INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE LODO ROJO (RESIDUO DE BAUXITA) EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MATERIALES CERÁMICOS CONFORMADOS POR EXTRUSIÓN

José Manuel Rivas Mercury [1,2,3], Laécio Gomes Galdino [2,3], Antônio Ernandes Macedo Paiva [2,3], Aluísio Alves Cabral Junior [2], Rômulo Simões Angélica [3]*

1: Departamento Academico de Química; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Maranhão (DAQ/IFMA). Av. Getulio Vargas, n° 04, Monte Castelo, CEP 65025-001, Sao Luis-MA, Brasil.
2: Programa de Posgrado en Ingeniería de Materiales; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnológica do Maranhão (PPGEM/IFMA).). Av. Getulio Vargas, n° 04, Monte Castelo, CEP 65025-001, Sao Luis-MA, Brasil.
3: Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará (UPPA). Campus Universitário do Guamá, Caixa Postal 1611, CEP 66075-110 Belém-Pará, Brasil.

[*]*E-mail: rivascefetma@gmail.com.br*

Recibido: 12-Mar-2008; Revisado: 30-Jun-2009; Aceptado: 07-Jul-2009
Publicado On-Line: 21-Dic-2009
Disponible en: *www.rlmm.mt.usb.ve*

Resumen

En el presente trabajo se ha estudiado la influencia de adiciones de Lodo Rojo (LR) en concentraciones variables de 45-65 %-p, en las propiedades físico-mecánicas de materiales cerámicos conformados por extrusión de mezclas de arcillas + LR. Los materiales obtenidos se trataron térmicamente en el intervalo de 750-1.050 ºC con tiempo de reacción de una 1 h para determinación de las propiedades cerámicas: Módulo de Ruptura (MOR), Absorción de Agua (AA), Retracción Linear (RL_{Aq}). Las fases cristalinas presentes de los materiales de partida, así como de los materiales después del tratamiento térmico fueron determinadas por Difracción de rayos (DRX) método de polvos, mientras que su microestructura por Microscopia Electrónica de Barrido (MEB). Los resultados han puesto de manifiesto que es posible utilizar este material como materia prima para la fabricación de ladrillos y tejas, los cuales presentaron buenas propiedades físico-mecánicas, superando las especificaciones de las Normas NBR 6113 y 6220 de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) para la fabricación de materiales estructurales.

Palabras Claves: *Lodo rojo, Residuo de bauxita, Extrusión, Materiales estructurales.*

Abstract

At the present work was studied the influence of Red Mud additions in the concentration range of 45-65 % w/w on the physical-mechanical properties of ceramic materials made with extruded clay + red mud mixtures. All ceramics material obtained were thermal treated in temperature range of 750-1050 ºC, with 1 h of dwell time, and their mechanical properties like: Flexural strength (MOR), Water Absorption, Linear shrinkage before and after firing was measure. The crystalline phases of the raw materials and sintered materials were analyzed by X ray Diffraction and the micro structure by Scanning Electron Microscope (SEM). The results pointed out that it is possible to produce heavy clay products like roof tile and clay bricks with physical-mechanics properties higher than the specifications of the Brazilian technical standard (ABNT) for heavy clay products.

Keywords*: Red mud, Bauxite tailing, Extrusion, Heavy clay products.*

1. INTRODUCCIÓN

Las actividades de algunas industrias del sector primario (Siderurgia, Metalurgia y producción de Aluminio Primario) vienen acompañadas de la producción de una gran cantidad de residuos, que en la mayoría de los casos son depositados en ambientes próximos a las fábricas, como consecuencia del elevado costo que representa su transporte, tratamiento, gestión y manipulación adecuada. Estos residuos, en su mayoría, son agresivos y tóxicos al medio ambiente y pueden contaminar suelos y mantos freáticos si no son tratados antes de su almacenamiento [1].

En la producción de aluminio metálico (proceso Hall-Heroult) se utiliza la alúmina (Al_2O_3) como precursor de este metal. Por otro lado, el óxido de aluminio es obtenido mediante la calcinación del hidróxido de aluminio precipitado en el proceso

Bayer por digestión de la bauxita con soda cáustica a elevada temperatura y presión. Como subproducto de este proceso se obtiene un residuo insoluble altamente cáustico denominado lodo rojo (LR) o barro rojo (*Red Mud*). Debido a la alta alcalinidad que presenta el LR, (pH = 11,9-13,6) y a que la concentración en sólidos está entre 400-600 g/L, este material es clasificado de acuerdo con la norma NBR 10.004/2004 de la ASOCIACIÓN BRASILERA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), como un residuo Clase I – peligroso de elevada corrosividad y reactividad [2].

Se estima que la producción mundial de este residuo alcanza 70 millones de toneladas por año [3], no obstante son escasas las informaciones sobre la producción nacional del LR de bauxita. Sin embargo, datos de la ASSOCIACIÓN BRASILERA DEL ALUMINIO (ABAL), indican que la producción de alúmina en el país alcanzó la suma de 6,66 millones de toneladas en el año 2006 [4,5]. A partir de estos datos y considerándose que por cada tonelada de alumina producida son generados 0,5 toneladas de LR, es posible estimar la producción Brasilera en 3,33 millones de toneladas/año de éste residuo, el cual llega a alcanzar en la isla de São Luis, estado de Maranhão (Brasil) una cantidad de 820 mil ton/año [6].

Este material peligroso para el medio ambiente, puede ser utilizado como materia prima para la producción de materiales cerámicos, ya que en su composición están presentes fases amorfas y cristalinas como: Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2, TiO_2 en concentraciones variables, lo cual depende de la naturaleza de la bauxita de partida. La dificultad de procesamiento de este residuo se debe a las grandes cantidades producidas, lo que requiere usos a gran escala. La introducción del LR en procesos que consuman elevadas cantidades de materias primas, como es el caso de la producción de ladrillos, tejas, y bloques, es de gran interés, pues, les proporcionaría un valor añadido a este residuo, diminuiría el consumo de materias primas naturales tradicionales, además diminuiría el riesgo a la contaminación ambiental.

En este trabajo se ha estudiado la influencia de adiciones de Lodo Rojo (LR) en concentraciones variables de 45, 50 y 65 % en peso, en las propiedades físico-mecánicas de materiales cerámicos conformados por extrusión de mezclas de LR y arcillas [7].

2. PARTE EXPERIMENTAL

Aproximadamente 250 kg del residuo de LR con pH = 11,9 fueron recibidos en el laboratorio y sometidos a secado en horno de microondas doméstico modificado. Este procedimiento permitió obtener un material seco en tiempos relativamente cortos evitando así el contacto y su manipulación prolongada. El polvo seco fue procesado en molino eléctrico durante 5 min hasta llegar a obtener un material homogéneo y de granulometría fina, posteriormente una parte de la muestra fue utilizada para la caracterización del LR y el resto para la preparación de las mezclas y obtención de las probetas para las pruebas del proceso de extrusión.

Las mezclas para extrusión se prepararon con dos arcillas proporcionadas por empresas de la región, utilizadas en el procesado de materiales cerámicos tradicionales, las muestras fueron molidas, condicionadas y caracterizadas en laboratorio siguiendo los procedimientos y recomendaciones de Souza Santos [8].

Para la determinación granulométrica, se utilizaron 250 g de LR seco, los cuales fueron pasados por una malla o tamiz, para homogeneizar, posteriormente el material fue lavado sucesivamente con agua destilada hasta que el pH alcanzó el valor neutro de 7. La suspensión así obtenida a pH constante, fue pasada por mallas de los números 100, 200, 325 (serie Tyler) sucesivamente, después fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura ambiente durante 72 h, para determinar posteriormente la masa retenida en cada malla.

La distribución del tamaño de partícula y/o aglomerado de las materias primas fue realizado por difracción a láser con el uso de un equipo MALVERN *Mastersizer S*.

La superficie específica (Se) fue determinada por absorción/desorción de N_2 líquido en la superficie de los sólidos de acuerdo con la técnica B.E.T. (Brunauer, Emmet e Teller), en un equipo QUANTACHROME INSTRUMENTS *Monosorb Surface Area Analyzer MS-13*.

El análisis químico del LR y de las arcillas fue realizado por diferentes métodos descritos a seguir: SiO_2 y perdida por calcinación (PPC), por método gravimétrico o vía húmeda; Al_2O_3 por complexometría (EDTA); Fe_2O_3 total, TiO_2 por colorimetría y CaO, MgO, Na_2O e K_2O, fueron analizados por espectrometría de absorción atómica (AA).

Para la identificación de las fases minerales tanto en las materias primas, como en los materiales producidos por extrusión después del tratamiento térmico, fue utilizado un difractómetro de rayos-X método de polvos PANALYTICAL *X´Pert PRO PW 3040/60*, con goniómetro Theta/Theta, tubo de rayos-X cerámico de ánodo de Cu ($CuK\alpha_1$ = 1,5406 Å). El detector utilizado fue del tipo RTMS, X'Celerator. Los registros fueron realizados en el intervalo de 5 a 70º (2θ), paso de 0,02º (2θ), corriente 40 mA, voltaje de 40 kV con tiempo de adquisición de 5s. Los difractogramas fueron tratados de modo digital con el paquete informático *X´Pert HighScore* ver. 2.1b, también de la PANALYTICAL. Para la identificación de las fases minerales fue utilizado el banco de datos PDF-ICDD (*Powder Diffraction File – International Center for Diffraction Data*).

La caracterización microestructural se realizó en secciones correspondientes a las fracturas frescas utilizando electrones secundarios en un microscopio electrónico de barrido (MEB) ZEISS *DSM-950* con una profundidad de campo de 500 Å.

El comportamiento plástico del LR, las arcillas y de las mezclas de arcilla con LR en las proporciones de 45, 50 e 65%-p, que de aquí en delante se denominarán LRAMSL-45, LRAMSL-50 y LRAMSL-65, respectivamente, estos fueron evaluados, mediante la determinación de los índices de Atterberg: Limite Plástico (LP), Limite Líquido (LL) e Índice de Plasticidad (IP), de acuerdo con las normas NBR-7180/84 [9], e NBR-6459 [10].

Para la extrusión de las pastas, las tres composiciones estudiadas fueron mezcladas con el agua necesaria (definida por el índice de plasticidad IP) en una mezcladora de laboratorio, para guardarlas posteriormente en sacos plásticos de polietileno durante 48 h para darle consistencia a las muestra antes de ser extruidas. Pasado este tiempo las mezclas fueron conformadas en una extrusora de laboratorio VERDÉS, para obtener probetas rectangulares de dimensiones 10 x 2 x 0,5 cm las cuales fueron secadas a 110ºC en estufa con circulación forzada de aire durante 24 horas.

Para el estudio de las características físico-mecánicas, ocho probetas para cada temperatura por composición fueron tratadas térmicamente en atmósfera oxidante a una velocidad de calentamiento de 5 ºC/min en un horno eléctrico NABERTHERM a las temperaturas de 750, 850, 950 e 1.050ºC, con tiempo de cocción de 1 h. Después del tratamiento térmico fueron medidas las siguientes propiedades cerámicas: Módulo de ruptura en tres puntos (MOR), utilizándose una máquina de ensayos universal de laboratorio TIRA GMBH *TIRAtest 2705*, de acuerdo con la norma NBR-6113/97 [11] de la ABNT. Absorción de Agua (AA); Retracción Lineal antes y después del tratamiento térmico (R_{Lsec} y R_L) de acuerdo con la norma NBR 6220/97 da ABNT [12].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de las Materias Primas

La composición química de las materias primas se presenta en la Tabla 1. Se puede observar que los óxidos mayoritarios presentes en las materias primas son: Fe_2O_3, Al_2O_3, SiO_2 e Na_2O e TiO_2.

Tabla 1: Composición química de las materias primas lodo rojo (LR) y arcillas.

Determinación	*% en peso*		
	LR	*ARC-1*	*ARC-2*
SiO_2	14,37	51,10	72,69
Al_2O_3	20,77	29,03	13,88
Fe_2O_3	31,22	2,85	3,77
TiO_2	4,55	2,11	0,93
Na_2O	9,87	1,06	1,76
K_2O	0,20	0,26	1,07
CaO	2,49	0,12	1,02
MgO	3,92	0,47	1,16
PCC	12,61	13,00	3,72

La Tabla 2 muestra el resultado de la caracterización mineralógica de las fases presentes en las materias primas realizado por difracción de rayos X. Se observa en el LR la presencia de hematita, gibbsita y cuarzo como fases minerales mayoritarias y anatasa, goetita, chantalita y sodalita como fases minerales minoritarias. Este resultado pone de manifiesto la compleja composición mineralógica que presenta el LR.

Las arcillas presentan una composición mineralógica característica de arcillas caoliníticas, con la presencia de cuarzo, pequeñas cantidades de illita y Fe_2O_3 en la forma de hematita que se confirma en el análisis químico.

Tabla 2: Composición mineralógica de las materias primas: Lodo rojo (LR) y arcillas (ARC-1 y 2).

Fase mineral	*LR*	*ARC-1*	*ARC-2*
Caolinita	---	+++	+++
Illita	---	+	+
Hematita	+++	+	+
Goetita	+	---	---
Gibbsita	++	---	---
Anatasa	+	---	---
Cuarzo	++	+	++
Feldespato	---	+	+
Sodalita	+	---	---
Chantalita	+	---	---

La determinación de la granulometría y las características de plasticidad de las materias primas se recogen en la Tabla 3. En la tabla se observa que el LR presenta una elevada superficie especifica del orden 12,96 m^2/g. El índice de plasticidad (IP) medido fue de 8 % lo que indica que se trata de una materia prima no recomendada para extrusión. Los elevados valores de D_{10} (7,50 μm), D_{50} (59,80 μm) y D_{90} (169,40 μm) obtenidos por difracción a láser, indican el estado de aglomeración del material. En cuanto al residuo retenido en la malla 325 mesh (45 μm) es cero.

Tabla 3: Determinación granulométrica y de plasticidad de las materias primas.

Medida	*LR*	*ARC-1*	*ARC-2*
D_{10} (μm)	7,50	2,22	2,76
D_{50} (μm)	59,80	13,83	26,52
D_{90} (μm)	169,40	48,30	184,22
LL (%)	25,60	58,85	44,70
LP (%)	17,59	28,75	27,41
IP (%)	8,01	28,10	17,29
% Ret. # 325 (45 μm)	0,00	2,42	34,56
Se (m^2/g) (B.E.T.)	12,96	Nd.	Nd.

Las arcillas utilizadas presentan comportamiento plástico diferente. Se puede observar en la Tabla 3 que la arcilla *ARC-1*, presenta un IP de 28,10 %, mientras que la arcilla *ARC-2* un IP de 17,29 %, esta diferencia se explica tomando en cuenta el valor del residuo retenido en la malla 325 mesh de la arcilla *ARC-2* (34,56 %), constituido esencialmente por cuarzo. Un análisis de los diámetros D_{10}, D_{50}, D_{90} para ambas arcillas muestra que la arcilla ARC-1 presenta un tamaño de partícula/aglomerado mas fino que la arcilla ARC-2. Los resultados de la Tabla 3, ponen de manifiesto la necesidad de combinar estas materias primas en proporciones adecuadas para obtenerse una pasta con plasticidad idónea para el proceso de conformado por extrusión.

3.2 Extrusión de las Pastas

Con la finalidad de obtener una pasta adecuada para extrusión, de acuerdo a sus características descritas en el apartado anterior, las materias primas fueron combinadas tomando en cuenta el diagrama de Winkler [13], después de esta combinación, la plasticidad fue determinada nuevamente. Es importante observar, que el **LP** está relacionado con la cantidad de agua necesaria para que una arcilla alcance una consistencia plástica ideal para ser conformada por extrusión, mientras que el índice de plasticidad (**IP**) indica el intervalo de consistencia plástica de una materia-prima arcillosa.

La Tabla 4 muestra el resultado de la determinación de los límites de Atterberg para las diferentes pastas constituidas por LR en concentraciones de 45, 50 e 65 % en peso.

Tabla 4: Límite de Atterberg de las mezclas LRAMSL.

Medida	*% en peso de LR en la mezcla*		
	45	*50*	*65*
LL (%)	47,0	45,0	37,2
LP (%)	29,36	28,85	27,71
IP (%)	17,64	16,15	9,49

Este resultado muestra que las pastas LRAMSL-45, LRAMSL-50, presentan valores de LP e IP adecuados para extrusión, mientras que la pasta LRAMSL-65 presenta un valor bajo de IP, que puede ser explicado tomando en cuenta la baja plasticidad que presenta el LR y su elevada concentración en la misma.

La Figura 1 muestra los materiales (en verde) obtenidos por extrusión de las mezclas. En función de los resultados se puede afirmar que las mezclas LRAMSL-45 y LRAMSL-50 presentaron un buen comportamiento de flujo durante el proceso de extrusión, mientras que la pasta LRAMSL-65, como era de esperarse, presentó dificultades de extrusión y de ajuste del agua de amasado.



Figura 1. Probetas en verde extruidas de mezclas de LR y arcillas.

3.3 Propiedades Cerámicas de las Pastas

La calidad de los productos cerámicos estructurales está directamente asociada a las propiedades tecnológicas de: porosidad, capacidad de absorber agua y resistencia mecánica.

En la Tabla 5 se muestran los valores mínimos para el módulo de ruptura (MOR) y absorción de agua máxima (AA) recomendados por *Sousa Santos* para masas cerámicas ensayadas en laboratorio las cuales serán usadas para la fabricación de materiales cerámicos tradicionales o estructurales, secos a 110 ºC durante 24 h y después de ser tratados térmicamente a 950 ºC durante 3 h de cocción.

Tabla 5: Especificaciones del módulo de ruptura (MOR) mínimo y de la máxima absorción de agua (AA) para materiales cerámicos estructurales ensayados a nivel laboratorio.

Tipo de Material	*MOR (MPa)*		*AA (%)*
	110 ºC	*950 ºC*	*950 ºC*
Ladrillo macizo	*1,5*	*2,0*	*3,8*
Ladrillo hueco	*2,5*	*5,5*	*25*
Teja	*3,0*	*6,5*	*20*

Se ha observado que los materiales obtenidos en el proceso de extrusión presentaron: buena apariencia, ausencia de grietas, defectos y fáciles de manipular. Sin embargo, con la finalidad de confirmar estas observaciones, fue determinado el módulo de ruptura en verde (MOR) de las probetas después de ser secadas a 110 ºC durante 24 h, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 2.

Es fácil deducir a partir de la Figura 2 que a medida que aumenta el contenido de LR en la composición, el MOR en verde diminuye, este efecto que puede ser atribuido a la disminución del índice de plasticidad de las mezclas (Tabla 4) a medida que aumenta el contenida de LR en la pasta, aunque los valores obtenidos superan los establecidos por las especificaciones (Tabla 5) para materiales estructurales en verde, siendo la retracción lineal de secado inferior a 4,5 %.

Las propiedades cerámicas después del tratamiento térmico de las pastas a las temperaturas de 750, 850, 950 e 1.050 ºC/1 h, son presentadas en la Figura 3.

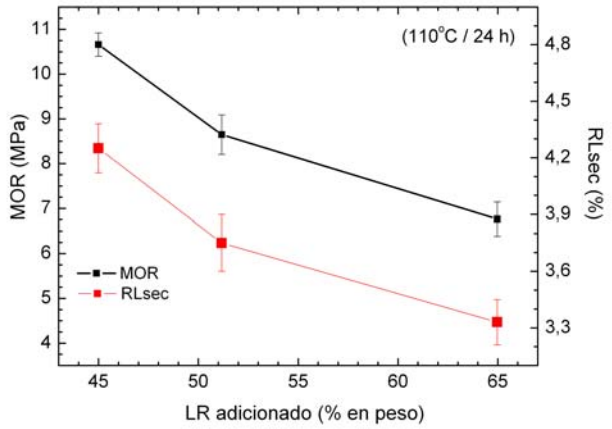


Figura 2. Módulo de ruptura y retracción lineal vs. contenido de LR, determinado en probetas de mezclas de LR y arcillas, extruidas en verde y secadas a 110ºC por/24 h.

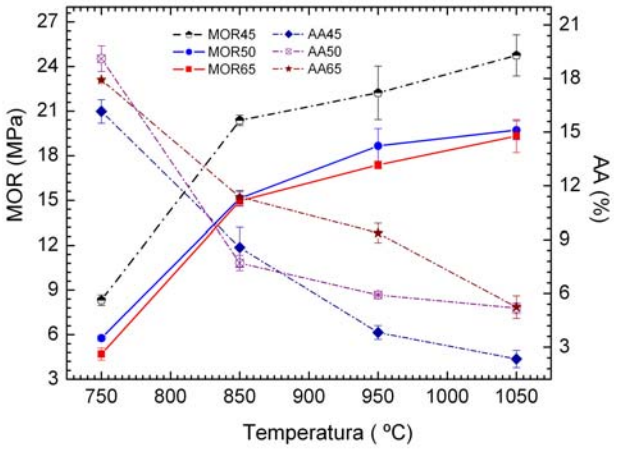


Figura 3. Módulo de ruptura y absorción de agua vs. temperatura determinados después de tratamiento térmico a 750, 850, 950 y 1.050ºC de probetas extruidas de mezclas de arcillas con 45, 50 y 65% peso de LR.

Se puede observar claramente en la Figura 3, que el MOR de las piezas obtenidas disminuye con el aumento de la concentración de LR. Este comportamiento también ha sido observado por De Aza *et al*. [14] y Sglavo *et al*. [15], que lo atribuyen a la baja reactividad que presenta el LR en el intervalo de temperatura de 750-950 ºC [14] lo que hace que el material se comporte como material inerte (Chamota) en ese intervalo de temperatura, disminuyendo así la resistencia mecánica de las piezas a medida que aumenta su concentración en la pasta.

En la misma Figura 3 se observa que a medida que ocurre un aumento de la temperatura se da un significativo incremento en las propiedades mecánicas pasando el MOR de valores que oscila entre 4-9 MPa a 750 ºC, a valores entre 18-24 MPa a 1.050 ºC. Un análisis de la AA en la misma figura muestra que esta propiedad varía de 21-24 % a 750 ºC hasta alcanzar valores entre 2-6 % a 1.050 ºC, lo que pone de manifiesto el aumento significativo de la sinterización de las piezas a medida que aumenta la temperatura. Este comportamiento durante la sinterización puede ser atribuido a la elevada concentración de alcalinos (Na_2O y K_2O) presentes en la pasta que actúan como fundentes promoviendo la formación de fase líquida a bajas temperaturas. Para confirmar esta hipótesis fue realizado el análisis por DRX de una pieza con concentración 50% en peso de LR sinterizada a 1.050 ºC por 1 h de reacción, cuyo difractograma se muestra en la Figura 4. Se observa en la Figura 4 que las fases minerales dominantes en el material son la hematita y una serie de feldespatoides como es el caso de los plaglioclasios y los clinopiroxenos, los cuales actúan como fundentes en la masa.

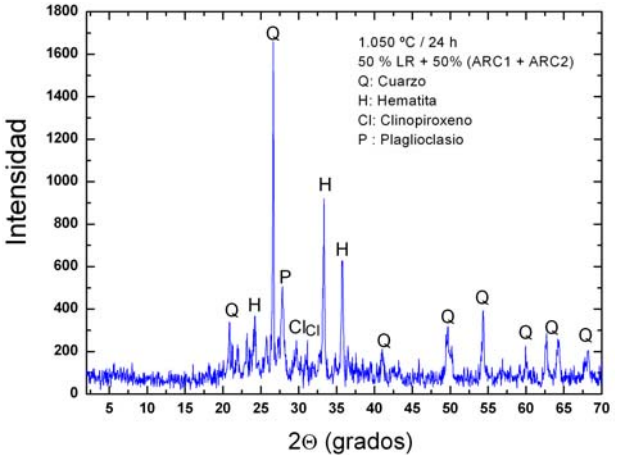


Figura 4. Difracción de rayos X de una pieza con 50 % de LR tratada térmicamente a 1050ºC por 1h de reacción.

Es importante observar que estos valores son superiores a los establecidos en la Tabla V y en las normas NBR: 15270:1[16], 15270:2[17] y 15270:3[18].

Finalmente, el análisis de la microestructura de los materiales sinterizados en este estudio realizado sobre la fractura fresca de una pieza extruida y tratada térmicamente a 950 ºC por/ 1 h se muestra en la Figura 5. A bajos aumentos (figura 5-a), se observa la presencia de gran cantidad de poros de tamaño inferior a 10 μm, formados probablemente por los gases descompuestos durante las diferentes etapas del tratamiento térmico. A mayores aumentos (Figura 5-b), se observa una mayor cantidad de poros de tamaño inferior a 2 μm con cuellos interconectados. En ambas figuras se observa la formación de fase líquida en cantidad insuficiente

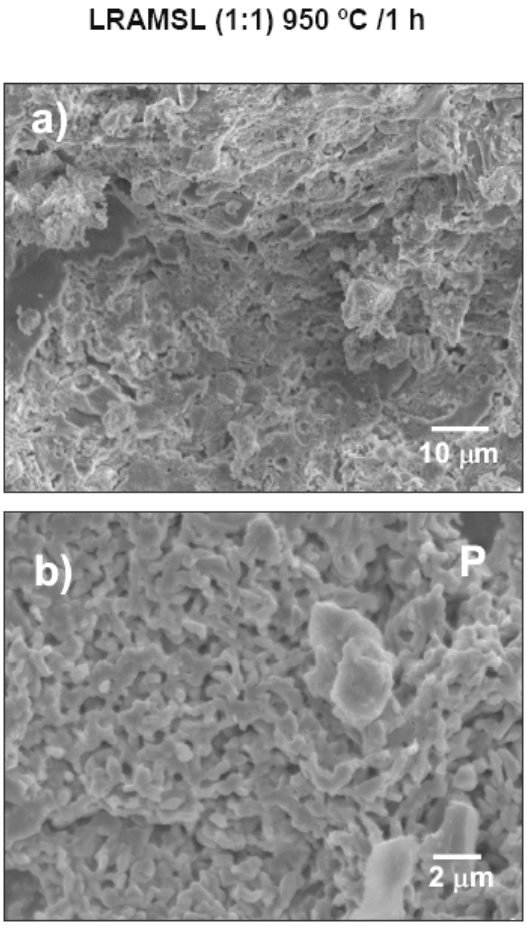


Figura 5. Microscopía electrónica de barrido de electrones secundarios de probeta extruida y tratada térmicamente a 950ºC/por 1 h de la mezcla de 50% de LR y 50% de mezclas de arcillas: a) Fractura fresca a 1.000 X ; b) Fractura fresca a 4.000 X.

para cerrar los poros, sin embargo, a medida que la temperatura aumenta esta fase se debe formar en mayor cantidad lo que explica el aumento considerable de la resistencia mecánica de las piezas a 1.050 ºC cuando son comparadas con las mismas tratadas a 750 ºC.

4. CONCLUSIONES

- Se ha estudiado la incorporación de un LR, residuo de bauxita, en la producción de materiales estructurales por extrusión.
- Los resultados muestran que es posible producir materiales como: ladrillos huecos, ladrillos macizos y tejas, con mezclas de arcilla y lodo rojo en el intervalo de concentración de 45-65 %-p, con buenas propiedades mecánicas, en el intervalo de temperatura de 750-1050 ºC.
- Los datos de caracterización de los materiales obtenidos muestran que las propiedades mecánicas diminuyen a medida que aumenta la concentración de LR en la mezcla.
- Todos los materiales obtenidos por extrusión de mezclas de arcillas y LR en el intervalo de concentraciones de 45-65 %-p, presentan propiedades cerámicas superiores a las establecidas en las normas brasileras para la producción de materiales estructurales.

5. AGRADECIMIENTOS

A la FUNDACIÓN DE APOIO À PESQUISA DO ESTADO DO MARANHÃO (FAPEMA) de Brasil. Al Instituto de Cerâmica y Vidrio del CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS (CSIC) de España.

6. REFERENCIAS

[1] Galdino LG, *Aproveitamento da Lama Vermelha, um Resíduo da Industria do Alumínio, na Obtenção de Materiais Cerâmicos por Extrusão*. Tesis M.Sc. São Luis (Brasil): Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão, 2008.

[2] Norma NBR 10004/04: *Resíduos Sólidos – Classificação*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2004.

[3] Hind AR, Bhargava SK, Grocott SC, *Colloid. Surface. A*: *Physicochem. Eng. Asp*. 1999; **146** (1-3): 359-374.

[4] Thakur RS, Sant BR, *J. Sci. Industr. Res*. 1974; **33** (1): 403-416.

[5] Glenister D, Smirk D, Piskersgil G, "Bauxite Residue – Development of a Resource". En: Proceedings del *An International Bauxite Tailings Workshop.* Perth (Australia): Australian Bauxite and Alumina Producers, 1992, p. 301-308.

[6] *ABAL Indústria: Estatísticas*. São Paulo (Brasil): Associação Brasileira do Alumínio ABAL. [En línea] 2008 [citado 17-Feb-2008]. Disponíble en la web: <http://www.abal.org.br/industria/>.

[7] Perez RGA, Guitián RF, De Aza PS, *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidr*. 1999; **38** (3): 220.

[8] Santos OS, *Ciência e Tecnologia das Argilas*, 2da Ed. São Paulo (Brasil): Edgard Blücher, 1989, 1: 499.

[9] Norma NBR 7180/84: *Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 1984.

[10] Norma NBR 6459/84: *Solo - Determinação do Limite de Liquidez.* Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 1984.

[11] NBR 6113/97: *Materiais Refratários Densos Conformados - Determinação da Resistência à Flexão à Temperatura Ambiente*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 1997.

[12] Norma NBR: *Determinação da Densidade Aparente, Porosidade Aparente e Absorção de Água*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 1997.

[13] Pracidelli S, Melchiades FG, *Cerâmica Industrial* 1997; **2 (**1/2): 31-36.

[14] Perez Rodriguez GA, Gutian Rivera F, De Aza PS, *Bol. Soc. Esp. Cerám. Vid*. 1999; **38** (2): 220-226.

[15] Sglavo VM, Campostrini R, Maurina S, Carturan G, Monagheddu M, Budroni G, Cocco G, *J. Eur. Ceram. Soc*. 2000; **20** (3): 235-244.

[16] Norma NBR 15270:1/05: *Componentes Cerâmicos - Parte 1: Blocos Cerâmicos para Alvenaria de Vedação - Terminologia e Requisitos*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2005.

[17] Norma NBR 15270:2/05: *Componentes Cerâmicos - Parte 2: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural - Terminologia e Requisitos*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2005.

[18] Norma NBR 15270:3/05: *Componentes Cerâmicos - Parte 3: Blocos Cerâmicos para Alvenaria Estrutural e de Vedação - Métodos de Ensaio*. Rio de Janeiro (Brasil): Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT, 2005.