

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE FIBRAS DE VIDRIO Y QUERATINA

Comparative study of the mechanical properties of glass and keratin fibers

RESUMEN

Este trabajo estudia el potencial de utilización de fibras naturales de queratina como reemplazo de las fibras sintéticas tradicionales (Vidrio, Carbono y Aramida). Se presenta un estudio comparativo de las características morfológicas y mecánicas de fibras de vidrio y de queratina, detallando los resultados de caracterización dimensional, morfológica, de densidad y resistencia mecánica de los dos tipos de fibras considerados. Se encontró que las fibras de queratina poseen unas propiedades mecánicas que pueden llegar a ser adecuadas para su utilización como material de refuerzo para materiales compuestos, presentando una relación resistencia-densidad próxima a la que poseen las fibras de vidrio.

PALABRAS CLAVES: Fibras naturales, Fibra de Vidrio, Queratina, Ensayos Mecánicos, Morfología.

ABSTRACT

This work studies the potential of use of human keratin natural fibers as a replacement to traditional synthetic fibers (Glass, Carbon and Aramide). This work presents a comparative study of the morphologic and mechanical characteristics of glass and keratin fibers, finding that keratin fibers had promising properties and advantages in comparison to glass fibers. Keratin fibers showed a strength-density ratio 20% lower to the ratio for glass fibers. These findings encourage the study of natural materials as an environmentally friendly replacement to synthetic fibers for the manufacture of composite materials.

KEYWORDS: *Natural fibers, Glass Fibers, Keratin, Mechanical testing, Morphology.*

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los tipos de materiales que durante los últimos años ha presentado un crecimiento más acelerado en cuanto a utilización y desarrollo son los denominados materiales compuestos. Estos pueden ser definidos como un sistema de materiales constituido por una mezcla o combinación de dos o más micro o macro constituyentes que difieren en forma y composición química y que son esencialmente insolubles entre si [1]. Su alta utilización radica en la significativa mejora de propiedades que pueden obtenerse al mezclar materiales básicamente disímiles. De esta manera se puede lograr que un material frágil y de baja resistencia se combine con otro dúctil y de moderada resistencia para obtener un material de ductilidad moderada y con buena resistencia.

Los materiales compuestos se desarrollan básicamente adicionando fibras o partículas a una matriz definida, que puede ser metálica, polimérica o cerámica. Los denominados reforzados con fibras tradicionales se fabrican utilizando fibras de vidrio, carbono o aramida. Estos materiales presentan buena resistencia mecánica, pero tienen como limitantes su baja o nula bio-

degradabilidad, su alto costo y la cantidad de energía necesaria para su producción.

Debido a la creciente demanda por parte de las autoridades ambientales por una utilización de materiales amigables con el medio ambiente, y con el deseo industrial de reducir el costo de las fibras utilizadas tradicionalmente como refuerzo para materiales compuestos (Fibras de carbono, vidrio y aramida), se ha incrementado durante los últimos años el desarrollo y manufactura de materiales compuestos reforzados con fibras naturales. Investigadores como Saheb y Jog [2] realizaron una revisión completa de las principales fibras naturales de origen vegetal utilizadas, teniendo en cuenta tanto su potencial de utilización como refuerzo así como las dificultades inherentes a su procesamiento. Algunos investigadores estudiaron las características y propiedades mecánicas de diferentes fibras naturales al ser utilizadas como refuerzos en materiales compuestos de matriz polimérica. A continuación se describirán algunos de los resultados más relevantes: Gazan y Bledzki [3] estudiaron la influencia de los tratamientos superficiales de fibras vegetales de *Corchorus capsularis* en las propiedades mecánicas de compuestos de estas fibras y polipropileno, encontrando

E. ALEXANDER OSSA H.

Ingeniero Mecánico, *Ph. D.*
Profesor Asociado
Universidad EAFIT
eossa@eafit.edu.co

FELIPE CANO M.

Estudiante Ingeniería Mecánica
Universidad EAFIT
fcanomej@eafit.edu.co

JULIANA ARANGO M.

Estudiante Ingeniería de Producción
Universidad EAFIT
jarang16@eafit.edu.co

CAROLINA MONTOYA

Estudiante Ingeniería de Producción
Universidad EAFIT
cmonto18@eafit.edu.co

que con un tratamiento superficial adecuado la resistencia mecánica del compuesto puede mejorarse hasta en un 50%.

Okubo et al. [4], estudiaron las propiedades mecánicas de materiales compuestos poliméricos reforzados con fibras de bambú, encontrando que con la preparación adecuada de las fibras es posible obtener buenas propiedades mecánicas en el compuesto.

Rouison et al. [5], utilizaron fibras vegetales 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. [6], desarrollaron materiales compuestos con fibras de hoja de piña utilizando procesos de extrusión y de inyección, encontrando buenas propiedades mecánicas, sin embargo reportaron la importancia de un buen secado para evitar la creación de vacíos entre la fibra y la matriz.

Demir et al. [7], estudiaron las propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno reforzados con fibras vegetales de *Luffa aegyptiaca* encontrando buenos resultados cuando la absorción de humedad de las fibras era controlada.

De los resultados de estos estudios resulta evidente la dificultad presentada con las fibras vegetales debido a su alta absorción de humedad y la consecuente evaporación durante el proceso de fabricación, ya que las temperaturas involucradas en la mayoría de los procesos sobrepasan los 100°C.

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. [8] estudiaron la utilización de queratina extraída de plumas de gallina para la fabricación de películas delgadas para empaques debido a su alta bio-degradabilidad. Martínez et al [9], estudiaron la utilización de fibras de queratina extraídas de plumas de gallina como refuerzo para materiales compuestos con matriz de Poly-Metil Metacrilato (Acrílico) encontrando un incremento substancial de las propiedades mecánicas del compuesto al ser comparado con Acrílico puro; además reportaron que la adhesión entre las fibras de queratina y el acrílico era adecuada, evitando de esta manera los problemas fundamentales de adhesión presentados por las fibras vegetales. De manera similar, Barone y Schmidt [10], 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.

A pesar de los promisorios resultados obtenidos con fibras de queratina de origen animal, no ha sido posible encontrar información sobre materiales reforzados con fibras de queratina de origen humano (cabello). Al ser la queratina el componente principal de los cabellos, al igual que en las plumas de gallina, es de esperarse que la

adhesión de estas fibras con los materiales poliméricos sea también adecuada y que las propiedades mecánicas presenten mejoras significativas.

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 interés mostrado en cuanto a posibilidad de utilización como fibras de refuerzo a sido poco (ver por ejemplo: [11, 12, 13, 14 y 15]).

El objeto fundamental de este artículo es el de estudiar las características morfológicas y de resistencia mecánica de fibras de queratina de origen humano y realizar una comparación con las características de fibras de vidrio comerciales.

2. MATERIALES

2.1. Fibra de Vidrio

Para el presente estudio se utilizaron fibras de vidrio comerciales fabricadas por la empresa Owens Corning. Estas fibras fueron extraídas de hilos continuos Roving.

Las fibras de vidrio son producidas estirando monofilamentos de vidrio provenientes de un horno que contiene vidrio fundido y reuniendo un gran número de estos filamentos para formar un cordón de fibras de vidrio [1]. La figura 1 muestra las características macroscópicas de las fibras de vidrio empleadas en este estudio, apreciando la uniformidad en el diámetro y su superficie lisa.

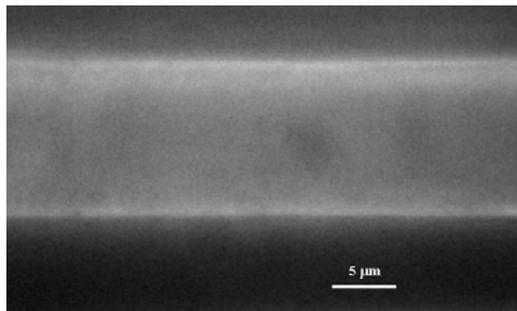


Figura 1. Fotografía óptica de una de las fibras de vidrio estudiadas.

2.2. Fibras de Queratina

Los cabellos humanos están formados por varias capas de estructuras celulares [13, 14, 15]. Estas fibras poseen un diámetro exterior aproximado de 65-90 μm consistente de cortex y cutícula, como se puede apreciar esquemáticamente en la figura 2. 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.

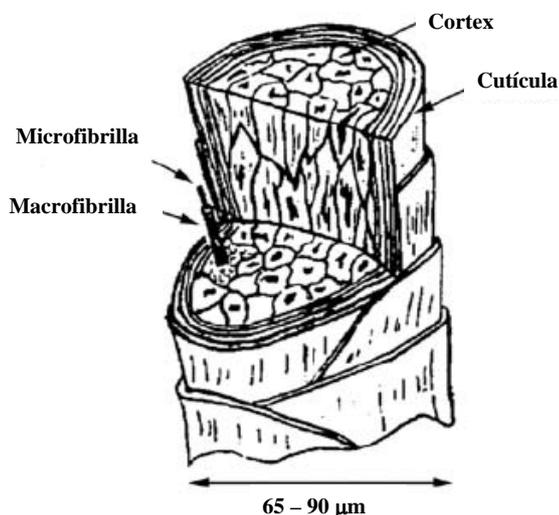


Figura 2. Representación esquemática de la estructura de una fibra de queratina.

La capa externa o cutícula consiste de celdas planas superpuestas (escamas) unidas desde sus raíces y apuntando hacia el extremo final de la fibra. Cada cutícula posee un espesor aproximado de $0.3-0.5 \mu\text{m}$ y una longitud visible de $5-10 \mu\text{m}$.

El cortex está formado por células corticales y el material ligante intercelular. Las células corticales poseen un espesor de entre $1-6 \mu\text{m}$ y una longitud de unos $100 \mu\text{m}$ con una orientación longitudinal al eje de la fibra. Las microfibrillas (entre $0.1-0.4 \mu\text{m}$ de diámetro) comprenden la porción principal de las células corticales. Cada microfibrilla está conformada por filamentos intermedios (de unos 7.5 nm de diámetro) y una matriz rica en cistina.

Para este estudio se utilizaron cinco grupos de cabellos o fibras de queratina de origen humano, que en lo siguiente se denominarán grupos A, B, C, D y E. Cuatro de ellos pertenecientes a un mismo individuo cada uno (grupos A-D), y el quinto grupo pertenecientes a individuos diferentes (grupo E), esto con el fin de analizar la variabilidad existente entre fibras de un mismo individuo y de individuos aleatorios. Las muestras analizadas contaban con una longitud aproximada de 0.3 m . La ubicación de estas muestras con respecto a la raíz no es conocida, pero se estima que puede estar a 0.2 m de esta en todos los casos. En la mayoría de los casos las pruebas se realizaron en las zonas intermedias de las muestras.

Este procedimiento de selección de muestras se asemeja al seguido en [15].

Las muestras analizadas se encontraban en un estado virgen, es decir, sin aplicación de ningún tratamiento que pudiera modificar sus características.

3. METODOS EXPERIMENTALES

3.1. Caracterización Morfológica

Para la caracterización morfológica de las fibras se utilizó microscopía óptica y microscopía de fuerza atómica (AFM).

Para la determinación de los diámetros de las fibras se utilizó un microscopio óptico de luz reflejada con ocular graduado y una magnificación máxima de $1000\times$ marca Leitz.

Para la determinación de las características dimensionales de las escamas de las cutículas se utilizó un microscopio de fuerza atómica marca NanoSurf con un rango de barrido de $20 \mu\text{m}$.

3.2. Determinación de Densidad

Para la determinación de la densidad de las fibras se utilizó el método directo o de medición de volumen a partir de las dimensiones de la fibra (diámetro y longitud) y su peso por medio de una balanza analítica marca Metler Toledo. Este método fue utilizado ya que la variación encontrada en los diámetros a lo largo de las fibras fue de alrededor del 5%, por lo que se consideran de diámetro constante.

3.3. Caracterización Mecánica

La determinación de la resistencia a la tensión y el módulo de elasticidad de las fibras estudiadas se realizó siguiendo el procedimiento detallado en la norma ASTM C 1557-03 "Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers" [16]. Mediante este método se tensiona la fibra con una velocidad de deformación constante hasta que se produce la fractura de la misma. La velocidad del ensayo se ajusta para que la fractura suceda en un tiempo aproximado de 30 s . El diagrama carga - deformación es almacenado en un computador personal para posterior análisis de los resultados y determinación de esfuerzos últimos de las fibras.

Uno de los problemas fundamentales que se presentan para el ensayo de tensión en fibras individuales radica en su sujeción y alineamiento para las pruebas. En este estudio se siguió la recomendación establecida en la norma técnica [16], mediante la cual las fibras se sujetan en un molde hecho de cartulina sobre el cual se adhiere la fibra y luego se lleva este molde a la máquina de ensayos

donde es sujetado por mordazas planas recubiertas por caucho para evitar aplastamiento de las fibras, ya que esto afectaría los resultados (ver figura 3)

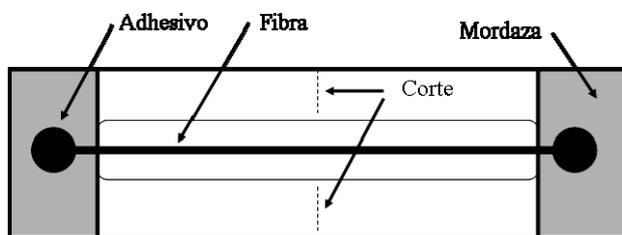


Figura 3. Representación esquemática del molde de sujeción de fibras para ensayo de tensión de fibras individuales.

Una vez las fibras se encuentran sujetas a los moldes y soportadas por las mordazas de la máquina de ensayos, se cortan las dos secciones punteadas mostradas en la fig. 3 y así la fibra queda lista para ser ensayada. Los ensayos se realizaron utilizando una máquina de ensayos marca Instron 3366 con una celda de carga con una resolución de 1 mN. La longitud de medición de las fibras fue de 50 mm (zona de ensayo) para todos los casos y se tomó como referencia la línea media de desplazamiento de la máquina de ensayos.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1. Morfología

La figura 1 muestra una de las fibras de vidrio estudiadas, estas fibras poseen un diámetro de 15 a 27 μm (ver Tabla 1) y poseen una superficie lisa. Por otra parte, la figura 4 muestra la superficie de una de las fibras de queratina estudiadas. Estas fibras presentan diámetros de 60 a 90 μm (ver Tabla 1). En la Tabla 1 también pueden apreciarse los resultados de las mediciones de densidad de los dos tipos de fibras. Las fibras de queratina resultan en promedio aproximadamente 45% menos densas que las fibras de vidrio, lo que les confiere cierta ventaja en comparación con las fibras de vidrio, ya que podrían utilizarse para crear materiales compuestos más livianos. Debido a que la muestra E es una recopilación de fibras de diferentes individuos, en la tabla 1 no se especifica la densidad promedio de esta muestra.

En la figura 4 se aprecian las escamas que forman la cutícula de las fibras de queratina.

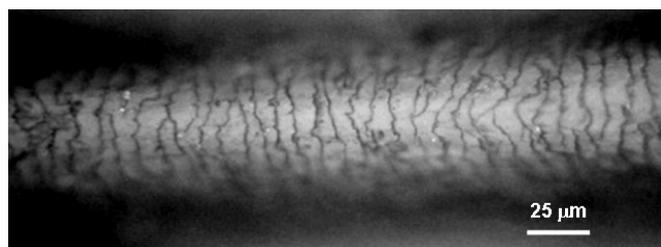
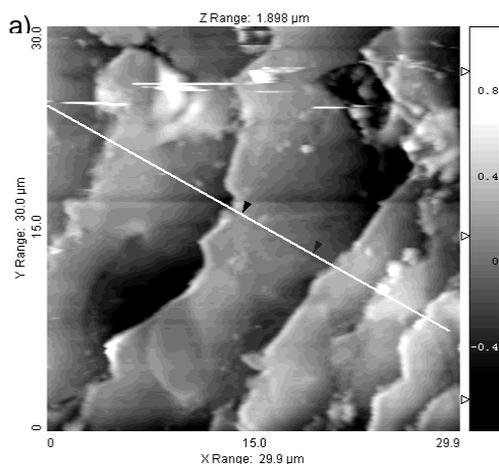


Figura 4. Fotografía óptica de una de las fibras de queratina estudiadas.

Muestra	Diámetro promedio (μm)	Densidad promedio (gr/cm^3)
Queratina (A)	66.23 ± 6.67	1.41
Queratina (B)	88.72 ± 5.07	1.21
Queratina (C)	72.35 ± 3.74	1.31
Queratina (D)	66.73 ± 8.01	1.55
Queratina (E)	79.18 ± 11.01	N/A
Fibra de Vidrio	21.30 ± 6.12	2.55

Tabla 1. Resultados de las mediciones dimensionales y de densidad de las fibras estudiadas.

La figura 5a muestra una imagen AFM de la topografía superficial de una de las fibras de queratina, mientras que la figura 5b presenta la variación topográfica de la superficie de la fibra a lo largo de la línea que se aprecia en la figura 5a. Mediante este análisis se encuentra que la longitud visible de las escamas es de aproximadamente 5.5 μm y poseen un espesor aproximado de 240 nm. Estas escamas se cree que pueden ser benéficas para el comportamiento mecánico de materiales compuestos reforzados con estas fibras, ya que estas pueden incrementar la adhesión entre fibra y matriz generando un efecto de *traba mecánica*. Un análisis completo sobre este comportamiento será presentado en otra publicación.



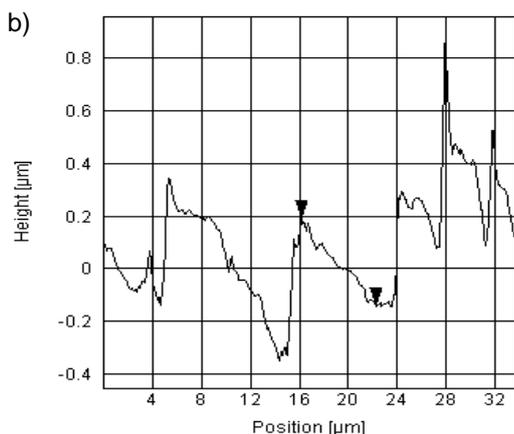


Figura 5. Imagen AFM. (a) Imagen de la topografía de una de las fibras de queratina estudiadas mostrando el detalle de las escamas de la cutícula. (b) Topografía a lo largo de la línea trazada en (a).

4.2. Propiedades mecánicas

La figura 6 muestra la relación resistencia-densidad (σ/ρ) contra deformación unitaria para las fibras de vidrio y de queratina ensayadas. La relación resistencia-densidad es un parámetro importante para el análisis de fibras de refuerzo utilizadas en la fabricación de materiales compuestos. Una relación alta indica un material con bajo peso y buena resistencia. En la figura se observa que la fibra de vidrio posee una relación buena, sin embargo esta fibra posee un comportamiento fundamentalmente frágil, presentando una fractura súbita. Por el contrario, las fibras de queratina poseen una relación resistencia densidad un 20% menor que para las fibras de vidrio, pero a diferencia de estas, las fibras de queratina poseen una alta ductilidad que llega hasta el 60%, siendo este comportamiento similar al presentado por los materiales termoplásticos. Este comportamiento exhibe inicialmente un rango elástico con poca deformación, seguido de una zona de alta deformación plástica bajo una carga aproximadamente constante, y terminando con un incremento de carga previo a la fractura. Este comportamiento es debido al “desenrollamiento” de las cadenas de proteínas de la queratina seguido del rompimiento de enlaces covalentes entre las microfibrillas que finalizan en la ruptura de la fibra. La alta ductilidad de las fibras de queratina (aproximadamente 50%) las hace más tenaces y resistentes a los impactos que las fibras de vidrio, que poseen un porcentaje de elongación a la ruptura de aproximadamente 3%.

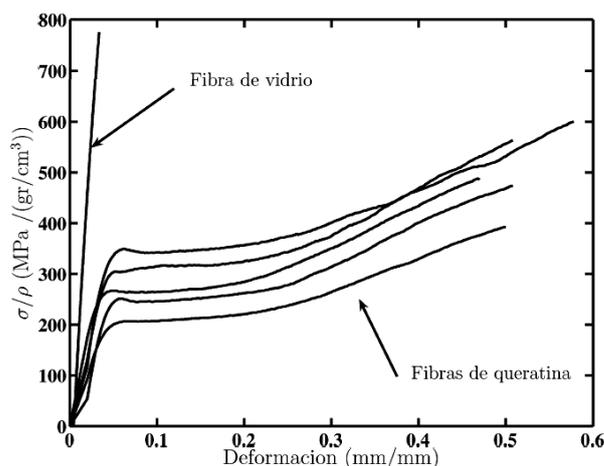


Figura 6. Relación resistencia - densidad obtenida de ensayos de tensión en fibras de vidrio y de queratina.

La tabla 2 presenta los resultados de los ensayos de tensión en las fibras. Las fibras de queratina poseen una resistencia máxima de aproximadamente 1 GPa mientras que la fibra de vidrio alcanza hasta 4 GPa. Esta diferencia a pesar de ser considerable, pierde importancia cuando se analiza la relación resistencia densidad presentada en la figura 6, pues lo que pierden las fibras de queratina en resistencia lo ganan en peso y capacidad de deformación plástica. Cabe mencionar que mediante análisis estadístico de los datos se encontró que los resultados corresponden a una distribución normal con una confiabilidad del 90%.

Muestra	Carga máxima (N)	Elongación (mm/mm)	Esfuerzo máximo (GPa)
Fibra de Queratina	1.03 ± 0.24	0.53 ± 0.07	0.899 ± 0.523
Fibra de Vidrio	0.58 ± 0.15	0.023 ± 0.009	3.6 ± 2.52

Tabla 2. Cuadro comparativo de propiedades mecánicas entre la fibra de queratina y la fibra de vidrio.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este estudio muestra que el comportamiento de las fibras de queratina sometidas a tensión es similar al de un material polimérico termoplástico, evidenciando un estiramiento inicial de las cadenas de queratina hasta que éstas alcanzan alineación completa y se da inicio a la fase plástica en donde finalmente, se da la ruptura del material.

A pesar de que la resistencia mecánica de las fibras de queratina es menor que la alcanzada por las fibras de vidrio, un análisis de la relación resistencia-densidad para los dos tipos de fibras revela que la diferencia entre fibras de vidrio y queratina es de aproximadamente 20%. Este

resultado es alentador en busca de reemplazos a las fibras sintéticas con fibras amigables con el ambiente, ya que las fibras de queratina poseen mayor ductilidad, menor densidad y costo que las fibras sintéticas, lo que las hace susceptibles de utilización en aplicaciones que no requieran altas prestaciones de carga y además requieran de bajo peso.

Éste estudio arroja resultados alentadores en el área del desarrollo de materiales amigables con el ambiente. Esto se hace significativamente importante en un mundo exigente que cada vez con más auge, reúne esfuerzos y experiencia para optimizar procesos y aprovechar residuos con el objetivo de balancear los ciclos productivos y desarrollar nuevas fuentes de recursos al mismo tiempo que se logra una economía sostenible.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores quisieran expresar su agradecimiento a la dirección de investigaciones de la Universidad EAFIT, por su apoyo económico a este proyecto. Al personal del laboratorio de Materiales de la Universidad EAFIT, por su colaboración en la elaboración de pruebas y montajes especiales. Y a los profesores Mauricio Arroyabe y Juan Manuel Jaramillo por su valiosa colaboración con la caracterización mediante AFM de las fibras.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Smith, W. F. (2004) "Ciencia e Ingeniería de Materiales" Mc Graw Hill/Interamericana de España, 3ª Edición, Madrid, Pag: 371-372.
- [2] Saheb, D. N. & Jog, J. P. (1999), "Natural fiber polymer composites: A review" *Advances in Polymer Technology* 18: 351-363.
- [3] Gazan & Bledzki (1997), "The influence of fiber-surface treatment on the mechanical properties of jute-polipropilene composites" *Composites Part A* Vol 28A: 1001-1005.
- [4] Okubo, K. & Fujii, T. & Yamamoto, Y. (2004), "Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties" *Composites Part A* Vol 35: 377-383.
- [5] Rouison, D. & Sain, M. & Couturier, M. (2004), "Resin transfer molding of natural fiber reinforced composites: cure simulation" *Composites Science and Technology* Vol 64: 629-644.
- [6] Liu, W. & Misra, M. & Askeland, P. & Drzal, L. T. & Mohanty, A. K. (2005) *Polymer*, Vol 46: 2710-2721.
- [7] Demir, H y Atikler, U y Balköse, D y Tihminlioglu, F. (2006), "The effect of fibre surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene-luffa fiber composites" *Composites Part A* Vol 37: 447-456.
- [8] Martelli, S. M. & Moore, G. & Silva, S. & Gandolfo, C. & Borges, J. (2006) "Influence of plasticizers on the water sorption isotherms and water vapor permeability of chicken feather keratin films" *LWT - Food Science and Technology*. Vol 39(3): 292-301
- [9] Martínez, A. L. & Velasco, C. & de Icazaa, M. & Castaño, V. M.(2005) "Mechanical properties evaluation of new composites with protein biofibers reinforcing poly(methyl methacrylate)" *Polymer* Vol 46(19): 8233-8238
- [10] Barone, J. R. & Schmidt, W. F. (2005) "Polyethylene reinforced with keratin fibers obtained from chicken feathers" *Composites Science and Technology*. Vol 65(2):173-181.
- [11] Barnes, H. A. & Roberts, G. P. (2000) "The non-linear viscoelastic behaviour of human hair at moderate extensions" *Int. Journal of Cosmetic Science*. Vol 22: 259-264.
- [12] Swift, J. A. (1999) "The mechanics of fracture of human hair at moderate extensions" *Int. Journal of Cosmetic Science*. Vol 21: 227-239.
- [13] Wei, G. & Bushan, B. & Jorgeson, P. M. (2005) "Nanomechanical characterization of human hair using nanoindentation and SEM" *Ultramicroscopy*. Vol 105: 248-266.
- [14] LaTorre, C. & Bushan, B. (2005) "Nanotribological characterization of human hair using atomic force microscopy" *Ultramicroscopy*. Vol 105: 155-175.
- [15] Wei, G. & Bushan, B. & Jorgeson, P. M. (2006) "Nanotribological and nanomechanical characterization of human hair using a nanoscratch technique" *Ultramicroscopy*. Vol 106: 742-754.
- [16] ASTM "Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers" ASTM Standard C 1557-03
- [17] Hearle, J. W. S. (2000), "A critical review of the structural mechanics of wool and hair fibres" *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol 27: 123-138.