

## MODELACIÓN DE PLACAS COMPUESTAS SOMETIDAS A CARGAS EXPLOSIVAS LOCALIZADAS

**Fernanda de Borbón<sup>a,b</sup> y Daniel Ambrosini<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Grupo de Dinámica Experimental, Universidad Nacional de Cuyo, Ciudad Universitaria,  
5500 Mendoza, Argentina, fdeborbon@fing.uncu.edu.ar*

<sup>b</sup>*CONICET, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas*

**Palabras Clave:** Placas compuestas, cargas explosivas localizadas, modelo numérico.

**Resumen.** En los últimos años, las cargas explosivas sobre estructuras han adquirido una importancia relevante debido a eventos de índole accidental o intencional. Por lo tanto, los materiales que puedan servir de protección a dichas estructuras también son tema de estudio. En este trabajo se presenta un estudio numérico - experimental de la respuesta dinámica de placas compuestas de aluminio/epoxi sometidas a cargas explosivas localizadas. Las placas son cuadradas de 150 mm de lado compuestas por aluminio y resina epoxi de 2 mm de espesor. La resina epoxi es utilizada debido a su buena rigidez, resistencia específica, estabilidad dimensional y resistencia química. Se utiliza un explosivo plástico (PE4) en forma de disco para impartir una carga impulsiva localizada a la placa compuesta. La masa de explosivo varía para proveer un rango de respuesta de los paneles que vaya desde la deformación a la rotura. El estudio numérico es llevado a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS/AUTODYN. La deformación y/o rotura de las placas es utilizada para validar el modelo numérico. Se obtiene buena correlación entre resultados numéricos y experimentales.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años han ocurrido diversos eventos accidentales o intencionales relacionados con explosivos. Es por esta razón, que el estudio de estructuras o materiales que puedan paliar los daños producidos por las explosiones ha recibido considerable atención. Las cargas explosivas son un tipo de cargas impulsivas de muy corta duración. Debido a las altas tasas de deformación, los materiales se ven afectados en su resistencia, ductilidad y modos de falla.

Una explosión se define como una liberación de energía en forma instantánea la cual usualmente genera altas temperaturas y liberación de gases. Históricamente, el análisis de las explosiones ha sido llevado a cabo con métodos analíticos simplificados (Baker et al., 1983; Kinney y Graham, 1985; Smith y Hetherington, 1994). Sin embargo, las técnicas simplificadas no pueden representar adecuadamente o ignoran la reflexiones generadas por la onda de presión, el efecto *match*, la fase negativa de la onda de presión, etc. y por lo tanto, no pueden utilizarse para evaluar adecuadamente las presiones o el impulso (Smith y Rose, 2002). El avance tecnológico de las computadoras, tanto hardware como software, ha posibilitado estudiar y modelar fenómenos complejos y junto con el desarrollo de hidrocódigos adecuados, hoy en día se cuentan con todas las herramientas para obtener un análisis numérico confiable.

La respuesta de placas metálicas totalmente empotradas bajo cargas explosivas uniformes ha sido estudiada por años y por lo tanto, se han reportado numerosos trabajos experimentales en vigas, placas y cáscaras (Nurick y Martin, 1989). Teeling y Nurick (1991) investigaron la falla de placas circulares bajo cargas explosivas uniforme. Reportaron que la deformación del punto medio de la placa aumentaba a medida que el impulso aumentaba, y como resultado se adelgazaba el contorno de la placa. Un impulso superior conducía a un parcial desgarramiento del contorno de la placa y luego al arrancamiento completo. Nurick y Radford (1997) reportaron experimentos realizados en placas de acero completamente empotradas bajo cargas explosivas localizadas. En los años siguientes, Chung Kim Yuen y Nurick (2000) y Jacob et al. (2004) continuaron con estas investigaciones. La deformación de placas sometidas a cargas localizadas se caracteriza por un domo interno superpuesto a un gran domo. A mayor impulso, el área central y el contorno se afina hasta que se llega a la rotura de la parte central.

Por otra parte, son de destacar los trabajos de Jacinto et al. (2001, 2002) en los cuales se realizaron estudios numéricos -experimentales sobre placas de acero y donde se presentaron guías para la realización del modelo numérico y el análisis del fenómeno.

En el ámbito de los materiales compuestos bajo cargas explosivas, los trabajos de investigación experimentales y numéricos son de naturaleza diversa. Langdon et al. (2005, 2007) investigaron la respuesta de un material compuesto por aluminio, fibra de vidrio y polipropileno bajo carga explosiva concentrada y presentaron fórmulas empíricas para caracterizar el material y modos de falla. Como resultado concluyeron que el material compuesto sería de uso potencial en refuerzo de estructuras por su habilidad de absorber energía por medio de la delaminación de las capas del material, desprendimiento de las capas y rotura. Karagiozova et al. (2009) reportaron resultados experimentales y numéricos de paneles sandwich flexibles bajo cargas explosivas y destacaron que la eficiencia del núcleo en términos de la absorción de energía es fundamental en núcleos gruesos. Jacob et al. (2007) modificaron los números adimensionales de impulso para incluir el parámetro de la distancia a la cual se encuentra la carga (stand off distance). Ambrosini et al. (2009) estudiaron el efecto que tiene el confinamiento y la distancia a la que se encuentra la carga explosiva en las presiones y el impulso, y presentaron una excelente correlación entre resultados numéricos y experimentales. En de Borbón et al. (2011) se presentó un estudio numérico - experimental de placas sandwich sometidas a cargas explosivas distribuidas

presentando excelente correlación numérica.

En este trabajo se realiza un estudio numérico-experimental de placas compuestas sometidas a cargas explosivas localizadas. El estudio numérico es llevado a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS/AUTODYN. Para validar el estudio numérico se utiliza la deformación permanente y rotura de las placas de los ensayos experimentales. Se obtiene buena correlación entre resultados numéricos y experimentales y se discuten los mismos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO DE FABRICACIÓN

Se fabricaron placas compuestas de aluminio y resina epoxi para ser ensayadas bajo cargas explosivas localizadas. Las placas eran de tipo sandwich con un núcleo de 2mm de espesor de resina epoxi a las cuales se les agragaron placas de aluminio adicionales para tener dos tipologías. En Figura 1 se presentan los dos tipos de placas ensayadas denominadas 4Al y 6Al según la cantidad de placas de aluminio.

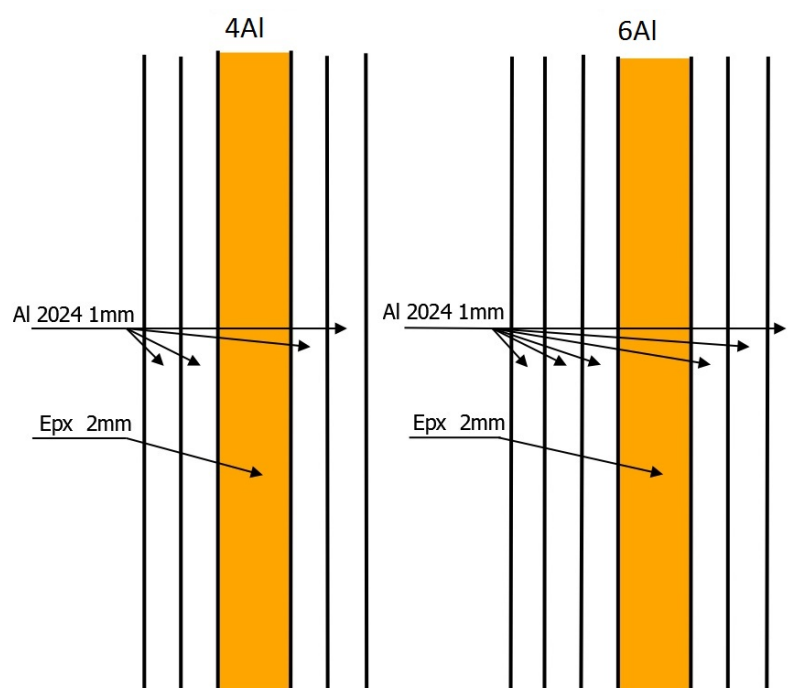


Figura 1: Esquemas de placas a ensayar

Se utilizó aluminio AL 2024 - T3 de 1mm de espesor. El epoxi es un polímero termoestable producto de la reacción de dos componentes, un monómero y el agente catalizador. Se utilizó una resina epoxi líquida standard derivada del Bisfenol-A cuyo nombre comercial es Epokukdo YD-128. Dependiendo del agente endurecedor se pueden obtener resinas con diferente propiedades físicas. En este caso se utilizó un agente amino aromático cuyo nombre comercial es DOCURE TH-430.

Las placas de aluminio se arenaron para mejorar la adherencia entre el aluminio y el epoxi. El arenado se realizó con arena fina previamente utilizada y fue aplicado con un ángulo de incidencia inferior a 30° con respecto a la placa. De esta manera se consiguió la rugosidad uniforme deseada y que no se perforaran las planchas de aluminio por efecto del impacto de la arena en ellas. Luego, la plancha se cortó mecánicamente en placas cuadradas de 150mm x 150mm.

Se fabricaron moldes según las dimensiones anteriormente mencionadas como se aprecia en Figura 2. Dado que la resina epoxi es autonivelante, se niveló cada uno de los moldes para asegurar un espesor constante en las placas.

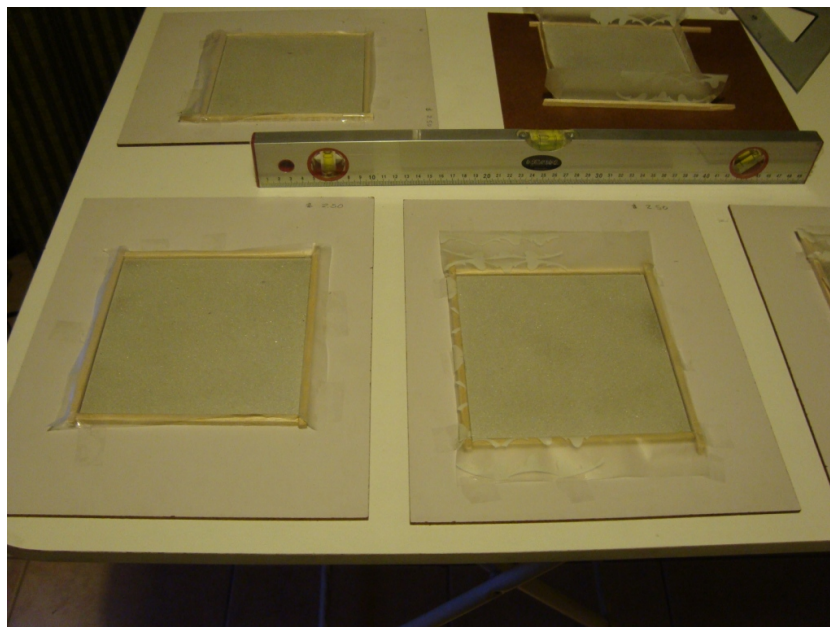


Figura 2: Molde para placa de resina

La resina se calentó hasta alcanzar una temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$  con la finalidad de disminuir su viscosidad, facilitar el mezclado y prevenir la incorporación de aire en la mezcla en forma de burbujas. El agente endurecedor fue agregado en las proporciones indicadas por el fabricante y se homogeneizó la mezcla por cinco minutos en forma manual.

Se colocó una placa de aluminio en cada uno de los moldes y se aplicó, con una espátula, una capa fina de epoxi sobre las placas de aluminio para asegurar que la pintura penetrara en los poros del aluminio y de esta forma se asegurara la adherencia entre la pintura y el aluminio.

En la fabricación de las placas sandwich, se vertió la mezcla en los moldes hasta alcanzar una altura del 75 % de la altura deseada. Las placas se dejaron curar a temperatura ambiente entre siete y diez horas. Luego de este tiempo de curado, se preparó nuevamente mezcla con el procedimiento descrito. Se aplicó la mezcla con una espátula tanto en la placa de aluminio como en la placa del molde. Finalmente, se unieron las dos placas alcanzando el espesor deseado. Las placas sandwich continuaron su proceso de curado a temperatura ambiente. En Figura 3 se aprecia un ejemplar en su primera etapa de fabricación.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Los ensayos con cargas explosivas se llevaron a cabo en el Blast Impact and Survivability Research Unit (BISRU [www.bisru.uct.ac.za](http://www.bisru.uct.ac.za)) de la University of Cape Town (Sudáfrica) y los ensayos se realizaron bajo la supervisión del director del Instituto, el Prof. Gerald Nurick.

Para medir el impulso aplicado a las placas por las cargas explosivas se utilizó un Péndulo Balístico (Figura 4). El péndulo balístico consiste en una viga I de acero suspendida de cuatro cables de acero. Los cables están unidos a la viga I del péndulo balístico por cuatro tornillos ajustables.

El péndulo es nivelado ajustando los tornillos y agregando masas de contra peso a un extremo

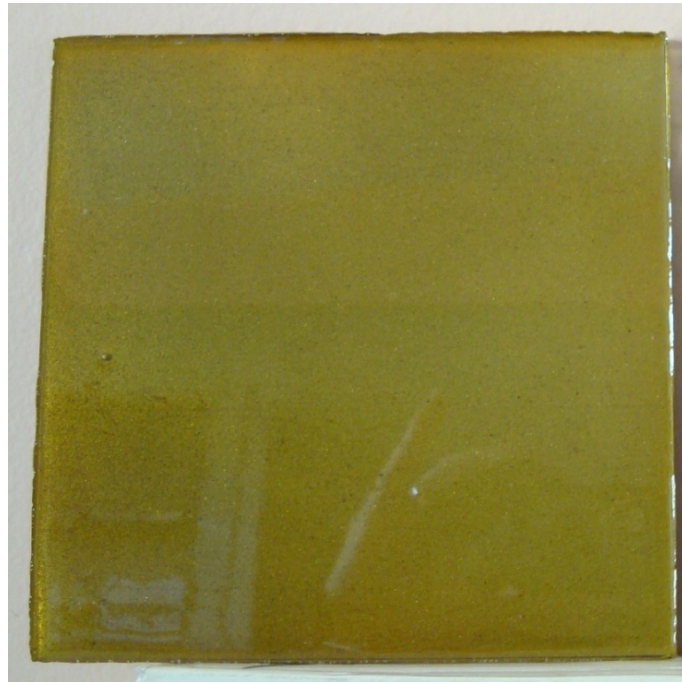


Figura 3: Placa de resina



Figura 4: Péndulo balístico

de la viga en contraposición de la masa del aparato de ensayo que se encuentra en el otro extremo de la viga. De esta manera se puede asegurar que los cuatro cables de acero soportan la misma carga. El impulso generado por la explosión es transmitido a través del centroide del péndulo. Un marcador se sujeta al péndulo en el mismo extremo que se encuentran las masas nivelantes, para marcar las amplitudes de oscilación del péndulo en un papel. La oscilación del péndulo se relaciona directamente con el impulso generado por la explosión, el cual es transmitido al espécimen ensayado.

Al péndulo balístico se le une un aparato de ensayo usando cuatro barras espaciadoras que

permiten que la placa se deforme sin entrar en contacto con la viga I del péndulo balístico. El aparejo de ensayo consiste en dos marcos de acero de 20mm de espesor y de 244mm x 244mm de lado. El espécimen a ensayar es empotrado entre los dos marcos (Figura 5). Los marcos tienen orificios maquinados que permiten colocar el soporte del explosivo y que la muestra a ensayar se deforme o rompa.

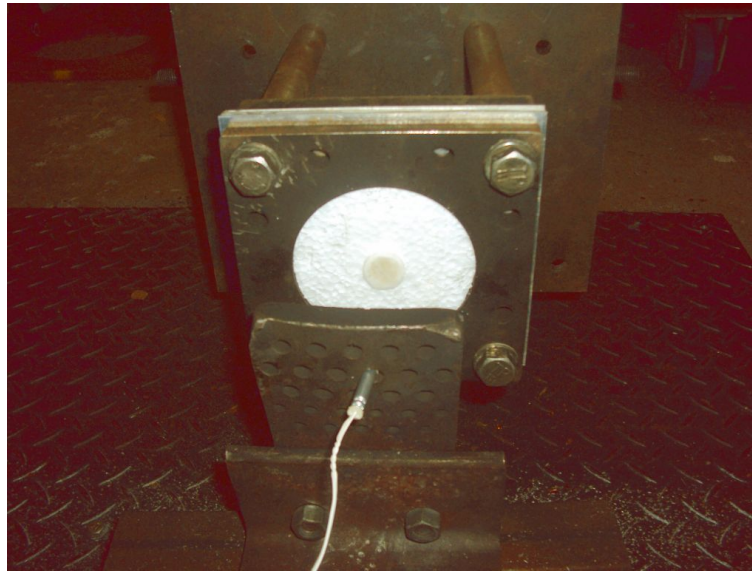


Figura 5: Aparejo de ensayo - Detonador

Los ensayos con carga localizada se refieren a que el explosivo se coloca a una distancia de la muestra de manera tal que tenga un efecto local sobre la muestra de ensayo. En este caso, el explosivo se separa de la placa a ensayar por un soporte de poliestireno. El explosivo plástico se moldeó con forma de disco de diámetro 20mm para impartir una carga explosiva en la cara de las placas a ensayar. El explosivo plástico utilizado es el PE4, el cual es una combinación de ciclotrimetilentrinitramina (RDX) y cera de Litio (*Lithium grease*) (Wharton et al., 2000)(Ver Tabla 1).

Tabla 1: Propiedades explosivo

RDX y cera Litio	88 % RDX y 12 % cera de Litio
Densidad	1,6g/cm <sup>3</sup>
TNT equivalente	1,30 (Wharton et al., 2000)
Velocidad de detonación	8200m/s

El PE4 se coloca con una cinta adhesiva doble en una placa de poliestireno de 13mm de espesor como se observa en Figura 6.

La explosión de la plataforma de poliestireno no afecta la carga explosiva porque su densidad es muy baja. Además, inspecciones posteriores a la explosión, muestran que el poliestireno se quema y consume. Se utiliza un gramo (1g) de explosivo (líder) en el detonador además del explosivo en la placa a detonar. Se utilizaron en estos ensayos masas de 3.0g a 7.0g de explosivo en total. Finalmente, el detonador se adhiere al explosivo y se activa en forma remota.

El espesor de cada placa antes del ensayo y el punto medio de deformación luego del ensayo se midieron con un calibre digital. También se registró la rotura de las placas.



Figura 6: Explosivo sobre poliestireno

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En Tablas 2 y 3 se presentan los resultados obtenidos. El término masa se refiere a la masa total de explosivo,  $\delta$  es la deformación del punto medio y  $\delta/t$  es la relación entre deformación y espesor de la placa. Cuando no se indica la deformación, significa que se ha producido la rotura en la placa.

Tabla 2: Placas Sandwich 4Al

Especimen	Masa g	Impulso N·s	$\delta$ mm	$\delta/t$
1	3.00	7.18	12.08	1.93
2	3.50	7.62	13.17	2.06
3	4.00	7.65	-	-
4	4.00	8.50	-	-
5	4.00	8.99	-	-

Tabla 3: Placas Sandwich 6Al

Especimen	Masa g	Impulso N·s	$\delta$ mm	$\delta/t$
1	3.00	9.06	7.79	0.94
2	4.00	8.90	8.76	1.06
3	5.00	10.92	11.39	1.37
4	6.00	10.94	13.70	1.66
5	7.00	7.63	-	-

En general, se puede observar un impulso creciente con el aumento de la carga explosiva.

En cuanto a la deformación, también es creciente con la cantidad de explosivo. Para independizar los resultados con respecto a posibles diferencias en el espesor de las placas, se presentan además, los resultados en relación al espesor de las placas.

Las dos primeras placas 4Al y las placas 1 a 4 6Al presentan un modo de falla de grandes deformaciones permanentes. En las placas restantes se produce la rotura de las placas, la cual se caracteriza por tener forma de pétalos y por lo tanto no se mide la deformación. En Figuras 7 y 8 se observan los resultados de las placas ensayadas.



Figura 7: Deformación y rotura de placas 4Al



Figura 8: Deformación y rotura de placas 6Al

Se puede observar, que en los ensayos realizados las placas se rompen de forma abrupta y con la magnitud de cargas explosivas utilizadas no se ha podido capturar un estado de rotura intermedio.

## 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Con el objetivo de reproducir numéricamente los ensayos realizados y de este modo, poder calibrar los modelos materiales para estudios posteriores, se realizó una simulación numérica de las placas de 2mm de espesor de núcleo ensayadas bajo cargas localizadas. Se utilizó el



programa AUTODYN (AUTODYN, 2007) que es un *hidrocódigo* que utiliza diferencias finitas, volumen finito y técnicas de elementos finitos para resolver una variedad de problemas no lineales en sólidos y dinámica de fluidos.

El fenómeno a ser estudiado con AUTODYN puede ser caracterizado como altamente dependiente del tiempo con no linealidad geométrica y del material. Los variados procesadores numéricos disponibles en el programa generalmente usan un enfoque acoplado de diferencia finita - volumen finito similar a lo descrito por Cowler y Hancock (1979). Este esquema permite usar selectivamente los procesadores numéricos para modelar diferentes componentes del problema. Las mallas que operan en estos procesadores pueden ser acopladas en el espacio y el tiempo para resolver problemas estructurales, de fluidos y problemas acoplados eficientemente.

Los procesadores incluidos en AUTODYN son: Lagrange, Euler, ALE, Shell, Euler - Godunov, Euler - FCT y SPH. Todos estos procesadores utilizan integración explícita. El hidrocódigo utiliza la conservación de la masa, momentum y energía. Para obtener la solución completa, además de condiciones de borde apropiadas, es necesario definir otras relaciones entre las variables de flujo. Esto puede ser encontrado en los modelos materiales, que relacionan las tensiones con las deformaciones y la energía interna. En la mayoría de los casos las tensiones pueden separarse en un tensor hidrostático y un tensor desviador asociado con la resistencia del material al corte.

### 5.1. Modelos materiales

1. *Aire*: Se utilizó la ecuación ideal de un gas para el aire. Esta es una de las formas más simples de la ecuación de estado para gases. En un gas ideal, la energía interna es función de la temperatura solamente y si el gas es politrópico la energía interna es simplemente proporcional a la temperatura. Por lo tanto la ecuación de estado para un gas que tiene condiciones iniciales uniformes, se escribe:

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (1)$$

donde  $p$  es la presión hidroestática,  $\rho$  es la densidad,  $e$  es la energía interna específica y  $\gamma$  es la constante adiabática.

Los datos utilizadas para el aire se presentan en Tabla 4:

Tabla 4: Propiedades del aire

$\gamma$	1,4
Densidad $\rho$	$1,223e^{-6}kg/cm^3$
Temperatura $T$	288,20K
Calor específico $c_v$	717,6J/kgK
Energía interna $e$	$2,068e^{-5}$

2. *TNT*: Los explosivos son sustancias químicas, que cuando están bajo un estímulo apropiado, reaccionan químicamente muy rápidamente liberando energía. En la teoría hidrodinámica de la detonación, el intervalo de tiempo es reducido a cero y la onda de detonación se asume como una discontinuidad que se propaga a través del material instantáneamente liberando energía y transformando al explosivo en un producto detonante. Las relaciones normales Rankine-Hugoniot, que expresan la conservación de la masa, momentum

y energía a través de la discontinuidad, se utilizan para relacionar las variables hidrodinámicas a través de la zona de reacción. La única diferencia entre las ecuaciones de Rankine-Hugoniot para una onda de shock en un material químicamente inerte y aquellas para una onda de detonación es la inclusión de un término de energía química en la ecuación de conservación de la energía. La ecuación de estado de Jones - Wilkins - Lee (JWL) utilizada es la siguiente:

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{r_1 v}\right) e^{-r_1 v} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{r_2 v}\right) e^{-r_2 v} + \frac{\omega e}{v} \quad (2)$$

donde  $v = 1/\rho$  es el volumen específico,  $C_1, r_1, C_2, r_2$  y  $\omega$  son constantes adiabáticas y sus valores se determinan de experimentos dinámicos. Estas constantes están disponibles en la literatura para los explosivos más comunes.

Se puede demostrar que a grandes radios de expansión, el primer y segundo término del lado derecho de la ecuación 2 pueden despreciarse y entonces el comportamiento del explosivo tiende hacia el comportamiento de un gas ideal. Por lo tanto, cuando el explosivo se ha expandido en un factor de 10 de su volumen original, es válido cambiar la ecuación de JWL por la de gas ideal. En ese caso el exponente adiabático para el gas ideal  $\gamma$  se relaciona con  $\omega$  a través de  $\gamma = \omega + 1$ . En este modelo se utilizó la ecuación de estado de Lee-Tarver (Lee y Tarver, 1980) para la detonación y expansión del TNT en conjunto con la ecuación de estado JWL para el explosivo sin reaccionar. Los datos utilizados se presentan en tabla 5.

Tabla 5: Datos del TNT

Densidad $\rho$	1,63g/cm <sup>3</sup>
$C_1$	3,7377e <sup>5</sup> MPa
$r_1$	4,15
$C_2$	3,7471e <sup>3</sup> MPa
$r_2$	0,9
$\omega$	0,35
C-J Velocidad de detonación	6,93e <sup>3</sup> m/s
C-J Energía por unidad de volumen	6,00e <sup>3</sup> m/s
C-J Presión	2,10e <sup>4</sup> MPa

3. *Aluminio*: La ecuación de estado de este aluminio está representado por las ecuaciones de Rankine-Hugoniot de ondas de choque. Se ha demostrado a lo largo de experimentos dinámicos que para la mayoría de los sólidos y muchos líquidos existe una relación empírica entre la velocidad de choque  $U$  y la velocidad de la partícula  $u_p$ :

$$U = c_0 + s u_p \quad (3)$$

donde  $c_0$  es la velocidad del sonido y  $s$  es la relación entre  $U$  y  $u_p$ .

Es conveniente establecer una forma de Mies-Gruneisen de la ecuación de estado basado en la ecuación de Hugoniot :

$$p = p_h + \Gamma \rho (e - e_h) \quad (4)$$

donde  $\Gamma$  es el parámetro Gruneisen y se asume que  $\Gamma\rho = \Gamma_0\rho_0$  es constante,  $\rho_0$  y  $\rho$  son la densidad antes y después de la onda de choque,  $e$  y  $e_h$  es la energía interna antes y después de la onda de choque.

Se utilizó el modelo de Von Mises para modelar el comportamiento a resistencia del material. Este modelo usa la premisa original de Von Mises donde la tensión de fluencia es constante. Por lo tanto, el radio del cilindro de Von Mises es constante y todo lo que se encuentra dentro del cilindro tiene comportamiento elástico. La superficie del cilindro tiene comportamiento plástico. Este modelo no tiene en cuenta el efecto de endurecimiento, ablandamiento por temperatura o sensibilidad a la tasa de deformación. Sin embargo, estos efectos pueden de algún modo incluirse especificando un valor dinámico de la tensión de fluencia. Se utilizó un valor de fluencia de  $285\text{ MPa}$  y de módulo de corte de  $28,2\text{ GPa}$ . Se incluyó un modelo de erosión de deformación geométrica instantánea.

Los datos utilizados para el aluminio se presentan en Tabla 6.

Tabla 6: Datos del TNT

Densidad	$2,7\text{kg/m}^3$
Coefficiente de Gruneisen	2,1
$C_1$	$5,38e^3\text{m/s}$
$S_1$	1,337
$\sigma_y$	$285\text{MPa}$
$G$	$28,2\text{GPa}$

4. *Resina epoxi*: La resistencia del material se modeló con RHT Concrete. Este modelo es un modelo avanzado de plasticidad para materiales frágiles desarrollado por Riedel, Hiermaier y Thoma del Instituto de Ernst Mach (Riedel et al., 1999). Es particularmente apto para modelar hormigón, rocas, cerámica y cualquier otro material de comportamiento frágil. El modelo constitutivo del RHT Concret es un modelo combinado de plasticidad y daño en el cual las tensiones desviadoras están limitadas por una superficie de falla generalizada.

Los datos utilizados en el modelo se presentan en Tabla 7.

Tabla 7: Datos del epoxi

Densidad	$1,17\text{kg/m}^3$
Coefficiente de Gruneisen	1,13
$C_1$	$3,234^3\text{m/s}$
$S_1$	1,255
$G$	$1,6\text{GPa}$
Resistencia a compresión ( $f_c$ )	$180\text{MPa}$
Resistencia a tracción ( $f_t/f_c$ )	0,25

## 5.2. Modelo numérico

Se realizaron modelos en dos dimensiones. Las condiciones de simetría permitieron utilizar simetría axial y reducir considerablemente la cantidad de elementos.

Se utilizó un procesador Euler-Godunov para modelar el aire y la carga de explosivo. Para la placa de material compuesto se utilizó el procesador Lagrange.

En Figura 9 se presenta el modelo numérico. El punto de detonación se representa por un rombo rojo. Se pueden apreciar numerados puntos de interés (gauges) donde se guarda la historia en el tiempo de las diferentes variables. También se representan las condiciones de borde de transmisión.

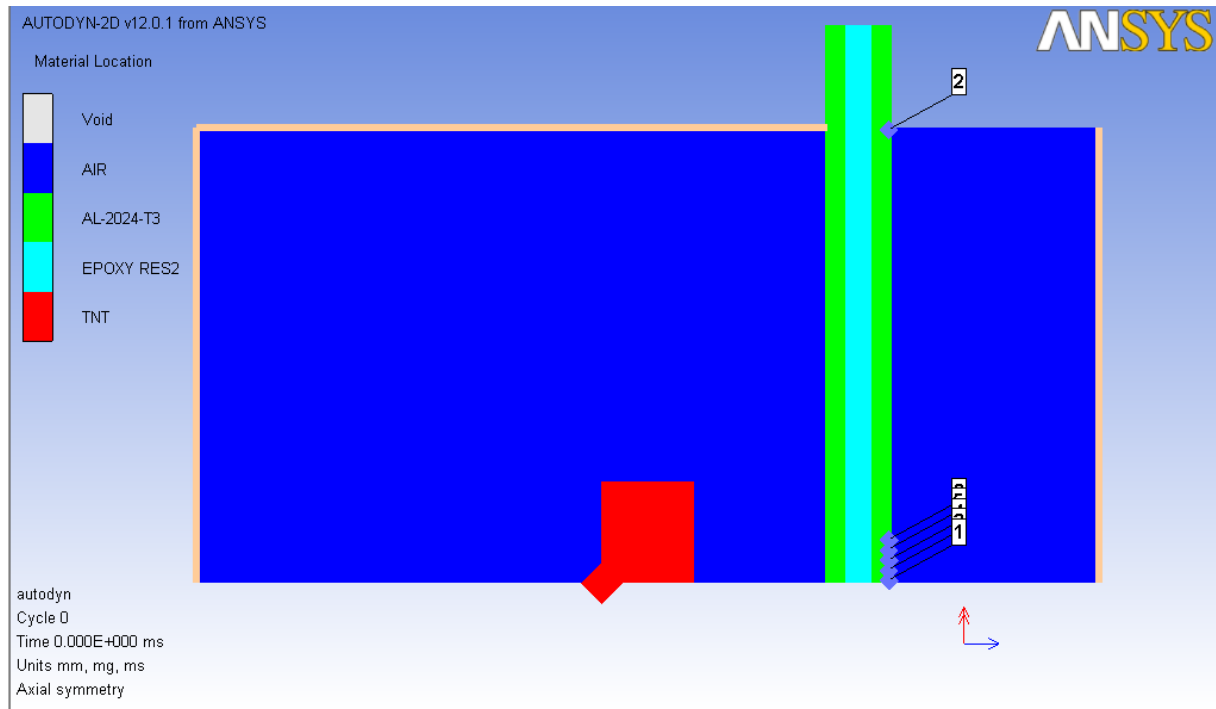


Figura 9: Modelo numérico

En Tabla 8 se presenta un resumen con la equivalencia entre el explosivo PE4 utilizado en los ensayos y el TNT modelado calculado según Wharton et al. (2000). Teniendo en cuenta el diámetro  $d$  de la carga, se calcula la altura  $h$  de explosivo.

Tabla 8: Datos de modelos numéricos

g PE4	g TNT	h TNT [mm]
3.0	3.9	7.8
3.5	4.6	9.1
4.0	5.2	10.3
5.0	6.5	12.9
6.0	7.8	15.5
7.0	9.1	18.1

### 5.3. Condiciones de borde

Para modelar en forma apropiada la condición de radiación, se aplicó una condición de contorno de transmisión tanto para el aire como para sólidos. Esta condición de borde permite que la onda (*stress wave*) continúe a través del límite físico de la grilla sin que se refleje. El tamaño

de la malla disminuye al utilizar esta condición de borde y solo permite el flujo hacia afuera de la grilla. La condición de borde se calcula como sigue:

Si la velocidad normal en el contorno es  $U_n$ , donde  $U_n$  es positivo para flujo saliente, entonces la presión en el contorno ( $P$ ) se calcula como sigue:

Para  $U_n > 0$

$$P = P_{ref} + (U_n - U_{ref})I \quad (5)$$

Para  $U_n < 0$

$$P = P_{ref} \quad (6)$$

Donde  $P_{ref}$  y  $U_{ref}$  son presión y velocidad de referencia respectivamente (Propiedades materiales del modelo) e  $I$  es la impedancia del material (densidad por velocidad de la luz). Si la impedancia no está definida en el contorno, los valores se toman de celdas adyacentes.

Aunque se aplicó esta condición de contorno, se adicionó un espacio de aire para prevenir reflexiones espurias.

Para modelar el empotramiento de la placa al aparejo de ensayo, se aplicó una condición de contorno de velocidad cero tanto en dirección vertical como horizontal.

#### 5.4. Resultados

En Tabla 9 se presentan los resultados de las placas modeladas. El valor de impulso que figura en la tabla se refiere al obtenido en el ensayo.

Tabla 9: Resultados de modelos numéricos

	Placa	g PE4	Impulso[Ns]	$\delta$ Ensayo [mm]	$\delta$ Autodyn[mm]
<b>4Al</b>	1	3.00	7.18	12.08	12.21
	2	3.50	7.62	13.17	11.59
	3	4.00	8.50	-	-
<b>6Al</b>	1	3.00	9.06	7.79	7.96
	2	4.00	8.90	8.76	9.28
	3	5.00	10.92	11.39	9.90
	4	6.00	10.94	13.70	10.86
	5	7.00	7.63	-	-

Se observa que en general se obtienen excelentes resultados numéricos de deformación en relación a los resultados de los ensayos experimentales. Si bien las placas 3 y 4 del tipo 6Al difieren en un 13 y 20 % respectivamente, se puede decir que estos valores son aceptables debido a la complejidad del problema y a la gran cantidad de variables presentes en el ensayo experimental. Dentro de estas variables, se puede mencionar la correcta detonación del explosivo, la variación en el espesor de las placas, defectos de fabricación no visibles, entre otros.

En Figura 10 se presenta la salida gráfica del modelo numérico mostrando la deformación y rotura de las placas 4Al. Se observa que la deformación de las placas coincide con lo observado en el ensayo. La rotura de la placa es representada en forma aproximada ya que no se refleja la forma de rotura en pétalos producto de la forma en que está modelado el aluminio.

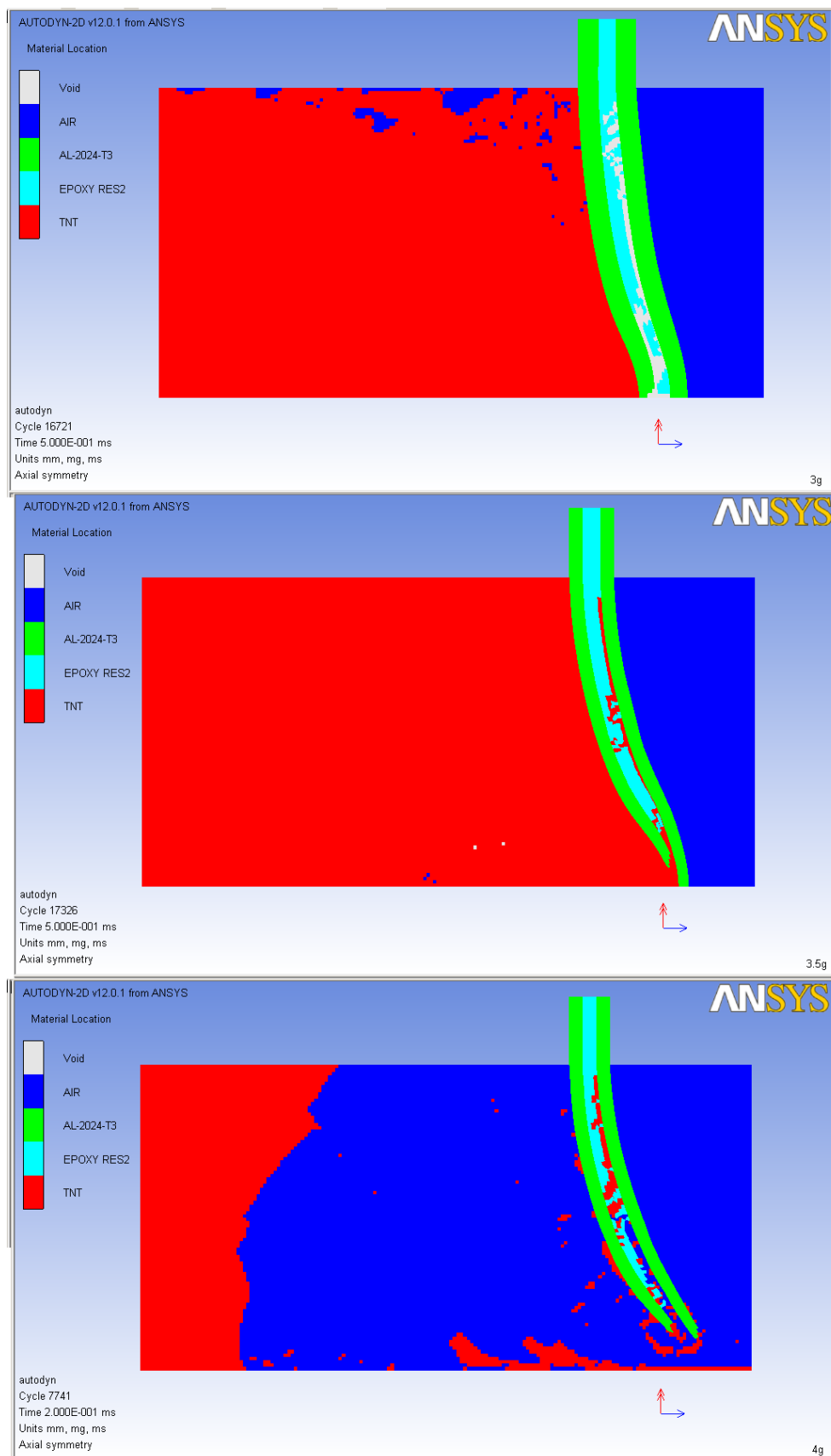


Figura 10: Modelo numérico de placas 4Al

Por otra parte, el modelo numérico permite obtener información de la placa que no ha podido obtenerse en forma experimental. En Figuras 11 y 12 se observa la velocidad y desplazamiento de los puntos de control.

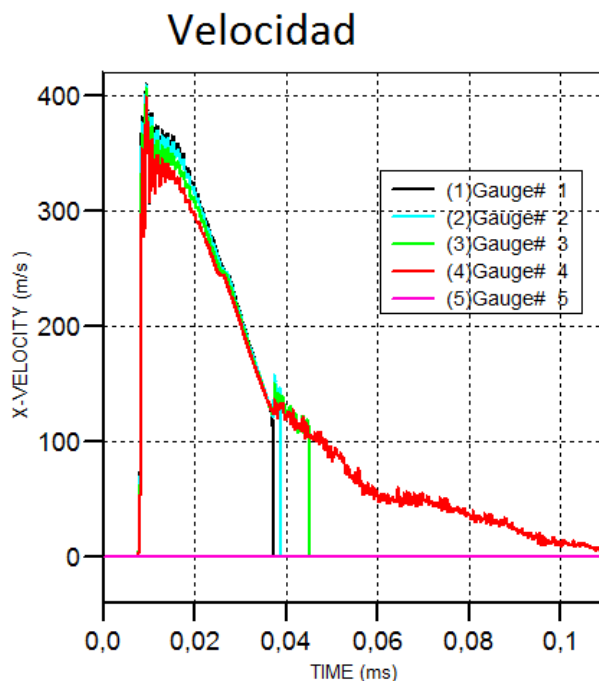


Figura 11: Velocidad en los puntos de control

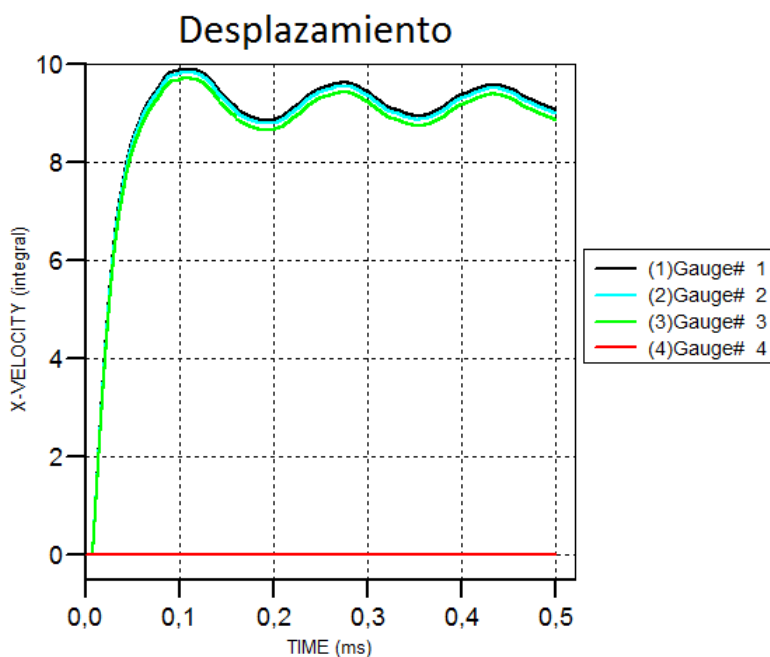


Figura 12: Desplazamiento en los puntos de control

Se puede observar que la velocidad en algunos casos es superior a 400m/s. Se observa la caída brusca de la velocidad en algunos puntos de control. Esto se debe a que se produce un

afinamiento en la zona donde se encuentran ubicados, situación que concuerda con el ensayo experimental. Finalmente, se puede observar que el máximo desplazamiento se obtiene a los 0.1ms de producida la detonación, lo cual evidencia la velocidad del fenómeno.

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio numérico experimental de placas sandwich de aluminio y resina epoxi sometidas a cargas explosivas localizadas. Se utilizó un explosivo plástico PE4 en un rango de 3.0g a 7.0g.

De los ensayos experimentales se obtuvo el valor del impulso y la deformación del punto medio o evidencia de rotura. El modelo numérico se llevó a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS - AUTODYN a través de un modelo 2D. Se obtuvieron excelentes resultados numéricos de deformación en relación a los resultados experimentales. El modelo numérico también predice la carga a la cual se produce la rotura en los ensayos aunque la forma de la rotura no es representada con exactitud. Por otra parte, la simulación numérica permite obtener datos que son de difícil obtención en ensayos experimentales tales como la velocidad.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero del CONICET y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo. También se agradece especialmente al Prof. Gerald Nurick y al Dr. Steeve Chung de la Universidad de Cape Town.

## REFERENCIAS

- Ambrosini D., Luccioni B., Nurick G., Langdon G., y Jacob N. The effect of confinement and stand-off distance in blast tests. En *Mecánica Computacional*, volumen XXVIII, páginas 343–362. Tandil, 2009.
- AUTODYN. *Interactive Non-Linear Dynamic Analysis Software, Version 12.0, Users's Manual*. Century Dynamics Inc., 2007.
- Baker W., Cox P., Westine P., Kulesz J., y Strehlow R. *Explosion hazards and evaluation*. Elsevier, Amsterdam, 1983.
- Chung Kim Yuen S. y Nurick G. The significance of the thickness of a plate when subjected to localised blast loads. En *Proc 16th int symp military aspects of blast and shock*, páginas 491–499. 2000.
- Cowler M. y Hancock S. Dynamic fluid-structure analysis of shells using the pisces 2delk computer code. En *5th International Conference on Structural Dynamics in Reactor Technology*, páginas 1–6. 1979.
- de Borbón F., Ambrosini D., Chung Kim Yuen S., y Nurick G. Respuesta dinámica de placas compuestas sometidas a cargas explosivas. *Mecánica computacional*, 30:1089 – 1105, 2011.
- Jacinto A., Ambrosini D., y Danesi R. Experimental and computational analysis of plates under air blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 25(10):927–947, 2001.
- Jacinto A., Ambrosini D., y Danesi R. Dynamic response of plates subjected to blast loading. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, SB152(3):269–276, 2002.
- Jacob N., Chung Kim Yuen S., Bonorchis D., Nurick G., Desai S., y Tait D. Quadrangular plates subjected to localised blast loads-an insight into scaling. *International Journal of Impact Engineering*, 30:1179–1208, 2004.
- Jacob N., Nurick G., y Langdon G. The effect of stand-off distance on the failure of fully



- clamped circular mild steel plates subjected to blast loads. *Engineering Structures*, 29:2723–2736, 2007.
- Karagiozova D., Nurick G., Langdon G., Yuen S.C.K., Chi Y., y Bartle S. Response of flexible sandwich-type panels to blast loading. *Composites Science and Technology*, 69(6):754 – 763, 2009.
- Kinney G. y Graham K. *Explosive shocks in air*. Springer Verlag, 2nd edición, 1985.
- Langdon G., Cantwell W., y Nurick G. The blast response of novel thermoplastic based fibre metal laminates-some preliminary results and observations. *Composites Science and Technology*, 65:861–872, 2005.
- Langdon G., Lemanski S., Nurick G., Simmons M., Cantwell W., y Schleyer G. Behaviour of fibre metal laminates subjected to localised blast loading part i: Experimental observations. *International Journal of Impact Engineering*, 34:1202–1222, 2007.
- Lee E. y Tarver C. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives. *Physics of Fluids*, 23(12):2362–2372, 1980.
- Nurick G. y Martin J. Deformations of thin plates subjected to impulsive loading - a review; part I - theoretical consideration. *International Journal of Impact Engineering*, 8(2):159–170, 1989.
- Nurick G. y Radford. Deformation and tearing of clamped circular plates subjected to localised central blast loads. En *Recent developments in computational and applied mechanics: A volume in honour of John B. Martin.*, páginas 276–301. International centre for numerical methods in engineering (CIMNE), Spain, 1997.
- Riedel W., Thoma K., Hiermaier S., y Schmolinske E. Penetration of reinforced concrete by beta b 500 numerical analysis using a new microscopic concrete model for hydrocodes. *Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures*, 1999.
- Smith P. y Hetherington J. *Blast and ballistic loading of structures*. Great Britain: Butterworth-Heinemann Ltd, 1994.
- Smith P. y Rose T. Blast loading and building robustness. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4(2):213–223, 2002.
- Teeling R. y Nurick G. The deformation and tearing of circular plates subjected to impulsive loads. *International Journal of Impact Engineering*, 11(1):77–92, 1991.
- Wharton R., Formby S., y Merrifield R. Air blast TNT equivalence for a range of commercial blasting explosives. *Journal of Hazardous Materials*, 79:31–39, 2000.