

# COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS ANTE ONDAS DE CHOQUE

ORIGINADAS EN EXPLOSION

Un enfoque para suscripción  
y atención del reclamo

**EN ESTE NUMERO:**

**COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS ANTE  
ONDAS DE CHOQUE  
ORIGINADAS EN EXPLOSION  
UN ENFOQUE PARA SUSCRIPCION Y ATENCION DEL RECLAMO**

**COMPORTAMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS ANTE ONDAS DE CHOQUE  
ORIGINADAS EN EXPLOSION  
UN ENFOQUE PARA SUSCRIPCION Y ATENCION DEL RECLAMO**

El interés y la investigación por la interacción entre la onda de choque y estructuras aumente debido a diversos factores, entre los que ha destacado la actividad terrorista se ha convertido en elemento de básico estudio al momento de suscribir coberturas destinadas a proteger bienes esenciales o estratégicos y consecuentemente al evaluar las consecuencias o efectos al momento de ajustar las pérdidas generadas.

El estudio de la onda de choque y su interacción con estructuras es un problema multidisciplinario en el cual se ven envueltos los siguientes fenómenos físicos: análisis dinámico estructural, comportamiento del material, física de la onda de choque, y balística.

Dado lo anterior, en el diseño estructural, para predecir el comportamiento real de las estructuras bajo la carga de la onda de choque, se hace uso de herramientas avanzadas tanto analíticas como numéricas las cuales pueden tomar en cuenta la complejidad de la estructura, su geometría y el ambiente circundante (potenciales amenazas directas provenientes del entorno) y de otra, las vinculadas con intereses-objetivo de índole pseudo militar (terrorismo).

Por ello la evaluación PRE y POST (antes de la suscripción y luego de la afectación), habrán de incluir, diversos elementos de estudio, pues una cosa es proyectar una estructura a ser construida, otra, la estructura ya en operación y finalmente, la estructura afectada por la onda de choque. Entre dichos estudios o evaluaciones habrán de considerarse factores como el comportamiento de la onda de choque, su interacción con la estructura, las cargas ejercidas sobre los elementos construidos en proceso de construcción, la mecánica del comportamiento de los materiales que conforman el diseño previsto o final de la estructura sometida a impacto, etc.

## EL FENOMENO DE LA EXPLOSION

Una explosión es el resultado de una liberación extremadamente rápida de energía proveniente de un espacio reducido en un lapso de tiempo muy corto. Las explosiones pueden ser categorizadas según sea su naturaleza ya sea física, química o nuclear. [Nos concentraremos en las dos primeras por razones provenientes de nuestros clausulados vinculados con las exclusiones en relación con cualquier tipo de reacción Nuclear]

**EXPLOSION FISICA:** es causada por fenómenos mecánicos como por ejemplo: una falla en un tanque con gas comprimido, una erupción Volcánica o incluso mezclando dos líquidos a diferentes temperaturas. (En nuestro análisis queda excluido el fenómeno de la erupción volcánica, en virtud del principio de causa primera de la pérdida, vinculada a una cobertura de catástrofe)

**EXPLOSION QUIMICA:** puede ser causada por la conversión extremadamente rápida de un compuesto sólido o líquido a un gas con alta temperatura, debido a la rápida oxidación de los átomos de hidrógeno y carbono, generando un mayor volumen que la sustancia que generó el fenómeno.

**NOTA:** El término detonación se refiere a un proceso de combustión supersónica que implica la existencia de una onda expansiva y una zona de reacción detrás de ella. La velocidad de una detonación varía entre [5.000, 8.000] m/s para la mayoría de materiales explosivos. La presión tras la detonación se incrementa rápidamente en un rango de [18.000, 35.000] MPa. En este fenómeno solo una tercera parte de la energía química de la mayoría de los materiales explosivos se libera en el proceso. [Tomado de notas del US-Army]

Dado que los elementos explosivos son variados, la explosión tendrá efectos variables dependiendo de la cantidad, la distancia del punto de detonación, la clase de explosivo y por supuesto los obstáculos del frente de onda ante la estructura (no será lo mismo en efecto partiendo del exterior del edificio que otro localizado al interior de la estructura). Y como la explosión es el resultado de una liberación súbita de energía en un espacio muy reducido, debido a la reacción química de sus componentes y es independiente del oxígeno atmosférico, implicando la producción de grandes cantidades de gas a altísima temperatura. Su expansión produce una onda de presión en el aire y a medida que se desplaza, la parte interna que se desplaza hacia el sector comprimido se calienta y se incrementa la presión, formando un frente de onda que puede llegar a desplazarse a varias veces la velocidad del sonido.

El valor del frente de onda alcanza un valor pico, hacia atrás la presión es menor y a medida que se produce la expansión, si no hay obstáculos que se interpongan, la sobrepresión en el frente de onda también disminuye.

Eventualmente pueden presentarse zonas de succión que generan efectos paradójicos como los de puertas o ventanas desprendidas en dirección al sitio de la explosión.

Cuando la onda en avance encuentra un obstáculo (p. ej. una pared), el aire se acumula ante ella y la presión instantánea es mucho mayor a la presión incidente; los elementos frágiles (p. ej. vidrios) se rompen inmediatamente, pero los daños a las estructuras dependen de sus características constructivas, pues si son, por ejemplo, muy flexibles (Alto Período de Vibración Natural) la presión puede bajar a cero antes de producir daños.

Cuando la explosión ocurre en el interior de la estructura, existe mucha reflexión, aunque pisos o paredes hayan fallado, prolongando la duración de las grandes presiones, tratando de igualarlas en todo el recinto.

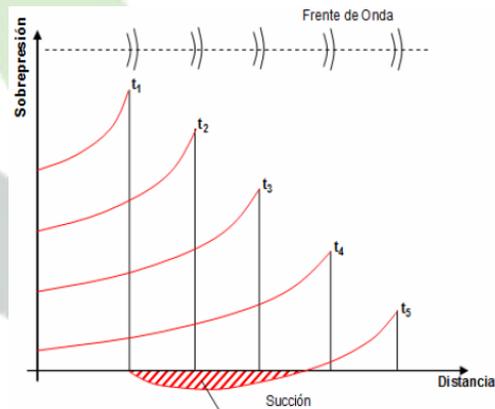
Por ello, unos pocos kilos de explosivo (TNT ó ANFO, p. ej.) pueden llegar a producir efectos de empuje mayores a 1 Tn/m<sup>2</sup> destruyendo estructuras de concreto, con facilidad.

Las explosiones de gases inflamables son de características distintas, pues sí requieren de oxígeno y como generalmente están más dispersos, es necesario que el frente inflamado recorra más espacio antes de quemarse totalmente. El proceso toma más tiempo y genera temperaturas menores, la velocidad de las ondas depende de la mezcla pero generalmente es inferior a la velocidad del sonido y las presiones sobre las estructuras son más uniformes.

Debido a ello, en los actos terroristas es común el uso de explosivos sólidos, pues ejercen presiones dinámicas sobre las estructuras, que añadido a la multiplicidad de variables que pueden presentarse, hacen casi imposible prever un efecto máximo resultante de afectación, calculado previamente (PML).

En consideración a todos estos aspectos, al analizar un siniestro por explosión, se busca establecer la equivalencia entre el tipo y masa del explosivo usado y la cantidad equivalente en TNT que produciría el mismo resultado, sobre los que se conocen parámetros más o menos aceptables de energía y sobrepresión, altura de la bola de fuego y radio máximo, permitiendo determinar más fácilmente la reflexión del frente de onda al chocar con obstáculos. Generalmente, diagramas de estos efectos coadyuvan a entender la magnitud de las pérdidas sufridas y la potencialidad de la afectación estructural, que dicho sea de paso, también depende de la calidad de la misma para resistir esfuerzos horizontales (Caso de adecuación a Normas de Construcción Vigentes).

**Curiosamente, sufre menos la estructura, cuanto mayor son los daños a los acabados, por la dispersión que éstos permiten a las ondas de presión.**



SOBREPRESION A DIFERENTES DISTANCIAS Y TIEMPOS

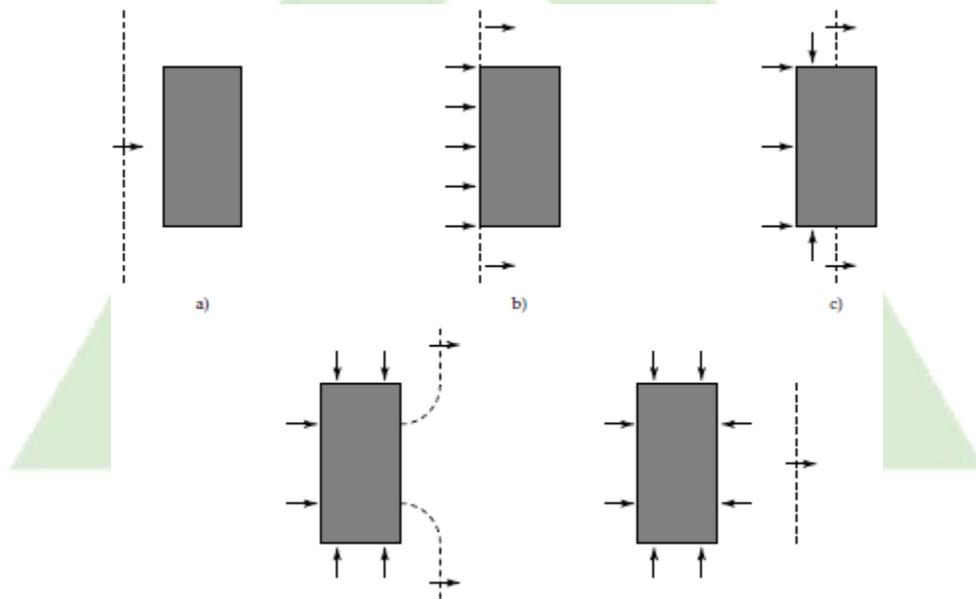
Algunos factores que pueden resultar relevante en los análisis PRE y POST (Suscripción – Reclamo) están referidos a específicas evaluaciones que deberían ser adelantadas por expertos (desde el punto de vista de cálculos) están relacionados con las PROPIEDADES DE LA ONDA DE CHOQUE IDEAL, pero que también son útiles al suscribir una póliza o evaluar el reclamo; encontramos entre ellas, las denominadas **RELACIONES RANKINE-HUGONIOT**, que son las vinculada con la conservación de la masa, energía y momento a través de un frente de choque. Naturalmente, está más allá de éste R&CA su implicancia matemática, pero es útil como demostrativo de observación y estimación del riesgo:

- Velocidad del Frente de Choque** (aquí simplemente digamos que se vincula la velocidad del elemento que detona, para ser comparada con la velocidad del sonido [Mach]; por tanto es importante saber del elemento en cuestión.
- Velocidad de las partículas** que vincula la máxima velocidad de viento detrás del frente de choque.
- Densidad** del aire detrás del frente de choque (densidad ambiental)
- Presión Dinámica** que es la energía cinética por unidad de volumen del aire inmediatamente detrás del frente de choque; esta cantidad tiene la misma dimensión que la presión.
- Presión Reflejada.** Entendida como la onda de choque que golpea una superficie plana (una estructura), de una forma normal (Perpendicular), que instantáneamente alcanza una sobre presión (mayor fuerza de impacto).
- Impulso.** Este factor toma en cuenta la duración de la fase positiva y la variación de la sobre presión en el tiempo. El impulso (por unidad de área) puede ser definido como el área bajo la curva de la variación de la sobre presión en el tiempo.

Finalmente, de igual forma es clave tener en cuenta que un elemento explosivo no afecte estructuras de muros portantes por la mayor probabilidad de colapso que ello puede implicar.

Así, al analizar el siniestro, es importante, para determinar los efectos causados y las posibles reparaciones a las que debe someterse la estructura, se tengan en cuenta elementos, como:

- Difracción.** Cuando el frente de la onda de choque golpea la cara de una estructura, el fenómeno de difracción ocurre. [A continuación se ilustran los diferentes estados de este fenómeno a partir del arribo del frente hasta que la estructura es completamente envuelta en un campos de presión]



Estados en la difracción de la onda de choque.  
La línea punteada representa el frente de choque

Como resultado el valor de la sobre presión aumenta rápidamente por lo menos al doble (generalmente es mucho más) que la presión incidente. La presión alcanzada está en función de la sobre presión de la onda de choque incidente y del ángulo de incidencia del frente de choque y la cara de la estructura, a esta presión se le denomina **Presión Reflejada**

El cambio de presión se debe a la conversión de energía cinética del aire detrás del frente en energía interna, debido a que el rápido movimiento detrás de la onda es bruscamente desacelerado al entrar en contacto con la cara de la estructura.

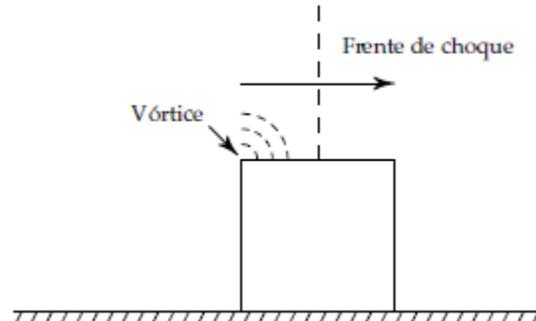
- Presión Dinámica.** Durante la fase positiva (y un corto tiempo después), la estructura estará sujeta a la presión dinámica (arrastre),  $q$ , debido al viento en movimiento detrás de la onda de choque.

La carga de arrastre persiste mayor tiempo que la carga de difracción.

- c. **Cargas.** La carga debido a la interacción de la onda de choque, está en función de las características de la onda de choque incidente (máxima sobre presión, presión dinámica y duración) y las características geométricas del objeto (dimensiones, forma y orientación).

Para obtener una idea general de cómo se caracterizan las cargas en un objeto, se analizará un cubo el cual es alcanzado por una onda de choque por la parte frontal (normal a la dirección de propagación).

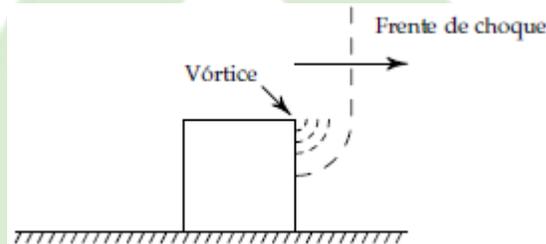
Cuando la onda de choque alcanza la cara frontal, se presenta la reflexión, la cual puede ser de dos a ocho veces más grande que la sobre presión de incidencia.



*Onda de choque moviéndose por las caras laterales y superior.  
En éste caso, la formación de un vórtice en la esquina superior izquierda de la Estructura*

La onda de choque cubre las caras laterales, superior y trasera, el objeto es envuelto en un campo de alta presión la cual decae al transcurrir el tiempo hasta alcanzar la presión atmosférica. La presión reflejada que actúa sobre la cara frontal del objeto, es mayor en comparación a la presión ejercida en las caras laterales, superior y trasera.

La presión reflejada no puede ser mantenida y decae rápidamente hasta la presión de estancamiento, la cual es la suma de la sobre presión y la presión dinámica.

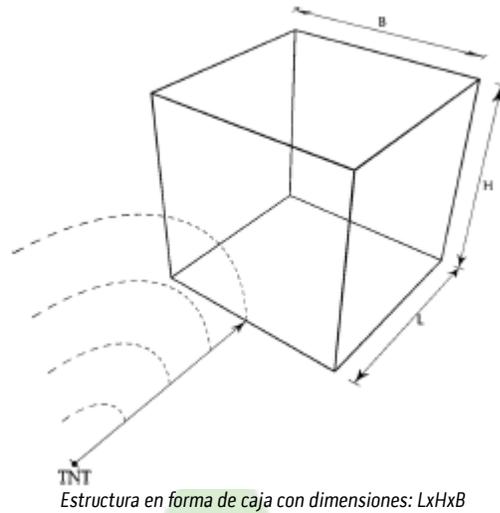


*Onda de choque moviéndose por la cara trasera de la estructura*

La presión en las demás caras alcanza la sobre presión incidente cuando el frente de choque alcanza los puntos en cuestión. Después se presenta un periodo de baja presión el cual es causado por la formación de un vórtice en el borde frontal del objeto. Cuando el vórtice termina, la presión regresa a la presión de incidencia la cual decae al pasar el tiempo.

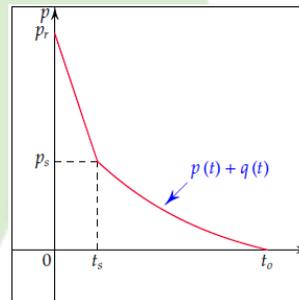
El flujo de aire causa una disminución en la carga en las caras laterales y superior debido a que la presión de arrastre tiene un valor negativo. Cuando la onda de choque alcanza la cara posterior del objeto, se difracta alrededor de los bordes y baja recorriendo la parte trasera de éste alrededor de los bordes y baja recorriendo la parte trasera de éste.

- d. **Estructura en Forma de Caja.** Una estructura en forma de caja puede ser representada como un Paralelepípedo. Por simplicidad se asume que los muros de la estructura no cuentan con aperturas (puertas o ventanas). La presión en el interior se considera que permanece alrededor de la presión atmosférica. En la Figura siguiente se muestra la estructura y se considera que una de las caras apunta hacia la detonación y que es perpendicular a la dirección de propagación de la onda de choque.



En ésta concepción simplista, se observa que:

1. Existe una distribución de presiones (**p** incidente y **q** dinámica en el tiempo **t**) sobre la cara frontal:



2. Las caras laterales y superior no son completamente cargadas hasta que la onda de choque viaja la distancia, L.
3. La cara trasera queda sometida a una sobrepresión que depende del tiempo de llegada de la onda y las dimensiones del "cubo"

En resumen, cada tipo de bien expuesto depende de ciertas caracterizaciones, habiéndonos centrado aquí en una de ellas, pero también mantienen una alta dependencia del tipo de detonaciones causantes de los daños que se reclamen.

### ANÁLISIS DEL RECLAMO POR EXPLOSION [provocada por acción humana]

Al analizar el siniestro, es importante entonces, para determinar los efectos causados y las posibles reparaciones a las que debe someterse la estructura, se tengan elementos como:

- 1o Identificar el sitio en el cual se colocó el artefacto explosivo.
- 2o Procurar establecer el recorrido de la onda explosiva; establecer acciones positivas, negativas y laterales de las ondas y relacionarlas con agrietamientos (Si se debe intervenir la estructura es menester comprender lo que sufrió, así como el sentido de las fuerzas, pues éstas consideraciones, usualmente conducen a otros descubrimientos).
- 3o En estos caso, como en los incendios, si no hay manifestaciones exteriores, usualmente no hay daños, pero no se deben menospreciar las fisuras, su disposición y tamaño pueden justificar estudios más profundos, como el ultra sonido.
- 4o Las posibles soluciones de restitución funcional, pueden incluir:
  - a. No intervenir, debido a que los daños son menores
  - b. Aplicar inyecciones de resina epóxica
  - c. Demoler la zona afectada y reconstruirla
  - d. Una combinación de varias de las anteriores
- 5o Recomendar un proceso de seguimiento, con la presencia de Interventoría
- 6o Si se requiere el Reforzamiento Estructural, las condiciones de indemnización deben ser meridianamente claras en el sentido de que se apliquen sobre elementos afectados por el siniestro, o acorde a como esté establecido el alcance de dicha cobertura.

**Nos gustaría conocer su opinión sobre el contenido de ésta Edición y su contenido, no sin antes aclarar que en próximas ediciones podremos estar considerando temas vinculados con el tratado aquí, complementándolo con sus importantes sugerencias sobre éste u otros aspectos que considere de interés**

