

Influencia del espesor de adhesivo de poliuretano en la resistencia de uniones sometidas a cortadura^(*)

R. García-Ledesma*, J. Oñoro*, J.M. Amo**, M.C. Durán** y J. Durán**

Resumen El espesor de la capa de adhesivo en las uniones por adhesión de materiales metálicos, tiene una influencia notable en el comportamiento y las propiedades mecánicas de dichas uniones. El objeto de este trabajo fue analizar las propiedades de resistencia y desplazamiento, presentadas por uniones a solape de acero, unidas con capas de diferentes espesores de un adhesivo de poliuretano. Los resultados obtenidos muestran que la resistencia mecánica es máxima para capas de adhesivo de espesor muy delgado: 0,1 mm. Cuando el espesor crece de 0,1 hasta 1 mm la resistencia disminuye rápidamente. Para capas desde 1 hasta 1,5 mm la resistencia disminuye más lentamente y, a partir de 1,5 mm, la resistencia permanece prácticamente constante. Por otro lado, los desplazamientos de la unión aumentan uniformemente a medida que crece el espesor de la capa de adhesivo.

Palabras clave Adhesivos. Poliuretano. Propiedades mecánicas. Espesor de adhesivos.

Thickness influence in mechanical properties of polyurethane adhesive overlap joints

Abstract The thickness of adhesive layers in metallic bonded joints has direct influence in the performance and mechanical behaviour of these joints. The aim of this study was to analyse the strength and strain properties of steel overlap joints bonded with polyurethane adhesive layers with different thickness. The results show that the strength is maximum when the thickness of the adhesive layer is very thin, 0.1 mm. When the thickness growth to 1 mm the strength goes down rapidly. For layers from 1 to 1.5 mm the strength goes down slower and from 1.5 to 4 mm the strength is nearly constant. In other hand, the joint strain increase uniformly with adhesive layer thickness growth.

Keywords Adhesive. Polyurethane. Mechanical properties. Adhesive thickness.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, aumenta progresivamente la utilización de adhesivos como medio de unión de materiales. El desarrollo de esta técnica de unión va unido al avance en el conocimiento de la influencia de los factores que intervienen en los procesos de adhesión. Entre los factores a tener en cuenta en el diseño de la unión, se encuentran el tipo de adhesivo, espesor del mismo, tipo de materiales a unir y acabado superficial, espesor de los sustratos, y formas de aplicación de las sollicitaciones.

El espesor del adhesivo utilizado tiene una influencia determinante en la resistencia de la unión. Una capa delgada de adhesivo en una

unión, proporciona una mayor resistencia, tanto a tracción como a cortadura, que el mismo adhesivo aplicado en una capa gruesa^[1]. McBain^[1] realizó experimentos con adhesivos de sellado utilizando como adherentes níquel y aluminio. El hecho experimental de un aumento de la resistencia de la unión con la disminución de los espesores de la capa de adhesivo está de acuerdo con las deducciones teóricas acerca de las fuerzas de adhesión. Si se considera la fórmula de Stefan^[1] para la fuerza de separación de dos superficies, entre las cuales hay una capa de líquido (adhesivo), se puede deducir que la fuerza de separación, F , es inversamente proporcional al cuadrado del espesor de la capa de líquido. También, según las deducciones de Healy^[1]

(*) Trabajo recibido el día 30 de marzo de 2004 y aceptado en su forma final el día 11 de noviembre de 2004.

(*) Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales. ETSI Industriales. Universidad Politécnica de Madrid. c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

(**) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM). CSIC. Av. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid.

para un volumen de líquido entre superficies paralelas, existe una fuerza de separación, F , que disminuye en función de D^4 , siendo D el espesor de la capa de líquido; y, finalmente, la fuerza de separación para un adhesivo, considerado como un fluido no newtoniano entre superficies paralelas, muestra una fuerza de separación inversamente proporcional al espesor de la capa de líquido elevado a $5/2$.

H. M. Budgett^[2] investigó el comportamiento de capas de líquidos extremadamente delgadas, usando superficies pulidas. Comprobó la resistencia de las superficies, unidas por presión y muy limpias, frente a la obtenida con las superficies cubiertas con una capa de vapor de agua condensado y con capas de aceites. El resultado fue que, con la superficie limpia la fuerza de separación era muy débil mientras que con capas delgadas de dichos fluidos la resistencia de la unión era mucho mayor y esta resistencia iba disminuyendo a medida que el espesor de las capas de líquidos aumentaban. En todos los casos, la rotura tenía lugar por la capa de líquido y nunca por la interfase líquido-sólido. Además, demostró que la influencia de la tensión superficial del líquido sobre la resistencia de la unión era muy pequeña; por tanto, la resistencia es debida a las fuerzas de cohesión del líquido. El estudio de estos experimentos con superficies pulidas con acabado de alta precisión ha sido objeto de muchas discusiones teóricas, con respecto a la atracción polar de las moléculas.

El estudio de uniones adhesivas en madera ha demostrado que la película de adhesivo debe ser muy delgada para conseguir uniones fuertes. J.W. Maxwell^[3] investigó la influencia de los espesores de adhesivo sobre la tensión cortante en uniones de madera, empleando adhesivos de resinas. Demostró que las mayores resistencias se obtienen con las capas más delgadas, disminuyendo rápidamente hasta un punto donde el espesor de la película se aproxima a 80 micras, y para espesores mayores la resistencia de la unión permanece relativamente constante.

McBain y Lee^[4] sugirieron que la mayor resistencia de las uniones delgadas, era debida al largo alcance de las fuerzas moleculares que tienen lugar entre los metales y el interior de la película de adhesivo. Pero, posteriormente, otras investigaciones, por ejemplo, R. Bulkley^[5], J.E. Lennard Jones^[6] y F.P. Bowden^[7] demostraron que esto no es cierto, porque las fuerzas de atracción entre las superficies y las capas intermedias no alcanzan distancias mayores que el de una capa monomolecu-

lar del fluido, es decir, que pueden considerarse en valores aproximados al de las fuerzas superficiales.

J.J. Bikerman^[8] propone que el aumento de resistencia de las capas delgadas, se debe a dos causas. La primera, que supone $2/3$ del aumento, es la disminución de defectos en las capas delgadas, y el tercio restante lo justifica por las diferencias de cristalización entre las capas delgadas y gruesas. La primera razón queda justificada por el hecho conocido de que la resistencia de una varilla o de una fibra depende de la longitud de la misma; las fibras más cortas dan mayor resistencia, dado que las fibras largas tienen más defectos que las cortas y estos defectos son los que dan origen a la rotura de los sólidos bajo tensiones, produciéndose la rotura por el punto más débil. F.T. Peirce^[9] demuestra con cálculos teóricos y contrasta con experimentos que, al disminuir el tamaño de la fibra aumenta su resistencia. La segunda causa, motivada por las diferencias en la cristalización de las capas de diferentes espesores, no está demostrada, por lo que otros autores explican que existen otros factores que también influyen en la resistencia de la unión. En especial, tienen una influencia muy marcada los parámetros operacionales de ejecución de las uniones, como señala J. Durán^[10] ya sea para adhesivos rígidos o flexibles.

Las investigaciones de Poletika^[11] realizadas con uniones de madera aglomerada demuestran que hay proporcionalidad inversa entre la tensión de rotura y el espesor de adhesivo en los espesores estudiados.

En este trabajo se estudia la influencia que tiene el espesor de un adhesivo de comportamiento flexible de poliuretano, donde se ha analizado la tensión cortante y el desplazamiento hasta rotura. Esta influencia se ha estudiado de forma práctica, realizando ensayos de cortadura de uniones a solape, con chapa de acero S235, de acuerdo con las condiciones del ensayo de la Norma UNE-EN 1465.

Es previsible que el comportamiento de este adhesivo sea similar en todos los considerados flexibles, pero no en los rígidos, debido a las diferencias que se producen en la forma de rotura.

2. MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL

Los ensayos se han realizado utilizando chapa de acero al carbono S235 de 1,5 mm de espesor. El adhesivo utilizado ha sido un poliuretano mono-componente que endurece con la humedad (Körapur 140), suministrado por Kömmerling, con un

tiempo de endurecimiento de 24 h para espesores hasta 3 mm.

Los pasos seguidos en la preparación y ensayo de las probetas han sido los siguientes:

- Preparación de chapas de dimensiones $100 \times 25 \times 1,5$ mm con la superficie exterior decapada.
- Unión de las chapas con una longitud de solape de 12,5 mm y una gama de espesores de adhesivo que va desde 0,1 mm hasta 3,8 mm. La unión se realiza limpiando, primeramente, las superficies a unir con acetona; después, recubriendo las mismas con un acondicionador superficial; y, al cabo de 20 min, de espera para que tenga lugar la reacción del acondicionador, se dosifica el adhesivo y se unen las chapas.
- Tiempo de espera para el curado del adhesivo que ha sido variable desde 7 d para los espesores delgados hasta 21 d para los más gruesos.
- Realización del ensayo de tracción, según las instrucciones de la norma UNE-EN 1465.
- Para obtener los diferentes espesores de adhesivo en la unión se utilizó la técnica siguiente:
 - 0,1 mm: se obtienen presionando el adhesivo entre ambas chapas, con una fuerza de 20 N durante el tiempo de curado del adhesivo.
 - 0,2 mm: se obtienen presionando el adhesivo entre ambas chapas, con una fuerza de 10 N, durante el tiempo de curado del adhesivo.
 - 0,3 mm: se obtienen presionando el adhesivo entre ambas chapas, manualmente durante un instante y dejando curar sin presión.
 - Superiores a 0,3 mm: se obtienen colocando los suplementos adecuados entre las chapas para cada espesor, evitando el movimiento de las chapas aplicando una fuerza de 10 N.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las tensiones máximas de cortadura (fuerza máxima en el ensayo de cortadura, dividida por área de pegado), necesarias para producir la rotura del material se recogen en la figura 1, donde se relacionan las tensiones máximas a cortadura que soporta la unión con el espesor de adhesivo utilizado. Se ha seleccionado una probeta representativa de las curvas tensión-desplazamiento de cada grupo de espesores de adhesivos de los estudiados; en las figuras 2 y 3 se muestran los diagramas obtenidos. En la figura 2 se representan las tensiones

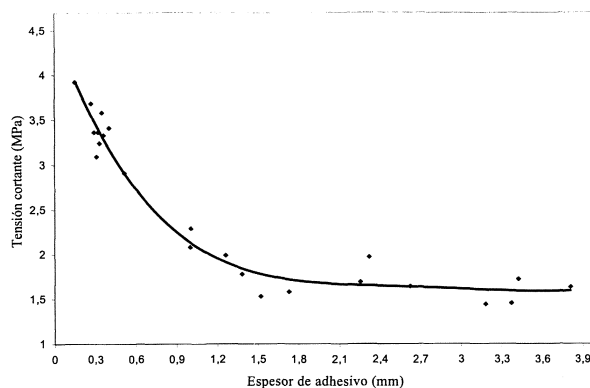


Figura 1. Tensión de rotura de uniones a solape en función del espesor del adhesivo.

Figure 1. Ultimate strength of overlap joints vs. adhesive thickness.

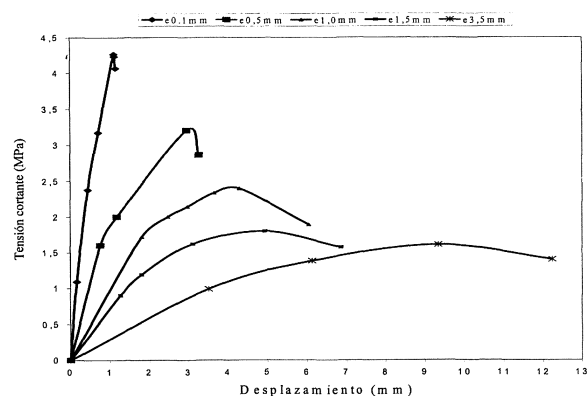


Figura 2. Curvas tensión-desplazamiento para probetas con diferente espesor de adhesivo.

Figure 2. Strength-elongation curves for samples with different adhesive thickness.

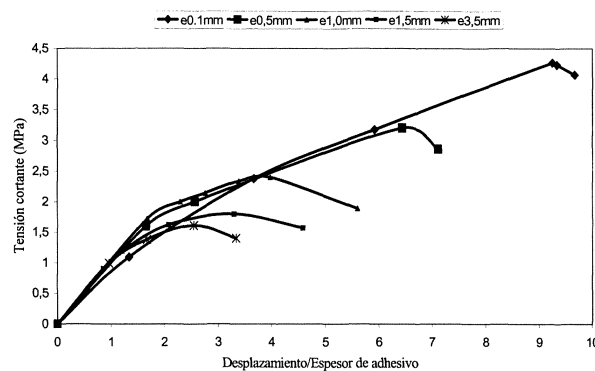


Figura 3. Curvas tensión-desplazamiento/espesor de adhesivo, para probetas con diferente espesor de adhesivo.

Figure 3. Strength-elongation curves/adhesive thickness for samples with different adhesive thickness.

referidas a los desplazamientos obtenidos durante el ensayo de las uniones y, en la figura 3, se representan los mismos resultados en función de los desplazamientos para los diferentes espesores de adhesivo. En las tres figuras se puede apreciar cómo la tensión máxima alcanzada es mayor cuanto menor es el espesor del adhesivo.

En la figura 4 se muestran los desplazamientos obtenidos en el momento en que se alcanza la tensión máxima, también para los diferentes espesores utilizados, donde puede apreciarse cómo el desplazamiento aumenta sensiblemente a medida que aumenta el espesor de adhesivo. En la figura 5 se representan el desplazamiento en el momento en que se alcanza la tensión máxima y la energía absorbida por la probeta, también en el momento de

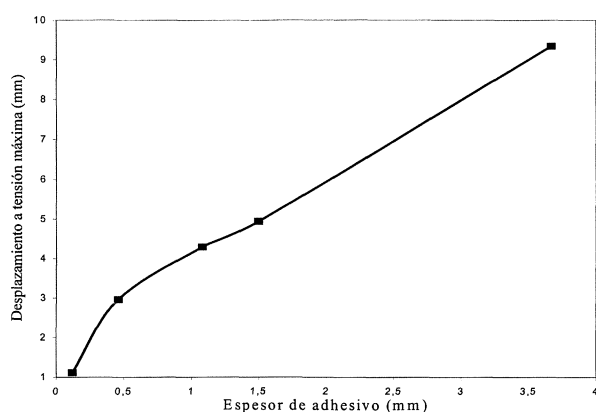


Figura 4. Desplazamiento al alcanzar la tensión máxima en función del espesor de adhesivo.

Figure 4. Elongation at ultimate strength vs. adhesive thickness.

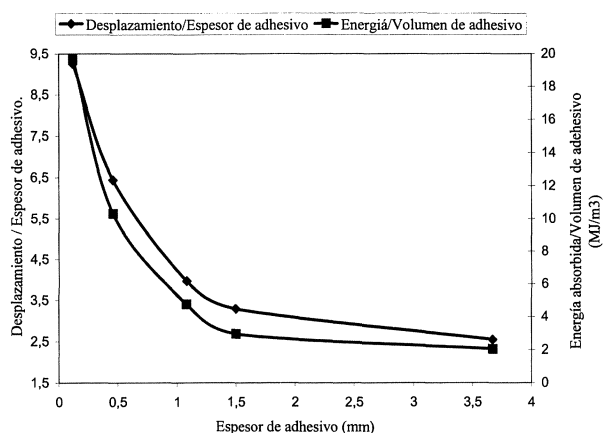


Figura 5. Desplazamiento y energía absorbida al alcanzar la tensión máxima en función del espesor de adhesivo.

Figure 5. Elongation and absorbed energy at ultimate strength vs. adhesive thickness.

alcanzar la tensión máxima; la primera, en función al espesor de adhesivo de la muestra y, la segunda, en función del volumen de adhesivo. La energía se ha calculado dividiendo el área de la curva tensión-desplazamiento por el espesor de adhesivo.

4. DISCUSIÓN

Las capas delgadas de adhesivo tienen restringido su desplazamiento, porque se encuentran embridadas entre las dos superficies de los adherentes a unir. El movimiento entre tales capas está dificultado de manera que, la deformación y rotura final tienen lugar por una sección transversal igual a la original. Por eso, la tensión que pueden soportar antes de romperse, es mayor que si la sección pudiera deformarse con toda libertad.

M. Zschokke y R. Montandon^[12] justifican el aumento de resistencia de las capas delgadas por la mayor restricción de los desplazamientos producidos por el efecto de las tensiones. Si una pieza de material que admite deformación plástica se somete a un esfuerzo exterior, por ejemplo de tracción unidireccional, su sección transversal empieza a disminuir por el punto más débil, hasta que rompe. Esto lo hace con una sección mucho menor que la inicial.

A.L. Kalamkarov^[13], mediante análisis teórico de tensiones realizado en uniones solapadas con adhesivos elásticos, obtiene que las tensiones cortantes máximas aumentan al disminuir el espesor del adhesivo. Señala también, que en uniones solapadas a muy pequeños espesores las propiedades mecánicas del adhesivo van adquiriendo menor influencia en las propiedades finales. Se pone nuevamente de manifiesto el efecto de película delgada.

Otra razón para el aumento de resistencia en las uniones delgadas la dan los autores N.A. De Bruyne y R. Houwink^[1]. Dentro de una unión adhesiva existen unas tensiones internas que son debidas a contracciones y expansiones causadas por variaciones de humedad, reacciones químicas durante el fraguado, variaciones térmicas, diferencias entre las dilataciones térmicas del adherente y del adhesivo, faltas de adhesivo, hinchamiento de adhesivo, etc. Estas tensiones internas son proporcionales a los espesores de la capa de adhesivo. Si estas contracciones se impiden, dan lugar a unas tensiones internas en el material. La restricción se ejerce por la adhesión a la superficie. Una capa delgada de adhesivo se contrae o expande menos que una gruesa, por eso las fuerzas ejercidas por la

capa delgada son menores que las ejercidas por la capa gruesa. De esta forma la adhesión será puesta en peligro, mucho más por tales expansiones o contracciones en una capa gruesa que en una delgada.

La menor resistencia de los espesores grandes de adhesivo se debe, adicionalmente, al tipo de ensayo, a la utilización de un adhesivo flexible y a la no alineación de las fuerzas en el ensayo (más separadas cuanto mayor es el espesor). Debido a estas condiciones se genera un par de fuerzas (mayor cuanto mayor es el espesor de adhesivo) que hace trabajar a la unión, además de, a cortadura, a pelado (cuanto mayor es el par, mayor es la tensión de pelado). Es conocido que la resistencia de una unión adhesiva es inferior a pelado que a cortadura, por tanto, cuanto mayor es el espesor de la capa de adhesivo mayor es la tensión de pelado y el fallo ocurre por pelado antes que por cortadura.

En concordancia con todo lo anterior se comprueba que, en cuanto a los valores de resistencia a cortadura (Fig. 1), los espesores delgados de adhesivo proporcionan mayor resistencia a la unión que los espesores más gruesos. La resistencia decae bruscamente, desde los espesores más pequeños (0,1 mm) con 4,2 MPa hasta, aproximadamente, 1 mm con 2,1 MPa. Entre espesores de 1 a 4 mm, la resistencia disminuye lentamente, hasta llegar a 1,6 MPa.

La rotura ocurre en todas las probetas tras alcanzar la carga máxima (Fig. 2). Cuanto mayor es el espesor de adhesivo mayor es el desplazamiento total después de alcanzar la carga máxima y antes de llegar a rotura, lo cual se debe a que hay más cantidad de adhesivo.

Destaca que, con espesores de adhesivo de 0.1 mm, apenas se consiga 1 mm de desplazamiento total en la unión, mientras que con 1mm puedan obtenerse desplazamientos de 6 mm. El criterio de diseño de la unión en la disyuntiva resistencia-desplazamiento es criterio básico en la consideración de las diferentes aplicaciones industriales de los adhesivos.

Si se tienen en cuenta los desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo utilizado, (Fig. 3) se observa que todas las probetas siguen curvas muy parecidas hasta el momento de su rotura y, además, que los desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo son mayores cuanto mayor es la resistencia total de la unión, es decir, el desplazamiento con respecto al espesor de adhesivo es mayor en las uniones delgadas y va disminuyendo progresivamente con la disminución de tensiones

a medida que aumenta el espesor de adhesivo. Esto, justifica a su vez que las uniones gruesas no rompen, únicamente, por un estado tensional interno a cortadura (ya que si rompieran por el mismo estado tensional que las delgadas, deberían aguantar al menos igual tensión e igual desplazamiento con respecto al espesor de adhesivo), sino que rompen por la combinación de tensiones de cortadura y pelado en concordancia con lo expuesto anteriormente.

Todas las curvas de la figura 3, están formadas por dos tramos diferentes antes de alcanzar la carga máxima: un primer tramo lineal (módulo elástico grande y constante), que termina en un valor aproximado de 1,8 MPa para las probetas que superan holgadamente este valor en su tensión máxima (probetas con espesores de adhesivo inferiores a 1,5 mm), en el que el adhesivo se encuentra en buen estado; un segundo tramo, de menor pendiente (módulo elástico menor que el del primer tramo), donde la disminución de la pendiente tiene lugar porque el adhesivo empieza a deteriorarse internamente, lo cual se aprecia en el examen de las superficies de fractura de las probetas porque aparecen fisuras en la zona de unión con el sustrato. Finalizando este tramo, se obtiene la carga máxima, después de la cual aparece la rotura.

Los desplazamientos totales antes de alcanzar la tensión máxima (Fig. 4) son mayores cuanto mayor es el espesor de adhesivo, debido a que una capa gruesa de adhesivo permite mayor alargamiento que una delgada. Para pequeños espesores, de 0,1 mm, los desplazamientos que permiten son muy reducidos, del orden de 0,5 mm, aumentando mucho con el aumento de espesor. De 0,5 mm en adelante, los desplazamientos, aunque aumentan de forma continua con el espesor, lo hacen más moderadamente a medida que este aumenta. La causa puede justificarse considerando que la influencia de la restricción que produce la adhesión superficial es menor cuanto mayor es el espesor y, para determinados espesores suficientemente grandes, su influencia tiende a ser nula. Sin embargo, aunque los desplazamientos totales son cada vez mayores, resulta que los desplazamientos referidos al espesor de adhesivo son cada vez menores, a medida que aumenta el espesor de adhesivo de la unión (Fig. 5). Esta disminución es muy significativa a partir de 0,1 mm y puede considerarse estable a partir de 1,5 mm de espesor de adhesivo. Esta disminución del desplazamiento con respecto al espesor de adhesivo se justifica porque en los espesores grandes predomina el estado tensional a pelado,

que no provoca desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo en la dirección de las fuerzas, siendo además la resistencia de la unión a este tipo de esfuerzos sensiblemente menor.

Por la misma causa anterior, se comprueba que la energía absorbida en función del volumen de adhesivo, necesaria para llevar la unión a su carga máxima (Fig. 5), es, en todos los casos, proporcional al desplazamiento necesario para llevar la unión a la carga máxima.

5. CONCLUSIONES

- La resistencia a cortadura de uniones a solape realizadas con adhesivos de poliuretano varía notablemente en función del espesor de adhesivo utilizado. Cuanto menor es el espesor del adhesivo mayor resistencia mecánica se obtiene, descendiendo esta a medida que aumenta el espesor.
- El efecto de capa delgada es muy destacado con espesores de adhesivo inferiores a 0,5 mm. A espesores superiores, al ser un adhesivo flexible, además de cortadura van aumentando las fuerzas de pelado, lo que hace que la resistencia del adhesivo vaya descendiendo de forma gradual.
- El fallo se ha producido en todos los casos por cohesión, lo que indica la obtención de una buena adhesión metal-adhesivo.
- El desplazamiento total a rotura presenta un comportamiento inverso al de resistencia máxima, obteniéndose mayores desplazamientos a mayor espesor del adhesivo. Sin embargo, los desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo presentan un comportamiento proporcional a la resistencia máxima, obteniéndose menores desplazamientos con respecto al espesor de adhesivo a mayor espesor de adhesivo.

- Es importante tener en cuenta en el diseño de uniones con adhesivos, la correlación observada entre resistencia y desplazamiento, dando prioridad en cada caso al parámetro más significativo. Este trabajo pretende ayudar a una correcta selección del espesor de adhesivo a utilizar. ●

AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Investigación del MCYT por la ayuda concedida para la realización del proyecto DPI2002-04007-CO2.

REFERENCIAS

- [1] N.A. DE BRUYNE y R. HOUWINK, *Adhesion and Adhesives*, Elsevier Publishing Company, New York, Amsterdam, London, Brusels, 1951, pp. 7-112.
- [2] H.M. BUDGETT, *Proc. Roy. Soc. A* 86 (1912) 25-26.
- [3] J.W. MAXWELL, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* 67 (1945) 104-105.
- [4] J.W. McBAIN y W.B. LEE, *J. Phys. Chem.* 32 (1928) 1.178-1.179.
- [5] R. BULKLEY, *J. Res. Nat. Bur. Stand.* 6 (1931) 89-93.
- [6] J.E. LENNARD-JONES y B.M. DENT, *Trans. Faraday Soc.* 24 (1928) 92-97.
- [7] F.P. BOWDEN, *Phys. Z. Sowjetunion* 4 (1933) 185-188.
- [8] J.J. BIKERMAN, *J. Soc. Chem. Ind.* 60 (1941) 23-29.
- [9] F.T. PEIRCE, *J. Text. Inst.* 17 (1926) T 355-T 360.
- [10] J. DURÁN, J.M. AMO, C.M. DURÁN, J. OÑORO y R. GARCÍA, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005).
- [11] N.V. POLETIKA, *Report Nr. W.E.* 170 M2, Research Laboratory Curtiss-Wright Corp. (1943) 3-5.
- [12] M. ZSCHOKKE y R. MONTANDON, *Schweiz. Arch. Angew. Wiss. Techn.* 10 (1944) 129-132.
- [13] A.L. KALAMKAROV, *Int. J. Mech. Sci.* 39 (1997) 873-883.