

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 718 880**

51 Int. Cl.:

F41H 1/04

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **14.11.2014 PCT/US2014/065658**

87 Fecha y número de publicación internacional: **13.08.2015 WO15119695**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **14.11.2014 E 14881432 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.01.2019 EP 3069098**

54 Título: **Sintonización y mitigación de frecuencia de explosión/impacto**

30 Prioridad:

14.11.2013 US 201361904206 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

05.07.2019

73 Titular/es:

**THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF MICHIGAN (100.0%)
Office of Technology Transfer 1600 Huron Parkway 2nd Floor
Ann Arbor, Michigan 48109, US**

72 Inventor/es:

**THOULESS, MICHAEL;
ARRUDA, ELLEN M.;
RAHIMZADEH, TANAZ y
WAAS, ANTHONY M.**

74 Agente/Representante:

CARPINTERO LÓPEZ, Mario

ES 2 718 880 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sintonización y mitigación de frecuencia de explosión/impacto

La presente divulgación se refiere a dispositivos protectores y, más en particular, se refiere a dispositivos protectores con propiedades de sintonización y mitigación de frecuencia de explosión y/o impacto.

5 Esta sección proporciona información de antecedentes relacionados con la presente divulgación que no son necesariamente técnica anterior. Esta sección proporciona un sumario general de la divulgación, y no es una divulgación exhaustiva de su alcance completo o de todas sus características.

10 Los conceptos existentes para el diseño de cascos y armaduras incluyen el uso de incompatibilidad de impedancia para reducir la amplitud de una onda de tensión. Estos también incluyen el uso de plasticidad para absorber energía; también se reconoce que algunos materiales viscoelásticos son útiles para la mitigación de explosiones.

15 El concepto clave de las presentes enseñanzas es que si las ondas de tensión desde una explosión o impacto pueden sintonizarse con la frecuencia de amortiguación crítica de un material disipador, y las propiedades disipadoras de un material disipador se eligen apropiadamente, la energía puede disiparse de manera muy eficaz. Normalmente la energía de una explosión o impacto se contiene en múltiples frecuencias, solo algunas de las cuales pueden disiparse por el paso a través de una capa determinada de material viscoelástico.

20 Las características dañinas de las cargas de explosión e impacto en un objetivo delicado soportado por una estructura se muestran incluyendo tanto la sobrepresión como el impulso suministrado al soporte. Las presentes enseñanzas examinan cómo las capas de materiales elásticos, plásticos y viscoelásticos pueden ensamblarse para mitigar estas características de explosión. La incompatibilidad de impedancia entre dos capas elásticas se conoce para reducir la presión, pero la disipación se requiere para mitigar el impulso transmitido en una armadura ligera. Un concepto de diseño nuevo llamado sintonización de explosión se introduce en el que una armadura de múltiples capas se usa para sintonizar una explosión a frecuencias específicas que coinciden con las frecuencias de amortiguación de las capas viscoelásticas. Además, el material sin dimensión y los parámetros geométricos que controlan la disipación viscosa de energía en la armadura sintonizada con explosión se identifican por un sistema unidimensional simplificado para proporcionar una perspectiva sobre cómo el diseño óptimo de la armadura puede basarse en estas enseñanzas. Finalmente, el rendimiento del diseño sintonizado con explosión se compara con el rendimiento de otros diseños potenciales, incluyendo diseños elásticos/plásticos. Se muestra que el diseño de armadura sintonizada con explosión es más eficaz al mitigar las características dañinas de una explosión o impacto.

30 Del documento DE 3544929 C1 una cubierta para proteger contra cargas explosivas se conoce, que se realiza de una pluralidad de diferentes capas que alternativamente tienen una impedancia de onda de impacto alta y baja.

Además, del documento US 3658635 A una intercapa adhesiva adecuada para amortiguación de vibración de capa limitada se conoce. Una intercapa realizada de polímero viscoelástico se usa para mejorar una amortiguación de vibración.

35 A la vista de esto el objeto de la invención es desvelar un dispositivo protector, tal como un casco, para mitigar una explosión o impacto, que ofrece una protección mejorada contra cargas de explosión e impacto en un objetivo delicado, tal como el cerebro humano.

Este es objeto se soluciona por el dispositivo protector de acuerdo con la reivindicación 1.

Otras características se someten a las reivindicaciones dependientes.

40 Otras áreas de aplicabilidad serán aparentes desde la descripción proporcionada a continuación. La descripción y ejemplos específicos en el sumario pretenden tener fines solo de ilustración y no pretenden limitar el alcance de la presente divulgación, limitándose solo la invención por las reivindicaciones adjuntas.

Los dibujos aquí descritos tienen solo fines ilustrativos de realizaciones seleccionadas y no todas las posibles implementaciones, y no pretenden limitar el alcance de la presente divulgación, limitándose la invención por las reivindicaciones adjuntas.

45 La FIG. 1 es una ilustración esquemática de la geometría de la armadura y de la estructura de soporte expuesta a una carga normal variable en el tiempo analizada en el modelo de elemento finito;
 la FIG. 2 es un gráfico que ilustra que el impulso efectivo se minimiza después del paso a través de una armadura viscoelástica de tres capas;
 50 la FIG. 3 es un gráfico que ilustra que una reducción significativa en la presión máxima transmitida puede lograrse con una armadura viscoelástica de tres capas bien sintonizada;
 la FIG 4 es un gráfico que ilustra que para una armadura de tres capas bien sintonizada, el impulso efectivo cae con el tiempo que lleva que la onda de tensión viaje por la capa viscoelástica;
 la FIG. 5 es un gráfico que ilustra que para una armadura de tres capas bien sintonizada, la amplitud máxima de la presión transmitida cae con el tiempo que lleva que la onda de tensión atraviese la capa viscoelástica, ya que

esto permite un incremento en la disipación de energía;

las FIGS. 6A a 6C ilustran que (A) una onda de tensión se atenúa cuando viaja a través de una capa viscoelástica tanto como el momento se transfiere en un pulso amplio inicial (B), en una capa viscoelástica bien sintonizada pero no óptimamente amortiguada, el resto del momento se suministra sobre una serie de pulsos separados por incrementos de tiempo de $1/f_B$, y (C) en una armadura viscoelástica bien sintonizada y óptimamente amortiguada, el resto del momento se transmite en pulsos posteriores ampliamente dispersados;

la FIG. 7 es un gráfico que ilustra que la amplitud máxima de la presión transmitida disminuye con la incompatibilidad de impedancia incrementada entre la primera y segunda capa tanto para diseños viscoelásticos bien sintonizados como elásticos, aunque la disipación de energía asociada con la viscoelasticidad proporciona una reducción más eficaz en la amplitud;

la FIG. 8 es un gráfico que ilustra que el impulso transmitido disminuye cuando el potencial disipador de la capa plástica aumenta;

la FIG. 9 es un gráfico que ilustra el impulso total transmitido a la estructura/sistema objetivo como una función de tiempo;

la FIG. 10 es un modelo dinámico de un soporte estructural de masa m_1 unido a un cimiento rígido mediante un resorte de rigidez k_1 y acoplado a un objetivo delicado de masa m_2 a través de un resorte de rigidez k_2 , en el que un pulso de presión $P(t)$ se transmite a la estructura bien directamente desde la explosión o a través de la armadura;

y la FIG. 11 es un gráfico que ilustra la presión máxima ejercida en la estructura y en el objetivo delicado como una función de tiempo normalizado.

Los números de referencia correspondientes indican partes correspondientes a través de las varias vistas de los dibujos.

Las realizaciones de ejemplo se describen ahora más totalmente en referencia a los dibujos adjuntos.

Las realizaciones de ejemplo se proporcionan para que esta divulgación completamente y de forma exhaustiva transporte el alcance a los expertos en la materia. Numerosos detalles específicos se exponen como ejemplos de componentes específicos, dispositivos y procedimientos para proporcionar un entendimiento completo de las realizaciones de la presente divulgación. Será aparente para los expertos en la materia que los detalles específicos no necesitan emplearse, que las realizaciones de ejemplo pueden incorporarse en muchas formas diferentes y que no deben interpretarse para limitar el alcance de la divulgación, limitándose la invención por las reivindicaciones adjuntas. En algunas realizaciones de ejemplo, unos procedimientos bien conocidos, estructuras de dispositivo bien conocidas y tecnologías bien conocidas no se describen en detalle.

La terminología usada aquí tiene el fin de describir realizaciones de ejemplo particulares solo y no pretende ser limitante. Tal como se usa en este caso, las formas singulares "un", "una" y "el" pueden pretender incluir las formas plurales también, a menos que contexto indique claramente lo contrario. Los términos "comprende", "comprendiendo", "incluyendo", y "teniendo" son inclusivos y por tanto especifican la presencia de características, enteros, etapas, operaciones, elementos y/o componentes mencionados, pero no excluyen la presencia o adición de una o más de otras características, enteros, etapas, operaciones, elementos, componentes y/o grupos de los mismos. Las etapas, procedimientos, y operaciones del procedimiento descritas en este caso no se interpretan como necesariamente necesitando su realización en el orden particular analizado o ilustrado, a menos que se identifique específicamente como un orden de realización. También se entiende que unas etapas alternativas o adicionales pueden emplearse.

Cuando un elemento o capa se menciona como "sobre", "unido a", "conectado a" o "acoplado con" otro elemento o capa, puede estar directamente sobre, unido a, conectado o acoplado con el otro elemento o capa, o elementos o capas intermedias pueden estar presentes. En comparación, cuando un elemento se menciona como "directamente sobre", "directamente unido a", "directamente conectado a" o "directamente acoplado a" otro elemento o capa, puede no haber elementos o capas intermedias presentes. Otras palabras usadas para describir la relación entre elementos deberían interpretarse de manera similar (por ejemplo, "entre" frente a "directamente entre", "adyacente" frente a "directamente adyacente", etc.). Tal como se usa aquí, el término "y/o" incluye todas y cualquiera de las combinaciones de uno o más de los artículos mencionados asociados.

Aunque los términos primero, segundo, tercero, etc., pueden usarse en este caso para describir diversos elementos, componentes, regiones, capas y/o secciones, estos elementos, componentes, regiones, capas y/o secciones no deberían limitarse por estos términos. Estos términos pueden solo usarse para distinguir un elemento, componente, región, capa o sección de otra región, capa o sección. Los términos tales como "primero", "segundo" y otros términos numéricos cuando se usan en este caso no implican una secuencia u orden a menos que se indique claramente por el contexto. Así, un primer elemento, componente, región, capa o sección analizada a continuación podrían denominarse como segundo elemento, componente, región, capa o sección sin apartarse de las enseñanzas de las realizaciones de ejemplo.

Los términos relativos, tal como "interior", "exterior", "por debajo", "bajo", "inferior", "superior", "por arriba" y similares pueden usarse en este caso para facilitar la descripción para describir un elemento o relación de característica con otro elemento o característica como se ilustra en las figuras. Los términos espacialmente relativos pueden pretender abarcar diferentes orientaciones del dispositivo en uso u operación además de la orientación representada en las

figuras. Por ejemplo, si el dispositivo en las figuras se voltea, los elementos descritos como “por debajo” o “bajo” otros elementos o características se orientarían entonces “por encima” de otros elementos o características. Así, el término de ejemplo “bajo” puede abarcar tanto una orientación por encima como por debajo. El dispositivo puede orientarse de otra forma (rotado 90° o a otra orientación) y las descripciones espacialmente relativas usadas en este caso interpretarse por consiguiente.

El concepto clave de las presentes enseñanzas es que si las ondas de tensión de un impacto o explosión pueden sintonizarse con la frecuencia de amortiguación crítica de un material disipador, y las propiedades disipadoras del material disipador se eligen apropiadamente, la energía puede disiparse de forma muy eficaz. Normalmente la energía de un impacto o explosión contiene múltiples frecuencias, solo algunas de las cuales pueden disiparse por el paso a través de una capa determinada de un material viscoelástico.

De acuerdo con los principios de las presentes enseñanzas, un diseño de multicapa se proporciona en el que dos o más capas consistentes en materiales de diferente impedancia acústica se usan para sintonizar una explosión o impacto en una o más frecuencias específicas. La frecuencia o frecuencias pueden sintonizarse por elección de parámetros materiales y geométricos apropiados. Las capas posteriores de materiales viscoelásticos se eligen con frecuencias de amortiguación críticas que coinciden con estas frecuencias sintonizadas. Los espesores de estos materiales se diseñan por lo que las ondas de tensión de las frecuencias sintonizadas disminuyen antes del paso de la onda a través de la capa al objetivo.

La eficacia de este sistema depende de la coincidencia de las propiedades de la capa viscoelástica y la frecuencia o frecuencias sintonizadas. La frecuencia o frecuencias de amortiguación de las capas viscoelásticas pueden personalizarse por diseño de material adecuado.

Las presentes enseñanzas ilustran el diseño de estructuras para proteger contra impacto y explosión. Los usos de esta invención incluirán cualquier aplicación en la que un objetivo delicado deba protegerse. Los ejemplos incluyen, pero no se limitan a, armaduras y cascos para el campo de batalla, protección contra lesiones cerebrales traumáticas en deportes y protección frente a golpes de vehículos. La invención también es útil para la protección de cualquier dispositivo mecánico delicado sometido a impactos.

1. Introducción

Una explosión se asocia con una elevación rápida en la presión local de fluido. Esto ocurre a menudo como resultado de la detonación de un explosivo líquido o sólido que se convierte en un producto gaseoso, o como resultado de una elevación de temperatura local intensa. Una explosión es la transmisión de este pulso de presión a través de un fluido por la propagación de una onda de choque en velocidades aproximadamente sónicas. La integración de un pulso de presión con estructuras puede provocar daños, bien de naturaleza estructural, si la explosión provoca colapso u otra pérdida de integridad estructural, o de naturaleza funcional, si las ondas de tensión transmitidas provocan que los componentes delicados fallen. El impacto de un proyectil sólido, o al parar un cuerpo en movimiento, también tiene como resultado un pulso de presión que se transmite a la estructura. Tales impactos o detenciones pueden ser resultado de golpes de, pero sin limitarse a, un balón de fútbol, caída de bicicleta, un puñetazo en hockey o similar. La mecánica para los dos fenómenos (por ejemplo impacto y detención) son similares, y los análisis presentados en las presentes enseñanzas son válidos para ambos, aunque las escalas de tiempo asociadas con una explosión pueden ser significativamente menores. El término “explosión” se usará a través de la presente enseñanza, pero debería apreciarse que los análisis también se aplican generalmente a eventos provocados por impacto.

Los dos tipos de fallo, pérdida de integridad estructural o funcional, conducen a dos enfoques distintos para diseño contra explosión. Un enfoque es el diseño de un sistema que puede acomodar una intensidad determinada de explosión sin pérdida de integridad estructural. Por ejemplo, el casco de un barco debería diseñarse para que una explosión no provoque ruptura. El otro enfoque es diseñar armaduras para evitar que los efectos dañinos de una explosión alcancen a un objetivo detrás de la armadura. Por ejemplo, un casco debería diseñarse para que una explosión no provoque lesiones en el cerebro por transmisión de una onda de choque a través del cráneo y los orificios. Sin embargo, este último concepto puede generalizarse a la protección de cualquier dispositivo mecánicamente delicado.

En el diseño de estructuras resistentes a explosiones y armaduras, existe a menudo un objetivo asociado de minimizar la masa. Por tanto, el procedimiento de diseño implica finalmente una optimización de la tolerancia de explosión y la minimización de masa. Esto requiere el entendimiento de cómo las estructuras se dañan por la explosión, y cómo los efectos de la explosión pueden acomodarse por la estructura o disiparse por la armadura. Como se detalla en los siguientes párrafos, ha existido mucho trabajo realizado sobre la mecánica de la explosión y su relación con la optimización de estructuras resistentes a explosiones. Menos trabajo se ha realizado sobre cómo realizar a medida arquitecturas materiales para armadura para usar como protección externa de estructuras delicadas. Esta última preocupación proporciona el enfoque del trabajo actual en el que la mecánica para mitigación de explosión por armadura se desarrolla. Esto se usará como la base para futuro trabajo al optimizar el diseño de una armadura multicapa.

La relación entre la elevación de presión en un fluido y la onda de tensión que entra en un sólido depende de los

detalles de la interacción de fluido-sólido. Cuando una estructura se expone a la explosión, la presión ejercida en la superficie, P , se eleva casi instantáneamente a un valor máximo P_0 , y luego cae con el tiempo, t , por lo que

$$P(t) = P_0 f(t/t_0), \quad (1)$$

donde t_0 es una característica temporal para el decaimiento. Para una explosión, $f(t/t_0)$ tiene una forma exponencial, y P_0 y t_0 dependen del tipo y masa de material explosivo, la distancia desde la fuente de la explosión y la naturaleza de la interacción de fluido-estructura. Para el impacto, P_0 y t_0 dependen de la masa, la velocidad y las propiedades elásticas del proyectil; también puede haber un tiempo de elevación más largo. La presión máxima es una de las características importantes de una explosión que puede provocar daños. La otra característica importante es el impulso transmitido por la explosión:

$$I_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (2)$$

Este impulso es responsable de la transferencia de energía cinética en la estructura que puede provocar daños en la estructura o los componentes dentro de ella.

Un requisito para mitigación de explosiones es el diseño de estructuras que pueden absorber toda la energía transportada por explosión sin fallo estructural. El enchapado de armadura proporciona uno de tales ejemplos. Esta forma de armadura puede visualizarse como placas sujetas que sufren flexión y estiramiento en respuesta a la explosión, resultando en una deformación plástica que disipa la energía. Las contribuciones adicionales a la disipación de energía pueden proporcionarse añadiendo un polímero tal como poliurea a la superficie trasera de las placas. Un enfoque alternativo para el diseño de estructuras resistentes a explosión es incorporar un núcleo disipador de energía, en la forma de espumas o cerchas, entre dos placas de cara. Estas estructuras intercaladas disipan energía cuando el impulso de la onda de presión transmite momento a la placa de cara, que luego deforma el núcleo. Las estructuras pueden diseñarse con núcleos metálicos y placas de cara, placas de cara compuesta y núcleos poliméricos o con híbridos de polímero-metal.

Otros enfoques para disipar la energía desde una explosión incluyen el uso de vejigas de aire y cámaras llenas de fluido, sistemas granulares y espumas llenadas. Estos enfoques dependen de variaciones en la masa y rigidez de los componentes para dispersar y atenuar la explosión. Un enfoque activo en lugar de pasivo para mitigación de explosión se ha propuesto recientemente por Wadley y col. para minimizar la tensión compresiva transmitida en una estructura compuesta de dos capas hecha de una placa de amortiguación (expuesta a la carga de explosión) y una espuma aplastable precomprimida que se relaja justo antes de la llegada del impulso llevado por la explosión, creando un momento opuesto al adquirido de la explosión.

Los estudios sobre la interacción entre una explosión, armadura y un objetivo se han limitado al análisis específico de un casco de combate, entre los que un estudio numérico ha mostrado cómo la sustitución de la espuma por poliurea como una almohadilla de suspensión puede reducir la tensión compresiva máxima en el cerebro y la velocidad. Más allá de este tipo de estudio empírico, ha habido poco enfoque en la bibliografía mecánica sobre las características de una explosión que los objetivos sensibles necesitan para protegerse contra ella, y cómo la armadura puede optimizarse para lograr esto. Estas cuestiones proporcionan el enfoque de la presente divulgación. La motivación original se proporcionó por el diseño contra lesiones cerebrales, pero se reconoce que los objetivos sensibles que requieren protección contra explosiones pueden generalizarse en cualquier sistema dinámico, tal como los que contienen dispositivos MEMS. En la primera sección de las presentes enseñanzas, un breve análisis se presenta en cuanto a las características de una explosión que deberían mitigarse en el diseño de la armadura. Esto va seguido por análisis numérico de cómo las capas de materiales viscoelásticos, plásticos y elásticos pueden ser mejor ensamblados para proteger un objetivo. Una de las conclusiones principales de este trabajo es que un diseño nuevo y potencialmente muy eficaz de la armadura de múltiples capas puede incluir capas para sintonizar una explosión a frecuencias específicas que coinciden con las frecuencias de amortiguación de materiales viscoelásticos incorporados dentro de la armadura.

2. Mecánica de daños en objetivos delicados desde la explosión

Recientemente, ha habido mucha publicidad sobre los daños que pueden provocarse en el tejido cerebral por explosiones y por impactos en la cabeza en deportes o choques de vehículo. El origen del daño no se entiende bien, aunque generalmente se está de acuerdo en que es resultado de una formación axonal excesiva. Los detalles de cómo un objetivo puede quedar afectado por explosión o impacto, después de mediación de la armadura, depende de factores tales como la geometría del objetivo y la armadura, las propiedades constitutivas del objetivo y el medio a través del que se transmitió la explosión. Sin embargo, para los fines de evaluar las posibles estrategias de mitigación, es necesario identificar las características importantes de cualquier onda de tensión que puede surgir de la armadura para dañar un objetivo delicado.

En la presente enseñanza, se asume que el sistema detrás de la armadura es un sistema simple dinámico de dos componentes que consiste en un objetivo delicado y la estructura de soporte. La estructura de soporte y el objetivo se acoplan por un resorte, y la estructura se une a un cimiento rígido por un segundo resorte. La motivación para esta resolución es un modelo simple de una cabeza que puede concebirse como un cerebro acoplado a un cráneo a través

de un fluido cerebroespinal, con el movimiento del cráneo que se resiste por su unión al resto del cuerpo por el cuello. Se asume que el objetivo delicado (cerebro) puede dañarse si experimenta un nivel demasiado alto de tensión.

5 Como se muestra aquí, la tensión máxima transmitida al objetivo (cerebro) surge bien de un pulso de presión transmitido directamente o de la respuesta dinámica del sistema, dependiendo de la duración de la interacción entre el pulso de presión y la estructura de soporte (cráneo). Si el tiempo para el pulso de presión a transmitir a la estructura, t_t , es significativamente más corto que el periodo natural del sistema de objetivo/estructura, $T_{objetivo}$, la tensión que el objetivo experimenta es directamente proporcional al impulso suministrado al soporte estructural. Si t_t es significativamente mayor que $T_{objetivo}$, la tensión máxima en el objetivo es igual a la presión máxima transmitida al soporte estructural.

10 La aceleración máxima de la estructura de soporte (cráneo) se mide a menudo en estudios instrumentados de impacto como una representación para las tensiones transmitidas. Sin embargo, como se analizó antes, las aceleraciones de cráneo y cerebro no están correlacionadas si $t_t < T_{objetivo}$.

15 Por tanto, los estudios instrumentados deberían medir todo el historial de aceleración de la estructura de soporte, no solo los valores máximos. Esto parece reflejarse en algunos criterios de diseño empírico, en los que se reconoce que la aceleración máxima que una cabeza puede experimentar sin dañar el cerebro surge para impulsos de corta duración.

20 Aunque se reconoce que los detalles geométricos son importantes para análisis detallados y diseño de casos, la intención de este trabajo es explorar los conceptos generales de las estrategias de mitigación de explosión diferentes en un nivel fundamental de mecánica. Por tanto, solo los análisis unidimensionales se presentan en la presente enseñanza. Las simulaciones de elementos finitos se usan para comparar la forma y características del pulso de presión transmitido a través de diferentes diseños de armadura multicapa con las de la explosión original. El conocimiento de estos análisis se usa para evaluar diferentes estrategias de diseño, ya que se relacionan con impacto y explosión, y proponer nuevas estrategias asociadas con el uso de materiales viscoelásticos.

3. Enfoques de mitigación de explosión

25 Como se analizó antes, el objetivo principal en el diseño de armadura protectora es mitigar tanto el impulso como la amplitud de tensión que se transmite desde una explosión a una estructura de soporte y objetivo. Se conoce bien que una onda de tensión que viaja a través de dos materiales puede atenuarse si existe una incompatibilidad de impedancia entre ellas. Si una onda de tensión compresiva incidente de amplitud σ_i que viaja en el material A pasa por una interfaz con material B que es normal a la dirección de propagación, la amplitud de la onda de tensión compresiva transmitida, σ_t en B se proporciona por

$$\sigma_t = \frac{2\sqrt{E_{BPB}}}{\sqrt{E_{APA}} + \sqrt{E_{BPB}}} \sigma_i \quad (3)$$

donde E es el módulo, ρ es la densidad y los subíndices A y B indican los dos materiales. Como se indica por esta ecuación, la magnitud de la onda de tensión transmitida se reduce haciendo que la impedancia acústica, definida como $\sqrt{E\rho}$, del segundo material sea mucho menor que la del primer material.

35 La incompatibilidad de impedancia en su enfoque descrito antes para mitigar la presión máxima transmitida a través de la armadura no tiene efecto en el impulso. Sin embargo, el impulso transmitido no depende de las masas relativas de la armadura y/o la estructura/sistema de objetivo. Si no existe disipación de energía, un análisis de dinámica corporal rígida simple indica que la relación del impulso total transmitido, I_{total} , con el impulso original, I_o , llevado por la armadura es

$$\frac{I_{total}}{I_o} = \frac{2(m_s / m_a)}{(m_s / m_a) + 1} \quad (4)$$

en donde, m_a es la masa de la armadura, y m_s es la masa de la estructura y el objetivo. Por tanto, un enfoque para mitigar el impulso es usar armadura masiva ($m_s \gg m_a$).

45 Un enfoque que depende de armadura pesada entra en conflicto claramente con un criterio de diseño común de minimización de masa de estructura protectora. Por tanto, un enfoque alternativo es reducir el impulso transmitido por la energía de disipación dentro de la armadura. Sin embargo, la dinámica de cuerpo rígido proporciona un límite a este enfoque, en el que la relación mínima para I_{total}/I_o correspondiente a una colisión perfectamente inelástica se proporciona por

$$\frac{l_{total}}{l_o} = \frac{(m_s / m_a)}{(m_s / m_a) + 1} \quad (5)$$

Esto es solo un factor dos veces menor que el impulso total transmitido en una colisión perfectamente elástica.

Los procedimientos disipadores asociados con la plasticidad o viscoelasticidad, así como fricción y deslaminación, pueden usarse para disipar energía en la armadura. La deformación plástica es irreversible, y se limita a un único uso. Una vez un elemento de material se ha deformado plásticamente, no está disponible para absorber energía desde ondas de tensión posteriores de la misma magnitud. Por otro lado, los materiales viscoelásticos pueden deformar energía en múltiples ciclos, siempre que la escala de tiempo de la carga cíclica esté en el orden del tiempo característico para el material. Por tanto, la eficacia con la que la energía se disipa en materiales viscoelásticos depende de las frecuencias de las ondas de tensión asociadas con el impulso de explosión. Si existe una incompatibilidad entre las frecuencias y las frecuencias de amortiguación críticas del material viscoelástico, entonces la viscoelasticidad no es una manera eficaz de disipar energía. El simple concepto de introducir únicamente una capa de material viscoelástico en la armadura, sin pensar en sus frecuencias características, no será en general útil. Además, las ondas de explosión exhiben diferentes componentes de frecuencia, por lo que puede ser difícil hacer coincidir el material de absorción de energía con las frecuencias. Estos problemas conducen a un concepto nuevo que se llama sintonización de explosión, en el que una construcción de múltiples capas se usa para sintonizar explosiones con frecuencias que pueden coincidir con las frecuencias de disipación de energía óptimas de los materiales viscoelásticos.

Una consideración adicional que surge por las ecuaciones 4 y 5, es que incluso con la disipación de energía más eficaz, el impulso transmitido puede ser solo cortado por un factor de dos. Esto introduce un papel adicional de la armadura: incrementar la escala de tiempo del pulso de presión. Esta es una consecuencia directa de descender la presión promedia de un pulso acoplado con el concepto de la conservación del momento. Si la duración de una onda de presión se incrementa suficientemente, puede volverse tan larga, en comparación con la respuesta dinámica de la estructura y el objetivo, que el impulso transmitido es menos importante que la amplitud de una onda de tensión al determinar el daño. La presión máxima puede controlarse más fácilmente mediante la incompatibilidad de impedancia, límite elástico o propiedades viscoelásticas de la armadura, de lo que puede hacerlo el impulso transmitido. Tal como se explicará más extensivamente a continuación, el uso de sintonización de explosión con propiedades con viscoelasticidad proporciona una ventaja adicional en esta conexión. El impulso puede transmitirse a la estructura/sistema objetivo sobre una serie de impulsos ampliamente separados. Como resultado, el pulso efectivo, l_{ef} , que actúa en la escala de tiempo que es importante para determinar el daño en la estructura puede ser menor que el predicho por la ecuación 5. El resto del impulso se transmite en pulsos pequeños sobre una escala de tiempo relativamente larga, sin proporcionar tensiones significativas al objetivo. Se cree que esta característica de armadura viscoelástica sintonizada, en que l_{ef} puede ser menor que el impulso total transmitido sobre escalas de tiempo largas, l_{total} , aumenta enormemente la eficacia potencial de la sintonización de explosión.

4. Concepto de sintonización de explosión

En esta sección, la viscoelasticidad lineal se usa para introducir el concepto de sintonización de explosión. Los parámetros geométricos y de materiales sin dimensión que controlan la disipación de energía viscosa se identifican para un sistema unidimensional simplificado para proporcionar conocimiento sobre cómo se puede diseñar la armadura con base en este concepto. Se asume que las propiedades de un material viscoelástico pueden representarse como un sólido lineal estándar (SLS), que consiste en un resorte elástico lineal en paralelo con un elemento Maxwell (un resorte elástico lineal y un amortiguador viscoso lineal conectado en serie), proporcionando un único tiempo de relajación característico. Los parámetros que describen las ecuaciones constitutivas para un sólido lineal estándar son el módulo sin relajar, E_u , el módulo relajado, E_r , y el tiempo de relajación, τ . (En la presente enseñanza, el uso de la palabra "módulo" para un polímero, siempre implica "módulo de almacenamiento" o "la parte real" del módulo complejo). Si tal material se somete a una tensión oscilante en la frecuencia f , la relación del módulo de pérdida con el módulo de almacenamiento se proporciona por

$$\tan \delta = \frac{(E_u - E_r) f \tau}{\tau^2 f^2 E_u + E_r} \quad (6)$$

La energía disipada en el material escala con $\tan \delta$. Puede mostrarse que el valor máximo de esta cantidad se proporciona por

$$\tan \delta_{max} = \frac{E_u - E_r}{2\sqrt{E_r E_u}} \quad (7)$$

50 en una frecuencia crítica de

$$f_{crit} = \frac{\sqrt{E_r / E_u}}{\tau} \quad (8)$$

Por lo tanto, puede verse que un material óptimamente disipador es uno en el que la frecuencia de una onda de tensión coincide con la frecuencia crítica, y la diferencia en el módulo relajado y sin relajar es tan grande como es posible.

5 El problema con el uso de materiales viscoelásticos para disipar la energía de una explosión (o impacto impulsivo) es que el impulso se suministra normalmente a la armadura en la forma de un único pulso, representado por un amplio intervalo de frecuencias en el dominio de Fourier. Ambas consideraciones, el único pulso y el amplio intervalo de frecuencias características, puede parecer que hacen que los materiales viscoelásticos sean poco atractivos para disipación de energía en esta aplicación. Sin embargo, como se explica después, es posible usar una estructura multicapa para sintonizar el pulso de explosión en frecuencias características que luego pueden disiparse por una elección apropiada de materiales viscoelásticos. El desafío de materiales potenciales desde una perspectiva del desarrollo es que las frecuencias asociadas con esta sintonización estarán en el intervalo para el que las propiedades de polímeros solo han recibido un estudio limitado.

15 Para lograr la sintonización de explosión requerida para realizar la amortiguación óptima, un mínimo de tres capas se necesita. La primera capa debería ser un material lineal elástico rígido (aquí, se asume que es isotrópico), con una gran impedancia acústica en relación con la segunda capa. La longitud de la primera capa en la dirección de propagación de onda es L_1 , el módulo es E_1 y la densidad es ρ_1 . La segunda capa debería ser elástica también. La longitud de la segunda capa es L_2 , el módulo es E_2 y la densidad es ρ_2 . La impedancia acústica de la segunda capa necesita ser mucho menor que la de la primera capa para asegurar la sintonización: $\sqrt{E_1 \rho_1} \gg \sqrt{E_2 \rho_2}$. Como resultado de esta incompatibilidad acústica, las reflexiones internas entre esta interfaz y la superficie de armadura sintonizarán las vibraciones a un valor característico de

$$f_A = \frac{\sqrt{E_1 / \rho_1}}{2L_1} \quad (9)$$

25 Las simulaciones numéricas que usan el código de elemento finito comercial ABAQUS confirman que la ecuación 9 proporciona una descripción precisa de esta frecuencia característica siempre que la relación entre las impedancias de las dos capas sea mayor que aproximadamente 70. La tercera capa debería ser una capa viscoelástica que disipa la energía de la explosión sintonizada. Esta capa tiene longitud L_3 , densidad ρ_3 , módulo sin relajar E_u , módulo relajado E_r y constante de tiempo τ . Las propiedades de esta capa deberían ser tales que su frecuencia de amortiguación característica coincida con la frecuencia sintonizada proporcionada por la ecuación 9.

30 La energía disipada desde las ondas de tensión que viajan a través de la capa viscoelástica de una longitud determinada se incrementa con el número de ciclos de carga y descarga de las ondas dentro de la capa, y con su amplitud. Estos dos conceptos añaden algunas consideraciones adicionales al diseño de la armadura multicapa. Primero, aunque la incompatibilidad de impedancia entre la primera y segunda capa debe ser lo suficientemente grande para proporcionar sintonización de frecuencia, no debe ser tan grande como para evitar que las ondas de tensión de amplitud significativa se transmitan a la capa de absorción de energía. En las simulaciones aquí presentadas, se establece $E_1 \rho_1 / E_2 \rho_2 = 5000$ para cumplir estos criterios. Por motivos similares, para asegurar una amplitud razonable de ondas de tensión para disipación, la impedancia de la tercera capa debe ser relativamente alta en comparación con la impedancia de la segunda capa. Además, la necesidad de muchos ciclos de tensión que deben ocurrir dentro de la capa viscoelástica sugiere que se debería intentar sintonizar la frecuencia de explosión con un valor lo más alto posible, consistente con encontrar un material con una constante de tiempo adecuada. Cuanto mayor sea la frecuencia, menor volumen de material se necesita para disipar la energía (para una velocidad de onda determinada). Al contrario, se puede considerar ralentizar la velocidad de onda en el material viscoelástico para maximizar el número de ciclos que se experimentan por la explosión sintonizada cuando atraviesa la tercera capa.

45 Se aprecia desde los cálculos de elemento finito que existe una segunda frecuencia característica para la explosión sintonizada, f_B , correspondiente al periodo para una onda que viaja de un lado a otro a través de las tres capas. Esta segunda frecuencia juega un papel importante en el análisis ya que el impulso se transmite por la armadura bien sintonizada en una serie de pulsos separados por múltiplos enteros de $1/f_B$. En principio, se podrían añadir otras capas o usar materiales con constantes de tiempo múltiples, para disipar la energía transportada en esta frecuencia. Sin embargo, ya que siempre es mucho menor que f_A , y transporta menos energía, la atención solo se enfoca en este análisis de disipar la energía transportada por f_A .

5. Análisis de elemento finito de mitigación de explosión

50 En esta sección, se presentan resultados del análisis de elemento finito realizado para examinar mitigación de explosión usando el concepto de sintonización de explosión antes analizado. En estos resultados, se compara la amplitud máxima de la onda de tensión, P_t , y el impulso efectivo, I_{ef} transmitido a través de la armadura, a P_0 y I_0 de la

explosión original. El rendimiento de este concepto se compara entonces con el rendimiento de sistemas que dependen de la elasticidad o plasticidad únicamente.

En este análisis, la interacción entre la estructura de soporte y el objetivo delicado no se abordan. Se asume que, desde una perspectiva de diseño, las características del pulso de presión que la estructura puede soportar sin dañar el objetivo se conocen desde un análisis separado del objetivo y la estructura de soporte. Los cálculos de elemento finito se realizan usando el código comercial ABAQUS Explicit. La armadura y la estructura de soporte se modelan usando elementos de ladrillo de ocho nodos tridimensionales con integración reducida. La geometría se muestra en la FIG. 1. Los desplazamientos a lo largo de un conjunto de caras xz y xy se limitan en las direcciones y y z respectivamente. Las otras caras xz y xy estaban libres de tracción. Las interfaces entre las capas internas de la armadura se unieron. La estructura de soporte era elástica lineal con un módulo de E_s , y la interfaz entre esta y la armadura era sin fricción.

Una presión variable en el tiempo $P(t)$ se aplicó a la superficie externa de la armadura, a lo largo de la dirección x (FIG. 1). Esta presión disminuyó linealmente a cero desde un valor máximo de P_0 durante un tiempo t_0 , para proporcionar un impulso de $I_0 = P_0 t_0 / 2$. Aunque los resultados para solo una forma particular de presión aplicada se han presentado en este trabajo, se verificó que las conclusiones principales del estudio no eran sensibles a esta elección. La presión máxima transmitida a la estructura, P_t , se adoptó como el valor máximo de la tensión longitudinal en la superficie interna de la armadura, como se calcula desde los cálculos de elemento finito. La determinación del impulso efectivo transmitido a la estructura era más complicada. Tal como se analiza en más detalle después, existen dos tipos distintos de comportamiento observado. En un tipo de comportamiento, la transferencia de momento completa a la estructura/sistema objetivo ocurrió bastante uniformemente en un único pulso amplio con un periodo que varía desde aproximadamente $10 t_0$ a aproximadamente $100 t_0$. En otro tipo de comportamiento, el momento se transfirió sobre un gran número de pulsos amplios separados por períodos significativos de tiempo. Debido a las escalas de tiempo implicadas, solo el impulso suministrado en el primer pulso amplio se consideró e identificó con I_{ef} . El impulso efectivo o transmitido, como sea apropiado, se determinó integrando la tensión longitudinal en la superficie interna de la armadura sobre el primer pulso amplio suministrado a la estructura. El valor del impulso transmitido en cualquier punto en el tiempo se verificó comparándolo con el momento que proporcionó a la estructura de soporte:

$$L_{trans} = V_{m\acute{a}x} \rho_s L_s \quad (10)$$

Donde $V_{m\acute{a}x}$ es la velocidad de partículas media máxima, ρ_s es la densidad y L_s es la longitud de la estructura de soporte (FIG. 1).

5.1. Análisis de la armadura de tres capas

El material y parámetros geométricos que describen las diferentes capas de la armadura y el objetivo se han definido antes. Cada capa es isotrópica. La capa 1 tiene un módulo de Young de E_1 , una densidad de ρ_1 y una longitud de L_1 . La capa 2 tiene un módulo de Young de E_2 , una densidad de ρ_2 y una longitud de L_2 . La capa viscoelástica 3 tiene un módulo sin relajar de E_u , un módulo relajado de E_r , un tiempo de relajación característico de τ , una densidad de ρ_3 y una longitud de L_3 . La placa que representa la estructura de soporte tiene un módulo de Young de E_s y una masa de m_s .

Esas dimensiones y propiedades, más las dos características de la explosión, hacen un total de quince variables y tres unidades diferentes para describir la propagación de la onda de tensión por la armadura. Por tanto, según la teoría de Buckingham-II, el impulso y la presión resultantes deben ser una función de doce grupos sin dimensión. Sin embargo, los cálculos de elemento finito mostraron que muchos de estos grupos no tienen una influencia significativa en los resultados, en ciertas condiciones limitantes. Por ejemplo, el módulo de la estructura no tiene efectos si $E_s/E_u \gg 1$. Como se analizó antes, $E_1 \rho_1 / E_2 \rho_2$ se estableció igual a 5000 en todos los cálculos, ya que este valor demostró ser un compromiso efectivo entre proporcionar una buena sintonización y permitir el paso de la onda de tensión en la capa de disipación de energía. Además, las masas de la estructura de soporte y la armadura se establecieron arbitrariamente igual entre sí, por lo que el impulso transmitido sería igual al pulso incidente en un sistema perfectamente elástico (Ec. 4) y a una mitad del impulso incidente en un sistema perfectamente plástico (Ec. 5). Otros grupos sin dimensión que tienen efectos insignificantes en la transmisión de una onda de tensión a través de la armadura se mantuvieron en intervalos que eran razonables para la aplicación propuesta y para materiales realísticos. Con estas limitaciones, los cálculos de elemento finito mostraron que existen esencialmente otros cuatro grupos importantes a considerar, por lo que I_{ef}/I_0 y P_t/P_0 pueden expresarse como

$$\frac{I_{ef}}{I_0} = f\left(\frac{f_{cr\acute{i}t}}{f_A}, \frac{t_3}{t_1}, \frac{E_{cr\acute{i}t} \rho_s}{E_2 \rho_2}, \frac{E_r}{E_u}\right)$$

$$\frac{P_t}{P_0} = f\left(\frac{f_{cr\acute{i}t}}{f_A}, \frac{t_3}{t_1}, \frac{E_{cr\acute{i}t} \rho_s}{E_2 \rho_2}, \frac{E_r}{E_u}\right) \quad (11)$$

La frecuencia crítica, f_{crit} , y la frecuencia sintonizada f_A , se han definido en las Ecuaciones 8 y 9. E_{crit} es el módulo de almacenamiento de la tercera capa en la frecuencia crítica: $E_{crit} = (2E_u E_r)/(E_u + E_r)$. Finalmente, los parámetros t_1 y t_3 se definen como

$$t_1 = L_1 \sqrt{\rho_1 / E_1} \quad (12)$$

5 y

$$t_3 = L_3 \sqrt{\rho_3 / E_{crit}} \quad (13)$$

donde t_1 es el tiempo que le lleva a una onda de tensión pasar a través de la capa 1, y t_3 es el tiempo que una onda de tensión en la frecuencia crítica viaja a través de la capa 3.

10 Una onda bien sintonizada se espera que sea óptimamente amortiguada en $f_{crit}/f_A = 1$, y la efectividad de la amortiguación se espera que aumente con el número de ciclos que experimenta la onda de presión en la capa viscoelástica. El primer concepto se ilustra por las gráficas en las FIGS. 2 y 3 que muestran los resultados de cálculos sobre un intervalo de valores para f_{crit}/f_A . Estas gráficas muestran mínimos en el impulso efectivo y la presión transmitida en $f_{crit}/f_A = 1$. El segundo concepto se ilustra por las gráficas en las FIGS. 4 y 5 que muestran los resultados de cálculos sobre un intervalo de valores para t_3/t_1 . Estas gráficas muestran cómo el impulso efectivo y la presión transmitida disminuyen a medida que el tiempo para la onda de tensión que viaja por la capa viscoelástica se incrementa. Esto resulta en más ciclos de carga y descarga, y por tanto un incremento en la cantidad de energía puede disiparse por un sistema viscoelástico sintonizado. El tiempo de viaje puede incrementarse bien incrementando el espesor de la capa viscoelástica o disminuyendo la velocidad de onda.

20 De importancia particular en las FIGS. 2 y 4 son los regímenes en los que $I_{ef} < I_{máx}$: donde el impulso efectivo transmitido al objetivo es mejor que lo que se esperaría para una armadura perfectamente plástica. El motivo de esto descansa en la definición del impulso efectivo. Esto puede explicarse en referencia a la FIG. 6 que muestra la presión transmitida al objetivo como función de tiempo para una armadura bien sintonizada y óptimamente amortiguada. Se observa que existe un pulso de presión amplio de duración t_{ef} seguido por un largo período donde la armadura pierde contacto con el objetivo. El impulso transmitido a la armadura en este pulso inicial se define como el impulso "efectivo" ya que los pulsos posteriores ocurren mucho después por lo que probablemente no tienen efecto significativo en la tensión máxima experimentada por el objetivo (véase 7. Información adicional). Con una capa viscoelástica bien sintonizada, la magnitud del impulso efectivo puede ser significativamente menor que el impulso esperado a transferir en una colisión perfectamente plástica, ya que toda la transmisión del impulso puede requerir muchos pulsos menores posteriores. En el cálculo de las FIGS. 2 y 4, la masa del objetivo se asume que es igual a la masa de la estructura, por lo que el impulso transmitido para una colisión totalmente plástica se espera que sea la mitad del impulso incidente. Por tanto, en estas gráficas, un valor de $I_{ef} < 0,5 I_0$ indica que la onda de presión transmitida se divide como se indica en la FIG. 6. Al contrario, un valor de $I_{ef} > 0,5 I_0$ indica que el impulso se suministra en un único pulso amplio.

35 La FIG. 2 muestra que no existe reducción significativa en el impulso efectivo si $E_r / E_u \geq 0,1$, porque no existe entonces ninguna disipación de energía, incluso para una armadura bien sintonizada. Correspondientemente, la caída de la amplitud de la presión transmitida para $E_r / E_u \geq 0,1$ mostrada en la FIG. 3 se determina solo por incompatibilidad de impedancia. Finalmente, se apreciará desde las gráficas en las FIGS. 2 y 3 que cuando E_r / E_u es pequeño, los mínimos son bastante amplios para valores de $f_{crit}/f_A > 1$. Esto puede explicarse por referencia a las ecuaciones 6 y 8; cuando E_r / E_u se vuelve menor, tan δ exhibe un máximo más amplio sesgado hacia $f_{crit}/f_A > 1$. Como se analizará más tarde, esto puede tener una importancia práctica significativa desde la perspectiva del diseño, al reducir la sensibilidad del rendimiento de la armadura a variaciones en condiciones operativas.

45 Las FIGS. 6A y 6B ilustran los resultados de elemento finito de cómo la presión varía con el tiempo para tres elementos diferentes dentro de la capa viscoelástica: en el borde delantero de la capa (elemento 1), en el medio de la capa (elemento 2) y en la parte trasera de la capa (elemento 3). La magnitud de la presión máxima que entra en la capa viscoelástica depende de la incompatibilidad de impedancia entre las capas 2 y 3. Esta presión se atenúa entonces cuando viaja a través del material viscoelástico. En una armadura bien sintonizada con amortiguación limitada, el momento se transmite a la estructura en un único pulso amplio, después de lo que el contacto se pierde (en el escenario usado aquí de una estructura sin unión). El impulso transmitido en tal caso puede estar en cualquier lugar entre 100 y 50 % del impulso incidente (en este caso de masas iguales), dependiendo de la cantidad de amortiguación. Las FIGS. 6A y 6B ilustran un diferente caso donde la armadura tiene más amortiguación. Ahora, el contacto se pierde después de transmitir menos del 50 % del impulso. Sin embargo, el contacto se restablece posteriormente y unos incrementos adicionales del momento se transfieren a la estructura en intervalos de $1/f_B$, hasta que el 50 % total se ha transmitido. La FIG. 6C muestra la presión en el último elemento cuando existe incluso más amortiguación. Ahora, los pulsos posteriores de transferencia de momento están incluso más alejados, pero siempre separados por múltiplos de $1/f_B$. En este caso, todo el impulso se transmite sobre una escala de tiempo de $\sim 10\,000 t_0$ (no se muestra). Estas escalas de tiempo sobre las que el impulso total se transmite son tan largas que la respuesta de la estructura y el objetivo puede no estar ya dominada por el impulso que reciben, sino por la presión máxima. Esto es por lo que solo el impulso efectivo (transmitido en el primer pulso amplio) se ha representado en la gráfica de las FIGS. 2 y 4.

5.2. Comparación de la armadura sintonizada con explosión respecto a un diseño elástico

Para subrayar el rendimiento mejorado de la armadura sintonizada con explosión, el rendimiento de enfoques alternativos que dependen de solo elasticidad o plasticidad también se ha analizado, manteniendo parámetros equivalentes iguales, y manteniendo las masas de la armadura y la estructura iguales para proporcionar una comparación válida. El primer caso considerado es una armadura que consiste en dos capas elásticas lineales. La presión transmitida en un sistema elástico puede reducirse significativamente usando la incompatibilidad de impedancia entre las dos capas, con $E_1\rho_1/E_2\rho_2 \gg 1$. Estas condiciones se cumplen con diseños de casco que consisten en una cubierta exterior hecha de un polímero vítreo de alto módulo y un interior realizado de espuma elástica de baja densidad y baja impedancia.

- 5 Como se muestra en la FIG. 7, con todo lo demás siendo igual, la disipación proporcionada por la capa viscoelástica sintonizada reduce la presión transmitida más eficazmente que un sistema elástico. Además, el problema principal con un diseño que depende solo de materiales elásticos, es que no existe disipación de energía, por lo que cualquier reducción en el impulso depende de tener una armadura masiva. Sin embargo, se aprecia que una baja impedancia para la segunda capa podría incrementar la escala de tiempo para la transmisión del impulso suficientemente para hacer que la amplitud de presión sea una consideración de diseño más importante. Para cascos y armaduras baratas de bajo rendimiento, esto es ciertamente una estrategia posible. Que sea un enfoque apropiado o no dependería de la aplicación.

5.3. Comparación de la armadura sintonizada con explosión respecto a un diseño plástico

En el diseño de estructuras que pueden acomodar directamente una explosión sin pérdida de integridad estructural (por ejemplo el casco de un barco), es también reconocido que una capa plástica puede usarse para disipar energía. Para ilustrar esto, se considera el rendimiento de una armadura que depende de una capa plástica para disipar energía. Como se ha establecido, el diseño de la armadura plástica depende de una capa superficial para convertir el pulso en energía cinética que luego puede disiparse por la capa plástica. Una armadura ligera depende de una espuma (o cercha) para la capa plástica, por lo que el análisis asume una forma similar. La capa superficial consiste en un material elástico rígido (E_1, ρ_1 y L_1). La capa de disipación de energía es una espuma perfectamente plástica /elástica (E_2, ρ_2 y L_2) con un límite elástico de σ_y , y una tensión de densificación de ϵ_{dens} .

- 20 La estructura/sistema objetivo tiene una masa de m_s , que se adopta como igual a la masa de la armadura, para proporcionar un punto de comparación con los otros cálculos en este caso.

Los cálculos de elemento finito indicaron que dos grupos no dimensionales eran de importancia primaria al determinar la disipación de energía. El primer grupo es la relación del límite elástico de la segunda capa con la amplitud de la onda de presión transmitida en esa capa:

- 30

$$\frac{\sigma_y (\sqrt{E_1\rho_1} + \sqrt{E_2\rho_2})}{2P_0\sqrt{E_2\rho_2}}$$

Esta relación necesita ser mucho menor que uno, para asegurar que una deformación plástica eficaz de la capa plástica ocurre. Si es demasiado grande, entonces la espuma se comporta de manera elástica, como se describe en la sección anterior. La presión transmitida también depende de esta relación. Si la relación es grande, la presión transmitida depende de la incompatibilidad de impedancia, como con la armadura elástica. Si la relación es pequeña, la presión transmitida se limita al límite elástico.

- 35

El segundo grupo no dimensional que es importante al determinar la disipación de energía y el impulso transmitido es lo que se llama "el potencial disipador" de la armadura. Esto es igual a la energía de tensión plástica máxima que puede disiparse por la segunda capa dividido por la energía cinética de la primera capa:

- 40

$$2\sigma_y L_2 E_{dens} \rho_1 L_1 / l_0^2$$

La FIG. 8 muestra una gráfica de cómo el impulso transmitido varía con este parámetro. Cuando el potencial disipador es pequeño, no existe deformación plástica, y el impulso transmitido es igual a b . El caso totalmente plástico se desarrolla cuando el potencial disipador es igual a uno, y $l_{total}/l_0 = 0,5$ (dentro de una incertidumbre numérica).

- 45 El punto clave en este caso es que en comparación con los resultados de viscoelasticidad, los resultados de plasticidad nunca exhiben un régimen donde el pulso se transmite al objetivo fuera de una onda de presión inicial amplia. La FIG. 9 proporciona ilustraciones representativas de cómo el impulso transmitido a la estructura/sistema objetivo varía con el tiempo para armadura elástica, la armadura plástica más eficaz, y dos ejemplos de armadura viscoelástica. Para la armadura plástica, el impulso siempre se transmite sobre un único pulso amplio, y el valor del impulso transmitido durante este pulso está siempre en el intervalo de l_0 a $0,5 b$, dependiendo del "potencial disipador" de la armadura. Para la armadura viscoelástica, si el impulso transmitido en el pulso inicial es mayor de $0,5 b$, entonces no hay transmisión adicional en un momento posterior. Sin embargo, el impulso efectivo transmitido por una armadura

- 50

viscoelástica bien sintonizada y amortiguada en este primer pulso puede ser menor de 0,5 k . Con un objetivo que se mueve libremente asumido en los cálculos, el contacto puede perderse momentáneamente entre la armadura y el objetivo, incluso con transmisión parcial del impulso, y no restablecerse durante algún tiempo.

6. Conclusiones

5 Un simple modelo dinámico ilustra que la tensión en un objetivo se determina tanto por el impulso que golpea la estructura de soporte, como por la presión transmitida directamente. La importancia relativa de cada parámetro depende de la escala de tiempo de la onda de presión en comparación con la escala de tiempo de la respuesta dinámica de la estructura/sistema objetivo. El diseño de cualquier armadura usada como protección desde la explosión en aplicaciones militares o por impacto en deportes o aplicaciones industriales necesita abordar todos estos parámetros. La armadura puede mitigar la presión y el impulso; también puede cambiar la escala de tiempo sobre la que se transmite la onda de presión. Cambiar la escala de tiempo sobre la que un pulso de presión se transmite puede, dependiendo de la aplicación, alejar el diseño de uno en el que el impulso necesita mitigarse, a uno en el que la presión necesita limitarse.

10 La incompatibilidad de impedancia puede utilizarse para controlar la presión transmitida, pero la disipación de energía en sus mecanismos necesita mitigar el impulso transmitido. En la presente enseñanza se propone que, usando polímeros viscoelásticos para disipar energía por deformación cíclica, se puede conseguir un concepto de diseño más eficaz que usando materiales plásticos para disipar energía durante un único evento de carga. Sin embargo, para conseguir este concepto, es necesario que las ondas de tensión que viajan a través de la armadura lo hagan a frecuencias correspondientes a transiciones moleculares apropiadas en los polímeros. Normalmente, la energía de un impacto o explosión se distribuye ampliamente sobre múltiples frecuencias. Por tanto, esta energía debe sintonizarse con un espectro estrecho que puede disiparse óptimamente por el polímero. Se propone hacer esto a través de un diseño multicapa en el que las capas exteriores sintonizan las ondas de tensión para coincidir con la frecuencia de amortiguación crítica de la capa interior. Cuando la onda de tensión de frecuencia alta viaja a través de esta capa viscoelástica, sufre múltiples ciclos de carga y descarga que pueden resultar en una disipación de energía significativa sobre una duración corta.

15 Un análisis de elemento finito de este concepto ha ilustrado varias limitaciones importantes en el diseño. La capa exterior debe tener una alta impedancia acústica en comparación con su vecino, por lo que la onda puede sintonizarse por múltiples reflejos en la interfaz entre las dos capas. Normalmente, esto implicaría una capa exterior con un módulo relativamente alto; pero se reconoce que esta capa exterior puede tener además que servir a otros fines funcionales tal como la resistencia a penetración balística. Una relación de impedancia de aproximadamente 5000:1 parece apropiada.

20 Existen dos limitaciones significativas en las propiedades de material de la capa viscoelástica usada para disipación de energía. Primero, que necesita tener una relación muy baja del módulo relajado con el módulo sin relajar para proporcionar un alto valor de $\tan \delta$ en una frecuencia crítica que coincide con la frecuencia sintonizada de la primera capa. Segundo, esta frecuencia crítica en general necesita ser muy alta. Por ejemplo, si el módulo de la capa exterior es del orden de 1-10 Gpa, su densidad es 1000 kg·m⁻³, y su longitud es 5 mm, su frecuencia crítica será aproximadamente 100-300 kHz. Esto conduce a algunos desafíos experimentales al identificar y diseñar polímeros adecuados, ya que está muy por encima del intervalo de frecuencias en las que los polímeros se investigan normalmente. Sin embargo, un procedimiento para medir $\tan \delta$ y el almacenamiento de los módulos de pérdida en el intervalo de MHz usando ultrasonidos se ha demostrado, como con análisis dieléctricos.

25 La transición vítrea puede ser un posible máximo de pérdida de energía a explorar para estos fines, y es instructivo considerar qué valor de temperatura de transición vítrea, T_g , medida en el intervalo de 1 Hz puede corresponderse a una transición vítrea en el intervalo de 200 kHz a una temperatura operativa de T_0 . Esto puede estimarse desde la ecuación WLF, para un factor de desplazamiento de 2×10^5 :

$$45 \quad \log(2 \times 10^5) = \frac{17,5(T_0 - T_g)}{S_2 + T_0 - T_g} \quad (14)$$

Esta expresión tiene como resultado una temperatura de transición vítrea medida en 1 Hz que está aproximadamente 23 °C por debajo de la temperatura operativa. Por ejemplo, si el interior del casco se mantiene a temperatura corporal, la temperatura de transición vítrea requerida sería aproximadamente 14 °C. Sin embargo, existirá obviamente un intervalo de temperaturas operativas, dependiendo del entorno externo. Afortunadamente, el análisis (FIG. 2) muestra que la eficacia del diseño propuesto es relativamente insensible a f_{crit} siempre que $f_{crit}/f_A > 1$ y E_r/E_u es muy pequeño. En la práctica, esto coloca un límite superior en T_g de aproximadamente 20-30 °C por debajo de la temperatura más inferior que la armadura experimenta en servicio. Las temperaturas mayores, dentro de un intervalo razonable, tienen como resultado que el sistema esté dentro del punto muerto donde la respuesta no es muy sensible a f_{crit}/f_A . En conclusión, este resultado parecería indicar que existe mucha flexibilidad para usar incluso a frecuencias de sintonización mayores que 200 kHz, ya que el valor requerido de T_g no es particularmente bajo.

7. Información adicional

En la presente enseñanza, se asume que un objetivo delicado puede dañarse si experimenta una tensión máxima mayor que un valor crítico, y que esta tensión puede transmitirse bien directamente en la forma de una onda de tensión o a través de interacciones dinámicas entre el objetivo y su estructura de soporte. Una tensión crítica (para un área determinada y masa de objetivo) es equivalente a una aceleración crítica del objetivo. Este concepto de aceleración crítica forma la base de unos criterios usados normalmente para investigaciones de lesiones cerebrales. Sin embargo, por motivos prácticos, la aceleración medida en tal contexto es la de la estructura de soporte (cráneo) que se usa como representación para la aceleración del objetivo (cerebro). La cabeza es un sistema dinámico complejo, por lo que la fuerza transmitida al cerebro no puede simplemente adoptarse como la fuerza aplicada al (aceleración del) cráneo. El fin del presente análisis es usar un sistema dinámico simple para ilustrar este punto, y derivar criterios mecánicos claramente identificables que se usan en el texto principal para evaluar conceptos de diseño para armaduras para proteger un sistema dinámico simple. Se reconoce que una cabeza es un sistema dinámico mucho más complicado que el considerado aquí, y que existen umbrales críticos no bien establecidos; sin embargo, se espera que los principios generales ilustrados por el actual análisis sean válidos en concepto, si no en detalle.

Como se muestra en la FIG. 10, un objetivo delicado soportado por un soporte estructural que se somete a una explosión se modela como dos masas de punto acopladas por dos resortes. El soporte estructural se representa por una masa m_1 que se une a un cimiento rígido por un resorte de rigidez k_1 . Por ejemplo, en un modelo simple de la cabeza, este soporte estructural es el cráneo, y el resorte representa la rigidez del cuello y el cuerpo y cualquier otro límite. El pulso de presión transmitido desde la explosión, bien directamente o modificado por el paso a través de la armadura, $P(t)$ se aplica a este soporte estructural. El objetivo delicado se representa por la masa m_2 que se une a un soporte estructural por un resorte de rigidez k_2 . Por ejemplo, en el modelo simple de la cabeza, el objetivo es el cerebro, y el resorte representa el fluido cerebroespinal. La carga que puede provocar daños en el objetivo se proporciona por

$$P_2(t) = k_2[x_1 - x_2] = m_2 \ddot{x}_2 \quad (15)$$

donde x_2 es el desplazamiento del objetivo, y x_1 es el desplazamiento de la estructura. La relación entre la presión impuesta por la explosión y la estructura, $P(t)$ y la presión que actúa en el objetivo, $P_2(t)$ se proporciona por

$$P_2(t) = P(t) - [m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1] \quad (16)$$

Un cálculo de la presión que actúa en el objetivo se obtiene solucionando estas dos ecuaciones, sometidas a una suposición sobre la forma del pulso de presión transmitido desde la explosión. Como ejemplo, la estructura y el objetivo se asume que están inicialmente en reposo ($x_1 = x_2 = \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = 0$), y la presión transmitida se idealiza como un pulso triangular con una fuerza máxima/área unitaria P_t y una duración de t_t .

Un análisis no dimensional de este problema indica que la presión máxima que actúa en el objetivo y en la estructura son de la forma

$$\frac{P_{m\acute{a}x}}{P_t} = f\left(\frac{m_1}{m_2}, \frac{k_1}{k_2}, \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} t_t\right) \quad (17)$$

Un cálculo MATLAB SIMULINK se realizó para mostrar cómo la presión máxima en la estructura (masa 1), $P_{1m\acute{a}x}$ y en el objetivo (masa 2), $P_{2m\acute{a}x}$ varía con $\sqrt{k_2 / m_2} t_t$ para un intervalo de masas y constantes de resorte. Un ejemplo de tal gráfico se muestra en la FIG. 11. Esta figura muestra cómo la presión máxima en la estructura es relativamente constante y aproximadamente igual a la amplitud de la presión que actúa en la estructura P_t . La presión máxima en el objetivo depende del impulso transmitido cuando el pulso transmitido es más corto que el periodo natural del objetivo. Esto depende de la amplitud de la presión transmitida solo cuando el pulso es más largo que el periodo natural del objetivo. Físicamente, se puede ver este resultado apreciando que una presión constante aplicada durante largo tiempo en la estructura tendrá como resultado una fuerza en el objetivo que no se incrementa con el tiempo.

Aunque este es un modelo dinámico relativamente simple, existen varias conclusiones importantes sobre proteger objetivos contra daños que surgen de explosiones o impactos. La primera es que la fuerza máxima en la estructura no se correlaciona con la fuerza máxima en el objetivo. Una implicación práctica de esto es que una simple medición de aceleración máxima de un cráneo no proporciona indicaciones de la fuerza que un cerebro puede experimentar. Las mediciones de aceleración son útiles como parte de un registro de historial de tiempo completo. La segunda es que la estrategia protectora correcta depende de la duración de la explosión o impacto en comparación con la frecuencia natural del objetivo que alguien intenta proteger. Si la duración del impacto es larga, entonces es la amplitud de la presión transmitida lo que debe reducirse. Esto puede realizarse por incompatibilidad de impedancia. Si la duración del impacto es corta, entonces se necesita minimizar el impulso que se transmite. Existen límites en cualquier impulso que se transmite por la armadura. Estos se ajustan por la masa relativa de la armadura. El límite superior se corresponde con el caso donde existe conservación de energía, sin disipación de energía en la armadura. El límite

5 inferior es finito y corresponde a una colisión perfectamente plástica. Desde la perspectiva de la conservación del momento, existe muy poca libertad para usar armaduras para descender la fuerza en un objetivo si la duración del pulso es muy corta. Sin embargo, como se explica en el texto, un enfoque para diseño de armadura es usar la armadura para extender la duración de un pulso incidente corto, por lo que el pulso transmitido es relativamente largo y la fuerza en el objetivo puede controlarse limitando la presión transmitida. Esto es un componente clave de la armadura viscoelástica sintonizada presentada en este documento.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo protector para mitigar un impacto o explosión, dicho dispositivo protector comprendiendo:
- 5 una primera capa con una longitud en la dirección de propagación de onda L_1 , con una primera impedancia acústica, con un módulo de elasticidad E_1 y una densidad ρ_1 ;
- una segunda capa unida a dicha primera capa, con una longitud L_2 , con una segunda impedancia acústica, con un módulo de elasticidad E_2 y una densidad ρ_2 ; y
- una tercera capa unida a dicha segunda capa;
- caracterizado porque**
- 10 dicha primera capa se hace de un material elástico lineal rígido;
- dicha segunda capa se hace de un material elástico;
- dicha tercera capa se hace de un material viscoelástico;
- dicha segunda impedancia acústica es mucho menor que dicha primera impedancia acústica para asegurar la sintonización, de manera que una relación de la primera impedancia acústica con la segunda impedancia acústica que se expresa como $\sqrt{E_1 \rho_1} \gg \sqrt{E_2 \rho_2}$, es mayor que o igual que 70;
- 15 dicha tercera capa tiene una frecuencia de amortiguación crítica que coincide con una frecuencia sintonizada específica de dicha primera y segunda capa;
- en el que dicha primera capa y dicha segunda capa se eligen colectivamente para sintonizar las ondas de tensión desde el impacto o explosión en dicha frecuencia sintonizada específica de $f_A = \sqrt{\frac{E_1 / \rho_1}{2L_1}}$.
- 20 2. El dispositivo protector de acuerdo con la reivindicación 1 en el que dicha primera capa y dicha segunda capa se eligen colectivamente para sintonizar las ondas de tensión desde la explosión o el impacto con dicha frecuencia sintonizada específica usando parámetros geométricos.
3. El dispositivo protector de acuerdo con la reivindicación 1 en el que dicha primera capa y dicha segunda capa se eligen colectivamente para sintonizar las ondas de tensión desde el impacto o explosión en dicha frecuencia sintonizada específica usando parámetros materiales.
- 25 4. El dispositivo protector de acuerdo con la reivindicación 1 en el que un espesor de al menos dicha primera capa, dicha segunda capa o una combinación de dicha primera capa y dicha segunda capa es suficiente tal que la presencia de una onda de tensión de dicha frecuencia sintonizada específica disminuye antes del paso de dicha onda de tensión a través de dicha primera capa, dicha segunda capa o dicha combinación de dicha primera capa y dicha segunda capa.
- 30 5. El dispositivo protector de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicha impedancia de dicha tercera capa es mayor que dicha impedancia de dicha segunda capa.

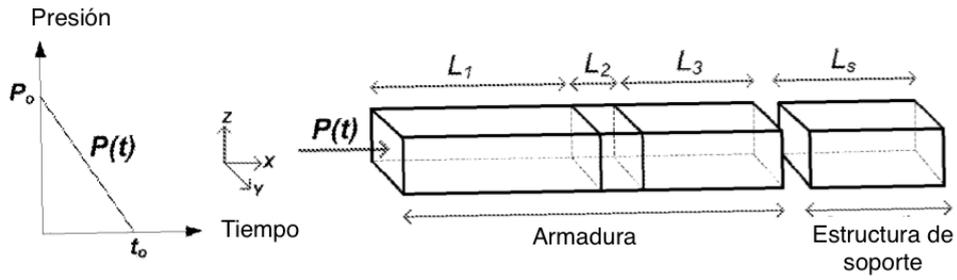


FIG. 1

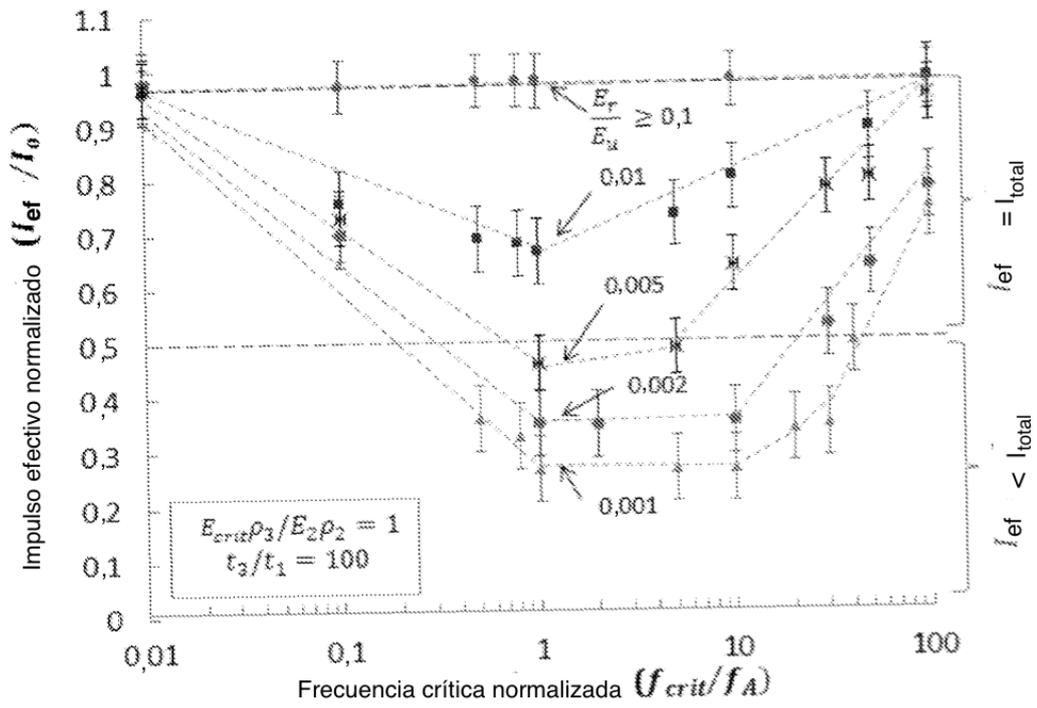


FIG. 2

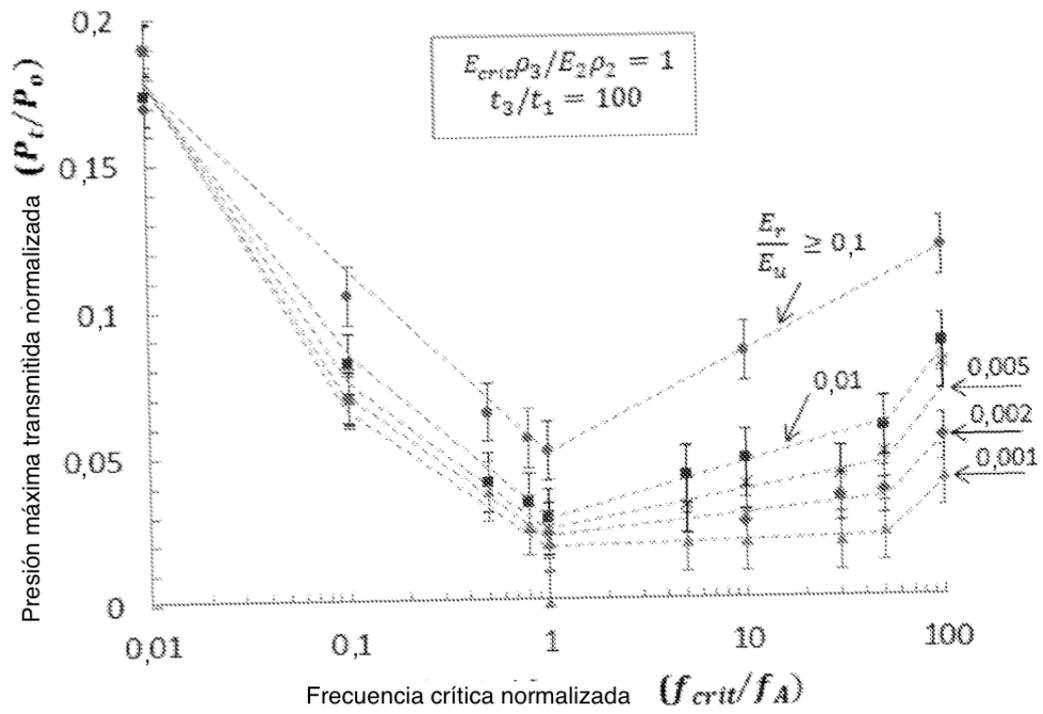


FIG. 3

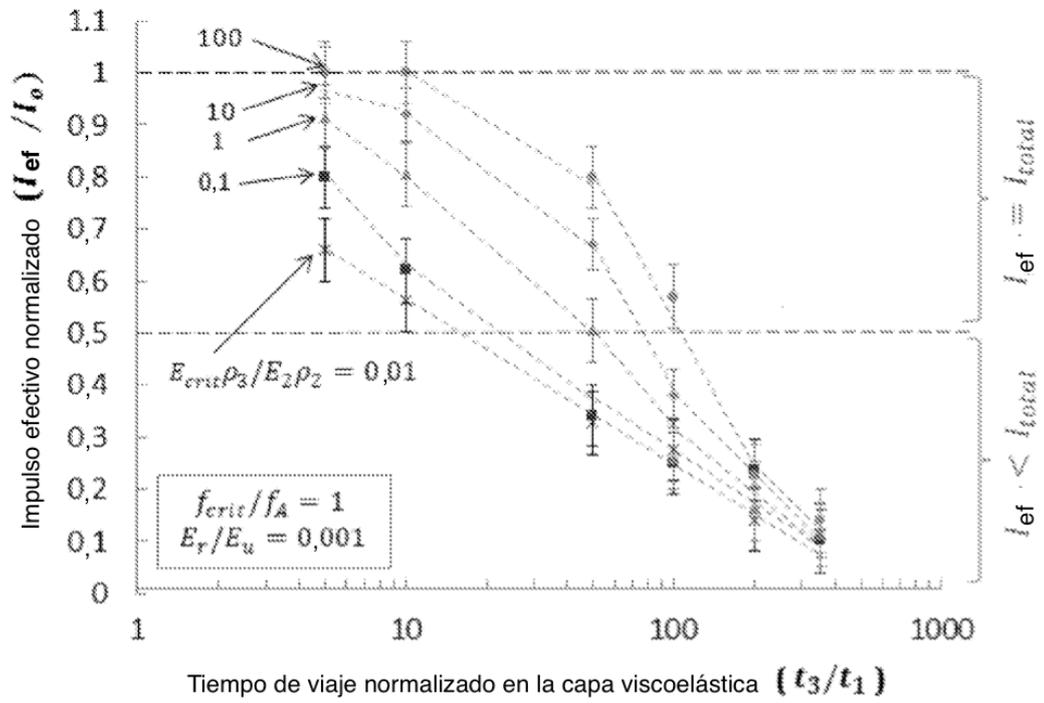


FIG. 4

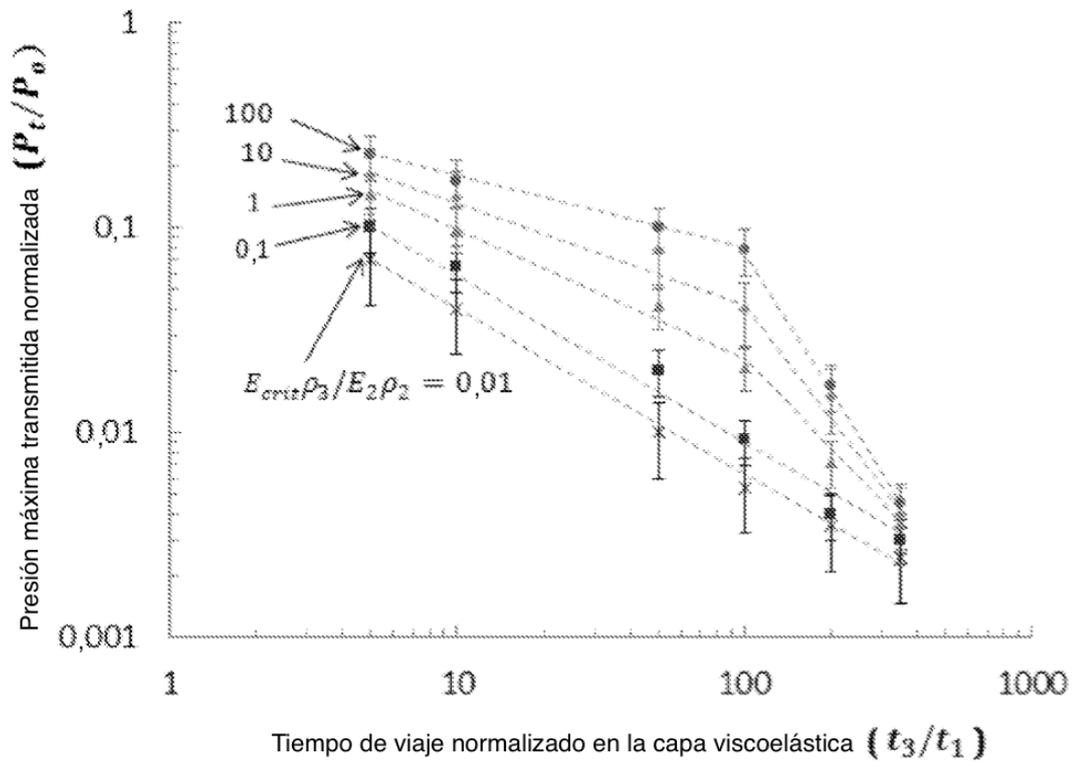


FIG. 5

FIG. 6A

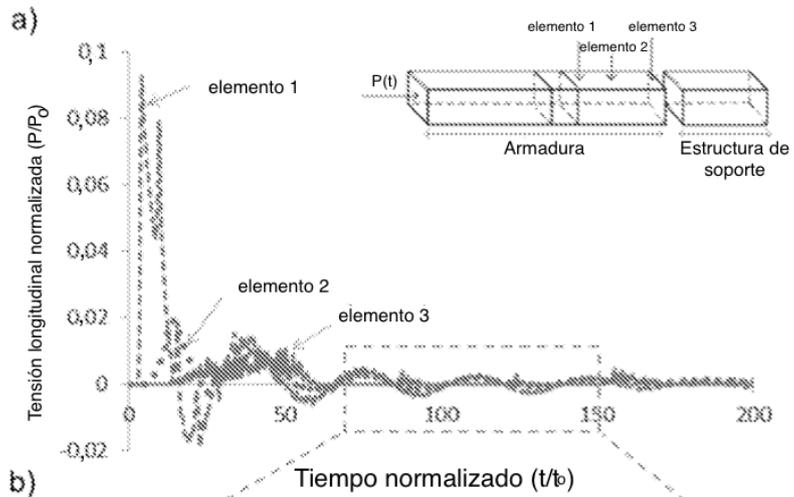


FIG. 6B

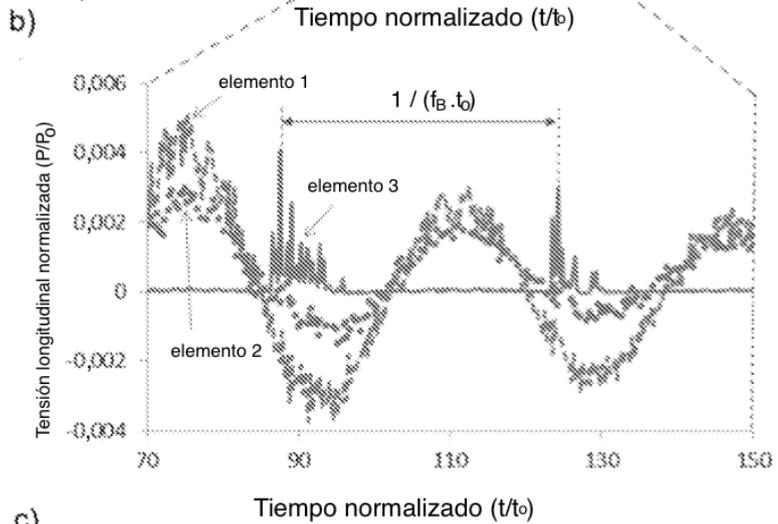
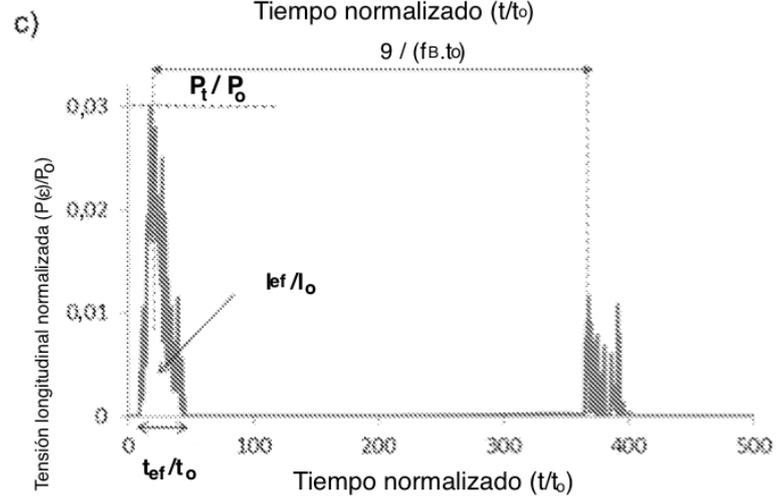


FIG. 6C



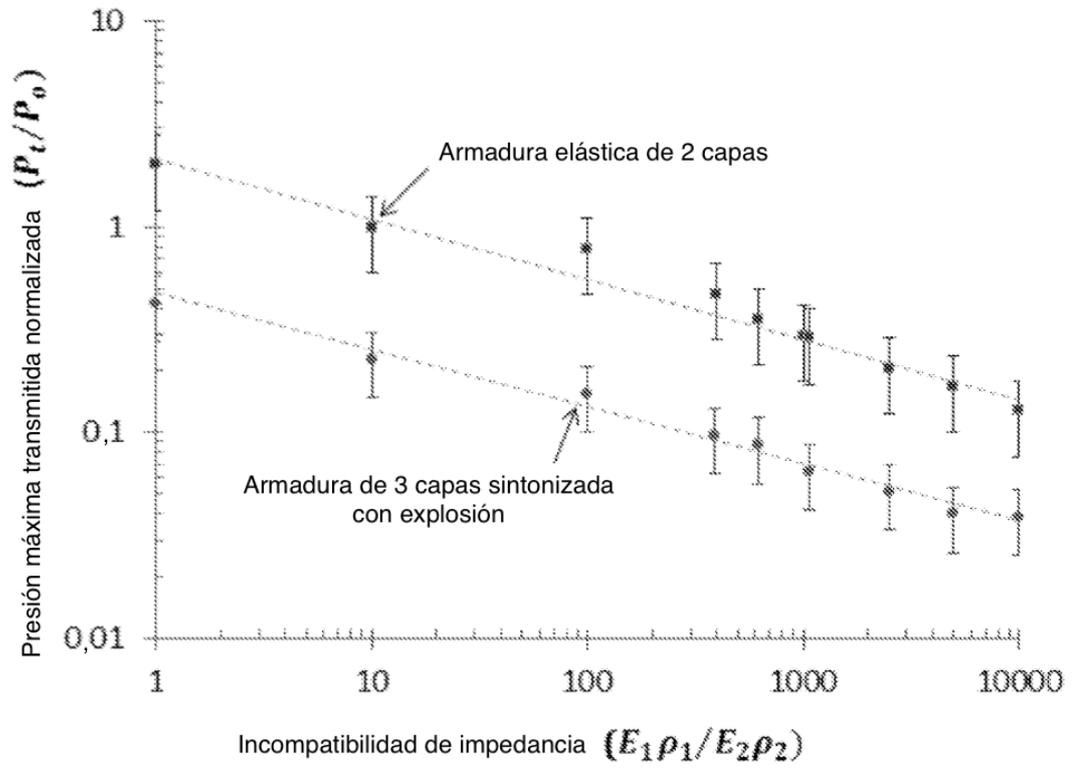


FIG. 7

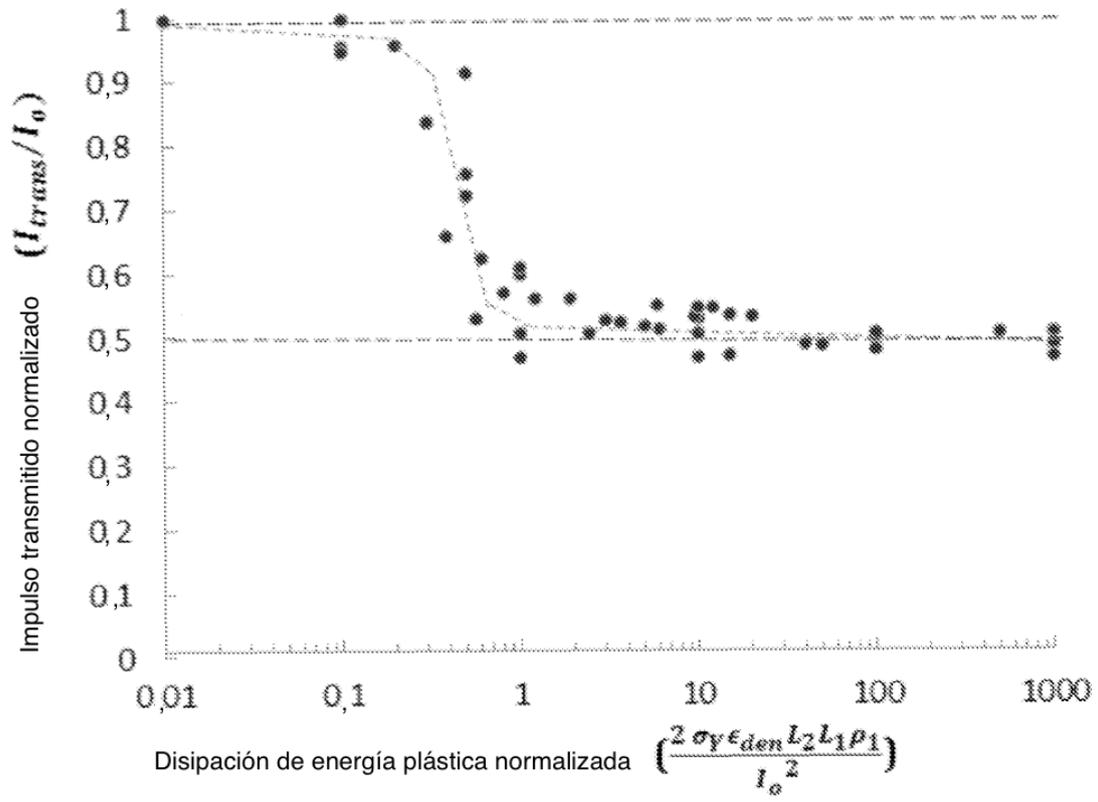


FIG. 8

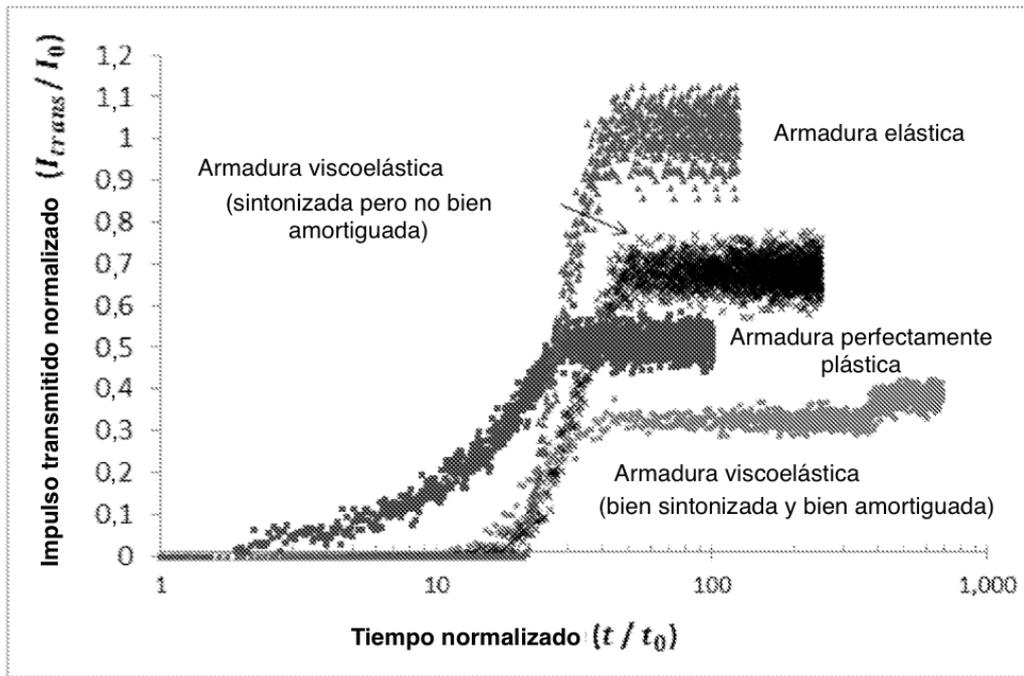


FIG. 9

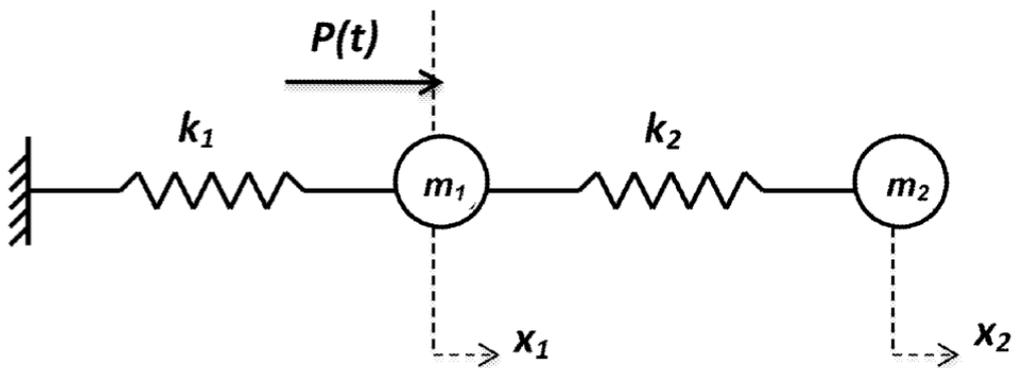


FIG. 10

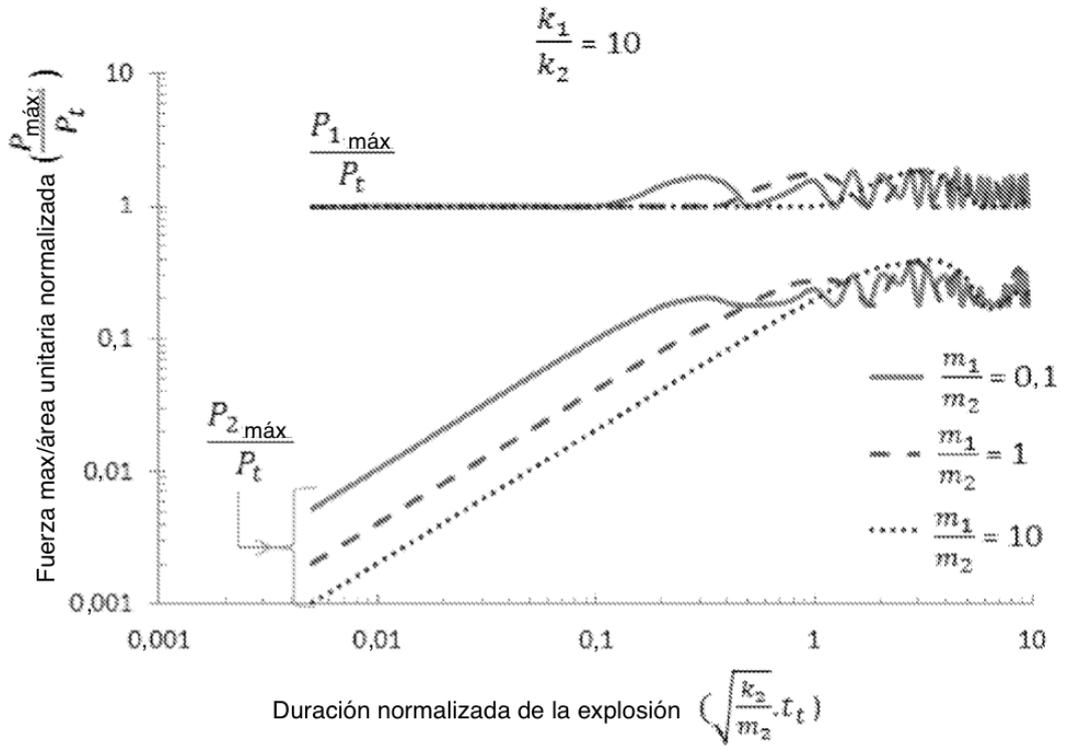


FIG. 11