

Disponible en www.hormigonyacero.com
Hormigón y Acero, 2026
<https://doi.org/10.33586/hya.2026.4206>

ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

Daños en edificios por explosión: patrones lesionales, mecanismos resistentes, robustez estructural y criterios de reparación a partir de la experiencia en casos reales

Raúl R. Rodríguez Escribano, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma, Enrique Calderón Bello, Ismael Carpintero García

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2026.4206>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Rodríguez, R.R., Díaz-Pavón, E., Calderón, E., & Carpintero, I. (2026) Daños en edificios por explosión: patrones lesionales, mecanismos resistentes, robustez estructural y criterios de reparación a partir de la experiencia en casos reales, *Hormigón y acero*, <https://doi.org/10.33586/hya.2026.4206>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2026 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

DAÑOS EN EDIFICIOS POR EXPLOSIÓN: PATRONES LESIONALES, MECANISMOS RESISTENTES, ROBUSTEZ ESTRUCTURAL Y CRITERIOS DE REPARACIÓN A PARTIR DE LA EXPERIENCIA EN CASOS REALES

Raúl R. Rodríguez Escribano⁽¹⁾, Eduardo Díaz-Pavón Cuaresma⁽¹⁾, Enrique Calderón Bello⁽¹⁾, Ismael Carpintero García⁽²⁾

(1) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. INTEMAC. (Madrid, España)

(2) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX.

Persona de contacto/ *Corresponding author*: rrodriguez@intemac.es

RESUMEN

La evaluación de daños estructurales en edificios afectados por explosiones presenta una complejidad singular, tanto por la naturaleza impulsiva de la acción como por la necesidad de adoptar decisiones inmediatas en materia de seguridad, apeos, desalojo, demolición o reparación. A partir de la experiencia acumulada por INTEMAC en numerosos casos reales de siniestros por explosión ocurridos entre finales de la década de 1990 y la primera del siglo XXI, y respecto de los cuales ha transcurrido ya un plazo prudente para su difusión técnica, el presente trabajo sistematiza los principales patrones de daño observados, los relaciona con los mecanismos resistentes comprometidos y expone criterios prácticos de inspección e intervención.

El artículo distingue, en primer lugar, entre daños asociados a mecanismos de fallo de tipo frágil y daños vinculados a respuestas estructurales de tipo dúctil. Entre los primeros se analizan, entre otros, los fallos por cortante, punzonamiento y por solicitaciones no previstas que generan esfuerzos contrarios a los considerados en el diseño. Se pone de manifiesto que estos mecanismos fallo revisten especial gravedad por su brusquedad, la limitada capacidad de redistribución de la estructura y su potencial para desencadenar consecuencias desproporcionadas. Frente a ellos, se exponen también casos en los que la estructura respondió mediante fisuración por flexión con grandes deformaciones, mostrando una cierta capacidad de absorción de energía y de redistribución de esfuerzos.

A partir de la casuística analizada se destaca el papel decisivo de la robustez estructural en la limitación del daño. La elección de detalles constructivos apropiados, especialmente en las uniones y secciones apoyo, para generar estructuras hiperestáticas, dúctiles y redundantes puede marcar la diferencia entre un daño local severo y una evolución progresiva del colapso. Muchos de estos aspectos están asociados al uso de buenas prácticas, como la adopción y observancia de detalles estructurales y disposiciones recogidos en la normativa y en la bibliografía de referencia, con una repercusión reducida en el coste de la estructura y, sin embargo, una influencia muy significativa frente a acciones accidentales.

Finalmente, se exponen criterios prácticos de inspección inicial, valoración técnica del daño, delimitación de zonas irreparables, demolición controlada y reconstrucción con restitución de la continuidad resistente. El trabajo no pretende formular un modelo analítico del fenómeno explosivo ni constituir una guía exhaustiva de intervención, sino aportar una síntesis de experiencia profesional contrastada que pueda resultar útil tanto para técnicos que deban enfrentarse a este tipo de siniestros como para investigadores interesados en esta problemática.

Palabras Clave: Explosión; edificación; daños estructurales; robustez estructural; mecanismos de fallo; inspección estructural; reparación de estructuras; refuerzo estructural.

ABSTRACT

Structural damage assessment in buildings affected by explosions is particularly complex, both because of the impulsive nature of the action and because of the need to make immediate decisions regarding safety, shoring, evacuation, demolition, or repair. Based on the experience accumulated by INTEMAC in numerous real explosion incidents that occurred between the late 1990s and the first decade of the 21st century, and for which a prudent period has now elapsed to allow their technical disclosure, this paper systematizes the main damage patterns observed, relates them to the structural mechanisms involved, and sets out practical inspection and intervention criteria.

The paper distinguishes, first, between damage associated with brittle mechanisms and damage linked to ductile-type responses. The former includes shear failures, punching failures, and failures caused by stress reversal or by actions not considered in ordinary design. These mechanisms are shown to be particularly serious because of their sudden nature, their limited redistribution capacity, and their potential to trigger disproportionate consequences. By contrast,

the paper also presents cases in which the structure responded through flexural cracking with large deformations, showing a certain capacity for energy absorption and stress redistribution.

From the case histories analysed, the decisive role of structural robustness in limiting damage is highlighted. Continuity of reinforcement, proper detailing of supports and connections, redistribution capacity and, more generally, good structural detailing can make the difference between severe local damage and progressive collapse development. Many of these aspects are part of good practice in structural detailing and are also covered by codes and technical literature, with only a limited impact on the overall cost of the structure and yet a major influence under accidental actions.

Finally, practical criteria are presented for initial inspection, technical damage assessment, delimitation of irreparable areas, controlled demolition, and reconstruction with restoration of structural continuity. The paper does not aim to formulate an analytical model of the explosive phenomenon or an exhaustive intervention guide, but rather to provide a synthesis of well-established professional experience that may be useful both to engineers faced with this type of incident and to researchers interested in this field.

Keywords: explosion; buildings; structural damage; structural robustness; failure mechanisms; structural inspection; structural repair; structural strengthening.

1. INTRODUCCIÓN, ALCANCE Y BASE EMPÍRICA DEL TRABAJO

La evaluación de estructuras afectadas por explosiones es una tarea afortunadamente poco habitual en nuestro entorno.

La explosión constituye una acción de carácter impulsivo, de muy corta duración y elevada intensidad, capaz de someter a los edificios a estados tensionales muy distintos de los asociados a las acciones ordinarias de proyecto. De forma simplificada (Figura 1), la onda de presión genera un efecto dinámico en una primera fase positiva, seguida en ocasiones por una fase negativa de menor intensidad. Esta naturaleza excepcional de la acción puede dar lugar a daños localizados severos, a sollicitaciones poco habituales en elementos corrientes de edificación y, en determinados casos, a esfuerzos de signo contrario a los previstos en su diseño.

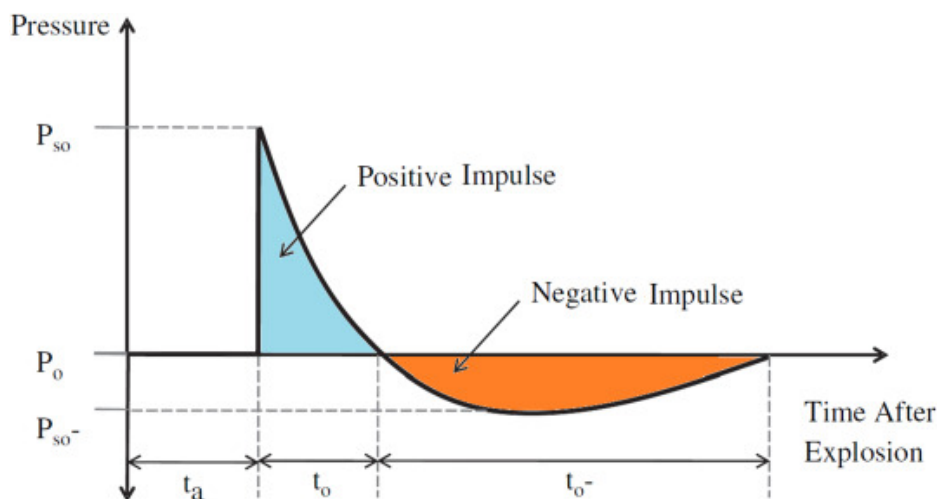


Figura 1: Acción impulsiva debida a una explosión

El paso de la onda expansiva puede afectar a zonas alejadas del foco de la explosión, incluso de forma importante (1), (2), (3).

Así, la explosión produce en la estructura una respuesta singular, en la que el daño visible no siempre coincide con la afectación estructural más relevante. Pueden existir lesiones aparentemente limitadas que oculten mecanismos frágiles de especial importancia.

Asimismo, el técnico se ve obligado a adoptar con rapidez decisiones de carácter preventivo, tales como la disposición de apeos, desalojo total o parcial de la edificación, y la reparación o sustitución de elementos. La propia

evaluación estructural resulta compleja en presencia de deformaciones permanentes, fisuración, pérdida de sección o alteraciones en apoyos o uniones.

El presente artículo expone cómo se abordó esta problemática en diferentes casos reales de siniestros por explosión analizados por INTEMAC entre finales de la década de 1990 y la primera del siglo XXI. No se pretende desarrollar un modelo analítico del fenómeno explosivo ni elaborar una guía exhaustiva de evaluación de estructuras sometidas a este tipo de acción, dada la singularidad propia de cada caso. El objetivo es sistematizar patrones de daño, relacionarlos con mecanismos resistentes, destacar el papel de la robustez estructural y exponer los criterios de evaluación e intervención empleados en dichos casos.

El trabajo se apoya en numerosos casos reales de edificios dañados por explosión, de los que se conservan en nuestros archivos los resultados de las inspecciones realizadas, incluyendo croquis de daños, reportajes fotográficos, evaluaciones estructurales y medidas de intervención propuestas. Su interés no reside en un caso aislado, sino en la repetición de determinados patrones observados en los distintos expedientes.

Debe señalarse, no obstante, que los casos analizados son heterogéneos en cuanto a tipología estructural, entidad del daño y calidad o cantidad de la información disponible, y que no siempre se dispone de una caracterización completa de la acción explosiva. En consecuencia, el trabajo se plantea como una síntesis de observaciones técnicas sobre patrones lesionales, mecanismos resistentes y criterios de intervención, que puede resultar de utilidad tanto para técnicos que deban enfrentarse a este tipo de daños como para investigadores.

Los casos estudiados corresponden, en términos generales, a las tipologías estructurales más comunes en la edificación española, en particular forjados unidireccionales con apoyo en pórticos o muros de carga y forjados sin vigas sobre soportes aislados.

Debe señalarse, asimismo, que en este trabajo no se analizan los efectos del fuego eventualmente asociado a la explosión, centrándose el estudio exclusivamente en los daños derivados de la acción explosiva sobre la estructura.

2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA RESPUESTA DE LOS EDIFICIOS FRENTE A EXPLOSIONES

La respuesta de un edificio frente a una explosión difiere sensiblemente de la asociada a las acciones habitualmente contempladas en el proyecto de edificación (4), (5), (6), (7). La muy corta duración de la sollicitación, su elevada intensidad y su carácter fuertemente localizado hacen que puedan aparecer estados tensionales, trayectorias de carga y modos de daño poco frecuentes en la práctica ordinaria. Como consecuencia, la estructura puede verse sometida no solo a esfuerzos de magnitud elevada, sino también a sollicitaciones de sentido no previsto, concentraciones locales de demanda resistente y alteraciones súbitas de su esquema de funcionamiento.

En este contexto, resulta especialmente importante distinguir entre la respuesta local y la respuesta global del edificio. En numerosos casos, la explosión produce daños muy severos en elementos próximos al foco o directamente expuestos al paso de la onda, sin que ello afecte necesariamente a la estabilidad del conjunto. En otros, por el contrario, una lesión aparentemente localizada puede afectar a un elemento clave, alterar la transmisión de cargas y dar lugar a consecuencias estructurales desproporcionadas. La gravedad del siniestro no depende, por tanto, únicamente de la extensión visible del daño, sino también de su localización y de la función resistente del elemento afectado dentro del conjunto estructural.

La experiencia recogida en los casos analizados pone de manifiesto que la evolución del daño está estrechamente relacionada con el grado de robustez estructural del edificio. Debe entenderse aquí por robustez la capacidad de la estructura para admitir daños locales sin que estos desemboquen en una pérdida general de estabilidad o en una propagación desproporcionada de sus efectos. La continuidad resistente entre elementos, la existencia de trayectorias alternativas de carga, la hiperestaticidad del sistema y una cierta capacidad de redistribución de esfuerzos pueden desempeñar, en este sentido, un papel decisivo. Gracias a ello, estructuras con daños locales severos pueden conservar un comportamiento global aceptable, al menos durante el tiempo necesario para su inspección, apeo y posterior intervención.

Junto a la configuración general del sistema resistente, la casuística analizada muestra también la importancia de determinados detalles constructivos que, aun no habiendo sido concebidos específicamente frente a acciones explosivas, contribuyeron a limitar la gravedad del daño. La continuidad de armaduras más allá de donde son estrictamente necesarias por condicionantes de diseño, la eficacia de anclajes y enlaces, la adecuada vinculación entre vigas, soportes y forjados, o la existencia de elementos capaces de colaborar en la redistribución de esfuerzos,

resultaron en diversos casos factores favorables para evitar mecanismos frágiles o pérdidas bruscas de capacidad. Del mismo modo, deficiencias en conexiones, discontinuidades resistentes, cuantías escasas en zonas sometidas a inversión de esfuerzos o detalles poco favorables en apoyos y uniones tendieron a agravar los efectos del siniestro.

Estas consideraciones permiten encuadrar la lectura de los daños observados en los expedientes analizados. En efecto, la interpretación de una estructura dañada por explosión no debe basarse únicamente en la descripción de las lesiones visibles, sino en la identificación del mecanismo resistente comprometido, de su posible evolución y de la capacidad remanente del sistema. Sobre esta base, en los apartados siguientes se distinguen los principales patrones de daño estructural observados, se analiza el papel de la robustez en la limitación de sus consecuencias y se exponen los criterios de evaluación e intervención empleados en la práctica.

3. DAÑOS ESTRUCTURALES OBSERVADOS EN CASOS DE EXPLOSIÓN

La interpretación del daño estructural causado por una explosión no debe basarse únicamente en la descripción de las lesiones visibles, sino en el reconocimiento del mecanismo resistente que ha resultado comprometido y en la valoración de sus consecuencias sobre la estabilidad y la capacidad residual del edificio. En este tipo de acciones, la misma apariencia externa del daño puede corresponder a situaciones de gravedad muy distinta, según su localización, el tipo de elemento afectado y la posibilidad de que la estructura mantenga o no caminos alternativos de transmisión de cargas. El tema está profusamente tratado en la bibliografía (por ejemplo, (4), (5), (6), (8) y (9)).

La experiencia recogida en los casos analizados pone de manifiesto que, junto a daños compatibles con una respuesta deformable y con cierta capacidad de redistribución, aparecen con frecuencia mecanismos de carácter frágil o de inestabilidad cuya relevancia estructural es muy superior a la que podría deducirse de una observación superficial. En estos últimos, la brusquedad del fallo y la escasa capacidad de aviso previo obligan a extremar la cautela en la inspección, en la valoración de la seguridad residual y en la definición de las medidas de intervención.

Por ello, en este apartado se exponen en primer lugar ejemplos de daños asociados a mecanismos de tipo frágil, por ser los que con mayor frecuencia condicionan la gravedad potencial del siniestro y la necesidad de adoptar decisiones inmediatas. Dentro de este grupo se incluyen los fallos por tensiones normales debidos a inversión de momentos, los fallos por cortante, los fallos por punzonamiento y los daños por rasante o deslizamiento en interfaces o uniones, para terminar con una consideración específica sobre la fragilidad local y el riesgo de consecuencias desproporcionadas.

A continuación, se recogen los daños asociados a respuestas de tipo dúctil, en particular la fisuración por flexión con grandes deformaciones y aquellos casos en los que la estructura mostró capacidad de redistribución y reserva resistente suficientes para limitar la extensión del daño. La exposición de estos patrones, además de sistematizar la casuística observada, aporta una base para la interpretación del daño estructural. En apartados posteriores se apuntan, asimismo, criterios que pueden ayudar a orientar la inspección y a identificar adecuadamente los distintos tipos de daños presentes en edificios afectados por explosión.

3.1. Daños asociados a mecanismos de rotura de tipo frágil

Los mecanismos de tipo frágil merecen una consideración prioritaria en la evaluación de daños por explosión, por cuanto suelen asociarse a fallos bruscos, con escasa capacidad de redistribución y limitado margen de aviso previo. En este tipo de lesiones, la apariencia externa del daño no siempre refleja adecuadamente su gravedad potencial, por lo que su correcta identificación resulta esencial tanto para valorar la seguridad residual como para definir las medidas de actuación inmediatas, reparación o refuerzo. En los casos analizados, los mecanismos frágiles más relevantes correspondieron a fallos por cortante, punzonamiento, rasante o deslizamiento en interfaces o uniones e inversión del signo de los esfuerzos respecto de los contemplados en diseño.

Fallos por cortante

Entre los mecanismos frágiles observados en edificios dañados por explosión, los fallos por cortante revisten una especial gravedad, por cuanto se asocian a formas de rotura bruscas, con escasa capacidad de redistribución y reducido margen de aviso previo. A diferencia de otros daños en los que la estructura puede desarrollar deformaciones apreciables antes de alcanzar una situación crítica, en los fallos por cortante la pérdida de capacidad resistente puede producirse de forma súbita, lo que obliga a extremar la cautela en su identificación durante la inspección.

Su expresión más característica es la aparición de fisuración diagonal, normalmente concentrada en almas de vigas, soportes, zonas próximas a apoyos o puntos de introducción de carga, aunque la manifestación concreta del daño

depende de la geometría del elemento, de sus condiciones de contorno y del esquema resistente previsto en su diseño. En acciones de carácter impulsivo, como las debidas a explosión, este mecanismo puede adquirir protagonismo incluso en elementos que, bajo acciones ordinarias, no presentarían al cortante como sollicitación dominante.

La experiencia analizada muestra que la vulnerabilidad frente a este tipo de fallo aumenta en elementos con armadura transversal escasa, disposición deficiente de cercos, detalles poco favorables en zonas de apoyo (por ejemplo, vigas de apeo, entregas escasas para el anclaje de la armadura longitudinal, etc.), o, en general, escasa capacidad para movilizar mecanismos resistentes alternativos. En estos casos, la brusquedad del daño y su posible incidencia sobre elementos estructuralmente relevantes hacen que sus consecuencias puedan ser severas, tanto desde el punto de vista de la estabilidad local como de la seguridad global del edificio.

En la Figura 2 se muestran los daños por cortante en los nervios de un forjado reticular de un aparcamiento, y el fallo por ese mismo tipo de esfuerzo en el nervio transversal. En la Figura 3 se muestra un daño análogo en un forjado unidireccional con viguetas prefabricadas semirresistentes en un edificio de viviendas. En ambos ejemplos puede observarse la fisuración inclinada típica de la respuesta estructural en elementos de hormigón armado frente a este esfuerzo, así como la respuesta particularmente frágil asociada a la ausencia de armadura transversal. Cabe destacar la nula capacidad de redistribución y las consecuencias graves del daño (Figura 4), y como la estructura queda colgada de la armadura longitudinal.



Figura 2: Daños por cortante en nervios de un forjado reticular (Aparcamiento Pza. Colón, Madrid, 2001)



Figura 3: Rotura por cortante en un forjado unidireccional (Edif. C/ Martín Gaité, Leganés, Madrid, 2004)



Figura 4: Rotura por cortante en una alineación de nervios de forjado a la salida del ábaco (Aparcamiento en Aeropuerto de Barajas, Madrid, 2006)

Fallos por punzonamiento

Los fallos por punzonamiento constituyen otro de los mecanismos frágiles de especial gravedad observados en estructuras afectadas por explosiones, en particular en losas y forjados apoyados directamente sobre soportes. Se trata de un modo de fallo muy localizado, pero de consecuencias potencialmente muy severas, por cuanto compromete de forma directa la transmisión de cargas verticales en el nudo, y afectar al arriostramiento del pilar; pudiendo dar lugar a pérdidas bruscas de capacidad resistente y a colapsos localizados con afección importante sobre el entorno inmediato.

Su manifestación suele concentrarse en torno a los apoyos, mediante fisuración radial y tangencial, desprendimientos locales de material o pérdida de continuidad en la zona próxima al soporte. La especial sensibilidad de losas y forjados planos a este tipo de sollicitación hace que, bajo acciones impulsivas, puedan desarrollarse formas de trabajo especialmente desfavorables, con escasa capacidad de redistribución una vez iniciado el proceso de fallo.

La experiencia analizada muestra, no obstante, que determinados aspectos geométricos y algunos detalles de armado pueden contribuir a limitar la gravedad de este tipo de daño, retrasando su desarrollo o acotando su extensión. Ello refuerza la importancia de una inspección cuidadosa de estas zonas, en las que un daño aparentemente localizado puede tener una relevancia estructural muy superior a la que su apariencia pudiera hacer pensar.

En la Figura 5 se muestra el mecanismo de fisuración indicado en un aparcamiento, junto con otro en el que ya se ha producido el fallo por punzonamiento en la misma edificación.



Figura 5: Daños por punzonamiento (Aparcamiento en Aeropuerto de Barajas, Madrid, 2006)

Este tipo de fallo puede dar lugar a una evolución progresiva del daño. En efecto, el punzonamiento en el apoyo de un forjado sobre un soporte provoca una sobrecarga de los apoyos próximos, especialmente cuando las luces entre pilares o las cargas del forjado son elevadas, a lo que se añade el efecto dinámico asociado a dicho sobreincremento de carga. Ello puede conducir al fallo por punzonamiento de los soportes contiguos, desencadenando una sucesión de fallos en el mismo nivel. La presencia de armadura de punzonamiento puede contribuir no solo a aumentar la resistencia, sino también a dotar a la estructura de una cierta ductilidad, siempre y cuando el detalle de armado adoptado sea adecuado y eficaz (10). Hay que hacer notar en este sentido dos aspectos en relación con la práctica constructiva en España. Por un lado, de manera muy habitual se ha dispuesto la armadura transversal de punzonamiento anclada por dejado de la armadura longitudinal de flexión; lo que, unido a un frecuentemente insuficiente control de recubrimientos en épocas pasadas, dotaba a esta armadura de una capacidad muchas veces menor de la considerada al resultar excesiva la separación entre armaduras transversales para coser la fisuración. Y por otro, la evolución de la formulación ha hecho que anteriormente se sobrevalorara la contribución del hormigón cuando se disponía armadura de punzonamiento, por lo que se disponían menores cuantías de armadura transversal que actualmente.

Los hundimientos por cortante o punzonamiento de forjados pueden favorecer una propagación vertical del colapso (véase la fotografía derecha de la Figura 5 anterior y la Figura 6).



Figura 6: Ejemplo de fallo progresivo hacia plantas inferiores por punzonamiento (fotografía izquierda) y cortante (fotografía derecha) a la salida de ábacos (Aparcamiento P2 del Aeropuerto de Barajas 2001, y Centro Comercial en Zaragoza 2002).

Fallos por rasante y deslizamiento en interfaces o uniones

Otro de los mecanismos de rotura frágiles observados en algunos de los casos analizados se corresponde con la pérdida de transmisión tangencial entre elementos, con el consiguiente efecto de delaminación y deslizamiento o apertura en juntas, interfaces o zonas de enlace. Se trata de un tipo de daño que, en ocasiones, puede pasar más desapercibido que otros mecanismos de fallo más evidentes, pero cuya relevancia estructural puede ser considerable al comprometer el funcionamiento conjunto de elementos que, aun conservando individualmente parte de su capacidad resistente, dejan de colaborar de la forma prevista.

Este tipo de daño puede presentarse en interfaces hormigón-hormigón, en uniones entre elementos prefabricados, en juntas entre fases constructivas distintas o en zonas de conexión entre elementos principales y secundarios. En todos estos casos, la acción explosiva no pone a prueba únicamente la resistencia propia de cada elemento, sino también la eficacia de su conexión, la capacidad de cosido o atado existente y, en definitiva, la aptitud de la unión para transmitir esfuerzos tangenciales sin pérdida de integridad estructural.

La experiencia recogida pone de manifiesto que la vulnerabilidad frente a este mecanismo aumenta cuando existen detalles de conexión poco favorables, insuficiencia de armaduras de cosido, anclajes deficientes o una baja capacidad de transferencia en la interfaz. Bajo acciones impulsivas, estas debilidades pueden traducirse en deslizamientos relativos, aperturas locales o degradaciones de la unión que alteran de forma significativa el esquema resistente inicialmente previsto. De ahí la importancia de reconocer este tipo de daños durante la inspección, aun cuando su manifestación externa no resulte tan llamativa como la de otros mecanismos frágiles.

Este modo de fallo es frecuente en forjados unidireccionales con una parte prefabricada (vigüeta semirresistente) y otra hormigonada “in situ”.



Figura 7: Fallo por rasante en un forjado unidireccional con vigueta semirresistente en “T” invertida (Edif. C/ Martín Gaité, Leganés, Madrid, 2004)



Figura 8: Fallo por rasante en un forjado unidireccional con vigueta semirresistente “en celosía” (Centro de Menores de Zumárraga, Guipúzcoa, 2001)

Fallos asociados a esfuerzos de signo contrario o a solicitaciones no previstas en el diseño

La acción explosiva puede someter a los elementos estructurales a estados tensionales distintos de los considerados en el diseño ordinario del edificio, ya sea por inversión del signo de esfuerzos habitualmente predominantes o por la aparición de solicitaciones cuya magnitud o localización no resultaban determinantes en las situaciones de proyecto. Este hecho adquiere especial relevancia en estructuras concebidas para acciones gravitatorias y combinaciones convencionales, en las que determinadas zonas o detalles resistentes pueden presentar una capacidad muy limitada frente a este tipo de demanda no habitual.

Los daños asociados a esta situación no responden necesariamente a un único mecanismo de respuesta estructural, sino que pueden manifestarse de formas diversas en función del elemento afectado, de su esquema de apoyo, de la proximidad al foco de la explosión y del detalle constructivo existente. En algunos casos se traducen en fisuración o rotura en caras que, en condiciones ordinarias, no estarían sometidas a tracción significativa; en otros, en la activación de esfuerzos locales o de interacciones entre acciones que apenas tendrían relevancia en el comportamiento habitual del edificio.

La experiencia analizada pone de manifiesto que este tipo de daño puede resultar especialmente severo cuando, al tratarse de solicitaciones no previstas en el diseño, no existe armadura suficiente para absorberlas sin que se desarrollen mecanismos de carácter frágil. A ello pueden sumarse cuantías reducidas de armado en la zona traccionada, detalles poco favorables en anclajes o uniones, o una escasa capacidad del elemento para adaptarse a trayectorias de carga distintas de las previstas. De este modo, la explosión pone de manifiesto vulnerabilidades que permanecen ocultas en el funcionamiento ordinario de la estructura y que solo emergen cuando ésta se ve forzada a responder frente a solicitaciones excepcionales.

Un ejemplo es la flexión inversa que puede producirse por la sobrepresión en forjados de techo. En la Figura 9 se presenta el caso de una explosión ocurrida junto a la fachada de un edificio en planta baja. La onda expansiva invirtió el sentido de los momentos en los voladizos sobre la zona del foco de la explosión, provocando un fallo frágil con rotura del forjado en vuelo en su arranque. En forjados sin vigas en ocasiones el fallo en el nudo se produce por flexión positiva en el nudo provocada por la sobrepresión, frente a la cual se disponen a bajas cuantías de armadura longitudinal, que hace que el pilar atravesase de forma "limpia" (sin superficies de rotura por tensiones tangenciales de punzonamiento) el forjado cuando este cae tras el paso de la onda de presión (véase la fotografía derecha de la Figura 15).

En la Figura 10 se recoge otro caso en el que se produjo la rotura frágil del forjado de techo como consecuencia de la inversión de esfuerzos en los apoyos. Puede observarse la rotura de los nervios del forjado en su entrega a la viga de borde, que permaneció estable, con una inclinación ascendente hacia el apoyo, en sentido contrario al correspondiente a la fisuración por cortante bajo cargas gravitatorias. En los nervios situados en el borde de la zona colapsada se aprecia igualmente esta fisuración de inclinación contraria a la habitual frente a acciones gravitatorias.



Figura 9: Fallo en los voladizos de un edificio por una explosión bajo ellos en planta baja (Edificio en la Gran Vía de Logroño, 2001).



Figura 10: Colapso por inversión de esfuerzos en forjado de techo sobre el foco de la explosión (Edif. C/ Martín Gaité, Leganés (Madrid), 2004)

Otro ejemplo es el caso de los soportes en los que la onda expansiva puede provocar empujes que los sitúen en flexión dominante, cuando en condiciones normales se encuentran principalmente en compresión. Esto ocurre especialmente cuando los cerramientos presentan llaves de atado a los soportes, de manera que, frente a la onda expansiva, los cerramientos crean un “efecto vela” capaz de originar flexiones relevantes en estos, como se observa en las fotografías superiores de la Figura 11.

En las fotografías superiores de la Figura 12 se muestra otro ejemplo, en este caso correspondiente a una explosión ocurrida en el exterior del edificio. Véase la rotura a cortante del soporte en su coronación.

En algunos casos en los que la carga sobre el soporte es reducida, el empuje de la onda expansiva sobre los forjados de techo puede poner el soporte en tracción (obsérvese la fotografía inferior de la Figura 11). El arranque violento de particiones y cerramientos por la onda expansiva puede producir desconchados en el hormigón dejando armadura al descubierto (véase la misma Figura 12).



Fisuración por flexión en un pilar (fotografía superior izquierda) en un soporte al que el cerramiento estaba referido con llaves ancladas a los soportes



Fisuración horizontal de un soporte que se situaba próximo al foco de la explosión. El edificio sólo tenía planta baja más primera



Daños en cabeza de un soporte por una explosión exterior junto a un cuerpo de una única altura adyacente al edificio principal



Desconchones en el hormigón

Figura 12: Casa Cuartel de Burgos, 2009.

Por último, en la Figura 13 mostramos la fisuración en cara superior del forjado reticular en zona de centro de vano en techo de la zona de paso de la onda expansiva, asociada a la inversión de momentos.



Figura 13: Daños en cara superior de forjado reticular en zonas centrales de vano, en techo sobre el foco de la explosión (efecto de la “inversión” de momentos flectores) (Aparcamiento P2 Aeropuerto Barajas, 2001).

Fragilidad local y riesgo de colapso desproporcionado

La especial gravedad de los mecanismos frágiles no reside únicamente en la brusquedad con que pueden desarrollarse, sino también en su capacidad para desencadenar consecuencias desproporcionadas respecto de la entidad inicial del daño. En efecto, una lesión localizada en un elemento o en una zona concreta puede comprometer la continuidad resistente, alterar la transmisión de cargas y dar lugar a una evolución progresiva del daño, especialmente cuando afecta a apoyos, uniones, soportes o elementos con escasa capacidad de redistribución. La experiencia analizada pone de manifiesto que, en estructuras sometidas a explosión, la frontera entre un daño local severo y una situación de colapso parcial o de propagación del fallo puede depender en gran medida de la robustez del sistema estructural y de la existencia de trayectorias alternativas de carga.

Es el caso del fallo progresivo, ya comentado, asociado a la rotura de la unión forjado-pilar por inversión de la cara, al punzonamiento o al cortante (Figura 5 y Figura 6), que puede llevar al colapso de una parte significativa del inmueble (Figura 14).

En ocasiones pueden presentarse fenómenos de inestabilidad, consecuencia de las acciones horizontales y pérdida de arriostramiento que estos daños producen (Figura 15). Es un aspecto para tener en cuenta, pues algunos soportes han podido quedar en situación precaria desde el punto de vista de la estabilidad sin que, en el instante de la inspección, hayan presentado fallos (aumenta la esbeltez del pilar por la pérdida del arriostramiento de la planta, y el nudo, donde se han concentrado las tensiones por los esfuerzos de flexión y cortante/punzonamiento puede estar dañado).



Figura 14: Colapso progresivo en un edificio de aparcamiento tras la explosión (Aparcamiento de Barajas, Madrid, 2006).



Figura 15: Pilares con daños graves o riesgo de inestabilidad tras la explosión (Aparcamiento de Barajas, Madrid, 2006).

Los desplazamientos ocurridos tras la explosión pueden comprometer el estado de juntas (Figura 16), apoyos en elementos prefabricados, etc.



Figura 16: Abertura apreciable en una junta de forjado con pasadores tras los desplazamientos ocurridos como consecuencia de la explosión (Aparcamiento de Barajas, Madrid, 2006).

3.2. Daños asociados a respuestas de tipo dúctil

Frente a los mecanismos de respuesta descritos en el apartado anterior, en otros casos se ha observado que las estructuras responden de manera más dúctil, con desarrollo de deformaciones apreciables y cierta capacidad de redistribución de esfuerzos. De hecho, pueden superarse claramente las deformaciones límite asumidas en las comprobaciones de agotamiento en el diseño, y sin embargo no llegar al colapso debido a la ductilidad real de las armaduras y al efecto membrana de los forjados gracias a la armadura de continuidad que pueda haber. Aunque este tipo de daño puede llegar a ser muy aparatoso y comprometer de forma importante la aptitud de servicio o requerir una reparación, su significado estructural suele ser distinto del asociado a los fallos bruscos, por cuanto revela, al menos en parte, la existencia de reserva resistente y de capacidad de adaptación del sistema frente a la acción excepcional sufrida.

En estos casos, la respuesta estructural suele manifestarse mediante fisuración por flexión, grandes deformaciones y alteraciones geométricas permanentes, sin que ello implique necesariamente una pérdida inmediata de estabilidad. La experiencia analizada muestra que, cuando la estructura conserva continuidad resistente y posibilidad de movilizar mecanismos alternativos de transmisión de cargas, este tipo de comportamiento puede limitar la extensión del daño y evitar consecuencias desproporcionadas, aun a costa de una degradación importante del elemento afectado.

El reconocimiento de estas respuestas resulta igualmente relevante en la inspección, tanto para distinguirlas de mecanismos frágiles de mayor peligrosidad como para valorar adecuadamente la capacidad residual de la estructura y la viabilidad de su reparación o refuerzo. Se recogen a continuación algunos de los patrones más representativos observados en los casos analizados.

Fisuración por flexión con grandes deformaciones

Uno de los modos de respuesta más representativos dentro de los comportamientos de tipo dúctil es la fisuración por flexión acompañada de grandes deformaciones. En estos casos, la estructura o el elemento afectado desarrolla curvaturas apreciables, fisuración de flexión y, en ocasiones, importantes desplazamientos permanentes, poniendo de manifiesto una capacidad significativa de deformación antes del agotamiento resistente.

Aunque los daños resultantes pueden ser muy severos y exigir medidas de apeo, reparación o refuerzo, su significado estructural difiere del asociado a los mecanismos frágiles, por cuanto evidencian una cierta capacidad de redistribución y absorción de la acción extraordinaria sin pérdida inmediata de estabilidad. La experiencia analizada muestra que este tipo de respuesta se presenta con mayor probabilidad en elementos con continuidad resistente suficiente y detalle de armado favorable, en los que la explosión induce estados de flexión que, aun llevando la sección a situaciones próximas al hundimiento, pueden ser absorbidos mediante deformaciones apreciables antes de producirse el colapso.

En la Figura 17 se recoge un ejemplo representativo de este tipo de comportamiento. Se observan importantes deformaciones de flexión en la estructura horizontal, con formación de rótulas plásticas tanto en apoyo como en centro de vano en las vigas situadas en el límite de la zona colapsada por la explosión, así como la fisuración asociada. La presencia de armadura de cortante adecuada permitió que la respuesta evolucionara hacia un mecanismo dúctil de flexión, con absorción de energía mediante deformación, en lugar de desencadenar prematuramente un fallo frágil por cortante. Se puede comprobar la apertura significativa de las fisuras en las secciones críticas, sin pérdida súbita de integridad del elemento.



Figura 17: Deformaciones remanentes por flexión en la estructura horizontal y fisuración asociada (Edif. C/ Martín Gaité, Leganés (Madrid). 2004

La hiperestaticidad de la estructura constituye, en estos casos, un factor básico para el desarrollo de este tipo de respuesta, al favorecer la redistribución de esfuerzos y permitir la formación de rótulas sin pérdida inmediata de estabilidad.

En la Figura 18 se presenta el caso de un edificio con forjados de viguetas autoportantes simplemente apoyadas sobre las vigas, sin continuidad estructural. La explosión de gas provocó el colapso del forjado, que se desprendió de forma prácticamente limpia. Este caso ilustra, por contraste, la importancia de la continuidad y de la hiperestaticidad para que puedan desarrollarse respuestas con capacidad de redistribución y deformación sin colapso inmediato. Por otro lado, la ausencia de esos detalles limitó el alcance de los daños sobre los pórticos y hacia otras zonas de la estructura.



Figura 18: Fallos en forjados en un edificio tras una explosión de gas (Alcalá de Henares, Madrid, 2010).

Los ejemplos anteriores ponen de manifiesto la importancia de este tipo de respuesta cuando la estructura dispone de continuidad y capacidad de redistribución suficientes.

En estos casos, la capacidad de redistribución y la reserva resistente remanente condicionan de forma decisiva tanto la interpretación del daño como la viabilidad de las medidas de reparación o refuerzo, aspectos que se abordan más adelante.

3.3. Daños en el foco de la explosión

En el entorno inmediato del foco de la explosión, los mecanismos de daño descritos en los apartados anteriores suelen presentarse de forma especialmente intensa y, con frecuencia, combinada. En esta zona pueden concurrir fallos frágiles, deformaciones asociadas a respuestas de tipo dúctil, pérdidas de continuidad resistente y alteraciones del esquema estructural, todo ello magnificado por la elevada concentración espacial y temporal de la acción. A ello se añaden, además, roturas locales por desintegración, desprendimientos, pérdida de material y daños severos en encuentros, apoyos, uniones o elementos directamente expuestos, lo que confiere a esta zona una especial complejidad desde el punto de vista del diagnóstico.

La proximidad al foco hace que los daños no respondan siempre a un único mecanismo claramente identificable, sino a la superposición de varios de ellos, con manifestaciones que pueden resultar especialmente aparatosas y con una importante alteración local de la geometría y de las condiciones de apoyo o enlace entre elementos. Por ello, la interpretación estructural de esta zona exige particular cautela, pues en ella pueden coexistir daños muy visibles, pero de alcance limitado con otros menos evidentes que comprometen de forma decisiva la estabilidad local o la posibilidad de propagación del daño.

La experiencia analizada pone de manifiesto que, precisamente en el foco o en su entorno más próximo, es donde con mayor claridad se revelan tanto las vulnerabilidades locales de la estructura como la importancia de la robustez del sistema resistente para limitar las consecuencias del siniestro. Se exponen a continuación algunos casos representativos de este tipo de daños concentrados.

La Figura 19 reúne varios ejemplos correspondientes a la zona del foco, donde los mecanismos descritos en los apartados anteriores aparecen concentrados y magnificados, acompañados con frecuencia de roturas locales, pérdida de material y alteración severa de las condiciones de apoyo o enlace entre elementos.



Aparcamiento Pza. Colón, Madrid. 2001



Aparcamiento P2 Aeropuerto Barajas, Madrid. 1998



Centro de Menores de Zumárraga, Guipúzcoa. 2001



Centro Comercial en Zaragoza. 2002

Figura 19: Daños en forjados en la zona donde se produjo la explosión

Es frecuente en forjados sin vigas la aparición de fisuras concéntricas con el foco de la explosión (Figura 20).



Figura 20: Fisuración concéntrica con el foco de la explosión en forjado reticular (Aparcamiento Pza. Colón, Madrid, 2001).

En forjados unidireccionales son asimismo frecuentes la rotura de bovedillas, como se muestra en la fotografía inferior izquierda de la Figura 19 anterior; y la rotura de la losa superior (“capa de compresión”), como puede observarse en la fotografía izquierda de la Figura 21. En casos más severos puede llegar a desaparecer la vigueta, e incluso el hormigón del nervio, permaneciendo únicamente la capa de compresión, como se aprecia en esa misma figura. Obsérvese cómo el paño de forjado se sostiene por la continuidad del mallazo superior por efecto membrana.



Figura 21: Rotura de la “capa de compresión” en las inmediaciones del foco de la explosión (Edif. C/ Martín Gaité, Leganés, Madrid, 2004).

Aunque la variedad de daños que pueden presentarse en el entorno inmediato del foco es muy extensa, los casos mostrados bastan para poner de manifiesto la especial concentración, superposición y severidad de las lesiones que suelen producirse en esta zona.

4. EL PAPEL DE LA ROBUSTEZ ESTRUCTURAL EN LA LIMITACIÓN DEL DAÑO

La experiencia recogida en los casos analizados pone de manifiesto que la importancia del daño tras una explosión no depende exclusivamente de la intensidad de la acción o de la proximidad al foco, sino también, en gran medida, de la capacidad de la estructura para admitir daños locales sin que éstos desemboquen en *consecuencias desproporcionadas respecto de la causa original* (Artículo 5.2.1.3 del Código Estructural). En este sentido, la robustez estructural desempeña un papel esencial, al permitir que el edificio mantenga, siquiera de forma degradada, una cierta continuidad resistente (mediante la formación de rótulas o el desarrollo de mecanismos resistentes tipo membrana) y una capacidad suficiente para redistribuir esfuerzos, movilizar trayectorias alternativas de carga y evitar mecanismos de colapso progresivo (11), (12), (13), (14) que desencadenen en el hundimiento total o generalizado de la estructura.

Esta cuestión se aprecia con particular claridad en los casos en los que, pese a haberse producido daños locales severos o incluso la pérdida parcial de algunos elementos, la estructura conserva una respuesta global aceptable, al menos durante el tiempo necesario para su inspección, apeo y posterior intervención. En otros casos, por el contrario, lesiones inicialmente localizadas dieron lugar a efectos mucho más graves al afectar a zonas con escasa capacidad de redistribución, conexiones poco eficaces o detalles resistentes insuficientes para limitar la propagación del daño. De

ello se desprende que la gravedad final del siniestro no viene determinada únicamente por la entidad de la lesión inicial, sino también por la aptitud del sistema estructural para contener sus efectos.

En muchos de los expedientes analizados se ha podido comprobar que determinados detalles constructivos contribuyeron de forma decisiva a mejorar este comportamiento. La continuidad de las armaduras, la eficacia de los anclajes y solapes, la adecuada vinculación entre forjados, vigas y soportes, la existencia de elementos capaces de colaborar en la redistribución de esfuerzos o una disposición favorable de las armaduras transversales son algunos de los aspectos que, aun sin haber sido necesariamente concebidos de forma específica frente a una explosión, introducen una capacidad adicional de defensa frente a daños desproporcionados. En este sentido, la explosión actúa con frecuencia como una suerte de prueba extrema que pone de manifiesto las virtudes o debilidades del sistema resistente que permanecen ocultas en las situaciones ordinarias de servicio.

Debe subrayarse, además, que muchos de estos aspectos no responden a soluciones excepcionales ni a disposiciones ajenas a la práctica habitual del proyecto y de la ejecución, sino que forman parte de lo que recogen las normas estructurales y la buena práctica en la definición de detalles constructivos. La adecuada continuidad de los elementos, el correcto anclaje de las armaduras, la disposición de atados eficaces, el cuidado en apoyos, encuentros y uniones, o evitar detalles especialmente vulnerables, son medidas que incrementan la robustez del conjunto y que, en general, tienen una influencia reducida en el coste global de la estructura. Sin embargo, su repercusión en la capacidad del edificio para soportar acciones accidentales o limitar la propagación del daño puede ser muy significativa.

En general va a interesar esta hiperestaticidad e hiperresistencia, fundamentalmente frente a modos de fallo frágiles como el cortante y el punzonamiento, para garantizar la estabilidad de la estructura y limitar el alcance de los daños personales y de bienes existentes. En este sentido, resulta aplicable el criterio conceptual del diseño por capacidad, procurando que la respuesta de la estructura quede gobernada por mecanismos dúctiles y redistribuibles, y no por roturas frágiles o súbitas. Ello puede ser a costa de extender el daño, de manera que tras la explosión la zona de la estructura sobre la que haya que actuar o reconstruir sea mayor. Las roturas frágiles pueden limitar inicialmente la extensión del daño, pero generan daños más graves en los elementos afectados y pueden desembocar en colapsos progresivos.

La casuística analizada muestra igualmente que la ausencia o insuficiencia de estos detalles favorables puede agravar de forma notable determinados mecanismos frágiles. Cuantías muy ajustadas en zonas sometidas a inversión de esfuerzos, apoyos o uniones con escasa capacidad de transferencia, discontinuidades resistentes o deficiencias de cosido y confinamiento favorecen respuestas más abruptas y reducen la posibilidad de que la estructura absorba la acción extraordinaria mediante deformación y redistribución. En estos casos, la falta de robustez no se manifiesta tanto en el comportamiento ordinario del edificio como en su incapacidad para limitar las consecuencias de una lesión local severa.

Por ello, la experiencia acumulada permite afirmar que la robustez no debe entenderse como una cualidad abstracta, sino como el resultado de decisiones en el ámbito del proyecto y de la ejecución, así como un diseño apropiado de los detalles, que condicionan la capacidad del edificio para responder frente a situaciones accidentales. En estructuras sometidas a explosión, la frontera entre un daño local severo y una consecuencia estructural desproporcionada puede depender, en buena medida, de aspectos aparentemente modestos del sistema resistente.

A continuación, se exponen algunos ejemplos procedentes de los casos estudiados, representativos tanto de la contribución de determinados detalles a la robustez estructural como de la mayor vulnerabilidad observada cuando éstos faltaban o resultaban insuficientes.

Un ejemplo de la influencia favorable de adecuados detalles constructivos es el que se comenta a continuación. En la Figura 22 se presenta una vista del forjado reticular de un aparcamiento en el apoyo sobre el pilar más próximo al foco de la explosión. Puede observarse el fallo por punzonamiento del forjado en dicho apoyo. Sin embargo, la relativamente importante cuantía de armadura inferior que atravesaba el soporte permitió que el forjado quedase “colgado” de éste mediante dicha armadura, evitando su hundimiento y, posiblemente, un fallo progresivo como los expuestos en apartados precedentes.



Cara superior. fisuración por punzonamiento



Cara inferior. descenso del forjado al “clavarse” en el pilar y permanencia del mismo colgado de éste a través de la armadura inferior

Figura 22: Fallo por punzonamiento en el apoyo del forjado reticular situado sobre la zona en la que se produjo la explosión, en el pilar más próximo al foco (Aparcamiento P2 del Aeropuerto de Barajas, Madrid, 1998).

Otro caso significativo de la influencia de la disposición de detalles constructivos que redunden en la robustez de la estructura es el que se muestra en la Figura 23, en el que se pone de manifiesto la importancia de dar continuidad a parte de la armadura necesaria en vigas frente a momentos positivos en centro de vano hasta los apoyos. La explosión, por el “efecto vela” propiciado por particiones referidas a los pilares ya comentado en apartados anteriores, arrancó completamente el pilar junto al que se encontraba la carga explosiva. Sin embargo, no se produjo un hundimiento local en esa zona gracias a la mencionada continuidad de la armadura (el hecho de que el edificio sólo tuviera una planta más fue determinante, por supuesto).



Soporte en el suelo



Fotografía superior: vista de la zona de encuentro de pilar y viga, donde se produjo el arrancamiento

Fotografía inferior: rotura con estricción de la armadura de la cabeza del tramo de pilar

Figura 23: Arrancamiento de un pilar adyacente al foco de la explosión (Centro de Menores de Zumárraga, Guipúzcoa, 2001).

Aunque la casuística posible es más amplia, los ejemplos expuestos bastan para mostrar cómo decisiones aparentemente modestas sobre la disposición de las armaduras pueden desempeñar un papel decisivo en la robustez estructural y en la contención del daño.

Frente a ello, también se observaron situaciones en las que los detalles constructivos no eran favorables. Por ejemplo, en los forjados reticulares de las plantas de aparcamiento en sótano de un edificio, la longitud de la armadura de negativos resultaba correcta para la situación de cargas gravitatorias, aunque insuficiente para absorber los esfuerzos no previstos generados por la explosión. En efecto, el fallo frágil del forjado de techo sobre el foco de la explosión (Figura 24) pudo verse favorecido porque la estricta longitud de la armadura de negativos dispuesta en el forjado reticular no favorecía su capacidad para adaptarse a una redistribución no prevista de esfuerzos bajo la acción explosiva, limitando la extensión efectiva de la zona armada en tracción y dificultando el desarrollo de una respuesta más dúctil. No puede descartarse, además, que la fase negativa de la onda, posterior al pico de sobrepresión, contribuyera a agravar el daño al inducir transitoriamente esfuerzos dinámicos de signo contrario en una zona cuyo detalle resistente no permitía otras formas de trabajo. El caso pone así de manifiesto cómo un detalle admisible en condiciones ordinarias puede resultar insuficiente desde el punto de vista de la robustez estructural frente a acciones accidentales.



Figura 24: Fallo frágil del forjado en techo sobre el foco de la explosión (Centro Comercial en Zaragoza, 2002).

La experiencia expuesta permite concluir que la robustez estructural no depende únicamente de grandes decisiones de concepción resistente, sino también de detalles que condicionan de manera decisiva la evolución del daño ante una acción accidental como la explosión. Continuidad de armaduras, longitudes de anclaje adecuadas, capacidad de cosido entre elementos, vinculación eficaz en apoyos y uniones o disposiciones que favorezcan la redistribución de esfuerzos pueden marcar la diferencia entre un daño local severo y una consecuencia estructural desproporcionada. Muchos de estos aspectos forman parte de lo que recogen las normas y la buena práctica del detalle estructural, con una repercusión generalmente reducida en el coste global de la estructura, pero con una influencia potencialmente muy significativa en su capacidad para limitar el daño y evitar mecanismos progresivos de colapso.

5. CRITERIOS DE INSPECCIÓN, DIAGNÓSTICO Y VALORACIÓN DE LA SEGURIDAD RESIDUAL

La experiencia acumulada en los casos analizados pone de manifiesto que, tras una explosión, la inspección y el diagnóstico estructural exigen una lectura particularmente cuidadosa del daño, orientada no solo a describir las lesiones visibles, sino a identificar los mecanismos resistentes comprometidos, su posible evolución y la capacidad remanente del edificio. La toma de decisiones en esta fase suele venir condicionada por la necesidad de actuar con rapidez, tanto para adoptar medidas de seguridad inmediatas como para valorar la viabilidad de la reparación, del refuerzo o, en su caso, de la sustitución de elementos dañados.

En este contexto, la gravedad del siniestro no puede juzgarse exclusivamente por la extensión o por el carácter aparatoso del daño. Resulta esencial distinguir entre lesiones llamativas, pero de alcance resistente limitado y daños menos evidentes que afecten a elementos críticos, apoyos, uniones o zonas con escasa capacidad de redistribución. Del mismo modo, determinadas manifestaciones observadas en tabiquería, particiones o cerramientos pueden aportar indicios útiles sobre el recorrido de la onda expansiva, la localización de las zonas más directamente afectadas o la

existencia de desplazamientos relativos entre elementos, siempre que se interpreten como complemento —y no como sustitución— del análisis estructural propiamente dicho.

Los subapartados siguientes recogen, a partir de la experiencia en los casos estudiados, algunos criterios prácticos de inspección, diagnóstico y valoración de la seguridad residual, orientados a reconocer los daños más relevantes, jerarquizar su importancia y apoyar la definición de las medidas de intervención.

Junto a la exposición de estos criterios generales, se utilizará en los subapartados siguientes uno de los casos analizados como referencia, con el fin de mostrar de forma concreta cómo se organizó la inspección, cómo se identificaron los elementos críticos y cómo se valoró la seguridad residual del edificio, complementando esta exposición con otros ejemplos cuando resulte de interés. El ejemplo será la intervención para la reparación del aparcamiento P2 del Aeropuerto de Barajas tras la explosión ocurrida en 1998.

5.1. Inspección inicial y medidas urgentes

Tras una explosión, la primera actuación técnica no debe orientarse todavía a un diagnóstico detallado, sino a comprobar la existencia de riesgos inminentes y a adoptar las medidas necesarias para asegurar de forma provisional la estabilidad y la seguridad de las personas. En esta fase inicial resulta prioritario identificar zonas con peligro de desprendimiento, pérdida de apoyo, colapso local, inestabilidad de elementos verticales o posible progresión del daño, prestando especial atención a los elementos estructuralmente críticos, aunque otras lesiones más extensas o llamativas puedan atraer inicialmente la atención (15), (16).

La inspección inicial debe ir, por tanto, encaminada a reconocer con rapidez aquellos daños que puedan comprometer de manera inmediata la seguridad del edificio o de parte de él, a fin de decidir sobre la necesidad de desalojo total o parcial, restricción de accesos, balizamiento de zonas peligrosas, apeos provisionales, descarga de elementos o protección frente a desprendimientos. En muchos casos, la adopción correcta y temprana de estas medidas condiciona no solo la seguridad en el momento posterior al siniestro, sino también la posibilidad de llevar a cabo con garantías la inspección detallada y la posterior intervención (17), (18).

Junto a ello, resulta fundamental documentar desde el primer momento la situación observada mediante inspección visual, croquis de daños y reportaje fotográfico, de modo que quede constancia tanto de la extensión aparente de las lesiones como de aquellos indicios que puedan resultar relevantes para interpretar más adelante los mecanismos resistentes comprometidos. La experiencia analizada pone de manifiesto que una adecuada ordenación de esta fase es decisiva para evitar errores de valoración, priorizar correctamente las actuaciones urgentes y encauzar con criterio el diagnóstico posterior.

Para esta inspección el técnico se apoya en reglas de medición de fisuras (su precisión, de $\pm 0,1$ mm, es más que suficiente), útiles básicos para registro de daños (cámaras fotográficas, vídeo, drones, prismáticos, ...) y medios auxiliares para acceder a los puntos de inspección, bien sea por la altura a la que se encuentran las zonas a inspeccionar, bien cuando el riesgo de colapso de alguna zona así lo aconseje. Es importante contar con toda la documentación descriptiva del inmueble y, en particular, de su estructura, lo antes posible pues será de gran utilidad en esta inspección inicial. Es también esencial dejar bien documentada esta inspección, incluida la parte de los escombros identificando en estos el proceso de colapso, pues en las siguientes labores de aseguramiento y las posteriores de desescombros puede perderse buena parte de esta información, que puede ser vital para el diagnóstico sobre la afección a la estructura. En esta fase hay que decidir también con carácter inmediato si es preciso el desalojo total o parcial, acordonar zonas, disponer apeos de seguridad, colocar viseras para retener posibles desprendimientos, etc.

En el caso del Aparcamiento P2, que cuenta con cuatro módulos, la primera inspección permitió, por un lado, descartar cualquier afección por la explosión a los otros tres módulos del aparcamiento, quedando abiertos de forma inmediata tras la limpieza y retirada de restos en ellos. Las juntas estructurales entre módulos actuaron como aisladores de la acción explosiva. La inspección de estos otros módulos permitió identificar algunos patrones sistemáticos de fisuración por flexión por cara superior frente a momentos negativos (no existe pavimento sobre el forjado, sino que la rodadura se materializa sobre éste para lo cual fue pulido en su ejecución) y por fenómenos de

origen higrotérmico. Mediante la determinación de dichos patrones y la medida de la abertura de fisura en ellos, se pudo acotar el alcance del efecto de la onda expansiva en el módulo afectado. Ello permitió también, a los pocos días, la apertura de amplias zonas de este módulo, quedando acotada la zona afectada con carácter conservador dejando dos crujeas de forjado desde el último punto donde se veían daños potencialmente originados por la explosión; y liberando las dos plantas superiores completamente para su uso.

En la Figura 25 se muestra el croquis de daños en el forjado sobre el que se produjo la explosión. La rotura del forjado se concentró en el recuadro entre pilares que se señala en la figura. Véanse en ésta las fisuras concéntricas en torno al foco ya comentadas en apartados anteriores. Se constató que la junta de dilatación dispuso el efecto en buena medida.

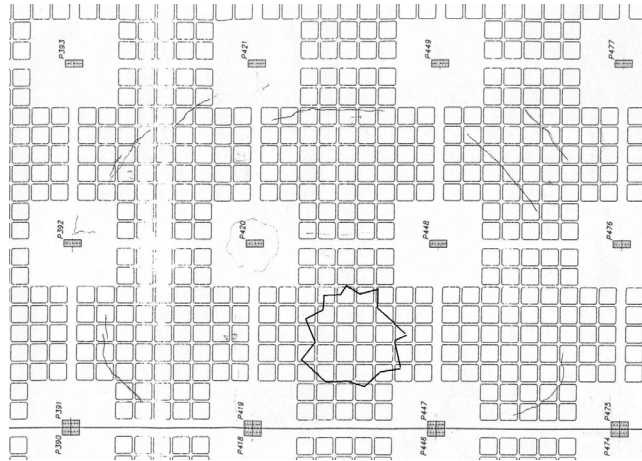


Figura 25: Aparcamiento P2. Croquis de la localización del foco de la explosión y de la fisuración observada.

De forma inmediata se dispuso un apeo continuo desde la solera de planta baja hasta el techo del forjado sobre el que se produjo la explosión, que era el nivel más alto afectado por ésta y que se conservó íntegramente. Ello permitió continuar las investigaciones y plantear los trabajos sucesivos con seguridad.

Es importante en estos casos seguir el o los caminos seguidos por la onda expansiva. En el ejemplo que nos ocupa, no existían cerramientos salvo en las rampas, lo que permitió una salida rápida de la onda expansiva. En el caso del Centro Comercial en Zaragoza, en cambio, al producirse la explosión en el sótano, la onda llegó a los muros provocando por reflexión algún daño en los recuadros de forjado adyacentes, incluso en zonas muy alejadas (Figura 26).

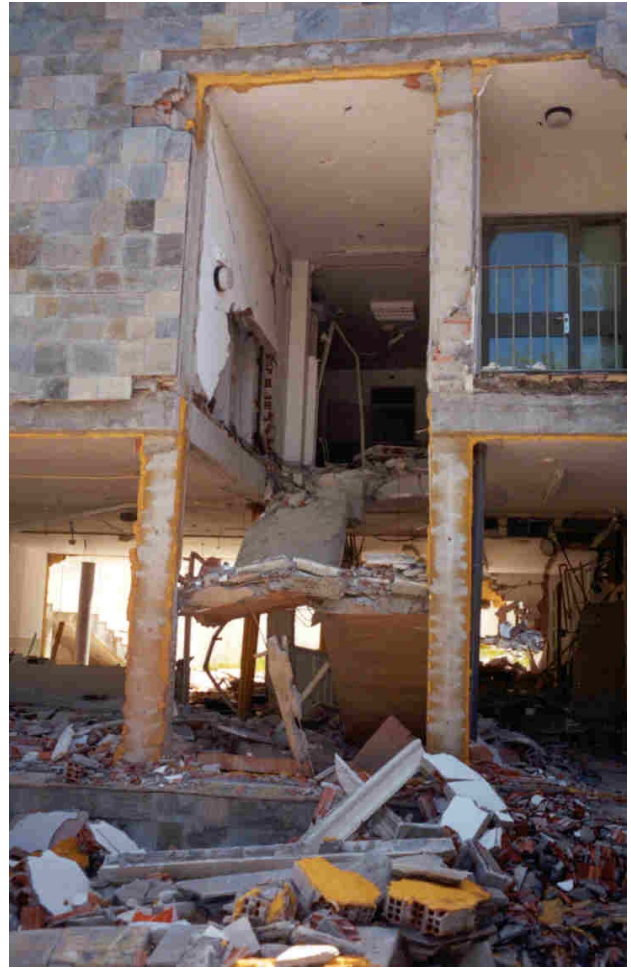


Figura 26: Centro Comercial en Zaragoza (2002). Recuadro de forjado adyacente a muro de sótano afectado, aun estando alejado del foco.

Los daños en particiones y cerramientos son un buen indicador de estas zonas de paso de la onda. En ocasiones ésta provoca su caída (Figura 27), aunque en otros casos -especialmente al debilitarse conforme se aleja del foco- da lugar a una típica fisuración en forma de líneas de rotura como las que se muestran en la Figura 28. Existen otros muchos indicios en carpinterías, falsos techos, acabados, etc. que pueden ayudar en esta tarea. Es importante, a la hora de adoptar las medidas de precaución (desalojo, acordonamiento de seguridad, ...) prestar atención a estos daños pues un fallo en alguno de los elementos afectados, como sería, por ejemplo, la caída de un paño de fachada puede causar daños que pudieran ser graves en último término.

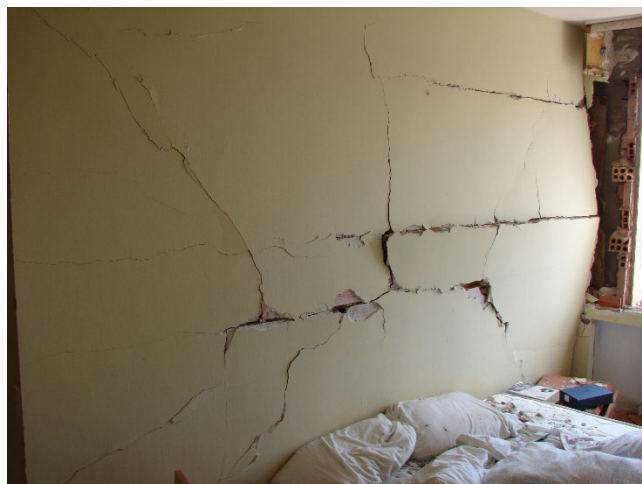


Edif. C/ Martín Gaité, Leganés, Madrid, 2004



Centro de Menores de Zumárraga, Guipúzcoa, 2001

Figura 27: Caídas de cerramientos provocadas por la onda expansiva.



Edif. C/ Martín Gaité, Leganés, Madrid, 2004 (la onda expansiva subió por la caja de escalera provocando los daños que se muestran en el casetón de cubierta)

Casa Cuartel de Burgos, 2009

Figura 28: Fisuración en particiones al paso de la onda expansiva.

5.2. Identificación de elementos críticos, interpretación del daño y criterios de intervención

Una vez asegurada la estabilidad inmediata del edificio y adoptadas las primeras medidas de seguridad, la inspección debe orientarse a identificar los elementos críticos cuyos daños puedan comprometer de forma significativa la seguridad de la estructura estructural o condicionar la estrategia de intervención. La gravedad de una lesión no depende únicamente de su entidad aparente, sino también de la función resistente del elemento afectado, de su posición dentro del sistema estructural y de la posibilidad de que su deterioro altere la transmisión de cargas o desencadene efectos desproporcionados. Por ello, deben examinarse con especial atención soportes, apoyos, nudos, encuentros entre elementos, zonas de cambio de rigidez y regiones próximas al foco o a trayectorias de propagación de la onda.

La correcta lectura del daño exige, además, interpretar su morfología y disposición. La orientación y abertura de las fisuras, la existencia de deformaciones permanentes, pérdidas de apoyo, aperturas de juntas o alteraciones geométricas pueden aportar información esencial sobre el mecanismo resistente comprometido. A ello pueden sumarse, como indicios complementarios, determinadas manifestaciones en tabiquería, cerramientos, carpinterías o falsos techos, útiles para seguir el recorrido de la onda y orientar la inspección hacia las zonas potencialmente más afectadas.

En el caso del Aparcamiento P2, una vez delimitada provisionalmente la zona afectada, la inspección se centró en los apoyos del forjado en pilares, en los nervios y ábacos más próximos al foco. También se centró en analizar la posible propagación del daño hacia apoyos contiguos y en el estado de los elementos verticales situados en la trayectoria de transmisión de cargas. Esta lectura permitió distinguir entre daños muy llamativos, pero de alcance local (fotografía superior derecha de la Figura 19), y otros de mayor trascendencia estructural, especialmente allí donde podían desarrollarse mecanismos de fallo frágiles o quedar comprometida la continuidad del sistema.

De este modo, las zonas con daños no reparables por procedimientos convencionales —como la inyección de fisuras o los refuerzos con fibra de carbono— se catalogaron como zonas a demoler. La línea de corte se amplió para situarla convenientemente bordeando los ábacos para facilitar su posterior reconstrucción. Esta zona es la delimitada mediante línea de puntos en la Figura 29. La línea continua indica el trazado de corte con sierra, de forma que la zona interior pudiera demolerse con medios de alta potencia al quedar aislada del resto de la estructura. La franja comprendida entre ambas líneas, separadas aproximadamente un canto de forjado, debía demolerse con medios manuales de baja capacidad, a fin de dejar armaduras en espera sin dañarlas y permitir posteriormente la

reconstrucción de la zona demolida con continuidad mecánica en las armaduras, soldando donde fuera preciso para garantizar el empalme.

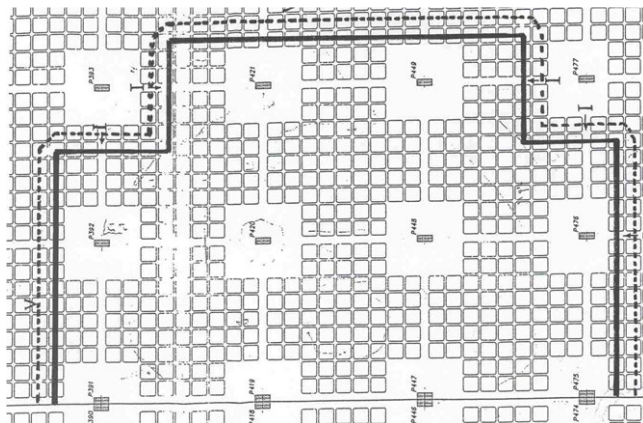


Figura 29: Aparcamiento P2. La línea de puntos indica el borde de la demolición controlada para la reconstrucción de las zonas con daños irreparables.

Resultaba precisa también la demolición del forjado del nivel inferior (planta primera), para el cual se adoptaron los mismos límites, aunque los daños no reparables no alcanzaban estrictamente esa extensión. La planta baja, sobre solera, era perfectamente recuperable.

El resto de los daños asociados a la explosión, o de aquellos que evolucionaron como consecuencia de ella, una vez diferenciados de los preexistentes en la forma ya expuesta, se repararon mediante procedimientos habituales dirigidos a restituir el monolitismo —como la inyección de fisuras— y, en los casos de duda sobre la capacidad resistente, mediante refuerzos convencionales una vez restituida dicha continuidad.

Cuando la fisuración, aun sin implicar un problema de seguridad, es intensa, puede afectar a las condiciones de servicio. En estos casos puede plantearse una prueba de carga en servicio para valorar flechas, vibraciones y otros efectos, y prever con ello las actuaciones que puedan requerirse para la restitución de particiones, acabados y demás elementos afectados.

En casos de duda sobre la repercusión de los daños causados por la explosión sobre la capacidad resistente de forjados, en zonas en las que no se deduzca inequívocamente como necesaria la demolición, pueden plantearse pruebas de carga de seguridad como las planteadas en las referencias (19) y (26).

6. PROCEDIMIENTOS DE REPARACIÓN Y REFUERZO EMPLEADOS EN LA PRÁCTICA

La casuística de apeos, reparaciones locales, refuerzos y sustituciones de elementos dañados por explosión es muy amplia y depende, como es lógico, del tipo de daño producido, de su localización, de la tipología estructural y de las condiciones concretas de cada edificio. Muchas de las técnicas aplicables en estos casos coinciden, además, con las utilizadas en otros procesos patológicos o accidentales y están ampliamente recogidas en la bibliografía especializada. Referencias a procedimientos de reparación pueden encontrarse en (15), (17), (18), (21), (22), (23), y (24) entre otras publicaciones de interés. Por ello, no se pretende aquí realizar una revisión exhaustiva de las distintas soluciones de intervención posibles, sino centrar la atención en aquellos aspectos que, a la luz de la experiencia analizada, presentan un interés más específico en este tipo de siniestros.

Entre estos aspectos destaca, de forma particular, la necesidad de delimitar adecuadamente las zonas con daños irreparables, disponer los apeos arriostramientos necesarios, adoptar medidas provisionales que permitan su tratamiento en condiciones de seguridad, y abordar después su demolición controlada y reconstrucción con restitución de la continuidad resistente. La experiencia obtenida en los casos estudiados muestra que estas operaciones exigen

una lectura precisa del daño, una definición cuidadosa de los límites de demolición y una ejecución especialmente atenta a la reconstrucción para recuperar el comportamiento estructural.

6.1. Delimitación, apeo y demolición controlada de zonas irreparables

La delimitación de las zonas con daños irreparables y su posterior demolición constituyen una de las fases más delicadas de la intervención tras una explosión, por cuanto en ellas confluyen exigencias de seguridad, condicionantes constructivos y la necesidad de preservar, en la medida de lo posible, las condiciones para una reconstrucción estructuralmente correcta.

El apeo de la zona a demoler debe permitir trabajar sobre el forjado y sobre los elementos afectados sin introducir riesgos adicionales, para lo cual resulta preciso prever no solo las cargas propias de la estructura dañada, sino también las derivadas del personal, de la maquinaria de demolición, de las bandejas de protección y del proceso de retirada de escombros. Del mismo modo, debe comprobarse que el sustrato sobre el que apoyan los sistemas auxiliares presenta capacidad suficiente, siendo especialmente importante confirmar si se trata de una solera firme o, por el contrario, de un elemento de menor capacidad, como puede ser un forjado sanitario.

La disposición del apeo debe asegurar asimismo la estabilidad global del sistema provisional. Ello exige, en general, el arriostramiento adecuado de los puntales y, en determinados casos, el arriostramiento específico de pilares que, al demolerse los forjados adyacentes, puedan quedar con una esbeltez o una altura libre tales que hagan cuestionable su estabilidad durante la intervención.

La definición de la zona a demoler no debe venir determinada únicamente por el límite estricto del daño irreparable, sino también por criterios constructivos que permitan disponer juntas de construcción adecuadas con la parte de la estructura que se conserva. En este sentido, la experiencia analizada muestra la conveniencia de extender la demolición hasta líneas o zonas favorables desde el punto de vista estructural y constructivo, aunque ello suponga rebasar localmente el ámbito mínimo del daño.

Una vez fijado dicho límite, resulta conveniente establecer un procedimiento de demolición que combine seguridad, rendimiento y preservación de las armaduras y del hormigón de la zona conservada. Con este fin, puede disponerse un precorte con sierra o hilo de diamante que permita demoler con medios potentes la zona interior delimitada, dejando una franja final para su demolición manual, de menor agresividad, con objeto de no dañar las armaduras que deban quedar en espera para la posterior reconstrucción. Esta solución facilita el posterior solape de la nueva armadura, ya sea por longitud de anclaje o mediante soldadura cuando ello resulte preciso. Asimismo, esta última franja debe dejarse con una geometría favorable para la formación de la junta de construcción y con una textura adecuada (25), de modo que quede el árido visto, no desprendido, con relieve suficiente para asegurar una buena trabazón con el hormigón de reposición, con independencia de que adicionalmente se disponga o no un puente de unión.

En esta fase conviene, además, prever la realización de ensayos no destructivos en pilares (26), en especial en la franja anteriormente ocupada por el forjado, a fin de estudiar posibles daños en el nudo o en las zonas de encuentro cuya afección no resulte claramente visible.

Durante todo el proceso de demolición y apeo resulta aconsejable mantener una auscultación de la estructura y de los medios auxiliares, de manera que puedan detectarse desplazamientos, vibraciones excesivas o cualquier otra incidencia que aconseje revisar el procedimiento previsto. La experiencia obtenida en los casos estudiados muestra que esta fase no debe entenderse como una mera operación de retirada de material dañado, sino como una actuación estructural en sí misma, cuya correcta definición condiciona de forma decisiva la seguridad de los trabajos y la viabilidad de la reconstrucción posterior.

En el ejemplo del Aparcamiento P2 que venimos desarrollando en este apartado y el anterior, en la Figura 29 se muestran la línea de corte con sierra de disco (línea continua) y la que delimita el picado manual (línea discontinua).

Se dispusieron unas vigas metálicas en celosía de rápido montaje¹ en las plantas superiores no afectadas, que apeaban los forjados en dichas plantas, en las que no se intervenía, en la posición de los soportes. Se dispuso el sistema para prevenir un posible fallo de los nudos viga-pilar ante las incertidumbres sobre el estado de estos (Figura 30). Las vigas en celosía apoyaban sobre el forjado junto a los pilares sanos fuera de la zona afectada, conduciendo las cargas hasta la cimentación mediante perfiles metálicos retacados a los forjados entre suelo y techo y dispuestos de forma continua en todas las plantas.



Figura 30: Aparcamiento P2. Apeo de los forjados de los pisos superiores en los que no se realizaban demoliciones.

En la Figura 31 puede verse el arriostramiento dispuesto en los pilares (entre sí y con el resto de la estructura) necesario para reducir su esbeltez, considerando la altura libre resultante al demoler los forjados. Estos perfiles se fijaban a los soportes, mediante chapas ancladas previamente con tacos a los soportes, ligeramente por debajo del entablonado bajo el forjado apeado, antes de demoler.



Figura 31: Aparcamiento P2. Arriostramiento de los pilares para asegurar su estabilidad tras la demolición.

¹ Fueron suministradas temporalmente por el Ejército Español, y pertenecían a sus sistemas Bailey de montaje rápido de puentes en situaciones de conflicto o emergencia.

En la Figura 32 se muestra la demolición con medios de elevada potencia en la zona aislada con corte de sierra del resto de la estructura, así como el apeo y cimbra dispuestos para permitir estas operaciones.



Figura 32: Aparcamiento P2. Proceso de demolición en la zona con daños irre recuperables.

El picado en la franja adyacente a la línea de corte y alrededor de los pilares (Figura 33) se hizo de forma controlada, con medios manuales de bajo poder de demolición (pistolete eléctrico, puntero y maceta) para no dañar a las armaduras ni afectar a sus condiciones de adherencia y anclaje. La superficie de la interfaz de contacto con el hormigón de reconstrucción se realizó premeditadamente con pendiente descendente alejándose del soporte (contraria a la inclinación de posibles fisuras por cortante frente a cargas gravitatorias (25)), en una franja de forjado en torno a los pilares.



Nervio de forjado. Véase la superficie inclinada, con textura rugosa de árido visto no desprendido



Demolición en el entorno del soporte. Se están dejando en los bordes superficies inclinadas descendentes alejándose del pilar

Figura 33: Aparcamiento P2. Fase final de demolición.

6.2. Reconstrucción y restitución de la continuidad estructural

Previamente a la demolición se habían determinado las velocidades de propagación del impulso ultrasónico en pilares sanos del entorno de la zona afectada. Con ello se comprobó el estado de los pilares en la zona afectada antes de la demolición. Una vez completada la demolición, esta actuación pudo llevarse a cabo también en los nudos forjado-pilar de éstos tras la demolición. Descartados daños en esos elementos, se procedió a la disposición de cimbras y encofrados y a la colocación de nuevas armaduras de refuerzo, solapándolas entre si la longitud necesaria o soldándolas cuando no era posible en la zona a reconstruir con la que quedó en espera tras la demolición manual (Figura 34). La rectificación de las armaduras en espera, dobladas durante el proceso, fue la tarea que más tiempo requirió.



Figura 34: Aparcamiento P2. Encofrado y disposición de armadura de las zonas a reconstruir.

El hormigonado no planteó condicionantes especiales, una vez aseguradas las condiciones de continuidad y preparación de las juntas. En paralelo, se procedió a la inyección de las fisuras que, por su abertura, comprometían el monolitismo en zonas próximas a la que se estaba reconstruyendo. El proceso completo, desde la inspección previa hasta la puesta en servicio de la estructura, se desarrolló entre el 28 de agosto y el 6 de octubre de 2001.

7. CONCLUSIONES

A partir de la experiencia presentada en este trabajo pueden señalarse las siguientes conclusiones:

- a) Los daños estructurales causados por explosiones en edificios presentan una gran variedad de manifestaciones, pero su correcta interpretación exige identificar las formas de trabajo de la estructura que los han originado y no clasificarlos únicamente por su apariencia.
- b) Entre los daños observados, los mecanismos de fallo de tipo frágil revisten especial gravedad por su brusquedad, su limitada capacidad de redistribución y su potencial para desencadenar el hundimiento total o generalizado de la estructura, especialmente cuando la explosión induce esfuerzos de signo contrario o solicitaciones no previstas en el diseño ordinario.
- c) La experiencia acumulada pone de manifiesto la importancia decisiva de la robustez estructural en la limitación del daño. La continuidad de las armaduras más allá de las secciones donde estrictamente son necesarias frente a las cargas para las que fueron diseñadas, la adecuada resolución de apoyos y uniones, la capacidad de redistribución y, en general, un buen desempeño en la definición de los detalles estructurales puede evitar que daños locales severos evolucionen hacia fallos progresivos o colapsos parciales.
- d) La inspección y valoración de la seguridad residual de una estructura afectada por una explosión debe orientarse prioritariamente a la identificación de los elementos críticos, a la lectura correcta de los mecanismos de daño y a la adopción temprana de medidas de seguridad, sin dejarse condicionar únicamente por el carácter más o menos aparatoso de las lesiones visibles.

- e) La actuación en zonas donde existen daños irreparables debe abordarse contemplando las siguientes actividades: delimitación precisa de la zona afectada, apeo y arriostamiento preventivo, demolición controlada; y finalmente su reconstrucción, que debe restituir la continuidad resistente, siendo este uno de los aspectos más relevantes y sensibles de la intervención en estructuras afectadas por explosión.

8. REFERENCIAS

1. **U.S. Department of Defense.** *UFC 3-340-02: Structures to resist the effects of accidental explosions. Whole Building Design Guide.* 2008 (Change 2, september1, 2014).
2. **Federal Emergency Management Agency (FEMA).** *Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings.* s.l. : U.S. Department of Homeland Security., 2011 (2nd ed., FEMA 426/BIPS 06).
3. **Dusenberry, D. O.** *Handbook for blast-resistant design of buildings.* s.l. : John Wiley & Sons, 2010.
4. **CORMIE, David y SMITH, Peter D. y MAYS, Gordon C.** *Blast effects on buildings. 3rd ed.* London : ICE Publishing, 2019.
5. **DUSENBERRY, Donald O., ed.** *Handbook for blast-resistant design of buildings.* Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2010.
6. *Blast loading and blast effects on structures: an overview.* **NGO, T., MENDIS, P. y GUPTA, A. y RAMSAY, J.** s.l. : Electronic Journal of Structural Engineering. Special Issue: Loading on Structures, p. 76-91, 2007.
7. **AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.** *ASCE/SEI 59-22: Blast protection of buildings.* 2022.
8. *Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads.* **CARTA, G. y STOCHINO, F.** s.l. : Engineering Structures, 2013, Vols. 49, p. 306-315.
9. *Punching shear failure in blast-loaded RC slabs and panels.* *Engineering Structures.* **SAGASETA, J., OLMATI, P. y MICALLEF, K. y CORMIE, D.** s.l. : Engineering Structures, 2017, Vols. 147, p. 177-194.
10. **FIB (International Federation for Structural Concrete).** *Punching shear of structural concrete slabs: Model Code 2010 and fib Model Code 2020 approaches for punching shear design. fib Bulletin 81.* Lausanne : s.n., 2017.
11. *Robustness of reinforced concrete frames against blast-induced progressive collapse.* **FRANCIOLI, Mattia, PETRINI, Francesco y OLMATI, Pierluigi y BONTEMPI, Franco.** s.l. : Vibration, 2021, Vols. 4, no. 3, p. 722-742.
12. *Analysis of building collapse under blast loads.* **LUCCIONI, B.M. y AMBROSINI, R.D. y DANESI, R.F.** 1, p. 63-71, s.l. : Engineering Structures, 2004, Vol. 26.
13. **AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.** *ASCE/SEI 76-23: Standard for mitigation of disproportionate collapse potential in buildings and other structures.* s.l. : ASCE, 2023.
14. **FIB (INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE).** *FIB Bulletin 63: Design of precast concrete structures against accidental actions.* Lausanne : FIB, 2011.
15. —. *FIB Bulletin 102: Guide for protection and repair of concrete structures.* Lausanne : FIB.
16. **U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. PROTECTIVE DESIGN CENTER.** *PDC TR-08-06: User's guide for Component Explosive Damage Assessment Workbook (CEDAW v2).* Omaha, NE : U.S. Army Corps of Engineers, 2008.
17. **AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.** *ACI PRC-364.1-19: Guide for assessment of concrete structures before rehabilitation.* s.l. : ACI (American Concrete Institute), 2019.
18. —. *ACI CODE 562-21: Code requirements for assessment, repair, and rehabilitation of existing concrete structures and commentary.* s.l. : ACI (American Concrete Institute), 2021.
19. **FIB (INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE).** *FIB Bulletin 103: Guide for strengthening of concrete structures.* Lausanne : FIB.
20. —. *FIB Bulletin 17: Management, maintenance and strengthening of concrete structures.* Lausanne : FIB, 2002.
21. **AMERICAN CONCRETE INSTITUTE.** *ACI PRC-546-23: Concrete repair—Guide.* s.l. : ACI (American Concrete Institute), 2023.
22. **ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL (ACHE).** *Monografía M-33: Evaluación de estructuras de hormigón armado.* s.l. : ACHE, 2019.
23. **CALAVERA, J.** *Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón. 2ª edición.* Madrid : Ediciones INTEMAC, 2008.
24. **LEY, J. et Al.** *Evaluación de la capacidad resistente de estructuras de hormigón.* Madrid : Ediciones INTEMAC, 2001.
25. **Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.** *Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. Boletín Oficial del Estado.* s.l. : B.O.E., 10 de agosto de 2021.

26. **ASOCIACIÓN CIENTÍFICO-TÉCNICA DEL HORMIGÓN ESTRUCTURAL (ACHE)**. *Pruebas de carga de estructuras. Monografía M-09*. s.l. : ACHE, 2004.