

Criterio de falla para probetas cilíndricas unidas con adhesivo:
Diseño de dispositivo para la aplicación de cargas de tensión y torsión.

Luis Ernesto Mendoza Navarro*, Stephan Hunkeler*, Rubén Castañeda Balderas**,
Alberto Díaz Díaz***.

* Estudiante, ** Técnico Académico, *** Investigador

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., Miguel de Cervantes 120, Complejo Industrial Chihuahua, Chihuahua, Chih., México C.P. 31109 Teléfono (614) 439-4802

Resumen.

Este artículo trata de definir un criterio de falla para uniones adhesivas. Utiliza probetas cilíndricas de acero unidas con adhesivo estructural. El criterio de falla se deduce de los valores obtenidos experimentalmente por medio de un dispositivo que permite aplicar cargas de tensión y torsión. En primer lugar se presenta el dispositivo que permita aplicar estas cargas, posteriormente se presenta el análisis numérico de estas pruebas. De esta manera se obtuvo un criterio de falla utilizando valores promedio de los esfuerzos cortantes y normales en una determinada zona.

Abstract.

This paper tries to define a criterion that would allow to foresee break of stuck unions. It uses steel cylindrical samples stuck with structural adhesive. The criterion relies on experimental data gotten from a device that allows to enforce tension and torsion loads. First we introduce this device and then the numerical simulation of the experiments. Thus, we get a break criterion that uses average value of shear and normal stresses on a defined area.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de adhesivo en la unión de piezas estructurales se ha venido incrementando considerablemente debido a que se han observado ventajas con respecto a otros sistemas de unión de piezas, como son la soldadura o por medio de tornillería. Algunas de las ventajas son la facilidad de aplicación y la distribución de esfuerzos sobre toda la unión. Al

utilizar adhesivos para unir piezas, las fuerzas aplicadas se transmiten de manera homogénea sobre toda la superficie de unión. Estas fuerzas transmitidas a través del adhesivo hacen que éste se encuentre sometido a diferentes tipos de esfuerzos, como lo son los esfuerzos de tensión, de compresión, de desprendimiento y de torsión.

En piezas unidas mediante adhesivo, se puede predecir la carga máxima que soportará el ensamble como una función de las propiedades de los materiales, la geometría de la unión y el tipo de carga que se le aplique. Para poder determinar la carga máxima que soportará el ensamble, es necesario entender el estado de los esfuerzos y deformaciones presentes en la estructura. El estado de los esfuerzos y deformaciones en la unión se pueden aproximar por medio analítico, resolviendo las ecuaciones diferenciales que modelan la mecánica y cinemática de la unión, o numéricamente por medio de la técnica del análisis de elementos finitos. Desde principios de los años 40, Goland y Reissner [1], desarrollaron un modelo simplificado para calcular los esfuerzos en piezas unidas mediante adhesivos. A mediados de los años 70, gracias a la capacidad de las computadoras, se comenzó a resolver numéricamente y con mayor precisión las ecuaciones que modelan el comportamiento y equilibrio en la unión, Adams [2]. Actualmente, a fin de construir estructuras más confiables se tiene un interés especial por predecir con precisión el momento de la falla de piezas unidas mediante adhesivo. Keller et al. [3-5] han tratado de predecir el esfuerzo máximo que soporta una unión a doble traslape de compósitos de polímero con fibras como refuerzo. Sin embargo, se han tenido problemas para la predicción, ya que los autores trabajan con muchos parámetros como: materiales anisotrópicos, adhesivos elastoplásticos, configuraciones de probetas que producen cargas difíciles de calcular que hacen complicado el determinar la forma en que influye cada parámetro en la carga crítica [6-10]. En el presente trabajo se busca eliminar parámetros que hagan complicado el determinar el estado de esfuerzos en la interfase de la unión. Para reducir algunos parámetros, primeramente, se utilizó un adhesivo epóxico tipo poliéster que se comporta de forma más frágil que otro tipo de adhesivos epóxicos. Con este tipo de adhesivo se espera obtener un tipo de falla de adhesión, el cual es en la interfase adhesivo – sustrato, con esto se elimina algún otro tipo de falla. Otro parámetro que se elimina es la plasticidad que pudiera presentar el adhesivo, gracias a la fragilidad del adhesivo utilizado.

En la búsqueda de un criterio de resistencia de la unión basado en los esfuerzos presentes en la interfase, se realizaron pruebas de tensión y de torsión a probetas cilíndricas unidas a tope. Con los resultados experimentales de falla, se calculan los esfuerzos normal σ y cortante τ en

las interfases en el momento de la falla y se posicionan la pareja (σ, τ) en el plano virtual de esfuerzos (normal – cortante). Para poder obtener más puntos de la envolvente de falla en el plano virtual se requiere aplicar diferentes valores de carga sobre la probeta. Para lograrlo se construyó un dispositivo que permitiera realizar pruebas de tensión-torsión al mismo tipo de probetas. En esta máquina se aplica una carga de tensión determinada a la probeta y, posteriormente, se va aplicando un momento sobre la probeta hasta la ruptura. Con estos valores de tensión y torsión, se calculan los valores de esfuerzos normales y cortantes presentes en la interfase al momento de la falla. Con los valores de la pareja de esfuerzos se tienen otros puntos en el sistema de coordenadas. Con la obtención de diversos puntos en el sistema de coordenadas de esfuerzos normales – cortantes, se obtendrá la envolvente de falla que permitirá determinar un criterio que prediga el momento de la falla del componente.

El objetivo de este trabajo de investigación es realizar pruebas mecánicas en las que se apliquen fuerzas de tensión y de torsión simultáneamente sobre la probeta, para determinar los esfuerzos que provocan la falla de la unión. El trabajo consta de tres partes. En la primer parte se describe el funcionamiento del dispositivo desarrollado. En la segunda parte se mencionan las propiedades de los materiales utilizados, se describen las probetas utilizadas y se muestran los resultados de las pruebas realizadas. En la tercer parte se realiza un análisis de los esfuerzos presentes en la interfase, se establece el criterio de falla propuesto y se muestran las predicciones del criterio.

2. Diseño de dispositivo de pruebas torsión – tensión.

En el presente trabajo se busca aplicar una fuerza de tensión y, al mismo tiempo, aplicar un momento sobre dos barras metálicas, las cuales se encuentran unidas mediante adhesivo. En la figura 1 se muestra un esquema de dichas cargas sobre la probeta.

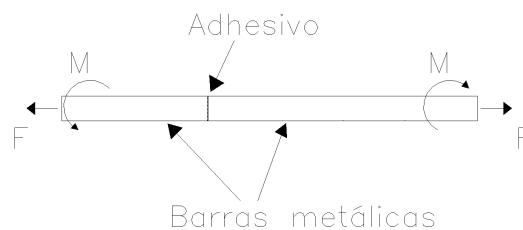


Figura 1. Esquema de fuerzas aplicadas.

Se diseñó un dispositivo para lograr aplicar el par de cargas, fuerza de tensión y momento sobre las barras metálicas. Este dispositivo consta de tres chumaceras en las cuales se monta la probeta (ver figura 2). Las chumaceras permiten que la probeta tenga movimiento tanto longitudinal, como de rotación. Un extremo de la probeta está sujeta, por medio de ganchos a una celda de carga. La celda de carga cumple dos funciones: mide la fuerza que se trasmite a la probeta y no permite que la probeta tenga movimiento longitudinal. En el mismo extremo se tiene un perno que no permite que rote la probeta. En el otro extremo, la probeta se sujeta por medio de un gancho con cuerda a un eje. El eje tiene una polea con la cual se aplica la carga de tensión. Además se tiene el brazo de palanca que aplica un momento sobre la probeta. Con este dispositivo se puede aplicar una fuerza de tensión sobre la probeta, por medio de la polea, y un momento, por medio del brazo de palanca. La polea permite multiplicar la fuerza aplicada sobre la probeta.

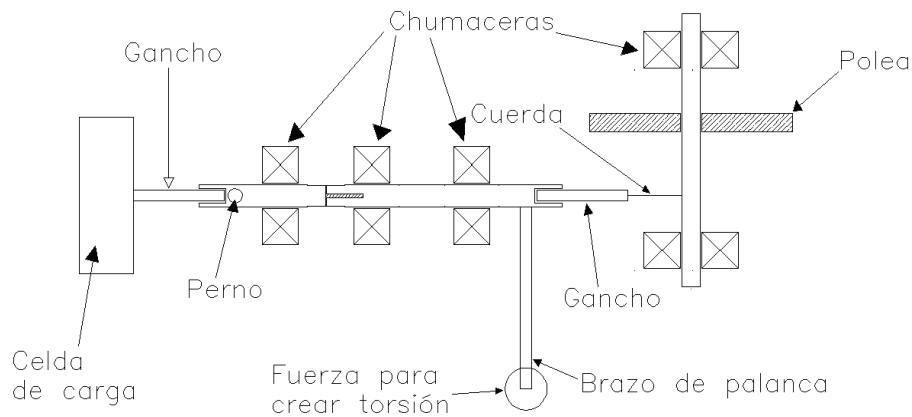


Figura 2. Esquema de máquina torsión – tensión.

3. Realización de probetas y resultados.

Las probetas elaboradas en esta investigación constan de dos partes: substratos y adhesivo (ver figura 3). El material utilizado para elaborar los substratos, es acero estructural de baja aleación 1018. El adhesivo que se utilizó es resina poliéster. Se caracterizaron los materiales mediante pruebas de tensión instrumentadas con galgas extensiométricas, en una máquina universal marca Instron. En la tabla 1 se tienen los datos obtenidos de las pruebas mecánicas de los materiales.

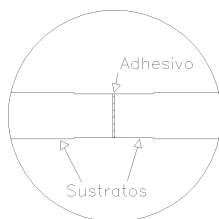


Figura 3. Detalle de probeta.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la realización de probetas.

Propiedad	Acero	Adhesivo
Módulo de Young (GPa)	181	2.3
Coefficiente de Poisson	0.33	0.347
Esfuerzo de cedencia (MPa)	370	51

En lo que respecta a la elaboración de probetas de unión a tope, se emplearon barras de 12.5 mm de diámetro. En un extremo de las barras se maquinó la pieza para reducir su diámetro exterior, esto con la finalidad de facilitar el desmolde. La figura 3 muestra el detalle de la reducción de diámetro. Se realizó un conducto de salida de aire en el centro de una de las barras, por medio de una perforación en el centro de la probeta, la cual se conecta con otra perforación transversal (ver figura 4). Este conducto permite la salida de aire al momento del curado, y así se eliminan las burbujas que pudieran quedar atrapadas en el adhesivo.

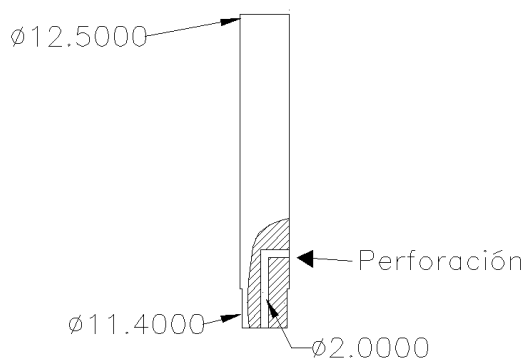


Figura 4. Conducto para evitar burbujas en el adhesivo (dimensiones en mm).

Se construyó un molde para sujetar los sustratos para asegurar que ambos sustratos se encontraran concéntricos. Se elaboraron aros de caucho de silicón, para contener al adhesivo entre las superficies a unir. Se depositó el adhesivo por medio de jeringa. La figura 5 muestra la

forma de vaciado de resina en las probetas. El espesor del adhesivo que se utilizó en las pruebas es de 0.5 mm.

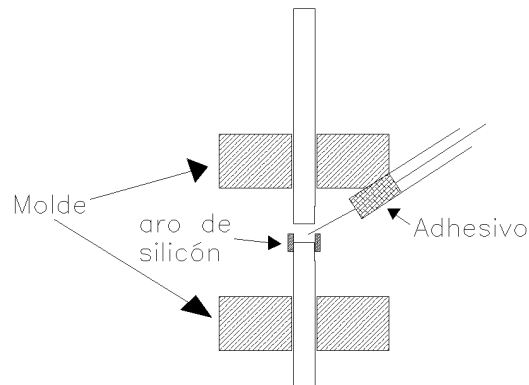


Figura 5. Molde de vaciado de resina.

En la tabla 2 se tienen pares de valores de fuerzas de tensión y torsión obtenidas en las pruebas.

Tabla 2. Datos experimentales de pruebas de tensión – torsión para probetas cilíndricas.

Designación	Número de especímenes	Valor de la carga última en tensión (N)	Valor de la carga última en torsión (N*mm)
Prueba 1	9	1287	0
Prueba 2	4	670	3225
Prueba 3	4	434	4251
Prueba 4	4	193	3421
Prueba 5	5	0	5543

4. Análisis de esfuerzos y criterio de falla.

Los valores de carga que se obtuvieron se utilizaron para determinar, por medio de Análisis de Elemento Finito, el valor de los esfuerzos a los que se encuentran sometidas las interfaces. Se empleó el software comercial Comsol Multiphysics 3.3 para estos cálculos. Se empleó un análisis axial simétrico. La figura 6 (a) muestra la geometría utilizada para la obtención de los esfuerzos de interfase, así como las condiciones de frontera impuestas. En la figura 6 (b) se observa el refinamiento de la malla que se utilizó.

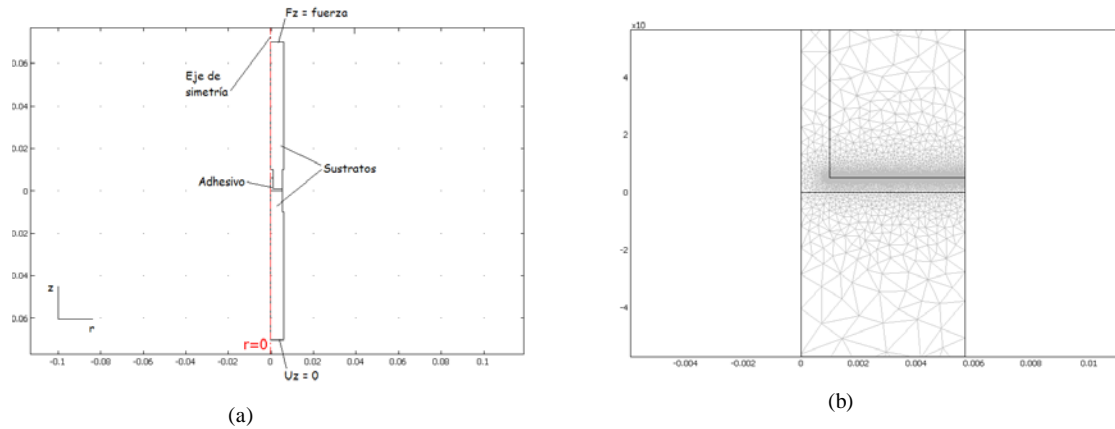


Figura 6. (a) Geometría de probeta utilizada para determinar los esfuerzos de interfase. (b) Detalle de malla en el adhesivo.

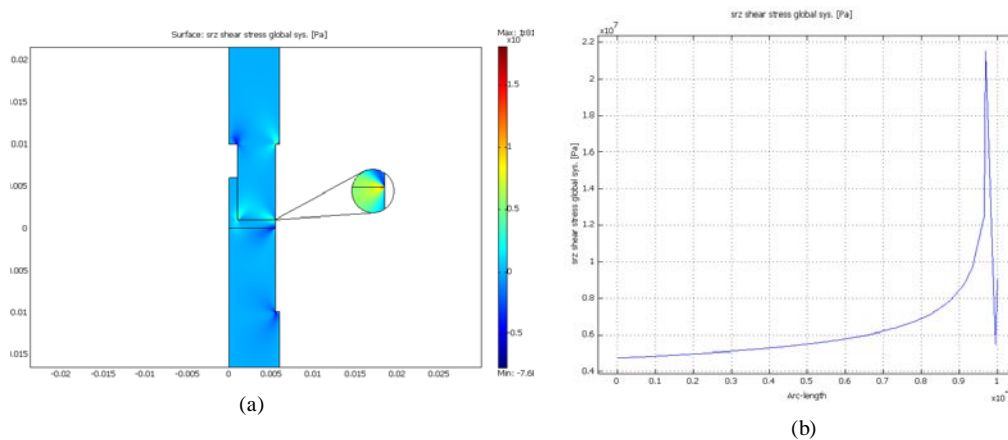


Figura 7. (a) y (b) Esfuerzos cortantes en la interfase.

Como se observa en la figura 7, los esfuerzos no tienen un valor constante a todo lo largo de la interfase. En la orilla de la interfase se presenta una singularidad, la cual tiende a infinito al hacer más fino el mallado. Estas singularidades son clásicas en interfases entre materiales diferentes. Un criterio de falla no puede establecerse sobre el valor puntual de los esfuerzos debido a las singularidades. Se puede emplear un criterio sobre los esfuerzos promedio calculados mediante una integral sobre una distancia característica a partir del borde [11]. El criterio propuesto es de la forma siguiente:

$$\left[\frac{\tau^p}{k} + \sigma^p \right]^{\frac{1}{p}} = \sigma^c \quad (1)$$

donde:

$\bar{\tau} = \frac{\int_d \tau ds}{d}$ es el esfuerzo cortante promedio.

$\bar{\sigma} = \frac{\int_d \sigma ds}{d}$ es el esfuerzo normal promedio.

σ^c, d, P, k constantes, propiedades de la interfase por identificar.

Empleando los valores obtenidos, se puede graficar la pareja $\bar{\sigma}, \bar{\tau}$ obtenida para cada prueba en el plano virtual de esfuerzos (ver figura 8). La curva trazada corresponde al criterio de falla obtenido también conocida como envolvente de falla.

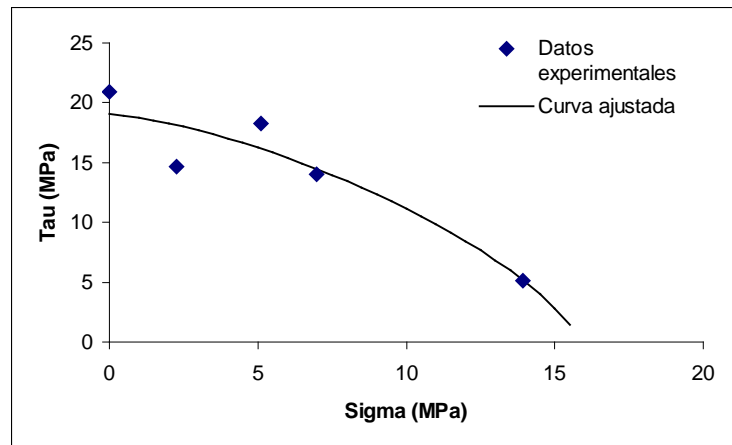


Figura 8. Criterio de falla de esfuerzo normal - cortante para probetas cilíndricas.

Gracias a los resultados experimentales y a una optimización del juego de parámetros, se ajustaron los parámetros del criterio y se obtuvieron así: σ^c, d, P, k . Con un valor de distancia característica de $d = 0.1$ mm se tiene la siguiente ecuación del criterio:

$$\left[\bar{\tau}^{-1.4} + 1.3 \bar{\sigma}^{-1.4} \right]^{1.4} = 19.05 \text{ MPa} \quad (2)$$

Es importante comentar que en la figura 8 se observa que el segundo punto de los datos experimentales tiene un valor más bajo que lo esperado, este punto se da cuando se aplica una carga de tensión baja. Esta baja en la resistencia se puede deber a la forma en que los ganchos, utilizados para la aplicación de la fuerza de tensión, transmiten la carga hacia la

probeta. Probablemente con valores bajos de carga los ganchos no se alineen con la probeta, transmitiendo un momento adicional al adhesivo, el cual podría contribuir en la ruptura.

Con el valor de los parámetros obtenidos se realizaron predicciones de las cargas de falla para cada probeta. En la tabla 3 se encuentra un comparativo entre las cargas obtenidas experimentalmente y las cargas teóricas predichas, y al comparar los valores calcular los porcentajes de error en las predicciones.

Tabla 3. Comparación entre cargas últimas de falla calculadas y predicciones.

Designación	Carga última en tensión medida (N)	Carga última en tensión predicha (N)	% de error	Carga última en torsión medida (N*mm)	Carga última en torsión predicha (N*mm)	% de error
Prueba 1	1287	1248	-3.1	0	0	0
Prueba 2	670	681	1.7	3225	3238	0.39
Prueba 3	434	389	-11.6	4251	3811	-11.5
Prueba 4	193	241	19.9	3421	4263	19.7
Prueba 5	0	0	0	5543	5287	-4.8

Conclusiones.

Se desarrollo un dispositivo para aplicar cargas combinadas de torsión y tensión con el cual se pueden hacer que varíe el valor de los esfuerzos que se generan la interfase del adhesivo.

Con este dispositivo se obtuvieron valores de esfuerzos normales y cortantes en la interfase del adhesivo con los cuales se pudo determinar un criterio de falla. El criterio de falla propuesto se aproxima bastante a los valores obtenidos experimentalmente.

En trabajos futuros se realizaran pruebas con diferentes adhesivos en el dispositivo desarrollado para determinar que valores tomarán las constantes de la ecuación del criterio propuesto. Además, en trabajos posteriores, se buscará adecuar la misma ecuación del criterio a otro tipo de pruebas como son a doble traslape en tensión con diferentes adhesivos.

Bibliografía

- [1] Goland M, Reissner E. "The stresses in cemented joint". J Appl Mech 1944; A17–A27.
- [2] Adams RD. In: Matthews FL, editor. "Theoretical stress analysis of adhesively bonded joints. Joining fiber-reinforced plastics". Essex, UK: Elsevier Applied Science (1987) p. 185–226.
- [3] Thomas Keller, Till Vallée. "Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part I: stress–strain analysis and failure modes". Composites: Part B 36 (2005) p. 331–340.
- [4] Thomas Keller, Till Vallée. "Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part II: joint strength prediction". Composites: Part B 36 (2005) p. 341–350.
- [5] Thomas Keller, Till Vallée. "Adhesively bonded lap joints from pultruded GFRP profiles. Part III: Effects of chamfers". Composites: Part B 37 (2006) p. 328–336.
- [6] Madhukar Vable, JaiHind Reddy Maddi. "Boundary element analysis of adhesively bonded joints". International Journal of Adhesion & Adhesives 26 (2006) p. 133–144.
- [7] V. Kradinov, E. Madenci, D.R. Ambur. "Combined in-plane and through-the-thickness analysis for failure prediction of bolted composite joints". Composite Structures 77 (2007) p. 127–147
- [8] Lucas F.M. da Silva, R.D. Adams. "Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range". International Journal of Adhesion & Adhesives Artículo en Prensa.
- [9] J.A. Nairn. "Simulation of crack growth in ductile materials". Engineering Fracture Mechanics 72 (2005) p. 961–979.
- [10] P.R. Underhill, D.L. DuQuesnay. "The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation" International Journal of Adhesion & Adhesives 26 (2006) p. 62–66.
- [11] Brewer JC, Lagace PA. "Quadratic stress criterion for initiation of delamination". J Compos Mater 22 (1988) p. 1141-1155.