

Influencia de la temperatura y espesor de capa adhesiva epóxica sobre la resistencia a la tracción de estructuras metálicas unidas

Paulino W. Sánchez Sandoval¹; Pablo Aguilar Marín¹; Hipólito F. Flores Urquiaga¹

¹Departamento Académico de Física, Facultad de CFYM. Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
pauliw2@yahoo.es; pabloagma@hotmail.com; hipofranflour@yahoo.com

Recibido: 23-07-2014

Aceptado: 12-09-2014

RESUMEN

En el presente trabajo se ha estudiado la influencia del espesor de la capa adhesiva y de la temperatura sobre la resistencia adhesiva a la tracción de dos estructuras cilíndricas de acero tipo SAE-1020 unidas por su base con adhesivo epóxico del tipo comercial DGEBA-TETA. Para analizar el efecto del espesor en la resistencia adhesiva, un grupo de probetas acero/adhesivo del tipo unión a tope, con diferente espesor de capa adhesiva, fueron sometidas a ensayo mecánico de tracción siguiendo los procedimientos especificados en la norma ASTM D 897. Todas las probetas fueron ensayadas a temperatura ambiente y estuvieron sujetas a las mismas condiciones de: tiempo de curado, composición, velocidad de ensayo y geometría de la probeta. A fin de estudiar la influencia de la temperatura, otro grupo de probetas del mismo espesor de capa adhesiva fueron ensayadas a distintas temperaturas y estuvieron sujetas a las mismas condiciones antes indicadas. Se ha encontrado que para capas finas (0,04 - 0,30 mm) la resistencia decae aproximadamente en forma exponencial conforme el espesor aumenta. Para capas más gruesas a partir de un espesor característico (0,30 mm), la resistencia tiende a aumentar hasta un cierto límite a medida que el espesor se incrementa. Así mismo, se ha encontrado que la resistencia adhesiva consigue su “máximo” valor (2,96 kgf/cm²) cuando la temperatura toma valores en la vecindad de la temperatura característica de transición vítrea del adhesivo, mientras que para temperaturas superiores o inferiores a ésta, la resistencia decae considerablemente.

Palabras clave: espesor de capa adhesiva, resistencia adhesiva de tracción, uniones metálicas, polímeros epóxicos.

ABSTRACT

In this research work it has been studied the influence of the thickness of an adhesive layer and temperature on the tensile adhesive strength of two steel cylindrical structures SAE-1020 jointed by their bases with the commercial epoxy adhesive DGEBA-TETA. To analyze the effect of thickness of the adhesive layer on its tensile strength a group of samples of steel/adhesive joints of various thicknesses were prepared and subjected to tensile tests following the ASTM D 897 standard. All samples were tested at room temperature and prepared under the same conditions of: curing time, composition, speed rate and geometry. To study the influence of temperature on the tensile strength of steel/adhesive joints another group of samples with the same thickness and conditions were heated within the range of temperatures 20-45 °C. It was found that for thin layers (0,04 - 0,30 mm) the adhesive tensile strength decreases near exponentially as the thickness increases. However, for thicker layers from 0.30 mm the adhesive tensile strength tends to increase up to a certain level as the thickness increases. Likewise, it was found that the adhesive tensile strength of steel/adhesive joints peaks when the temperature values lie in the neighborhood of the glass transition temperature T_g of the adhesive layer; outside this temperature range the adhesive tensile strength of steel/adhesive joints decays considerably.

Keywords: thickness of adhesive layer, adhesive tensile strength, metal joints, epoxy polymers.

I. INTRODUCCIÓN

Un compuesto capaz de mantener unidas dos superficies mediante fuerzas interfaciales, se denomina *adhesivo*. Los polímeros epóxicos son polímeros termorrígidos que, al reaccionarlo con algún tipo de

amina alifática se convierte en un excelente adhesivo y por esto hoy en día viene siendo utilizada para unir o recubrir estructuras metálicas.

Actualmente constituye una exigencia formular y encontrar la mejor performance de los adhesivos epóxicos que se utilizan generalmente para unir estructuras metálicas. El conocimiento de la adhesión de polímeros epóxicos a metales es de gran importancia en la industria moderna, porque de ello depende la calidad de numerosos productos de uso múltiple, tales como el armado de autos, construcción de partes de aviones, elaboración de circuitos impresos, recubrimiento polimérico de envases para alimentos, etc.

Los polímeros epóxicos presentan las siguientes características:

- Baja contracción durante el curado, ya que resulta en un material con menor cantidad de tensiones residuales.

- Baja viscosidad, para el mejor mojado de la superficie y producir uniones más fuertes.

- No elimina volátiles durante el curado, por lo que son especialmente aptas cuando se confinan en ambientes cerrados.

- Alta fragilidad cuando cura.

En los últimos años se ha profundizado el estudio de la adhesión de los epoxi a metales (Lee, 1991; Lewis, 1998; Ghosh y Nukala, 2008). Sin embargo, todavía existen discrepancias al explicar el efecto sobre la resistencia adhesiva del sistema epoxi/metal producido por ciertos factores, tales como la temperatura y el espesor de la capa adhesiva, especialmente en sistemas sometidos a esfuerzos de tracción (Kinloch, 1982; Kovrov y Zolotukhin, 1999).

Gent y Hamed (1977) han estudiado el efecto sobre la resistencia adhesiva, del espesor de la capa y manifiestan que el valor del esfuerzo límite de desgarro depende del espesor de la capa adhesiva de modo que, se necesita mayores esfuerzos para capas más finas que para las más gruesas y sugieren que el valor del esfuerzo límite es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del espesor de la capa. Otros investigadores comentan que, la resistencia “peel” aumenta con el espesor; este comportamiento se pone en evidencia generalmente en un rango que comprende capas de espesor pequeños (Hunston y Bascom, 1984). Sin embargo, al entrar a espesores mayores, la resistencia va alcanzando un tope a partir del cual y en adelante se hace independiente del espesor. Por otro lado, si el adhesivo se prepara de tal manera que la temperatura de transición vítrea (Arellano, 1990) resulte cercana a la temperatura de ensayo, la resistencia adhesiva aumentará (Lewis, 1998).

Jiang et al (2011) realizaron un nuevo enfoque para evaluar la resistencia adhesiva de recubrimientos húmedos a base de epoxi basándose en una prueba de scratch ASTM/ISO recientemente estandarizada. Una carga crítica aplicada causa que la película adhesiva pueda despegarse del sustrato y puede ser determinada experimentalmente. La carga crítica para la delaminación de la capa está influenciada significativamente por el tiempo de exposición al agua, espesor del recubrimiento y rugosidad del sustrato. El enfoque propuesto es para procurar la alta performance del recubrimiento en aplicaciones industriales.

Así mismo, se ha estudiado las características de juntas adhesivas de hojas de aluminio y acero que contienen una base epóxica con polvos de aluminio y alúmina de diferentes tamaños (Ghosh y Nukala, 2008). El grosor de línea de la unión del adhesivo con respecto a la cantidad y tamaño de las partículas de aluminio y alúmina se ha optimizado para desarrollar máxima resistencia a la tracción de uniones adhesivas. Por otro lado, al estudiar la adhesión de una resina epóxica por encima de su temperatura de transición vítrea a superficies de aluminio, acero y oro utilizando los métodos de mecánica de la fractura (Andrews y King, 1976) encontraron que en el acero y aluminio, pero no en el oro, la adhesión interfacial es más fuerte que la fuerza cohesiva de la resina debido probablemente a la formación de lazos fuertes con la capa superficial de óxido de metal.

Investigación teórica sobre el estado de tensión en los puntos especiales de las construcciones, por ejemplo, en uniones de adherencia, dan cuenta que el estado de tensión en la zona de contacto depende fuertemente de la configuración geométrica de la zona. Experimentos para confirmar este comportamiento fueron realizados por Kovrov y Zolotukhin (1999). Muestras de polímero cilíndrico

con una ranura circular en uno de sus extremos fueron unidas a setas de acero cementadas y probadas para desprendimiento en tensión y flexión voladizo. Los experimentos demostraron que la resistencia adhesiva depende del perfil de la articulación y tenía un máximo en el valor óptimo del ángulo de la articulación y un mínimo cuando el surco estaba ausente. Los resultados experimentales confirman la posibilidad de controlar la resistencia adhesiva cambiando la geometría de contacto de acuerdo con los cálculos tensión-deformación.

Ensayos “peel” realizados para medir la resistencia de adhesión de las interfaces de metales y polímeros en encapsulados electrónicos muestran que la resistencia de adhesión, que está vinculada al trabajo hecho en la separación de la película desde el sustrato, es muy sensible a los métodos de ensayo y a los efectos mecánicos, tales como la tensión residual, espesor y propiedades mecánicas de las capas, velocidad de despegue y ángulo de fase (Yu, Song y Park, 2002).

También, constituye una exigencia conocer acerca de la degradación de los polímeros. Particularmente, se estudió el comportamiento de la degradación de las resinas epoxi utilizadas en láminas alternadas de fibra de vidrio y aluminio bajo condiciones de alta temperatura (Zhu et al, 2012) en base a resultados de análisis de termogravimetría (TGA) y de calorimetría diferencial de barrido (DSC). Se realizaron experimentos de delaminación térmica a temperaturas afinadas para optimizar la temperatura de tratamiento y el tiempo de mantenimiento para lograr un mejor comportamiento de la resina.

En nuestro medio todavía son incipientes las técnicas experimentales directas para estudiar el fenómeno de adhesión de epóxicos a metales.

Es por ello que el presente trabajo ha surgido como consecuencia de una interesante experiencia adquirida en la División de Polímetros del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina (Sánchez, 1994; Ricardi, Adabbo y Williams, 1984).

A la luz de que la resistencia adhesiva de la unión polímero/metal depende esencialmente de los factores (Kinloch, 1982): estructura química del adhesivo, técnica de limpieza superficial del sustrato metálico, geometría de la probeta, espesor de la capa adhesiva y temperatura, ha sido de interés en este trabajo estudiar la influencia de estos dos últimos factores considerando probetas (sistema epoxi/acero) del tipo unión a tope sometidas a ensayos de tracción.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Objeto de estudio

En la presente investigación el objeto de estudio fueron uniones a tope constituidas por cilindros de acero unidos entre sí por capas de adhesivo elaborado en base a material polimérico de tipo epóxico, como se ve en la Fig.1 y con las siguientes características:

- *Sustratos*: estructuras de acero tipo SAE-1020 cilíndrico trafilado con las siguientes dimensiones de cada sustrato: altura, 17,00 mm; diámetro, 25,40 mm.
- *Adhesivo*: matriz de resina epoxi comercial, diglicidil éter de bisfenol A (DGEBA), líquida.
- *Endurecedor*, amina alifática, trietilentetramina (TETA), líquida.
- *Agentes para limpieza superficial*: espumas, papel abrasivo y acetona.

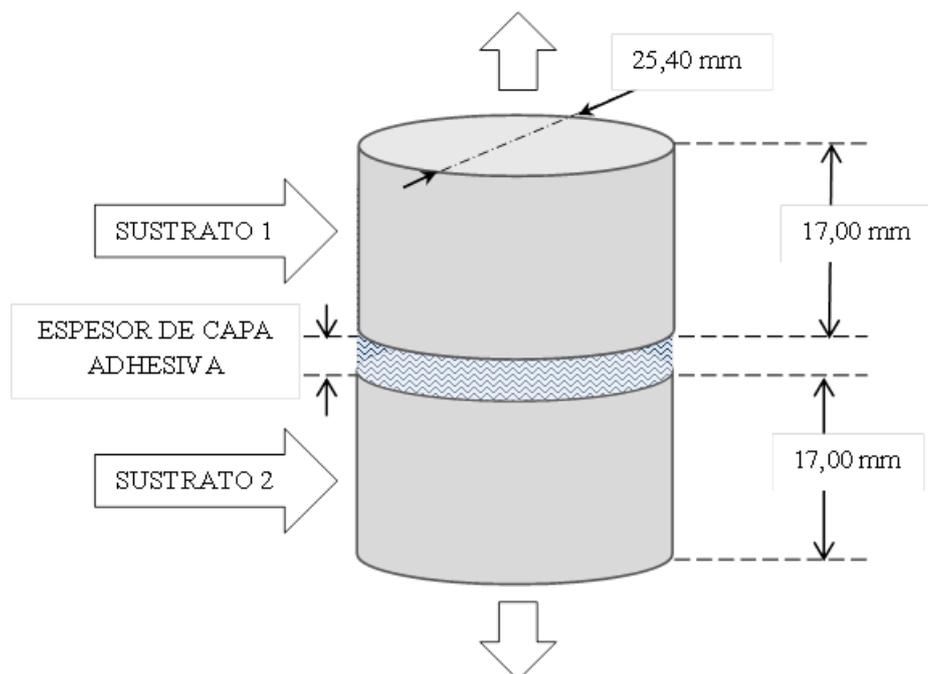


Fig.1. Probeta de ensayo tipo unión a tope. Sustratos: acero SAE-1020. Adhesivo: epoxi DGEBA-TETA.

2.2. Instrumentación

Se utilizaron los siguientes equipos, instrumentos y medidores:

- Máquina de ensayos mecánicos (prensa hidráulica) "Henius". Carga 0-6 kgf/cm²
- Balanza analítica "Sartorius-Werke AG"; 0,1 mg de precisión
- Estufa "Dalvo"; selector 20-150 °C
- Calibrador vernier "Litz Professional"; 0,01 mm de precisión
- Termómetro 0 - 150 °C
- Espátulas para adhesivos
- Guantes de goma y máscara antitóxicos.

2.3. Métodos y Técnicas

Se seleccionó y verificó las características de los materiales utilizando la respectiva norma ASTM D 897 (1985).

- a) Una máquina de ensayos para adhesivos (cargas livianas o pequeñas), adaptando para este fin una prensa hidráulica, lo que ha exigido, la construcción de un par de mordazas apropiadas para las probetas adhesivas.
- b) Construcción de las probetas y curado que abarca:
 - Limpieza de las superficies a unir de los sustratos de acero, se desengrasaron con acetona, se lijaron, se enjuagaron con agua destilada y finalmente se pusieron a secar.
 - Preparación del adhesivo, mezclando la epoxi comercial con el endurecedor en partes iguales con ayuda de la balanza analítica. Se agitó la mezcla para obtener un adhesivo homogéneo.
 - Aplicación de adhesivo a las superficies a unir, se extendió uniformemente.
 - Unión y curado a temperatura ambiente (25 °C) de las probetas así formadas.
 - Se dispuso de 24 probetas de tipo unión a tope, ver Fig.1. La mitad de ellas de diferente espesor de capa adhesiva, comprendidos entre 0,03 mm y 0,43 mm pero sujetas a las mismas condiciones de: velocidad de ensayo, composición, curado y

temperatura de ensayo. La otra mitad fueron ensayadas a diferentes temperaturas, comprendidas entre 20 °C y 45 °C pero sujetas a las mismas condiciones de: velocidad de ensayo, composición, curado y espesor de capa.

- c) Preparación del ensayo:
- Puesta a punto del equipo experimental.
 - Se colocó la probeta entre las mordazas de la máquina de ensayos y se calibró el sistema mecánico. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente (25 °C), salvo para el caso del segundo grupo de probetas que justo antes de ser ensayadas fueron calentadas en la estufa cada una a diferente temperatura.
- d) Ejecución del ensayo de tracción:
- Sujetando firmemente la probeta con las mordazas y alineándola, se puso en marcha la máquina de ensayos.
 - La máquina registró la carga de fractura por unidad de área que se produce en la capa adhesiva de la probeta. La resistencia adhesiva de fractura a la tracción es el valor de la carga de falla por unidad de área unida con el adhesivo y se expresa en kgf/cm² o en kN/m².

Cada ensayo fue realizado cuidadosamente y constituye el paso final de tres pasos previos consecutivos: limpieza superficial de los sustratos adherentes, preparación adecuada del adhesivo epóxico, elaboración-curado del sistema adhesivo (probeta) y ejecución del ensayo mecánico de tracción a cada una de las probetas.

El curado de los sistemas adhesivos se ha realizado a temperatura ambiente del laboratorio (25 °C) durante 20 días.

III. RESULTADOS

3.1. Efecto del espesor sobre la resistencia adhesiva a la tracción

Todas las probetas son de diferente espesor de capa adhesiva, y se ha procurado que estén sujetas a las mismas condiciones de: velocidad de ensayo, geometría, composición, curado y temperatura de ensayo (25 °C).

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Comportamiento de la resistencia adhesiva a la tracción de un sistema epoxi DGEBA-TETA/acero SAE-1020 para diferentes espesores de la capa adhesiva

ENSAYO N°	ESPESOR CAPA ADHESIVA mm	RESISTENCIA ADH. TRACCIÓN kgf/cm ²
1	0,04	3,80
2	0,08	3,60
3	0,12	3,50
4	0,15	3,30
5	0,17	3,20
6	0,22	3,05
7	0,26	2,95
8	0,32	2,90
9	0,36	3,00
10	0,42	3,10

Con los valores experimentales de la Tabla 1 se ha construido la gráfica de la Fig.2. En esta gráfica se observa el comportamiento mecánico de la resistencia adhesiva a la tracción para diferentes

espesores de la capa adhesiva, habiéndose trazado en ella la curva que mejor ajusta a la distribución de puntos.

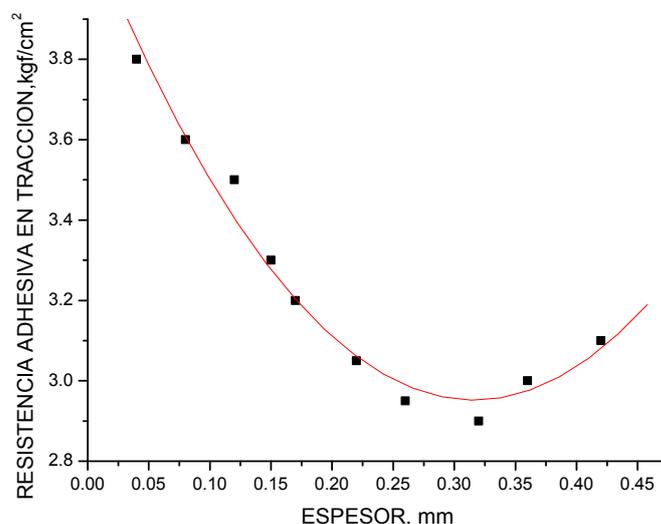


Fig. 2. Efecto del espesor de la capa adhesiva en la resistencia adhesiva a la tracción de un sistema epoxi DGEBA-TETA / acero SAE-1020, tipo unión a tope.

3.2. Efecto de la temperatura sobre la resistencia adhesiva a la tracción

Se ha procurado que el espesor resultante de la capa adhesiva de cada una de las probetas de este grupo sea aproximadamente el mismo (0,32 mm en promedio) y adicionalmente a esto, las probetas han estado sujetas a la mismas condiciones de: velocidad de ensayo, geometría, composición y curado. Luego han sido ensayadas cada una a distinta temperatura.

Los resultados experimentales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Comportamiento de la resistencia adhesiva a la tracción de un sistema epoxi DGEBA-TETA/acero SAE-1020 para distintos valores de la temperatura

ENSAYO N°	TEMPERATURA °C	RESISTENCIA ADH. TRACCIÓN kgf/cm ²
1	22	2,80
2	23	2,92
3	25	3,00
4	26	2,90
5	28	2,70
6	30	2,50
7	32	2,40
8	35	2,30
9	38	2,25
10	42	2,20

Con los valores experimentales de la Tabla 2 se ha construido la gráfica de la Fig. 3. En esta gráfica se presenta el comportamiento mecánico de la resistencia adhesiva a la tracción para distintos valores de la temperatura (de ensayo). Igualmente, sobre la gráfica se ha colocado la distribución de los puntos experimentales y luego se ha trazado la curva que mejor ajusta a dicha distribución.

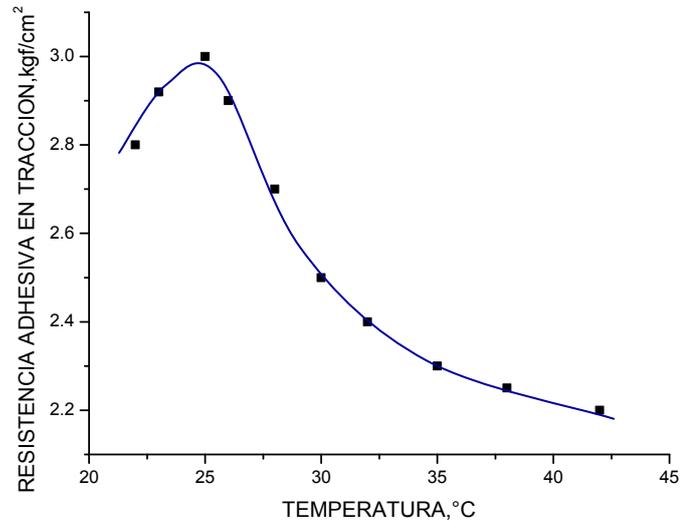


Fig.3. Influencia de la temperatura en la resistencia adhesiva a la tracción de un sistema DGEBA-TETA/ acero SAE-1020, tipo unión a tope.

IV. DISCUSIÓN

El efecto del espesor de la capa adhesiva en la resistencia adhesiva a la tracción de los sistemas epoxi DGEBA-TETA/ acero SAE-1020, tipo unión a tope, se puede observar en la Fig.2, aquí puede verse cómo la resistencia decae aproximadamente en forma exponencial conforme se incrementa el espesor de la capa adhesiva, en un rango de espesores pequeños comprendidos entre 0,04 y 0,30 mm. Para espesores mayores a 0,30 mm, la resistencia vuelve a recuperarse hasta ir alcanzando un cierto nivel que una vez logrado la resistencia llega a independizarse del espesor.

Por lo que, para capas finas la resistencia va disminuyendo conforme el espesor de la capa aumenta. Para capas más gruesas, dígame a partir de 0,30 mm, se aprecia que la resistencia no disminuye más, siendo la tendencia a aumentar hasta un cierto límite a medida que el espesor se incrementa. Aparentemente este comportamiento de la resistencia parece inesperado, sin embargo es consistente con algunos reportes científicos sobre el particular.

El reporte de Schmidt y Bell (1986: 35) acerca de la dependencia de la resistencia adhesiva peel respecto al espesor trabajando con sistemas epoxi/hojalata, informa que la resistencia disminuye a medida que el espesor aumenta, aquí es oportuno señalar que tales resultados solo se producen operando con rangos de espesores a nivel de películas finas, es decir, espesores comprendidos entre 0 y 0,2 mm. Esta información satisface el postulado de Gent y Hamed, presentado en la introducción del presente trabajo, el cual manifiesta que se necesitan mayores esfuerzos para las capas más finas que para las más gruesas.

En contraste con la explicación última anterior Kinloch (1982: 620) reporta que la fuerza peel por unidad de ancho crece conforme aumenta el espesor de la capa adhesiva, este comportamiento ocurre en el rango 0,2-2,0 mm aproximadamente. Para espesores por encima de 2,0 mm dicha "fuerza" se independiza del espesor, esto es, en adelante ella permanece constante. Esta explicación puede complementarse con los trabajos de Yang, Pang y Griffin (1992: 634) y Lacosta (1992: 741).

En la presente investigación, como se observa, se ha trabajado con un rango de espesores comprendidos entre 0,04 y 0,45 mm. El comportamiento de la resistencia de la Fig.2, en el rango de espesores 0,04-0,30 mm aproximadamente, se ubica dentro del alcance experimental de Schmidt y

Bell; claro está, que ellos obtuvieron un comportamiento similar en un rango de espesores más pequeños, como es 0-0,2 mm. Ello puede explicarse por el tipo de ensayo considerado para el sistema epoxi/metal; ellos realizaron el ensayo peel, en cambio en este caso se ha realizado el ensayo de tracción. Ahora bien, el comportamiento de la resistencia en el rango 0,30-0,45 mm, se ubica prácticamente dentro de las explicaciones de Kinloch (1982), Yang et al (1992) y Lacosta (1992).

La influencia de la temperatura en la resistencia adhesiva a la tracción de los sistemas epoxi DGEBA-TETA/ acero SAE-1020, tipo unión a tope, se puede apreciar en la Fig.3; en esta gráfica puede verse que el “máximo” valor de la resistencia ($2,96 \text{ kgf/cm}^2$) se alcanza a la temperatura de $24 \text{ }^\circ\text{C}$ (valor cercano a $T_g = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ que es la temperatura característica de transición vítrea del adhesivo utilizado), sin embargo, conforme la temperatura se aleja de T_g ya sea por debajo de ésta (adhesivo en estado vítreo) o por encima (adhesivo en estado gomoso), la resistencia decae notoriamente.

Este comportamiento de la resistencia es consistente con la explicación de (Lewis, 1998: 660), quien manifiesta que, si el adhesivo (resina + endurecedor) se prepara de tal manera que su temperatura T_g de transición vítrea resulte lo más próxima a la temperatura de ensayo, la resistencia exhibirá su mayor valor en relación a los que se puedan obtener a cualquier otra temperatura de ensayo.

Se resalta que, comportamiento mecánico de la resistencia adhesiva a la tracción puede atribuirse a la disipación de la energía adicional que existe dentro de la masa adhesiva, tal como lo describen Williams (1993: 240) y Chiang (1994: 2480). La energía disipada por acción de la deformación viscoelástica y plástica alrededor del frente de la grieta usualmente determina la medida de la energía de falla (Joseph, Bell, McEvily y Liang, 1993).

Finalmente, debe indicarse que para lograr una mejor performance de la estructura metal/adhesivo, en términos de una buena resistencia adhesiva, se agrega polvos de aluminio y alúmina de diferentes tamaños (Ghosh y Nukala, 2008: 310). Igualmente, se puede optimizar la temperatura de tratamiento y el tiempo de mantenimiento para lograr un mejor comportamiento de la resina, ante el efecto de degradación (Zhu et al, 2012: 258). Es más, los resultados experimentales confirman la posibilidad de controlar la resistencia adhesiva cambiando la geometría de contacto de acuerdo con los cálculos tensión-deformación (Kovrov y Zolotukhin, 1999: 336).

V. CONCLUSIONES

- El espesor de la capa adhesiva afecta notoriamente la resistencia adhesiva a la tracción de las estructuras de acero unidas con adhesivo epóxico DGEBA-TETA. Para capas finas la resistencia va decayendo exponencialmente conforme el espesor de la capa aumenta. Para capas más gruesas a partir de un espesor de valor característico, la resistencia tiende a aumentar hasta un cierto límite a medida que el espesor se incrementa. Después de alcanzar dicho límite se espera que la resistencia permanezca a ese nivel, aun cuando el espesor pueda seguir aumentando.
- La temperatura influye marcadamente en la resistencia adhesiva a la tracción de las estructuras de acero unidas con adhesivo epóxico DGEBA-TETA. Cuando la temperatura alcanza el valor característico de la temperatura de transición vítrea del adhesivo epóxico, la resistencia exhibe su máximo valor, mientras que si la temperatura se aleja de la de transición vítrea, ya sea aumentando o disminuyendo, la resistencia decae considerablemente.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Roberto J.J. Williams, Director de la División de Polímetros del Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales de la Universidad Nacional de Mar del Plata así como a la Dra. Analía Vázquez y Dra. Patricia Frontini, por sus orientaciones y sugerencias.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREWS, E. H., KING, N. E. 1976. Adhesion of epoxy resins to metals. *Journal of Materials Science*. Volume 11, Issue 11 , pp 2004-2014.
- ARELLANO, M. M. 1990. **Estudio de la Reacción de Curado de una resina epóxica con Aminas Alifáticas**. Tesis Magíster, pp.98-191.
- ASTM DESIGNATION. 1985. **Annual Book of ASTM Standards**, vol.02.02. Philadelphia.
- CHIANG, Y.M., CHAI, H. 1994. **Plastic Deformation Analysis of Cracked Adhesive Bonds Loaded in Shear**. *Int. J. Solids Structures*. Vol. 31 (18) pp. 2477-2490.
- GHOSH, P.K., NUKALA S.K. 2008. Characteristics of adhesive joints of metals using inorganic particulate composite adhesives. *Transactions of the Indian Institute of Metals*. Volume 61, Issue 4 , pp 307-317.
- HUNSTON, D.L., BASCOM, W.D. 1984. **Failure Behavior of Rubber-Toughened Epoxies in Bulk Adhesive, and Composite Geometries**. American Chemical Society, Chap.7, pp.84-99.
- JIANG HAN, BROWNING R., LIU PENG, CHANG T. A., SUE HUNG-JUE. 2011. Determination of epoxy coating wet-adhesive strength using a standardized ASTM/ISO scratch test. *Journal of Coatings Technology and Research*. Volume 8, Issue 2, pp 255-263.
- JOSEPH, R., BELL, J.P., MCEVILY, A.J., LIANG, J.L. 1993. **Fatigue Crack Growth in Epoxy/Aluminum and Epoxy/Steel Joints**. *J. Adhesion*, vol.41, pp.169-187.
- KINLOCH, A.J. 1982. **Review the Science of Adhesion Part 2.- Mechanics and Mechanisms of Failure**. *Journal of Materials Science* 17, 617-651.
- KOVROV, V. N., ZOLOTUKHIN, V. G. 1999. Experimental studies on the adhesion strength of a polymer-metal bond depending on the contact zone geometry. *Journal of Mechanics of Composite Materials*. Volume 35, Issue 4 , pp 335-338.
- LACOSTA BERNA, J.M. 1992. Características y Ensayos de Adhesivos Poliméricos. *Revista de Plásticos Modernos*, 438, pp. 740-746 (12).
- LEE, L.H. 1991. **Fundamentals of Adhesion**. Plenum Press. New York.
- LEWIS, A.F. 1998. **Epoxy Resin Adhesives, Chap.7 (Clayton A. May: Epoxy Resins Chemistry and Technology, 2nd. Edit.)**, pp.653-718.
- RICARDI, C.C., ADABBO, H.E., WILLIAMS, J.J. 1984. **Curing Reaction of Epoxy Resins with Diamines**. *Journal of Applied Polymer Science*, vol.29, pp.2481-2492.
- SÁNCHEZ, P.W. 1994. **Adhesión de Epoxi a Metales**. Informe de Proyecto de Investigación UNMDP.
- SCHMIDT, R.G., BELL, J.P. 1986. **Epoxy Adhesion to Metals** (*Advances in Polymer Science*, 75 *Epoxy Resins and Composites II*, Editor K. Dusek), pp. 33-71.
- ZHU GUO-LIANG, XIAO YAN-PING, YANG YONG-XIANG, WANG JUN, SUN BAO, BOOM ROB. 2012. Degradation behavior of epoxy resins in fibre metal laminates under thermal conditions. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. Volume 17, Issue 3 , pp 257-262.

- WILLIAMS, J.G. 1993. **A Review of the Determination of Energy Release Rates for Strips in Tension and Bending; Static and Dynamic Solutions.** Journal of Strain Analysis. Vol. 28 (4) pp.237-255.
- YANG, C., PANG, S.S., GRIFFIN, S. 1992. **Strength Model of Adhesive-Bonded Double-Lap Joints Under Cantilevered Bending** - Polymer Engineering and Science MID-MAY, vol. 32, N° 9, pp. 632-640.
- YU J., SONG J.Y., PARK, I. S. 2002. Analyses of the practical adhesion strengths of the metal/polymer interfaces in electronic packaging. Journal of Electronic Materials. Volume 31, Issue 12 , pp 1347-1352.