

Características de adhesión entre fibras de queratina y poliéster insaturado

Adhesion characteristics between keratin fibers and unsaturated polyester

Marco Paniagua, Alexander Ossa*, Gladys Ruiz

Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Producción, Universidad EAFIT, Carrera 49 N.º 7 sur 50, Avenida las Vegas, Medellín, Colombia.

(Recibido el 27 de febrero de 2008. Aceptado el 30 de junio de 2008)

Resumen

En este trabajo se presentan los métodos y resultados utilizados para determinar las características de adhesión entre fibras de queratina y una matriz de poliéster insaturado. Las fibras fueron preparadas con varios tratamientos superficiales para determinar el efecto de estos en la adhesión a la matriz mediante: *i*) pruebas de desgarre de monofilamento, *pull-out*, como método directo de medición y *ii*) pruebas de tensión en laminados como método indirecto para estudiar, mediante microscopía electrónica SEM, la adhesión fibra matriz en la zona de fractura.

----- *Palabras clave:* Adhesión, fibras de queratina, materiales compuestos, ensayos de adhesión.

Abstract

This work presents the methods and results employed to find the adhesion characteristics between keratin fibers and unsaturated polyester as matrix material. The fibers were conditioned prior to testing using four different methods in order to establish the effect of these treatments on the adhesion to the matrix by means of *i*) monofilament *pull-out* testing, as direct method; and *ii*) Lamina tensile tests as indirect method to analyze the adhesion in the fracture zone with the help of electron microscopy (SEM).

----- *Keywords:* Adhesion, keratin fibers, composite materials, adhesion testing.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 261 95 00 Ext 603, fax: + 57 + 4 + 266 42 84, correo electrónico: eossa@eafit.edu.co (E. A. Ossa)

Introducción

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras de vidrio, carbono y aramida son ampliamente utilizados para la fabricación de piezas en diferentes áreas de la ingeniería debido a las buenas propiedades mecánicas que se logran alcanzar. A pesar de su amplia utilización, estos materiales cuentan con detractores debido a la contaminación ambiental que generan, puesto que son no biodegradables y en sus procesos de fabricación se involucran grandes cantidades de energía. Como una alternativa a la fabricación de estos compuestos, desde la década de los 90's se ha procurado utilizar fibras naturales para reemplazar las fibras sintéticas tradicionales. Estas fibras naturales son biodegradables, livianas, con buenas propiedades mecánicas y generalmente son consideradas desecho, por lo cual su costo es bajo. La principal dificultad que se presenta con estas fibras de origen natural es su alta absorción de agua y su consecuente evaporación, puesto que los procesos de fabricación de los compuestos involucran generalmente temperaturas mayores a 100°C. Este fenómeno genera vacíos indeseables en la matriz y por lo tanto, pobre adherencia en la interfase fibra-matriz.

Investigadores como Okubo et. al [1] estudiaron el desarrollo de eco-composites utilizando fibras de bambú. En su estudio encontraron que las fibras de bambú poseen unas propiedades mecánicas apropiadas y que es necesario aplicar el método de explosión de vapor a las fibras para mejorar su desempeño, en cuanto a la adherencia en una matriz de polipropileno. Por su parte, Rouison et. al [2] utilizaron fibras de *cannabis* como refuerzo de compuestos de poliéster insaturado utilizando el proceso de *Resin Transfer Molding* (RTM), obteniendo resultados alentadores pero con inconvenientes en cuanto a la adhesión de las fibras con la resina. Liu et. al. [3], desarrollaron materiales compuestos con fibras de hoja de piña utilizando procesos de extrusión y de inyección, encontrando buenas propiedades mecánicas y al igual que los anteriores autores, reportaron la importancia de un buen secado para evitar la creación de vacíos entre la fibra y la matriz.

Además de la utilización de fibras vegetales, algunos investigadores han estudiado la fabricación y propiedades de materiales reforzados con fibras de origen animal. Por ejemplo, Martelli et. al [4] estudiaron la utilización de queratina extraída de plumas de gallina para la fabricación de películas delgadas para empaques debido a su alta biodegradabilidad. Martínez et. al [5], estudiaron la utilización de fibras de queratina extraídas de plumas de gallina como refuerzo para materiales compuestos con matriz de Poly-Metil Metacrilato (PMMA) encontrando un incremento substancial de las propiedades mecánicas del compuesto al ser comparado con PMMA puro; además reportaron que la adhesión entre las fibras de queratina y el PMMA era adecuada, evitando de esta manera los problemas fundamentales de adhesión presentados por las fibras vegetales. De manera similar, Barone y Schmidt [6], estudiaron las propiedades mecánicas y adhesión de compuestos de matriz de Polietileno reforzado con fibras de queratina, también de plumas de gallina, encontrando excelente adhesión y una considerable mejora de las propiedades mecánicas.

Las fibras de queratina de origen humano han sido estudiadas durante los últimos años por parte de la industria cosmética utilizando métodos de microscopía electrónica (SEM y AFM) y métodos de nano-indentación, mostrando resultados interesantes en cuanto a su estructura y propiedades a escala nanométrica. Sin embargo, el enfoque de estos estudios se concentra en el desarrollo de productos capilares y no en las características mecánicas de las fibras (ver por ejemplo referencias [7-11]). Recientemente, Ossa et. al [12] caracterizaron mecánicamente las fibras de queratina de origen humano y encontraron que éstas poseen un alto potencial para ser utilizadas como materiales de refuerzo en matrices poliméricas, gracias a sus propiedades mecánicas y beneficios ecológicos. Sin embargo, no estudiaron las características de adhesión con matrices poliméricas, tema que es de vital importancia para la posible utilización de estas fibras como refuerzo en materiales compuestos. El objetivo de este artículo es dar a conocer las características de adhesión entre fibras de queratina de origen humano y resina

de poliéster insaturado mediante métodos directos (*pull-out*) e indirectos (pruebas de tensión en compuestos laminados) de análisis de adhesión.

Adhesión entre fibras y matriz

El nivel de refuerzo de una fibra en un material compuesto depende fundamentalmente de las características de adhesión entre ésta y la matriz [13]. La interfase formada entre las fases, matriz-fibra, juega un papel importante en la transferencia de carga desde la matriz hacia las fibras y es la responsable del efecto de refuerzo. Han sido considerables los intentos para desarrollar una técnica que mida el nivel de adhesión de fibras en matrices, particularmente poliméricas y el efecto de la adhesión fibra-matriz sobre las propiedades finales del compuesto. Según Drzal et. al [13], los métodos empleados se pueden clasificar en tres categorías: Métodos directos y métodos indirectos.

Los *métodos directos* incluyen: *i*) pruebas de *pull-out* de monofilamentos; *ii*) pruebas de flexión para la determinación de fragmentación de una fibra embebida; *iii*) pruebas de compresión de una fibra embebida; y *iv*) pruebas de microindentación. Estos métodos miden la adhesión de la fibra a la matriz y suministran información sobre el tipo de falla y la capacidad para medir la energía involucrada en la fractura de la interfase fibra-matriz, lo cual resulta útil para relacionar la adhesión de las fibras a la matriz con las propiedades del compuesto, especialmente la tenacidad. Zhandarov [14], agrupa estos métodos bajo la categoría de ensayos micromecánicos, definiéndolos como “probetas de ensayo conteniendo una fibra simple” y los divide en dos grupos. Uno incluye las pruebas en las que se aplica una fuerza externa directamente a la fibra, como en la prueba de *pull-out* de monofilamento. El otro grupo está formado por pruebas en las cuales, solamente se carga externamente la matriz, como en el ensayo de fragmentación de una fibra embebida y sus variantes, en los cuales la matriz cargada es sometida a doblez, más que a tensión (Broutman test).

Los *métodos indirectos* incluyen: *i*) fabricación de muestras con curvatura variable; *ii*) ensayos de compresión en rebanadas; *iii*) pruebas de com-

presión con esfera; y *iv*) fabricación y ensayo mecánico de compuestos laminares. Estos métodos proporcionan un análisis cualitativo de las propiedades en la interfase.

En este trabajo se determinará la resistencia cortante de la fibra de queratina cuando un extremo de ella se introduce dentro de una matriz polimérica (*pull-out*), como un medio de medir el nivel de adhesión entre dicha fibra y la matriz polimérica. Al mismo tiempo, se utilizará el método indirecto de ensayo mecánico en compuestos laminados, para analizar las características morfológicas de las superficies de fractura.

Prueba de *pull-out*

Esta prueba consiste en introducir un extremo de una fibra axialmente, longitud embebida L , dentro de un cilindro o disco delgado del mismo material que la matriz. La figura 1 muestra una representación esquemática del conjunto fibra-matriz para la prueba de *pull-out*. Una fuerza F se aplica al extremo libre de la fibra en forma incremental para extraerla de la matriz. Esta fuerza y el desplazamiento se registran continuamente, a medida que la fibra se extrae axialmente, hasta que ocurra la extracción completa o la fractura de la fibra.

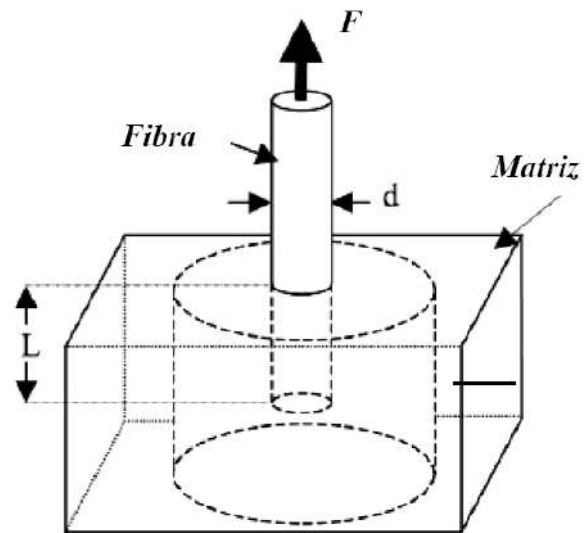


Figura 1 Representación esquemática de la prueba de *pull-out* de monofilamentos [15]

Según Zhandarov [14], la vía tradicional para caracterizar la calidad de la adhesión en la interfase, matriz-fibra, es calculando la resistencia cortante de la interfase de acuerdo a:

$$\tau = \frac{F_{\max} \cdot}{\pi d L} \quad (1)$$

Donde: d = diámetro de la fibra en la longitud embebida

L = longitud embebida.

La figura 2 muestra una curva de fuerza-desplazamiento típica de un ensayo de *pull-out* en donde se observan las tres etapas desarrolladas durante este ensayo.

En la primera etapa, $0 \leq F \leq F_y$, la interfase matriz-fibra permanece constante y la curva presenta un comportamiento fundamentalmente elástico lineal. Cuando la carga externa alcanza el valor de la carga crítica F_y , las fibras empiezan a deformarse plásticamente. En esta etapa, la fuerza registrada continúa aumentando con la deformación de la fibra externa. Después de alcanzar la carga máxima, F_m , el desprendimiento de la interfase es inestable logrando que la longitud total embebida se separe completamente, haciendo que la fuerza registrada caiga hasta cero.

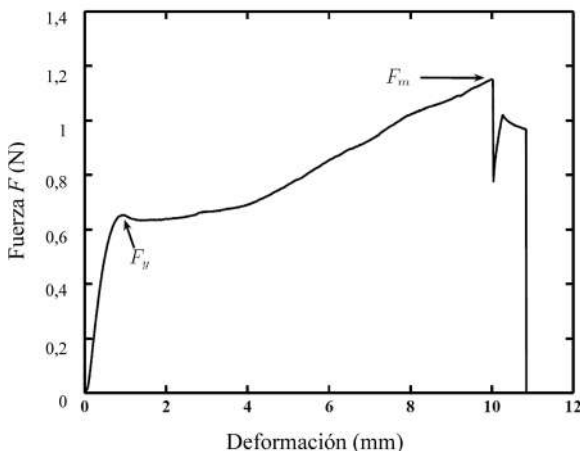


Figura 2 Diagrama Fuerza-Desplazamiento para una prueba de *pull-out*

Materiales

Fibras de queratina

Los cabellos humanos están formados por varias capas de estructuras celulares [9-11]. Estas fibras poseen un diámetro exterior aproximado de 65-130 μm consistente de cortex y cutícula. Estas capas están compuestas por células muertas formadas principalmente por queratina, que es una proteína que se caracteriza por contener un alto contenido de cistina, un aminoácido que posee la capacidad de generar enlaces cruzados entre la proteína y sus enlaces intermoleculares de bisulfuro. Un alto contenido de cistina corresponde a alto contenido de enlaces cruzados de bisulfuros, lo que genera buenas propiedades mecánicas.

Para este estudio se utilizaron cinco grupos de cabellos o fibras de queratina de origen humano. Estas muestras contaban con una longitud aproximada de 0,3 m. La ubicación de estas muestras con respecto a la raíz no es conocida, sin embargo, se estima que puede estar a 0,2 m de ésta en todos los casos. La mayoría de las pruebas se realizaron en las zonas intermedias de las muestras. Este procedimiento de selección se asemeja al seguido en [10]. Las muestras analizadas se encontraban en un estado virgen, es decir, sin aplicación de ningún tratamiento químico que pudiera modificar sus características. En la figura 3 se observa una imagen de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) de una de las fibras de queratina estudiadas.

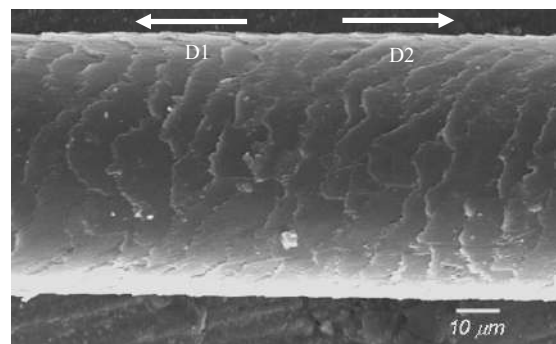


Figura 3 Imagen SEM de una de las fibras de queratina estudiadas. Las flechas indican la dirección de extracción de las muestras de los grupos D1 y D2 durante *pull-out*

Resina de Poliéster Insaturado

Un poliéster es un polímero que resulta de la reacción de un ácido con dos grupos carboxílicos COOH y de alcoholes con dos grupos hidroxílicos OH. De esta reacción pueden resultar varios tipos de poliéster: poliéster saturado, poliéster textil, poliésteres plastificantes y poliéster insaturado.

El poliéster insaturado es un poliéster con parte alifática y aromática y con la característica de poseer dobles enlaces en su estructura, de lo cual se deriva su nombre insaturado y da lugar a la formación de un polímero termoestable.

El poliéster forma cadenas de moléculas de ácidos y de alcohol mediante una reacción de condensación generando agua como subproducto [16]. En este estudio se utilizó un poliéster insaturado pre-acelerado comercial denominado Cristalan 809. La cantidad de Mek Peróxido (Metil etil cetona) utilizado como catalizador fue de 2.0%.

Procedimiento experimental

La figura 4 muestra la configuración del ensamble utilizado para introducir el extremo de una fibra de queratina dentro de un cilindro de resina de poliéster insaturado. El ensamble permite centrar y alinear el extremo de la fibra dentro del bloque cilíndrico de poliéster mientras este se encuentra en estado líquido previo a su reacción de curado. El procedimiento experimental permite determinar la resistencia cortante interfacial de una fibra introducida dentro de un cilindro de resina de poliéster insaturado.

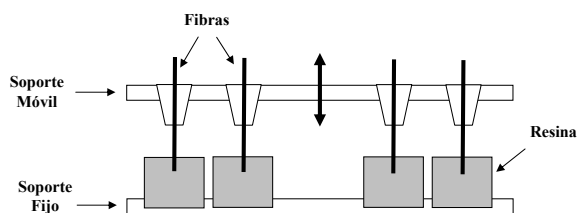


Figura 4 Representación esquemática del soporte utilizado para introducir las fibras en la resina de poliéster aún líquida

Los moldes utilizados son cilindros de 32 mm de diámetro y 23 mm de altura. La inmersión de las fibras dentro del molde se da una vez se ha mezclado la resina de poliéster con el catalizador en un recipiente aparte. Esta resina se vacía hasta alcanzar una altura establecida dentro del molde y se ubica en el soporte fijo del ensamble (ver Fig. 4). Luego se mueve hacia abajo el soporte móvil del ensamble para lograr que las fibras penetren la longitud requerida en la resina todavía líquida y posteriormente se deja curar completamente, antes de ensayar por un período de por lo menos siete días.

Los materiales compuestos utilizados para el estudio de adhesión por método indirecto fueron fabricados utilizando fibras cortas de queratina con una longitud aproximada de 25 mm. Las muestras fueron laminadas manualmente y se dejaron curar completamente por un tiempo de siete días, antes de ser sometidas a ensayos de tensión. Los laminados fueron fabricados con un porcentaje en peso de fibras de 10%. Una vez concluido el tiempo de curado, las láminas fueron sometidas a un proceso de mecanizado para obtener las dimensiones finales de las probetas de ensayo según la norma ASTM C 1557-03 [17].

Preparación de muestras para ensayo

Las fibras de queratina a emplear en las pruebas fueron divididas en cuatro grupos, que en el resto del texto se denominarán fibras A, B, C y D.

Las fibras del grupo A se utilizaron según su condición original, es decir sin sometimiento a temperatura o químicos. Las muestras del grupo B fueron sometidas a un proceso de secado dentro de un horno de microondas, con dos ciclos de secado de tres minutos cada uno y un intervalo de enfriamiento entre ellos de 30 s. Las muestras del grupo C, se introdujeron dentro de una solución de estireno y anhídrido maleico por un período de 24 horas, luego del cual se secaron a temperatura ambiente durante 12 Horas, siguiendo un procedimiento similar a [6] para mejorar la adhesión de fibras de Queratina. Las muestras del grupo D se sometieron al tratamiento de secado utilizado

para el grupo B, seguido por el tratamiento anteriormente descrito con estireno-maleico aplicado a las muestras del grupo C.

Pruebas de pull-out y tensión

Una vez preparadas las muestras, tanto para *pull-out* como para tensión, se ensayaron en una máquina universal de ensayos marca Instron, con capacidad de carga de 10 kN y con una celda de carga de 50N con una resolución de 0.001 N, siguiendo los lineamientos establecidos por las norma ASTM C1557-03 [17], para tensión de fibras y ASTM D638-03 [18] para tensión de compuestos.

El extremo libre de la fibra se adhiere a un soporte rectangular de cartulina para facilidad de alineamiento con respecto a las mordazas de la máquina de ensayos. Estas mordazas presentan una superficie plana recubierta de caucho para evitar el deslizamiento y aplastamiento de las fibras durante la prueba. El cilindro de resina se coloca en la parte inferior de la máquina y se procede a la realización del ensayo, aplicando la fuerza incrementalmente con una velocidad de 5 mm/min en condiciones ambientales, hasta que se extrae el extremo total embebido de la fibra en la resina o hasta que se presenta la rotura de ésta en su extremo libre. La figura 5 muestra una vista del conjunto fibra-resina, acoplado a la máquina de ensayo previo a un ensayo de *pull-out*.

Un software de adquisición de datos permite registrar los valores de fuerza y desplazamiento obtenidos para cada ensayo. Las longitudes embebidas, así como los diámetros de las fibras de queratina dentro de la resina, se miden con la ayuda de métodos ópticos, utilizando un estereomicroscopio y un microscopio metalográfico, luego de seccionar el cilindro de resina en dos, una vez realizada la prueba de *pull-out*.

Para determinar las características morfológicas de adhesión de los compuestos queratina-poliéster insaturado, las muestras laminadas se someten a ensayo de tensión y los extremos fracturados se inspeccionan mediante microscopía electrónica SEM.

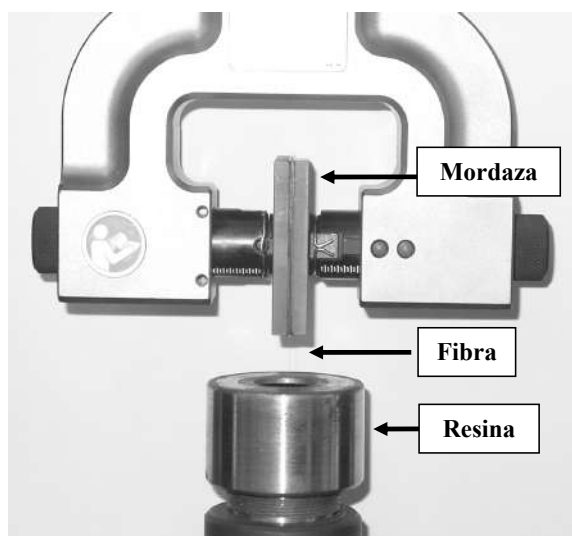


Figura 5 Montaje para prueba de *pull-out* de una fibra de queratina

Resultados y análisis

Pruebas de pull-out

Mediante la utilización de la ecuación (1) es posible calcular los esfuerzos cortantes τ de cada una de las muestras ensayadas. La tabla 1 presenta estos resultados para los diferentes grupos de fibras, empleando siempre poliéster insaturado como material de matriz. Las muestras sin tratamiento superficial (grupo A) presentan menores valores del esfuerzo cortante debido al contenido de humedad y falta de acondicionamiento al momento de su inmersión en la matriz. La mejor adhesión encontrada en los grupos de fibras ensayados se da para las fibras del grupo B; esta buena adhesión se debe a la eliminación de la humedad de las fibras, lo que permite una mejor afinidad entre fibra y matriz. La aplicación de tratamiento químico, mediante utilización de anhídrido maleico (grupos C y D) a las fibras mejora las características de adhesión si se compara con fibras no tratadas (grupo A); sin embargo, el elemento fundamental en la adhesión de las fibras resulta ser la eliminación de humedad como se puede apreciar de los resultados de adhesión de las muestras del grupo B que fueron secadas previamente a su inmersión en la matriz.

Tabla 1 Resultados de las pruebas de *pull-out*

Fibras	Diámetro (μm)	L (mm)	τ (MPa)
Grupo A	96,5 \pm 1,50	4,73 \pm 1,09	0,684 \pm 0,08
Grupo B	98,5 \pm 12,71	1,19 \pm 0,19	2,525 \pm 0,453
Grupo C	126,0 \pm 28,8	1,28 \pm 0,51	2,178 \pm 0,90
Grupo D	91,17 \pm 16,1	2,42 \pm 0,68	1,381 \pm 0,252

La superficie recubierta de escamas de la cutícula de las fibras de queratina (Fig. 3) puede generar un efecto de traba mecánica que ayude a mejorar la adhesión de la interfase. Para estudiar el efecto de la dirección de inmersión de las fibras, se prepararon dos grupos adicionales de fibras para efectuar la prueba de *pull-out*. Las muestras de los grupos D1 y D2 que se presentan en la tabla 2 sufrieron el mismo acondicionamiento que las fibras del grupo D (ver sección 4.1). Las muestras del grupo D1 fueron sumergidas en la matriz de tal manera que las escamas se encontraran en dirección contraria a la fuerza de extracción, F, mientras que las muestras D2 fueron orientadas

con las escamas en el mismo sentido de la fuerza F (Figura 3).

La tabla 2 presenta los resultados obtenidos de las pruebas de *pull-out* según la dirección de las escamas. Se aprecia que la dirección de las escamas puede mejorar la resistencia cortante de las fibras debido a la oposición que debe hacer la fuerza de extracción para vencer la resistencia que las escamas hacen a ser *desgarradas*. Las escamas de las fibras hacen que el poliéster que solidifica a sus alrededores tome la forma de éstas, como se puede apreciar en la figura 6b, en donde la flecha señala el interior de un agujero de poliéster dejado por la extracción de la fibra que se encontraba en su interior.

Tabla 2 Efecto del sentido de las fibras de queratina sobre la resistencia cortante

Muestra	Diámetro (μm)	L (mm)	τ (MPa)
D1	94,8 \pm 16,3	2,13 \pm 0,55	1,48 \pm 0,197
D2	96,0 \pm 5,0	2,14 \pm 0,09	1,25 \pm 0,123

Pruebas de tensión en laminados

Una vez ensayadas las probetas laminadas bajo cargas de tensión, los extremos fracturados del compuesto fueron sometidos a análisis morfológico, mediante la utilización de microscopía electrónica de barrido, para evaluar la eficiencia de la adhesión de una manera cualitativa.

La figura 6 presenta las características fundamentales de la zona de interfase fibra matriz para las probetas fabricadas con fibras de los grupos A y D. Las figuras 6a y 6b muestran la superficie de fractura para las fibras que no sufrieron ningún acondicionamiento previo. Es importante observar como la fibra de queratina se desprende intacta

de la matriz de poliéster, incluso manteniendo sus escamas completas. Esta es una evidencia directa de la deficiencia de adhesión de estas muestras, corroborando los resultados obtenidos en la tabla 1. Por otra parte, las figuras 6c y 6d muestran las características de la superficie de fractura de las muestras fabricadas con fibras tratadas como el grupo D. En estas dos figuras puede apreciarse que la adhesión de las fibras es mucho mejor que para las fibras no tratadas. En la figura 6c se observa que parte de la fibra quedó dentro de la matriz. La figura 6d evidencia una mejor adhesión de las fibras, pero a la vez muestra, que esa buena adhesión genera el desprendimiento de las escamas de la fibra (cutícula).

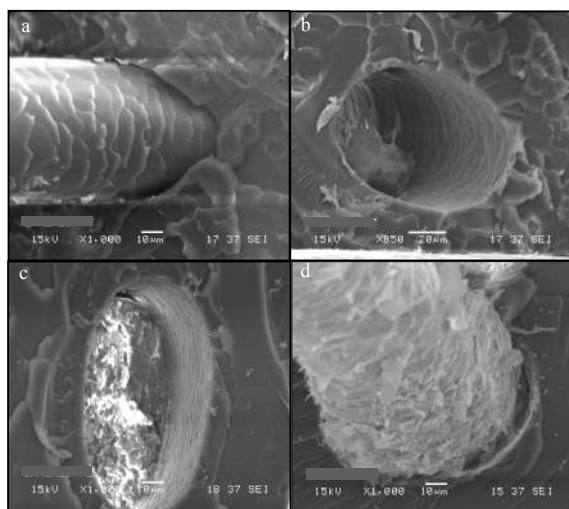


Figura 6 Imágenes de microscopía electrónica de la adhesión en compuestos laminados. a) y b) Muestras no tratadas (grupo A); c) y d) Muestras tratadas (grupo D)

Conclusiones

Pruebas de *pull-out* realizadas a fibras de queratina embebidas en una matriz de poliéster insaturado revelan que las características de adhesión se mejoran con la eliminación de humedad de las fibras, es decir, las características hidrofílicas de las fibras pueden reducir considerablemente su adhesión si no se realiza un proceso de secado previo. La adición de anhídrido maleico a las fibras también representa una mejoría en las características de adhesión de las fibras. La orientación de las escamas de las fibras de queratina con respecto a la aplicación de la fuerza de extracción genera un efecto de traba mecánica que puede incrementar los esfuerzos adhesivos hasta en un 20 %.

Mediante análisis de microscopía SEM, se logró determinar que una buena adhesión de las fibras de queratina no necesariamente implica una buena resistencia del compuesto, pues al mejorar la adhesión se logra un desprendimiento de cutícula, lo que hace que la resistencia de la fibra se reduzca.

Agradecimientos

Los autores expresan agradecimientos a las ingenieras Carolina Montoya y Juliana Arango por su valiosa ayuda en la preparación de muestras y ensayos en fibras; al personal técnico del laboratorio de materiales de la Universidad EAFIT por su ayuda y sugerencias para el diseño de sistemas de montaje y ensayo de muestras; y a la dirección de investigación y docencia de la Universidad EAFIT, por el apoyo económico.

Referencias

1. K. Okubo, T. Fujii, Y. Yamamoto, "Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties" *Composites Part A*. Vol. 35. 2004. pp. 377-383.
2. D. Rouison, M. Sain, M. Couturier. "Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation" *Composites Science and Technology*. Vol. 64. 2004. pp. 629-644.
3. W. Liu, M. Misra, P. Askeland, L. T. Drzal, A. K. Mohanty. "Green composites from soy based plastic and pineapple leaf fiber: fabrication and properties evaluation" *Polymer*. Vol. 46. 2005. pp. 2710-2721.
4. S. M. Martelli, G. Moore, S. Silva, C. Gandolfo, J. Borges. "Influence of plasticizers on the water sorption isotherms and water vapor permeability of chicken feather keratin films". *LWT - Food Science and Technology*. Vol. 39. 2006. pp. 292-301.
5. A. L. Martínez, C. Velasco, M. de Icazaa, V. M. Castaño. "Mechanical properties evaluation of new composites with protein biofibers reinforcing poly(methyl methacrylate)". *Polymer*. Vol. 46. 2005. pp. 8233-8238.
6. J. R. Barone, W. F. Schmidt. "Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers". *Composites Science and Technology*. Vol. 65. 2005. pp.173-181.
7. H. A. Barnes, G. P. Roberts. "The non-linear viscoelastic behaviour of human hair at moderate extensions". *Int. Journal of Cosmetic Science*. Vol. 22. 2000. pp. 259-264.
8. J. A. Swift. "The mechanics of fracture of human hair at moderate extensions". *Int. Journal of Cosmetic Science*. Vol. 21. 1999. pp. 227-239.

9. G. Wei, B. Bushan, P. M. Jorgeson. "Nanomechanical characterization of human hair using nanoindentation and SEM". *Ultramicroscopy*. Vol. 105. 2005. pp. 248-266.
10. C. LaTorre, B. Bushan. "Nanotribological characterization of human hair using atomic force microscopy". *Ultramicroscopy*. Vol. 105. 2005. pp. 155-175.
11. G. Wei, B. Bushan, P. M. Jorgeson. "Nanotribological and nanomechanical characterization of human hair using a nanoscratch technique". *Ultramicroscopy*. Vol. 106. 2006. pp. 742.
12. A. Ossa, F. Cano, J. Arango, C. Montoya. "Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de las fibras de vidrio y queratina". *Scientia et Técnica*. N° 36. 2007. pp. 407-412.
13. L. T. Drzal, P. J. Herrera-Franco, H. Ho. "Fiber-matrix interface tests". *Comprehensive Composite Materials*. Elsevier. 2000. pp. 1- 41.
14. S. Zhandarov, E. Mäder. "Characterization of fiber/matrix interface strength". *Composites Science and Technology*. Vol. 65. 2005. pp. 149-160.
15. P. J. Herrera, A. Valadez. "A study of the mechanical properties of short natural-fiber reinforced composite". *Composites Part B: Engineering*. Vol. 36. 2005. pp. 597-608.
16. R. Askeland. "Ciencia e ingeniería de los materiales". International Thompson Editores S.A. México. 4ª ed. 2004. pp. 240-249
17. Norma ASTM C 1557-03. *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers*.
18. Norma ASTM D638-03. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*.