

Estructuras de hormigón armado bajo carga dinámica severa. Parte I: Aspectos teóricos.

Alejandro Alañón Juárez. Ingeniero Técnico de Obras Públicas
Máster en Técnicas Experimentales Avanzadas en la Ingeniería Civil
Departamento de Construcción y Agronomía. E.P.S. de Ávila - USAL

Anastasio P. Santos Yanguas. Dr. Ingeniero de Minas
Departamento de Ingeniería de Materiales. E.T.S.I. de Minas – UPM

María Jesús Vázquez Gallo. Dra. Ciencias Matemáticas.
Departamento de Ingeniería Civil: Servicios Urbanos. E.U.I.T. de Obras
Públicas - UPM

Introducción

En el ámbito de las estructuras de protección, tales como polvorines o refugios de protección civil, el hormigón armado es el material más empleado, fundamentalmente por su masividad, sus buenas características de absorción de energía y, cuando está adecuadamente reforzado, por su comportamiento dúctil. En ambos tipos de estructuras, la principal amenaza proviene de las explosiones causadas por armas de guerra, en particular, por armas convencionales.

Por otro lado, en España viene actuando la organización terrorista ETA desde finales de los años 60, a lo que últimamente hay que añadir el denominado *terrorismo internacional*. En ambos casos, sus apariciones se manifiestan, generalmente, mediante la detonación de explosivos, aspecto que ha hecho que tanto entidades públicas como privadas hayan estado seriamente interesadas por el comportamiento de las estructuras cerramientos, etc.

A título de ejemplo, se puede recordar el atentado perpetrado el día 31 de diciembre de 2008 en la sede de EITB de Bilbao, o el perpetrado el día 9 de febrero de 2009 en la sede de la empresa constructora Ferrovial-Agroman situada en el Campo de las Naciones de Madrid.



Figura 2. Atentado en la sede de EITB de Bilbao



Figura 3. Atentado en la sede de Ferrovial-Agroman en el Campo de las Naciones de Madrid

La simulación numérica del comportamiento de una estructura frente a impactos y/o explosiones puede resultar una cuestión de gran interés, ya que permitiría racionalizar y ajustar el dimensionado de las estructuras o elementos que pudiesen ser susceptibles de soportar este tipo de situaciones, buscar sus puntos débiles, o, en el caso de estructuras o elementos ya construidos, prever su comportamiento.

Para entender el comportamiento de las estructuras de hormigón sometidas a una carga severa de armas de guerra, o de artefactos terroristas, conviene comprender la naturaleza y la física de las explosiones y la creación de una onda explosiva y sus reflexiones. Cuando una onda explosiva golpea la superficie de un elemento de hormigón, se produce una onda de choque que se propaga a través del hormigón. Hay, fundamentalmente, dos teorías para describir esta respuesta, los métodos euleriano y lagrangiano. En el tratamiento de la onda de choque con el método euleriano, se elige una referencia fija en el espacio y las propuestas de resolución se obtienen con respecto a esa región, la teoría de ondas de choque se basa en la conservación de la masa, el momento y la energía. En el tratamiento de la onda de choque con el método lagrangiano, con referencia en movimiento, la teoría de la onda de choque se basa en la ecuación clásica de onda del movimiento, donde se considera el equilibrio y la compatibilidad.

El fenómeno explosivo

Una explosión se caracteriza por un cambio físico o químico del material, donde de forma repentina se transforma toda la energía potencial almacenada en trabajo mecánico, con la creación de una onda explosiva y un potente sonido. El material explosivo puede reaccionar de dos formas: como deflagración o como detonación. La deflagración ocurre cuando la velocidad del cambio químico en el material se produce a una velocidad inferior a la del sonido, mientras que la detonación sucede con cambios químicos del material con rapidez superior a la velocidad sónica. En el caso de las armas de guerra, y en la generalidad de los explosivos más utilizados, es más habitual la detonación que la deflagración. Por ello, suele ser habitual entender por explosión la detonación del material explosivo, a menos que se indique expresamente lo contrario.

El rango de las velocidades de detonación van desde 6.500 a 8.500 m/s en la mayoría de los explosivos de alta energía. Durante la detonación se convierte el explosivo sólido o líquido en un gas a muy alta presión muy denso y caliente, y el volumen de este gas es la fuente de las fuertes ondas que choque en el aire. Las presiones inmediatamente después de la detonación están en el rango de 185.000.000 a 338.000.000 hPa. Solo alrededor de un tercio de la energía total de la mayoría de los materiales explosivos de alta energía se libera durante el proceso de detonación, los otros dos tercios se liberan más lentamente como mezcla de los productos de detonación con el aire y se queman. Este proceso de post-combustión sólo tiene un ligero efecto sobre las propiedades de la onda explosiva, ya que es mucho más lento que la detonación.

Los efectos de la explosión son una onda de choque conformada por un frente de choque de alta intensidad que se expande hacia el exterior de la superficie del explosivo en el aire circundante. A medida que la onda se expande, disminuye en su fuerza, se alarga su duración y disminuye su velocidad. Este fenómeno tiene su origen en la divergencia esférica, así como por el hecho que la reacción química se ha completado, a excepción de algunas post-combustiones asociadas a los productos de la explosión en caliente se queman en la atmósfera circundante.

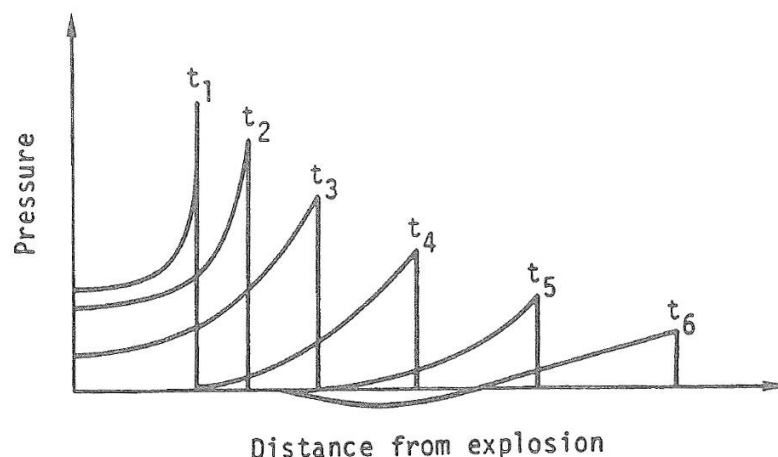


Figura 1. Variación de la presión máxima con la distancia para sucesivos instantes de tiempo [1]

Como la onda se expande en el aire, el frente incide en las estructuras situadas en su camino, y posteriormente toda la estructura quedará envuelta por las presiones de choque. La magnitud y distribución de las cargas de la explosión en la estructura que originan estas presiones están en función de los siguientes factores:

- propiedades del explosivo, es decir, tipo de material explosivo, cantidad de energía producida, y el peso del explosivo;
- la ubicación de la detonación en relación a las estructuras afectadas;
- magnitud y refuerzo de la presión por su interacción con el terreno, o la propia estructura.

Materiales explosivos

Los materiales explosivos se pueden clasificar de acuerdo con su estado físico: sólidos, líquidos o gaseosos. Los explosivos sólidos son principalmente explosivos de alta energía, si bien, también hay que tener en cuenta que hay productos químicos inflamables y propelentes que se pueden clasificar como materiales potencialmente explosivos. Los explosivos líquidos y gaseosos abarcan una amplia variedad de sustancias utilizadas en la fabricación de productos químicos, combustibles y propelentes. El entorno de presión originado por una explosión no solo varía entre los diferentes materiales, también puede ser diferente para un material dado: factores tales como los métodos y/o procedimientos de fabricación, almacenamiento y manipulación, además de las características específicas físicas y químicas, pueden alterar los efectos de un material explosivo.

Los efectos de los materiales sólidos son los más conocidos, fundamentalmente en el caso de los explosivos de alta energía. Las presiones de explosión, los impulsos, la duración, y otros efectos de la explosión se han estudiado de forma amplia.

A diferencia de los explosivos de alta energía, hay otros materiales sólidos, líquidos o gaseosos que pueden tener variaciones en la producción de presión por su explosión. En muchos casos, la explosión de estos materiales la origina una porción de la masa total del mismo, el resto de la masa se consume por la deflagración, resultando que se libera una gran cantidad de energía térmica que, a su vez, puede provocar incendios o daños por radiación térmica.

Equivalente de TNT

La mayor parte de los datos disponibles corresponden a explosiones de cargas de TNT sin carcasa. Estos datos se pueden ampliar para incluir otros materiales con masa potencialmente detonante mediante la energía explosiva del “peso efectivo de carga” de estos materiales respecto a su peso equivalente de TNT. Además de la energía explosiva existen otros factores que pueden afectar al equivalente de TNT, tales como: forma del material (plano, cuadrado, redondo, etc.), el número de elementos explosivos, y el confinamiento del explosivo (carcasa, contenedor, etc.).

Para la determinación de los parámetros de la explosión, la energía explosiva de un material genérico al TNT pueden ser expresados como una función del calor de la detonación de los distintos materiales, mediante la expresión [2]:

$$W_E = \frac{H_{EXP}^d}{H_{TNT}^d} \cdot W_{EXP}$$

donde:

W_E = peso efectivo de la carga,

W_{EXP} = peso del explosivo genérico,

H_{EXP}^d = calor de detonación del explosivo genérico,

H_{TNT}^d = calor de detonación del TNT.

El calor de detonación de algunos de los explosivos más comúnmente empleados se muestran en la Tabla 1.

Explosivo	Densidad – ρ_{\max} (g/cm ³)	Velocidad de detonación (m/s)	Calor de explosión (kJ/g)
AN (Amon./Nit.)	1,73	8.510	1,59
Ciclonita (RDX)	1,76 - 1,80	8.700 - 8.750	5,13 - 6,19
Composición C-4	1,59	8.040	5,86
Nitrocelulosa	1,66	7.300	10,60
Nitroglicerina	1,60	7.580	6,30
Nitrometano	1,13	6.290	6,40
Pentolita (50/50)	1,70	7.530	5,86
Pentrita (PETN)	1,77	7.980 - 8.260	6,12 - 6,32
Trinitrotolueno (TNT)	1,64	6.950	4,10 - 4,55

Tabla 1. Propiedades características de explosivos comunes [3]

La prueba más utilizada para determinar la potencia de un explosivo consiste en explosionar la carga dentro de un bloque de plomo de dimensiones estandarizadas (bloque de Taruzl), y medir el volumen de la cavidad creada dentro de su interior. Resulta posible establecer una correlación entre la potencia del explosivo y la de otro explosivo patrón al que se asocia convenientemente una potencia igual a 100, si bien, tanto en el ámbito militar como en el civil, es más común definir la carga explosiva en peso equivalente respecto al TNT.

El fenómeno de la onda explosiva

En una detonación se convierte el material explosivo en un gas a muy alta presión y temperatura mediante una violenta liberación de energía. En la atmósfera se propaga de forma radial un frente de presión asociado con el gas a alta presión como una fuerte onda de choque, impulsado y apoyado por los gases calientes. Este frente de choque, denominado onda explosiva, se caracteriza por un aumento casi instantáneo de la presión atmosférica a una presión incidente máxima (o sobrepresión estática), P_{so} (ver Figura 4).

Este incremento de presión, o frente de choque, se mueve radialmente desde el punto en que se produce la explosión con una velocidad de choque U que va disminuyendo conforme avanza. Las moléculas de gas detrás del frente se mueven a velocidades de flujo inferiores, denominadas velocidades de partículas u , que están asociadas con las presiones dinámicas, cuyos valores máximos se denominan q_0' . Dado que el frente de choque se expande en volúmenes del medio cada vez mayores, el valor máximo de la presión incidente del frente disminuye paulatinamente, incrementándose la duración de las presiones. En la Figura 5 se muestra la variación de los parámetros comentados.

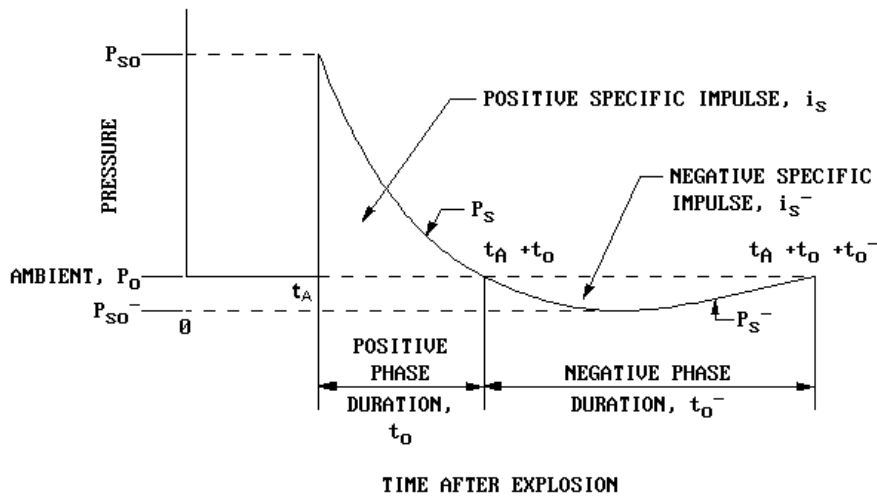


Figura 4. Gráfica presión-tiempo en una explosión aérea [2]

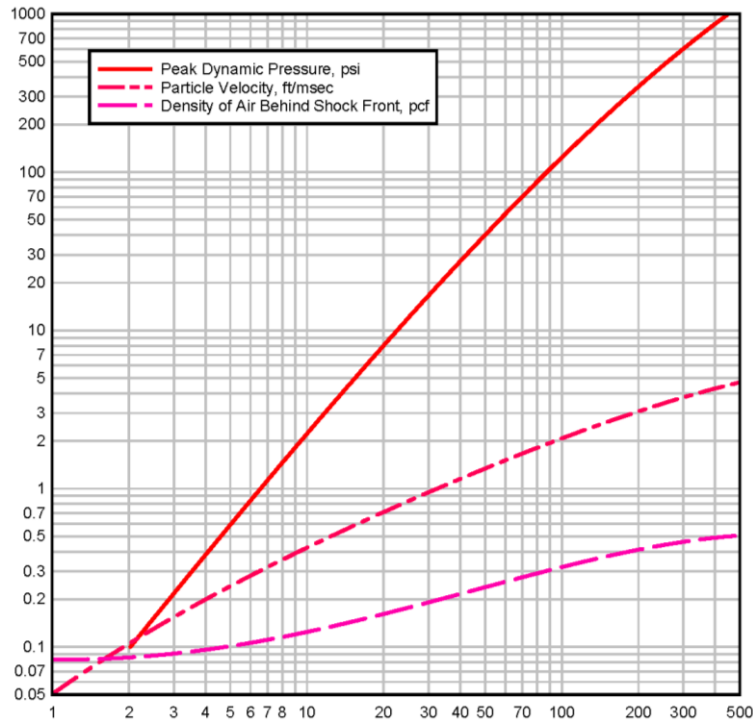


Figura 5. Presión incidente máxima frente a presión dinámica máxima, densidad del aire tras el frente de choque, y velocidad de las partículas [2]

El frente de choque alcanza una ubicación dada en un tiempo t_A y, después de alcanzarse el valor máximo o de pico P_{so} , la presión incidente decae hasta el valor ambiental en el tiempo que delimita la duración de la fase positiva. A continuación se inicia la fase negativa con una duración t_o^- , que generalmente es mucho más prolongada que la fase positiva y se caracteriza por tener una presión por debajo de la atmosférica, de valor máximo P_{so}^- , así como una reversión de la corriente de partículas. La fase negativa es generalmente menos importante que la fase positiva, y su amplitud P_s^- debe ser menor que la presión atmosférica P_o en todos los casos. La densidad del impulso incidente asociada con la onda explosiva es el área bajo la curva presión-tiempo y se denomina i_s para la fase positiva, e i_s^- para la fase negativa.

En el análisis de estructuras puede ser necesario un parámetro adicional de la onda explosiva, que es la longitud de onda. La longitud de onda positiva L_w^+ es esa longitud a una distancia de la detonación que, en un determinado instante de tiempo, está experimentando presión positiva. La longitud de onda negativa L_w^- se define de forma análoga, para las presiones negativas.

Tipos de explosiones

Las explosiones pueden dividirse en dos grandes grupos en función de su confinamiento: explosiones confinadas o sin confinar; pudiéndose subdividir basándose en si la explosión se produce dentro de la estructura donante, o actuando sobre una estructura receptora. Estos tipos se muestran en la Figura 6 y Tabla 2, donde pueden observarse que existen hasta seis posibles categorías, también se muestran las cinco probables cargas de presión asociadas a los tipos de explosiones, la ubicación de la carga explosiva que produciría estas cargas de presión, y las estructuras sometidas a las citadas cargas.

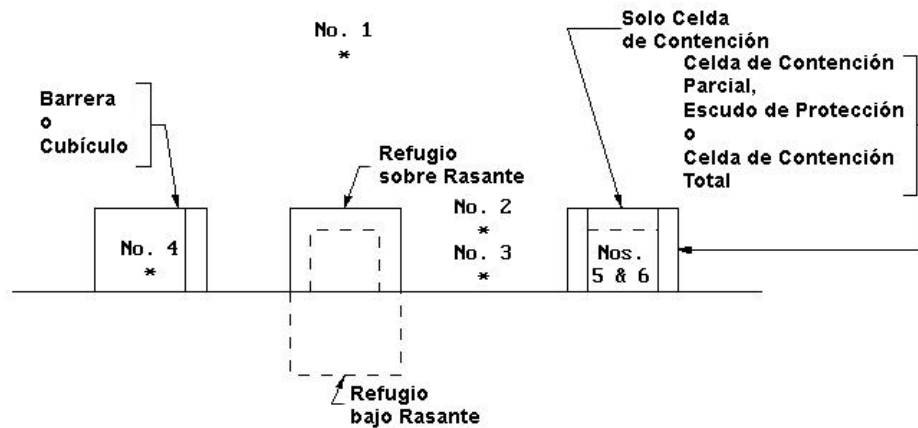


Figura 6. Tipos de explosiones [2]

Confinamiento de la Carga	Tipo de Explosión	Cargas de Presión	Tipo de Estructura
Explosiones sin Confinar	Explosión aérea libre Explosión aérea Explosión en superficie	Sin reflexión Con reflexión Con reflexión	Refugio
Explosiones Confinadas	Totalmente ventilada	Impacto interior Fugas	Recinto
	Parcialmente confinada	Impacto interior Gases interiores Fugas	Celda de contención parcial o Escudo de protección
	Totalmente confinada	Impacto interior Gases interiores	Celda de contención total

Tabla 2. Tipos de explosiones [2]

Explosiones sin confinar

Explosión aérea libre

Las cargas explosivas actúan sobre una estructura como una *explosión aérea libre* cuando la detonación se produce de forma próxima y a una altura superior a la de la citada estructura, de tal forma que la onda de choque inicial no sufre ninguna amplificación antes de impactar contra la estructura (Figura 7.a).

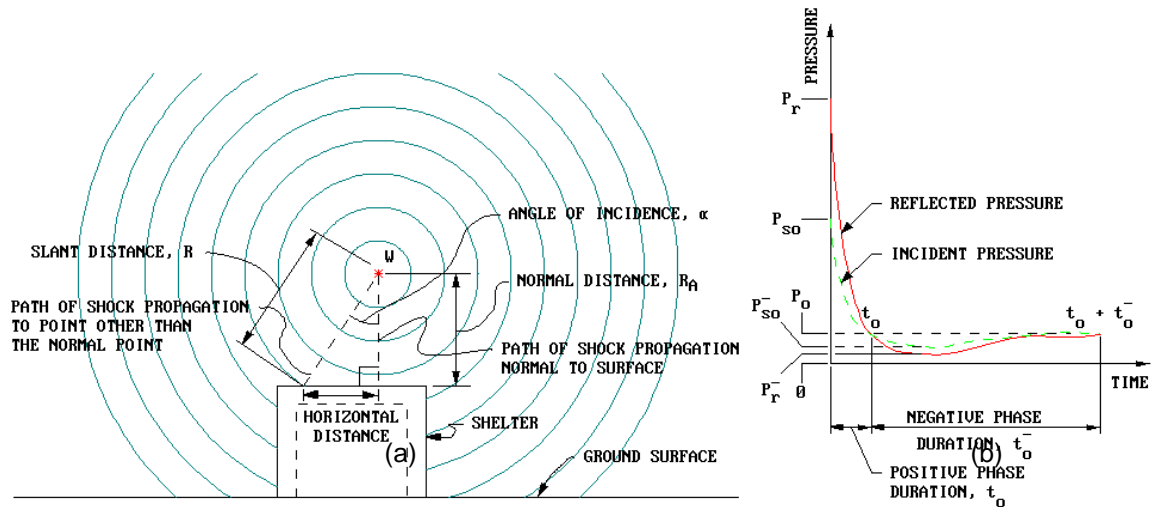


Figura 7. Explosión aérea libre: (a) Entorno de la explosión; (b) Variación de la curva presión-tiempo [2]

La onda incidente en su desplazamiento radial desde el centro de la explosión impactará contra la estructura, originándose su reforzamiento por la reflexión (Figura 7.b). Cuando la onda de choque incide sobre una superficie orientada de forma perpendicular a su dirección se provocan las máximas presiones e impulsos reflejados. La Figura 8 muestra las relaciones entre las presiones reflejadas normales y las presiones incidentes como una función de las presiones incidentes.

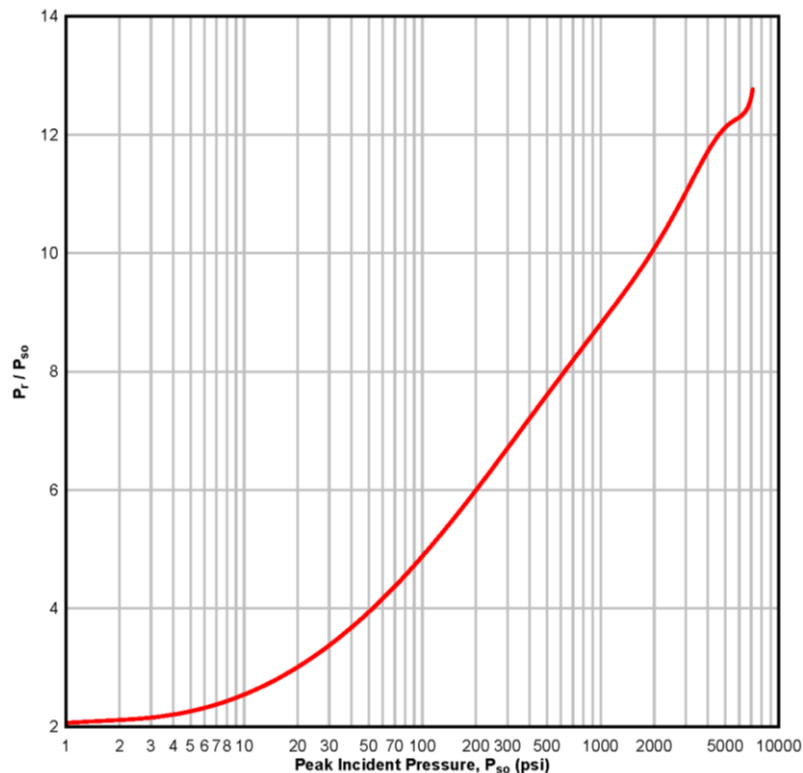


Figura 8. Presión incidente máxima frente a la presión reflejada perpendicular / presión incidente, para una explosión aérea libre [4]

Explosión aérea

Se denomina *explosión aérea* a la ocasionada por encima de la superficie del suelo y a suficiente distancia de una estructura para que la onda de choque inicial pueda incidir sobre la superficie del terreno antes del impacto contra la mencionada estructura. A medida que la onda de choque se propaga por encima de la superficie del terreno se forma el denominado frente de Mach (Figura 9) por la interacción de la onda inicial (onda incidente) y la onda reflejada, siendo esta última el resultado del fortalecimiento de la onda incidente por su reflexión en la superficie del suelo.

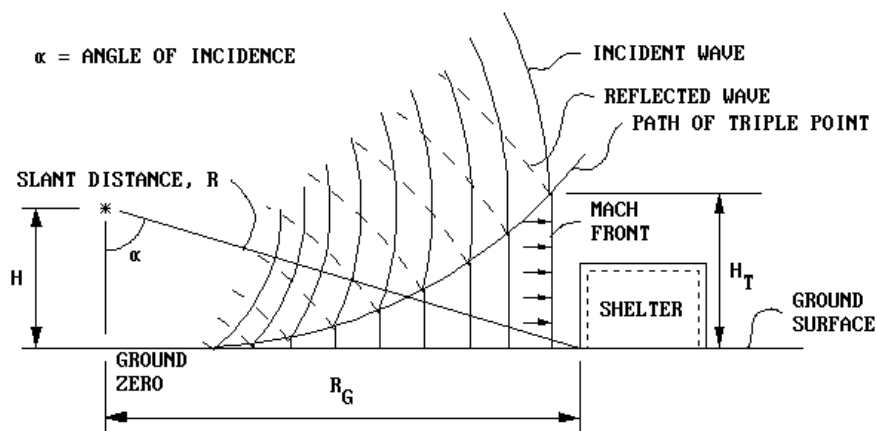


Figura 9. Entorno de una explosión aérea [2]

En la zona superior del frente de Mach se producen algunas variaciones de las presiones, pero a efectos de diseño, esta variación puede ser obviada y considerarse el frente de choque como una onda plana en toda la altura del frente. Los parámetros de la explosión en el frente de Mach se calculan a la altura del suelo. La variación de la presión-tiempo en el frente de Mach (Figura 10.a) es similar a la de la onda incidente, salvo que la magnitud de los parámetros de la explosión son un poco superiores.

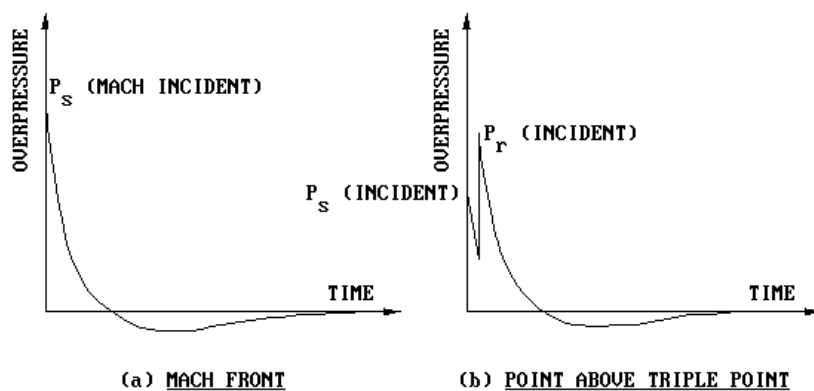


Figura 10. Variación presión-tiempo en una explosión aérea [2]

La altura del frente de Mach aumenta a medida que la onda se propaga desde el centro de la detonación. Este aumento en la altura del frente se denomina como el *camino del punto triple*, y se forma por la intersección de la onda inicial, onda reflejada y frente de Mach. Se considera que una estructura soporta una onda plana (presión uniforme) cuando la altura del punto triple supera la altura de la estructura.

Explosión en superficie

Una carga situada sobre la superficie del terreno, o muy cerca de ella, ocasiona una explosión superficial en la que la onda inicial se refleja y se refuerza por la superficie del terreno para producir la onda reflejada. A diferencia de la explosión aérea, la onda reflejada se combina con la onda incidente en el punto de la detonación, formando una onda única similar en su naturaleza a un frente de Mach de una explosión aérea, pero esencialmente semiesférica (Figura 11).

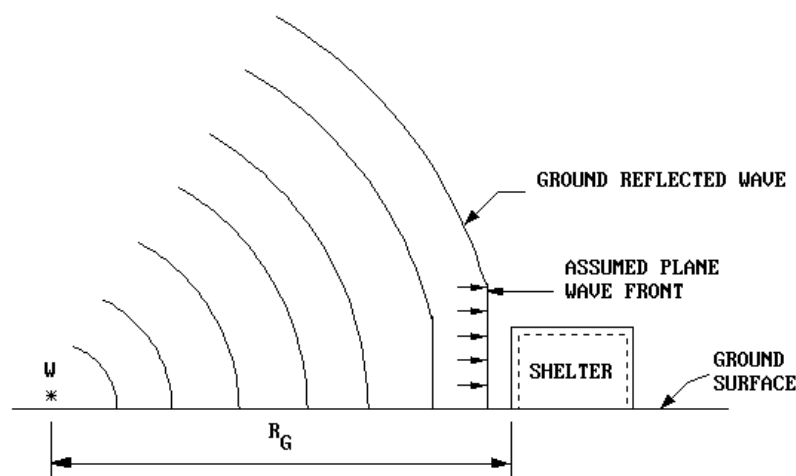


Figura 11. Entorno en una explosión en superficie [2]

Explosiones confinadas

Efectos del confinamiento

Cuando una explosión se produce dentro de una estructura el valor máximo (pico) de las presiones asociadas con el frente de choque inicial será extremadamente alto y, a su vez, las presiones van a verse amplificadas por sus reflexiones dentro del recinto de la estructura. Además, y dependiendo del grado de confinamiento, las altas temperaturas y la acumulación de productos gaseosos producidos por el proceso de químico implicado en la explosión ejercen presiones adicionales e incrementan la duración de la carga dentro de la estructura. Los efectos combinados de estas presiones eventualmente pueden dañar la estructura, a menos que la estructura esté específicamente diseñada para soportarlas. Es posible diseñar elementos de ventilación para que se reduzcan la magnitud de estas presiones, así como su duración.

El uso de estructuras tipo recinto (Figura 12.a) u otras barreras similares con una o más superficies suficientemente frágiles o abiertas a la atmósfera proporcionará algún grado de ventilación en función del tamaño de la apertura. Este tipo de estructuras permitirán que la onda explosiva de una

detonación interior se extienda por el entorno exterior, y por tanto, se reduzcan considerablemente la magnitud y la duración de las presiones internas. Las presiones exteriores muy a menudo se conocen como las "*presiones de fuga*", mientras que las presiones reflejadas y reforzadas en el interior de la estructura se denominan "*presiones de choque*" internas. Las presiones asociadas con la acumulación de los productos gaseosos y aumento de temperatura se identifican como las "*presiones de gas*". Para el diseño de estructuras tipo recinto, cuando puedan considerarse completamente ventiladas es posible obviar los efectos de las presiones de gas.

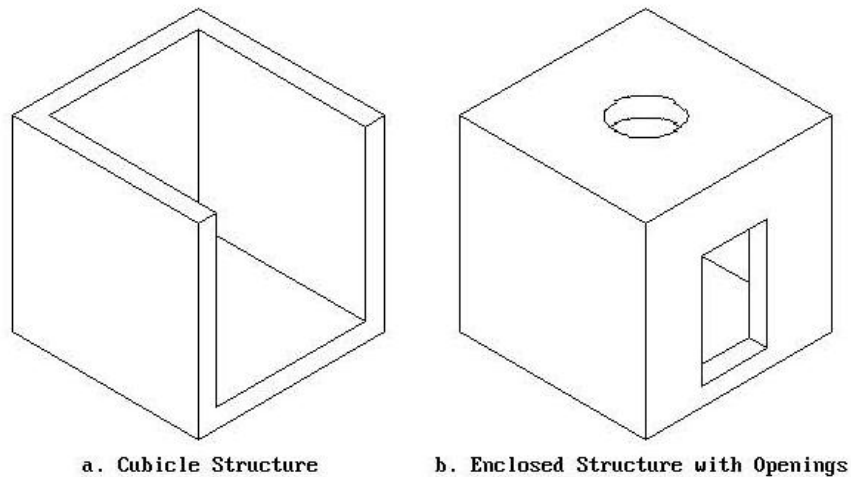


Figura 12. Estructuras con explosión confinada [2]

Una explosión en una estructura cerrada con aberturas relativamente pequeñas (Figura 12.b) está asociada con presiones de choque y de gas cercanas a las magnitudes máximas posibles. La duración de la presión del gas y, por lo tanto, el impulso de la presión de gas son una función del tamaño de la apertura. Cabe señalar que la aparición de la presión de gas no coincide necesariamente con el comienzo de la presión de choque, además, tiene una duración finita de tiempo después de alcanzar su valor máximo, sin embargo, estos tiempos son muy pequeños y, para el diseño de las estructuras con un alto grado de confinamiento, pueden ser tratadas como instantáneas.

Bibliografía

- [1] ASCE – American Society of Civil Engineers (1985). *Design of Structure to Resist Nuclear Weapons Effects*. **ASCE - Manual and Reports on Engineers Practice no. 42**.
- [2] U.S. Army – Department of Defense (2008). UNIFIED FACILITIES CRITERIA (UFC 3-340-02). *Structure to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Department of Defense of United States of America.
- [3] Gobierno de España – Ministerio de la Presidencia (2010). *Reglamento de artículos pirotécnicos y cartuchería*. Real Decreto 563/2010, de 7 de mayo.

- [4] Krauthammer T. (2008): *Modern Protective Structures, Design, Analysis and Evaluation*. Taylor & Francis Group. Florida.