CIFIE 2010

LEYES COHESIVAS EN UNIONES ADHESIVAS: ENSAYO DE DESGARRO/PELADO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS ADHESIVAS DELGADAS

J.C. SUAREZ(1)*, S. MIGUEL(1) F. LOPEZ(1), M.A. HERREROS(1)

(1) Centro de Investigación en Seguridad y Durabilidad Estructural y de Materiales (CISDEM. UPM-CSIC). Grupo de Investigación en Materiales Híbridos. ETS Ingenieros Navales, Avda. Arco de la Victoria, s/n, 28040 Madrid, España.
*juancarlos.suarez@upm.es

ABSTRACT: To be able to predict the strength of adhesive joints accurately, correct material data of adhesives are essential. Hence, it is critical to develop reliable testing methods to obtain the constitutive behaviour of adhesive layers. In use, adhesives are constrained to thin layers. Thus, an adhesive constrained into a layer is expected to behave differently compared to the adhesive as a bulk material. Under loading, the size of the Failure Process Zone (FPZ) in the adhesive layer is often much larger than the thickness of the layer. Thus, the small scale FPZ condition is not fulfilled and the traditional Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) can not be applied. At the same time, experiments show that test specimens are prone to produce unstable crack propagation and combined adhesive/cohesive fracture patterns appear frequently, especially when mixed mode loading (peel and shear) is involved. Cohesive law should be taken as the basic fracture property for adhesives characterization; cohesive laws must be determined experimentally. The effects of loading rate and adhesive layer thickness on the cohesive law shape have to be investigated experimentally. The coupling of elasticity, adhesion and fracture make difficult interpretation of test results, especially if the adhesive is an elastomer, which has a failure strain of several hundred percents. A new test has been proposed, combining tearing of the adhesive layer and debonding from the substrate in a controlled way and using a simplified geometry. Results are closely related to the stiffness, work of fracture and adhesive energy of the adhesive system, all of them plying simultaneously an active role during the very same test.

Keywords: Adhesive, Tearing, Debonding, Cohesive law.

RESUMEN: Para poder predecir la resistencia de una unión adhesiva de manera precisa es necesario disponer de información adecuada sobre las propiedades mecánicas del adhesivo. Por tanto, es fundamental desarrollar métodos de ensayo fiables para determinar el comportamiento constitutivo de las capas adhesivas. En su uso más habitual, los adhesivos se disponen en películas delgadas. Un adhesivo trabajando en una película delgada se comporta de manera muy diferente de como lo haría el mismo adhesivo en masa. Cuando es cargado, el tamaño de la Zona de Proceso de Fallo (ZPF) en el adhesivo es frecuentemente de mayor tamaño que el espesor de la propia película adhesiva. Por tanto, la condición de una ZPF de pequeño tamaño no se cumple y, por consiguiente, no es aplicable la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal (MFEL). Al mismo tiempo, los experimentos demuestran que las probetas de ensayo tienen tendencia a producir propagación inestable de la grieta, dando lugar a la aparición frecuente de patrones de fallo combinados adhesivo/cohesivo, especialmente cuando la solicitación se realiza en modo mixto (pelado/cortadura). Las leyes de comportamiento cohesivo deben ser tomadas como las propiedades de fractura básicas para la caracterización del adhesivo; las leyes cohesivas han de ser obtenidas experimentalmente. Los efectos de la velocidad de solicitación y del espesor de la capa adhesiva sobre la forma de la ley cohesiva pueden ser investigados de forma experimental. El acoplamiento de los fenómenos de elasticidad, adhesión y fractura hace difícil la interpretación de los resultados de los ensayos, especialmente si el adhesivo es un elastómero, que tiene una deformación de varios cientos por ciento antes de fallar. Un nuevo ensayo, que combina el desgarro del adhesivo y el pelado de la película de su substrato, hace uso de la simplicidad de la geometría para aplicar una metodología de análisis de resultados que desacopla los tres fenómenos. Los valores obtenidos permiten elucidar la rigidez, el trabajo de fractura y la energía adhesiva del sistema adhesivo, que juegan un papel fundamental de manera concurrente durante el ensayo.

Palabras clave: Adhesivo, Desgarro, Despegado, Ley cohesiva.

1. INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales y estrategias biológicas como herramientas para el diseño de materiales innovadores es de la máxima actualidad [1]. Los numerosos ejemplos muestran, sin lugar a dudas, las posibilidades que nos ofrece la Naturaleza para obtener combinaciones de propiedades aún no logradas por la tecnología humana. Una de ellas sería la obtención de materiales ligeros capaces de disipar energía de manera eficiente en relación a su densidad y, concurrentemente, poseer una notable tolerancia al daño de manera que mantengan una cierta resistencia residual tras un impacto. Se abre, asimismo, toda una línea de trabajo en el sentido de buscar otros materiales bioinspirados, con diversas propiedades mejoradas respecto a las disponibles actualmente, y basados en el aprovechamiento de las posibilidades que ofrece la combinación de materiales orgánicos e inorgánicos para formar materiales híbridos, con estructuras altamente jerarquizadas.

En este sentido, podemos recibir ayuda de la propia Naturaleza: la mayoría de los materiales biológicos tenaces presentan una capacidad de absorción de energía muy notable, basada en mecanismos de reforzamiento que funcionan en diferentes escalas espaciales. Las propiedades de algunos de estos materiales, tales como las conchas de ciertos moluscos, los exoesqueletos de algunos insectos, la madera de diversas especies vegetales, son ejemplos de las excepcionales prestaciones que ha logrado la Naturaleza tras millones de años de evolución.

Algunos de los mecanismos que los materiales biológicos y los materiales bioinspirados ponen en funcionamiento para disipar energía e incrementar la tenacidad a fractura son:

1. Rotura de enlaces de sacrificio “débiles” de los componentes macromoleculares.
2. Extensión, extracción o formación de un ligamento en un componente macromolecular en la intercara, formando un puente entre dos componentes estructurales.
3. Formación de huecos que conducen a una deformación plástica extendida; enromamiento del vértice de grieta; bifurcación.
4. Deformación plástica localizada delante del vértice de grieta.
5. Microagrietamiento.
6. Transformación de fase en las inmediaciones del vértice de grieta.
7. Disipación viscoelástica.
8. Interacción de las microrrugosidades y bloqueo mecánico que provocan una deformación inelástica.

Un adhesivo trabajando en una película delgada se comporta de manera muy diferente de como lo haría el mismo adhesivo en masa. Las leyes de comportamiento cohesivo fueron introducidas por Dugdale y Barenblatt para describir el comportamiento mecánico tensión-separación en la Zona de Proceso de Fallo (ZPF), es decir, allí donde tienen lugar los fenómenos (deformación y dañado) que llevan finalmente al material a romper. El concepto de ley de comportamiento cohesivo, desarrollada inicialmente para sólidos en masa, ha sido extendido con éxito a la situación particular de las uniones adhesivas, donde el material está dispuesto en una película delgada [2]. La Figura 1 muestra un ejemplo de ley cohesiva para un adhesivo elastomérico.

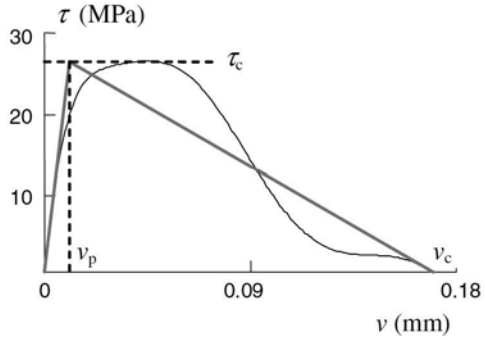


Fig. 1. Ley cohesiva para un adhesivo elastomérico solicitado a cortadura. Curva real de comportamiento, determinada experimentalmente, y triángulo que recoge de manera simplificada la forma de la ley cohesiva, más adecuado para su uso en modelos de elementos finitos.

En un adhesivo, se define la ZPF de manera que se incluya el volumen donde tienen lugar las deformaciones elásticas no lineales y la zona de descohesión, dentro de la cual se produce el despegado del substrato. Con el objeto de determinar la ley de comportamiento cohesivo de un adhesivo, puede resultar tentador el empleo de una probeta de ensayo con una unión adhesiva entre dos adherentes colocados a tope y sin introducir ninguna pregrieta. Sin embargo, los experimentos muestran que este tipo de probeta de ensayo tiende a ser muy inestable. La parte de ablandamiento en la relación constitutiva, que contribuye de manera substancial a la energía de fractura, no llega a ser capturada plenamente durante los experimentos con dicha geometría de ensayo. Existen otros procedimientos de ensayo y probetas con distintas geometrías que han sido desarrolladas para evaluar las propiedades a fractura de los adhesivos. Sin embargo, la mayoría de ellos se basan en el supuesto de que es aplicable la Mecánica de la Fractura Elástica y Lineal (MFEL) y suelen considerar despreciable la flexibilidad de la propia capa de adhesivo [3].

Sin embargo, existen dificultades con la mayoría de los ensayos estándar para uniones adhesivas. Diferentes autores se han ocupado del problema de lugar de iniciación del fallo y de la estabilidad direccional de las grietas en las uniones adhesivas. Se han desarrollado varios criterios [4] de acuerdo a los cuales una grieta en un adhesivo puede ser dirigida a diferentes lugares dentro de la unión dependiendo del grado de mixicidad –relación entre los modos de pelado y cortadura- de la solicitación en el vértice de grieta. En consecuencia, pueden tener lugar distintos tipos de fallo en la unión adhesiva (adhesivo, cohesivo, mixto, alternante) y no necesariamente se inician en el lugar más débil dentro del material. La tensión-T juega un papel importante en la estabilidad direccional durante la propagación de las grietas. La grieta es direccionalmente estable si la tensión-T es negativa, mientras que resulta ser inestable si la tensión-T es positiva. La flexión del adherente modifica el valor de la tensión-T y supone una influencia no despreciable del espesor de los adherentes sobre la estabilidad direccional de la grietas propagándose en una unión adhesiva.

Incluso para las geometrías más sencillas de las probetas de ensayo, la tasa de liberación de energía de deformación y/o la integral-J incluyen contribuciones no claramente definidas de distintos mecanismos de disipación (fractura del adhesivo, despegado interfacial, efectos viscoelásticos en el polímero, etc.) A partir de la información determinada experimentalmente, es generalmente difícil obtener propiedades que estén únicamente vinculadas con un proceso de disipación de energía y, por tanto, es complicado caracterizarlo y obtener valores críticos. La extrapolación de los resultados a uniones reales es, por consiguiente, inabordable bajo estas condiciones, lo cual redunda negativamente en la posibilidad de modelizar adecuadamente la unión adhesiva mediante técnicas numéricas.

2. ENSAYO DE DESGARRO-PELADO

Se ha propuesto un nuevo ensayo que combina el desgarro de la capa de adhesivo con el despegado del mismo de un substrato de forma controlada empleando una geometría simplificada [5]. Los valores obtenidos permiten elucidar la rigidez, el trabajo de fractura y la energía adhesiva del sistema adhesivo, que juegan un papel fundamental de manera concurrente durante el ensayo.

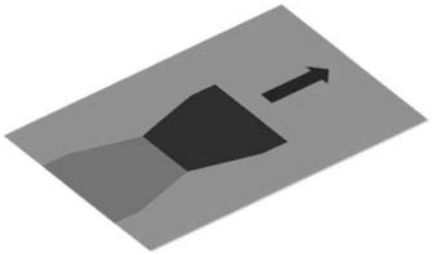


Fig. 2. Geometría simplificada del ensayo de desgarro-pelado.

Al intentar utilizar cinta adhesiva todos hemos experimentado alguna vez que después de rasgar con la uña y tirar del extremo de la cinta, ésta se va estrechando, quedándonos al final un trozo más corto que el que hubiéramos deseado. Dificultades similares se pueden experimentar cuando intentamos quitar el empapelado de una pared o la etiqueta adherida a un embalaje. El desgarro aparentemente incontrolado está tomando de hecho un camino controlado por las leyes físicas. El fenómeno de elasticidad de capas delgadas de adhesivo se acopla con los fenómenos de adhesión y fractura para producir formas distintas que caracterizan el proceso de desgarro. El estudio teórico y experimental que tiene en cuenta el acoplamiento de elasticidad, adhesión y fractura, en una geometría simplificada muestra un camino prometedor que clarifique el papel específico de cada mecanismo de disipación de energía, Figura 2. En nuestro trabajo adherimos láminas elásticas delgadas a la superficie plana de un adherente y hacemos dos cortes en uno de sus bordes, formando una especie de tira rectangular, a continuación se tira de ella a velocidad constante. Las dos direcciones de las zonas rotas inicialmente son paralelas, pero al continuar la propagación, ambas se desvían hacia el interior a la vez que la lámina progresivamente se va despegando. Finalmente, las dos direcciones de la rotura convergen en un punto y la tira se separa completamente, dejando una zona despegada de forma triangular con un ángulo bien definido en el vértice.

En la Figura 3 se muestran los perfiles de tres desgarros tipo en los que sólo se ha variado la anchura de la zona inicial a desgarrar (distancia entre los dos cortes iniciales). Los lados desgarrados son rectos y forman el mismo ángulo (θ) con el eje de simetría, independientemente de la anchura de la zona inicial desgarrada.

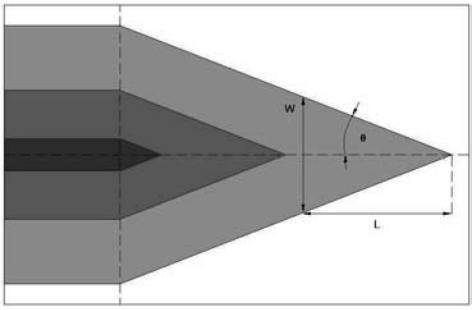


Fig. 3. Perfiles de tres desgarros tipo en los que sólo se ha variado la anchura de la zona inicial a desgarrar.

Siguiendo la teoría de Griffith sobre fractura se ha propuesto un mecanismo basado en la elasticidad para explicar las formas del desgarro que se obtienen experimentalmente [6]. La fuerza de pelado deforma la superficie de la lámina y almacena energía elástica en la doblez. Esta energía se puede relajar de dos maneras: reduciendo la curvatura (avance de la rotura en la dirección de aplicación de la carga), o bien reduciendo el tamaño del pliegue (desvío hacia el interior de las dos direcciones de rotura. La dirección real es una combinación de ambos efectos, pero siempre conduce a un estrechamiento de la banda desgarrada.

La energía total del sistema que cuantifica el mecanismo antes explicado es

$$U = U_E + 2\gamma ts + \tau A \qquad (1)$$

U es la energía total del sistema, U_E es la energía elástica, $2\gamma ts$ es la energía de fractura, y τA es la energía de adhesión. El factor 2 en el término de energía de fractura tiene en cuenta que se están propagando dos grietas por la película. La energía de fractura, γ, siempre se expresa en la combinación γt, y este parámetro que tiene dimensiones de fuerza nos referimos a él como "fuerza de fractura". Asumiendo que el final de la grieta forma siempre un ángulo de 180º con el plano de referencia definido por la pared del sólido, concluimos que la energía elástica es función únicamente del desplazamiento del borde, x, y de la longitud de la zona despegada, l. El exceso de longitud 2l - x es el que está en el pliegue, cerca de la línea de despegue (Figura 4), así que es de esperar que las energía elástica sea una función del desplazamiento del borde en esta combinación.

$$U_E = U_E\left(2l - x, W\right) \qquad (2)$$

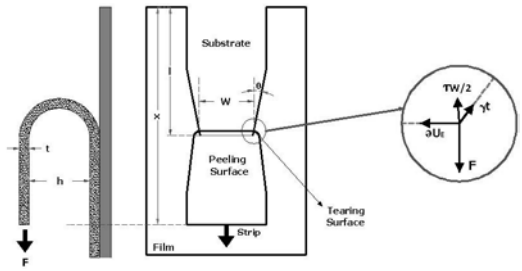


Fig. 4. Pliegue de la lámina de adhesivo cerca de la línea de despegue.

El frente de la grieta avanza hasta una posición que hace mínima la energía total. En un ensayo a velocidad de desplazamiento constante, el frente de la grieta avanza hasta una posición que hace mínima la energía total lo cual implica que la variación de energía respecto al camino recorrido es cero.

$$\frac{\partial U}{\partial s} = 0$$
$$\delta U = \left(\partial_W U_E\right)_{x,l} \delta W + \left(\partial_l U_E\right)_{x,W} \delta l + \ldots \quad (3)$$
$$\ldots 2\gamma t \delta s + \tau W \delta l$$

La fuerza viene dada por el teorema del trabajo como

$$F = \left(\partial_x U_E\right)_{W,l} \quad (4)$$

Esta ecuación combinada con la dependencia específica de la energía elástica de los parámetros geométricos conduce al mínimo de energía.

$$0 = -2\left(\partial_W U_E\right)\sin\theta - 2F\cos\theta + 2\gamma t + \tau W \cos\theta \quad (5)$$
$$\sin\theta = -\delta W / 2\delta s \qquad \cos\theta = \delta l / \delta s$$

Para encontrar el camino de fractura, se requiere que el desgarre siga la dirección donde la fuerza mínima sea necesaria para el avance de la grieta. Una derivada implícita de la ecuación (3) da la condición equivalente normalmente referida como criterio de máxima energía relajada.

$$\partial_\theta\left(\delta U / \delta s\right) = 0$$
$$0 = -2\left(\partial_W U_E\right)_{x,l} \cos\theta + 2F\sin\theta - \tau W \sin\theta \quad (6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) tienen una clara interpretación en términos de equilibrio estático de fuerzas en el plano. Estas fuerzas, que actúan en la mitad de la tira son: la fuerza de fractura (γt) que se opone a la propagación de la grieta, la fuerza aplicada F opuesta a la disipación de energía de adhesión τW/, y el lateral gradiente de energía elástica $\delta_W U_E$.

Las fuerzas proyectadas en las direcciones vertical y horizontal proporcionan las ecuaciones equivalentes

$$F = \tau\frac{W}{2} + \gamma t\cos\theta \quad (7)$$

$$\left(\partial_W U_E\right)_{x,l} = \gamma t \sin\theta \quad (8)$$

La fuerza aplicada está equilibrada por dos fuerzas: la fuerza de adhesión del adhesivo al substrato y la fuerza de fractura del propio adhesivo. Esto predice que la fuerza decrece proporcionalmente con la anchura de la grieta y tiene un valor finito ($\gamma t cos\theta$) cuando la anchura tiende a cero. Esto implica que cerca del vértice de grieta las fuerzas de adhesión son despreciables y la fuerza de fractura es el único obstáculo que se opone al desgarre.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para comprobar experimentalmente las ecuaciones (7) y (8) se ha utilizado adhesivo en película de varios espesores utilizado como filtro polarizador de ventana. Estos materiales son frágiles: fáciles de rasgar y en fractura dejan detrás bordes de grieta planos. Aunque la fuerza de fractura es diferente para cada película, la energía de adhesión es el parámetro que se puede variar más fácilmente de forma sistemática. Esto se puede realizar de dos formas: utilizando diferentes velocidades de pelado o bien utilizando substratos diferentes.



Fig. 5. Dispositivo experimental.

El adhesivo comercial en película utilizado en el ensayo fue el 3M Prestige 70 film, de espesores 23-38 μm. La película de adhesivo se adhirió a substratos planos de vidrio, acero y acero inoxidable, procediendo a continuación a cortar y separar bandas paralelas de 2-6 cm de ancho y de longitud variable, empezando por el borde de la película. Para tener en cuenta los efectos anisótropos se han ensayado muestras de la película de adhesivo en dos direcciones perpendiculares. Se solicitaron a continuación las tiras de película de adhesivo mediante una máquina de ensayos de forma uniforme en toda la serie de experimentos, a velocidades en un intervalo de 80 a 2 mm/min. En la Figura 6 se muestra un registro carga-desplazamiento típico.

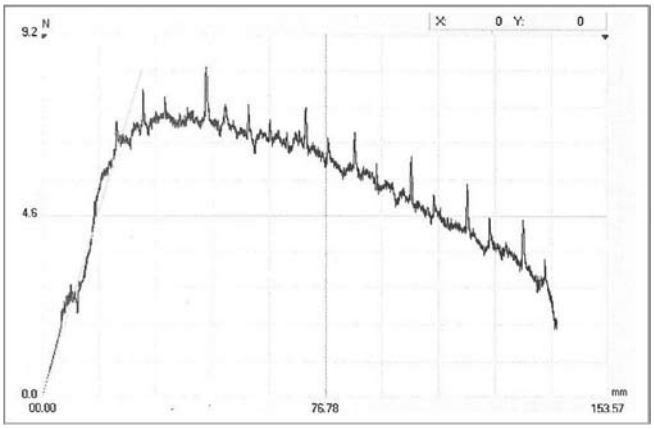


Fig. 6. Registro carga- desplazamiento típico en un ensayo de desgarro/pelado.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La relación entre la energía de adhesión y la velocidad de pelado, $\tau = \tau(v)$, no está completamente comprendida aunque se ha estudiado profusamente en los últimos años [7-9]. Como se muestra en la Figura 7, al aumentar la velocidad de pelado, la energía de adhesión aumenta y la longitud desgarrada se hace más corta.

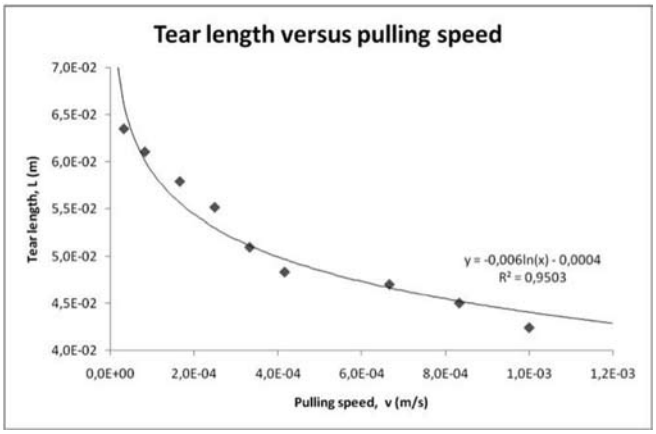


Fig. 7. Longitud desgarrada frente a velocidad de pelado en un ensayo de desgarro/pelado.

En la Figura 8 se representa la fuerza de pelado, F, en función del ancho de banda, W, para un número de experimentos en los que se ha variado la velocidad de pelado. Como predice la ecuación (7) se observa una disminución lineal de la fuerza con la anchura del desgarro. Las líneas rectas que unen cada juego de datos tienen aproximadamente la misma ordenada en el origen. Esta circunstancia es coherente con la ecuación (7), y de esta forma la ordenada en el origen obtenida nos proporciona una estimación de la fuerza de rotura. El valor de la fuerza de rotura obtenido de esta forma es coherente con el medido directamente de la fuerza necesaria para empezar a rasgar por pelado una banda rectangular cuando la película de adhesivo no está adherida a un substrato pero sí sujeta por sus extremos (ASTM D1938-06) [10].

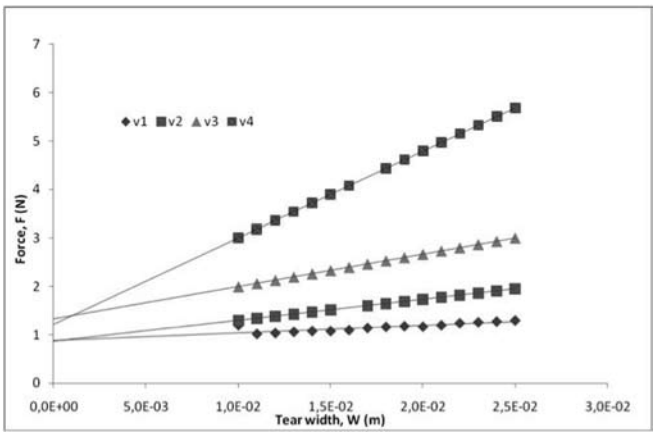


Fig. 8. Fuerza de pelado frente al ancho de banda para ensayos a diferentes velocidades.

La ordenada en el origen de la Figura 8 es sólo una estimación de la fuerza de fractura ya que las líneas rectas cortan al eje de ordenadas a $F = \gamma t \cos\theta$. Así, la ordenada en el origen también depende del ángulo de desgarro θ. Para obtener una estimación mejor de la fuerza de rotura, obtenemos la energía de adhesión de las pendientes en la Figura 8 y representamos los datos utilizando la ecuación modificada:

$$\frac{F}{\cos\theta} = \frac{\tau W}{2\cos\theta} + \gamma t \qquad (9)$$

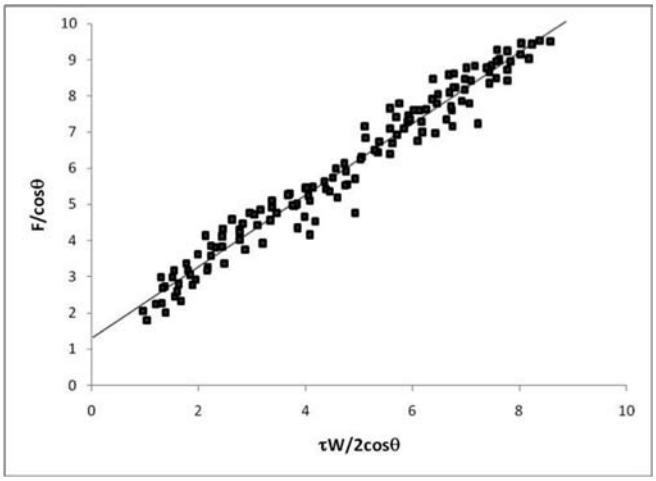


Fig. 9. Estimación de la fuerza de fractura en un ensayo de desgarro/pelado.

Como cabe esperar, la pendiente para el mejor ajuste es ≈1. Volvamos a la ecuación (8). Necesitamos conocer la expresión exacta de la energía elástica y, en general, es difícil conocer cómo se distribuye la energía elástica en la tira porque los desplazamientos típicos observados son del orden del tamaño del sistema. Nos aprovechamos que la película de adhesivo está fuertemente adherida al substrato. Esta configuración ayuda a mantener la alineación a lo largo del ancho de banda con curvatura nula, permitiendo a la superficie deformarse sólo a lo largo de la dirección longitudinal. Por tanto, la deflexión se puede analizar en términos de la teoría clásica de Euler que tiene en cuenta deformaciones planas arbitrarias de una lámina, y la energía elástica disponible para fractura se puede obtener fácilmente

$$U_E = \frac{4BW}{h} \qquad (10)$$

$$\sin\theta = \frac{4B}{\gamma th} \tag{11}$$

La Figura 10 muestra la comprobación experimenta de la ecuación (11). La variación del ángulo y la distancia media h se produce cambiando el substrato y modificando la velocidad de pelado. La línea continua muestra la predicción teórica. Las barras de error muestran la incertidumbre obtenida del error estimado de cada parámetro. Hemos encontrado constancia en el ángulo de desgarro en nuestros experimentos (formas de desgarro triangulares), esta relación implica que h es una constante en todo el proceso de desgarro.

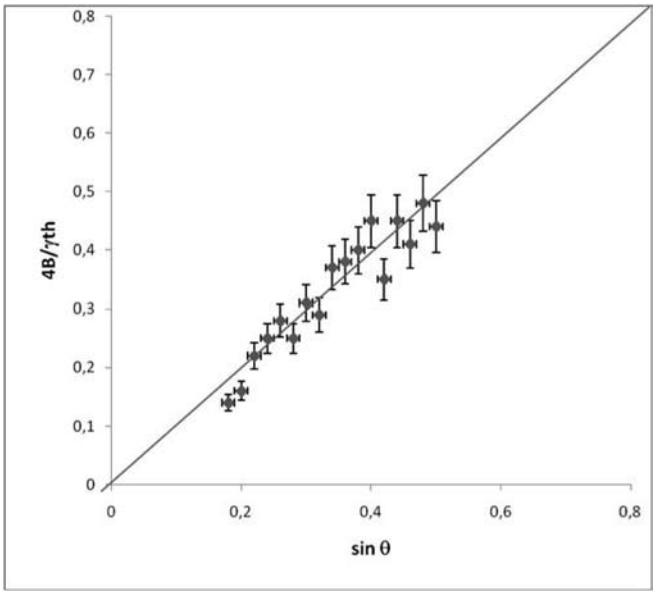


Fig. 10. Verificación experimental de la ecuación (11).

Hasta ahora, hemos mostrado con nuestros experimentos que se cumplen las ecuaciones (3) y (4). Queda por explicar por qué estas ecuaciones implican que las trayectorias de rotura sean líneas rectas. Esta relación es coherente con las medidas de fuerza de la Figura 11, aunque con un valor más bajo que el esperado η=1 para una tira perfectamente elástica. La línea continua con una pendiente de η= 0.55 es el mejor ajuste para todos los puntos experimentales y las líneas discontinuas muestran los márgenes de error de nuestra estimación. La ecuación (7) se puede escribir ahora como la ecuación (12)

$$4\eta^2 \frac{BW}{h^2} = \tau \frac{W}{2} + \gamma t \cos\theta \tag{12}$$

Para valores grandes de W, el último término de la ecuación (12) es despreciable, y la distancia h debe tener el valor constante

$$h = 2\eta\sqrt{\frac{2B}{\tau}} \tag{13}$$

La ecuación (12) muestra que a mayores velocidades de pelado aumenta la energía de adhesión, hace que el pliegue del vértice de grieta sea más pequeño (h decrece) y, el desgarro se hace más corto.

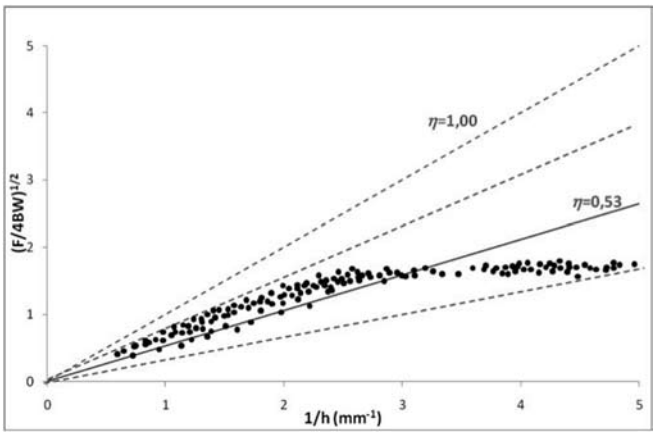


Fig. 11. Valor del parámetro η obtenido experimentalmente.

Las trayectorias son líneas rectas con un ángulo de desgarro determinado para constantes de tres materiales: la rigidez de la película de adhesivo, su fuerza de fractura y la energía de adhesión con el substrato. Cuando una tira de película de adhesivo se somete a pelado para producir un desgarro, la energía se localiza en una zona estrecha que constituye el pliegue y está disponible para producir la fractura. La geometría específica del pliegue resultante pone en juego una energía elástica que produce la fractura y conduce a formas nuevas de desgarro con lados de formas que no son rectas. Así, bajo las nuevas condiciones, se pueden producir formas del desgarro que engloban en su geometría el mecanismo de transformación de energía elástica en energía superficial de fractura y energía de adhesión, y se pueden utilizar para la caracterización mecánica.

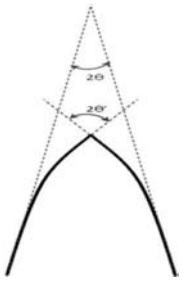


Fig. 12. Desviación de las líneas rectas en el vértice de la zona desgarrada.

5. CONCLUSIONES

1. Se propone un nuevo método para obtener valores de las propiedades mecánicas de adhesivos en película delgada. Cuando se reduce el espesor de la película de adhesivo, como requieren las nuevas tecnologías, los métodos tradicionales de medida de propiedades mecánicas de un material en masa dejan de ser aplicables porque aparecen fenómenos de concentración de tensiones y arrugamiento.
2. El acoplamiento entre la respuesta elástica, la adhesión y la fractura de la película de adhesivo da como resultado una forma geométrica del desgarro que nos permite obtener información cuantitativa sobre las propiedades mecánicas de los adhesivos en película. El ángulo observado es función de la combinación de tres parámetros: la rigidez, la fuerza de fractura y la energía de adhesión del sistema adhesivo.

3. Una deformación cilíndrica del pliegue significa que $\eta=1$. Los valores más bajos de η que se obtienen en los experimentos implican que el pliegue muestra más rigidez que el predicho por la teoría de la elasticidad. Los efectos de largo alcance debidos a los puentes de adhesivo también modifican la forma del pliegue.
4. Los valores medidos de η están relacionados con la ley cohesiva del adhesivo. La forma del desgarro engloba en su geometría el mecanismo de transformación de energía elástica en energía superficial de fractura y en energía de adhesión, y se puede utilizar en la caracterización mecánica de adhesivos en película.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la Universidad Politécnica de Madrid por concesión de la subvención AM0402. También expresan su gratitud a don José Illescas, doña Ana Soria y doña Ana García por su ayuda en la realización de los experimentos.

REFERENCIAS

[1] C. Sánchez, H. Arribart y M. M. Giraud, "Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems", Nature Materials , Abril (2005)

[2] B.F. Sørensen, "Cohesive law and notch sensitivity of adhesive joints", Acta Materialia 50 (2002) 1053–1061.

[3] J.L. Högberg, B.F. Sørensen, U. Stigh, "Constitutive behaviour of mixed mode loaded adhesive layer", International Journal of Solid and Structures, 44 (2007) 8335–8354.

[4] B. Chen, D.A. Dillard, "The effect of the T-stress on crack path selection in adhesively bonded joints", International Journal of Adhesion & Adhesives, 1 (2001) 357-368.

[5] E. Hamm, P. Reis, M. Leblanc, B. Roman, E. Cerda, "Tearing as a test for mechanical characterization of thin adhesive films", Nature Materials, 7 (2008) 386-390

[6] B. Lawn, Fracture of brittle solids (2nd Ed) Cambridge University Press, Cambridge (2004)

[7] P.P. Cortet, M. Ciccotti, L. Vanel, Imaging the stick-slip peeling of and adhesive tape under constant load, J. Stat. Mech. P03005 (2007)

[8] D.C. Hong, S. Yue, Deterministic chaos in failure dynamics: Dynamics of peeling of adhesive tape, *Phys. Rev. Lett*. 74 (1995) 254-257

[9] R. De, A. Maybhate, G. Ananthakrishna, Dynamics of stick-slip in peeling of an adhesive tape, *Phys. Rev. E 70*. (2004) 046223

[10] ASTM D1938-08, Standard test method for tear propagation resistance (trouser tear) of plastic film and thin sheeting by a single tear method, *ASTM International (2008)*.