EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE ARCILLA ROJA REFORZADA CON FIBRAS DE ACERO

Maryory Gómez Botero [1, 2], Claudia Álzate [1, 2], Alexander Márquez [2], Franklin Jaramillo[1, 2], J. William Restrepo [3]*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de *la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* (*RLMM*). Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales 2009; **S1** (2): 561-573

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO MECÁNICO DE ARCILLA ROJA REFORZADA CON FIBRAS DE ACERO

Maryory Gómez Botero [1, 2], Claudia Álzate [1, 2], Alexander Márquez [2], Franklin Jaramillo[1, 2], J. William Restrepo [3]*

1: Grupo de Corrosión y Protección, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia
2: Grupo de Ciencia e Ingeniería de Materiales Compuestos, Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia
3: Grupo Productividad hacia la Competitividad, Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín, Colombia

** E-mail: mgomezb@udea.edu.co*

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009
Disponible en: *www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html*

Resumen

La alta fragilidad de los materiales cerámicos, constituye un problema que limita sus aplicaciones estructurales. Esto ha conducido a que adquieran gran importancia los estudios orientados hacia la utilización de materiales dúctiles como refuerzo para aumentar las prestaciones de matrices cerámicas. En el presente estudio se reforzaron matrices cerámicas de arcilla roja con fibras de aceros bajo carbono e inoxidable, y para efectos de comparación también se estudiaron las matrices sin refuerzo. Las propiedades mecánicas de las fibras se evaluaron mediante pruebas de tracción, mientras que los materiales compuestos fueron sometidos a pruebas de flexión, la unión fibra-matriz se analizó por SEM y la composición química elemental de la pasta cerámica se estudió mediante EDS. Además se determinaron las propiedades físicas de contracción y absorción del material obtenido. El material compuesto obtenido mostró ductilidad mejorada respecto a la pasta cerámica sin refuerzo, sin embargo los productos de corrosión formados en la superficie de las fibras a la temperatura de cocción de la arcilla, inducen tensiones que pueden dar lugar a la formación de eventuales grietas, disminuyendo los valores de resistencia a la flexión del compuesto. Aun así, se encontró una fuerte unión fibra-matriz en el material compuesto obtenido.

Palabras Claves: *Fibras de acero, Arcilla roja, Materiales compuestos, Materiales de construcción.*

Abstract

The high brittleness of ceramic materials constitutes a problem that limits its structural applications. This has led that the studies about the use of ductile materials as reinforcement to increase the performance of ceramic matrixes get great importance. In the present study ceramic matrixes of red clay were reinforced with low carbon and stainless steel fibers, comparing their performance regarding ceramic matrixes without reinforcement. Mechanical properties of the fibers were evaluated by means tensile tests, whereas the composite materials were submitted to flexion tests, the fiber-matrix bond was analyzed by SEM and elemental chemical composition of the ceramic paste was studied by means of EDS. Besides, physical properties of contraction and absorption of the obtained material were determinated. The composite material obtained showed improved ductility with regard to the ceramic paste without reinforcement, however the corrosion products formed on the fibers surface at the baking temperature of the clay, generate stresses which can give place to the formation of possible cracks, reducing the flexion resistance values of the composite. Nevertheless, it was found a strong fiber-matrix bond in the composite material obtained.

Keywords*: Steel fibers, Red clay, Composite materials, Construction materials.*

INTRODUCCION

La arcilla roja ha sido utilizada como materia prima en la industria de la construcción por miles de años y actualmente sigue siendo un material de construcción de gran uso para la fabricación de ladrillos estructurales y de enchape, baldosas, tejas, etc. Es un material económico, ambientalmente amigable y de gran disponibilidad y de fácil acceso [1-3].

Los materiales compuestos de matriz cerámica

constituyen actualmente un campo de estudio que busca mejorar las propiedades y características que limitan las aplicaciones de los cerámicos monolíticos, como es el caso de la alta fragilidad que exhiben. En contraste, los materiales compuestos de matriz cerámica (CMCs) muestran mejores propiedades mecánicas, por lo que sus aplicaciones vienen mostrando un rápido crecimiento [4].

En estudios previos se ha reportado que las fibras proveen flexibilidad a estructuras obtenidas a partir de lodos, lo que motiva la investigación sobre las posibilidades de utilizar fibras como refuerzo de componentes base arcilla roja para mejorar sus propiedades mecánicas [5].

Las fibras inhiben el crecimiento de grietas durante el procesamiento de los componentes favoreciendo las propiedades mecánicas del material fibrorreforzado, entre las que se destacan ductilidad, tenacidad, resistencia a la compresión y a la tracción. Adicionalmente, las fibras de refuerzo ayudan a conservar la geometría de componentes fabricados en base arcilla roja, debido a que su orientación aleatoria previene la contracción y posterior agrietamiento del componente fibrorreforzado en todas las direcciones.

En este orden de ideas, el propósito del presente trabajo fue estudiar las propiedades mecánicas y físicas de probetas de arcilla roja reforzadas con fibras de acero bajo carbono y de acero inoxidable con diferentes relaciones longitud/diámetro.

1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

1.1 Materias primas para la matriz

El tipo de matriz utilizada en el presente estudio está constituida de una mezcla de arcilla, arenilla y limo; las proporciones no se indican debido a que hacen parte de información confidencial de la empresa que suministró la mezcla. En la tabla 1 se muestra el contenido de humedad y las pérdidas por calcinación de cada una de las materias primas utilizadas para obtener la pasta cerámica de arcilla roja.

Tabla 1. Características de las materias primas utilizadas para obtener la matriz.

Carácterísticas (%)	*Arcilla*	*Arenilla*	*Limo*
Humedad	0,95	0,41	0,53
Pérdida por calcinación	10,24	8,12	11,10

1.2 Fibras de acero

Se utilizaron fibras de acero de bajo carbono Dramix®, producidas a partir de varillas de acero estiradas en frío, estas fibras se utilizan principalmente para el refuerzo de concretos, morteros y otros materiales compuestos. Las fibras de acero de bajo carbono con un diámetro promedio de 750 μm, se cortaron en longitudes de 7, 10 y 15 mm. También se utilizaron fibras de acero inoxidable onduladas de diferentes diámetros y longitudes, fabricadas en acero AISI-SAE 304 con diámetros promedio de 130 y 230 μm, que se cortaron a las mismas longitudes de las fibras de acero bajo carbono. Todas las fibras fueron analizadas mediante microscopía óptica (Nikon eclipse E200) y fueron sometidas a ensayos de tracción en una máquina universal de ensayos INSTRON, modelo 3366. Estas pruebas fueron realizadas utilizando una longitud calibrada (zona de ensayo) de 30 y 38 mm para las fibras de acero bajo carbono e inoxidable 304, respectivamente, tomando como referencia la línea media de desplazamiento de la máquina de ensayos. La velocidad de ensayo se ajustó para que la fractura ocurriera en 30 s aproximadamente, de acuerdo a las directrices de la norma ASTM C1557-03 [6].

La densidad de las fibras fue hallada a partir del volumen calculado con sus dimensiones (longitud y diámetro) y su masa obtenida en una balanza analítica marca Mettler Toledo, modelo AB204. Este método se considera válido debido a que se encontró una variación mínima en el diámetro de las fibras. Los valores de densidad hallados fueron de 7,7 g/cm^3 para las fibras de acero de bajo carbono y de 7,5 g/cm^3 para las fibras de acero inoxidable.

1.3 Procesamiento del material compuesto

Para elaborar los compuestos fibrorreforzados, se ajustó la humedad de la mezcla (arcilla, arenilla y limo) preparada para la matriz a un valor de 13 % y se le adicionó 2 % en peso de fibras a la pasta cerámica; esta mezcla se homogenizó mediante mezclado manual. Con esta mezcla se conformaron probetas en forma de placas de 15mmx40mmx100mm, mediante prensado uniaxial aplicando una presión de 48 MPa durante 30 segundos. Para efectos de validar la reproducibilidad de los resultados se elaboraron 4 probetas para cada tipo de fibra estudiada y 4 probetas de pasta cerámica sin refuerzo, como referencia, para efectos de comparación, utilizando

un total de 40 probetas.

1.4 Estudio de las propiedades del material compuesto y de la pasta cerámica sin reforzar

Una vez conformadas las probetas se secaron sosteniéndolas a 50 ºC durante 24 horas, la cocción se realizó a 1000 ºC durante 3 horas con una tasa de calentamiento de 100 ºC/h y el enfriamiento se hizo dentro del horno. A todas las probetas se les midieron propiedades físicas de contracción y porcentaje de absorción de acuerdo a la norma ASTM C67-07 [7]. En el mismo equipo que se realizaron las pruebas de tracción de las fibras, se hicieron pruebas de flexión de las probetas con y sin refuerzo aplicando una velocidad de 2.5 mm/min, con una distancia entre apoyos de 85 mm. Se realizaron análisis mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de cortes transversales de las probetas y de las superficies de falla obtenidas en los ensayos de flexión. La composición química elemental de la matriz cerámica fue analizada mediante espectroscopia de dispersión de energía de rayos X (EDS) en un equipo Jeol JSM-5910LV.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1 Análisis de las fibras de acero

En la Figura 1 se muestran todas las fibras estudiadas, indicando su respectiva longitud y diámetro.

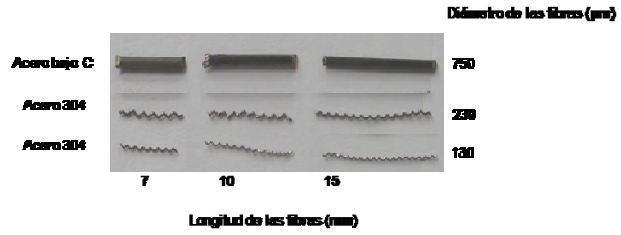
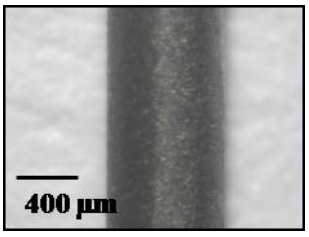


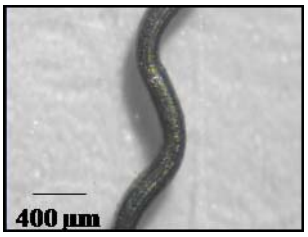
Figura 1. Imagen adquirida a simple vista de todos los tipos de fibras utilizadas.

En la Figura 2 se muestran en mayor detalle las imágenes adquiridas en el microscopio óptico para los tipos de fibras utilizadas, indicando sus diámetros. Se observa que las fibras de acero bajo carbono son lisas (Fig. 2a), mientras que las fibras de acero inoxidable son onduladas en toda su longitud (Figs. 2b y 2c) lo que permite una mayor adhesión de estas fibras con la matriz de pasta cerámica. La microscopía óptica permitió determinar el diámetro de las fibras, los cuales se verifican con la escala de las imágenes.

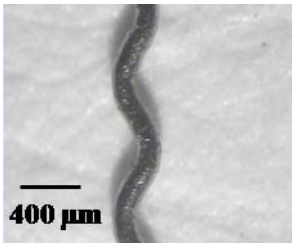
En la tabla 2 se presentan las respectivas relaciones de longitud/diámetro para cada una de las fibras utilizadas en el estudio. Evidentemente, la fibra que presenta el mayor valor (115,38) de esta relación es la de acero inoxidable de longitud 15 mm y diámetro 130 µm, mientras que la menor relación la presenta la fibra de acero bajo carbono de 7 mm de longitud (9,33).



(a) Acero bajo carbono diámetro = 750 µm



b) Acero inoxidable 304 diámetro = 230 µm



(c) Acero inoxidable 304, diámetro = 130 µm.

Figura 2. Imágenes de microscopía óptica de las diferentes fibras estudiadas.

Tabla 2. Relaciones longitud/diámetro de las diferentes fibras utilizadas.

Longitud (µm)	*Acero bajo carbono*	*Acero inoxidable 304*	
	Relación longitud/diámetro (l/d)		
7000	9,33	30,43	53,85
10000	13,33	43,48	76,92
15000	20	65,22	115,38
Diámetro (µm)	750	230	130

Para las pruebas de tracción de las fibras se utilizaron mordazas con dientes muy finos a fin de evitar el deslizamiento de las mismas o la falla en la zona de agarre. En todas las pruebas realizadas la fractura ocurrió a una distancia no inferior a 1/3 de la longitud de prueba desde el agarre. La imagen de la Figura 3 muestra la forma como fueron sujetadas las fibras para el ensayo.

Los resultados de las pruebas de tensión de las fibras, se muestran en la gráfica de la Figura 4, se puede observar que cuanto mayor es el diámetro de las fibras mayor es su resistencia a la tensión. Las fibras de acero bajo carbono exhiben los valores más altos de resistencia a la tensión, en general, los valores de resistencia a la tensión encontrados en estas fibras (759-968 MPa para las fibras de acero 304 y 1300 MPa para el acero bajo carbono) son altos comparados con los reportados en la literatura para estos materiales en volumen.

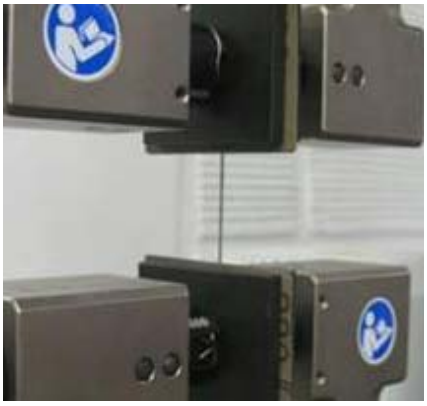


Figura 3. Sujeción de las fibras de acero durante las pruebas a la tensión.

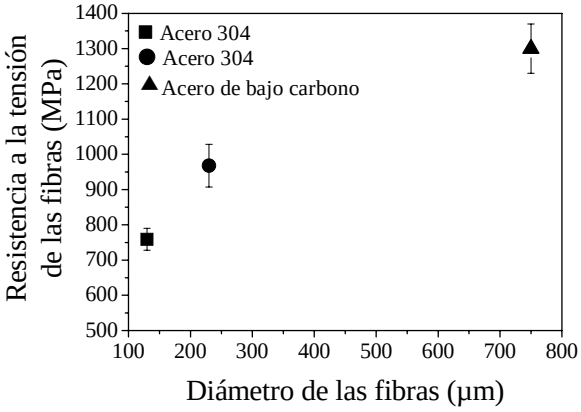


Figura 4. Resistencia a la tensión de las fibras de acero.

2.2 Caracterización del material compuesto y de la pasta cerámica sin reforzar

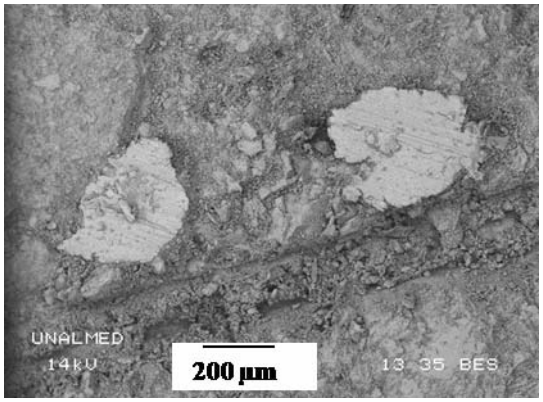
En la Figura 5 se presentan dos imágenes SEM que corresponden al material compuesto reforzado con fibras de acero inoxidable. En la Fig. 5a, en tono más claro se observa la sección transversal de dos fibras embebidas en la matriz cerámica, se aprecia buena continuidad física entre el refuerzo y la matriz; no se observa la presencia de espacios vacíos entre estos materiales, lo que sugiere un buen agarre de la fibra en la matriz.

La sección transversal de las fibras (Fig. 5a) no se observa circular debido a que durante la operación de corte con una herramienta manual, se generaron rebabas de material que enmascaran la geometría real de la sección.

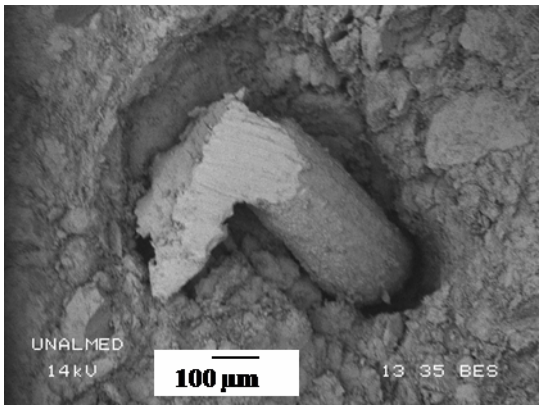
La Fig. 5b muestra el aspecto de la sección de falla formada durante la prueba de flexión, se observa una fibra de acero y la separación física que se generó, entre el refuerzo y la matriz cerámica durante el ensayo. El hecho de que la fibra no se desprenda completamente de la matriz, permite inferir el buen anclaje que hay entre la fibra y la matriz hacia el interior de la probeta.

En la Figura 6 se muestra una imagen SEM de la superficie de la pasta cerámica cocida sin refuerzo, sobre esta superficie se realizó análisis de composición elemental mediante EDS; los resultados dejan en evidencia la presencia de silicio (Si), oxígeno (O) y aluminio (Al) como elementos predominantes en la matriz cerámica. Los elementos hierro (Fe), sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg) y manganeso (Mn) están en menor proporción y se revela la presencia de titanio (Ti) en muy baja concentración; estos elementos encontrados coinciden con la composición de arcillas rojas reportadas en la literatura [8-13].

En la Figura 7 se presentan las gráficas de resistencia a la flexión en función de la deflexión de las probetas con y sin refuerzo, indicando la longitud de cada una de las fibras utilizadas. Estos ensayos se realizaron por cuadruplicado, debido a la buena reproducibilidad de los resultados se muestra una sola gráfica de cada tipo de placa ensayada. En todas las gráficas presentadas en esta figura se observa un comportamiento lineal de los materiales hasta aplicar un esfuerzo superior a su resistencia a la fractura (punto más alto de las gráficas) la declinación de la gráfica indica la ocurrencia de la fractura del material.



(a)



(b)

Figura 5. Imágenes de microscopía electrónica de barrido del material compuesto: (a) corte de una sección y (b) aspecto de una sección después de la falla por flexión.

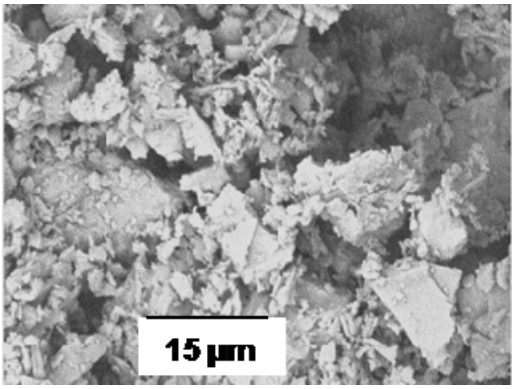
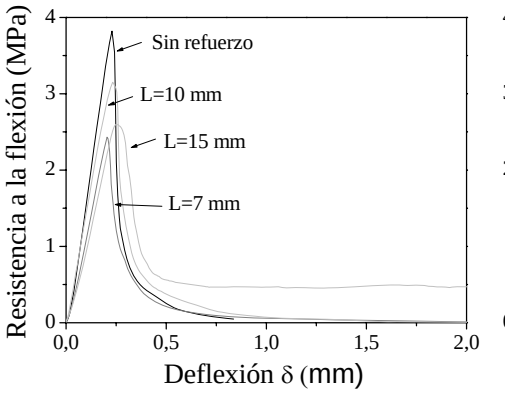


Figura 6. Imagen superficial de la pasta cerámica cocida sin refuerzo.

En el caso de la arcilla sin refuerzo, la fractura fue abrupta, se partió en dos la probeta, comportamiento típico de los materiales frágiles como los cerámicos. En las probetas reforzadas con fibras, no se produjo una fractura abrupta, se observó la fractura en la matriz cerámica, mientras las fibras mantenían unidas las partes de la probeta, por tanto para este material compuesto este valor corresponde a la fluencia a la flexión, de ahí que la evolución de estas gráficas del material reforzado no muestran una caída abrupta como sucede con el material sin refuerzo. Por lo tanto, la diferencia en el comportamiento del material (reforzado y sin reforzar) después de la fractura se debe al desempeño de las fibras de acero. En la Fig. 7a se observa que la placa sin refuerzo exhibió mayor resistencia a la flexión que las probetas reforzadas con las fibras de acero bajo carbono, esto es debido a que al someter la placa reforzada a la temperatura de cocción de 1000 ºC, en la superficie de las fibras se formaron productos de corrosión, los cuales ejercen presión sobre la matriz cerámica generando tensiones y en algunos casos agrietamiento de la misma, afectando de esta manera el desempeño mecánico del material compuesto resultante. De las tres longitudes de fibra utilizadas, la de 10 mm es la que menos disminuyó la resistencia a la flexión, mientras que con la de 15 mm la gráfica sugiere un comportamiento más similar al de un material ligeramente más dúctil.

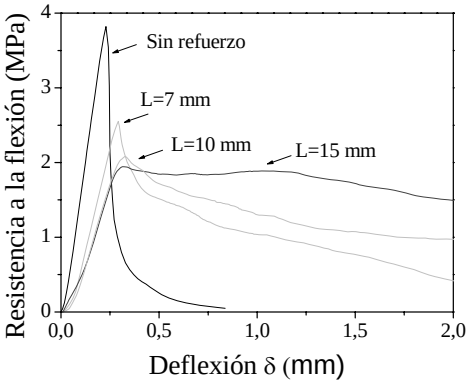


(a)

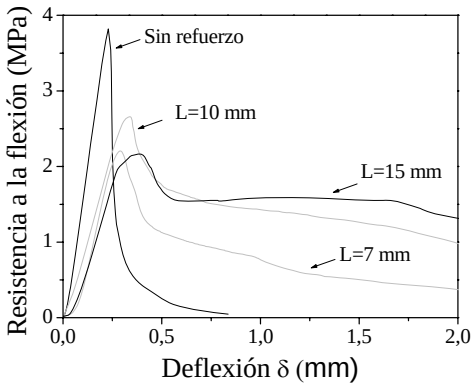
Respecto a las probetas reforzadas con las fibras de acero inoxidable se observa que a pesar de que su resistencia a la flexión disminuyó comparado con la resistencia de las probetas sin refuerzo (Figs. 7b y 7c), su ductilidad aumentó en relación a la pasta cerámica sin refuerzo, siendo esta ductilidad superior con las fibras de 15 mm de longitud.

En la Figura 8 se muestra el módulo de rotura de la matriz cerámica bajo flexión en función del diámetro de las fibras, la línea punteada

corresponde al módulo de rotura de la pasta cerámica sin refuerzo. Es evidente que al adicionar un refuerzo dúctil a una matriz rígida (cerámica), su módulo de rotura disminuye considerablemente. La gráfica sugiere que en la medida en que aumenta el diámetro de la fibra se incrementa el módulo de rotura de la matriz del material compuesto (excepto las fibras con l/d = 53,85), lo cual tiene sentido al comparar las Figuras 4 y 8. De acuerdo a la Figura 4 las fibras con mayor diámetro presentan mayor resistencia a la tensión y por lo tanto cuando el material compuesto es sometido a la aplicación de esfuerzos, la matriz transfiere estos esfuerzos a la fibra y ésta cuanto mayor resistencia mecánica tenga, mayor soporte mecánico podrá ofrecer a la matriz.



(b)



(c)

Figura 7. Gráficas de resistencia a la flexión de las probetas reforzadas y sin reforzar: (a) refuerzo con fibras de acero al carbono de 750 µm de diámetro, (b) refuerzo con fibras de acero 304 de 130 µm de diámetro y (c) refuerzo con fibras de acero 304 de 230 µm de diámetro.

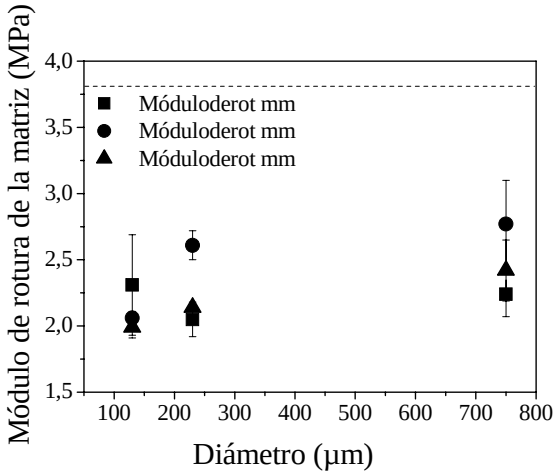


Figura 8. Gráfica del módulo de rotura de la matriz cerámica bajo flexión en función de los diámetros de las fibras.

En la Tabla 3 se presentan los porcentajes de contracción y absorción medidos a las probetas reforzadas y sin reforzar, la desviación estándar de estos valores es inferior a 0.3. Se puede apreciar que el refuerzo de fibras de acero no disminuyó la contracción respecto a las probetas sin reforzar, posiblemente, debido a que las fibras no quedaron en una posición muy cercana a la superficie, esto es más destacable con las fibras de acero bajo carbono que con las de acero 304, el porcentaje de absorción también se ve incrementado con el uso de las fibras debido a un eventual agrietamiento de la matriz cerámica. Es de anotar que las fibras de acero bajo carbono mostraron formación de productos de corrosión en mayor cantidad que las fibras de acero inoxidable, en estas últimas sólo se aprecia un inicio de formación de estos productos.

Tabla 3. Propiedades físicas de las probetas reforzadas y sin reforzar.

Probetas reforzadas			*Contracción (%)*	*Absorción (%)*
Acero de las Fibras	*Diámetro (µm)*	*Longitud (mm)*		
Bajo C	750	7	2,26	17,42
		10	2,33	17,22
		15	2,31	17,14
304	230	7	2,19	16,81
		10	2,21	17,21
		15	1,76	17,04
304	130	7	1,79	16,62
		10	1,50	16,97
		15	1,71	17,37
Pasta cerámica sin refuerzo			1,55	15,43

3. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se obtuvieron materiales compuestos de matriz cerámica a base arcilla roja, reforzada con fibras de acero bajo carbono e inoxidable 304. La adición de fibras de acero como refuerzo de arcilla roja permite obtener un material con una ductilidad mejorada comparada con la arcilla roja, sin embargo debido a las altas temperaturas de cocción de la arcilla, se forman productos de corrosión sobre la superficie de las fibras lo que genera esfuerzos y posibilidad de agrietamiento en la matriz cerámica, resultando como consecuencia un material con resistencia a la flexión disminuida respecto a la arcilla roja.

Los análisis SEM y las observaciones realizadas durante las pruebas de flexión, permiten inferir una buena unión entre las fibras de acero y la matriz cerámica.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la doctora Claudia García García del Laboratorio de Cerámicos y Vítreos de la Universidad Nacional de Colombia, seccional Medellín, por su colaboración para el prensado de las muestras.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Bicini H, Aksogan O, Bodur M.N, Akca E, Kapur S. *Constr. Build Mater*. 2007; **21**: 901-906.

[2] Kumar S. *Constr Build Mater* 2002;**16**: 519–525.

[3] Ren K.B, Kagi D.A. *Build Environ* 1995;**30** (3): 433–440.

[4] Bansal N.P. *Handbook of ceramic composites*, Boston (USA): Kluwer Academic Publishers, 2005, p. 1-5.

[5] Binici H, Aksogan O, Shah T. *Constr Build Mater* 2005;**19**: 313–318.

[6] Norma ASTM C1557-03, *Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers*, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2003.

[7] Norma ASTM C67-07, *Standard test methods for sampling and testing brick and structural lay tile*, Filadelfia (EEUU): American Society for Testing and Materials, 2007.

[8] Duitama L, Espitia C, Mojica J, Quintero J, Romero F. *Rev Acad Colomb Cienc* 2004; **XXVIII** (109): 555-563.

[9] Restrepo JW. *Marcado y Esmaltado de Materials Cerámicos con Láser*, Tesis Ph.D. Barcelona (España): Universitat de Barcelona, 2005 [citado 27-Agos-2008]. Disponible en la web: http://www.tesisenxarxa.net/TDX-1110105-130402/index_cs.html. ISBN (on-line): B.51484-2005 / 84-689-5256-7.

[10] Restrepo JW, Fernández-Pradas JM, Gómez MA, Serra P, Morenza L. *J Laser Appl* 2006; 18 (2): 1-5.

[11] Restrepo JW, Fernández-Pradas JM, Gómez MA, Serra P, Morenza L. *Appl Surf Sci* 2006; 253: 2272-2277.

[12] Monteiro SN, Alexandre J, Margem JI, Sánchez R, Vieira CMF. *Constr Building Mater* 2008; 22: 1281-1287.

[13] Vieira CMF, Sánchez R, Monteiro SN. *Constr Building Mater* 2008; 22: 781-787.