

# Uso de tomografía computarizada para la inspección de uniones adhesivas unidas usando adhesivo metilmetacrilato.

Celso Eduardo Cruz González<sup>a</sup> Juan Manuel Salgado López<sup>a</sup>

Luis del Llano Vizcaya<sup>b</sup> Marco Paredes<sup>a</sup>

- a. Dirección de Ingeniería de Manufactura. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

Correo electrónico: [ecruz@cidesi.edu.mx](mailto:ecruz@cidesi.edu.mx), [msalgado@cidesi.edu.mx](mailto:msalgado@cidesi.edu.mx),

- b. Gerencia de Sistemas Mecánicos. Dirección de Ingeniería Mecánica. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

Correo electrónico: [lvizcaya@cidesi.edu.mx](mailto:lvizcaya@cidesi.edu.mx)

## Resumen

Con el fin de determinar la calidad y confiabilidad de materiales compuestos y uniones adhesivas, la industria aeronáutica ha impulsado las técnicas de inspección no destructivas para detectar defectos. Por lo general, las técnicas no destructivas volumétricas son utilizadas en la industria para lograr este propósito. En ese sentido, el objetivo de trabajo es mostrar la efectividad para detectar imperfecciones en uniones adhesivas por medio de tomografía computarizada de una unión adhesiva aluminio-acero para detectar imperfecciones en este tipo de uniones y permitir al analista o ingeniero determinar causas que generaron la falla en componentes unidos con adhesivo.

**Palabras clave:** Acero, Adhesivo, aluminio, tomografía computarizada.

## Abstract

In order to determine the quality and reliability of composite materials and adhesive joints, the aeronautical industry has promoted non-destructive inspection techniques to detect defects. In general, volumetric non-destructive techniques are used in the industry to achieve this purpose. In this sense, the aim of the work is to show the effectiveness to detect imperfections of adhesive joints by means of computed tomography of an aluminum-steel adhesive joint to detect imperfections in this type of joints and allow the analyst or engineer to determine causes that generated the failure of components joined with adhesive.

**Keywords:** Adhesive, aluminum-steel, computer tomography.

---

Artículo arbitrado

---

Recibido: 15 de febrero de 2023      Aceptado: 21 de febrero de 2023

## Introducción.

Con base en la definición del instituto TWI, las pruebas no destructivas (END) son técnicas de prueba y análisis utilizadas por la industria para evaluar la sanidad de un material, componente, estructura o sistema en busca de diferencias características o defectos de soldadura y discontinuidades sin causar daños a la pieza original (TWI, 2022).

Por otro lado, la mayoría de autores reconocidos en el desarrollo de uniones adhesivas coinciden en que las pruebas no destructivas deben ser empleadas en la inspección de la sanidad de las uniones adhesivas. Esta necesidad de conocer la sanidad y con ello la integridad de uniones adhesivas es evidente revisando la literatura en este campo. En ese sentido, en la literatura han sido documentados los métodos más utilizados en la industria aeronáutica y las tendencias de ese tiempo (Ehrhart et.al., 2013, p.235). En este mismo sentido se ha reportado que en una unión adhesiva el módulo se puede determinar mediante la técnica de espectroscopia ultrasónica. Lo anterior con una precisión de  $\pm 6\%$ , mientras el espesor del adhesivo en la junta se puede conocer con la misma precisión que con otras técnicas como por ejemplo: estereoscopia (Cawley & Hodson, 1989, p.1382).

La evaluación de la calidad de las juntas adhesivas en tuberías de plástico de fibra de vidrio mediante NDT térmico activo ha sido reportada en literatura por la industria petrolera, la cual las ha venido empleando en plataformas y tuberías para agua o aceite a temperaturas moderadas. Así, la detección de defectos (fallo adhesivo o desprendimiento) en dichas uniones, gana importancia. Allí se sugieren que los resultados del NDT térmico activo están limitados a espesores de 8mm y que por debajo de

dicho espesor, los resultados son adecuados (Grosso et.al, 2013).

Otro ejemplo de este tipo es el análisis por ultrasonido y termografía lock-in para la evaluación del desprendimiento de juntas adhesivas en materiales compuestos. En dicho trabajo se consideraron nueve juntas con diferentes defectos en forma de despegue parcial y la inspección se basó en la propagación de ondas guiadas por ultrasonidos. Los resultados mostraron que las representaciones bidimensionales de los valores de la raíz cuadrada media ponderada permitieron identificar la presencia de defectos reales en la película adhesiva y determinaron su geometría (Palumbo et.al., 2016, p.7).

La aplicación del método de termografía infrarroja pulsada para la evaluación no destructiva de juntas adhesivas de material compuesto para aeronaves. La inspección, se realizó en las uniones adhesivas de la estructura portante del ala y las juntas estructurales relacionadas específicamente. Los resultados, sugieren que su interpretación es sencilla y se pueden utilizar para la evaluación tanto cualitativa como cuantitativa de las uniones adhesivas de piezas compuestas delgadas (Kostroum & Dvorak, 2021, p.17).

La inspección basada en emisiones acústicas también ha sido aplicada para la determinación del daño por fatiga en juntas adhesivas de compuesto de fibra de carbono (CFRP). Esto, debido a que las uniones adhesivas se emplean cada vez más y están sometidas a usos severos cada vez más frecuentemente. Por tal motivo, los autores realizaron el procedimiento de inspección en uniones adhesivas CFRP-CFRP mediante emisión acústica. Sus resultados sugieren que, tras una adecuada elaboración y filtrado mediante algoritmos de reconocimiento de patrones, la

técnica permite una identificación y caracterización efectiva de la extensión de los daños por fatiga en dichas uniones adhesivas (Carboni & Bernasconi, 2022, p.395).

Por su parte el método de inspección de ondas Lamb en uniones adhesivas ha sido investigado y se ha señalado que los defectos más típicos encontrados con la técnica de ondas Lamb fueron huecos y adhesión débil en el sustrato. Lo anterior, apunta a dicha técnica como una posible solución de inspección efectiva sin limitante del sustrato (Ramalho, Lopez y da Silva, 2022, p.20).

Como pudo notarse de la revisión bibliográfica, diversas técnicas no destructivas han sido aplicadas en uniones adhesivas de fibra de carbono y para la industria aeronáutica. Además, que queda en claro que estas son un tema de relevancia industrial, sobre todo si están enfocadas en la aplicación en materiales compuestos de la industria aeronáutica. En este sentido debe mencionarse que las técnicas volumétricas son las más aplicadas; ya que los defectos que se generan en las uniones adhesivas son variables y difíciles de detectar por otro tipo de técnicas no destructivas. No obstante, no existe información suficiente de la inspección de uniones adhesivas utilizando tomografía computarizada (CT).

La tomografía computarizada (CT), es un método radiográfico que proporciona una técnica de examinación volumétrica ideal cuando el objetivo principal es ubicar y dimensionar el detalle plano y en tres dimensiones (ASTM E1441-11. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging).

En este trabajo se empleó un adhesivo base metilmetacrilato auto curable en uniones aluminio-aluminio, acero-acero y acero-aluminio. El objetivo es mostrar la efectividad para detectar imperfecciones de la inspección por medio de

tomografía computarizada de una unión adhesiva aluminio-acero para detectar imperfecciones en este tipo de uniones y permitir al analista o ingeniero determinar causas que generaron la falla en componentes unidos con adhesivo. Además de presentar como alternativa de inspección no destructiva la tomografía computarizada aplicada en uniones adhesivas entre aluminio y acero.

## **Metodología.**

### **Preparación de uniones adhesivas.**

Las uniones adhesivas, se prepararon mediante la metodología estipulada en la norma (ASTM D1002. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), 2019), así como los métodos y herramientas diseñados por (Marin-Galicia, Santillan & Cruz –Gonzalez, 2020)

El proceso general, fue la activación de la superficie mediante limpieza ultrasónica, chorro de arena, limpieza con acetona y secado al aire. Una vez secos los sustratos se procedió a colocarlos entre los sujetadores del herramental; los topes se ajustaron a colocarlos entre los sujetadores del herramental y los topes se ajustaron para generar un espesor de 0.3 mm de película adhesiva. En la sección de materiales, se describirán los sustratos empleados en este trabajo. La Figura 1, muestra un ejemplo del proceso de pegado.



Figura 1. Esquema de proceso de pegado en herramental para probetas. Fuente: elaboración propia.

### Inspección post-fractura.

Se realizó una inspección visual post-fractura en las probetas ensayadas de aluminio-acero, para determinar el modo de falla de la unión adhesiva, con el fin de relacionar esta información con lo encontrado mediante CT. La inspección estereográfica post-fractura, se realizó en tres grupos (aluminio-acero) una vez que se sometieron a una carga estática en tensión. Lo anterior, mediante el empleo de microscopio estereoscopio Carl Zeiss modelo Axiovision. Las observaciones, se realizaron a 7X, 20X y 30X de magnificación.

### Tomografía computarizada (CT).

La inspección por medio de tomografía computarizada (CT), se realizó por medio de un escáner Phoenix -vtomex - m. Para la inspección, se empleó un voltaje de 210 kV, una corriente de 210  $\mu$ A, una resolución de 44.59  $\mu$ m, filtrado con 0.3mm CU, 1600 imágenes y un detector modelo GE DXR-250. Finalmente, el dimensionamiento del defecto se llevó a cabo con las herramientas del Software VG Studio Max 3.2.

### Materiales.

Los materiales involucrados fueron placas de aluminio 6061-T6 de 6mm de espesor y acero de alta resistencia DUAL-TEN® 590/600 de 3.2 mm de espesor. Las probetas fueron cortadas y se prepararon con las dimensiones estipuladas en la norma ASTM D1002. Las tiras de 120x25x espesor de pared de cada lámina se cortaron utilizando de una máquina de corte con chorro de agua marca Mitsubishi modelo Suprema. Posteriormente, se mecanizaron hasta las dimensiones finales mediante una maquina CNC HASS VF2. Después, las dimensiones fueron corroboradas mediante calibrador Vernier 12" Mitutoyo de 0.01mm de exactitud. Finalmente, se procedió al pegado de las probetas como se describió en la sección de metodología.

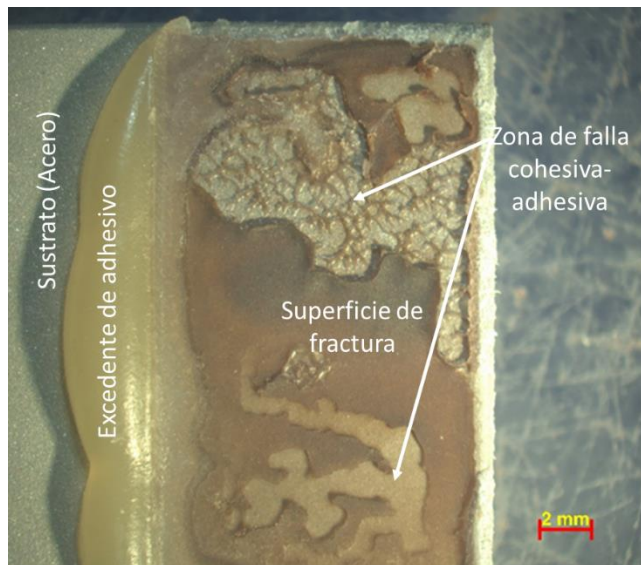
El adhesivo utilizado fue el metil metacrilato MP55420, el cual es un adhesivo de dos componentes que puede unir plásticos, metales y materiales compuestos. Este adhesivo cura a temperatura ambiente y libera calor mediante una reacción exotérmica cuya temperatura puede alcanzar 70°C (fuente: el autor). El tiempo de manejo es de 13 minutos máximo y cura totalmente después de 24 horas. La información técnica de este adhesivo se puede encontrar en la hoja técnica (HB fuller technical data sheet, 2018).

### Resultados.

#### Inspección post-fractura.

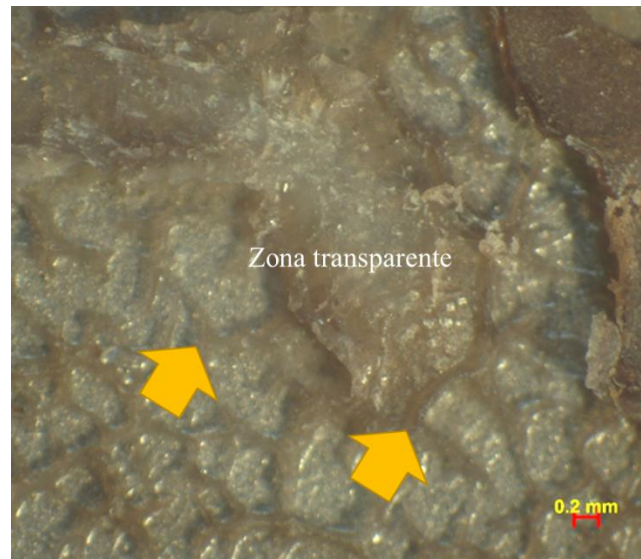
El efecto del curado en las uniones adhesivas, es muy importante ya que tiene impacto directo en las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas (Cruz-González, Vargas –Arista, Santillán, Barba Pingarron & Guzmán, 2022). En ese sentido, se ha notado que el cambio de coloración (de ámbar a café oscuro) en la superficie de fractura de las

probetas fracturadas aluminio-acero sugiere falla cohesiva-adhesiva (ver Figura 2).



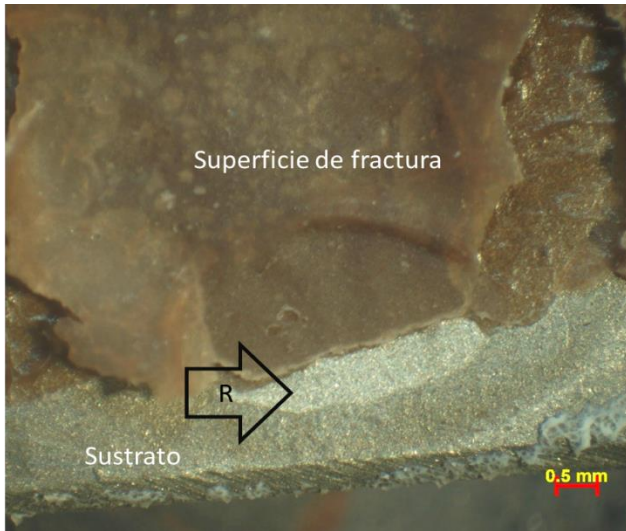
**Figura 2. Superficie de fractura de probeta de tensión de unión aluminio-acero (7X de magnificación). Fuente: elaboración propia**

Lo anterior lleva a la necesidad de realizar la inspección post-fractura utilizando microscopio estereográfico en la superficie de fractura de cada probeta aluminio-acero. Por tal motivo, se procedió a inspeccionar la superficie de la zona café oscuro, encontrando áreas que parecieran óxido o bien algún problema generado durante el curado de la película de adhesivo.



**Figura 3. Imagen a mayores aumentos de la zona falla cohesiva-adhesiva (30X de magnificación). Fuente: elaboración propia**

Posteriormente, se procedió a remover una sección de la película de adhesivo sobre la superficie de la probeta para verificar si lo observado era óxido. La Figura 4, muestra el resultado de la remoción de una pequeña cantidad de adhesivo en la superficie del sustrato acero. En la superficie (ver flecha negra Fig. 4), se puede apreciar una parte del sustrato totalmente limpia, se aprecia el acabado superficial sin algún tipo de oxidación. Por lo tanto, se descarta que el cambio de coloración sea generado por óxido de la superficie.



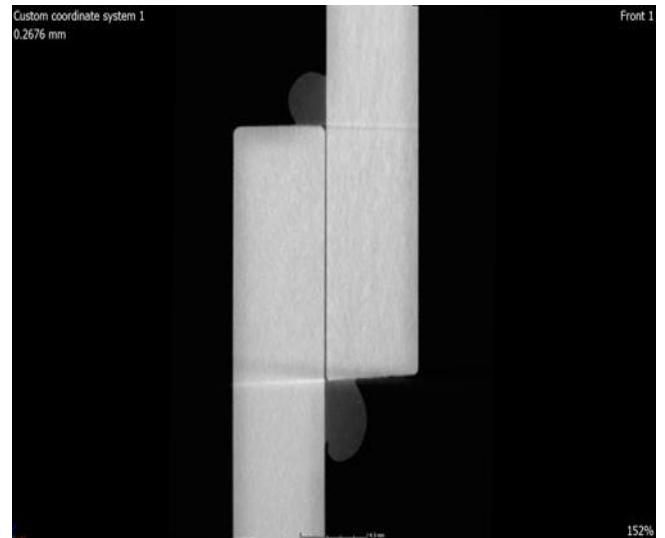
**Figura 4. Superficie de fractura de probeta de tensión de unión sustrato acero (20X de magnificación). Fuente: elaboración propia**

### Inspección CT.

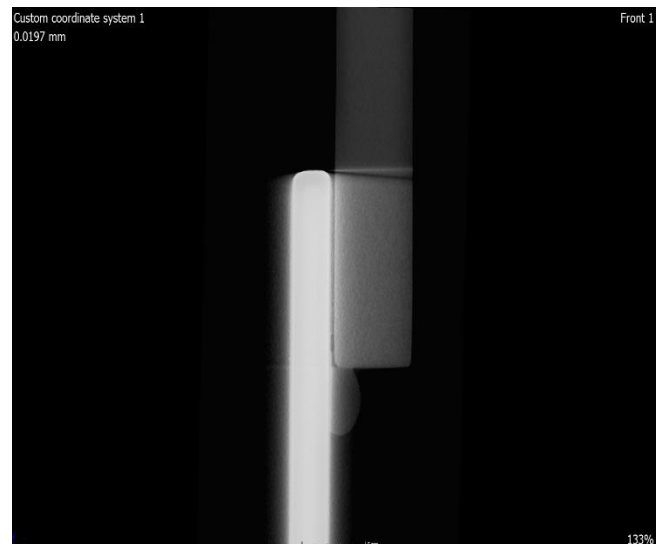
Una vez inspeccionada la superficie de fractura, se procedió a revisar la sanidad de los testigos de las probetas aluminio-acero mediante CT. La Figura 5, muestra la sección transversal de unión adhesiva aluminio-aluminio a 133% de magnificación donde se puede observar los sustratos y la película adhesiva. Por otro lado, la Figura 6 muestra la sección transversal de la unión adhesiva aluminio-acero a 133% cuyos sustratos de espesor disímil pueden ser notados.

Una vez inspeccionado la sección transversal, se procedió a inspeccionar dicha sección desde una vista superior a 188% ya que en la primera inspección, no se localizaron defectos. En la Figura 7, se muestra la inspección en vista superior de la película adhesiva a lo largo del traslape de la junta. El resultado de la inspección CT, muestra una superficie limpia y no se aprecian defectos de sanidad. Esto, es congruente con el resultado de prueba de tensión donde se apreció una fractura cohesiva.

En contraste, la Figura 8 muestra la superficie del sustrato de acero. En dicha Figura, se puede apreciar un defecto señalado por flechas amarillas el cual se encuentra dentro de la película adhesiva. La extensión del defecto, es de aproximadamente el 45% de la superficie interna de la película adhesiva.



**Figura 5. Unión adhesiva aluminio-aluminio cuyos sustratos tienen 6mm de espesor. Fuente: elaboración propia**



**Figura 6. Unión adhesiva aluminio-acero cuyos sustratos tienen 6mm y 3.2mm de espesor. Fuente: elaboración propia**

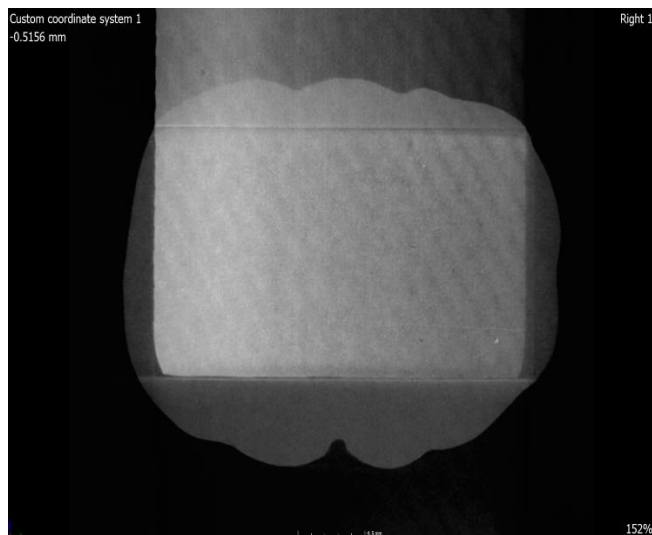


Figura 7. Vista superior de la unión aluminio-aluminio sin defectos. Fuente: elaboración propia

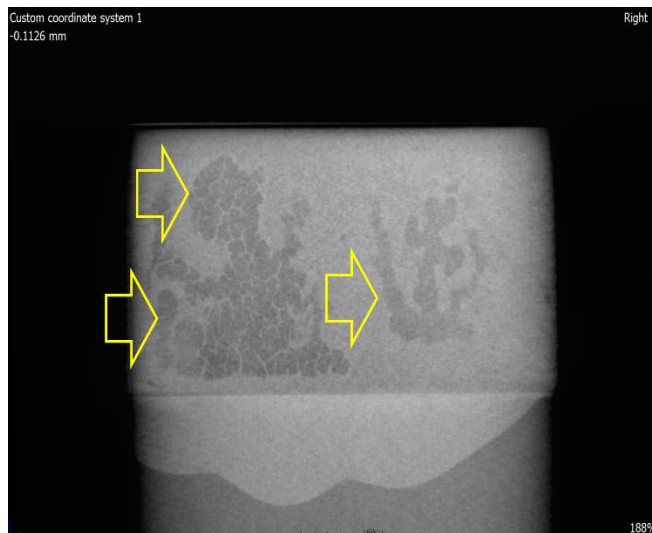


Figura 8. Vista superior de la unión aluminio-acero con defecto (señalado con flechas amarillas). Fuente: elaboración propia

Debido a que la reacción de curado del metilmetacrilato es exotérmica y que los sustratos tienen diferentes conductividades térmicas, se determinó la cantidad de calor de cada sustrato por medio de la Ley de Fourier para la transferencia de calor (Ecuación 1). Se consideró el tiempo de distribución de temperatura de pared interna con reacción exotérmica a 70°C y la pared externa a 21°C, en relación a espesor de probeta y

conductividad térmica de cada material. (Çengel, Yunus, 2011). (Mills, Anthony F., 1997), (Incropera, F.P., 1999).

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases. En la figura 9 puede observarse el esquema de flujo de calor a través de una pared o sustrato.

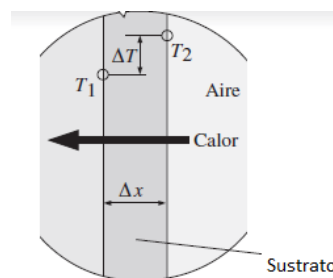


Figura 9. Conducción del calor a través de sustrato. Fuente: elaboración propia.

$$Q_{cond} = k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$

La tasa de conducción de calor  $Q_{cond}$  a través de una capa de espesor constante  $\Delta x$  es proporcional a la diferencia de temperatura  $\Delta T$  en la capa y el área  $A$  normal a la dirección de transferencia de calor, mientras que es inversamente proporcional al espesor de la capa. La constante de proporcionalidad  $k_t$  es la conductividad térmica del material, la cual es una medida de la capacidad del material para conducir calor.

En el caso límite de  $\Delta x \rightarrow 0$ , la ecuación (1) se reduce a la forma diferencial Ec. (2).

$$Q_{cond} = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2)$$

La cual se conoce como ley de Fourier de conducción de calor, e indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa misma dirección. El calor es conducido en la dirección de temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo.

Cuando la temperatura disminuye con  $x$  creciente. Por consiguiente, se agrega un signo negativo en la ecuación para hacer de la transferencia de calor en la dirección  $x$  positiva una cantidad positiva.

## Discusión.

Los resultados de la inspección mediante estereoscopio, revelaron que el cambio de coloración no fue provocado por oxidación superficial de los sustratos. Esto, pudo ser corroborado al descubrir la superficie limpia del sustrato de acero (Figura 4). Para (Omairey, Jayasree, & Kazilas, 2021), las incertidumbres más comunes en una unión adhesiva pueden manifestarse como enlaces de beso, porosidad y vacíos en el adhesivo. En ese sentido, el defecto observado se asemeja a un enlace de beso (Baker & Nezhad, 2021).

Sin embargo, los enlaces de beso están relacionados con contaminación en la superficie del sustrato que inhibe la formación de la unión. En este caso, es notorio que ocurrió un fenómeno que generó un defecto en la película adhesiva en forma de fractura superficial en el lado del sustrato de acero; es posible relacionar un causal debido a cantidad de flujo de calor conducido. El aluminio al ser mejor conductor de calor, absorbe 91.6% aproximadamente más cantidad de calor que el acero, provocándose una dirección de flujo disipado en dirección a sustrato de aluminio, por consecuencia se determina un curado a temperatura no homogénea. Conservándose de forma simultánea mayor temperatura en el acero mientras en aluminio se tiene decremento de temperatura en dependencia a los espesores sugeridos en la unión adhesiva.

En ese trabajo, la técnica CT se aplicó en una unión adhesiva con metales y pudo detectarse el defecto tipo enlace de beso en la unión aluminio-acero. Además de la identificación de este defecto, también esta técnica hizo posible determinar la

zona y extensión del defecto a lo largo de la película adhesiva.

## Conclusiones.

Con base en los resultados expuestos en los párrafos anteriores, se pueden concluir que:

Considerando que defectos que se generan en las uniones adhesivas son variables y difíciles de detectar, entonces esta técnica es una alternativa viable para su aplicación en uniones de este tipo que son utilizadas en la industria aeronáutica y en materiales compuestos. Además, la técnica de inspección volumétrica, tomografía computarizada puede usarse para completar la información del tipo de defectos en uniones adhesivas de aluminio-aluminio, acero-acero y acero-aluminio unidas con adhesivo base metilmetacrilato auto curable.

Como conclusiones específicas se obtiene lo siguiente:

Se observó cambio de coloración (de ámbar a café oscuro) en la superficie de fractura de las probetas fracturadas aluminio-acero que sugieren falla cohesiva-adhesiva.

Se inspecciona la superficie de la zona café oscuro, encontrando zonas que parecieran óxido o bien algún problema generado durante el curado de la película de adhesivo. Dicha hipótesis es descartada, ya que se observó que el cambio de coloración no era generado por óxidos de la superficie. Esto fue comprobado después de la remoción de una pequeña cantidad de adhesivo en la superficie del sustrato acero, donde se apreció una parte del sustrato totalmente limpia, sin algún tipo de oxidación.

Posterior a la inspección de la superficie de fractura, y revisar la sanidad de los testigos de las



probetas aluminio-acero mediante CT se muestra en sección transversal de la unión adhesiva aluminio-acero a 133%, el hallazgo de sustratos de espesor disímil.

En inspección de sanidad de los testigos de las probetas aluminio-acero mediante CT en vista superior de la película adhesiva a lo largo del traslape de la junta. Se manifiesta una superficie limpia y no se aprecian defectos de sanidad. En correspondencia congruente con el resultado de prueba de tensión donde se apreció una fractura cohesiva.

Es posible apreciar en la superficie del sustrato de acero un defecto el cual se encuentra dentro de la película adhesiva. La extensión del defecto, es cuantificable siendo aproximadamente el 45% de la superficie interna de la película adhesiva.

Adicionalmente es posible calcular espesores correlacionados con el material de sustrato y balancear la disipación de calor de la reacción exotérmica del adhesivo bilateralmente en forma homogénea.

## Agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial el invaluable apoyo a la ciencia en México.

## Referencias.

(2019). *ASTM D1002. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. American Society of Testing Materials.

*Aluminum 6061-T6; 6061-T651*. (s.d.). Fonte: MATWEB. Material Property Data: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matgu id=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b&ckck=1>

- ArcelorMittal*. (s.d.). Fonte: DH steels for cold drawing: [https://automotive.arcelmittal.com/products/flat/third\\_gen\\_AHSS/DH](https://automotive.arcelmittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/DH)
- ASTM E1441-11. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. (s.d.). American Society for Testing Materials.
- Baker, A., & Nezhad, H. Y. (2021). 15 - Adhesively bonded repairs to highly loaded structure. Em *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 437-497). Berlin: Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies.
- Carboni, M., & Bernasconi, A. (2022). Acoustic emission-based monitoring of fatigue damage in CFRP-CFRP adhesively bonded joints. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 393-397.
- Cawley, P., & Hodson, M. J. (1989). The NDT of Adhesive Joints Using Ultrasonic Spectroscopy. Em D. O. Thompson, & D. E. Chimenti, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. (pp. 1377-1384). Boston: Springer.
- Cruz González, C. E., Vargas-Arista, B., Santillan, S., Barba Pingarron, A., & Guzman, I. (2022). Effect of curing post-treatment time on mechanical properties and stress distribution of adhesively bonded dissimilar steel-aluminum joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 121*, 4929-4940.
- Ehrhart, B., Valeske, B., & Bockenheimer, C. (2013). 9 - Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: methods for testing adhesively bonded composites. Em *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites* (pp. 220-237). Berlin: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.
- Grosso, M., Marinho, C. A., Nesteruk, D. A., Rebello, J. M., Soares, S. D., & Vavilov, V. P. (2013). Evaluating quality of adhesive joints in glass-fiber plastic piping by using active thermal NDT. *Proceedings Volume 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV; 87050T (2013)*. Baltimore, Maryland, United States: SPIE Defense, Security, and Sensing.
- HB Fuller*. (s.d.). Fonte: MP55420 Technical Data Sheet: [https://www.hbfuller.com/-/media/files/resource-library/tds/structural-marine-bonding/mp55420-tds\\_en-20200707.pdf](https://www.hbfuller.com/-/media/files/resource-library/tds/structural-marine-bonding/mp55420-tds_en-20200707.pdf)
- Kostroun, T., & Dvořák, M. (2021). Application of the Pulse Infrared Thermography Method for Nondestructive

Evaluation of Composite Aircraft Adhesive Joints. *MDPI. Materials*, 1-19.

Marin-Galicia, D. N., Santillan, S., & Cruz-González, C. E. (2020). *Diseño y manufactura de herramienta para fabricación de probetas empleadas en investigación de uniones adhesivas/tesis que para obtener el título de Licenciada en Tecnología*. Cuautitlán Izcalli., Mexico: Universidad Autónoma de México.

MatWeb. *Material Property Data*. (15 de 12 de 2021). Fuente: <http://www.matweb.com/>

Omairey, S., Jayasree, N., & Kazilas, M. (2021). Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints. *SN Applied Sciences volume 3*, 1-14.

Palumbo, D., Tamborrino, R., Galiotti, U., Aversa, P., & Luprano, V. (2016). Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints. *NDT & E International*, 1-9.

Petrie, E. (1990). *Handbook of Adhesives and Sealants, Third Edition*. Chicago: McGraw-Hill.

Ramalho, G. M., Lopes, A. M., & da Silva, L. F. (2022). Structural health monitoring of adhesive joints using Lamb waves: A review. *Structural Control and Health Monitoring*, 1-22.

TWI. (26 de 10 de 2022). Fuente: What is Non-Destructive Testing (NDT)?: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-non-destructive-testing>

Wojtczak, E., & Rucka, M. (2019). Wave Frequency Effects on Damage Imaging in Adhesive Joints Using Lamb Waves and RMS. *MDPI. Materials*, 1-18.

Çengel, Yunus. (2011). *Transferencia de calor y de masa un enfoque práctico*, Tercera Edición, Editorial McGraw-Hill, México

Mills, Anthony F. (1997), *Transferencia de calor*. Tercera edición, Irwin, México.

Incropera, F.P.(1999), *Fundamentals of heat and mass transfer*, J. Wiley