

FABRICACIÓN DE TUBOS DE CARBURO DE SILICIO PARA USO COMO CUERPO RADIANTE EN HORNOS Y SISTEMAS DE CALENTAMIENTO

SILICON CARBIDE TUBES FABRICATION FOR RADIANT FURNACES AND HEATING SYSTEMS

FABIO VARGAS

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales, Universidad de Antioquia, gipimme@udea.edu.co

ESPERANZA LÓPEZ

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales, Universidad de Antioquia

DANIEL LÓPEZ

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales, Universidad de Antioquia

JAIME AREIZA

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales, Universidad de Antioquia

MÓNICA MONSALVE

Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales, Universidad de Antioquia

Recibido para revisar julio 14 de 2008, aceptado septiembre 24 de 2008, versión final octubre 10 de 2008

RESUMEN: El carburo de silicio (SiC) es un material con alta potencialidad de uso en hornos y sistemas de calentamiento dada su alta conductividad térmica, refractariedad, baja expansión térmica y estabilidad mecánica a temperaturas hasta de 1650°C. A pesar de sus excelentes propiedades térmicas, la utilización del SiC en hornos y sistemas de calentamiento ha estado limitada por la oxidación que sufre a temperatura superior a 1100°C y por su falta de plasticidad y alta dureza, lo que dificulta su conformado a través de los procesos tradicionalmente utilizados para dar forma a los cerámicos. En la búsqueda de una solución al problema de conformado, se obtuvo una pasta constituida por partículas de carburo de silicio de dos tamaños diferentes (180 μm y 7 μm), en relación en peso 70/30, las cuales fueron aglomeradas con una solución acuosa de 7,5 % en peso de plastificante tipo celulosa (B) de carácter orgánico desarrollado en laboratorio; utilizando 15 ml de solución por cada 100 gramos de SiC. Con esta pasta fueron fabricados mediante centrifugado, tubos de buenas propiedades físicas y térmicas para su uso en hornos radiantes y otros sistemas de calentamiento.

PALABRAS CLAVE: tubo radiante, carburo de silicio, transferencia de calor, radiación.

ABSTRACT: Silicon carbide is a useful material in furnaces and heating systems because its high thermal conductivity, refractory, dimensional and mechanical stability to high temperature until 1650°C. In spite of its excellent thermal properties, utilization of silicon carbide in furnaces and heating systems has been limited for two factors: its oxidation due to temperatures higher than 1100°C and its low plasticity, reasons for which it's shaped can become difficult by the conventional process normally used for shape ceramic materials. In order to solve the shape problem a paste was made. This paste was prepared using two different size particles (180 μm y 7 μm) with a relation of 70/30 weight, respectively. The SiC particles were agglomerated by a watery solution of 7,5% weight of cellulose Type B plasticizer developed at laboratory. 15 ml of watery solution for each 100 grams of SiC were used. The paste let us obtain silicon carbide tubes by centrifugal technique, which reached out good physical and thermal properties to be used in radiant furnaces and heating systems applications.

KEYWORDS: radiant tube, silicon carbide, heat transfer, radiation.

1. INTRODUCCIÓN

El carburo de silicio (SiC) es uno de los cerámicos de mayor desarrollo y uso en aplicaciones estructurales y de ingeniería en los últimos años. Desde 1907, cuando la Marconi Company observó que este material poseía electroluminiscencia, no han cesado los esfuerzos por obtener de él un mejor desempeño en diversas aplicaciones tales como: semiconductores a baja y alta temperatura, diodos de alto voltaje, diodos emisores de luz azul (Blue LEDs), componentes de radiación resistiva, detectores de luz ultravioleta, resistencias eléctricas, refractarios y medios abrasivos para el mecanizado y pulido de materiales, entre muchas otras; que han sido posibles gracias a sus excelentes propiedades eléctricas, térmicas, mecánicas y químicas [1].

Las propiedades del SiC se deben principalmente a su estructura cristalina, la cual puede ser cúbica (β) o hexagonal (α), siendo esta última la más estable química y mecánicamente, incluso a temperaturas superiores a 2000°C. El tipo de estructura obtenida depende en gran medida del método utilizado para su producción.

A pesar de que este material fue descubierto en estado natural desde 1893 por el premio Nobel Dr. Henry Moissan, la mayoría del polvo de carburo del silicio que se consume actualmente a nivel industrial es producido por el proceso de Acheson, que consiste en la reducción de la arena de sílice en contacto con coque del petróleo o con antracita a una temperatura cercana a 2400 °C durante 36 horas, para formar el SiC α de grado comercial.

Para suplir las necesidades de SiC de mayor pureza se han desarrollado otros procesos tales como el compactado por reacción, la sinterización en caliente con y sin presión, la deposición química de vapor (CVD) y el proceso de síntesis biomórfica, entre otros.

Por otro lado, a pesar de las múltiples aplicaciones que se le han dado a este material, aún quedan muchas otras por descubrir, ya que la combinación de propiedades tales como: alta conductividad térmica, alto punto de fusión, expansión térmica relativamente baja, alta resistencia relativa (relación resistencia mecánica/densidad), excelente dureza, resistencia a la abrasión y a la corrosión, y estabilidad mecánica a temperaturas hasta de 1650°C, ofrece múltiples oportunidades de uso. Una de ellas, es la de cámara de calentamiento de hornos y tubo radiante en sistemas de calentamiento, ya que gracias a sus propiedades térmicas, puede transferir eficientemente el calor generado por la fuente [2, 3, 4], al mismo tiempo puede hacer las veces de refractario y por su baja expansión térmica conserva su estabilidad dimensional sin fallar ni poner en riesgo otros sistemas con los que se encuentre en contacto.

Otros materiales como los aceros son ampliamente utilizados para esta aplicación, dada su excelente conductividad térmica, sin embargo, su uso y vida útil es limitada por la resistencia a la temperatura y alta expansión térmica.

En la Tabla 1 se hace una descripción comparativa de las propiedades térmicas que poseen algunos de los materiales generalmente utilizados en hornos y sistemas de calentamiento que funcionan a alta temperatura.

Tabla 1. Propiedades de algunos materiales utilizados en tubos de hornos y sistemas de calentamiento [5]

Table 1. Material properties used in tubes for furnaces and heating systems [5]

MATERIAL	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (w/m-K)	DILATACIÓN TÉRMICA * ($\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)	TEMPERATURA DE SERVICIO (°C)
ACERO REFRACTARIO	30 Aprox.	17,8 – 18,7	1000 máx.
ALÚMINA	6,3	8,2	1750
CARBURO DE SILICIO	77,5 – 125,6	4,7	1100**

* Propiedades medidas a temperatura cercana a 1000 °C.

** En atmósfera rica en oxígeno.

A pesar de la refractariedad y estabilidad mecánica del SiC a temperatura de hasta 1650°C, su temperatura máxima de servicio se puede ver afectada por efecto de la oxidación que experimenta este material por encima de 1100°C.

Una de las limitaciones que ha tenido el uso del SiC en sistemas de calentamiento ha sido su falta de plasticidad, lo que dificulta el conformado de piezas mediante el uso de técnicas como el colage, extrusión, torneado y prensado, que son usualmente utilizadas para dar forma a los materiales cerámicos; adicionalmente, la dureza excesiva limita el mecanizado de este material a partir de bloques de mayor tamaño [6].

Teniendo en cuenta que en todo proceso de conformado cerámico resulta fundamental la materia prima utilizada y que la fabricación de tubos de carburo de silicio no es la excepción, el Grupo de Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales –GIPIMME, se dio a la tarea de formular una pasta de carburo de silicio a partir del control del tamaño de partícula y del uso de aglomerantes que a su vez cumpliera la función de plastificante, de tal forma que se pudiera procesar por la técnica de centrifugado, la cual no es de uso común en el conformado de materiales cerámicos.

De acuerdo con lo anterior, la pasta de SiC requerida para la conformación del tubo mediante centrifugado debe tener las siguientes características:

- Plasticidad suficiente para fluir por efecto de la fuerza centrífuga aplicada sobre ella.
- Resistencia en verde suficiente para mantener su forma después del conformado.
- Porosidad adecuada para que la transferencia de calor por radiación sea buena, sin que esto afecte la conductividad térmica y la resistencia mecánica del tubo.

La teoría de plasticidad de pastas cerámicas, sugiere que esta propiedad puede ser promovida por el uso de plastificantes o mediante la utilización de partículas finas que se puedan desplazar unas sobre otras ante la aplicación de una fuerza cizallante [7, 8]. Por lo tanto, para la

formulación de la pasta de SiC se probaron dos aglomerantes esperando que a su vez contribuyeran con la plasticidad. Estos aglomerantes fueron adicionados a diferentes combinaciones de tamaño de partícula del polvo de SiC, con y sin la utilización de frita (material que alcanza estado de flujo viscoso o de fusión a una temperatura igual o inferior a la del vidrio, por lo que es utilizado para mejorar la sinterización de algunos cerámicos, su nombre proviene del francés *frittage* que significa sinterización), cuyo fin es el de densificar la estructura o reducir la porosidad, a partir del tratamiento térmico de sinterización del tubo.

Posteriormente se describirán algunos de los aspectos más relevantes del proceso experimental seguido para obtener los tubos de SiC por centrifugado.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para el conformado del tubo de SiC, se llevaron a cabo las siguientes etapas:

- Formulación de la pasta.
- Caracterización de la pasta.
- Selección de la pasta más adecuada para la conformación del tubo.
- Conformado del tubo (por extrusión y por centrifugado).
- Tratamiento térmico de secado y sinterizado.

Finalmente, se realizó la evaluación de la efectividad de radiación, mediante prueba de calentamiento en horno construido específicamente para tal fin.

2.1 Formulación de la pasta de SiC

En la Tabla 2, se muestra el diseño de experimentos planteado para determinar la combinación entre el aglomerante, la mezcla de tamaños de partícula y densificante (frita), que le proporcionaría al tubo las mejores propiedades de plasticidad, resistencia en verde y porosidad.

Tabla 2. Diseño de experimentos planteado para la selección de la pasta de SiC
Table 2. Experimental design conducted for the SiC paste selection

MUESTRA	TAMAÑO DE PARTÍCULA				FRITA	AGLOMERANTE																					
	GRUESOS		FINOS			A*	B**																				
	malla	µm	malla	µm																							
1	NO USADO		1000	25,5	SI	X																					
2	NO USADO						X																				
3	80	180			1000	25,5	SI	X																			
4									X																		
5	80	180					1000	25,5	NO	X																	
6											X																
7	120	122							1000	25,5	SI	X															
8													X														
9	120	122									1000	25,5	NO	X													
10															X												
11	220	67											1000	25,5	SI	X											
12																	X										
13	220	67													1000	25,5	NO	X									
14																			X								
15	400	38															1000	25,5	SI	X							
16																					X						
17	400	38																	1000	25,5	NO	X					
18																							X				
19	600	25,5																			1000	25,5	SI	X			
20																									X		
21	600	25,5																					1000	25,5	NO	X	
22																											X

*Agglomerante a base de alcohol

** Agglomerante a base de celulosa

El tamaño de las partículas de fritas corresponde a pasante malla 325 (45 µm) y la cantidad utilizada fue de 10% en peso respecto a la masa de SiC. El carburo de silicio utilizado fue grado comercial, dado su bajo costo y fácil consecución.

La relación en peso entre las partículas gruesas y finas fue de 70/30, y en las muestras en las que

se utilizó fritas, su peso fue adicionado al de las partículas gruesas, manteniendo la relación gruesos/finos en 70/30. Los aglomerantes fueron preparados mediante la adición de 10 y 15 gramos de una carga orgánica (alcohol o celulosa según el caso) en 200 gramos de agua y en este artículo se mencionarán como A y B por efectos de protección de la información y del conocimiento producido en este trabajo.

2.2 Caracterización de la pasta

2.2.1 Plasticidad

Con el fin de determinar la capacidad de la pasta para fluir bajo el efecto de una fuerza cizallante, se utilizó el método empírico de medida de la plasticidad mediante el tacto, el cual consiste en amasar una pequeña muestra de la pasta, hasta obtener una buena homogenización, posteriormente se hace un pequeño rollo por desplazamiento de ésta entre las dos palmas de la mano, si después de varios giros entre las palmas de las manos, el pequeño rollo logra estirarse sin romperse, se considera que tiene la plasticidad suficiente para ser utilizada en conformado plástico [9].

Las pruebas realizadas permitieron establecer que la pasta con mayor plasticidad fue la preparada con el aglomerante B.

2.2.2 Porosidad

Para determinar la porosidad de cada una de las muestras, inicialmente las probetas fueron secadas y sinterizadas, posteriormente se ensayaron de acuerdo con la norma ASTM C1039 (la cual se basa en el principio de Arquímedes) [10].

La porosidad aparente fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$\% P = [(W - D) / V] \times 100 = [(W - D) / (W - S)] \times 100 \quad (1)$$

De donde:

P, es la porosidad aparente.

W, es el peso saturado.

D, es el peso en seco de la muestra.

S, es el peso de la muestra suspendida en un líquido de referencia.

V, es el Volumen exterior de la muestra y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V (\text{cm}^3) = W - S \quad (2)$$

El volumen de porosidad superficial o porosidad abierta a la superficie (V'), puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

$$V' (\text{cm}^3) = W - D \quad (3)$$

Las ecuaciones 2 y 3 aplican cuando el líquido de referencia utilizado tiene una densidad de 1 g/cm³ (en este caso fue agua a temperatura ambiente).

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo realizado para determinar la porosidad de cada uno de los materiales producidos con las pastas propuestas en la metodología experimental de la Tabla 2.

Tabla 3. Resultados de la medida de porosidad
Table 3. Results of the porosity measurements

N° MUESTRA	POROSIDAD	VOLUMEN POROSIDAD SUPERFICIAL
	(%)	(cm ³)
1	58,3	0,33
2	54,5	0,38
3	18,7	0,05
4	27,2	0,08
5	22,5	0,07
6	17,2	0,05
7	20,6	0,07
8	24,7	0,07
9	17,4	0,06
10	25,1	0,05
11	27,5	0,10
12	35,8	0,13
13	21,0	0,08
14	26,6	0,10
15	27,4	0,10
16	40,7	0,15
17	26,6	0,09
18	26,8	0,08
19	34,7	0,12
20	37,3	0,12
21	35,2	0,13
22	52,7	0,20

En los resultados mostrados en la Tabla 3, se puede observar que las muestras de menor porosidad fueron las número 3, 6 y 9 obtenidas a partir de la pasta producida con:

- La mezcla de SiC tamaño 80 – 1000, con frita como densificante y con aglomerante A.
- La mezcla de SiC tamaño 80 – 1000, sin frita como densificante y con aglomerante B.
- La mezcla de SiC tamaño 120 – 1000, sin frita como densificante y con aglomerante A.

Por lo tanto, las muestras diferentes a estas fueron descartadas por tener porosidad excesiva. Teniendo en cuenta que la frita utilizada como densificante puede ser perjudicial para el desempeño de la cámara de calentamiento, ya que puede producir flujo plástico del material a alta temperatura, la pasta producida con este material fue descartada (muestra 3).

De acuerdo con lo anterior y con el resultado de la prueba de plasticidad en la que se encontró que el aglomerante que proporcionó la mejor plasticidad fue el B, se decidió que la prueba de resistencia en verde se realizaría solamente a la

mezcla de SiC tamaño 80 – 1000, sin frita como densificante y con el aglomerante B (muestra 6).

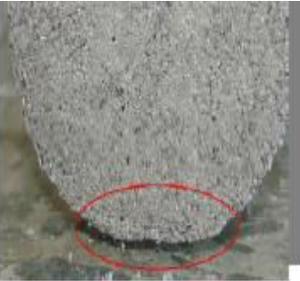
2.2.3 Resistencia en verde

Esta prueba permite determinar el nivel de deformación que puede sufrir la pieza conformada durante el proceso de secado o previo al tratamiento térmico de sinterización. El ensayo consiste en hacer una probeta cilíndrica y ubicarla en posición de canto sobre una superficie lisa, dejándola un tiempo superior a 5 minutos y posteriormente se determina si se produjo deformación en la zona de contacto con la superficie y el cambio de diámetro que pueda existir respecto al inicial.

A partir de los resultados obtenidos en la prueba de resistencia en verde, se determinó la viscosidad que debe tener el aglomerante B, para lo cual se elaboraron muestras con 10 y 15 gramos de esta sustancia en 200 ml de agua. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4. Resultados de la prueba de resistencia en verde

Table 4. Results of the green test resistance

MASA DEL AGLOMERANTE B (g)	ESTADO DE LA MUESTRA	
	INICIAL	FINAL
10		
15		

Como se puede observar en las fotos de la Tabla anterior, la muestra producida a partir la mezcla de SiC tamaño 80 – 1000, sin frita como densificante y con 15 gramos en 200 ml de aglomerante B, fue la que presentó mayor resistencia en verde (puesto que su deformación fue menor), por lo tanto, se seleccionó esta pasta como materia prima para la fabricación del tubo de SiC.

2.3 Conformado del tubo de SiC

Una vez obtenida una pasta homogénea de buenas características para el conformado por centrifugado, ésta se introdujo en el molde y fue puesta a girar a 750 rpm durante una hora.

En la Figura 1 se muestra la disposición del molde en el equipo de conformado y el tubo obtenido después de una hora de centrifugado de la pasta.

Una vez obtenido el tubo, este fue puesto a secar a temperatura ambiente dentro del molde durante el tiempo necesario para que este elimine la humedad remanente suministrada a través del aglomerante. Posteriormente, se le realizó tratamiento térmico de sinterización en un horno eléctrico, de acuerdo con las condiciones planteadas en la Figura 2.

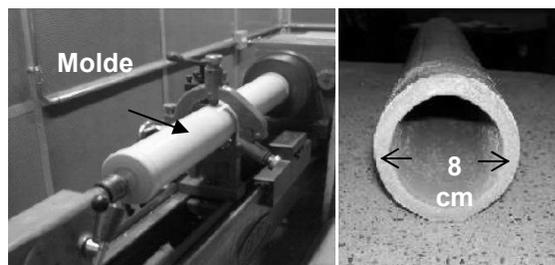


Figura 1. Montaje experimental para la obtención del tubo de SiC por centrifugado

a) Equipo de conformado b) Tubo obtenido

Figure 1. Experimental set up to obtain SiC tube by centrifugal process

a) Conformed machine b) Obtained tube

Durante el tratamiento térmico se observó que los tubos experimentan incandescencia a alta temperatura, lo cual es muestra de su efectividad como cuerpo radiante. En la Figura 3 se muestra la incandescencia del tubo cuando el horno en el que se realizó el tratamiento térmico calentaba a una temperatura cercana a 1000°C.

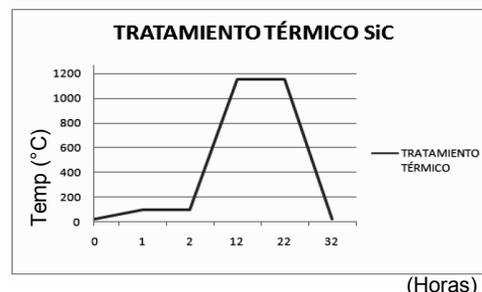


Figura 2. Condiciones del tratamiento térmico de sinterización realizado al tubo de SiC

Figure 2. Heat treatment conditions for the SiC tube sintering



Figura 3. Incandescencia del tubo de SiC durante su tratamiento térmico

Figure 3. Incandescence of SiC tube during its heat treatment

En la Figura 4 se muestran 2 de los tubos obtenidos después del tratamiento térmico.

2.4 Evaluación de la efectividad de radiación

Una vez construido el tubo de SiC, se determinó su efectividad de radiación a partir de la relación entre la temperatura en el interior de la cámara de radiación (Interior del tubo de SiC) y la temperatura de la superficie externa del tubo. En la Tabla 5 y en la Figura 5, se presentan los resultados obtenidos.



Figura 4. Tubos de carburo de silicio obtenidos

Figure 4. SiC tubes obtained

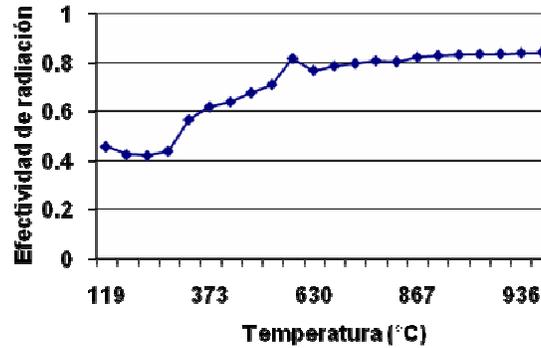


Figura 5. Efectividad de radiación en función de la temperatura de calentamiento
Figure 5. Radiation effectivity in function of the heating temperature

Tabla 5. Resultados de la prueba de efectividad de radiación
Table 5. Results of the radiation effectiveness test

TIEMPO (minutos)	Temperatura del tubo (°C)		Temperatura interior de la cámara (°C)	Efectividad de Radiación
	Pared exterior	Pared interior*		
10	76	71,56	37	0,51704863
20	121	116,56	54	0,46328071
30	170	165,56	71	0,42884755
40	231	226,56	96	0,42372881
50	274	269,56	119	0,44146016
60	325	320,56	183	0,57087597
70	375	370,56	231	0,62338083
80	421	416,56	268	0,6433647
90	475	470,56	320	0,6800408
100	523	518,56	370	0,71351435
110	528	523,56	430	0,82130033
120	632	627,56	484	0,771241
130	682	677,56	535	0,78959797
140	727	722,56	578	0,79993357
150	774	769,56	623	0,80955351
160	821	816,56	659	0,80704419
170	869	864,56	713	0,82469696
180	887	882,56	734	0,8316715
190	906	901,56	753	0,83521895
200	919	914,56	766	0,83756123
210	931	926,56	777	0,83858574
220	938	933,56	786	0,84193839
230	946	941,56	795	0,84434343
240	951	946,56	807	0,85256085

* Valor calculado a partir de la Ecuación de Fourier.

La temperatura de la pared interior del tubo fue calculada a partir de la Ecuación de Fourier para transferencia de calor por conducción, teniendo en

cuenta que el tubo tiene 8 cm de diámetro exterior, una longitud útil de calentamiento de 20 cm, un espesor de pared de 0,89 cm y haciendo la corrección

del coeficiente de conductividad térmica del SiC, el cual para una porosidad del 17,20% es de 64,17 W/m-K [7].

De acuerdo con la Figura 5, se puede establecer que el horno alcanza su mayor efectividad de radiación por encima de 940°C, cuando la incandescencia por efecto de la emisividad del SiC es significativa, esto es concordante con lo visto durante el tratamiento térmico de sinterización realizado al tubo y registrado en la Figura 3. En la figura 6 se puede apreciar la incandescencia producida en el interior del tubo de SiC producida por encima de 900°C durante las pruebas de calentamiento realizadas.

3. CONCLUSIONES

- Una combinación adecuada en el tamaño de las partículas de SiC (70% en volumen de malla 80 y 30% de malla 1000) favorece la obtención de una pasta de baja porosidad para la fabricación de tubos por el método de centrifugado.
- La relación de tamaño de partícula tiene mayor influencia en la densificación del SiC que el uso de un densificante convencional como la frita, tal como lo evidencian los resultados de la prueba de porosidad realizada a las muestras de este estudio.
- La resistencia en verde de las piezas obtenidas con el polvo de carburo de silicio malla 80 - malla 1000, puede ser controlada mediante la viscosidad del aglomerante, ya que un pequeño aumento de esta puede aumentar significativamente la viscosidad de la pasta obtenida y por lo tanto su consistencia.
- Los tubos de carburo de silicio pueden ser conformados por centrifugado mediante la adición de un aglomerante - plastificante adecuado, que le permita a la pasta obtenida tener la fluidez suficiente para adaptarse a la forma del molde, bajo las fuerzas aplicadas por éste proceso.

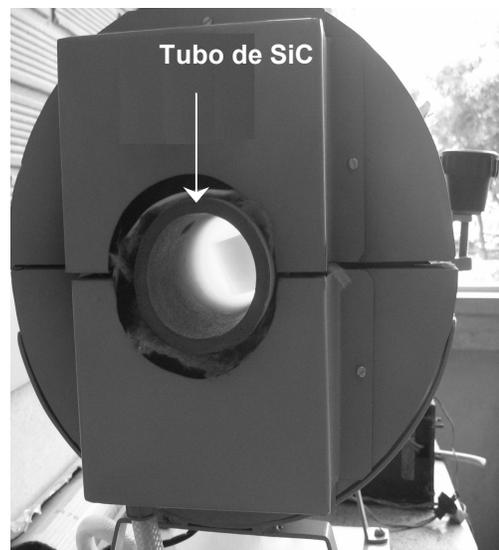


Figura 6. Incandescencia por efecto de emisividad térmica en el interior del tubo de SiC construido
Figure 6. Incandescent for the emissivity thermal effect inside the constructed SiC tube

- El carburo de silicio es un excelente conductor de calor, (su coeficiente de transferencia por conducción es superior a 70 W/m-K), lo que le permite a este material transportar eficientemente el calor producido por la fuente desde la pared exterior del tubo hacia la pared interior. Adicionalmente, su alta emisividad térmica le permite transferir el calor por radiación en su interior con una efectividad cercana al 85% a temperatura superior a 940°C. Por lo anterior, los tubos de SiC construidos son una excelente alternativa para el aprovechamiento de la energía producida en sistemas térmicos.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad de Antioquia, por el apoyo económico asignado a través del Fondo de Innovación Tecnológica para la realización del proyecto código FIT05-1-05.

REFERENCIAS

- [1] HARRIS, G. L.. Properties of Silicon Carbide. Materials Science Research Center of Excellence. Howard University, Washington DC, USA, 1995. 304 p.
- [2] SNEAD, L.L. Limits on irradiation-induced thermal conductivity and electrical resistivity in silicon carbide materials. Journal of Nuclear Materials. Vol. 329-333. Part 1. 2004. pp 524-529.
- [3] ARRIETA, A., COPETE, H., y GÓMEZ, J. P. Análisis de los parámetros para el diseño y optimización de un tubo radiante. Revista Facultad de Ingeniería. No. 38. 2006. pp. 31–39.
- [4] ARRIETA, A., COPETE, H., y CADAVID, F. Desarrollo y evaluación de un sistema de combustión autoregenerativo y radiante para procesos de alta temperatura en PYMES. Revista DYNA. Vol 74. 2007. pp. 61 – 69.
- [5] SEARCH ENGINEERING MATERIAL BY PROPERTY VALUE. Available: <http://www.matweb.com/search/PropertySearch.aspx>[Citado 27 de Septiembre 27 de 2007].
- [6] STEDMAN, S., RISSO, L. et GUAUTO, G. Fabrication and properties of sintered silicon carbide tubes for high temperature applications. Industrial ceramics. Vol. 17. 1997. pp. 84-86.
- [7] KINGERY, W. D., BOWEN, H. K., et UHLMANN, R. D. Introduction to Ceramics. 1976. 2nd Edition. pp. 47-49, 461-510.
- [8] LENK, R. et ADLER, J. SiC platelet orientation in a liquid-phase-sintered silicon carbide composite formed by thermoplastic forming techniques. Fraunhofer-Institut for Ceramic Technologies and Sintered Materials, IKTS Dresden, Winterbergstraße 28, D-01277, Dresden, Germany, 1996. pp. 95-98.
- [9] Hald Peder, Técnica de la cerámica, cuarta edición, Ediciones Omega S.A. Barcelona, 1986, Página 101 -102.
- [10] ASTM C1039-85. Standard test methods for apparent porosity, apparent specific gravity, and bulk density of Graphite Electrodes. 2005. 3 p.