

RESPUESTA DINÁMICA DE PLACAS COMPUESTAS SOMETIDAS A CARGAS EXPLOSIVAS

Fernanda de Borbón^{a,b}, Daniel Ambrosini^{a,b}, Steeve Chung Kim Yuen^c y Gerald Nurick^c

^a*Dinámica Experimental, Facultad de Ingeniería UNCuyo, Parque General San Martín, 5500 Mendoza, Argentina, ferdeborbon@gmail.com, <http://fing.uncu.edu.ar/estructural/index.html>*

^bCONICET

^c*Blast Impact and Survivability Research Unit (BISRU), Department of Mechanical Engineering, University of Cape Town, South Africa*

Palabras Clave: Placas Compuestas, Cargas explosivas, 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. Los materiales que puedan servir de protección a dichas estructuras también son tema de estudio. En este trabajo se presenta un estudio numérico de la respuesta dinámica de placas compuestas de aluminio/epoxi sometidas a cargas explosivas. Las placas son cuadradas de 150 mm de lado compuestas por aluminio de 1 mm de espesor, las cuales son arenadas para mejorar la adherencia con el núcleo. El núcleo consiste en resina epoxi de 2mm de espesor. La resina epoxi es utilizada como matriz 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 a hacia la placa. La masa de explosivo varía para proveer un rango de respuesta de los paneles que vaya desde la deformación al arrancamiento. El estudio numérico es llevado a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS/AUTODYN. La deformación permanente de las placas es utilizada para validar el modelo numérico. Se obtiene buena correlación entre resultados numéricos y experimentales.

1. INTRODUCTION

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 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 reportados numerosos trabajos experimentales en vigas, placas y cáscaras (Nurick y Martin, 1989). Jones (1989) propuso un impulso adimensional y una solución analítica para predecir las grandes deformaciones inelásticas de placas circulares totalmente empotradas bajo cargas con una distribución uniforme de velocidades. 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.

Son de destacar los trabajos de Jacinto et al. (2001, 2002) en los cuales se realizaron estudios numérico-experimental 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. Por otra parte, 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). Mientras que 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 este trabajo se realiza un estudio numérico-experimental de placas compuestas. El estudio numérico es llevado a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS/AUTODYN. La deformación permanente de las placas de los ensayos experimentales es utilizada para validar el modelo numérico. Se obtiene buena correlación entre resultados numéricos y experimentales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se fabricaron seis placas compuestas de aluminio y resina epoxi para ser ensayadas bajo cargas explosivas distribuida. Las placas eran de tipo sandwich con un núcleo de 2mm de espesor (Ver Figura 1).

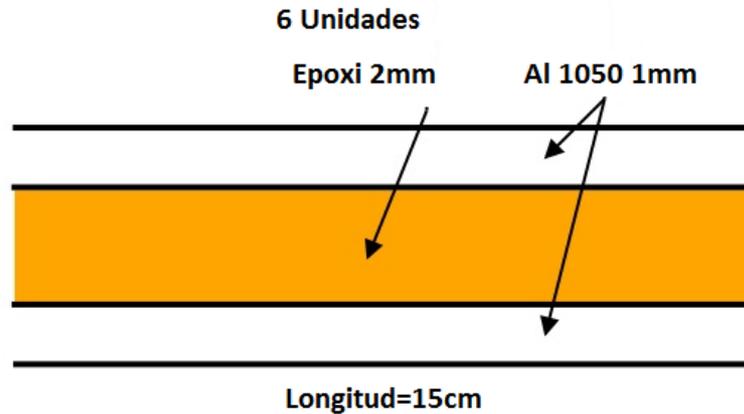


Figura 1: Esquemas de placas a ensayar

Se utilizó aluminio AL 1050 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 diferentes 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 aplicada 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 la figura 2. Dado que la resina epoxi es autonivelante se niveló cada uno de los moldes para asegurar un espesor constante en las placas.

La resina se calentó hasta alcanzar una temperatura de 70°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.

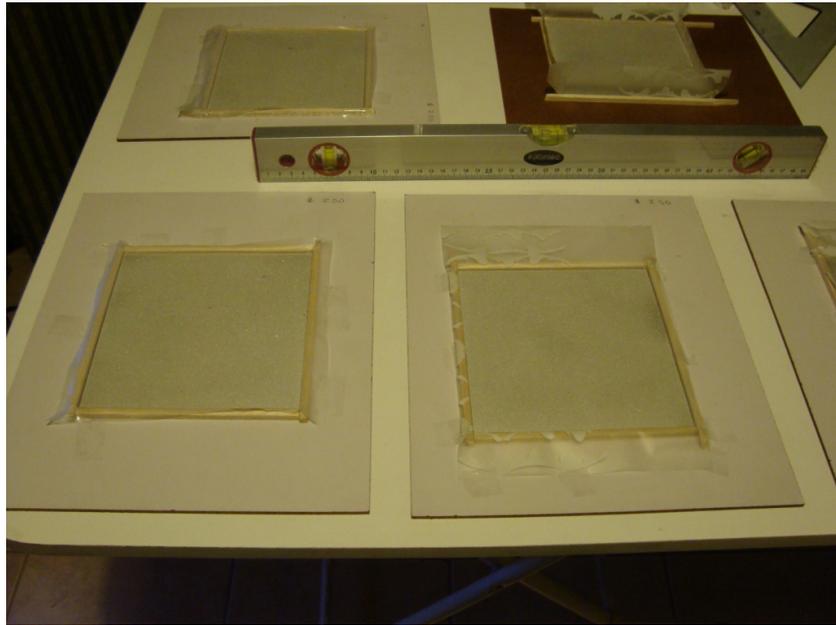


Figura 2: Molde para placa de resina

Las placas sandwich continuaron su proceso de curado a temperatura ambiente. En la figura 3 se aprecia un ejemplar en su primera etapa de fabricación.

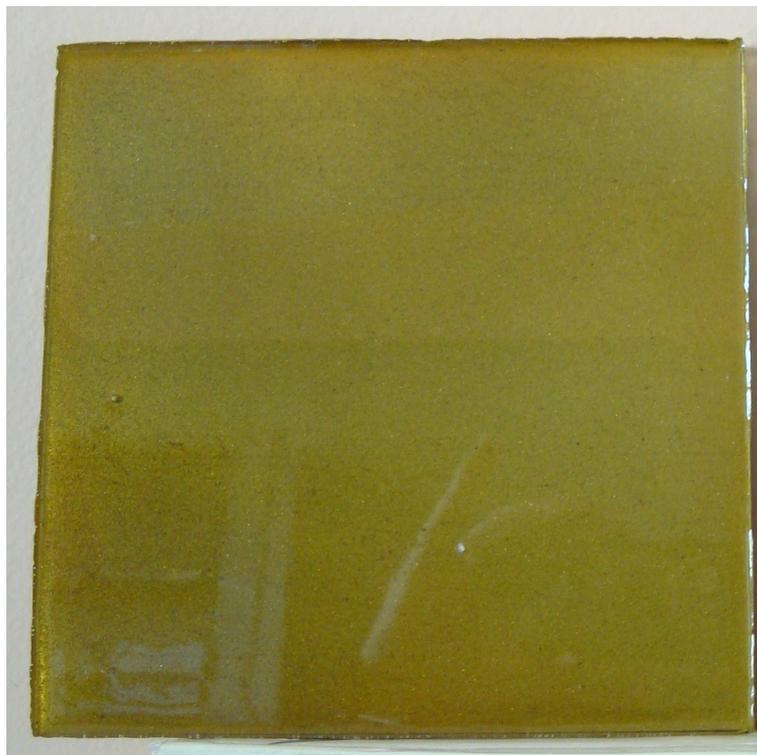


Figura 3: Placa de resina

Por otra parte, se realizaron ensayos estáticos a tracción en el Instituto de Estructuras de la Universidad Nacional de Tucumán. En tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 1: Datos ensayos estáticos

Material	σ_u	E
Aluminio 1050	125 MPa	75 GPa
Resina	45 MPa	4.3 GPa

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) 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 4 cables de acero (resorte). Los cables están unidos a la viga I del péndulo balístico por cuatro tornillos ajustables.



Figura 4: Péndulo balístico

El péndulo es nivelado ajustando los tornillos y agregando masas de contra peso a un extremo 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 relaciona directamente el impulso generado por la explosión que es transmitida al espécimen ensayado.

Al péndulo balístico se le une un aparato de ensayo usando cuatro barras espaciadoras que permiten a la placa deformarse sin entrar en contacto con la viga I del péndulo balístico. El

aparejo de ensayo consiste en dos marcos empotrantes de acero de 20mm de espesor y de 244mm x 244mm de lado. El espécimen a ensayar es empotrado entre las dos placas (Figura 5). Los marcos tienen orificios maquinados que permiten en un sentido colocar los dispositivos donde se encuentra el explosivo y en el otro sentido permiten que la muestra a ensayar se deforme o rompa.

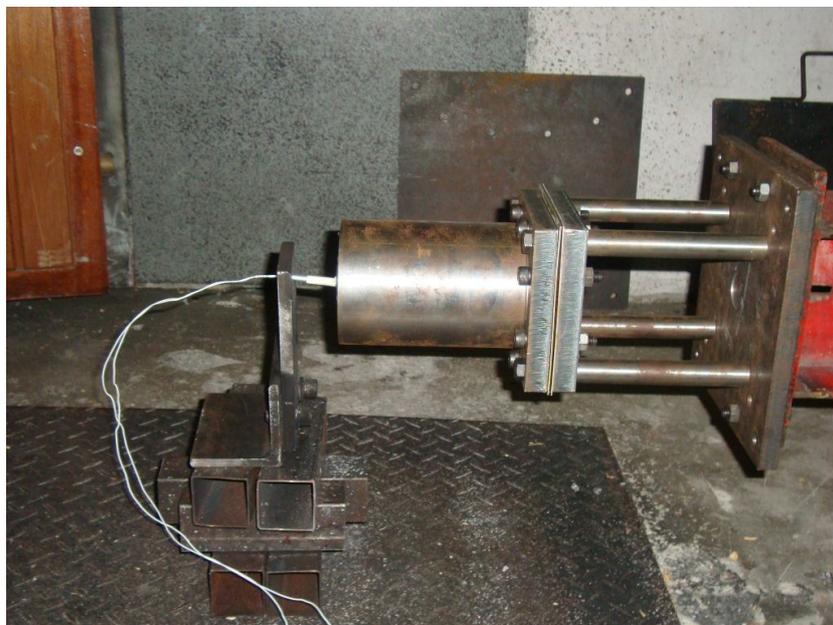


Figura 5: Aparejo de ensayo - Detonador

Los ensayos con carga distribuida se refieren a que la explosión genera una presión uniformemente distribuida sobre la muestra de ensayo (Jacob et al., 2007; Ambrosini et al., 2009). Para generar esta presión uniforme se debe separar el explosivo del ejemplar a ensayar. Para ello, se utilizaron tubos de acero de 180mm de longitud y 90 mm de diámetro. Estos tubos se enroscaron al aparejo de ensayo. En el otro extremo del tubo, se coloca un soporte de poliestireno con el explosivo adherido.

El explosivo plástico se moldeó con forma de disco de diámetro 20mm y de esfera de 16mm de diámetro para impartir una carga explosiva en la cara cargada 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 2).

Tabla 2: Propiedades explosivo

RDX y cera Litio	88 % RDX y 12 % cera de Litio
Densidad	1,6g/cm ³
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 la 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. Usualmente se utiliza un gramo (1g) de explosivo (lider) en el detonador



Figura 6: Explosivo sobre poliestireno

además del explosivo en la placa a detonar pero en estos ensayos no se utilizó debido a la baja carga de explosivos. Se utilizaron en estos ensayos masas de 1.5g a 3.0g. 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.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En tabla 3 se presentan los resultados obtenidos. El término masa se refiere a la masa total de explosivo, δ es la deformación del punto medio y δ/t es la relación entre deformación y espesor.

Se puede observar en general un impulso creciente con el aumento de la carga de explosivo. En cuanto a la deformación, también es creciente con la carga de explosivo. El espécimen 4 presenta un valor de deformación fuera de rango. 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. En este caso, si bien el espécimen 4 tiene mayor valor δ/t que el resto de las placas ensayadas, su valor está dentro de lo esperado.

Tabla 3: Placas Sandwich de 2mm de espesor de núcleo

Especimen	Masa g	Impulso N·s	δ mm	δ/t
1	1.50	4.40	2.19	1.02
2	2.00	3.94	1.99	1.88
3	2.25	7.09	8.26	1.97
4	2.50	6.38	11.38	2.32
5	2.75	7.32	9.93	2.23
6	4.00	7.67	0.00	0.00

Las placas 1 a 5 presentan un modo de falla tipo II, es decir grandes deformaciones permanentes. En la Figura 7 se observa la deformación con forma de domo característica de los ensayos con carga distribuida.



Figura 7: Deformación del punto medio de la placa

El espécimen 6 que no presenta datos de deformación tuvo un modo de falla tipo II de arrancamiento (Fig 8).



Figura 8: Falla de arrancamiento

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 distribuidas. 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 descripta 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 hidoestática, ρ es la densidad, e es la energía interna específica y γ es la constante adiabática.

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

Tabla 4: Propiedades del aire

γ	1,4
Densidad ρ	$1,223e^{-6} \text{ kg/cm}^3$
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 ω 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 γ se relaciona con ω 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 ρ	$1,63g/cm^3$
C_1	$3,7377e^5 MPa$
r_1	4,15
C_2	$3,7471e^3 MPa$
r_2	0,9
ω	0,35
C-J Velocidad de detonación	$6,93e^3 m/s$
C-J Energía por unidad de volumen	$6,00e^3 m/s$
C-J Presión	$2,10e^4 MPa$

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 Mie-Grüneisen de la ecuación de estado basado en la ecuación de Hugoniot :

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

donde Γ es el parámetro Grüneisen y se asume que $\Gamma \rho = \Gamma_0 \rho_0$ es constante, ρ_0 y ρ 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 y en 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 215 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	$5,38 \text{ e}^3 \text{ m/s}$
S_1	1,337
σ_y	215 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 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 la 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 de las variables de interés y las condiciones de borde de transmisión.

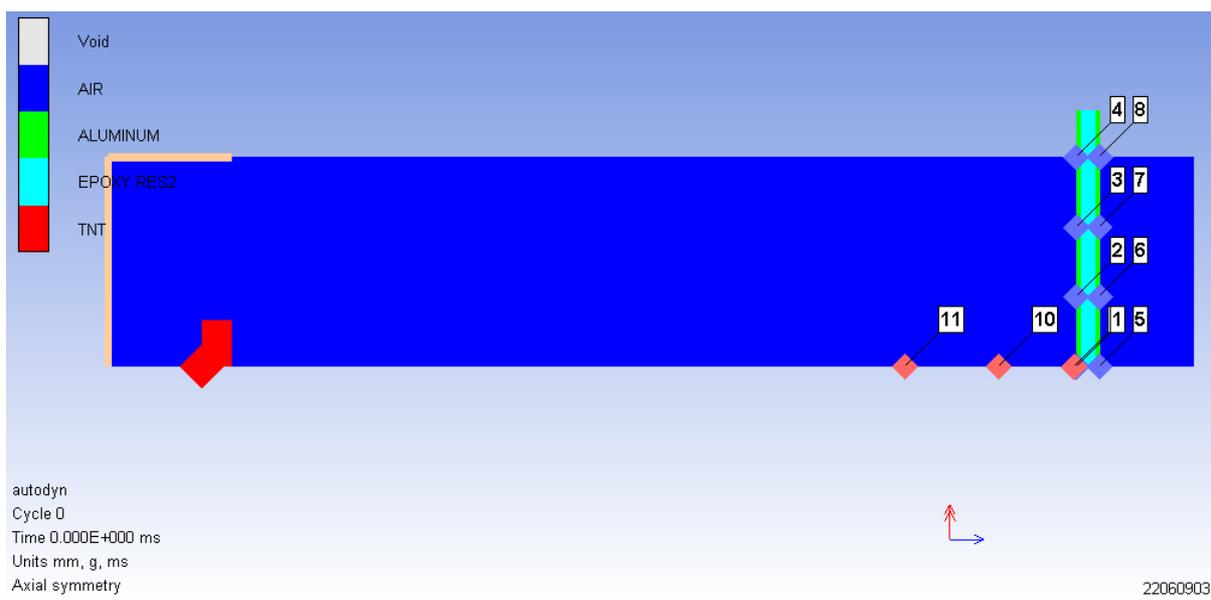


Figura 9: Modelo numérico

En la tabla 8 se presenta un resumen con la cantidad de elementos de cada modelo y 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

Placa	g PE4	g TNT	d [mm]	h [mm]	Elementos
1	1.5	1.95	16	6.1	7184
2	2	2.6	20	5.2	7128
3	2.25	2.93	16	9.1	7128
4	2.5	3.25	20	6.5	7240
5	2.75	3.58	20	7.1	11416

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

$$\begin{aligned} &\text{Para } U_n > 0 \\ P &= P_{ref} + (U_n - U_{ref})I \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} &\text{Para } U_n < 0 \\ P &= P_{ref} \end{aligned} \quad (6)$$

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 adicionaron 20mm 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 0 tanto en dirección vertical como horizontal.

5.4. Resultados

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

Se observa que se obtienen excelentes resultados numéricos de deformación en relación a los resultados de los ensayos experimentales. La excepción la presenta la placa 4.

Tabla 9: Resultados de modelos numéricos

Placa	g PE4	Impulso[Ns]	δ ensayo [mm]	δ Autodyn[mm]
1	1.50	3.66	4.53	4.75
2	2.00	4.04	7.91	8.28
3	2.25	5.14	8.26	8.68
4	2.50	6.36	11.38	8.54
5	2.75	6.67	9.93	10.61

Si hubieran más resultados similares a la placa 4 se podría pensar que las placas restantes tienen una deformación menor producto de una detonación incompleta del explosivo, lo cual es normal en ensayos experimentales con baja carga de explosivo. En este caso, el único valor fuera del rango de resultados es la placa 4, por lo cual se concluye que este valor depende únicamente del espesor del núcleo de resina y de posibles defectos no visibles en el momento de su fabricación que produjeron una deformación mayor.

En la figura 10 se observan las tensiones de von Mises luego de 1ms de ocurrida la detonación. Se observa que ya se ha alcanzado la deformación última de la placa. En algunos puntos se llega a valores cercanos a la tensión de fluencia del aluminio sin superarla.

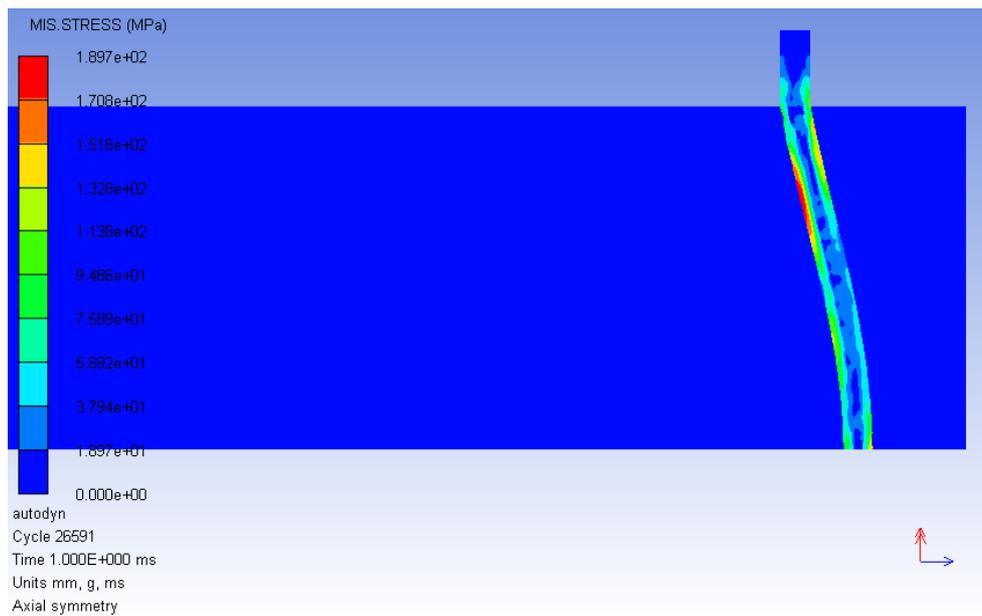


Figura 10: Tensión de von Mises luego de 1ms de la detonación

Por otra parte, el modelo numérico permite obtener información de la placa que no ha podido obtenerse en forma experimental. En figura 11 se observa la presión de la onda de choque, similar a la forma teórica. Los picos de la figura representan las reflexiones de la onda en las paredes del tubo.

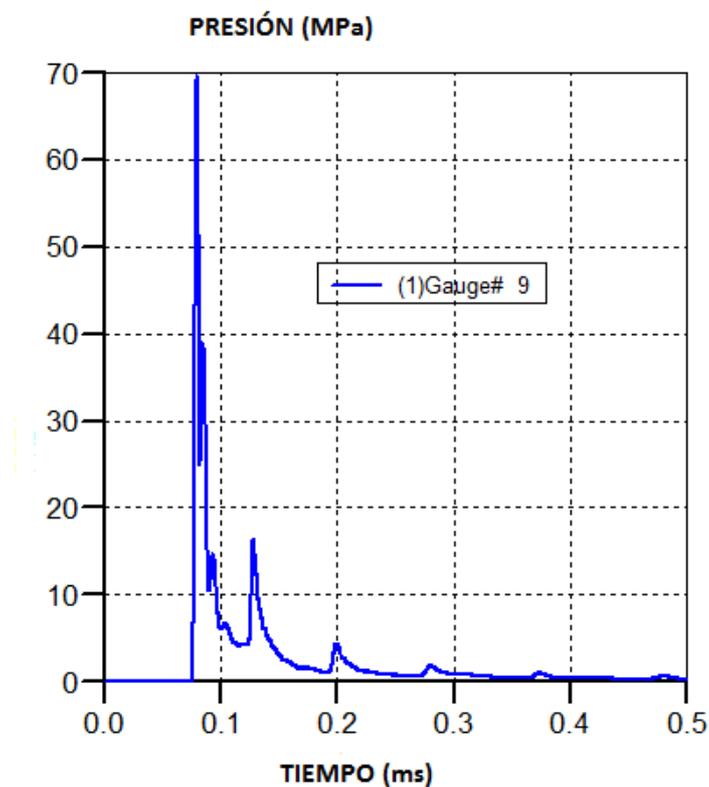


Figura 11: Presión de la onda de choque

Del registro de velocidades del punto medio de la placa (Figura 12), se observa que se alcanza una velocidad de deformación superior a 80 m/s .

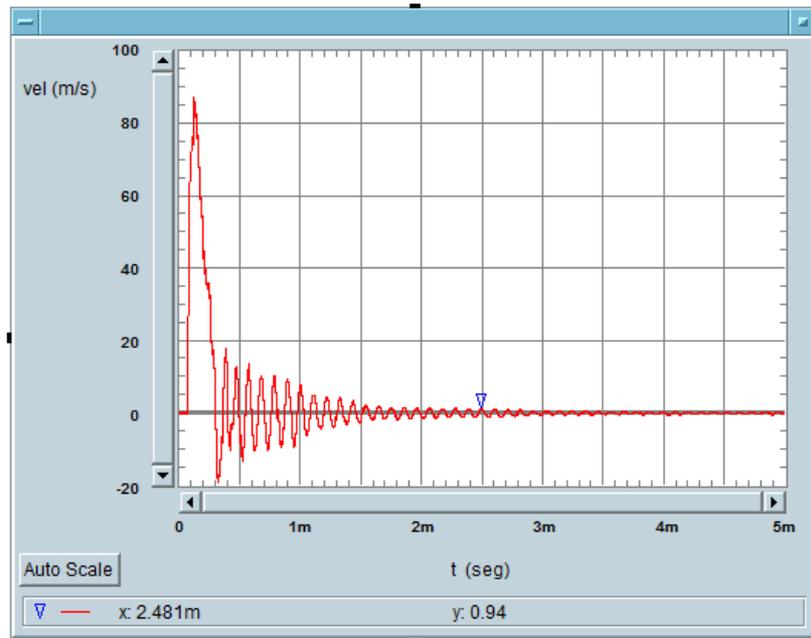


Figura 12: Velocidad del punto medio de la placa

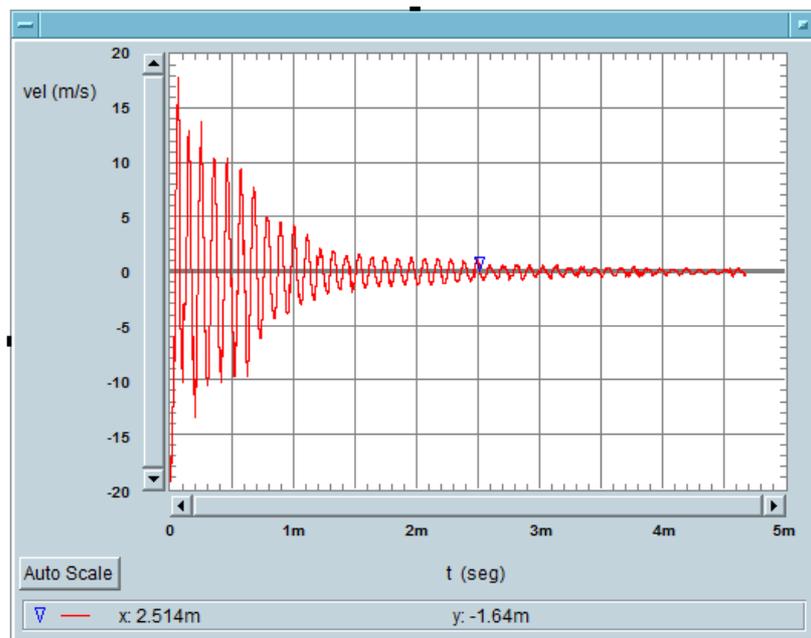


Figura 13: Velocidad en vibraciones libres

Eliminando la respuesta de la carga y dejando solamente la respuesta en vibraciones libres (Figura 13), se puede obtener la frecuencia de la placa por medio del espectro de Fourier.

En figura 14 se observa la frecuencia obtenida de 9402Hz, o sea que se está en presencia de una placa extremadamente rígida.

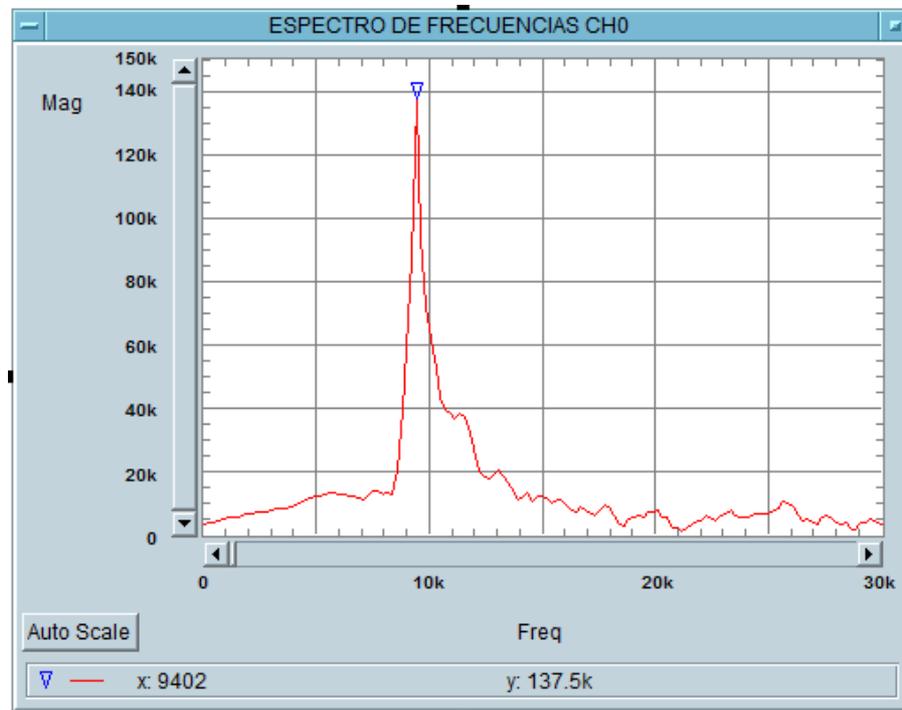


Figura 14: Frecuencia de la placa

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado un estudio numérico experimental de placas sandwich compuestas sometidas a cargas explosivas distribuidas. Se utilizó un explosivo plástico PE4 en un rango de 1.5g a 4.0g. De los ensayos experimentales se obtuvo el valor del impulso y la deformación del punto medio. El modelo numérico se llevó a cabo utilizando el hidrocódigo ANSYS - AUTODYN. Se obtuvieron excelentes resultados numéricos de deformación en relación a los resultados experimentales. Por otra parte, la simulación numérica permitió obtener datos como la velocidad y frecuencia de las placas al momento de la explosión, datos que de otra manera son difíciles de obtener de un ensayo experimental.

AGRADECIMIENTOS

Se agrade el apoyo financiero del CONICET, Ministerio de Ciencia y Tecnología (MINCYT) y del National Research Foundation (South Africa).

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.
- 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.
- 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., 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.
- Jones N., editor. *Structural Impact*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1989.
- 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.
- 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.