

PROCESSO DE RECICLAGEM DA ESCÓRIA DE ACIARIA VISANDO A PRODUÇÃO DE LÃ DE ROCHA ¹

Joner Oliveira Alves ²
Denise Croce Romano Espinosa ³
Jorge Alberto Soares Tenório ⁴

Resumo

O trabalho teve como objetivo o estudo do reaproveitamento da escória de aciaria visando a produção de lã de rocha. Inicialmente foi analisada a composição química da escória de aciaria e realizada uma verificação dos ajustes necessários em sua composição visando uma aproximação da lã de rocha constante na literatura. Posteriormente, foi utilizado um forno a arco elétrico, em escala de laboratório, para fundir a mistura da escória com os devidos aditivos químicos. Com a fusão da mistura, o produto foi vazado nas temperaturas de 1400°C, 1450°C e 1500°C, primeiro sobre um recipiente com água, visando um resfriamento brusco e com isso uma aproximação do método de produção da lã citada. No segundo vazamento foi realizado o ensaio de viscosidade Herty. Amostras do material produzido foram caracterizadas por técnicas de análises químicas, difratométricas e microestruturais, sendo que, os resultados obtidos foram comparados aos valores encontrados na literatura. Os resultados encontrados neste trabalho podem dar início a uma inovação tecnológica, pois permitem o reaproveitamento da escória de aciaria, transformando-a em subproduto e, além disto, encontrou-se uma alternativa econômica para a produção da lã de rocha, que possui amplo mercado como isolante térmico, acústico e inibidor de propagação de chamas.

Palavras-chave: Reciclagem; Escória de aciaria; Lã de rocha.

PROCESS'S RECYCLING OF STEELMAKING SLAG AIMING AT THE PRODUCTION OF ROCK WOOL

Abstract

The aim of this work was to study the use of steelmaking slag as raw material to the production of rock wool. Firstly, the chemical composition of the slag was analyzed. These results were used to infer the amount of additives to assemble the charge for the experiments. Thus, the mixture were prepared using steelmaking slag as main raw-material. A laboratory-scale electric furnace was used to melt the studied mixtures of residues and additives used as charge. Three different temperatures were studied: 1400°C, 1450°C and 1500°C. Firstly, a small amount of the melt material were turned into a water filled recipient, this process was performed in order to impose a fast freezing that is a characteristic of rock wool production. Finally, with the rest of the melt material it was performed the Herty Viscosity Test. Samples of the produced material were characterized by chemical analysis, X-ray diffraction and Scanning Electronic Microscopy. The results found in this research may lead to a technological innovation, because they indicate that the use of residue to produce rock wool is possible.

Key words: Recycling; Steelmaking slag; rock wool.

¹ *Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil*

² *Doutorando, Universidade de São Paulo (USP), Mestre.*

³ *Professora doutora, Universidade de São Paulo (USP), Doutora.*

⁴ *Professor titular, Universidade de São Paulo (USP), Doutor.*

1 INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações do mundo moderno é com relação à preservação do meio ambiente. A realização do presente trabalho visou a obtenção das bases do conhecimento para a transformação de um resíduo industrial em matéria-prima, através da re-inserção deste no meio produtivo, e assim, diminuindo o impacto causado pela exposição deste ao ambiente. Além disto, o novo produto formado possui amplo mercado, e a utilização do material reciclado implica em uma diminuição da extração de recursos naturais necessários para a geração deste.

A reciclagem de resíduos sólidos é uma crescente nos dias atuais, visto que a produção industrial se expande a cada ano. O aumento da produção industrial traz consigo um grave problema, a disposição do lixo produzido. A transformação do lixo industrial em subprodutos pode ser economicamente viável, uma vez que o descarte ou a disposição deste acarreta gastos tanto com o seu transporte, quanto com o controle das áreas de depósito, além da pressão social associada a este tema.⁽¹⁾

O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade técnica do reaproveitamento da escória de aciaria como matéria-prima no processo de fabricação da lâ de rocha, em substituição aos materiais tradicionais, oriundos de recursos naturais não renováveis.

O setor siderúrgico se encontra em franca expansão e com ele a produção de escória de aciaria. A produção mundial de aço bruto em 2006, alcançou a cifra de 1,24 bilhões de toneladas registrando um novo recorde de produção. O forte crescimento da produção de aço na China (que registrou 423,4 milhões de toneladas) e o processo de consolidação da indústria siderúrgica mundial, impulsionado pelas aquisições feitas pelas grandes companhias do setor, são fatores que contribuíram para o recorde de produção registrado.⁽²⁾ Considerando que em cada tonelada de aço produzido são geradas cerca de 150 kg de escória de aciaria, ou seja, 15% do total produzido, somente no ano de 2006 foram produzidos aproximadamente 186 milhões de toneladas deste resíduo.⁽³⁾ Extensas áreas dos parques industriais estão sendo ocupadas por estes resíduos, ocasionando custos de disposição. Portanto, o reaproveitamento da escória de aciaria representa uma solução técnica, econômica e ecológica para as siderúrgicas.⁽⁴⁾

A escória de aciaria é um subproduto gerado durante a produção do aço, podendo ser oriunda de diferentes processos, tais como as geradas nos fornos conversores Linz-Donawitz - LD, ou de arco elétrico – FEA.⁽⁴⁾ Durante o processo de produção do aço são eliminados carbono, CaO e os íons de alumínio, silício e fósforo. São estes elementos e compostos eliminados que originam a composição da escória de aciaria. Dentre os compostos que formam a escória estão: silicatos de cálcio (CaSiO_3), óxido de silício (SiO_2), ferrita cálcica (CaFe_2O_4), óxido de magnésio (MgO), além de altos teores de CaO e MgO livres.⁽³⁾

Cerca de 20% da produção mundial da escória de aciaria não é reaproveitada, sendo que no Brasil este número sobe para 30%. A utilização deste resíduo para a fabricação de lâ de rocha não possui números significativos no Brasil e no mundo, portanto, esta é uma técnica nova e que pode se tornar bastante útil.⁽⁵⁾

A lâ de rocha possui estrutura vítrea e como tal, suporta quantidades de diferentes elementos em solução, sendo, portanto, ideal para assimilar escórias complexas em suas composições. Tal fato faz com que este material possa ser utilizado como uma forma de reaproveitamento de resíduos industriais.⁽¹⁾

A matéria-prima principal para a produção da lâ de rocha são as rochas basálticas, sendo que, pode ser necessário a adição de calcário ou outros elementos, de modo

a corrigir eventuais desvios na composição química do basalto.^(6,7) Devido às suas características termo-acústicas, este material atende aos mercados de construção civil, industrial, automotivo, eletro-eletrônico, entre outros.⁽⁹⁾ Outra importante qualidade das lãs minerais é o fato de que estas não propagam chamas, não emitem fumaças tóxicas e possuem elevada resistência ao fogo.⁽¹⁰⁾

A produção das lãs inicia-se com a fusão das matérias-primas. Devido às elevadas temperaturas necessárias para fundir os componentes empregados (entre 1.400° C e 1.500° C) é necessário o emprego de fornos especiais. Após a fusão, o material fundido é ejetado por orifícios, devido a pressão de um gás (argônio ou nitrogênio), sobre um disco giratório de metal resfriado, que gira com uma determinada velocidade angular. Assim, o material é resfriado bruscamente, originando as fibras, estas são extraídas do disco (através de um jato de ar) e posteriormente lançadas em uma câmara coletora, na qual são pulverizadas com aglutinante (dependendo do produto final desejado também pode ser utilizada uma mistura de óleo solúvel, água e silicone). Esta técnica é conhecida como *Melt Spinning*.^(7, 8)

São características da lã de rocha: isolamento térmica, absorção acústica, não propagam chamas, são imputrescíveis, são dimensionalmente estáveis mesmo em altas temperaturas, fáceis de recortar e aplicar, não absorvem umidade e não sofrem danos estruturais, não quebram facilmente, reduzindo as perdas nas obras, não são atacadas por roedores ou insetos, não atacam as superfícies com as quais venham a entrar em contato, não depositam quando submetidos a vibrações, ausência total de partículas não fibradas.^(7, 8)

A sílica (SiO₂) é o principal componente da lã de rocha, seguido do óxido de cálcio (CaO). A composição química deste material pode ser variada de acordo com a aplicação final do produto. Uma análise das composições químicas da lã de rocha encontradas na literatura pode ser feita observando a Tabela 1.

Tabela 1. Composição química, em % de peso, da lã de rocha segundo diferentes autores.

COMPONENTES	PORCENTAGEM DE PESO		
	LUOTO et al. (1998)	BUCK (1997)	JURY (1997)
SiO ₂	45,9	45,0 - 52,0	41,0 - 44,0
CaO	18,5	10,0 - 12,0	10,0 - 12,0
MgO	11,6	8,0 - 15,0	6,0 - 7,0
Al ₂ O ₃	11,9	8,0 - 13,5	14,0 - 15,0
MnO	0,0	0,1 - 0,3	0,0 - 0,2
Fe ₂ O ₃	8,2	5,5 - 6,5	12,0 - 13,0
Na ₂ O	1,8	0,8 - 3,3	3,0 - 4,0
K ₂ O	0,6	0,8 - 2,0	1,0 - 1,5
TiO ₂	0,9	1,5 - 2,7	3,0 - 3,5

Fonte: BRAGA, 1991⁽¹¹⁾; JURY, 1997⁽⁶⁾; LUOTO et al., 1998⁽⁹⁾.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais relacionados a este trabalho foram realizados nos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).

A mistura das matérias-primas foi feita visando a maior aproximação possível das composições químicas da lã de rocha encontradas na literatura (mostradas na Tabela 1).

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram: 700g de escória de aciaria (Forno Elétrico a Arco - FEA), 400g de sílica (SiO₂), 80g de alumina (Al₂O₃), 80g de

óxido de magnésio (MgO), 60g de bórax (16,25% de Na₂O, 36,51% de B₂O₃ e 47,24% de H₂O).

A escória foi fragmentada utilizando-se um almofariz de alumina e, em seguida, passou por uma peneira do tipo ABNT - 4 (abertura de 4,76mm), sendo utilizado o material passante.

Para a pesagem dos materiais foi utilizada uma balança da empresa Marte modelo AS 5500C, com menor divisão de 0,001g. A homogeneização dos componentes da mistura foi realizada em um agitador do tipo Eirich (com 10min de funcionamento).

A fusão das matérias-primas foi realizada no forno a arco elétrico do tipo Detroit, que se encontra no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. O material foi aquecido durante 50 min, posteriormente, foram adotadas três temperaturas de vazamento do material (1.400°C, 1.450°C e 1500°C).

A lã de rocha é um material predominantemente amorfo, portanto um resfriamento rápido é necessário. Neste trabalho o material fundido, foi vertido diretamente do forno em um recipiente contendo água à temperatura ambiente. Neste procedimento procurou-se depositar o mínimo de material possível no recipiente, fazendo com isso uma tentativa de aproximação da técnica Melt Spinning, utilizada na produção da lã. Após o processo de resfriamento, o material foi coletado e levado a uma estufa do tipo FANEM a uma temperatura de 90°C durante 24h.

A Figura 1 exibe o processo de resfriamento adotado, pode-se observar o vazamento do material sobre um recipiente contendo água (a temperatura ambiente). A temperatura na qual o material se encontrava foi registrada através da utilização de um pirômetro ótico do tipo Minolta/Land (emissividade ajustada para 0,45).



Figura 1. Processo de resfriamento, em água, do material.⁽²⁾

As amostras dos produtos formados após o resfriamento foram caracterizados através de análises químicas, difratométricas e microestruturais. Sendo que, para as análises químicas e microestruturais foi caracterizada apenas a amostra que teve vazamento à temperatura de 1.450°C, uma vez que a ligeira variação da temperatura não influi significativamente na composição química do material produzido.

A curva de resfriamento é um dado importante quando tratamos de materiais vítreos, pois a condição de resfriamento influencia diretamente na estrutura do material formado. Neste trabalho foi utilizado o software ThermoCalc (versão "n") para os cálculos dos dados termodinâmicos e obtenção dos gráficos de resfriamento. O procedimento para a obtenção dos resultados da simulação consiste em inserir as porcentagens de cada elemento na tela do ThermoCalc, o software processa estes dados e fornece um gráfico onde são mostradas as transições de fases, bem como as temperaturas em que estas ocorrem.

Viscosidade é a resistência interna de um fluido à alteração de sua forma, ou aos movimentos internos de suas moléculas umas em relação às outras. O inverso da viscosidade é a fluidez, ou seja, a facilidade de escoamento. Apesar do nome, o Viscosímetro Herty mede a fluidez do material. Esta técnica, foi utilizada neste trabalho e consiste no vazamento do material fundido em um aparelho constituído de uma entrada no formato de um cone e um canal horizontal. Foram realizados ensaios de viscosidade Herty para três temperaturas de vazamento do material (1.400°C, 1.450°C e 1500°C).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Análise Química da Escória de Aciaria

A Tabela 2 traz o resultado da análise química da amostra de escória de aciaria elétrica, sendo que, os valores estão expressos em porcentagem de peso. Observando esta tabela, pode-se notar que o material possui aproximadamente 17% de SiO₂ em sua composição, portanto, para a sua utilização como matéria-prima para a produção de materiais vítreos, é necessária a adição de outros componentes para compensar este valor.

Tabela 2. Composição química da escória de aciaria elétrica (em % de peso).

Elementos	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	Outros
Composição (%)	16,85	46,93	2,56	5,44	5,47	16,21	2,12	4,42

3.2 Curvas de Resfriamento dos Materiais

A Figura 2 mostra a curva de resfriamento com base nas composições da lâ de rocha obtidas na literatura. Pode-se observar que o espinélio (MgO.Al₂O₃) é formado, aproximadamente, a 1.220°C e silicato de cálcio (CaO.SiO₂), segunda fase apresentada, é formado, aproximadamente, a 1.210°C.

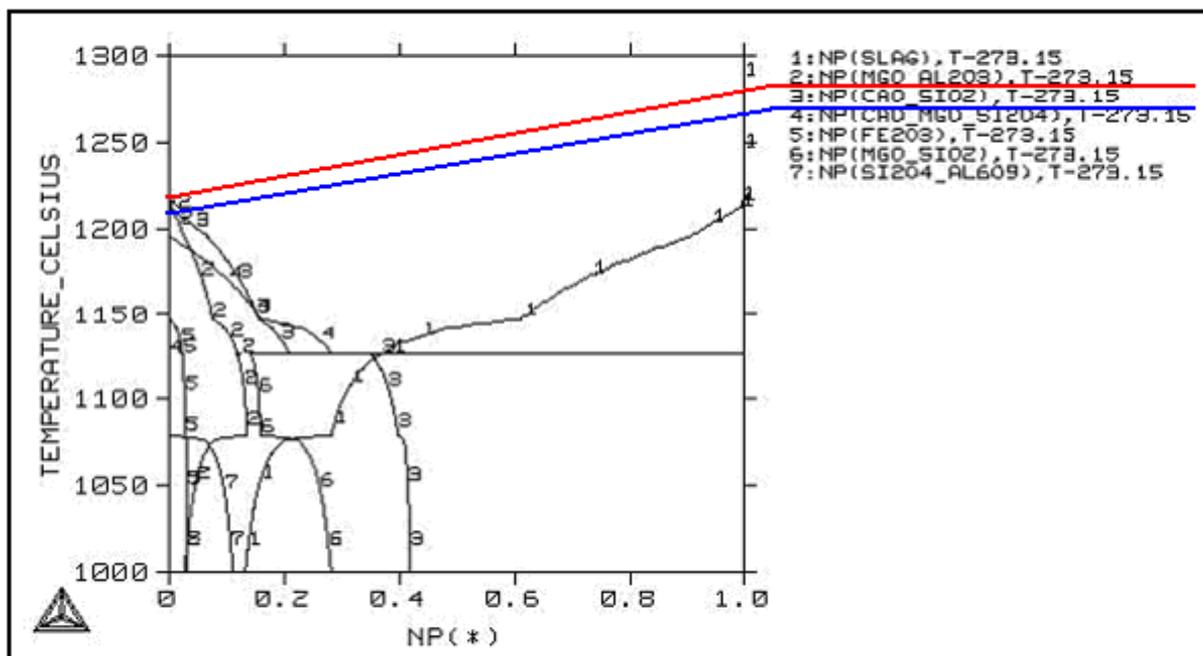


Figura 2. Curva de resfriamento da lâ de rocha.

Na Figura 3 tem-se a curva de resfriamento do produto obtido. Nesta, verifica-se a formação do silicato de cálcio a cerca de 1.280°C, sendo o espinélio formado a, aproximadamente, 1.220°C.

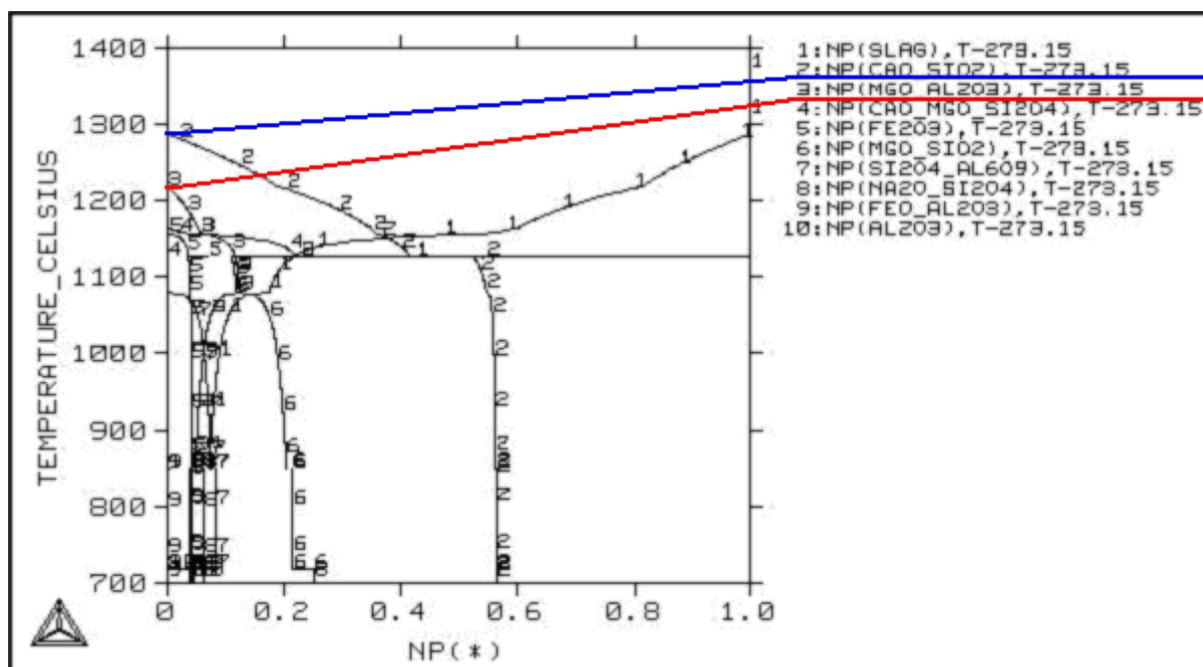


Figura 3. Curva de resfriamento do produto obtido.

3.3 Aspectos Físicos do Material Formado

Como era esperado, o material adquiriu propriedades semelhantes aos vidros: translúcidos, frágeis e quebradiços à temperatura ambiente. Quanto a coloração, o material apresentou uma cor verde (como pode ser observado na Figura 4).

O óxido de cromo III (Cr_2O_3) é o principal agente corante dos vidros verdes. Quando o cromo se encontra no estado reduzido, ele fornece uma tonalidade fortemente esverdeada ao vidro. Pode-se concluir que a cor verde obtida no material produzido neste trabalho possui origem no teor de Cr_2O_3 encontrado na escória de aciaria possui (2,12%). O aparecimento deste óxido na composição do produto não é uma restrição ao emprego deste como lâ de rocha, pois, como foi mencionado, o Cr_2O_3 é utilizado pelas indústrias vidreiras para a coloração do vidro.



Figura 4. Amostra do material formado.

3.4 Análise Química do Material Formado

A Tabela 3 mostra a composição química do produto formado. Pode-se observar que as proporções dos elementos se encontram dentro da faixa de composição da lâ de rocha (mostrada na Tabela 1). Traços dos elementos B_2O_3 (0,62%) e Cr_2O_3 (0,68%) foram encontrados, entretanto, devido as baixas concentrações destes óxidos, não existe perda de propriedades por parte da lâ. Os valores dos elementos majoritários encontrados neste produto satisfazem as porcentagens da composição da lâ de rocha.

Tabela 3. Composição química do produto formado (em % de peso).

SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	B_2O_3	Cr_2O_3
43,20	22,60	7,80	10,60	0,93	11,10	2,24	0,18	0,05	0,62	0,68

3.5 Difração de raios-X do Material Formado

Os espectros de difração de raios-X do produto obtido para as diferentes temperaturas de vazamento são mostrados na Figura 5. Através da análise desta figura pode-se notar que as curvas exibidas apresentaram picos largos, o que caracteriza a condição amorfa dos materiais. Portanto, o material apresentou características estruturais derivadas de um processo de resfriamento suficientemente rápido a fim de garantir a máxima ausência de ordenação estrutural dos vidros. Isto quer dizer que não houve o processo de devitrificação indesejado na obtenção deste material.

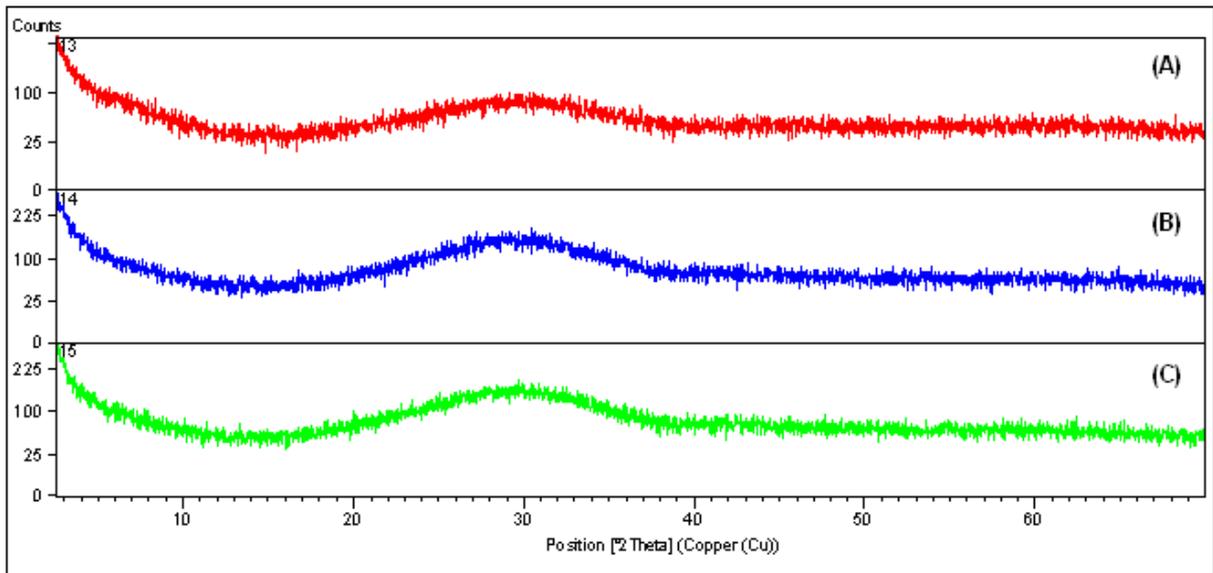


Figura 5. Espectros de difração de raios-X do produto obtido para as diferentes temperaturas de resfriamento: (A) 1.400°C, (B) 1.450°C e (C) 1.450°C.

3.6 Análise Microestrutural do Material Formado

A imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do material formado está disposta na Figura 6. O produto formado com a escória de aciaria como matéria-prima principal não apresentou fases secundárias, o que pode ser comprovado pelo aspecto homogêneo exibido pela figura.

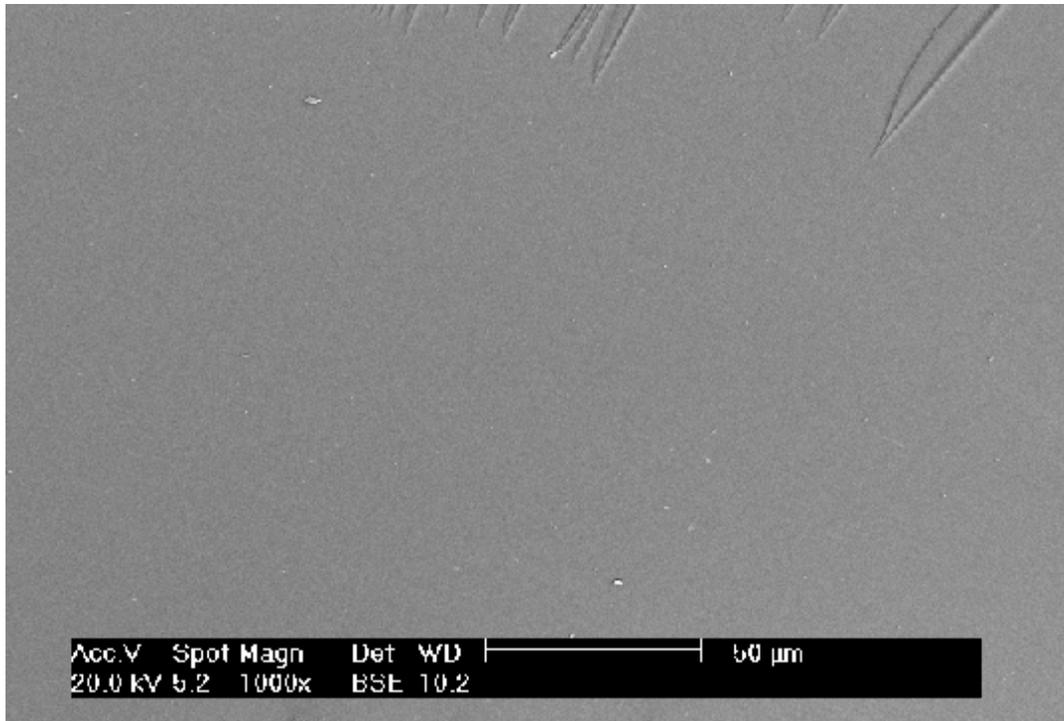


Figura 6. Imagem obtida por microscopia eletrônica de varredura do produto obtido.

3.7 Viscosidade Herty (Fluidez)

O ensaio de viscosidade Herty fornece a fluidez do material, ou seja, o quanto o material flui pelo viscosímetro antes da solidificação. Os resultados dos ensaios são expressos em centímetros, sendo demonstrados a seguir:

- Para a temperatura de vazamento a 1400°C = 12 cm;
- Para a temperatura de vazamento a 1450°C = 15 cm;
- Para a temperatura de vazamento a 1500°C = 18 cm.

Os valores da fluidez aumentaram proporcionalmente com o aumento da temperatura de vazamento. Uma variação de 6 cm foi registrada com o aumento da temperatura de vazamento de 1400°C para 1500°C.

4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que a utilização da escória de aciaria como matéria-prima principal para a produção da lã de rocha mostrou-se eficiente, podendo assumir valores em torno de 60% do total da mistura. Portanto, é recomendável a utilização deste resíduo para tal, proporcionando uma diminuição na extração de recursos minerais, um destino rentável para a escória de aciaria e uma economia na produção da lã de rocha.

Agradecimentos

Os autores agradecem a REDEMAT, USP, Fundação Gorceix e FAPESP.

REFERÊNCIAS

- 1 FERREIRA, H. S. ; MENEZES, R. R. ; FERREIRA, H. C. ; NEVES, G. A.. Uso de Rejeitos de Granitos como Matérias-primas Cerâmicas. *Cerâmica*, São Paulo, v. 48, n. 306, p. 92-101, 2002.
- 2 ALVES, J. O.. Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lã mineral. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, Brasil, 2008.
- 3 DELLA, V. P., JUNKES, J. A., KUHN, I., HIELLA, H. G., HOTZA, D.. By-product Utilization of Metallic Recovering of Stainless Steel Slags in The Ceramic Pigments Synthesis: Raw Material Characterization. *Cerâmica*, 2005, vol. 51, n. 318.
- 4 MANCIO, M.. Contribuição ao Estudo do Fenômeno da Instabilidade Volumétrica das Escórias de Aciaria Elétrica. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, UFRGS. Porto Alegre, Brasil, 2001.
- 5 YUAN, M. C.. Ações Institucionais da Siderurgia Brasileira para Disseminação do Uso das Escórias de Aciaria. Biblioteca Técnica, ArcelorMittal. Disponível em: <<http://www.arcelormittal.com/br/>>. Acessado em 26/09/2006.
- 6 JURY, J. B. R. B.. Cinétique de Cristallisation et Altération Post-Magmatique d'une Cheminée Basaltique du Complexe Volcanique de Lisbonne. Tese de Doutorado, Université POITIERS, França, 1997.
- 7 TRDIC, F. ; SIROK, B. ; BULLEN, P. R. ; PHILPOTT, D. R.. Monitoring Mineral Wool Production Using Real-Time Machine Vision. *Real-Time Imaging* 5, 125-140, Academic Press, USA, 1999.

- 8 UEDA, M; MURASE, F.; TAKAHASHI, F.; MATSUMOTO, T.. An Optical System for Measuring the Eccentricity of Glass Wool Pipe - for Industrial Use. *Optics and Lasers in Engineering*, issue 6, v. 31, , p. 493-50, 1999.
- 9 LUOTO, K.; HOLOPAINEN, M.; KANGAS, J.; KALLIOKOSKI, P.; SAVOLAINEN, K.. Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture. *Environ. Res. Sect. A* 78, pp. 25–37., 1998.
- 10 MARABINI, A. M.; PLESCIA, P.; MACCARI, D.; BURRAGATO, F.; PELINO, M.. New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass- and rock-wool fibre. *International Journal of Mineral Processing*, Volume 53, Issues 1-2, February 1998, Pages 121-134.
- 11 BRAGA, O. J. O Aproveitamento de Lã de Vidro Residual em Matriz de Gesso. *Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, Brasil, 1991.*