

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLAS EN INTERFASES DE UNIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS BASADO EN LA RESPUESTA DINÁMICA ANTE UNA EXCITACIÓN IMPULSIVA

Filoni, Pablo; Stuardi, José; Giudici, Alejandro; Ritta, Raúl

Departamento de Estructuras. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.
Universidad Nacional de Córdoba. pablofiloni@hotmail.com

RESUMEN

Se describe el desarrollo y posterior implementación práctica de un sistema de predicción de fallas en componentes estructurales construidos con materiales compuestos. El método se enmarca dentro de los Ensayos No Destructivos (END) de contacto con la estructura en ensayo. Como método de inspección primario, se destaca por su bajo costo y rápida implementación. Debido a su portabilidad, es de aplicación a materiales que forman parte de estructuras construidas con la ventaja de poder conocer su estado de degradación sin necesidad de acudir al lugar con grandes y complejos equipos. El método demostró ser una herramienta sólida para la detección temprana de fallas y posterior toma de medidas correctivas sobre estructuras en servicio. La metodología de trabajo consiste en generar impulsos mediante golpes de corta duración en la estructura a evaluar y registrar la respuesta dinámica mediante un sensor piezoeléctrico. El sistema fue testeado en probetas de materiales compuestos de componentes estructurales análogas a piezas reales y con presencia de fallas típicas. Actualmente se está extendiendo su aplicación a estructuras compuestas del tipo civiles con el fin de localizar fisuras no visibles provenientes de movimientos estructurales repetidos y estimar su velocidad de crecimiento.

ABSTRACT

We present the development and subsequent implementation of a failure detection system for structural components built with composite materials. The method can be classified as Non Destructive Test (NDT) in contact with the structure under test. It is a preliminary test method where the most relevant advantages are low cost and fast implementation. Because of its portability, it applies to materials that are part of built structures with the advantage of knowing the state of degradation without going to the place with large and complex equipment. The method proved to be a solid tool for early detection of faults allowing corrective action in service structures. The working methodology is to generate pulses with short strokes in the structure to assess and record the dynamic response using a piezoelectric sensor. The system was successfully proved on composite materials specimens with defects similar to typical failures found at real structures. At the present, we are applying the method to civil structures. The purpose is to find invisible failures, like internal cracks originated from repeated movements of the general structure and to estimate its growth rate.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La implementación de métodos de Ensayos No Destructivos (END) para conocer el estado de las estructuras fabricadas combinando más de un material base, se remonta a tiempos en los que se aplicaban técnicas sencillas como las de inspección visual o acústica. Estas técnicas, eficientes en relación a su grado de complejidad, han sido motivadoras de nuevas investigaciones para procedimientos de END que en la actualidad permiten predecir y diagnosticar con mayor certeza el estado de degradación de una construcción, sin necesidad de ser destruida y apartada de su lugar de trabajo.

En el presente trabajo se perfecciona una metodología para la obtención de parámetros físicos o estado del material, del tipo END de contacto por golpes, para luego determinar propiedades inherentes a estructuras construidas a partir de materiales compuestos. En especial fueron estudiadas las estructuras sándwich.

Los métodos de Ensayos No Destructivos (END) se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier prueba que no implique un daño considerable al cuerpo examinado ^[1].

El ensayo de golpeteo manual se enmarca dentro de las técnicas de evaluación mecánicas. Esta prueba se realiza generalmente con un martillo convencional, cuyo tamaño es función de la estructura a excitar. Se aplica un impacto pequeño a la superficie de la estructura, para luego analizar la respuesta sonora a través del oído humano. Los defectos se pueden detectar cuando se percibe un cambio en la respuesta sonora que resulta distinta al sonido audible normal. Es un método de bajo costo, que resulta eficaz en lugares donde es difícil acceder con equipos grandes y complejos ^[2].

Una forma de aumentar la efectividad del método es implementando una metodología de trabajo que elimine la intervención subjetiva del operario. Esto puede lograrse al agregar una herramienta intermedia entre la pieza a ensayar y la persona que realiza el trabajo ^[2].

Existen diferentes métodos basados en generar una vibración en el objeto a ensayar por medio de una excitación dinámica y posteriormente analizar su respuesta para estudiar el comportamiento a lo largo de su actividad como componente estructural. De esta forma es posible detectar deterioros o inicios de fallas, de manera que los elementos sean luego remediados o reemplazados ^[1]. Por lo anteriormente mencionado se puede considerar la metodología aquí desarrollada dentro de las técnicas de trabajo empleadas para mantenimiento predictivo de componentes estructurales.

La metodología de trabajo descrita a continuación se basa en el sistema de medición conocido como "Método del Golpeteo" (*Tap Testing*). La versión más primitiva del

ensayo de golpeteo consiste en colocar una moneda por encima de la superficie, y luego aplicar un golpe sobre la moneda para generar un sonido, que por comparación, sirve para determinar si la unión de las placas con el núcleo de una estructura tipo sándwich es efectiva. La ventaja de este método radica sin dudas en su simpleza y bajo costo, pero los resultados carecen de confiabilidad y varían de acuerdo a la persona que realiza el ensayo ^[1].

El objeto de este trabajo es desarrollar una técnica de ensayo más certera y confiable respecto a los resultados obtenidos por el Método del Golpeteo convencional limitando la intervención subjetiva del operario. Tratándose de un sistema primario de detección de fallas, es imprescindible mantener su simpleza y rápida implementación, incorporando una herramienta computacional de bajos recursos. Esto es posible si se mide el fenómeno físico que resulta al impactar un cuerpo de masa conocida sobre la estructura en estudio y al resultado se lo transforma en un parámetro que permita cuantificar el estado del espécimen de prueba.

La metodología de trabajo consiste en generar, con una masa conocida, una vibración sobre la estructura, para luego medir la respuesta del golpe a través de un sensor piezoeléctrico. Esta configuración responde a lo que comercialmente se llama martillo modal o de impacto. Un martillo modal es un instrumento que lleva incorporado un transductor que permite medir el perfil de fuerza amplitud-tiempo que se genera al aplicar un impacto. El transductor es el primer eslabón de la cadena de medición y debe reproducir adecuadamente las características de la magnitud que se desea medir.

La señal generada por el sensor piezoeléctrico es procesada por una cadena de medición específica y luego es digitalizada para el posterior análisis con un software. El software reconoce las señales, determina parámetros específicos y los compara respecto a parámetros patrones obtenidos como referencia, para luego cuantificar y/o calificar el estado local de la estructura bajo ensayo, todo en un breve período de tiempo. Una interfaz gráfica de usuario denominada *DRDG*, de las iniciales de *Detección Rápida del Daño por Golpeteo*, permite acelerar el tiempo de aplicación del método y acceder en forma simple y rápida a la interpretación de los resultados en base a esquemas claros y fáciles de reconocer.

La validación del método se llevó a cabo ensayando probetas de estructura sándwich que simulaban ser partes de componentes estructurales reales con presencia de fallas típicas. La identificación de fallas en construcciones sándwich fue posible gracias al análisis de componentes en los que se observaron deterioros en las interfaces producto de deformaciones excesivas y/o impactos de objetos extraños. Sumado a lo anterior, personal con experiencia en aplicar el Método del Golpeteo fue entrevistado con el objeto de averiguar que fallas típicas son más repetitivas en estructuras reales en servicio.

ESTRUCTURAS COMPUESTAS TIPO SÁNDWICH

Las *estructuras tipo sándwich* son una solución constructiva formada por dos placas de material resistente entre las que se interpone un material ligero de baja densidad denominado núcleo. El núcleo, si bien aumenta el espesor y el peso de la nueva estructura con relación a la estructura simple, logra importantes ventajas desde el punto de vista de la rigidez y la resistencia del conjunto ^[3].

Una estructura sándwich está compuesta por tres elementos fundamentales: las placas exteriores, el núcleo o intermediario del sándwich y la interfaz de unión entre el núcleo y las placas. Las placas exteriores son los elementos resistentes, soportan esfuerzos de flexión a través de esfuerzos de tracción y compresión, además de resistir esfuerzos de corte. El núcleo es el encargado de mantener separadas las placas exteriores, dar aislamiento térmico y transmitir los esfuerzos cortantes desde una cara hacia la opuesta. La interface de unión tiene como función principal mantener unido al conjunto y prestar resistencia a los esfuerzos cortantes ^[3].

En la Figura 1 pueden observarse esquemas representativos y estructuras en las que se ha empleado la solución tipo sándwich.

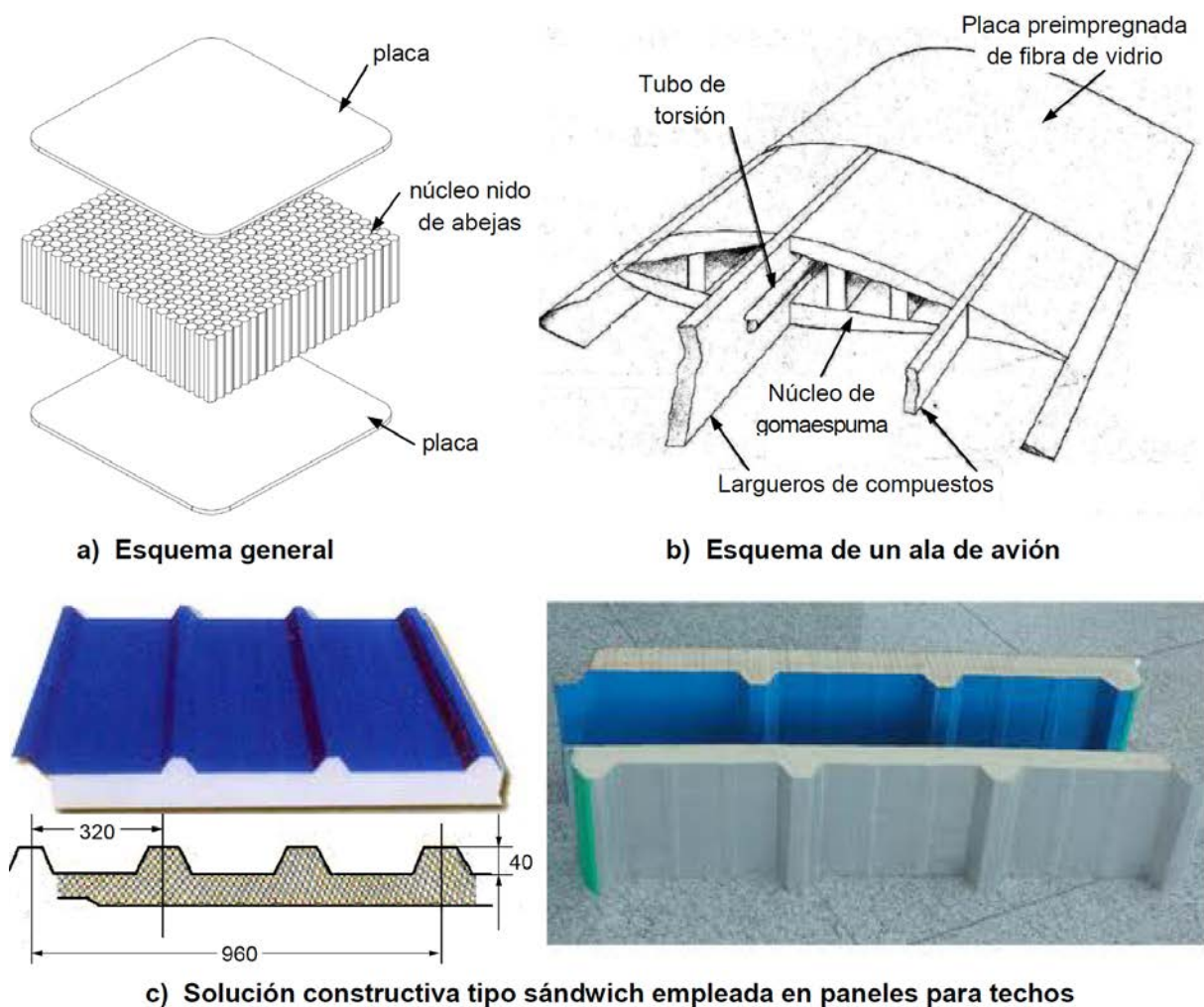


Figura 1. Estructuras tipo sándwich y sus aplicaciones ^[4] ^[5].

MODELO DEL SISTEMA VIBRATORIO

El modelo matemático del fenómeno en estudio está orientado al análisis de la variación de la fuerza de contacto durante el impacto de dos cuerpos y para ello se usa un modelo reducido de un solo grado de libertad.

Formulación matemática del modelo del golpe

Se utiliza un modelo vibratorio de un solo grado de libertad para analizar el impacto (choque) de dos cuerpos viscoelásticos. Dos cuerpos de masas m_1 y m_2 , cuya velocidad relativa justo antes del impacto es V_{12} , se muestran en la Figura 2. Cuando se tocan, la fuerza de contacto entre las masas m_1 y m_2 se representan por medio de un modelo de Kelvin-Voig mediante un resorte lineal de rigidez k en paralelo con un amortiguador viscoso con coeficiente de amortiguamiento c ^[6].

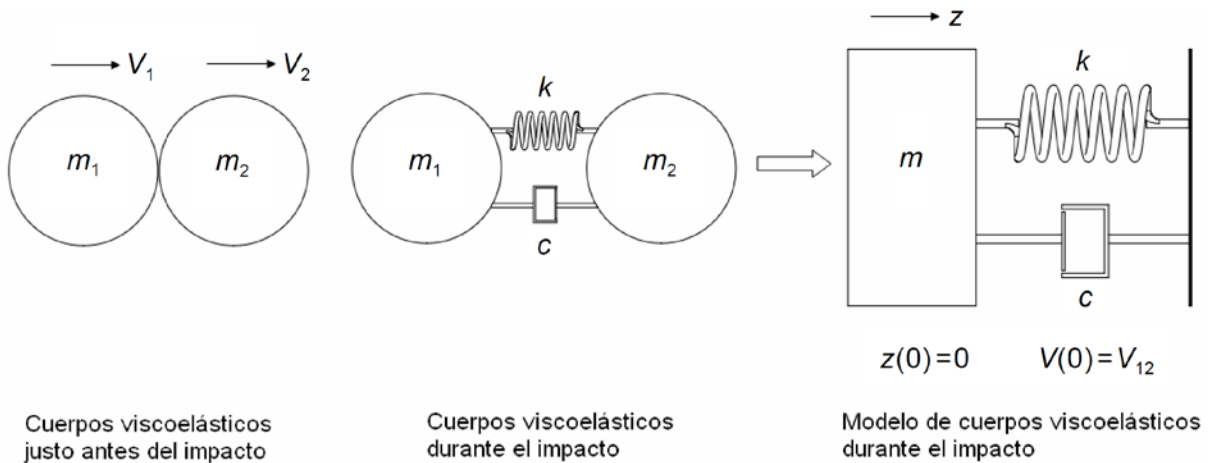


Figura 2. Modelo de impacto de dos cuerpos viscoelásticos.

Si mediante x_1 y x_2 representamos los desplazamientos absolutos de las masas m_1 y m_2 , el desplazamiento relativo entre las masas, la velocidad relativa y la aceleración relativa entre ellas se determinan, respectivamente, por medio de:

$$\begin{aligned}
 z &= x_1 - x_2 \\
 V_{12} &= \dot{z} = \dot{x}_1 - \dot{x}_2 = V_1 - V_2 \\
 a_{12} &= \ddot{z} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En el momento del impacto se genera entre ambas masas una fuerza de contacto, que viene dada por la ecuación:

$$F_{12} = c \dot{z} + k z \tag{2}$$

Del análisis del diagrama de cuerpo libre de cada una de las masas durante el

impacto, se llega a que

$$\ddot{x}_1 = -\frac{F_{12}}{m_1} \quad \text{y} \quad \ddot{x}_2 = -\frac{F_{12}}{m_2} \quad (3)$$

Aplicando el principio de la cantidad de movimiento a cada masa, se llega a la siguiente ecuación diferencial:

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = 0 \quad (4)$$

donde la cantidad m se llama *masa efectiva* ^[6] y se expresa por medio de:

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

Como no existen fuerzas externas que actúan sobre el sistema en el momento del impacto, se conserva la cantidad de movimiento lineal del sistema. La Ecuación (4) gobierna el movimiento del sistema masa-resorte-amortiguador de la Figura 1. La solución a la ecuación diferencial puede ser obtenida aplicando la transformada de Laplace.

En el modelo real se identifican a las masas m_1 y m_2 como las pertenecientes a la masa del martillo de impacto y a la masa de la estructura que se está ensayando, respectivamente ^[7].

Respuesta de un sistema lineal vibratorio ante un impacto

La solución general para la Ecuación (4), ante condiciones iniciales de desplazamiento o velocidad diferente de cero, viene dada por ^[6]:

$$z(t) = A_0 e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi_d) \quad (6)$$

donde A_0 es la amplitud de la respuesta y φ_d es su fase. $z(t)$ se representa en función del coeficiente de amortiguamiento ζ y de la frecuencia natural ω_n , que son valores característicos del sistema. En la Ecuación (6) se observa que el sistema oscila con la frecuencia ω_d y la amplitud disminuye de manera exponencial con una función de ζ , cuando $0 < \zeta < 1$.

El período de la oscilación libre es:

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (7)$$

donde T_d depende del coeficiente de amortiguamiento ζ y de la frecuencia natural ω_n , que son valores característicos del sistema. Sin embargo es independiente de la cantidad A_0 , que es función de las condiciones iniciales ^[6].

CADENA DE MEDICIÓN

A continuación se enumeran y caracterizan las componentes de las distintas etapas de la cadena de medición utilizada: a) Obtención de la señal mediante el transductor, b) Acondicionamiento de la señal, c) Análisis y/o medición, d) Registro y análisis de señal (software) ^[8].

Para el ensayo de golpeteo el transductor se encuentra en el martillo de impacto o martillo modal, instrumento que permite medir como varía la fuerza en el tiempo al dar un impacto ^[4]. El transductor de un martillo modal es normalmente un sensor piezoeléctrico.

Existen en el mercado una gran variedad de martillos modales según sea lo que se quiere medir. Sin embargo, en el desarrollo de este trabajo se evaluó la posibilidad de fabricar el dispositivo a bajo costo para su eventual implementación a escala incorporando algún grado de automatismo o como parte de una cadena productiva.

El esquema del martillo de impacto de construcción propia desarrollado durante la etapa de investigación se muestra en la Figura 3 y consta de las siguientes partes:

- El *mango del martillo* construido en aluminio con soporte manual de madera. Diseñado para mantener la conexión de cables estáticas con el fin de no introducir ruido externo a la señal.
- En el *extremo superior del martillo* se pueden identificar tres partes: la masa o punta de impacto, la masa anterior y el suplemento variable. La punta de impacto es la encargada de transmitir el impacto del martillo a la pieza ensayada. Se construyeron tres *puntas de impacto* de diferentes materiales: goma, plástico, y acero. Cada una de estas puntas generó un perfil de fuerza amplitud-tiempo de acuerdo a su dureza. La punta de impacto fabricada en plástico (tipo teflón) fue la que mejor resultado proporcionó cuando se la utilizó sobre materiales compuestos.
- El transductor de fuerza es un *sensor piezoeléctrico* comercial tipo parche.

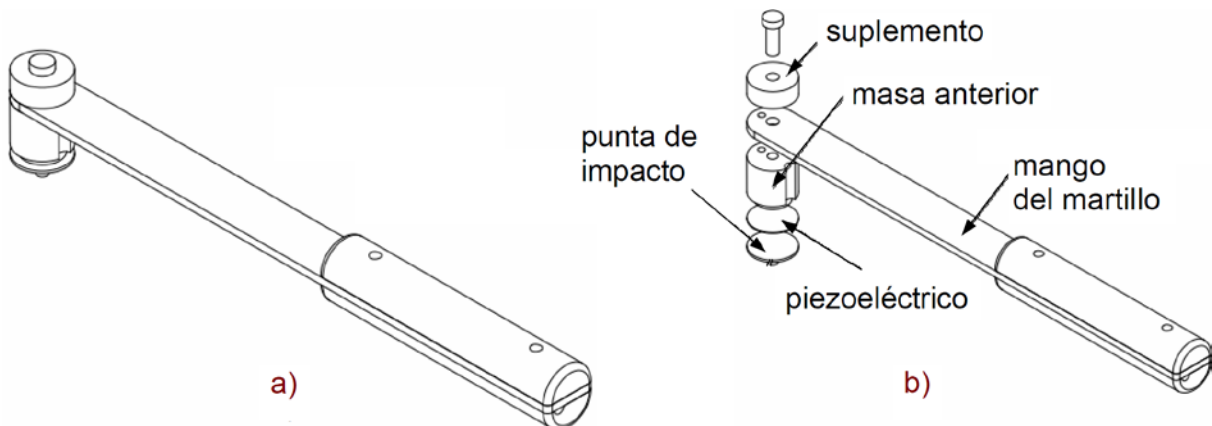


Figura 3. Martillo de impacto. a) Esquema general, b) Modelo particionado

En la Figura 4 se muestra a modo de ejemplo la señal obtenida con el martillo modal de construcción propia mostrado en la Figura 3.

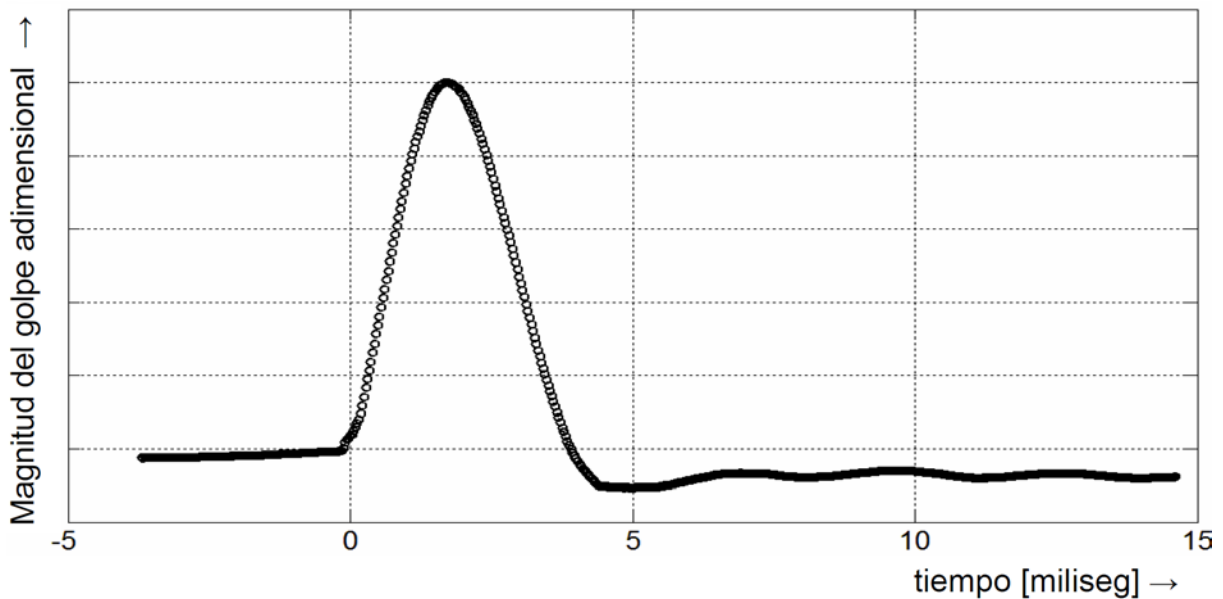


Figura 4. Señal amplitud-tiempo del martillo modal.

En la etapa de puesta a punto del sistema, y para lograr el *acondicionamiento*, *análisis*, y *registro* de la señal se utilizó un Analizador de Señales Dinámicas. Ese equipo permite la digitalización de la señal, la transformación al dominio de la frecuencia y el posterior registro de la señal digitalizada para su posterior análisis en un ordenador.

Para la implementación industrial del método, se reemplazó el equipo Analizador de Señales Dinámicas por un conjunto portátil de menor calidad, precio y tamaño, con posibilidad de ser alimentado con baterías.

Los componentes que han sido utilizados en la cadena de medición portátil fueron:

- Martillo de impacto con sensor tipo IEPE: Force Transducer modelo 208-C marca PCB.

Este instrumento incorpora el transductor que permite cuantificar el fenómeno que se quiere medir, en este caso el perfil de fuerza en el tiempo mientras el martillo de impacto está en contacto con la superficie de la estructura que se está ensayando.

- Acondicionador de señal: PCB Power Unit modelo 480B de la marca PIEZOTRONICS alimentado a baterías.

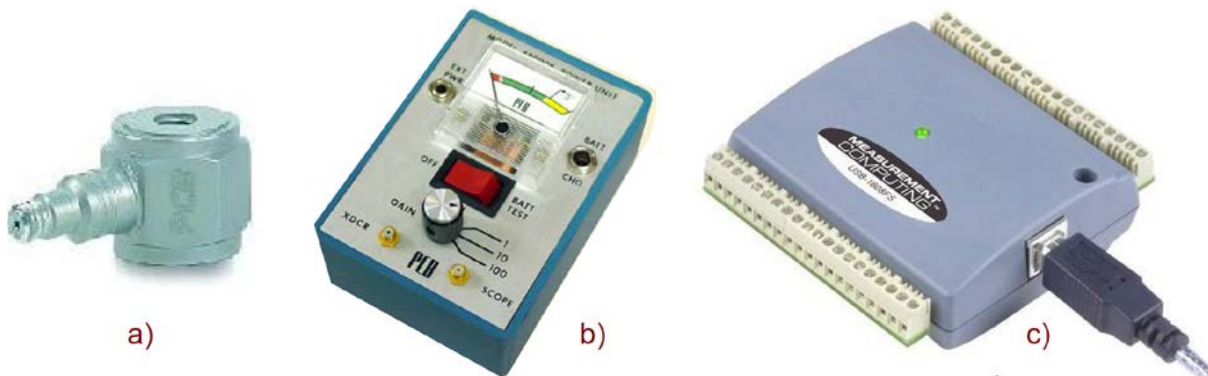
La señal generada por el transductor del martillo de impacto es de baja potencia y para poder ser digitalizada con un dispositivo análogo-digital es necesario acondicionarla previamente. El acondicionador de señales es un dispositivo capaz de aumentar la potencia de la señal sin alterar su información en relación al fenómeno físico censado.

- Placa de adquisición de datos multifunción USB-1608FS marca Measurement Computing.

La señal que llega desde el acondicionar de señales es del tipo analógica. Para que pueda ser analizada numéricamente es necesario digitalizarla en forma correcta de modo no perder información en el traspaso. Para esto se utilizó una placa de adquisición portátil de última generación con conexión a PC vía USB.

- PC portátil de bajo costo: netbook Samsung modelo NC110.

En la Figura 5 se presentan los componentes empleados en la cadena de medición portátil detallados más arriba.



- a) Transductor de fuerza PCB 208-C,
 b) Acondicionador de señal PCB 480B,
 c) Placa para adquisición de datos Measurement Computing USB-1608FS

Figura 5. Componentes de la cadena de medición portátil.

La conexión *Placa de adquisición USB-1608FS* a la *PC portátil* fue posible gracias a la implementación de la caja de herramientas *Data Acquisition Toolbox (DAT)* del entorno de programación *Matlab*^[9].

El DAT de Matlab permite adquirir señales previamente acondicionadas desde transductores para luego trabajar en su entorno de programación en forma directa y sencilla, evitando de esta forma la intervención de un dispositivo de almacenamiento que interrumpa la medición.

El análisis final de la señal se realiza en un ordenador aplicando un software de construcción propia y adecuada al tipo de estructura a ensayar^[10]. En el presente trabajo se desarrolló un algoritmo, llamado DRDG (Detección Rápida de Daño por Golpeteo), que determina parámetros característicos de la señal y efectúa un posprocesamiento. Finalmente, el software entrega los resultados del ensayo.

ANÁLISIS DE SEÑALES. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

La metodología propuesta consiste en comparar señales obtenidas de impactos en zonas de la superficie de la estructura donde se conoce su estado previo, adquiridas como señales patrones, con señales resultantes de zonas donde se desea determinar su estado y posible grado de deterioro.

En la Figura 6 se muestran en forma comparativa dos registros típicos obtenidos al golpear zonas en buen estado y zonas dañadas de la pieza de ensayo.

Las señales típicas son analizadas de forma de obtener parámetros que caractericen a la respuesta del material en buen estado y la diferencien del material defectuoso (*parámetros característicos*).

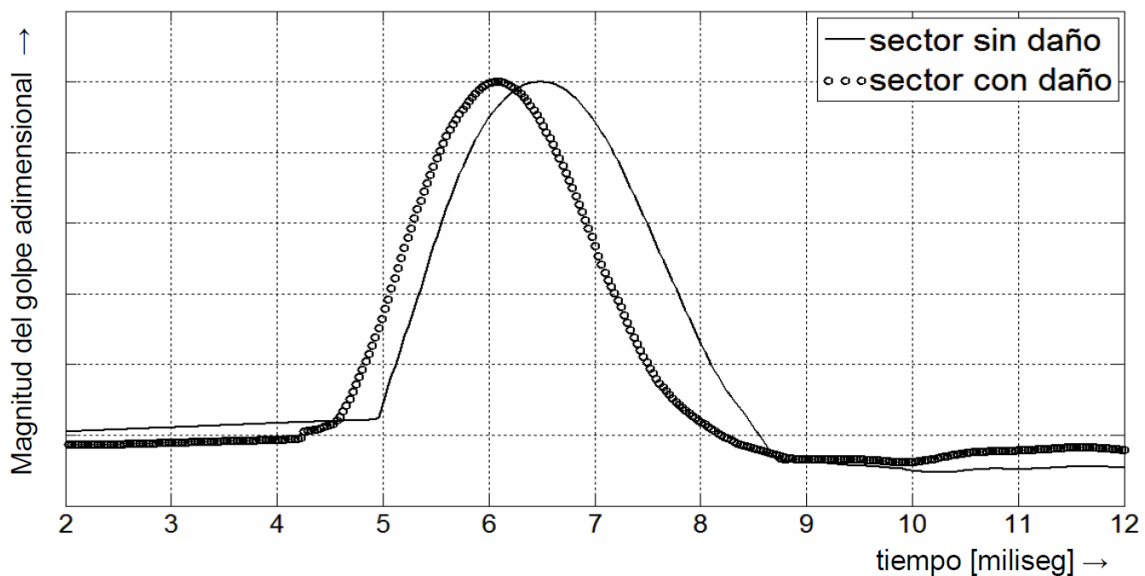


Figura 6. Registro de impactos en zonas con y sin daño.

Los siguientes aspectos de la respuesta son tenidos en cuenta:

- La duración del impacto varía de acuerdo a la zona de la estructura ensayada. Sobre sectores de la estructura sin falla este parámetro se mantiene regularmente constante. Sin embargo, para sectores con presencia de fallas, previamente identificadas, los tiempos de impacto son mayores a los anteriores. El parámetro puede ser calculado luego de identificar los puntos de inicio y fin de pulso.

Definimos como *parámetro característico 1* a la duración del impacto.

La duración del impacto es independiente de la magnitud (amplitud) con que se efectúa el golpe con el martillo. Si tenemos en cuenta la solución general del sistema, que oscila con una frecuencia natural amortiguada ω_d , con factor de amortiguamiento $0 < \zeta < 1$, el período de las oscilaciones viene nuevamente dado por la Ecuación (6) ^[6], donde ω_d y ζ dependen de la masa, rigidez, y amortiguamiento del sistema, pero no dependen de la amplitud de la respuesta. Este hecho se corrobora aplicando golpes de diferentes intensidades a un mismo sector de la pieza.

- El tiempo transcurrido en la respuesta del sistema desde el inicio hasta alcanzar un porcentaje convencional de la amplitud máxima (adoptado como 10%) varía de acuerdo al estado de la pieza ensayada. Los tiempos 0–10 % de respuestas de zonas de ensayo sin fallas, son menores a los tiempos de sectores con presencia de falla. La Figura 6 muestra la forma de determinar el parámetro para dos impactos provenientes de zonas con y sin falla.

Definimos como *parámetro característico 2* al tiempo 0 – 10% del pulso de impacto.

- En la Figura 6 se observa que la forma de los impactos experimentales se asimila a un pulso semisenoidal. Esto se debe a que la respuesta libre del sistema tiene la forma de un seno amortiguado. En el ensayo real la forma de la respuesta difiere levemente de la ideal o teórica. Una forma de medir este aspecto de la respuesta resulta del análisis de la transformada de la señal en el dominio de la frecuencia y del cálculo de su frecuencia de corte. La frecuencia de corte es por definición el valor de frecuencia para el cual la amplitud espectral adimensional ha disminuido a 0,707^[6]. La Figura 7 muestra los espectros en frecuencia de un pulso semisenoidal ideal (teórico) y uno real, con sus frecuencias de corte respectivamente.

Si la duración del pulso es t_0 , el producto de la duración del pulso-ancho de banda ω_c para una carga senoidal ideal se mantiene constante^[6]:

$$c_r = \omega_c t_0 = 3,7353 \quad (8)$$

de manera que cuando la duración del pulso t_0 decrece, el ancho de banda ω_c se incrementa en forma proporcional. Lo anterior permite que la frecuencia de corte, sobre espectros de impactos de piezas en estudio, pueda ser utilizada para la detección del deterioro local de una estructura producto de zonas fatigadas o sometidas a grandes deformaciones que aún no han fallado.

Definimos como *parámetro característico 3* a la frecuencia de corte del pulso.

Para calcular los *parámetros característicos* de las señales se desarrolló un algoritmo, utilizando el lenguaje de programación Matlab^[11].

- El *parámetro característico 1* mide la duración del impacto. Es el tiempo desde que la punta del martillo de impacto entra en contacto con la superficie, hasta que deja de estarlo.

Los puntos de inicio y fin de pulso se determinan mediante los cambios de pendiente, la que se calcula utilizando un algoritmo que utiliza cinco puntos discretos consecutivos de la señal. La duración del impacto surge de la diferencia entre ambos tiempos.

- El *parámetro característico 2* es sensible a la primera porción del pulso y determina si existen comportamientos extraños en el inicio del impacto a través de los tiempos 0 – 10%. Un comienzo de pulso similar al teórico ideal indica una zona en buen estado, mientras que cambios de pendiente y escalones en el inicio de la curva indican la presencia de degradación. Los daños provocan tiempos 0 – 10% prolongados respecto a los obtenibles con materiales en buen estado como se puede observar en la Figura 7.

- El *parámetro característico 3* se determina sobre el espectro en frecuencia de la señal obtenido al aplicar la Transformada Discreta de Fourier, a través de la función DFT en el entorno Matlab. Una vez obtenido el espectro en frecuencia, el algoritmo procede a determinar la frecuencia para la cual la amplitud espectral adimensional es igual a 0,707, encontrando de esta forma la frecuencia de corte como se muestra en la Figura 8.

Luego de calcular los *parámetros característicos* a partir la señal generada por el impacto, se efectúa una comparación con los parámetros promediados y obtenidos en zonas sin fallas.

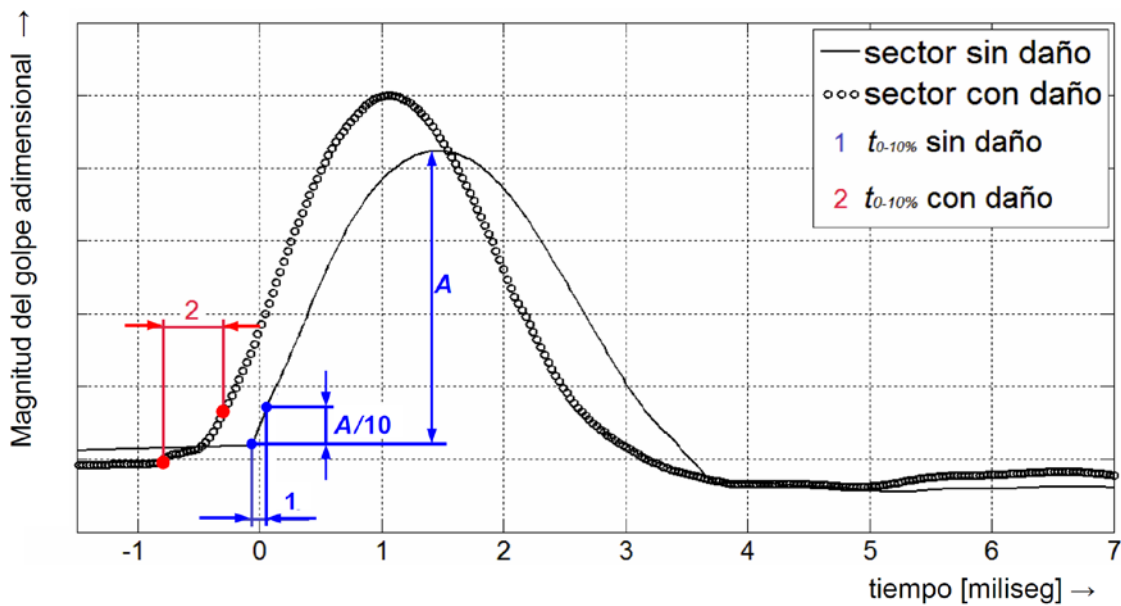


Figura 7. Tiempos 0–10% de una zona en buen estado y otra dañada de una misma pieza ensayada.

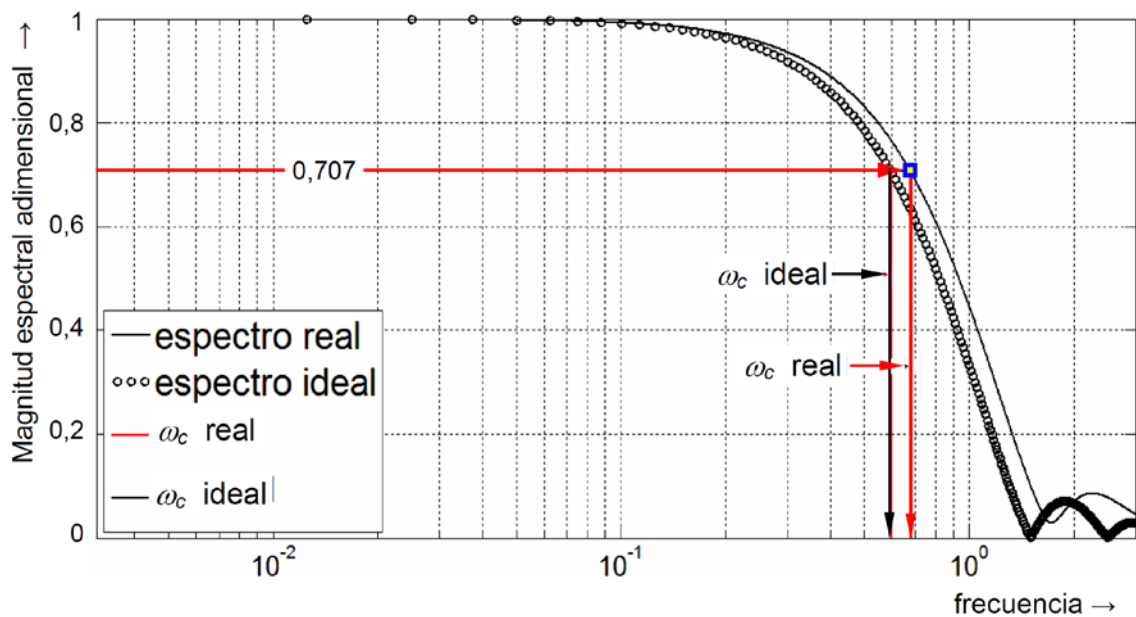


Figura 8. Espectros en frecuencia para un impacto ideal y uno real. Frecuencias de corte.

PROGRAMA DRDG. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

Para cada análisis parcial se desarrolló un algoritmo específico. Una rutina de cálculo general llama a las diferentes subrutinas de algoritmos parciales, realiza el análisis final y entrega los resultados al operador. A esta rutina general se la llama *DRDG*, cuyas siglas hacen referencia a *Detección Rápida del Daño por Golpeteo*.

El esquema de funcionamiento del programa DRDG divide el análisis en dos etapas. La primera corresponde al cálculo de parámetros patrones, provenientes de estructuras o zonas de una pieza de estudio sin falla, y la segunda etapa corresponde al cálculo de los mismos parámetros pero referidos a sectores de piezas a ensayar donde es posible encontrar novedades. El programa compara parámetros de ambas zonas y entrega los resultados en forma numérica y/o gráfica.

Para facilitar la ejecución del programa y acceder en forma intuitiva los resultados de los ensayos, se diseñó una interfaz gráfica de usuario en el mismo entorno de programación Matlab empleando la aplicación GUIDE ^[9] ^[12].

El aspecto de la interfaz DRDG se puede observar en la Figura 9. Al igual que la rutina de cálculo, la interfaz gráfica se divide en dos etapas de cálculo. En la primera etapa, que corresponde a la obtención de parámetros patrones, se pueden cargar hasta 10 golpes patrones para lograr un promedio estadístico, o eventualmente desechar mediciones con gran dispersión. Para la segunda etapa de cálculo el análisis se realiza de a un golpe por vez.

El resultado final se entrega en forma equivalente a un semáforo vial. También es posible acceder a los resultados numéricos y gráficos. Desde la interfaz gráfica se puede acceder al menú de ayuda y allí encontrar el manual de usuario del programa y una introducción al Método del Golpeteo empleando el procedimiento aquí desarrollado.

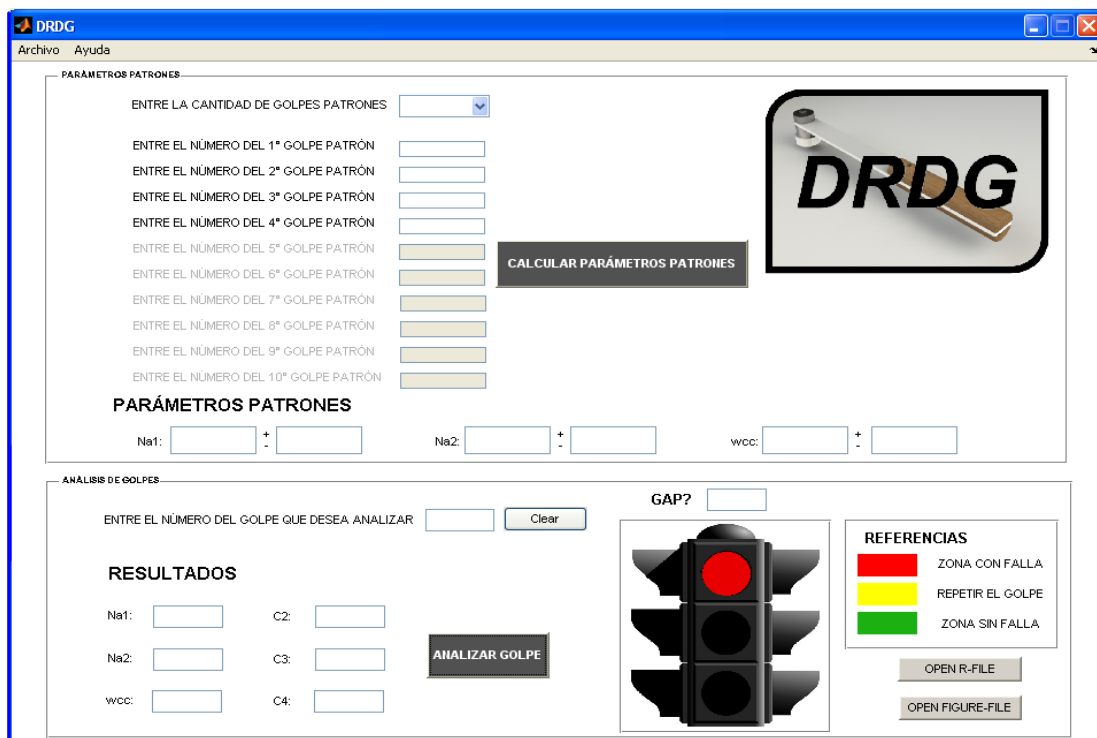


Figura 9. Interfaz gráfica de usuario del Programa DRDG.

RESULTADOS OBTENIDOS EN PROBETAS DE ENSAYO

La validación del método se realizó ensayando probetas construidas con materiales compuestos, simulando ser partes de estructuras tipo sándwich, con presencia de fallas típicas tomadas como referencias para defectos encontrados en piezas reales.

Las probetas de ensayos cumplían con condiciones de similitud respecto a estructuras reales ^[13]:

- *Materiales característicos*: las estructuras tipo sándwich se construyeron con recubrimientos y núcleos típicos en estructuras aeronáuticas.
- *Procesos de construcción*: se respetó la metodología de construcción, con tiempos de curado de materiales realistas.
- *Condiciones de borde*: por razones de costo las probetas no tenían el tamaño de una pieza real, por ello se implementaron apoyos para simular el comportamiento natural de la pieza simulada. Una forma de lograrlo fue apoyar las probetas sobre elastómeros utilizados en amortiguamiento de sistemas de aislamiento de vibraciones.
- *Fallas típicas*: a partir de fallas encontradas en servicio de piezas reales, se representaron los defectos en las probetas durante el proceso de construcción. En las estructuras tipo sándwich identificamos dos tipos de fallas comunes. Por un lado está la falta de adherencia entre el recubrimiento del sándwich y el núcleo, producto de una deformación excesiva, identificada como *falla tipo 1*. Por otro lado, la separación del recubrimiento al núcleo normalmente debido al impacto de un objeto extraño, identificada como *falla tipo 2*.

Luego de realizados los ensayos se analizan resultados parciales de acuerdo a cada parámetro característico y tipo de falla estudiada:

- El *parámetro característico 1* presenta una dispersión relativamente elevada, por lo que no se lo utiliza en el balance final ya que puede dar lugar a resultados erróneos. La duración de los impactos en zonas con fallas, previamente establecidas, no permiten ser diferenciados de la duración de los impactos aplicados a sectores patrones sin falla. Es decir, la dispersión en la longitud del pulso, es mayor a la diferencia existente en el parámetro característico de señales provenientes de sectores con y sin falla.
- El *parámetro característico 2* resultó ser efectivo en la determinación de presencia de fallas que generan cambios apreciables en el inicio del pulso (tiempos 0–10%). Los sectores con falta de adherencia entre el recubrimiento y el núcleo, pero que permanecen en contacto (*falla tipo 1*), son un tipo de falla que generan inicios bien definidos y similares a los ideales. Lo contrario ocurre con las *fallas tipo 2*, donde los inicios de impactos resultan difíciles de determinar.
- Respecto al *parámetro característico 3* se observó que una falla en la estructura provoca un impacto del martillo modal contra la superficie que se diferencia de un impacto ideal (tipo semisenoide). Esto hace que la forma del pulso se deforme, y por ende cambie su espectro en frecuencia. Utilizando la frecuencia de corte como parámetro de comparación se puede cuantificar esta diferencia.

Se concluyó que el *parámetro característico 3* es el parámetro de detección de falla más confiable dentro de los analizados. Los resultados obtenidos en zonas con fallas se diferencian de los obtenidos en zonas sin defectos.

Para las fallas tipo 2 las diferencias en la frecuencia de corte son aún más apreciables que en las fallas tipo 1. Esto se debe a que las fallas tipo 2 modifican en mayor medida la forma del pulso.

De acuerdo con lo expresado, el método implementado se basa en dos parámetros de comparación, los parámetros característicos 2 y 3. El *parámetro característico 3* es efectivo en la detección de la falla. El *parámetro característico 2* identifica el tipo de falla.

Se determinan primero los parámetros característicos de piezas patrones, tomados luego como parámetros de referencia. Comparando los valores de los parámetros característicos respecto a los patrones, el algoritmo procede a identificar fallas a través del *parámetro característico 3*, para luego determinar el tipo de falla por medio del *parámetro característico 2*.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de control de calidad de materiales compuestos que consta de hardware y software, basado en el método del golpeteo. El método de ensayo permite realizar un control de la calidad de las estructuras sándwich construidas en materiales compuestos.

Se investigó la posibilidad de remplazo de los martillos modales comerciales mediante hardware de bajo costo, para permitir la posibilidad de su implementación en dispositivos más sofisticados en cuanto a automatización. Mediante el uso de los instrumentos fabricados ad-hoc se ha logrado un buen funcionamiento del método, aunque serían necesarios estudios más dedicados para una implementación industrial definitiva.

Los parámetros utilizados en la detección de fallas han sido aplicados sobre muestras de materiales compuestos. Bajo esta forma de utilización el parámetro relevante ha sido la frecuencia de corte del pulso de impacto, mientras que la duración del impacto ha sido dejada de lado por tener gran dispersión en los resultados. A través del parámetro que mide el tiempo 0–10% en alcanzar la amplitud del pulso es posible diferenciar los tipos de fallas.

El software desarrollado analiza las señales obtenidas y entrega al operador los resultados del ensayo en forma concisa, mientras que la interfaz gráfica de usuario permite el análisis de señales recolectadas en una ruta de medición, entregando el resultado de manera instantánea.

El sistema desarrollado constituye una mejora evidente en el resultado respecto al ensayo de golpeteo manual. La implementación del software DRDG permite evitar subjetividades e independizar el resultado de la percepción o criterio de la persona que realiza el ensayo. La aplicación del método desarrollado permite obtener resultados rápidos y certeros sin necesidad de contar con una cadena de medición de costos elevados.

El objetivo del trabajo estuvo centrado en el desarrollo de una metodología general para la detección de fallas en materiales mediante golpeteo. La aplicación práctica se ha restringido en este trabajo a materiales compuestos tipo sándwich. Se prevé el uso y futuro desarrollo del sistema para otro tipo de materiales y estructuras.

REFERENCIAS

- [1] Gómez, F.; Fernández Soler, M.A.; Roldán, A.; Delojo Morcillo, G.; Valdecantos Martínez, C.; De los Ríos Rubalcaba, J.M. "Métodos de ensayos no destructivos". Tomo I. INTA, (1996).
- [2] Department of Defense, United State of America, "Nondestructive active testing techniques for structural composites", Military Handbook, (1989).
- [3] Smith, W.F., "Ciencia e ingeniería de los materiales", Tercera edición, Mc Graw Hill, (2004).
- [4] U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, "Bonded repair of aircraft composites sandwich structures", Final Report, (2004).
- [5] Revista de construcción y su entorno: "Arte y cemento". Edición Nª 9, (2006).
- [6] Balachandran, B.; Magrab, E.B. "Vibraciones". México, International Thomson Editores S. A., S.R. Otto and J.P. Denier, AN, (2006).
- [7] Hsu, D.K., "Nondestructive inspection of composite structure: methods and practice", 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, (2008).
- [8] Agilent Technologies (www.agilent.com). "The fundamentals of signal analysis", Application Note 243, (2000).
- [9] MathWorks, MATLAB® Creating Graphical User Interfaces, The MathWorks, Inc., (2007).
- [10] Robles del Peso, A.; García Benedito, J.. "Métodos numéricos en Ingeniería. Prácticas con Matlab". Ediciones de la Universidad de Oviedo, (2006).
- [11] Matthews, J.H.; Finks, K.D., "Numerical methods using Matlab", Third Edition. Prentice Hall, Upp, (2004).
- [12] Smith, S.T., "MATLAB: Advanced GUI Development". Dog Ear publishing, USA. (2006).
- [13] Georgenson, G.E.; Hansen, J.M.; Koll Gray, J.M.; Lee, S. W.; Boop, R.J. "Damage detection device and methods", The Boeing Company, Seattle, (2004).