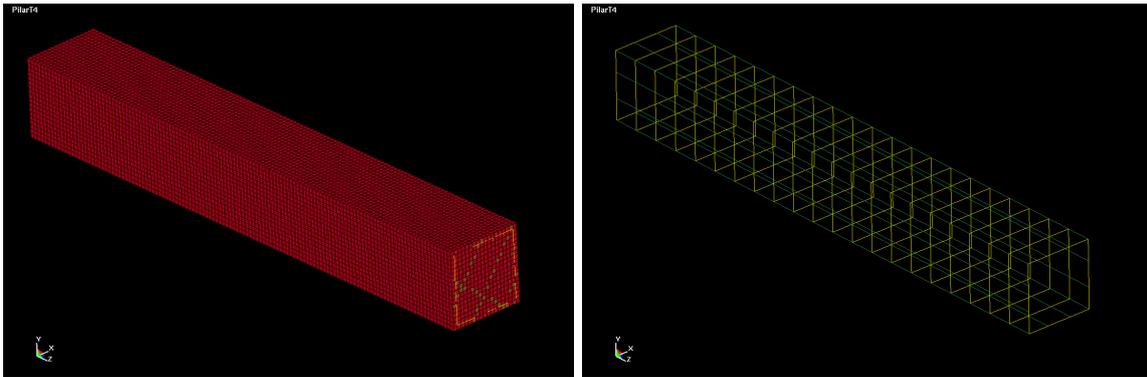


Figura 4: Columna: Malla y armado del modelo de elementos de continuo

Como modelo de elementos estructurales para la columna usamos elementos lámina cruzados en el eje de la viga con la formulación de material de hormigón EC2 y vigas excéntricas que se unen a los nodos en el cruce de las láminas, de forma que quedan unidas las doce barras de armado longitudinal al eje de la columna pero en las que se computa su posición real. Las dimensiones de las láminas se ajustan para obtener una misma masa y una misma inercia seccional que en la columna real. La razón para emplear elementos lámina en la modelización del hormigón en vez de elementos viga es que las láminas son capaces de recoger la presión de la onda explosiva, mientras que las vigas no. No es posible incluir el armado transversal de forma segregada, pero se puede tener en cuenta como una cuantía de armadura en el modelo de hormigón EC2.

Comparación en flexión cuasiestática: La figura 5 muestra la comparación de la respuesta de la columna a un movimiento impuesto que produce flexión en ella. La gráfica roja representa la respuesta del modelo de continuo y la gráfica azul la respuesta del modelo de elementos lámina; comparándolas observamos que tienen una buena correlación. El modelo de elementos estructurales es un poco más rígido debido a que en el otro modelo los elementos van plastificando progresivamente, mientras que en éste al haber menos elementos en la sección plastifican para una reacción mayor.

Comparación del efecto dinámico de carga explosiva: Con objeto de validar la respuesta de los modelos de elementos estructurales frente a explosión se comparan ambos modelos para varios casos de carga y distancia del explosivo. La respuesta estructural es muy diferente dependiendo de la cantidad de explosivo y de la distancia: para cuantías crecientes de explosivo

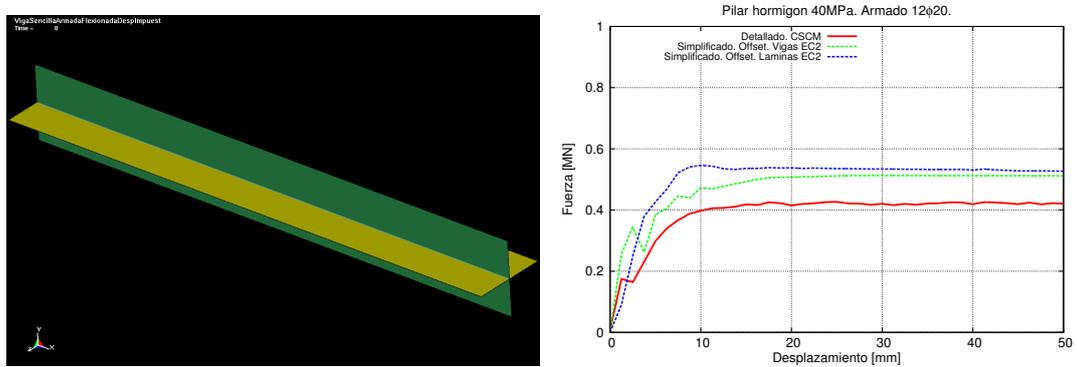


Figura 5: Malla del modelo de elementos estructurales y comparación de la respuesta a la flexión

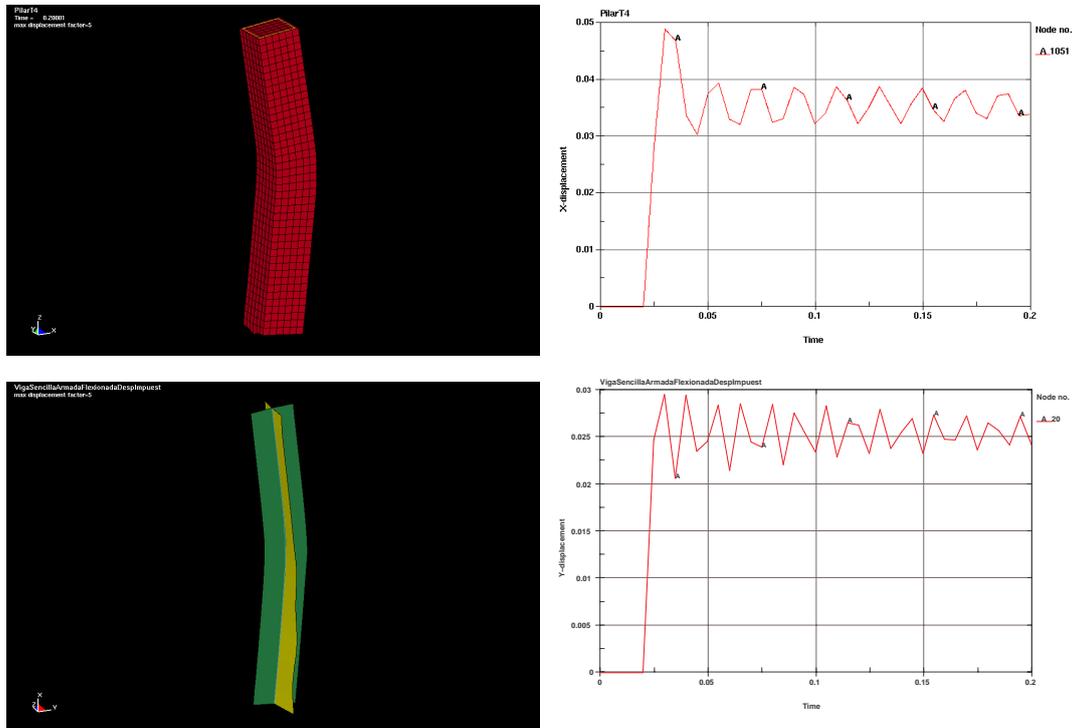


Figura 6: Columna deformada y desplazamiento (escalado x5) en el centro de la columna.

la columna recibe mayores daños: en primer lugar el hormigón de la parte posterior a la cara de impacto plastifica, luego algunos de los elementos de la cara posterior son erosionados debido a la fisuración, si seguimos aumentado la cuantía de explosivo la armadura de la cara posterior plastifica y la plastificación del hormigón se extiende por la sección hacia la cara anterior y finalmente la columna colapsa debido a la erosión de gran parte del hormigón y la plastificación

y erosión del armado.

La figura 6 muestra la comparación de la respuesta de los modelos de elemento de continuo y elementos estructurales para una cuantía de 400kg de TNT a cuatro metros de distancia. En este caso el hormigón plastifica pero no es erosionado. El desplazamiento en el centro de la columna es medido en ambos modelos resultado menor en el modelo de elementos de continuo debido a una mayor flexibilidad transversal, pero resultando una correlación aceptable.

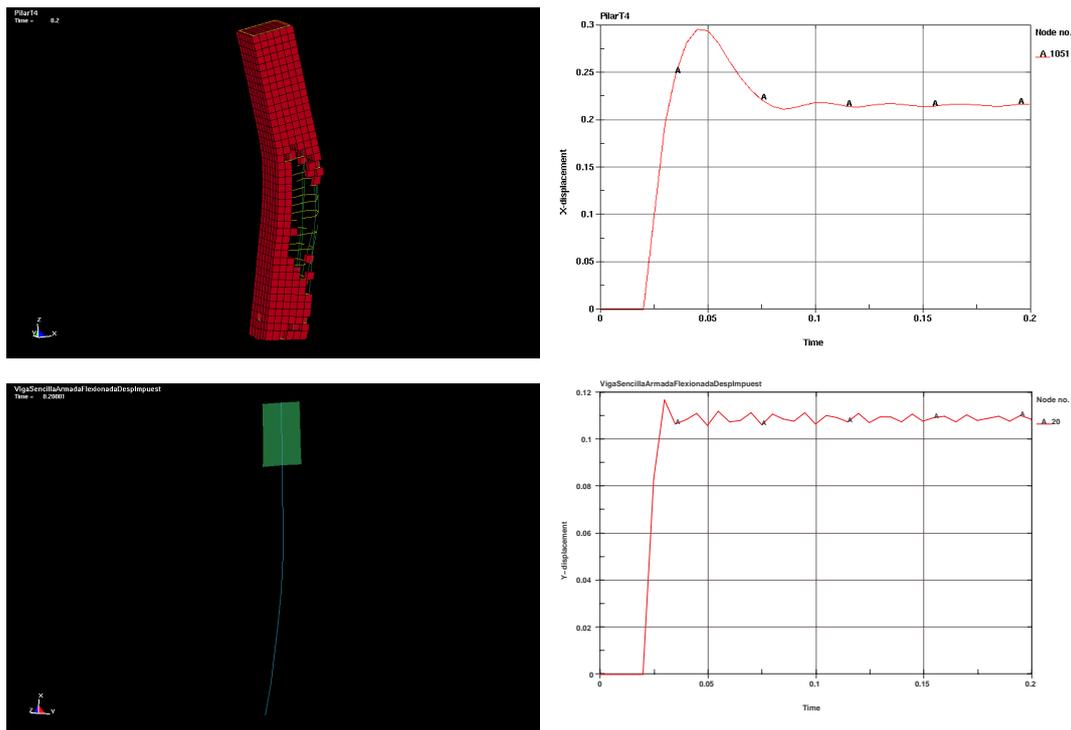


Figura 7: Columna deformada y erosionada y desplazamiento en el centro de la columna.

En el caso de la figura 7 el caso analizado es el mismo que el anterior, con una cuantía de 400kg de TNT pero a una distancia de 2 metros. En este caso los daños a la columna son mucho mayores. El desplazamiento en el modelo de elementos estructurales es menor debido a que se erosiona toda la sección de elementos lámina, mientras que en el modelo de elementos de continuo algunos permanecen sin erosionar. En ambos casos se llega al colapso de la columna por plastificación y erosión en el hormigón, quedando parte de la armadura plastificada, con lo que consideramos una buena correlación.

3.2. Viga

Del mismo modo que hemos analizado una columna analizamos una viga con armadura asimétrica, en este caso con cinco barras de armado de 16mm de diámetro en la cara inferior y otras

cinco de 12 mm de diámetro en la cara superior. La figura 8 muestra la respuesta para el análisis de la flexión cuasiestática que produce resultados similares al caso de la columna. Así mismo se obtienen resultados similares para el caso de acción explosiva.

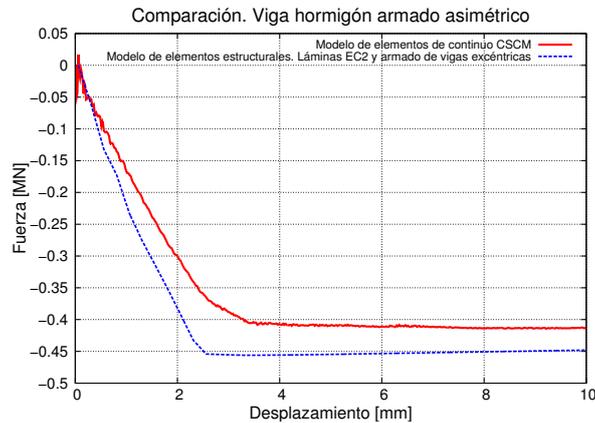


Figura 8: Comparación de la respuesta a flexión de una viga con armado asimétrico

3.3. Forjado reticulado

Hay varios tipos de forjados que se pueden usar en estructuras reticuladas. En este trabajo nos centramos en un forjado reticulado. Este tipo de forjado usa casetones recuperables para crear huecos en la parte inferior de la losa de forma que se ahorre material. La armadura en una losa de este tipo es compleja, con armado en los nervios, mallazo en la parte superior, etc. El modelo presentado usa hormigón 30MPa y acero B500S. Las dimensiones son de 8×8 metros de losa entre columnas y casetones de 80×80 centímetros, con un espesor total de 38 centímetros.

Con estas características desarrollamos dos modelos, uno de elementos de continuo y otro de elementos estructurales, el primero con material CSCM para el hormigón y acero elastoplástico para las armaduras de manera segregada y unidos mediante la formulación *constrain lagrange in solid*, y el segundo con material EC2 para el hormigón y acero elastoplástico para las armaduras y con las mallas dispuestas de modo que la malla del hormigón y la malla del acero tengan nodos coincidentes.

El modelo de elementos de continuo que se muestra en la figura 9 es un modelo detallado con una cantidad importante de elementos que producen que el coste computacional sea elevado aunque asumible. El modelo de elementos lámina y viga está diseñado con un número mucho menor de elementos y con elementos de un tamaño mayor, lo cual reduce considerablemente el coste computacional. Las cuantías de armadura y su excentricidad son equivalentes en ambos modelos, y como se muestra en la gráfica de la figura 10 la respuesta a la flexión es suficientemente aproximada.

En cuanto a la respuesta frente a una carga explosiva en la losa reticulada, la figura 11 muestra

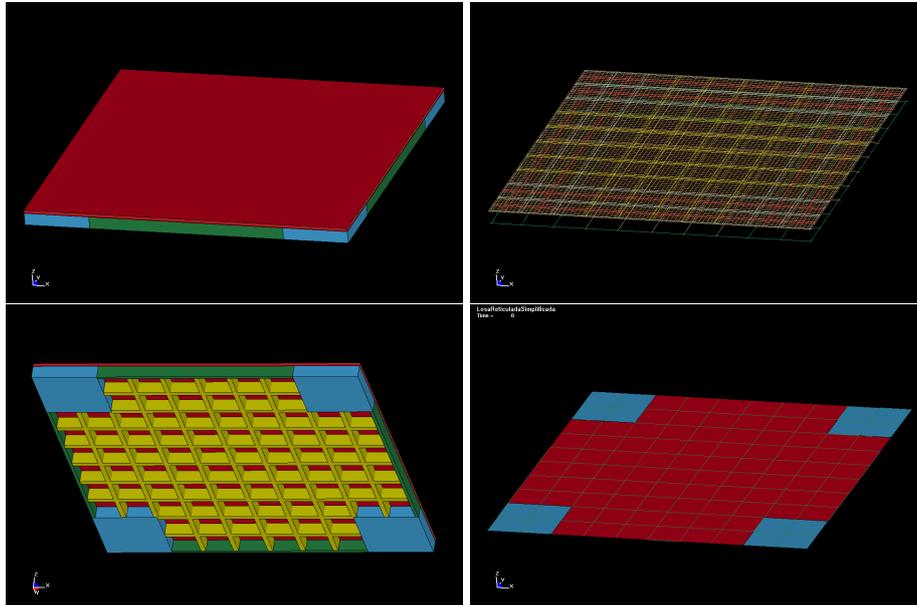


Figura 9: Arriba izquierda: Malla de elementos de continuo (vista superior); Arriba derecha: Armado de la losa reticulada; Abajo izquierda: Malla de elementos de continuo (vista inferior). Abajo derecha: Malla de elementos estructurales (vista superior)

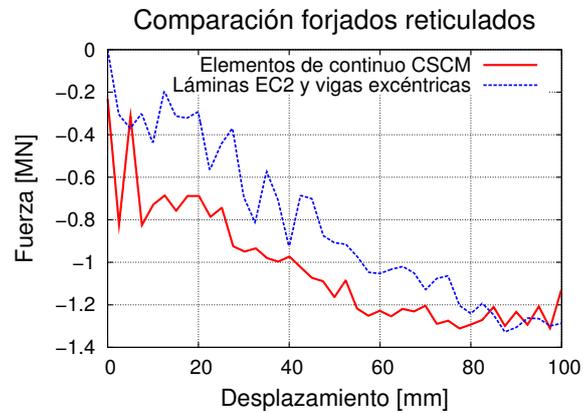


Figura 10: Comparación de la reacción frente a flexión de los dos modelos de losa reticulada

la comparación del modelo de elementos de continuo con el modelo de elementos estructurales cuando la losa se somete a una carga explosiva centrada de 200kg de TNT a dos metros de distancia bajo la losa. Entre estos modelos se puede comparar el desplazamiento máximo, la tensión en las armaduras y las zonas erosionadas. La conclusión es que el modelo de elementos lámina, que tiene un coste computacional mucho más bajo, es capaz de recoger en gran parte

el comportamiento global de la losa completa. Esta es la base que se puede usar para evaluar modelos de edificios completos con estructura reticulada.

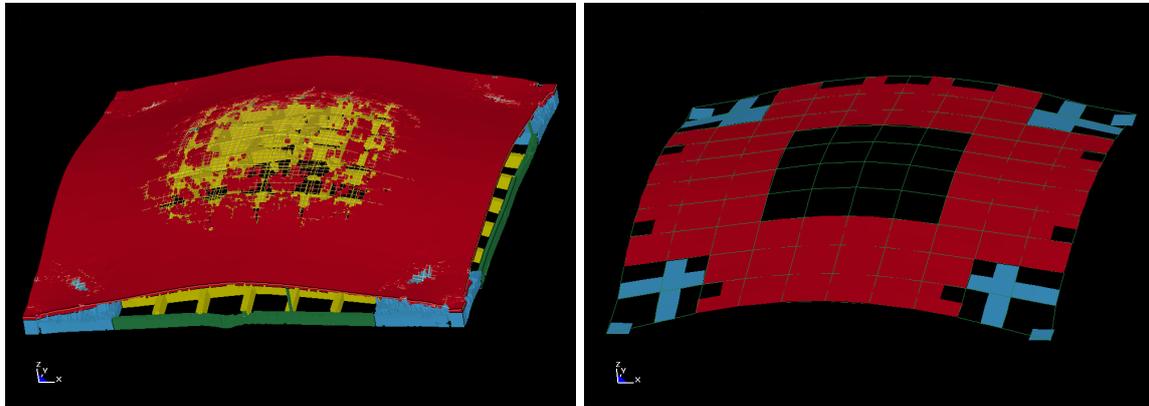


Figura 11: Comparación: Malla deformada de modelo de elementos de continuo y modelo de elementos estructurales. 200kg TNT

4. APLICACIÓN: EDIFICIO DE FORJADOS RETICULARES

Finalmente se muestra un ejemplo (figura 12) de un edificio de 3 plantas compuesto por 4×4 forjados reticulados en cada planta. Este modelo es capaz de estimar el daño causado en un edificio de estas características cuando se le somete a una carga explosiva en su interior. En este caso la carga es de 400kg de TNT colocada en la primera planta del edificio a un metro de altura del suelo de la primera losa, que produce el daño observado en la figura.

Este caso puede ser resuelto con un coste computacional moderado. El tiempo de cálculo está en el rango 0,1 a 0,5 segundos, suficiente para evaluar la acción de la explosión en la estructura. Hay algunas limitaciones a esta estrategia. Una de ellas es que no es posible evaluar directamente la presión que le llega por efecto de la explosión a una segunda losa cuando una primera ha roto y la onda de presión pasa a través de ella. La energía perdida por la onda explosiva en el proceso de rotura de la primera losa es difícil de evaluar. Para evitar este problema es necesario usar una malla ALE [10] para evaluar la propagación de la onda explosiva en el aire. Otra de las limitaciones es que partes de la estructura pueden convertirse en proyectiles que impacten sobre partes posteriores del edificio. La erosión necesaria para simular el daño en la estructura proporciona menos proyectiles de los que pueden producirse en realidad.

Este modelo puede ser usado también para estudiar el posible colapso progresivo, con el inconveniente de un mayor tiempo de cálculo, en el rango de 3 a 10 segundos para este edificio de tres plantas. Esto causa un incremento notorio en el tiempo de cálculo, pero asumible. El estudio del colapso progresivo y el análisis del efecto de la explosión en forjados sucesivos se encuentra en desarrollo.

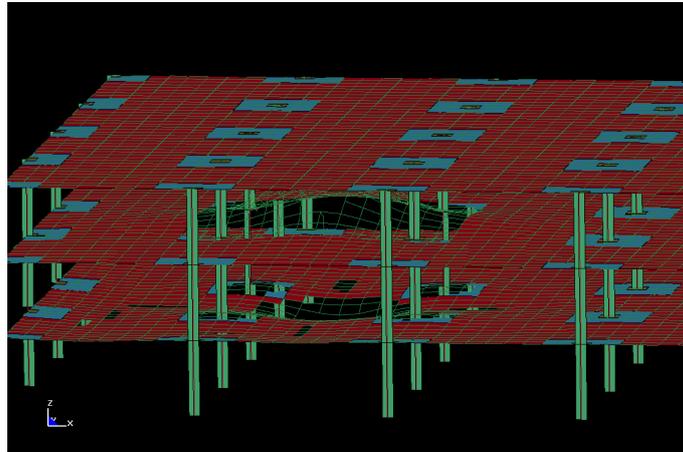


Figura 12: Explosión de 400kg TNT en el interior de un edificio.

5. CONCLUSIONES

Se presenta una estrategia de modelización de escenarios de explosión sobre estructuras reticuladas de hormigón basados en modelos de elementos estructurales, mediante los modelos de material disponibles, incluyendo la armadura sobre el hormigón de una forma realista. Estos modelos son calibrados con modelos de elementos de continuo 3D mostrando una precisión suficiente.

- Es necesario emplear modelos de elementos estructurales para el estudio de explosiones en edificios completos debido al coste computacional.
- Los modelos de elementos estructurales deben ser calibrados con modelos detallados de elementos de continuo 3D para obtener una respuesta realista.
- Los modelos de elementos estructurales proporcionan una solución aproximada a la solución; para análisis detallados son necesarios modelos de elementos de continuo 3D.
- Existen limitaciones a esta estrategia tales como la evaluación del efecto de la explosión en sucesivas plantas o la consideración del lanzamiento de proyectiles debido a la proyección de partes de la estructura, que requieren evaluación adicional para ser superadas. Así mismo, el estudio del colapso progresivo precisa ajustes adicionales en los modelos.
- Esta estrategia permite evaluar daños producidos por cargas explosivas y posibles mejoras de diseño frente a acción explosiva en estructuras completas reticuladas de hormigón.

Este estudio es parte de un proyecto de investigación de tres años en el que participa la Universidad Politécnica de Madrid y la consultora de ingeniería FHECOR, con el soporte de AENA, con el objetivo de modelar acciones explosivas sobre estructuras reticuladas de hormigón y mejorar la resistencia en el diseño de nuevas estructuras.

REFERENCIAS

- [1] Y. D. Murray, A. Abu-Odeh, R. Bligh, *Evaluation of LS-DYNA concrete material model 159*. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2007.
- [2] J. O. Hallquist, *LS-DYNA theory manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2006.
- [3] H. Corres, E. Romero, *Reconstrucción «módulo D» aparcamiento Madrid Barajas T-4*, FHECOR report.
- [4] B. M. Luccioni, D. Ambrosini, R. Danesi, Colapso estructural bajo cargas explosivas, *Mecánica Computacional*, **XXII**, 957-970, 2003.
- [5] J. Leppänen, *Dynamic Behaviour of Concrete Structures subjected to Blast and Fragment Impacts*, Department of Structural Engineering Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2002.
- [6] B. Luccioni, R. Ambrosini, R. Danesi, Analysis of building collapse under blast loads, *Engineering Structures*, 2004, **26**, 63-71.
- [7] *LS-DYNA keyword user manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2010.
- [8] G. Randers-Pehrson, K. A. Bannister, *Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D*. ARMY RESEARCH LABORATORY, 1997.
- [9] *TM5-855-1. Fundamentals of protective design for conventional weapons*. U.S. Department of the Army Technical Manual, 1978.
- [10] T. P. Slavik, A Coupling of Empirical Explosive Blast Loads to ALE Air Domains in LS-DYNA, *7th European LS-DYNA Conference*, 2009.