

# Resistencia mecánica de placas pegadas con adhesivo

Romuald Noret\*, Rubén Castañeda Balderas\*\*, Alberto Díaz Díaz\*\*

\* Romuald.Noret@ifma.fr, \*\* ruben.castaneda@cimav.edu.mx,

\*\*\* alberto.diaz@cimav.edu.mx

Centro de Investigación en Materiales Avanzados S.C. Miguel de Cervantes 120,  
Compl. Ind. Chih. 31109 Chihuahua, Chih.

## Resumen

El uso de adhesivos en las industrias automotriz y aeroespacial se ha incrementado considerablemente en los últimos años. La ventaja principal de esta técnica con respecto a los métodos convencionales (soldaduras, tornillos) es una menor concentración de esfuerzos en la unión puesto que no hay esfuerzos residuales por calentamiento ni perforaciones. Un diseño óptimo de un ensamble con adhesivo requiere de una predicción confiable de su resistencia mecánica. Actualmente, esta predicción es una dificultad para los ingenieros puesto que antes de la falla se presentan fenómenos no lineales como la plasticidad y que complican los cálculos predictivos. Para hacer estas predicciones, en este trabajo se propone el uso de la técnica de elementos finitos, un modelo de plasticidad para el adhesivo, criterios de rupturas de adhesivo. Las predicciones de estas herramientas teóricas son validadas mediante una comparación con resultados experimentales. Los resultados teóricos reproducen con fidelidad los fenómenos observados en las pruebas mecánicas: una longitud óptima de adhesivo a partir de la cual la resistencia mecánica no se incrementa más y una disminución de la resistencia cuando se aumenta el espesor de adhesivo. Los resultados de este trabajo representan un importante avance en la optimización del diseño de la unión de placas mediante adhesivos.

## 1. Introducción

El empleo de adhesivos para ensambles va cada día en aumento debido a su fácil aplicación, a la correcta transferencia de esfuerzos y a sus ventajas con respecto a otros métodos de ensamblado como son el uso de tornillos o de soldaduras. Los adhesivos son atractivos puesto que no generan esfuerzos residuales como las otras técnicas. Sin embargo, hasta la fecha, el diseño de ensambles pegados con adhesivo está lejos de ser optimizado. Esto es debido a que se conocen poco los fenómenos físicos que ocurren antes de la falla.

En este trabajo se consideran placas unidas por adhesivo. De acuerdo con los resultados experimentales de varios investigadores [1,2,3], se sabe que existe una longitud óptima  $l^{opt}$  de adhesivo debajo de la cual la fuerza máxima que soporta la estructura aumenta con la longitud y para longitudes mayores a  $l^{opt}$  la fuerza máxima es la misma. También, se sabe que existe un espesor óptimo  $e^{opt}$  de adhesivo: para espesores inferiores a  $e^{opt}$  un incremento de espesor aumenta la resistencia de la estructura y para espesores superiores a  $e^{opt}$  un incremento de espesor disminuye la

resistencia mecánica. Algunos investigadores [2,4] tratan de justificar de un punto de vista teórico estas dimensiones óptimas por medio de la teoría probabilística de Weibull [5] que se aplica correctamente para materiales frágiles. Sin embargo, esta teoría nos parece que no puede ser aplicada para el caso de adhesivos poliméricos que pueden presentar niveles de plasticidad considerables y además pueden no fallar a pesar de que exista una pequeña grieta (esto es lo contrario de lo que predice la teoría de Weibull).

En este trabajo se emplea la técnica de elementos finitos para calcular los esfuerzos y la plasticidad en el adhesivo. Se emplea también un criterio de ruptura de tipo plasticidad máxima. Con estas herramientas, se estudia los efectos del espesor y de la longitud de adhesivo sobre la resistencia del ensamble. La técnica es novedosa y muestra que la teoría prevé también longitudes y espesores óptimos de adhesivo.

## 2. Herramientas teóricas empleadas

### Cálculo de esfuerzos

En este estudio se considera un ensamble pegado como el esquematizado en la figura 1. Los substratos son de acero y se supone que tienen un comportamiento lineal elástico (módulo de Young  $E=210\text{GPa}$ , coeficiente de Poisson  $\nu=0.33$ ). El adhesivo es de tipo epóxico y tiene un comportamiento elastoplástico con plasticidad perfecta (módulo de Young  $E=2\text{GPa}$ , coeficiente de Poisson  $\nu=0.33$ , cedencia  $\sigma^c=20\text{MPa}$ ).

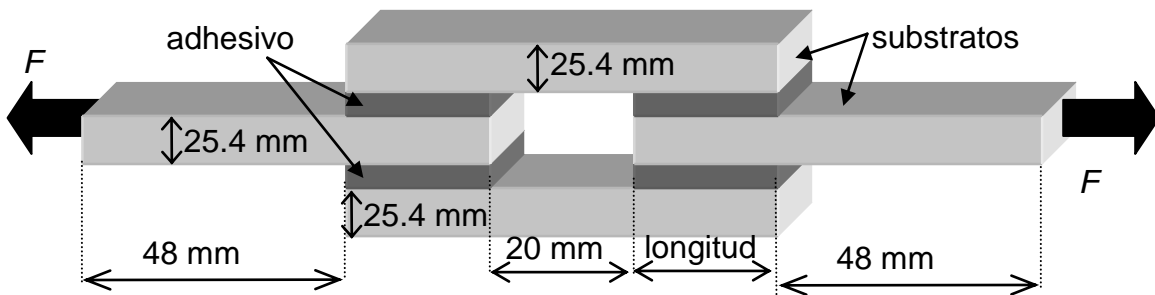


Figura 1. Esquema de la estructura considerada

Gracias a las simetrías del problema y a una hipótesis de deformaciones planas, la geometría de estudio se simplifica y se considera únicamente el cuarto de sección esquematizado en la figura 2.

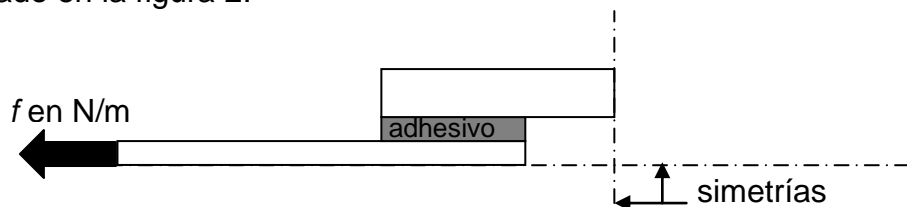


Figura 2. Geometría simplificada

La resolución del problema se hizo por medio del software COMSOL de elementos finitos. Las condiciones de frontera empleadas para el cálculo se deducen de la figura 2: a parte de las condiciones de simetría, en los bordes donde no se especifica ninguna condición el borde es libre de esfuerzos.

### Criterio de falla del adhesivo

El adhesivo es modelado con un comportamiento elastoplástico con plasticidad perfecta. Por consiguiente, no se puede emplear un criterio de ruptura del adhesivo que involucre a los esfuerzos (una vez que se alcanza la cedencia ya no aumentan estos esfuerzos). Para materiales que presentan plasticidad, es más útil emplear un criterio sobre la deformación plástica acumulada. Una podría entonces pensar que el siguiente criterio podría ser útil para predecir una ruptura en el adhesivo en un punto M:

$$p(M) = p^c \quad (1)$$

donde  $p(M)$  es la plasticidad acumulada calculada en el punto M y  $p^c$  es la deformación plástica máxima que puede soportar el material. Sin embargo, es bien sabido que los puntos de intersección de las interfases con los bordes presentan singularidades (valores infinitos) para los esfuerzos cuando se hace un cálculo elástico y para las deformaciones plásticas cuando se emplea plasticidad perfecta. Por lo tanto, no se puede emplear un criterio puntual en nuestro caso. Se escogió entonces remplazar la deformación puntual en la ecuación (1) por un valor promedio de la deformación plástica acumulada en un disco de radio  $\rho$  centrado en M mediante la ecuación:

$$\bar{p}(M) = \frac{\int_{r=0}^{\rho} \int_{\theta=0}^{2\pi} p(r, \theta) r d\theta dr}{\pi \rho^2} \quad (2)$$

Este valor promedio fue calculado mediante un programa que utiliza como datos los resultados de COMSOL. Es importante señalar que el radio  $\rho$  es para nosotros una propiedad del material que hay que identificar por medio de pruebas. Por otro lado, cuando el disco no puede ser incluido dentro de la capa de adhesivo, se considera únicamente el área de intersección entre el disco y la capa de adhesivo. De ahora en adelante, en este trabajo, el criterio de inicio de falla en el adhesivo es:

$$\bar{p}(M) = p^c \quad (3)$$

donde  $p^c = 3\%$  (valor escogido arbitrariamente pero típico de un material epóxico).

### 3. Resultados y discusión

Se consideraron primeramente los siguientes parámetros geométricos:

- espesor de adhesivo = 0.5 mm
- longitud de adhesivo = 30 mm

En la figura 3, se trazó la fuerza  $f$  para diferentes valores del desplazamiento  $D$  (aplicado en la extremidad izquierda de la capa de acero). Se puede apreciar que el comportamiento global es casi lineal elástico para valores de fuerza inferiores a 344KN/m. Después el comportamiento es típico de plasticidad generalizada en el adhesivo.

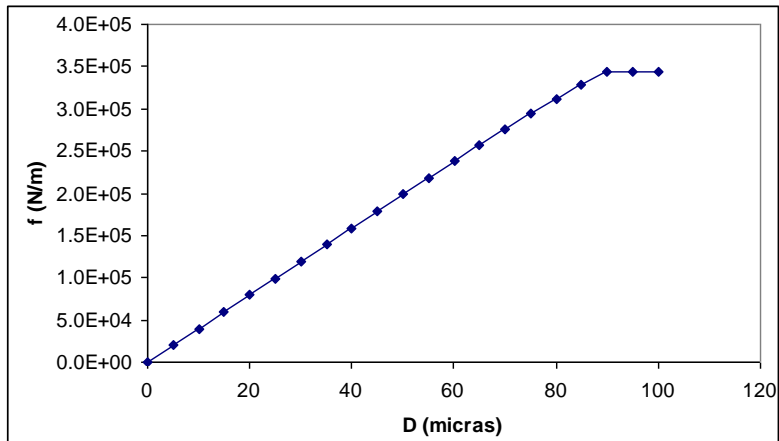


Figura 3. Gráfica de comportamiento global: fuerza  $f$  contra desplazamiento  $D$ .

Analicemos la plasticidad en el adhesivo para diferentes valores de carga (ver figura 4). Se puede observar que para la fuerza  $f=199\text{KN/m}$ , la plasticidad en el adhesivo inicia en la esquina inferior izquierda de la capa de adhesivo y se propaga de izquierda a derecha. Después, antes de que el frente de plasticidad del lado izquierdo alcance la mitad del adhesivo ( $f=312\text{KN/m}$ ), aparece plasticidad en la esquina inferior derecha del adhesivo. Luego, los dos frentes se propagan y se juntan plastificando la totalidad de la capa adhesivo.

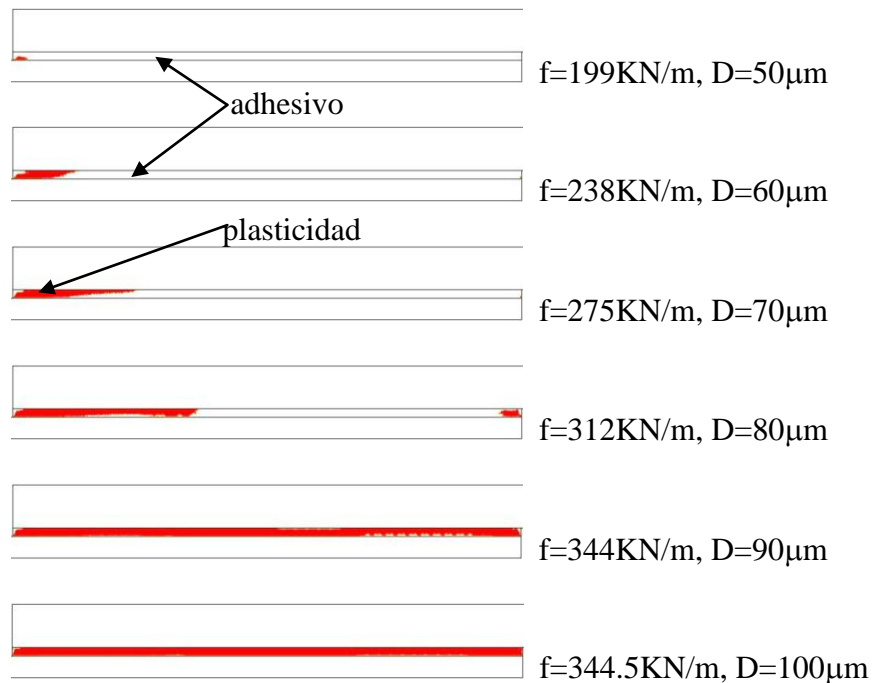


Figura 4. Zonas de plasticidad para diferentes valores de carga.

Es importante señalar que a pesar de que el comportamiento global es casi lineal elástico para valores de carga inferiores a  $344\text{KN/m}$ , el tamaño de la zona de

plasticidad en el adhesivo es bastante grande (esto hace no aplicable una predicción de tipo elástico-frágil). Lo que confiere el carácter “casi-elástico” al comportamiento global es que existe una zona sin plastificar antes de 344KN/m pero una vez que se alcanza ese valor de carga ya no existe ninguna zona en el adhesivo que pueda soportar más carga.

Aplicamos ahora nuestro criterio de inicio de falla definido en la ecuación (3) con un valor crítico  $p^c = 3\%$ . Veamos la influencia que tiene el radio  $\rho$  (propiedad del material que hay que identificar en un trabajo posterior) sobre las predicciones de la fuerza crítica que provocaría el inicio de la falla en el adhesivo para un espesor de adhesivo de 0.5 mm. Para todos los valores considerados de  $\rho$ , la plasticidad promedio  $\bar{p}(M)$  alcanza su valor máximo cuando el punto M se encuentra ubicado en la esquina inferior izquierda de la capa de adhesivo. Por esta razón, si la capa de adhesivo falla, esta falla inicia en esta esquina inferior izquierda. En la figura 5, se encuentra la gráfica de las fuerzas críticas que conducen al inicio de falla en el adhesivo en función de la longitud de adhesivo para diferentes valores de  $\rho$ . Primeramente, se puede observar que a mayor valor de  $\rho$ , mayor será la carga que inicia la falla del adhesivo. También, se puede apreciar que cualquiera que sea el valor de  $\rho$ , existe un valor de longitud óptima arriba de la cual la resistencia de la estructura ya no aumenta: esto ha sido observado experimentalmente por otros autores.

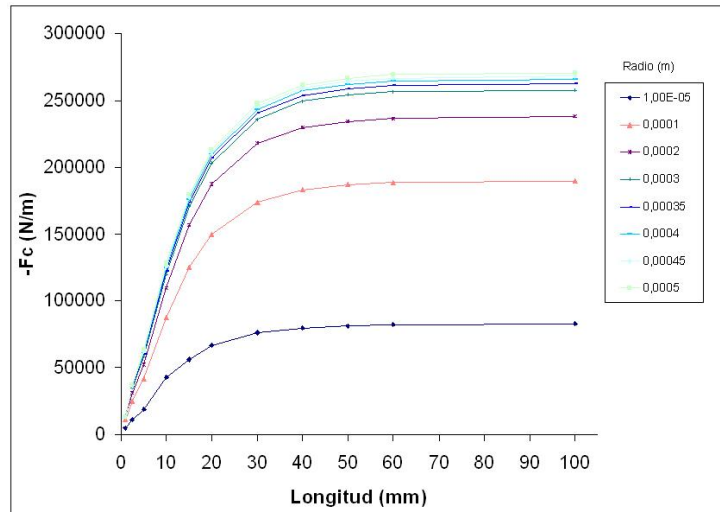


Figura 5. Fuerza crítica en función de la longitud de adhesivo con diferentes valores de la propiedad  $\rho$  del adhesivo.

Fijemos ahora el valor de  $\rho$  a 0.2 mm para darnos una idea de la influencia del espesor y para investigar la posible existencia de un espesor de adhesivo óptimo teórico. Analicemos el efecto de una variación de espesor para tres longitudes de adhesivo diferentes: 10mm, 20mm y 40mm. Para todas las geometrías ensayadas, el punto crítico de inicio de falla se encuentra nuevamente en la esquina inferior izquierda de la capa de adhesivo. En la figura 6, para las tres longitudes de adhesivo consideradas, se trazó la fuerza máxima en función del espesor de adhesivo. Se puede apreciar que

teóricamente se prevé un espesor óptimo de adhesivo (existe un máximo en cada gráfica). Este espesor óptimo de adhesivo es obviamente función de la longitud de adhesivo considerada. En la figura 7, se muestra la dependencia de este espesor óptimo con respecto a la longitud de adhesivo.

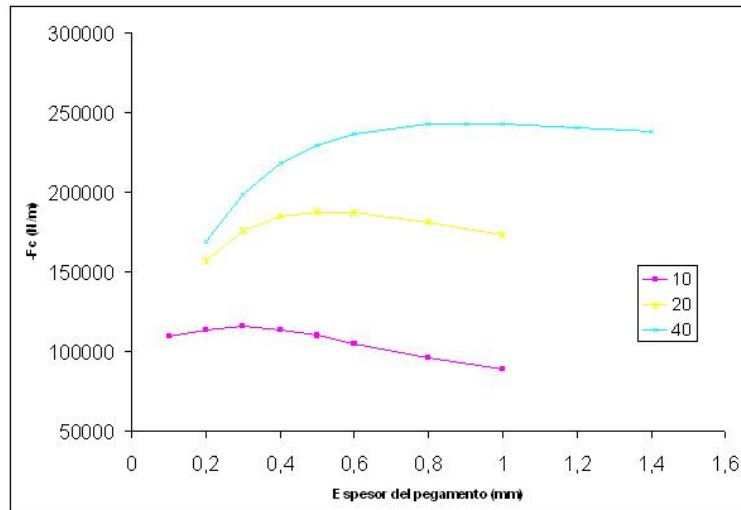


Figura 6. Fuerza máxima  $f$  en función del espesor de pegamento para tres longitudes de adhesivo diferentes (10, 20 y 40 mm)

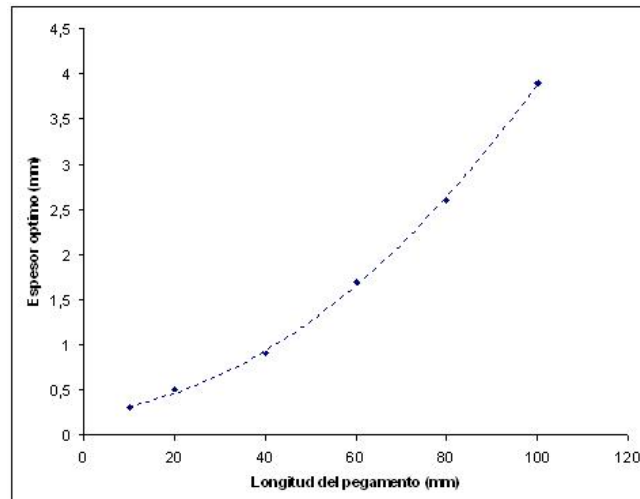


Figura 7. Espesor óptimo de adhesivo en función de la longitud de adhesivo.

Para un ingeniero, la figura 7, es de gran interés pues gracias a ésta, se puede realizar el ensamble con las dimensiones óptimas. Obviamente, previamente se requiere una identificación de los parámetros  $\rho$  y  $p^c$  que escogimos arbitrariamente y un nuevo cálculo de los espesores óptimos en función de las longitudes óptimas.

## 4. Conclusión

En este artículo se analizó la resistencia mecánica de placas pegadas con adhesivo que presenta deformaciones plásticas. Gracias a un software de elementos finitos y a un criterio de ruptura pertinente, se logró poner en evidencia longitudes y espesores óptimos de adhesivo tal y como se observa en los resultados experimentales reportados por otros autores. Estos logros hacen muy prometedor el método de predicción de falla para poder optimizar el ensamble por adhesivos. Para poder aplicar el método se necesita antes realizar una campaña de pruebas y hacer los ajustes pertinentes para afinar y validar experimentalmente la técnica de predicción de falla de placas pegadas con adhesivos.

## Referencias

- [1] Till Vallée, João R. Correia, Thomas Keller. “Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations”. *Composites Science and Technology*, 66, pp. 1903-1914, 2006.
- [2] Réda Hadj-Ahmed, Gilles Foret, Alain Ehlacher. “Probabilistic analysis of failure in adhesive bonded joints”. *Mechanics of Materials*, 33, pp 77-84, 2001.
- [3] Delmas, J.P. “Contribution à l’étude des collages structuraux: application au mortier plaqué”. Tesis de doctorado de la Universidad de Reims, Francia, 1979.
- [4] Till Vallée, João R. Correia, Thomas Keller. “Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles – Part II: Strength prediction”. *Composites Science and Technology*, 66, pp. 1915-1930, 2006.
- [5] Weibull, W.A. “Statistical distribution function of wide applicability”. *Journal of Applied Physics*, 18, p. 293, 1951.