

COMPORTAMIENTO EN FRACTURA DE UN FIELTRO DE FIBRA DE VIDRIO

Á. Ridruejo¹, C. González^{1,2}, J. LLorca^{1,2}

¹ Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

E-mail: aridruejo@mater.upm.es

cgonzalez@mater.upm.es

jllorca@mater.upm.es

² Instituto Madrileño de Estudios Avanzados de Materiales (IMDEA-Materiales), C/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

ABSTRACT

The deformation and damage micromechanisms of a glass-fiber non-woven felt were analyzed with a combination of experiments and simulations. Tensile tests were performed on unnotched and notched rectangular specimens to study the physical nature of damage. It was found that fracture was controlled by interbundle bond fracture followed by frictional sliding, leading to the localization of damage in a wide band. A random network model based on finite elements was developed in order to gain a better understanding of the experimental data. The simulations were in very good agreement with the data and contributed to explain features such as the effect of specimen dimensions on the strength of the material and its notch-insensitive behavior.

PALABRAS CLAVE: Modelo micromecánico, fieltros de fibras, daño.

1. INTRODUCCIÓN

Los fieltros de fibras son materiales fabricados a partir de fibras desordenadas que son consolidadas mediante distintos procedimientos, que van desde el entrelazado sencillo de las fibras a procedimientos de unión química o térmica de las mismas. El interés de estos materiales reside en su coste relativamente bajo, sobre todo si lo comparamos con sus equivalentes tejidos. Este tipo de materiales ha venido siendo utilizado por el hombre desde la antigüedad -los fieltros de lana desde hace al menos 3500 años-[1] y con profusión, puesto que el papel convencional no es sino un fieltro de fibras de celulosa [2], pero en los últimos años han recobrado interés tecnológico como consecuencia de nuevas aplicaciones en campos tales como la protección balística, el aislamiento térmico, como capas ignífugas, filtros o geotextiles para el refuerzo de suelos. Este interés se ha visto acrecentado desde un punto de vista más fundamental por la analogía estructural de los fieltros con los tejidos biológicos y las agrupaciones de nanotubos de carbono [3].

Las propiedades mecánicas de los fieltros difieren notablemente de las de los tejidos. Mientras que su rigidez y resistencia son menores, su capacidad de deformación y de absorción de energía es superior. Al deformarse un fieltro entran en juego distintos micromecanismos, como la deformación de cada fibra, su reacomodo mediante rotaciones y desplazamientos dentro del fieltro, la rotura de los enlaces entre fibras, el deslizamiento entre ellas y su fractura. La complejidad del estudio de todos estos procesos ha propiciado la utilización de los métodos numéricos, y en particular,

del método de los elementos finitos, para obtener una mayor comprensión de los mismos.

Las simulaciones llevadas a cabo hasta la fecha se han basado en redes bidimensionales desordenadas (random fiber networks) que desde los trabajos seminales de Yang [4] y posteriormente Rigdahl [5] han venido incluyendo el efecto de distintas combinaciones de propiedades mecánicas de las fibras y de los enlaces entre ellas [6,7,8]. Sin embargo, dichos modelos han debido recurrir a suposiciones y parámetros no siempre bien justificados desde el punto de vista físico. Por otra parte, gran información disponible tiene como origen la industria manufacturera de fieltros, y en consecuencia está orientada a las propiedades del material y sus aplicaciones, lo que hace que desde el punto de vista fundamental existan lagunas en cuanto al conocimiento preciso de los mecanismos de deformación, daño y rotura de este tipo de material. Dicho conocimiento constituye el objetivo principal de este trabajo. Para ello partimos de un fieltro comercial de fibra de vidrio. Siguiendo un proceso constructivo, se caracterizaron las propiedades mecánicas de las fibras individuales y de los haces de fibras. A continuación, se realizó un estudio de la estructura del fieltro, del que se extrajeron probetas de distintos tipos, que posteriormente fueron ensayadas a tracción uniaxial. Finalmente, a partir de la información experimental, se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos para simular el comportamiento del material.

2. MATERIAL

El material estudiado es el fieltro Vetrotex M123, fabricado por Saint Gobain. Este fieltro está compuesto

de fibras de vidrio de tipo E de 15 μm de diámetro y 50 mm de longitud. Las fibras se agrupan en haces de sección rectangular (360 x 60 μm). Cada uno de estos haces, que contiene 120 fibras, está consolidado por un ligante de poliestireno (PS) que recubre las fibras y constituye la unidad estructural del fieltro. El fieltro se conforma mediante la deposición de los haces de fibras sobre un sustrato plano. Las uniones entre los distintos haces de fibras se deben a las propiedades adhesivas del ligante de poliestireno.

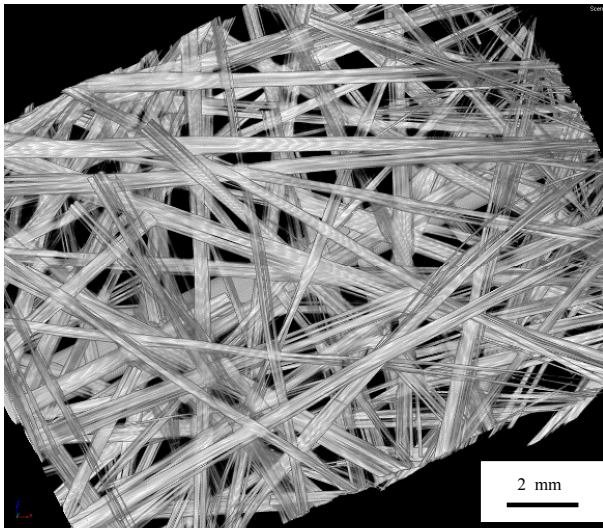


Figura 1. Fieltro Vetrotex M123. Imagen tomográfica

Se efectuaron medidas de la masa del fieltro mediante una balanza electrónica (AND HF 1200G) para hallar la densidad del mismo, que resultó ser de $454 \pm 6 \text{ g/m}^2$, en acuerdo con el valor nominal de 450 g/m^2 proporcionado por el fabricante. Las medidas del espesor del fieltro, realizadas mediante un p lmer ofrecieron un valor de $0.54 \pm 0.02 \text{ mm}$.

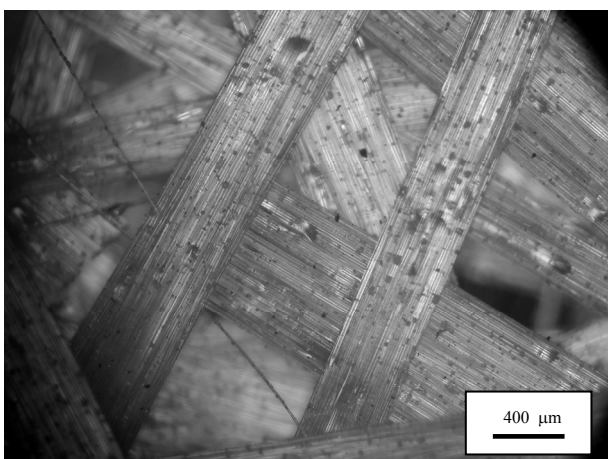


Figura 2. Fieltro Vetrotex M123. Detalle de los haces de fibras

La microestructura del fieltro fue observada mediante técnicas de proyección de perfiles (Nikon V12B) y microscopía óptica convencional (microscopio Nikon

Metaphot), así como mediante técnicas de tomografía computerizada de rayos X. Como puede apreciarse en las figuras 1 y 2, se trata de una estructura estratificada e isotópica en el plano que deriva del proceso de deposición de las fibras, según el cual los haces quedan apoyados sobre los depositados anteriormente, permaneciendo rectos y sin entrecruzarse en la dirección perpendicular al plano del fieltro. Las imágenes así obtenidas permit an su tratamiento digital y fueron utilizadas para hallar la densidad de entrecruzamientos y la distancia libre entre uniones. Este último parámetro es básico para el modelo numérico, y en el caso que nos ocupa tiene un valor de $0.75 \pm 0.02 \text{ mm}$. Asimismo, las medidas provenientes de las medidas de densidad y las tomografías obtenidas indican que el fieltro está compuesto por el apilamiento de tres capas representativas.

3. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

Un estudio completo del material exige la medición de las propiedades mecánicas de los constituyentes del material, partiendo de las fibras y concluyendo con el propio fieltro. Por tanto, en primer lugar se procedió a la extracción de fibras individuales de fibra de vidrio con ayuda de pinzas. Las fibras fueron pegadas a un marco que posteriormente se fijaba a una máquina de tracción. La carga se aplicaba únicamente tras cortar el marco, y quedaba registrada con una célula de carga de precisión $\pm 1 \text{ mN}$ (MTS Nanobionix). Las tensiones ingenieriles se determinaban a partir de dicho registro de fuerza y de los valores del diámetro de la fibra, siempre suponiendo una sección circular. A su vez, las deformaciones se determinaban como el cociente de la elongación de la fibra dividida por su longitud inicial.

En un segundo nivel organizativo, se realizaron ensayos encaminados a la determinación de la resistencia de los haces de fibras de vidrio y de los enlaces entre ellos. El problema con este tipo de ensayos consistía en la determinación precisa de la sección transversal de los haces y en la falta de uniformidad de las muestras enlazadas. Se seleccionaron uniones de fibras alineadas para evitar la aparición de pares de fuerzas, pero aún así era difícil conocer el área exacta de solape. Para reducir en lo posible la dispersión estadística, se realizó un número relativamente grande de ensayos. Finalmente, se extrajeron del rollo muestras rectangulares del material para la realización de ensayos de tracción simple según la norma EN ISO 10319. Las muestras se introducían en dos mordazas diseñadas al efecto y recubiertas de goma para evitar dañar el material. Los ensayos se llevaron a cabo en una máquina universal electromecánica (Instron 1122) equipada con una célula de carga de 5 kN con control de desplazamiento a una velocidad de 0.2 mm/s. Con objeto de estudiar sistemáticamente el posible efecto de la anchura o altura de la probeta, se recortaron muestras de varios tamaños, en particular de 100 mm de altura y 40, 60, 80, 100 y 200 mm de anchura, así como muestras de 100 mm de anchura y 100, 200 y 400 mm de altura. Finalmente, también se prepararon muestras de 200 x 200 mm². En

los fieltros de 100 x 200 mm² se estudió la sensibilidad a entalla de los fieltros, para lo cual se introdujeron mediante corte con cuchilla entallas centrales de longitud equivalente al 20%, 40% y 60% de la anchura de la probeta.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Fibras individuales

Las fibras individuales extraídas y ensayadas muestran un comportamiento lineal hasta fractura, con una dispersión relativamente grande característica de los materiales frágiles. Los valores obtenidos para el módulo elástico, tensión de rotura y deformación de rotura, que se muestran en la Tabla 1, están en buen acuerdo con los usuales en la literatura [9].

Tabla 1. Propiedades de las fibras de vidrio.

E_f (GPa)	σ_f (GPa)	ϵ_f (%)
72 ± 2	1.7 ± 0.2	2.3 ± 0.3

4.2. Haces de fibras y uniones

Se llevaron a cabo 16 ensayos para medir las propiedades de los haces de fibras. Las curvas carga-desplazamiento eran lineales hasta rotura. Dicha rotura se producía con un valor de carga de 25 ± 6 N. Este valor ha de ser comparado con el obtenido a partir de los 20 ensayos sobre haces unidos, que proporcionó una carga de rotura de 1.2 ± 0.2 N, lo que nos indica que la resistencia de los haces es mucho mayor que la de las uniones y que por tanto el mecanismo dominante en la fractura del fieltro es la rotura de las uniones entre haces de fibras.

4.3. Fieltrros no entallados

La Figura 3 muestra el comportamiento en tracción de un fieltro no entallado de fibra de vidrio. A pesar de la dispersión inherente al material, todas las curvas siguen el patrón mostrado, con la carga creciendo linealmente hasta alcanzar un pico agudo.

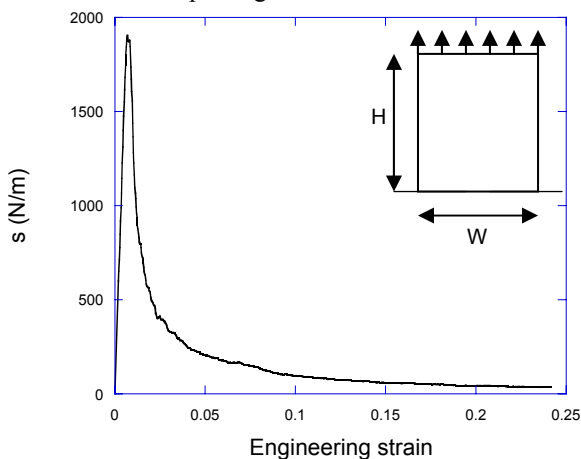


Figura 3. Curva tensión-deformación característica del fieltro M123 ensayado a tracción.

Este pico se corresponde con el inicio de la localización, que se da para una deformación aproximadamente igual al 0.5% por pérdida de adhesión entre los haces de fibras. Los enlaces que hasta entonces no habían soportado carga empiezan a hacerlo debido a los reajustes en el fieltro. A partir del momento en el que estas uniones se rompen, los haces comienzan a deslizar entre sí, y por tanto la resistencia remanente es consecuencia de la fricción entre éstos.

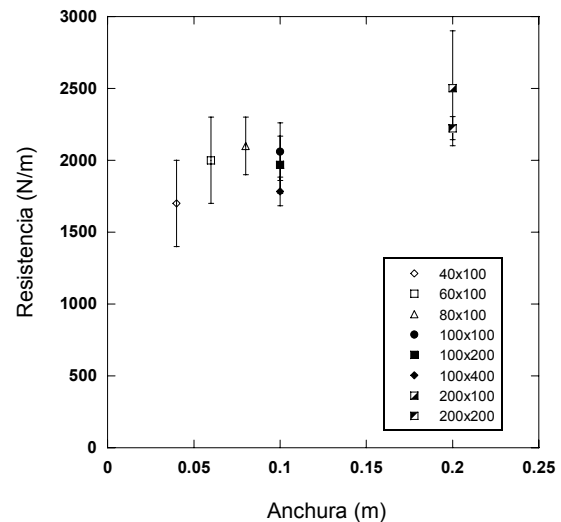


Figura 4. Resistencia del fieltro en función del tamaño.

En la Figura 4 podemos apreciar la influencia del tamaño sobre la resistencia del material. Para una altura dada, la resistencia se incrementa con la anchura, lo que puede interpretarse en términos de efecto de borde, puesto que los extremos de los haces carecen de tensión en la frontera libre. Lógicamente, la importancia de este efecto decae al aumentar la anchura de probeta. Por otra parte, una vez fijada la anchura, nos encontramos con que la resistencia disminuye con la altura de la probeta. Este efecto, más débil que el de la anchura, puede explicarse por la naturaleza frágil de las uniones entre fibras. La resistencia de una unión determinada dependerá de su posición, orientación y conectividad. Como hemos visto, esta variabilidad en la resistencia de los enlaces hace que la deformación se localice en una banda “débil”. La probabilidad de aparición de una banda más débil aumenta con la altura de la probeta. Pese a que un análisis probabilístico de Weibull no ha sido llevado a cabo por el limitado rango de tamaños accesibles, la hipótesis de la “banda más débil” tiene un sólido soporte experimental, como se mostrará después.

4.4. Fieltrros entallados

Como se ha mencionado antes, la sensibilidad a entalla de los fieltros se estudió en muestras de 100 x 200 mm² dotadas de entallas centrales cuyo tamaño a_0 era equivalente al 20%, 40% y 60% de la anchura. Las curvas tensión-deformación correspondientes a las distintas entallas mantenían su forma, indicando así que no se modificaban los procesos de daño. En general, la resistencia del material disminuye con la longitud de la

entalla, pero la dispersión no lo hace, y de hecho algunos fieltros con entallas del 20% y del 40% no localizaban la fractura en la sección de la entalla y mostraban valores anómalamente altos de resistencia, lo que apoya claramente la hipótesis de la “banda más débil”.

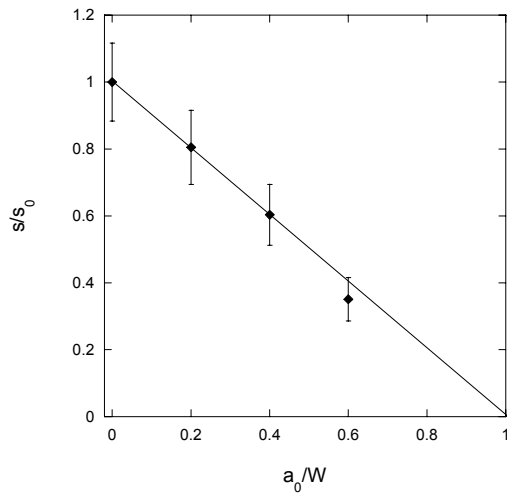


Figura 5. Resistencia del fieltro en función del tamaño de entalla

Por otro lado, la naturaleza frágil de los enlaces haría esperar un comportamiento sensible a entalla, en el que la resistencia fuera inferior a la calculada sin considerar concentración de tensiones, pero sin embargo, la resistencia demostró ser proporcional al ligamento, según la expresión

$$\frac{s}{s_0} = 1 - \frac{a_0}{W}, \quad (1)$$

donde s es la tensión de rotura, s_0 es la tensión de rotura correspondiente a las muestras no entalladas, a_0 es la longitud de la entalla y W es la anchura de la probeta, tal y como se observa en la Figura 5.

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO NUMÉRICO

Los detalles sobre la generación de malla están recogidos en una referencia anterior [10]. Sucintamente, se comenzó por delimitar un área rectangular de anchura W y una altura H , de dimensiones idénticas a las muestras reales previamente ensayadas. El programa de generación utiliza como inputs el número de fibras a depositar y la longitud de las mismas. Las fibras se construyen a partir de pequeños segmentos. El algoritmo comienza generando un punto con las coordenadas (x_1, y_1) aleatorias del primer punto del primer segmento, junto con su orientación θ_1 , también aleatoria. Conocidas la longitud y orientación del segmento, el programa coloca sucesivamente los segmentos hasta agotar la longitud de la fibra. Una vez completada la primera fibra, de nuevo se generan aleatoriamente las coordenadas del punto inicial de la segunda fibra junto con su orientación. El proceso se repite hasta el final de la fibra N -ésima. Si durante el proceso de deposición de segmentos de una fibra se alcanzara alguno de los contornos del área del fieltro, la

colocación del siguiente segmento se hace en el lado opuesto del recinto.

La estructura estratificada del fieltro supone una complicación, puesto que un modelo puramente bidimensional no puede mimetizar exactamente dicha estructura. Nuestro objetivo es, pues, el de encontrar una capa representativa bidimensional que reproduzca fidedignamente las propiedades mecánicas del fieltro. Posteriormente será preciso escalar la respuesta según el número de capas que contenga nuestro fieltro. Siguiendo a Kallmes y Corte [11], el parámetro de distancia libre medido $l_s = 0.75 \pm 0.02$ mm, que por su modo de obtención (dispositivos con pequeña profundidad de campo) se refiere a la densidad de una monocapa estructural, nos proporciona una densidad $\rho = 2.1 \text{ mm}^{-1}$, lo que para el tamaño de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ supone aproximadamente una longitud total depositada de 41900 mm, equivalente a 836 fibras de 50 mm, con una estimación de 27800 uniones totales, como se aprecia en la Figura 6.

Para discretizar la malla identificamos cada segmento como un elemento viga, tomando sus puntos inicial y final como nodos. Se ha optado por elementos viga de Timoshenko (elementos B21 de ABAQUS). En la definición de las propiedades de la sección se utilizaron las dimensiones medidas de los haces de fibras. El material del elemento viga sigue una ecuación constitutiva elástica lineal caracterizada a partir de las propiedades del material real (fibra de vidrio): un módulo elástico $E = 70 \text{ GPa}$, un coeficiente de Poisson $\nu = 0.2$ y una densidad de 2.5 g/cm^3 . Para la simulación de las uniones entre vigas se han utilizado elementos conectores sin masa (ABAQUS *connector elements CONN2D2*). El algoritmo compara las distancias entre nodos correspondientes a distintas fibras y coloca un conector cuando dicha distancia está por debajo de determinado umbral.

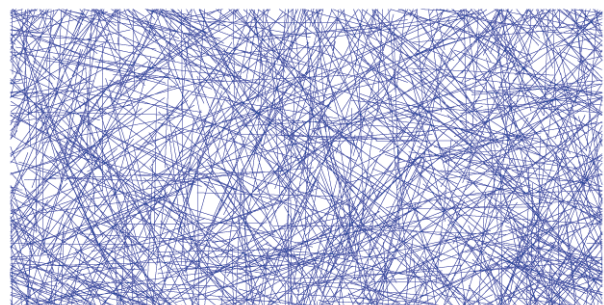


Figura 6. Modelo geométrico del fieltro de fibra de vidrio. Malla sin deformar.

Dada la arquitectura del fieltro, con haces de fibras muy rígidos y resistentes en comparación con las uniones, podemos descartar la ruptura de los haces de fibras y suponer que la rotura del fieltro se produce por la rotura de las uniones entre ellos. Para modelar este proceso se han utilizado un tipo de comportamiento de los conectores basado en la fricción entre haces de fibras. Se supone a las fibras sometidas a una fuerza N normal al plano del fieltro. El programa ABAQUS tiene

definido internamente mediante un pseudopotencial un criterio de deslizamiento de tal modo que cuando las fuerzas tangenciales (en el plano del fieltro) son inferiores al producto del coeficiente de fricción por la normal, el conector se comporta de modo análogo al caso anterior, siguiendo una relación lineal entre la fuerza tangencial ejercida sobre el conector y el desplazamiento relativo de sus nodos. Cuando las fuerzas tangenciales superan dicho umbral (1.2 N, valor experimental de rotura de las uniones) los nodos empiezan a deslizar penalizados con una fuerza de valor μN . En el modelo se toma $\mu = 0.5$, correspondiente al deslizamiento poliestireno-poliestireno [12]. El efecto del debilitamiento del enlace ha sido tenido en cuenta mediante una curva de decrecimiento bilineal de la fuerza normal, de tal modo que su valor se reduce a una décima parte cuando la fibra desliza una distancia equivalente a su anchura (parámetro de ajuste).

Las condiciones de contorno prescritas impedían el movimiento de los nodos de la frontera inferior del fieltro en las direcciones horizontal y vertical e imponían una velocidad de desplazamiento vertical constante en los nodos de la frontera superior de un valor tal que los experimentos virtuales se mantuvieran en régimen cuasiestático, esto es, que la energía cinética fuera despreciable frente al trabajo total, la energía elástica almacenada y la disipada por daño o fricción.

Las simulaciones fueron llevadas a cabo con el programa ABAQUS Explicit (versión 6.8) en modo de doble precisión.

5. RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

5.1. Fieltrros no entallados

En la Figura 8 se muestra cómo el modelo es capaz de seguir el comportamiento experimental del fieltro.

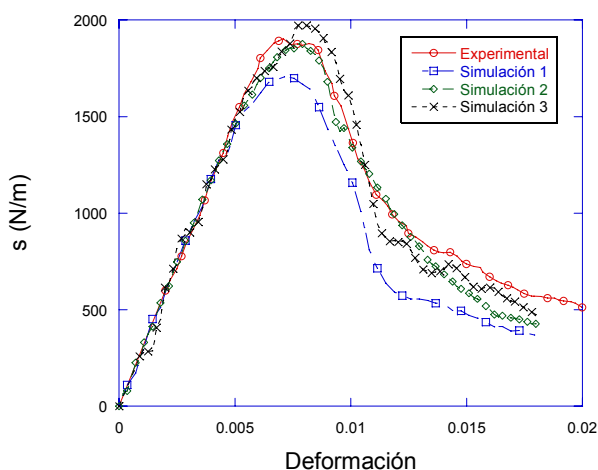


Figura 8. Curvas tensión-deformación. Comparación entre curva experimental y tres realizaciones numéricas

No sólo es relevante que el modelo ofrezca buenos valores tanto para el módulo elástico y para la resistencia del material –puesto que la dispersión

experimental es elevada– sino que sea capaz de predecir el comportamiento post-pico hasta las últimas etapas de deformación, cuando el fieltro pierde su capacidad de transmitir carga. Los resultados para distintos tamaños se pueden observar en la tabla 2.

Tabla 2. Efecto del tamaño sobre la resistencia del fieltro.

Anchura (mm)	Altura (mm)	Experimenta l (kN/m)	Simulació n (kN/m)
100	100	2.1 ± 0.2	2.04 ± 0.06
100	200	2.0 ± 0.2	1.83 ± 0.09
200	100	2.5 ± 0.4	2.2 ± 0.1

De nuevo, el modelo captura adecuadamente tanto el efecto de la anchura como el de la altura sobre la resistencia del material sin recurrir a ningún parámetro de ajuste (que sí entra en el comportamiento post-pico).

5.2. Fieltrros entallados

El estudio numérico se realizó, al igual que en el caso experimental, sobre fieltrros de $100 \times 200 \text{ mm}^2$ a los que se les introducía una entalla a_0 igual al 20%, 40% y 60% de su anchura. En el régimen elástico, las tensiones se canalizaban a través de los ligamentos laterales, con las regiones por encima y por debajo de la entalla descargadas (Figura 10). Sin embargo, la concentración de tensiones en la punta de la entalla era limitada ya que los haces de fibras en los que se localiza la tensión la transfieren a zonas más alejadas. Por tanto, las tensiones en los ligamentos son bastante homogéneas incluso bajo carga máxima, lo que conduce a un comportamiento insensible a entalla aun cuando el material es frágil desde el punto de vista de resistencia y tenacidad. Dicha insensibilidad a entalla, también reproducida por el modelo, se muestra en la Figura 9, donde se superponen los resultados numéricos y experimentales.

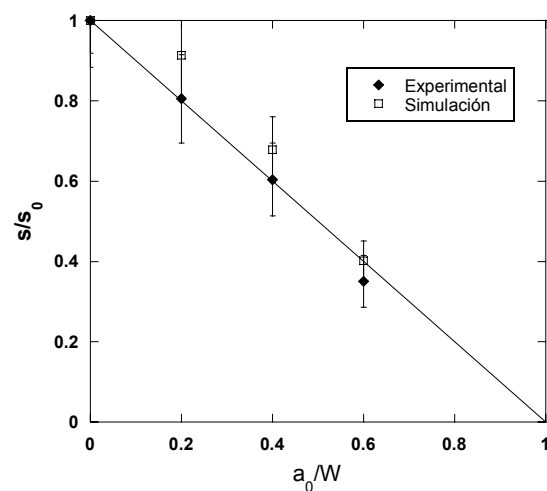


Figura 9. Predicción numérica del efecto de entalla. La línea corresponde a un comportamiento insensible a entalla ideal.

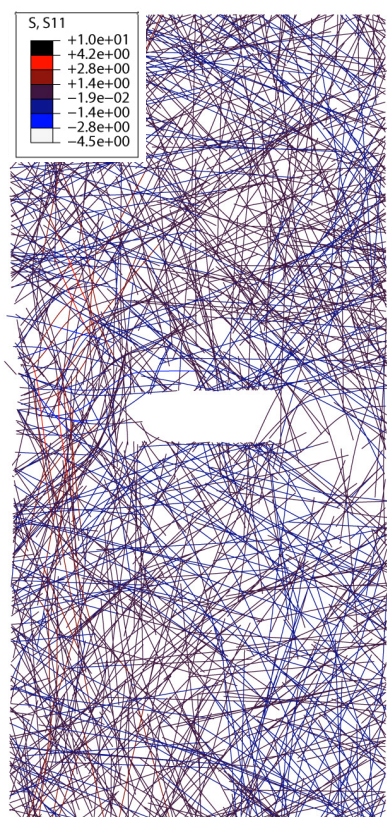


Figura 10. Simulación de la fractura de un fieltro con entalla central $a_0/W=0.4$. Se representa la tensión principal en el haz de fibras (MPa).

Desde el punto de vista de la localización, una vez alcanzado el máximo de carga, una rotura a gran escala de uniones entre haces de fibras conlleva la localización de la deformación en una banda cuyo aspecto es muy similar al observado en los experimentos. La carga se transfiere por fricción en dicha región hasta la pérdida total de cohesión entre los haces de fibras (Figura 10).

6. CONCLUSIONES

Se han estudiado los mecanismos de deformación y rotura de un fieltro de fibra de vidrio mediante ensayos de tracción y simulaciones numéricas. El daño en el material se produce por la rotura de las uniones entre los haces de fibras, frágiles individualmente pero que no conducen a la rotura inmediata del material. El reajuste de los haces de fibra y la disipación friccional de energía hacen que el material mantenga cierta capacidad de transmisión de carga hasta su fallo final. La fractura se localiza en una banda que se desarrolla a lo largo de un “camino de menor resistencia” según la estructura particular de cada muestra de fieltro. Se ha establecido que existe un efecto de la anchura y de la altura sobre la resistencia del material y se ha concluido que en las escalas de estudio el fieltro presenta insensibilidad a entalla por la aparición de bandas débiles y a la limitada concentración de tensiones debida a la estructura poco tupida del material.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a Saint Gobain Vetrotex el suministro de material y al Gobierno de la Comunidad de Madrid y el Ministerio de Ciencia e Innovación su apoyo financiero a través de los programas ESTRUMAT-CM (MAT/0077) y MAT2006-2602, respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] Burkett, M. *The Art of the Felt Maker* Titus Wilson & Son Ltd., 1979
- [2] H.L. Cox, *British Journal of Applied Physics*, **3**, 72-79, 1952.
- [3] L. Berhan, Y.B. Yi, A.M. Sastry, E. Munoz, M. Selvidge and R. Baughman, *Journal of Applied Physics*, 95-8 (2004) 4335-4345
- [4] C.F. Yang. *Plane modelling and analysis of fiber systems*. Ph.D. Thesis. U. of Washington, 1975.
- [5] M. Rigdahl, B. Westerlind y H. Hollmark. *Journal of Material Science*, 19 (2004) 3945-3952, 1984.
- [6] C. A. Bronkhorst, *Int. J. of Solids and Structures*, 40 (2003) 5441-5454
- [7] S. Heyden, Tesis Doctoral. Lund University, 2000.
- [8] J. A. Åström y K.J. Niskanen, *Europhys Lett.*, 21, 557-562 (1993).
- [9] K. K. Chawla, *Fibrous Materials*, Cambridge University Press, 1998.
- [10] A. Ridruejo, C. González, J. LLorca *Anales de Mecánica de la Fractura*, 26, 394-400 (2009).
- [11] O. Kallmes, H. Corte, *Tappi*, **43**, 737-752, 1960.
- [12] http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm
- [13] M. Á. Ramos Carpio. *Ingeniería de los Materiales Poliméricos*. Fundación para el Fomento de la Innovación Industrial, 2007
- [14] Vetrotex Chopped Strand Mats. Vetrotex Saint Gobain. http://www.vetrotexeurope.com/products/re_chopstrmat.html , 2005