

Monitoreo de integridad estructural utilizando amortiguamiento por histéresis

Structural health monitoring using hysteresis damping

Monitoramento de integridade estrutural usando amortecimento de histerese

Jose de Jesus Villalobos Luna¹, ORCID: 0000-0002-3532-2005; Pedro Lopez Cruz¹, ORCID: 0000-0001-8577-4723

¹Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, N.L., México.

Correo de contacto: jose.villalobosln@uanl.edu.mx

Resumen

En este trabajo se presenta un panorama general de la estrategia de Monitoreo de Integridad Estructural, sus componentes de hardware y escala o niveles de aplicación, así como los elementos relacionados con el análisis, diagnóstico y pronóstico. Se describe el amortiguamiento interno estructural como una medida de la disipación de energía y su potencial para ser utilizado como parámetro de medición de la integridad estructural. Se realizó un proceso experimental en una probeta de unión adhesiva estructural sometida a cargas de bajo ciclaje donde se evaluó la evolución de las energías disipadas. Los resultados experimentales muestran cambios significativos en la capacidad de disipación de energía de la unión adhesiva que se relacionan directamente con la evolución del daño. Se discuten los resultados de la integración de la estrategia MIE utilizando la medición de amortiguamiento por histéresis para la evaluación del daño, la resistencia residual o la vida útil de un sistema estructural.

Palabras Clave: Amortiguamiento, histéresis, integridad estructural, monitoreo, daño.

Abstract

This paper presents an overview of the Structural Health Monitoring (SHM) strategy, its hardware components and scale or application levels, as well as the elements related to analysis, diagnosis, and prognosis. Structural internal damping is described as a measure of energy dissipation and its potential to be used as a parameter for measuring structural integrity. An experimental process was carried out in a structural adhesive union probe subjected to low cycling loads from which the evolution of the dissipated energies was evaluated. The experimental results show significant changes in the energy dissipation capacity of the adhesive union that are directly related to the evolution of the damage. The results of the integration of the MIE strategy using the measurement of damping by hysteresis for the evaluation of the damage, the residual resistance or the useful life of a structural system are discussed.

Keywords: Damping, hysteresis, structural health, monitoring, damage.

Resumo

Neste trabalho é apresentado um panorama geral da estratégia de Monitoramento de Integridade Estrutural, seus componentes de hardware e escala de níveis de aplicação, bem como os elementos relacionados com a análise, diagnóstico e pronóstico. Descreve-se o amortecimento interno estrutural como uma medida da dissipação de energia e seu potencial para ser utilizado como parâmetro de medição da integridade estrutural. Realizou-se um processo experimental em uma sonda de união adesiva estrutural com cargas de baixo ciclo onde se avaliou a evolução das energias dissipadas. Os resultados experimentais mostram mudanças significativas na capacidade de dissipação de energia da união adesiva que se relacionam diretamente com a evolução do dano. Ele discute os resultados da integração da estratégia MIE usando a medição de amortecimento por histérese para avaliação do dano, resistência residual ou vida útil de um sistema estrutural.

Palavras-chave: Amortecimento, histerese, integridade estrutural, monitoramento, danos.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un panorama general de la estrategia Monitoreo de Integridad Estructural (Structural Health Monitoring, SHM) y el amortiguamiento por histéresis como parámetro potencial de monitoreo de la vida útil, resistencia residual o progresión de daños en estructuras.

La estrategia de MIE consiste en la implementación de tecnologías de medición automatizada de parámetros mecánicos para la identificación de daños en componentes críticos estructurales para la ingeniería aeroespacial, civil y mecánica. La estrategia de MIE ha sido implementada desde los años 70's (Doebbling, Farrar, Prime, & Shevitz, 1996; Kandl & Groghan, 1980) con diferentes objetivos, alcances y herramientas tecnológicas de las diferentes épocas. Sin embargo, la tecnología de sensores de deformación proviene desde inicios del siglo XX (Glisic, 2022). El avance de procesadores, software, protocolos de comunicación por internet y velocidad de la red permite una adquisición, procesamiento y análisis de datos de forma "instantánea" o "tiempo real" lo suficientemente rápido para los tomadores de decisiones virtuales o humanos y contar con información confiable y certera.

En términos generales, las estructuras diseñadas para las industrias aeroespaciales, automotrices o civiles se desarrollan bajo el concepto de mayor resistencia y menor peso o mayor eficiencia estructural. Sin embargo, aunque hay muchos avances en este rubro, las técnicas de inspección de calidad encuentran obstáculos derivados de la imposibilidad de inspeccionar todos los modos de falla de forma confiable, repetitiva y garantizar la seguridad.

Por ejemplo, los altos estándares que exige la industria aeronáutica, no ha sido posible implementar el uso de las uniones adhesivas de manera extensiva por si solas en componentes estructurales primarios. Esto debido a la falta de comprensión completa y 100% replicable de todos los modos de fallas posibles que se producen por las múltiples combinaciones de parámetros, tales como tipos de materiales de sustratos (metales, compuestos, metamateriales, etc.), tipos de adhesivos, geometría de la unión (tipo, espesores, traslapes, etc.), preparación de las superficies, tipos de carga (estática, cíclica, impacto, aleatoria), condiciones de prueba, escalabilidad, condiciones ambientales, envejecimiento de sustratos, adhesivos, resinas, etc. Por lo anterior, las

unionen adhesivas se utilizan como sistema de respaldo de las uniones mecánicas en base a remaches, siendo uniones híbridas las utilizadas en estructuras primarias. Sin embargo, la necesidad de conocer la vida útil, residual o progresión de daños en las uniones es una tarea primordial para el uso seguro de la tecnología de uniones adhesivas.

La medición de amortiguamiento se está volviendo una técnica atractiva que puede ser por si misma de mayor grado de sensibilidad al daño que los cambios en frecuencias modales o cambios en degradación de la elasticidad. (Amafabia, Montalvão, David-West, & Haritos, 2017).

2. ESTRATEGIA DE MONITOREO DE INTEGRIDAD ESTRUCTURAL

Actualmente la estrategia de MIE puede implementarse a casi cualquier aplicación, desde maquinaria industrial, turbinas de vapor y gas, tanques de almacenamiento de combustibles, estructuras civiles como edificios o puentes, así como para vehículos de transporte terrestre, marítimo, aéreo y espacial como se muestra esquemáticamente en la Figura 1.

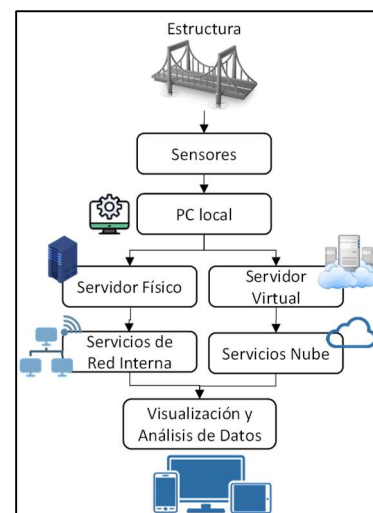


Figura 1. Esquema del monitoreo de integridad estructural

La estrategia de MIE se lleva a cabo mediante una infraestructura física de sensores, equipos de comunicación, transferencia y almacenaje de información y las modernas infraestructuras digitales en la nube, sin embargo, es posible que pueda ser implementada en partes, de acuerdo con la escala de la aplicación. Desde una escala del tipo local o aislada, en una escala de red interna en la que puedan interactuar

con la estructura y el sistema de medición sin compartir información fuera de la red local o interna de la organización y por último a la escala de la nube o global, accediendo a la información de la estructura o proyecto desde cualquier parte del mundo.

- *Escala local.* Es la configuración más sencilla y permite extraer la información directamente en el sitio de la prueba, a pie de estructura, máquina (o dentro de una estructura móvil). A esta escala, solo se requiere la comunicación directa entre sensores, tarjeta de adquisición de datos y el equipo de cómputo donde se almacenan los datos de medición de forma local o aislada. Es comparable con una escala de medición en laboratorio.
- *Escala red interna.* Esta estrategia es muy optima debido a que se provee de un sistema de monitoreo automatizado, que permite visualizar en tiempo real la condición estructuras, máquinas y estructuras móviles y en consecuencia planear las actividades de mantenimiento o intervención reduciendo costos por fallas repentinas inesperadas o paros no deseados. La información se queda dentro de la organización, sin la necesidad de ser compartida hacia el exterior dentro de un marco de confidencialidad y seguridad. Respecto a la escala de implementación, puede aplicarse a una o varias máquinas o estructuras que se encuentren en el dominio de la red interna de la empresa, aunque las aplicaciones se encuentren en lugares apartados geográficamente.
- *Escala en la nube o global.* Mediante proveedores de servicios de la nube puede coordinarse el enlace de varias instalaciones en cualquier ubicación del mundo (fijas o móviles). Los servicios que ofrecen los diferentes proveedores de la nube van desde almacenamiento, respaldo, procesamiento, descarga y visualización, herramientas de análisis y reportes, todo mediante contratos de servicios, pólizas de garantía, seguros contra ataques cibernéticos, etc.

Además de la estrategia MIE, para lograr su objetivo, debe utilizar métodos de procesamiento de datos automatizados que permitan en tiempo real analizar, diagnosticar y pronosticar las condiciones de integridad estructural de un sistema estructural.

a) *Análisis y diagnóstico.*

Los *elementos de evaluación operacional y adquisición de datos, normalización y limpieza* son elementos muy importantes de la etapa de análisis y diagnóstico de MIE, sin embargo, quedan fuera del alcance de este trabajo. Centraremos la descripción en dos elementos que son la *Selección de características y condensación de la información y el Desarrollo de modelos estadísticos y características de discriminación.*

- *Selección de características y condensación de la información.* Una vez que se cuenta con los datos válidos, es necesario encontrar patrones dependiendo de la naturaleza de la(s) variable(s) medidas (Farrar & Sohn, 2000). Cada variable tiene su propio comportamiento por lo que hay que analizarlas por separado.

En el caso del análisis estructural, los patrones de carga vs desplazamiento, funciones de respuesta a la frecuencia o lazos de histéresis forman patrones reconocibles que fácilmente pueden identificarse, así como los cambios que se produzcan en estos.

Es en el proceso de identificación, los datos medidos, podrían ser sometidos a la comparación de los algoritmos de los Modelos de Histéresis (Hassani, Tjahjowidodo, & Do, 2014) (Macki, Nistri, & Zecca, 1993) (Ismail, Ikhoulane, & Rodellar, 2009) y eventualmente evaluar el nivel de daño en tiempo real.

Otro patrón de comparación son los cambios en propiedades mecánicas de una estructura bajo la ausencia o presencia de fallas. El reconocimiento de dichos patrones, pueden ser identificados mediante algoritmos de inteligencia artificial o redes neuronales y realizar un análisis más eficiente.

- *Desarrollo de modelos estadísticos y características de discriminación.* Actualmente existen avances en el desarrollo de algoritmos que desarrollan modelos estadísticos basados en inteligencia artificial, los cuales se clasifican en: aprendizaje supervisado (clasificación por grupos y regresiones), aprendizaje no supervisado (sin ejemplos de patrones) y detección de valores atípicos o novedosos. Los resultados de estos algoritmos arrojan resultados estadísticos de las variables en cuestión o en el caso de estructuras pueden arrojar parámetros estadísticos que evalúen la presencia o progresión del daño.

b) Pronóstico.

El pronóstico (Elattar, Elminir, & Riad, 2016) es la última etapa del MIE y el potencial mayor de todo el sistema. En concepto es el mismo utilizado en mantenimiento predictivo como diagnóstico y pronóstico basado en condición. Se pronostica con base en patrones reconocibles, repetibles y tendencias de los datos. Normalmente el pronóstico permite ajustar la planeación de actividades de mantenimiento de manera más eficiente y garantizar la disponibilidad de equipos y estructuras. Normalmente el pronóstico es una proyección en el tiempo de la condición, daño o vida útil de una máquina o estructura basado en el comportamiento histórico de los datos. De esta manera, cobra relevancia el tipo y detalle de la información almacenada y el tiempo de almacenamiento, lo que conlleva a sistemas de almacenamiento robustos en donde la información se encuentre disponible para análisis más detallados de manera automatizada o con intervención de humanos.

3. AMORTIGUAMIENTO POR HISTÉRESIS

El amortiguamiento en términos mecánicos es la capacidad de disipar la energía en forma de calor de los cuerpos o sistemas oscilatorios dando como resultado un cambio en la amplitud de las oscilaciones o alteración en la deformación (Braun, Ewins, & Rao, 2002; Goodman, 2002). Todos los sistemas físicos, máquinas y estructuras, solo son más o menos eficientes mecanismos de transferencia de energía. La energía será disipada en diferentes escalas, desde la interacción de la estructura con su entorno (aero e hidro elásticos), sus interconexiones (uniones mecánicas) e interfases internas (adhesivos) y en la capacidad de disipación de energía que tienen los materiales sólidos a todas sus escalas.

La definición más aceptada por la comunidad científica de la palabra histéresis (del gr. ὑστέρησις *hystérēsis* 'retraso' der. de ὕστερος *hýsteros* 'posterior, siguiente') es un “fenómeno por el que el estado de energía de un material depende de su historia previa y que se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce” (Diccionario de la Lengua Española, s.f.). O, dicho de otra manera, es el retraso de la respuesta

(efecto) detrás o retrasado temporalmente a la acción (causa).

Se tiene registro del fenómeno de histéresis por lo menos desde 1885 por Prof. J.A. Ewing cuando realizó su publicación *Experimental Researches in Magnetism*, donde describe el fenómeno de histéresis al trabajar en conductores de hierro de la siguiente manera: “Y de manera más general, si una pieza de hierro, magnetizada o no, se somete a variaciones cíclicas de esfuerzo, se puede demostrar que algunas de sus cualidades físicas, aunque varían cíclicamente como consecuencia de los cambios de tensión, presentan este... retraso” (Ewing, 1885).

El amortiguamiento en general se puede clasificar como no estructural o externo y estructural o interno. El amortiguamiento externo o no estructural son el amortiguamiento por fricción seca o de Coulomb y el amortiguamiento fluido (viscoso o turbulento). A su vez, el amortiguamiento interno o estructural se puede clasificar en amortiguamiento por histéresis, viscoelástico, de interfases (Banks & Inman, 1989) o por inestabilidades estructurales (Padthe, Chaturvedi, Bernstein, Bhat, & Waas, 2008).

Desde el punto de vista mecánico en materiales y estructuras el amortiguamiento por histéresis es el resultado a escala macroscópica de la interacción de varios mecanismos de disipación de energía a una escala menor (Lesieutre, 2002), es decir, es la medida de la disipación de energía asociada con los defectos microestructurales, tales como fronteras de grano, impurezas, efectos termo elásticos causados por gradientes de temperatura locales resultado de esfuerzos por estructuras vibrantes, efectos de corrientes de Eddy en materiales ferromagnéticos, movimientos de dislocaciones en metales (Zhang, Perez, & Lavernia, 1993) y movimiento en las cadenas de polímeros (Panteliou, Chondros, Argyrakis, & Dimarogonas, 2001). Sin embargo, queda aún a discusión cuales son fenómenos lineales o no lineales, dependientes de la función de entrada o dependientes o independientes del tiempo. La variedad de comportamientos existentes por la diversidad de materiales y estructuras no permite tener un modelo único para representar el amortiguamiento de todos los materiales. No obstante, a continuación, se utilizará el amortiguamiento por histéresis por ser predominante en estructuras con materiales avanzados, compuestos tipo sándwich, fibras de carbón y uniones adhesivas.

Cuando un material es deformado por cargas cíclicas, la energía es almacenada y disipada debido a diferentes mecanismos como la fricción seca o viscosa entre las capas de materiales, interfaces entre materiales disimiles, planos internos en materiales solidos cristalinos o amorfos, por dislocaciones en los materiales solidos con estructura atómica cristalina o por la fricción entre las moléculas entrelazadas de los materiales poliméricos como lo son los enlaces moleculares en los adhesivos epóxicos.

Para englobar los efectos de la disipación de energía en un sistema amortiguado, puede caracterizarse mediante la construcción del lazo de histéresis en el plano fuerza-desplazamiento o plano F-D por lo que está relacionado con la energía disipada por ciclo de movimiento por medio de la ecuación:

$$W_d = \oint F dx \quad \text{Ec. (1)}$$

En la Figura 2 se representa el modelo de un sistema $b-k$ de primer orden, donde k es la elasticidad del material y b es la representación del amortiguamiento por histéresis relacionado con la capacidad de disipación de energía de un material bajo cargas cíclicas. En la Figura 3 se muestra el lazo de histéresis que se construye a partir de la Fuerza y Desplazamientos del modelo $b-k$.

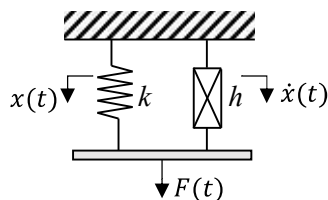


Figura 2. Modelo de primer orden de 1 GDL de sistema $b-k$

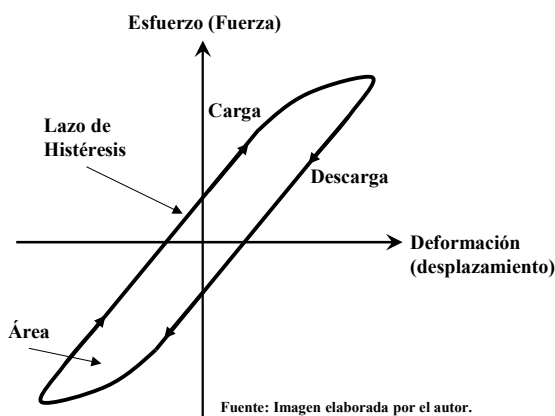


Figura 3. Lazo típico de amortiguamiento por histéresis.

Para fines de una solución práctica, la Ec. (1), puede resolverse para una función general armónica de fuerza y desplazamiento y por lo tanto, la energía disipada puede expresarse en términos de la histéresis y la energía total aplicada mediante la Ec.(2):

$$W_d = \frac{h}{k} W_{\max} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

h : Constante de amortiguamiento por histéresis (N/m).

k : Constante de rigidez equivalente (N/m)

W_d : Energía disipada en un ciclo (*Joules*)

W_{\max} : Energía máxima total aplicada en un ciclo (*Joules*)

Como es sabido, existe la degradación o pérdida de la elasticidad de los materiales al ser sometidos a cargas cíclicas. Dicha degradación tiene un efecto en cambios de las propiedades mecánicas y la resistencia de un material. De la misma manera, las propiedades amortiguantes deben tener un cambio, sin embargo, no es posible determinar *a priori* alguna función de cambio de este hasta que no sea medida experimentalmente.

Sin embargo, debido a que existen cambios en las constantes de elasticidad y amortiguamiento del sistema, la relación h/k se ve afectada y por lo tanto de veré afectada la energía disipada siendo un parámetro potencial para ser utilizado para la detección de cambios en las propiedades de elasticidad y amortiguamiento de un sistema físico.

4. EXPERIMENTACIÓN

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de una probeta típica de una unión adhesiva estructural con sustratos de aluminio 6063-T5 unidos mediante el adhesivo epóxico 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A (3M Company, 2017) con base al ASTM D1002-10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal) (ASTM International, 2010). Una unión adhesiva es un sistema estructural complejo donde el fenómeno de adhesión se logra mediante la conjunción de fuerzas mecánicas, reacciones químicas entre sustratos y adhesivos, así como fuerzas cohesivas en el interior del adhesivo.



Figura 4. Probeta de unión adhesiva estructural Al-Al con base al ASTM D1002-10 y adhesivo epóxico 3M™ Scotch-Weld™ EC-2216 B/A

En la Figura 5 se muestra la vista lateral de la unión adhesiva y se observa el espesor del adhesivo de espesor de 0.5 mm de espesor.

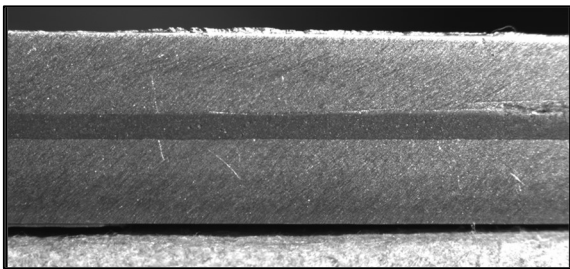


Figura 5. Vista lateral de la línea de adhesión y la zona de traslape con espesores controlados

En la Figura 6 se muestra una secuencia de lazos de histéresis en bajo ciclaje de una probeta de unión adhesiva.

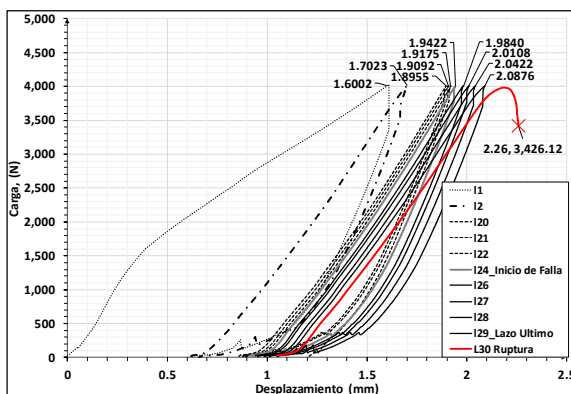


Figura 6. Lazos de histéresis F vs D experimentados en probeta de unión adhesiva

Mediante la curva V-Δ se obtuvieron la energía almacenada (W_s), la energía disipada (W_d) y por último la energía residual (W_r) como se muestra la Figura 7.

A partir de los lazos de histéresis, se obtuvo la variación de las energías de la unión adhesiva normalizadas respecto al número de ciclos ($r_c = \text{Ciclo} / \text{Número Máximo de Ciclos}$) y la evolución de las energías de la probeta normalizadas respecto a la energía máxima, $R = W_{s,d,r} / W_{max}$ (Figura 8). El área bajo la curva V-□ tiene unidades de Joules (J).

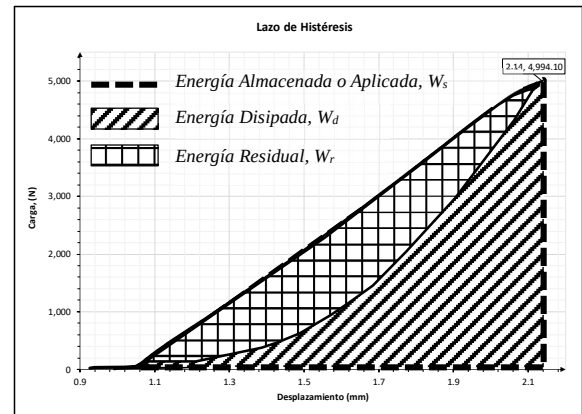


Figura 7. Energías involucradas durante cada ciclo de carga cortante

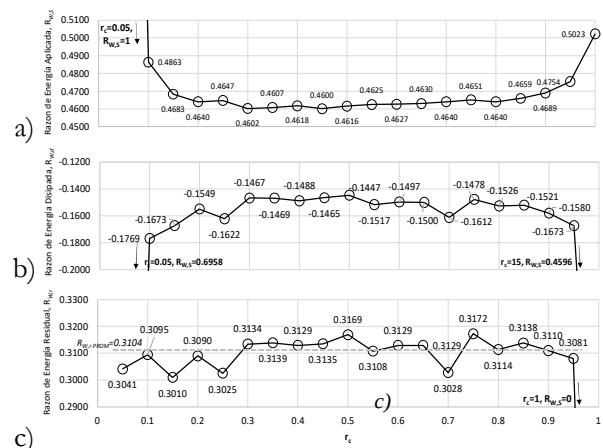


Figura 8. a) Razón de Energía Aplicada (R_{ws}), b) Energía Disipada (R_{wd}) y c) Energía Residual (R_{wr})

5. DISCUSIÓN

Implementando un sistema de medición de mediante celdas de carga, extensómetros y medidores de deformación, es posible medir lazos de histéresis en sistemas de uniones adhesivas simples. En una primera etapa, es posible monitorear la condición de resistencia a las cargas cíclicas de la unión estructural al menos en condiciones de laboratorio y obtener la variación de la energía disipada.

Durante la prueba de carga cíclica experimental, se observó que, durante los primeros ciclos de carga o razón de ciclaje, $r_c < 0.5$, los lazos disminuyen

continuamente su área, lo cual corresponde con una disminución de la energía almacenada (R_{WS}) (Figura 6.a) y la energía disipada (R_{Wd}) (Figura 6.b) mientras que la energía residual (R_{Wr}) permanece aproximadamente constante (Figura 6.c). Se observa que el área de los lazos disminuye progresivamente hasta el lazo número 23 y, a partir del lazo 24 el área vuelve a incrementar hasta el ciclo 30 de ruptura.

El incremento progresivo de la energía aplicada (R_{WS}) o decremento progresivo de la energía disipada (R_{Wd}) sugiere la existencia de otros mecanismos de disipación de energía relacionados con la apertura y cierre de la fractura o falla interna en el interior del cuerpo del adhesivo o en las interfaces. Este patrón de disminución y posterior aumento del área del lazo o energía disipada puede ofrecer valiosa información para la detección de daños durante la vida de uniones adhesivas.

6. CONCLUSIÓN

Los sistemas de monitoreo de integridad estructural se encuentran al alcance de poder ser implementados a un bajo coste y con altos estándares de confiabilidad en comparación con los que se tenían en décadas anteriores, pudiendo ser implementados a escala de laboratorio, o para monitoreo de estructuras o máquinas a distancia.

La medición de cambios en propiedades mecánicas como la elasticidad y frecuencias y formas modales han mostrado cierto grado de sensibilidad para ser utilizados en la detección de daños, sin embargo, el amortiguamiento interno o amortiguamiento por histéresis muestra un potencial como parámetro de medición de mayor sensibilidad. No obstante, no existen patrones predeterminados de la forma de disipación de energía de las uniones adhesivas debido a los múltiples mecanismos internos que afectan en diferentes escalas durante la generación de daños.

La integración de un sistema de adquisición de datos para medición de amortiguamiento por histéresis puede realizarse como un sistema de monitoreo de fuerza y desplazamiento mediante celdas de carga y extensómetros en el punto de aplicación de la carga o mediante sistemas de galgas extensométricas y la generación de cargas cíclicas mediante máquinas universales con carga cíclica o dispositivos de generación de carga armónica mediante motores desbalanceados aplicada al componente estructural

deseado. Realizando la medición de los lazos de histéresis es factible obtener la variación de las energías disipadas como indicador de daño en las uniones adhesivas estructurales.

REFERENCIAS

- Hassani, V., Tjahjowidodo, T., & Do, T. (2014). A survey on hysteresis modeling, identification and control. *Mechanical Systems and Signal Processing*. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.04.012>
- 3M Company. (2017). Safety Data Sheet - 3M™ Scotch-Weld™ Epoxy Adhesive EC-2216 B/A Gray.
- Amafabia, D.-a., Montalvão, D., David-West, O., & Haritos, G. (2017). A Review of Structural Health Monitoring Techniques as Applied to Composite Structures. *Structural Durability & Health Monitoring*, 1(2), 91-147. doi:<https://doi.org/10.3970/sdhm.2017.011.091>
- ASTM International. (2010). ASTM D1002-10 Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International.
- Banks, H. T., & Inman, D. J. (1989). *On Damping Mechanisms in Beams*. NASA Langley Research Center, Institute for Computer Applications in Science and Engineering. Obtenido de <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19890020639/downloads/19890020639.pdf>
- Braun, S., Ewins, D., & Rao, S. (Edits.). (2002). *Encyclopedia of Vibration*. Academic Press. doi:10.1006/rwvb.2001
- Diccionario de la Lengua Española*. (s.f.). (Real Academia Española) Recuperado el 11 de 27 de 2022, de <https://dle.rae.es/hist%C3%A9resis>
- Doebeling, S., Farrar, C., Prime, M., & Shevitz, D. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*. New Mexico: Los Alamos National Laboratory.
- Elattar, H., Elminir, H., & Riad, A. (2016). Prognostics: a literature review. *Complex Intell. Syst.*, 2, 125–154. doi:10.1007/s40747-016-0019-3
- Ewing, J. (1885). Experimental researches in magnetism. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 523 - 640. doi:<https://doi.org/10.1098/rstl.1885.001>

- Farrar, C., & Sohn, H. (2000). Pattern recognition for Structural Health Monitoring. *Workshop on Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies*. Las Vegas, NV, Estados Unidos.
- Glisic, B. (20 de 03 de 2022). Concise Historic Overview of Strain Sensors Used in the Monitoring of Civil Structures: The First One Hundred Years. *Sensors*, 22(2397). doi:<https://doi.org/10.3390/s22062397>
- Goodman, L. (2002). Chapter 36. Material Damping and Slip Damping. En C. Harris, & A. Piersol (Edits.), *Harris' Shock and Vibration Handbook* (Fifth Edition ed., págs. 36.1-36.30). Mc Graw Hill.
- Ismail, M., Ikhoulane, F., & Rodellar, J. (2009). The Hysteresis Bouc-Wen Model, a Survey. *Arch Comput Methods Eng*, 161–188. doi:10.1007/s11831-009-9031-8
- Kandl, M., & Groghan, D. (March de 1980). U.S. Navy, LM2500 Gas Turbine Condition Monitoring Development Experience. *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, 79665, V01BT02A064.
- Lesieutre, G. (2002). Damping in FE Models. En *Encyclopedia of Vibration* (págs. 321-388). London, UK: Academic Press.
- Macki, J., Nistri, P., & Zecca, P. (1993). Mathematical models for hysteresis. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 94-123.
- Padthe, A. K., Chaturvedi, N. A., Bernstein, D. S., Bhat, S. P., & Waas, A. M. (2008). Feedback stabilization of snap-through buckling in a preloaded two-bar linkage with hysteresis. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 43, 277–291. doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2007.12.010
- Panteliou, S., Chondros, T., Argyrakis, V., & Dimarogonas, A. (2001). Damping factor as an indicator of crack severity. *Journal of Sound and Vibration*, 235-245. doi:<https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.3299>
- Zhang, J., Perez, R. J., & Lavernia, E. J. (1993). Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials. *Journal of Materials Science*, 28, 2395–2404