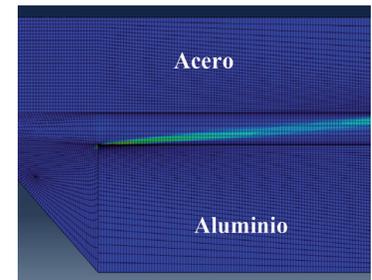


Evaluación por elementos finitos de uniones con adhesivos de materiales disímiles (acero – aluminio)

Finite element evaluation for adhesive joints dissimilar material (steel – aluminum)



Celso Cruz-González¹, Alexandre Jamilloux², Saul Santillán-Gutiérrez³, Pedro González-García⁴, Jaime Taha-Tijerina⁵, Rodrigo Romero⁵ y Hugo Gámez-Cuatzin¹

¹ Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Parque Industrial Cuamatla. Av. Desarrollo, s/n -54763 Cuautitlán. Izcalli (México).

² SIGMA Clermont. Campus des Cézeaux. 27, Rue Roche Genès -63178 Aubière Cedex (France).

³ UNAM. Centro de Alta Tecnología. Blvd. Juriquilla 3001, 76230 Juriquilla, Oro (México).

⁴ CONACYT. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa Pie de la Cuesta, 702. Desarrollo San Pablo - 76125. Querétaro (México).

⁵ METALSA. Departamento de Tecnología. Apodaca 6660. Nuevo León (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8619> | Recibido: 17/10/2017 • Evaluando: 26/10/2017 • Aceptado: 09/02/2018

ABSTRACT

- In the automotive industry the demand for the reduction of CO₂ emissions and environmental issues has generated regulations such as the CAFE (Corporate Average Fuel Economy). One critical point to be addressed is the weight reduction, this can be achieved by the substrate combination that can provide light weight, strength and stiffness. Adhesive bonding, is a technology in which one of its advantages is that it can join dissimilar materials. However, for the safe operation of bonded components, it is necessary to know their mechanical behavior in order to establish suitable operating parameters. The present manuscript presents a finite element analysis for dissimilar metal (aluminum-steel) adhesive bonded joints with different adhesives (methyl methacrylate, one and two component epoxy) and different thicknesses (3.9 and 2.9 mm). The substrates and adhesives were characterized to obtain a positive identification of the material and to feed the ABAQUS® software employed in the finite element analysis. In order to validate the model, lap shear tests were performed on samples bonded with the adhesives mentioned before. To verify the amount plastic strain, strain gauges were used bonded near the overlap area. Finally, post-fracture analyzes were used to analyze the type of failure. The results, provide information related to the mechanical behavior and stress distribution of the joints. It was revealed, that the strength of the joint depends on the type of adhesive and that the shear strength is not affected by the ductility of the adhesive. Additionally, the average normal stresses are greater in the edges of the adhesive joint and are responsible for the generation of the crack as could be verified in the post-fracture analysis. Finally, extensometer analysis suggested that higher stress was concentrated in the aluminum adherend without surpassing the yield stress.
- **Key words:** Adhesive, finite element simulation, stress distribution, scanning electron microscopy, foil strain gauge.

RESUMEN

En la industria automotriz la demanda para la reducción de emisiones de CO₂ y los problemas ambientales, ha generado normativas como la ley CAFE (Corporate Average Fuel Economy). Uno de los puntos de dicha normativa es la reducción de peso, dicha, puede realizarse mediante la combinación de sustratos que propor-

cionen ligereza, resistencia y rigidez. Los adhesivos, son tecnologías en la cual una de sus ventajas es que puede unir materiales disímiles. Sin embargo, para la operación segura de los componentes, es necesario conocer el comportamiento mecánico de dichas uniones para establecer parámetros de operación adecuados.

El presente trabajo presenta un análisis, mediante elementos finitos, de uniones con tres adhesivos diferentes (metil metacrilato, epóxico de un componente y epóxico de dos componentes) con sustratos disímiles en propiedades (aluminio-acero) y espesores (3.9 y 2.9 mm)

Los sustratos y adhesivos, se caracterizaron para obtener una identificación positiva del material y alimentar el software ABAQUS® utilizado en la simulación de elementos finitos. Para validar el modelo, se realizaron pruebas de cizallamiento en muestras unidas con los tres adhesivos. Para verificar la deformación plástica generada, se emplearon galgas extensométricas cercanas a la zona desolape de la unión. Finalmente, análisis post-fractura fueron empleados para analizar el tipo de falla.

Los resultados, generaron información respecto al comportamiento mecánico y distribución de esfuerzos de las uniones estudiadas. En el mismo orden de ideas, se reveló que la resistencia de la unión depende del tipo de adhesivo y que la resistencia al corte no se ve afectada por la ductilidad del adhesivo. También, que los esfuerzos normales promedio son mayores en las aristas de la unión adhesiva y son los responsables de la generación de la grieta como se pudo comprobar en los análisis post-fractura. Finalmente, los análisis mediante extensómetro sugirieron que el esfuerzo mayor se concentra en el adherendo de aluminio sin sobre pasar el esfuerzo de fluencia.

Palabras clave: Adhesivo, simulación por elementos finitos, distribución de esfuerzos, microscopía electrónica de barrido, extensometría.

1. INTRODUCCIÓN

Las emisiones de CO₂, son problemas de salud y medio ambientales cuya disminución o tratamiento han generado investigaciones como la publicada por Yuramendi-Caballero[1]. La norma de economía de combustibles corporativa, sugiere la reducción de peso de la estructura de los vehículos como para reducir de emisiones de CO₂. Una estrategia, es usar uniones de materiales disímiles (bajo peso, alta resistencia) como acero-aluminio. Los adhesivos estructurales han incrementado su uso en aplicaciones

automotrices y aeroespaciales. En comparación con los métodos de unión convencionales como pernos, remaches y soldadura, el adhesivo proporciona ventajas; como la distribución de carga, reducción de concentración de esfuerzos, peso ligero y sellado [2]. A pesar de dichos beneficios, los adhesivos se utilizan comúnmente en estructuras secundarias y raramente en estructuras críticas.

Las uniones adhesivas de solape simple, son muy usadas debido su geometría simple y eficiencia estructural. Sin embargo, tiene como desventaja que la carga excéntrica induce flexión en los sustratos y altos esfuerzos normales en los bordes. [3] [4] [5]. Por lo tanto, desde el punto de vista de diseño, es necesario entender la distribución de esfuerzos en la interface para predecir la resistencia de la unión bajo carga estática.

En la actualidad, el análisis de elementos finitos (FEA), es un método computacional ampliamente utilizado en la solución de problemas de frontera. En este método, un medio continuo se subdivide en varios elementos bien definidos unidos por nodos [6].

El análisis por elementos finitos ha sido utilizado para predecir el efecto de la humedad en las propiedades mecánicas [6][7]. También, dicho análisis ha sido empleado para el estudio de uniones híbridas (perno/adhesivo) [8] [9]. Karachalios et al. [10] [11], estudiaron el efecto de la longitud de solape y espesor del sustrato en uniones de aceros de baja y alta resistencia unidos con adhesivos epoxicos de uno y dos componentes. Dichos investigadores, notaron que en una unión con solape pequeño la falla es dominada por la cedencia global del adhesivo. En contraste, para una longitud de solape grande la falla ocurre debido a deformaciones por cortante y pandeo del sustrato.

Para hacer un análisis correcto, es importante tener en cuenta las diferencias en las propiedades mecánicas básicas, el comportamiento higrotérmico y la aparición de altos gradientes de tensión en ciertas regiones de la unión. La película de adhesivo es delgada en comparación con el espesor de los sustratos. Se requiere una malla fina en estas áreas, por lo que el número de grados de libertad en una unión es bastante alto. Un análisis completo de elementos finitos debería incluir, en primer lugar, los efectos de pandeo, cizallamiento y comportamiento no lineal del adhesivo [12].

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de elementos finitos para uniones metálicas diferentes (aleación de aluminio A356 y acero de doble fase DUALTEN® 590/600), unidas con tres adhesivos diferentes (MP55420, DC-80 y Betamate 120) para determinar el estrés distribución dentro de las articulaciones. Además, realizar observaciones visuales y electrónicas de barrido para el análisis post-fractura en el sustrato de aluminio y acero.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Se han utilizado dos sustratos para preparar las probetas de cortante simple: aluminio A356 (7Si-0.3Mg) (placa (1500 x 1500x3.9 mm) y DUAL-TEN® 590/600 (1500x1500x2.9 mm), una fase doble acero (matriz de ferrita y aproximadamente 5-15% martensita). Se utilizaron tres adhesivos diferentes: epoxi estructural de un componente (Betamate 120), un sistema epoxi de dos componentes (DC-80 Lord) y un componente de metilo de dos componentes metacrilato (MP55420 ASI).

El Betamate 120, es un adhesivo epoxi en pasta de un componente con aluminio como relleno, densidad de $1,14 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ y viscosidad de 50 Pa.s. El DC-80, es un adhesivo de dos componentes que consta de resina y endurecedor. La resina es una pasta que consta de 90-95% de resina epoxi, 1-5% de dióxido de titanio y 0.1-0.9 de óxido de vidrio. La resina tiene una densidad de $1.21 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ a

25 °C. Además, el endurecedor (densidad de $1.01 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ a 25 °C) consiste en 85-90% de resina de poliamida, 1-5% de compuesto de amina, 0.1-0.9% de óxido de vidrio y 0.1-0.9% de resina epoxi. Finalmente, el MP55420 es un adhesivo de metacrilato de dos componentes, que consiste en resina y activador, con viscosidades de 130 y 50 Pa.s a 25 °C, respectivamente.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUSTRATOS

La caracterización mecánica se realizó siguiendo la norma ASTM E8 [13]. Para el acero, se prepararon probetas de ensayo estándar (12,5 mm de ancho) y tres de tipo hueso de perro mediante mecanizado. Por el contrario, para la lámina de aluminio, se usaron tres sub-probetas (6 mm de ancho).

El aparato utilizado fue una máquina INSTRON 4482 con agarres planos moleteados. Se usaron extensómetros de clip (50 y 25 mm de longitud calibrada) para calcular el esfuerzo de fluencia del acero y aluminio, respectivamente. Las dimensiones de las probetas se midieron utilizando un calibrador Vernier Mitutoyo 500-752-10.

Para la caracterización química, se utilizó un equipo de emisión óptica Spectrotest y las metodologías ASTM E415 [14] y E1251 [15]. Cinco medidas aleatorias se realizaron a través de la superficie de la muestra (tamaño 25x25 mm).

2.3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL ADHESIVO

El adhesivo se vertió dentro de un molde de Teflon®. El molde (8 mm de grosor) tenía tres figuras de hueso de perro, cuyas dimensiones son 16 mm de ancho, 6 mm de espesor, 38 mm de longitud, 12 mm de radio y un extremo de agarre de 28x50 mm. Después, los adhesivos se sometieron a las condiciones de curado. El MP55420 generó una reacción exotérmica que pasa de 25 a 80 °C, luego curó a los 5 min. Para el DC-80, el curado fue a 150 °C (en un horno) por 30 min. Finalmente, el adhesivo Betamate 120 se sometió a curado a 170 °C (en un horno) por 20 min. Una vez que se completó el curado, las probetas permanecieron en el molde durante 24 h. Se utilizó un extensómetro de video de clase A MTS Model Avx 54 advantage para obtener el gráfico de tensión-deformación a $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ de velocidad.

2.4 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS DE CIZALLADO

Se empleó la norma ASTM D1002 [16], tanto el aluminio (2.9 mm) y acero (3.9 mm) fueron mecanizados a las dimensiones especificadas. Antes de unir las superficies, estas se limpiaron con acetona, ultrasónicamente a 20 kHz durante 3 minutos y secaron con aire (10 °C), finalmente se limpiaron con acetona. El aluminio se lijo con lija de grano 80 para reducir el patrón generado por el molde de fundición de arena. La rugosidad promedio (Ra) para el acero limpio fue de 0,39 y 0,45 μm para el aluminio. Al final, los sustratos se unieron y curaron (ver sección 2.2). Después del curado, se midieron los grosores de la capa de adhesivo (por medio de un comparador) y se determinó el promedio (0,150 mm). Cinco especímenes fueron preparados.

2.5 PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE CIZALLADO

Se utilizaron procedimientos de ASTM D1002 [16]. La máquina utilizada fue una máquina INSTRON 4482 con agarres planos moleteados. La velocidad de las pruebas se seleccionó con base a ASTM D1002 (1.2 mm.min⁻¹). Las dimensiones de los especímenes de prueba se midieron con un Vernier.

2.6 MODELO FE, CONDICIONES DE FRONTERA Y CARGA

El software ABAQUS® se usó para simular las uniones de acero-aluminio. El análisis numérico se realizó utilizando conside-

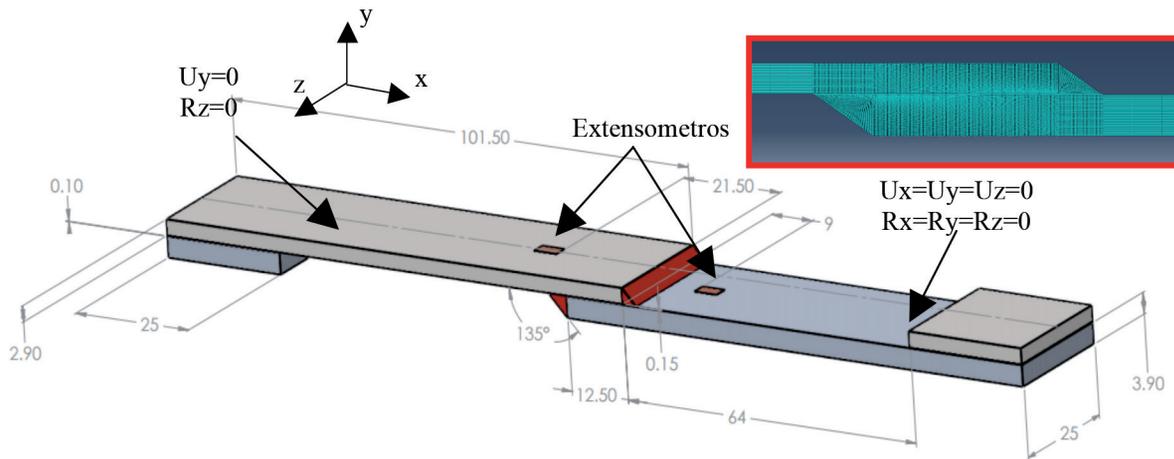


Figura 1: Representación tridimensional de una prueba de cizallado con extensómetros (mm)

raciones geométricas no lineales y propiedades de los materiales. La unión a solape se modeló en dos dimensiones (Fig. 1, recuadro rojo). La malla se compuso de elementos cuádruples con dos órdenes geométricos; CPS8R que es un cuadrilátero de tensión de plano bi-cuadrático con 8 nodos, integración reducida y el CPS4R que es un cuadrilátero de tensión bilineal plana con 4 nodos, integración reducida, control de reloj de arena. La malla de acero y aluminio está compuesta de CPS8R con 8 nodos y la malla de la capa adhesiva está compuesta por CPS4R con 4 nodos.

La geometría se basó en el espécimen de prueba de cizallamiento descrito previamente. Las dimensiones del acero y las placas de aluminio fueron las mismas en todos los experimentos, el espesor de la película de adhesivo fue de 0,150 mm (Figura 1). Aunque podrían ocurrir pequeños desplazamientos (U) y rotaciones (R) durante las pruebas en los ejes x, y y z, estos pueden despreciarse.

2.7 INSTRUMENTACIÓN CON EXTENSÓMETROS

Para unir los extensómetros a los sustratos, la superficie se lijó, acondicionó y limpió siguiendo las instrucciones del fabricante. Finalmente, los extensómetros (Vishay EP-08-250BG-120) se unieron a la superficie (Figura 1) [11]. La unión (calibradores de adherencia-deformación) permaneció durante 24 h, luego los cables de conexión se soldaron al extensómetro y se conectaron al sistema P3.

2.8 INSPECCIÓN POST-FRACTURA

Después de la prueba de cizallado, se realizó una inspección visual en cada espécimen fracturado para determinar el modo de fractura. Se utilizó un estereoscopio Optima V20 para observar las superficies a 20x. Se realizó un análisis posterior a la fractura para complementar la inspección visual, para la determinación del modo de fractura sobre el adhesivo restante en la superficie. El análisis posterior a la fractura se realizó con un microscopio electrónico de barrido JEOL LV600. Las ampliaciones utilizadas variarán entre 100-10000x, el rango de distancia de trabajo fue de 9 a 10 mm.

3 RESULTADOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE SUSTRATOS

Los resultados se muestran en la Figura 2a, los materiales exhiben un comportamiento similar, ya que tienen casi la misma parte elástica lineal y un punto de fluencia bien definido. Otra característica importante es que el acero tiene valores de resis-

tencia de casi dos veces el aluminio y un mayor coeficiente de endurecimiento por deformación, lo que sugiere que el acero tiene una mejor distribución de deformación que el aluminio (Figura 2a, recuadro). Los resultados del análisis químico (Figura 1a, recuadro) están de acuerdo con la química típica para un acero de doble fase y una aleación de aluminio 356.

3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ADHESIVO

El comportamiento de tensión-deformación para los adhesivos se representa en la Figura 2b. Como se observó, el DC-80 y el Betamate 120 tenían un comportamiento frágil (intermedio) ya que ambos adhesivos no mostraban un punto de fluencia o un comportamiento de endurecimiento por deformación [16]. Por el contrario, el adhesivo MP55420 revela un punto de fluencia más cercano a su esfuerzo máximo pero espaciado con un 2.5% (25000 $\mu\epsilon$) de deformación y la más alta ductilidad.

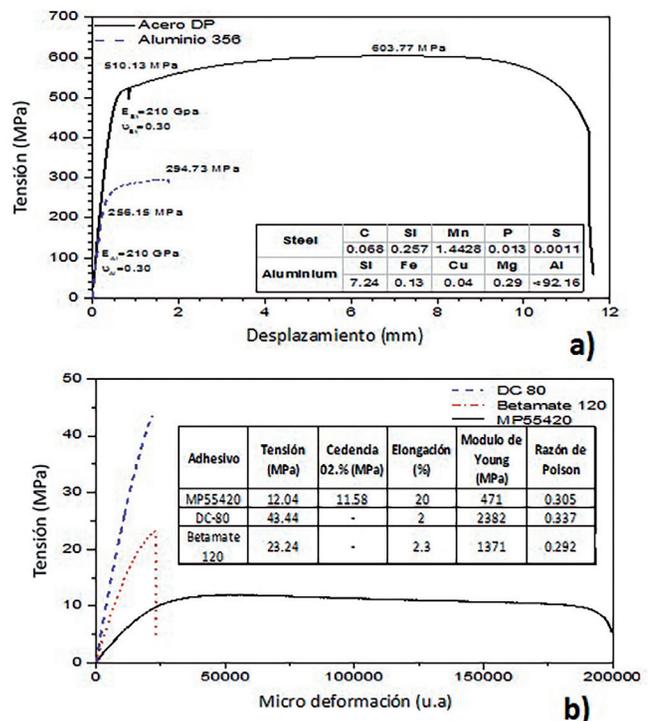


Figura 2: Resultados de caracterización para a) sustratos metálicos y b) adhesivos

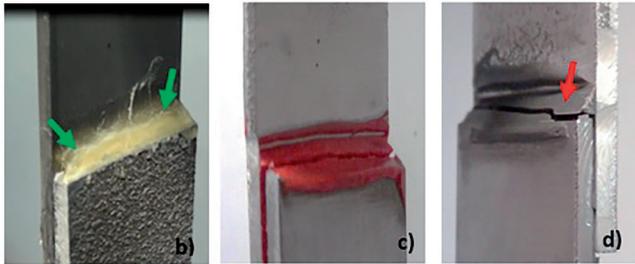
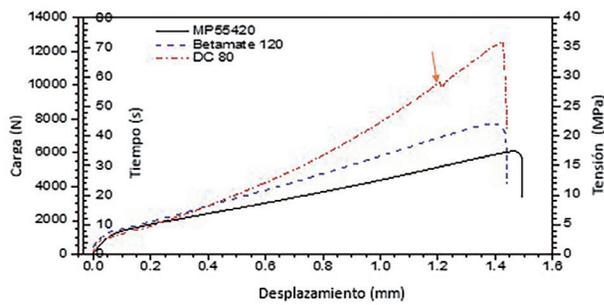


Figura 3: Gráficos de prueba de cizallado y especímenes de prueba

3.3 RESULTADOS PRUEBA DE CIZALLADO

Los resultados sugieren que el adhesivo DC-80 tiene la mayor resistencia (33.10-36.05 MPa). El adhesivo Betamate 120 generó una resistencia en el rango de 22.05 y 23.68 MPa. Finalmente, el adhesivo MP55420 generó resultados de resistencia al corte que variaban de 13.55 a 17.51 MPa. El adhesivo MP55420 mostró más dispersión en sus resultados al tener una desviación estándar más alta en comparación con el Betamate 120 y el adhesivo DC-80.

El comportamiento de la resistencia al cizallamiento para los tres adhesivos se representa en la figura 3. Los resultados sugieren que las uniones adhesivas tienen un comportamiento similar durante el desplazamiento de la carga. Sin embargo, la unión adhesiva tiene algunas particularidades: 1) la carga máxima, 2) el tiempo requerido para la falla y 3) los picos de daño.

De la Figura 3a, los adhesivos epoxi tienen un desplazamiento similar. El MP55420 proporciona un tiempo de duración más bajo, pues tiene una resistencia menor (Figura 2b). Por otro lado, la unión MP55420 desarrolló estrías por deformación plástica sobre la superficie del filete (Figura 3b flechas verdes). La unión Betamate 120 no reveló ninguna particularidad, ya que falló cuando alcanzó su carga máxima (Figura 3c). Para la unión DC-80, cuando la carga alcanzó alrededor del 90% de su carga máxima, se escuchó un sonido de vidrio quebrándose y se agrietó (cerca del borde del filete) y se produjo una caída de carga (flecha roja Figura 3d).

3.4. SIMULACIÓN

La Figura 4 representa la distribución de tensiones de Von Mises a lo largo de la película adhesiva. Para el adhesivo MP55420, la concentración de tensión se produce en la película adhesiva, ya que tiene una resistencia mecánica considerablemente inferior en comparación con

Adhesivo	Tensión Experimental (MPa)	Tensión FEM (MPa)
MP55420	15.53±1.98	12.50
Betamate 120	22.85±0.80	22.03
DC-80	34.59±1.49	35.83

Tabla 1: Comparación entre los resultados experimentales contra la simulación

los sustratos. El pico de tensión obtenido fue de aproximadamente 13.00 MPa y está ubicado en los bordes de la unión (Figura 4a, zona de color rojo). A medida que la tensión se mueve hacia el centro, esta disminuye de 13.00 a 11.92 (8,31%). La unión adhesiva Betamate 120, presenta tres zonas de intensidad de tensión a lo largo del solape (Figura 4b, recuadros blancos, rojos y negros). La zona de color rojo tiene el pico de tensión más alto (24.00 MPa) y está marcado con un recuadro blanco. La zona naranja representa la primera disminución de la intensidad de tensión aproximadamente del 8,0% (22,10 MPa), esta disminución se marca con un recuadro rojo en la Figura 4b. La disminución de tensión final fue de aproximadamente 17,0% (20,01 MPa) y se muestra por la zona de color amarillo rodeada por un recuadro negro.

Finalmente, la unión adhesiva DC-80 representó cuatro zonas de intensidad de tensión a lo largo del solape. El más alto (45 MPa) es de color rojo y está rodeado por un recuadro blanco (Figura 4c). La zona roja tenue representa la primera disminución de la intensidad del esfuerzo de aproximadamente 5.5% (42.05 MPa), esta disminución está marcada con un recuadro rojo en la Figura 4c. Una tercera disminución de la intensidad del estrés de aproxi-

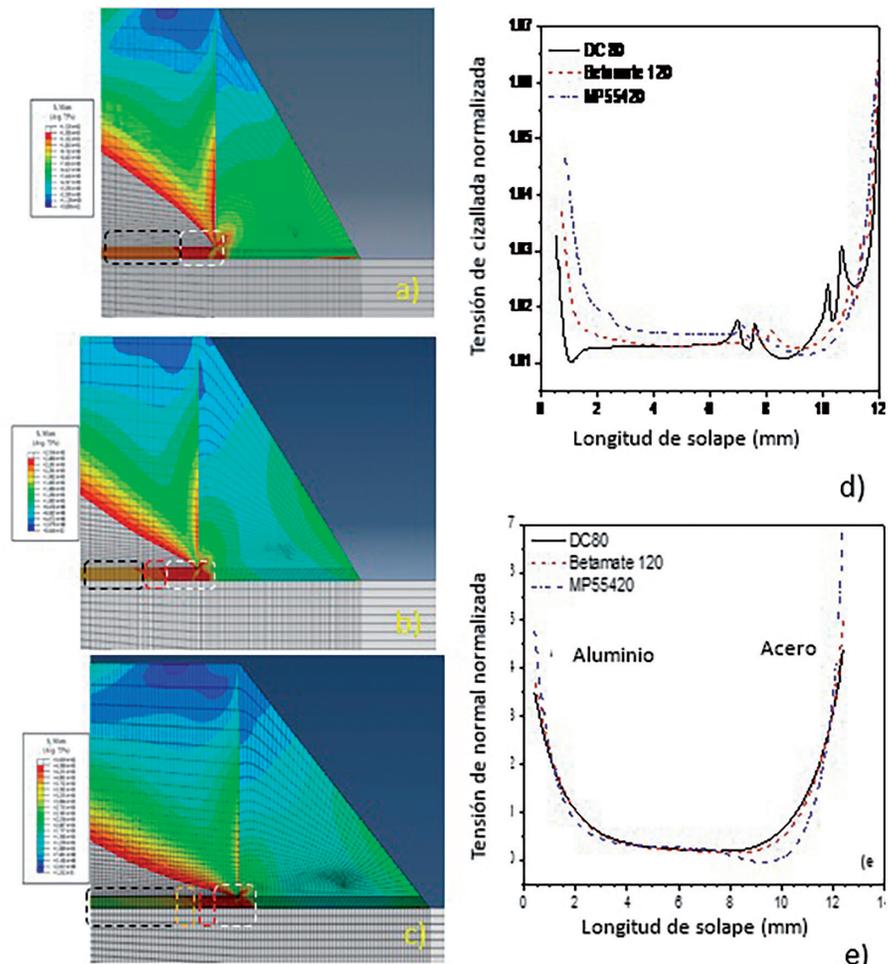


Figura 4: Distribución de las tensiones para a) MP55420, b) Betamate 120 y c) DC-80, d) esfuerzo de cizalladura y e) esfuerzo de normal normalizado

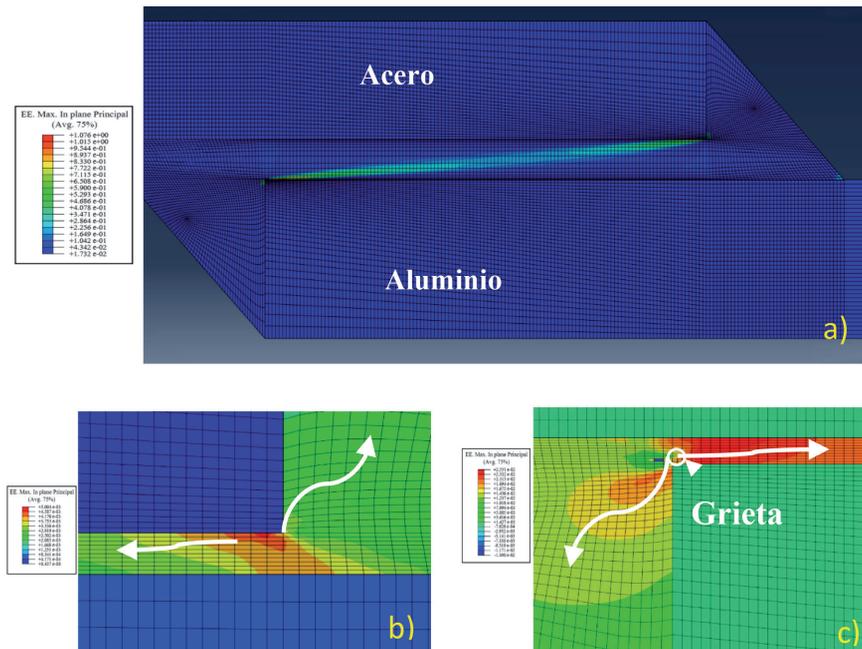


Figura 5. Distribución de deformación para el adhesivo DC-80 a) 50%, b) 30% de carga máxima y d) aparición de grieta

madamente 17.0% (37.50 MPa) está representada por una zona de color naranja, apuntada por un recuadro naranja en la Figura 4c. La disminución final de la intensidad del estrés del 44.4% (25.00 MPa) está representada por una zona verde, rodeada por un recuadro negro en la Figura 4c. La Tabla 1 muestra una comparación entre los resultados experimentales y la simulación FEM.

La Figura 4d representa la distribución de la tensión de cizallado normalizada (tensión de cizallamiento / tensión media) de cada unión a lo largo de su solapamiento. Como se puede observar en la Figura 4d, las tensiones son más altas en los bordes y decrece gradualmente a medida que se acerca al centro de la articulación. Sin embargo, se observaron pequeñas diferencias ya que el adhesivo Betamate 120 tiene una tensión máxima más alta (3.89%) en el lado de acero de la unión. Del mismo modo, para el adhesivo DC-80, la diferencia entre los picos de estrés fue de alrededor del 3,37%. El adhesivo MP55420 se comporta de manera similar, pero la diferencia fue de aproximadamente 1,32% en el lado del acero.

La figura 4e es una representación gráfica de la distribución normalizada de la tensión normal (tensión normal / tensión media de pelado) de cada unión a lo largo de su solapamiento. En el caso de MP55420, el esfuerzo de pelado fue alrededor de 7,0 veces el esfuerzo promedio en los bordes de solapamiento y disminuye alrededor de 67% a 1/12 de la longitud de solapamiento y 85% a 1/6 de la longitud de solapamiento. Para el Betamate 120, el esfuerzo de pelado fue aproximadamente 5.0 veces el esfuerzo promedio en los bordes de solapamiento y disminuye alrededor de 54.4% a 1/12 de la longitud de solapamiento y 79% a 1/6 de la longitud de solapamiento. Finalmente, en el caso de DC-80, el esfuerzo de pelado fue alrededor de 4.5 veces el esfuerzo promedio en los bordes superpuestos y disminuye alrededor de 44.4% a 1/12 de la longitud de solapamiento y 76.72% a 1/6 de la longitud de solapamiento.

El análisis de deformación por simulación reveló que su distribución para las tres articulaciones revela un comportamiento similar, ya que se generó una deformación máxima en los bordes de la unión, posteriormente la deformación disminuyó logarítmicamente a lo largo de la superposición. La Figura 5a representa la unión adhesiva DC-80 cargada al 50% de la tensión

máxima; se debe tener en cuenta que a ese nivel de carga, se alcanzó el 1% de la tensión (50% de su alargamiento).

La Figura 5b representa la distribución de deformación del adhesivo DC-80 al 30% del esfuerzo máximo, donde se alcanzó el 0,5% de la deformación en el borde del filete. Cuando el nivel de tensión alcanza su máximo, aparece una grieta (Figura 5c) y la distribución de la deformación estará altamente enfocada dentro del adhesivo (valores entre 1.27 y 1.89%).

3.5. EXTENSOMETRÍA

La Figura 6 resume las tensiones en ambos sustratos durante la prueba de cizallamiento por solapamiento. La Figura 6a (MP55420) revela que el aluminio tenía la mayor deformación (2756×10^{-6}). Dado que las tensiones pueden estar relacionadas por la ley de Hooke, la tensión generada en el aluminio adherido fue de aproximadamente 168 MPa. Para el adhesivo Betamate 120, la tensión generada en el aluminio adherido era de aproximadamente 200 MPa ya que su deformación a la carga máxima era de 2858×10^{-6} (Figura 6b). Finalmente, los resultados para el adhesivo DC-80 producen una tensión en la carga máxima de 2900×10^{-6} (Figura 6c) que representa una tensión de 203 MPa. Para los tres casos, la unión adhesiva no supera el límite elástico del material.

3.6. INSPECCIÓN VISUAL Y POST FRACTURA

La Figura 7a-c muestra los diferentes patrones de fractura para las tres uniones adhesivas. Como se muestra en la Figura 7a, la mayoría del adhesivo MP55420 se retuvo principalmente en el aluminio. Sin embargo, para DC-80 casi el 55% de los restos

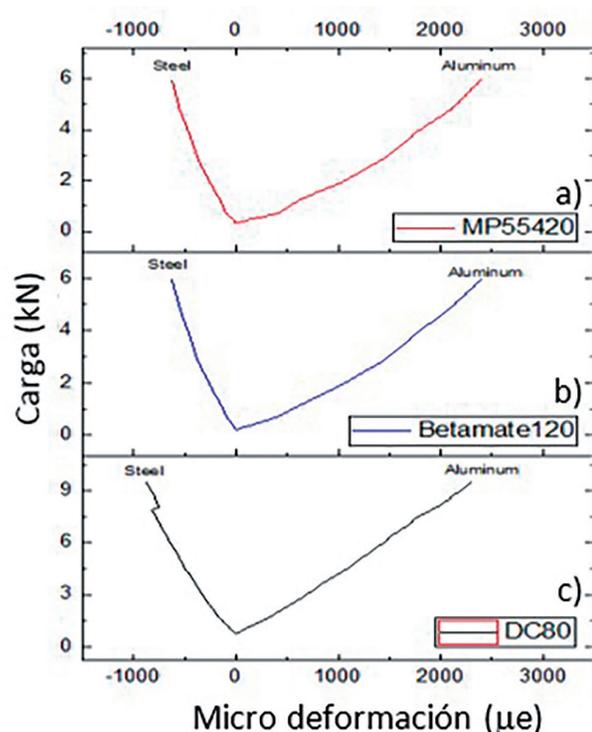


Figura 6: Gráficos de tensión de carga para las uniones de acero y aluminio

en ambos (Figura 7b). Por el contrario, la Figura 7c muestra que el adhesivo Betamate 120 permanece en ambos lados de los sustratos generando una falla cohesiva al 100%.

Para complementar cuantitativamente las observaciones visuales, se realizó un análisis de imágenes (mediante el uso del software Image J®) en la fractura superficial de cada espécimen. Estos resultados indican que el epoxi Betamate 120 produjo el 100% de falla cohesiva. Por otro lado, se obtuvieron 80 y 55% de falla cohesiva para los adhesivos MP55420 y DC-80.

3.6.1. Microscopía electrónica

La Figura 7d ilustra la superficie del borde en la zona del filete (MP55420); aquí, se observó una deformación plástica (estrías) a lo largo de su superficie. Estas estrías tienen áreas que varían de 6801 a 23032 μm^2 y límites (ancho de $8.14 \pm 1.69 \mu\text{m}$). La morfología de la fractura sugiere un patrón de fractura similar a un hoyuelo con alta deformación plástica (véase la Figura 7g), esto era de esperar ya que el adhesivo MP55420 tiene un alargamiento mayor en comparación con los otros. El comportamiento de daño en el Betamate 120 revela menos deformación, ya que su fractura ocurrió repentinamente.

La Figura 7e muestra la sección transversal del filete y su inicio de falla, para el adhesivo Betamate 120. Con el fin de determinar si se han producido grietas secundarias en la superficie del filete,

se realizaron observaciones SEM adicionales en la superficie. No se generaron grietas secundarias en el filete y se observó un patrón de fractura uniforme en toda la sección transversal del filete este patrón sugiere una fractura frágil (Figura 7h).

En la Figura 7c, el filete de la unión adhesiva DC-80 revela la propagación de grietas desde el borde del adherente al filete. La flecha roja revela una propagación progresiva de la fractura (cuyo ancho varía entre 7 y 24 μm) desde la parte inferior hasta la parte superior del filete, terminando en grietas secundarias con longitudes que van de 32 a 254 μm (flecha verde) sobre la superficie del filete. Como la Figura 17b representa un primer plano del inicio de la falla. Por otro lado, la Figura 7i revela un modo de fractura frágil. Además, el adhesivo permanece en la superficie de la fractura apuntando que la tensión normal causó la falla (recuadro Figura 7i).

4. DISCUSIÓN

Kellar, explicó que la unión de adherendos diferentes (Figura 2) podría causar fallas debido al desajuste del coeficiente térmico; ya que esas tensiones y deformaciones superan su máximo [18]. Sin embargo, las articulaciones no fallaron después del curado.

Los resultados de la prueba de cizallamiento revelaron que el adhesivo dúctil (MP55420) generaba una mayor dispersión en los resultados, en comparación con los más duros (DC-80 y

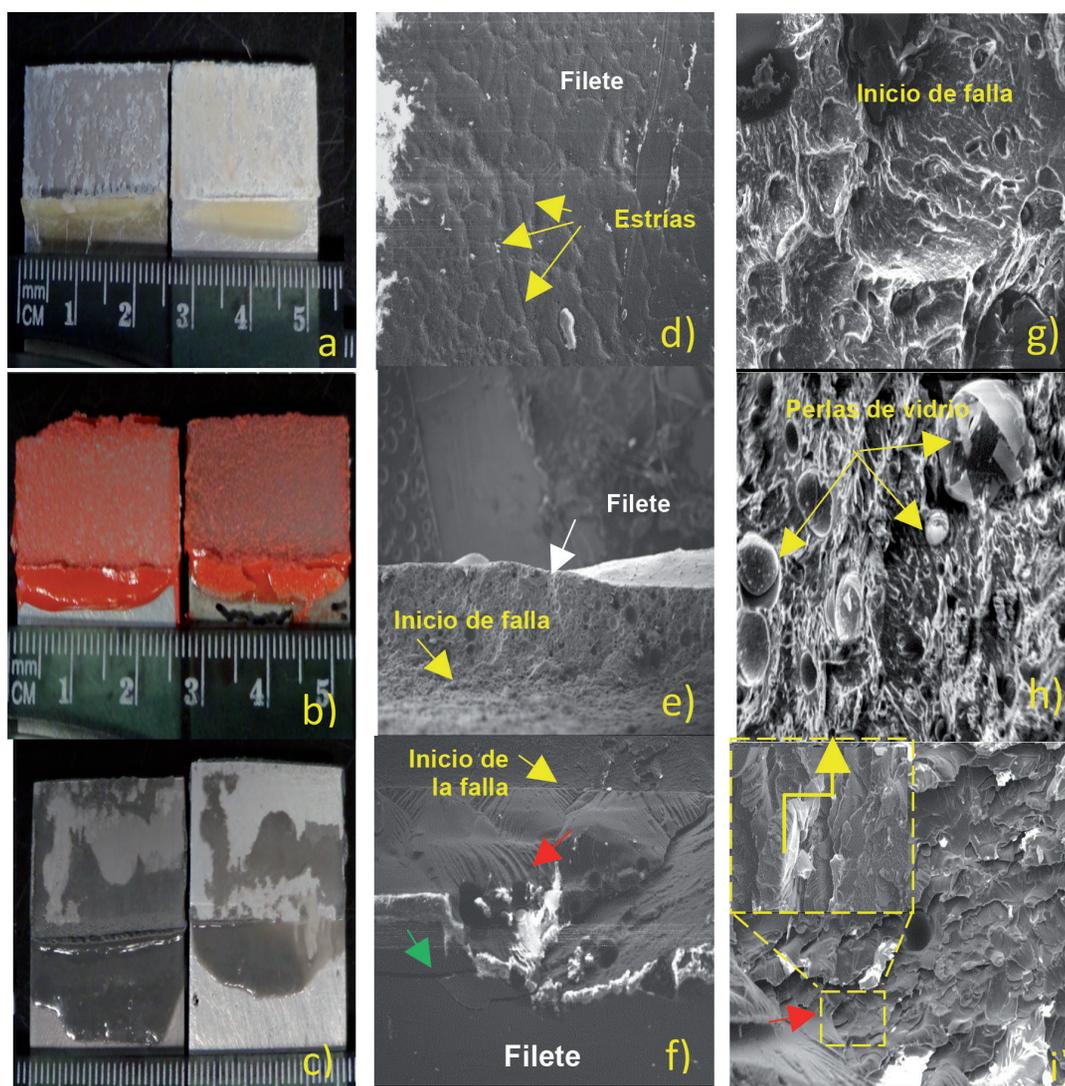


Figura 7. Análisis visual posterior a la fractura para a) MP55420, b) DC-80 y c) Micrografías de Betamate 120 y SEM con SEI, 15kV y distancia de trabajo de 11 mm, d) para MP55420 en la superficie del filete cerca del borde de la unión a 95x, e) para Betamate 120 en la superficie del filete cerca del borde de la unión en 35x, f) para DC-80 en la superficie del filete cerca del borde de la unión en 35x, g) patrón similar a hoyuelos para MP55420, h) patrón frágil para Betamate 120 y i) patrón frágil de roca para adhesivo DC-80

Betamate 120). La Figura 3 ilustra que las uniones se comportan linealmente hasta la carga máxima y luego fallan. El tiempo para alcanzar la carga máxima difiere significativamente entre el adhesivo DC-80 y los otros dos. Sin embargo, el desplazamiento de la carga fue similar para ambos adhesivos epóxis, no así para el adhesivo MP55420 que representaba un ligero incremento de desplazamiento (0,1 mm).

Las uniones MP55420 alcanzan su nivel máximo de tensión uniformemente ya que su comportamiento representa el endurecimiento por deformación. A diferencia de los otros adhesivos, el MP55420 desarrolló tensiones en los bordes del filete de corcho que se extienden a lo largo de su superficie hasta que la unión falla (Figura 3b). Lo anterior consiste en un módulo inferior adhesivo, por lo tanto, cuando esta unión alcanza un nivel de tensión que supera la elasticidad adhesiva, aparecerá tensión. Después de que aparece la tensión, crecerá de manera uniforme a medida que aumenta el nivel de estrés hasta que alcanza su máximo, fallando por la coalescencia micro void. Por el contrario, los adhesivos más duros (Betamate 120 y DC-80) fallaron abruptamente, como se esperaba dado que tales adhesivos tenían una ductilidad más baja (Figuras 3c-d).

El análisis de elementos finitos confirma los resultados experimentales, ya que muestran que la concentración máxima de tensión se produjo en los bordes de las uniones. El análisis de distribución de esfuerzos a lo largo de la línea adhesiva (Figura 4d-e), está de acuerdo con [3] [4] [5] [12] [19]. Además, los resultados revelan que el esfuerzo cortante fue mayor en el lado más delgado y de mayor módulo (acero), según S.C. Her [20].

Los resultados del análisis por extensometría en los sustratos, sugirieron que no alcanzaron tensiones por encima de su límite elástico (250 MPa). Esto revela que siguen un comportamiento lineal-elástico y que las tensiones dentro de la unión son soportadas por el adhesivo.

La inspección visual (Figuras 7a-c), mostró que los adhesivos fallaban de manera diferente. El Betamate 120 reveló una falla de cohesiva al 100%, lo que indica que la propagación de grietas se produjo a través del adhesivo. Por el contrario, los otros dos adhesivos fallaron en forma adhesiva-cohesiva. En este contexto, Adams et al [21] informaron un fenómeno donde mediante el análisis XPS revelan que no siempre las zonas con falla adhesiva aparente, lo son. Lo anterior, debido a que una fina película de adhesivo permanece sobre la superficie del sustrato. Finalmente, las observaciones del SEM confirmaron que las superficies de falla se relacionan con su ductilidad.

5. CONCLUSIONES

Las evaluaciones de cizallamiento revelaron que la resistencia de la unión depende de las propiedades mecánicas del adhesivo, también que el desplazamiento durante la prueba no se vio afectado por la ductilidad del adhesivo. De acuerdo con los resultados, las tensiones máximas se producen en los bordes de la unión, centrándose en el lado de acero de la unión (espesor más fino y módulo más alto). Aunque las propiedades mecánicas de cada adhesivo empleado en este manuscrito fueron diferentes, su efecto principal se produjo en la fuerza máxima de la unión y el comportamiento de la fractura. Además, el comportamiento de endurecimiento por deformación mostrado por el MP55420 podría ser útil para detectar daños cerca de su carga de falla, no así los otros dos adhesivos que fracasan de manera frágil. Finalmente, el análisis posterior a la fractura demostró que la superficie de fractura depende del adhesivo. Las evaluaciones descritas a lo

largo del manuscrito serían útiles para comprender los fenómenos de uniones disímiles y serían adecuadas para el análisis de tensiones en uniones empleadas para reducción de CO₂ en la industria automotriz, ya que permiten identificar la distribución de esfuerzos (pico y meseta) y prevenir una falla prematura.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Yurramendi-Sarasola and S. Caballero-Román, "Mineralización de dióxido de carbono mediante carbonatación de residuos térmicos," *Dyna Energía y Sostenibilidad*, pp. 1-12, 2012.
- [2] E. M. Petrie, *Handbook of adhesives and sealants*. Second edition, Chicago: Mc Graw Hill, 2007.
- [3] L. J. Hart-Smith, "Adhesive Bonded Single Lap Joints," California, 1973.
- [4] R. D. Adams and N. A. Peppiatt, "Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design* vol. 9, no. 3, pp. 185-196, 1974.
- [5] R. D. Adams and N. A. Peppiatt, "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints," *Journal of Adhesion* vol. 9, no. 1, pp. 1-15, 1977.
- [6] I. A. Ashcroft and A. Mubashar, "Numerical Approach: Finite Element Analysis," in *Handbook of Adhesion Technology*, Berlin, Springer-Verlag, 211.
- [7] M. Bordes, P. Davies, J.-Y. Cognard, L. Sohier, V. Sauvart-Moynot and J. Galy, "Prediction of long term strength of adhesively bonded steel/epoxy joints in sea water," vol. 29, p. 595-608, 2009.
- [8] C.-T. Hoang-Ngoc and E. Paroissien, "Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive," vol. 30, p. 117-129, 2010.
- [9] C.-T. Hoang-Ngoc and E. Paroissien, "Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive," vol. 30, p. 117-129, 2009.
- [10] E. F. Karachalios, R. D. Adams and L. F. da Silva, "Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 43, p. 96-108, 2013.
- [11] E. F. Karachalios, R. D. Adams and L. F. da Silva, "Single lap joints loaded in tension with high strength steel adherends," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 43, p. 81-95, 2013.
- [12] X. He, "A review of finite element analysis of adhesively bonded joints," *International Journal of Adhesion & Adhesives* vol. 31, p. 248-264, 2001.
- [13] *ASTM E8. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, American Society for Testing Material.
- [14] *ASTM E415. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry*.
- [15] *ASTM E1251. Standard Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry*.
- [16] *ASTM D1002. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*.
- [17] A. Akhavan-Safar, L. da Silva and M. R. Ayatollahi, "An investigation on the strength of single lap adhesive joints with a wide range of materials and dimensions using a critical distance approach," *International Journal of Adhesion & Adhesives*. Author's Accepted Manuscript, 2017.
- [18] E. J. Kellar, "12. Joining similar and dissimilar materials," in *Adhesive Bonding - Science, Technology and Applications*, Cambridge, Woodhead Publishing, 2005, pp. 258-263.
- [19] M. D. Aydin, A. Ozel and S. Temiz, "The effect of adherend thickness on the failure of adhesively-bonded single lap joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 705-718, 2005.
- [20] S.-C. Her, "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints," *Composite Structures*, vol. 47, pp. 673-678, 1999.
- [21] R. D. Adams, J. W. Cowap, G. Faquharson, G. M. Margary and D. Vaughn, "The relative merits of Boeing wedge test and the double cantilever beam test for assessing the durability of adhesively bonded joints, with particular reference to the use of fracture mechanics," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 29, pp. 609-620, 2009.