

# ESTUDO DA FLUIDEZ DA ESCÓRIA DE ACIARIA E DO RESÍDUO DE CORTE DO GRANITO EM TEMPERATURAS ELEVADAS <sup>1</sup>

*Joner Oliveira Alves<sup>2</sup>  
Denise Crocce Romano Espinosa<sup>3</sup>  
Jorge Alberto Soares Tenório<sup>4</sup>*

## **Resumo**

O presente trabalho teve como objetivo o estudo da viscosidade Herty da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito, misturados a outros elementos, visando estabelecer a composição de viscosidade mais adequada para a produção de materiais vítreos. Diferentes misturas contendo estes dois resíduos foram fundidas em um forno a arco elétrico do tipo Detroit, localizado no Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. O produto fundido foi vertido em um viscosímetro Herty e as respectivas medidas de fluidez foram estudadas. Como produto deste trabalho foram obtidos os valores da fluidez (viscosidade Herty) das diferentes misturas contendo a escória de aciaria elétrica e o resíduo de corte do granito, e com estes resultados foi elaborada uma faixa de composição ideal para a fabricação de vidros através destes resíduos como matéria-prima principal.

**Palavras-chave:** Viscosímetro Herty; Fluidez; Escória de aciaria; Resíduo do corte de granito.

## **STUDY'S FLUIDITY OF STEELMAKING SLAG AND WASTE FROM GRANITE CUTTING IN HIGH TEMPERATURES**

### **Abstract**

The aim of this work was to study the viscosity of steelmaking slag and waste from granite cutting, mixed with other elements, aiming to establish the best range of measures for the production of vitreous materials. Different mixtures containing these two residues were melted in a Detroit electric furnace located in the Department of Metallurgical Engineering and Materials of USP. The Herty Viscosity test was performed in the molten products and their measures of fluidity were studied. The results of this work were the values of fluidity (Herty viscosity) of the different mixtures containing steelmaking slag and waste from granite cutting, and the choice of the ideal composition for the manufacture of glass using these wastes as raw materials.

**Key words:** Herty viscosity; Fluidity; Steelmaking slag; Waste from granite cutting.

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

<sup>2</sup> *Doutorando, Universidade de São Paulo (USP), Mestre em Eng. de Materiais.*

<sup>3</sup> *Professora doutora, Universidade de São Paulo (USP), Doutora em Eng. Metalúrgica.*

<sup>4</sup> *Professor titular, Universidade de São Paulo (USP), Doutor em Eng. Metalúrgica.*

## 1 INTRODUÇÃO

O aproveitamento, total ou parcial, de rejeitos constitui uma vantagem que coloca o fabricante em uma posição fortemente competitiva no mercado, devido não apenas à questão econômica, como também à oportunidade de veiculação deste princípio como marketing ecológico.<sup>(1)</sup>

Neste projeto utilizou-se o resíduo do corte de granito e a escória de aciaria, dois rejeitos industriais, com o intuito de preparar-se materiais vítreos para a aplicação em isolamento termo-acústico.

O setor siderúrgico se encontra em franca expansão e com ele a produção de escória de aciaria, sendo que, a geração mundial deste resíduo é estimada em 44 milhões de toneladas por ano e a brasileira em 3 milhões de toneladas por ano.<sup>(2)</sup> O grande volume deste material faz com que a procura por meios de seu reaproveitamento seja grande, porém algumas de suas propriedades fazem com que seu uso seja restrito.

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.<sup>(3)</sup> 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.<sup>(1)</sup> 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.<sup>(2)</sup>

Outro setor industrial com grande produção de resíduo é o da indústria de corte do granito. Durante o processo de extração do granito, mais especificamente durante o corte da rocha, são gerados resíduos grossos e finos. Estimativas apontam que uma empresa pode produzir aproximadamente 35 toneladas de pó de granito em apenas um mês.<sup>(4)</sup>

O resíduo de granito deve ser tratado com cuidado, pois quando em contato com rios, lagoas ou reservatórios de água ele pode causar assoreamento, além de apresentar riscos à saúde humana, podendo causar graves problemas, como a silicose.<sup>(5)</sup>

A pesquisa sobre o reaproveitamento de resíduos industriais passa pela análise de certas propriedades dos materiais. Para a produção de materiais vítreos através da utilização de resíduos uma característica fundamental para tal é a fluidez no ponto de fusão dos materiais. Segundo Bansal e Doremus,<sup>(6)</sup> a fluidez (ou o seu inverso, a viscosidade) de um material vítreo é uma das mais importantes propriedades tecnológicas durante a produção de vidros. Ela determina as condições de fusão, as temperaturas de trabalho e a taxa de devitrificação.

Viscosidade é a resistência interna de um fluido (líquido ou gás) à alteração de sua forma, ou aos movimentos internos de suas moléculas umas em relação às outras. A viscosidade de um fluido denota sua resistência ao escoamento. O inverso da viscosidade é a fluidez, ou seja, a facilidade de escoamento.<sup>(7)</sup>

Segundo Bansal e Doremus,<sup>(6)</sup> a fluidez é uma das mais importantes propriedades tecnológicas durante a produção de vidros. Ela determina as condições de fusão, as temperaturas de trabalho e a taxa de devitrificação.

Teoricamente, é possível formar vidros de qualquer material, bastando que este seja resfriado suficientemente rápido para tanto. Porém, na prática, os materiais que podem vir a constituir vidros são aqueles que possuem a característica de ter uma certa alteração de viscosidade com a variação da temperatura.<sup>(8)</sup>

Este trabalho objetivou o estudo da fluidez em altas temperaturas do resíduo de corte de granito e da escória de aciaria, visando a aplicação destes resíduos como matérias-primas no processo de fabricação de materiais vítreos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Matérias-primas Empregadas

As matérias-primas empregadas neste trabalho foram elaboradas a partir dos seguintes constituintes principais: resíduo do corte de granito (misturas “A” e “B”), escória de aciaria elétrica (misturas “C” e “D”) e uma associação do resíduo do corte de granito e da escória de aciaria elétrica (misturas “E” e “F”). A Tabela 1 mostra as composições químicas das misturas empregadas neste trabalho.

**Tabela 1.** Composição química das misturas empregadas neste trabalho.<sup>(1)</sup>

Elementos	Misturas (% de peso)					
	A	B	C	D	E	F
SiO <sub>2</sub>	47,66	63,10	43,20	55,19	47,35	54,20
CaO	17,60	7,40	22,60	17,20	19,60	11,60
MgO	9,40	3,50	7,80	1,42	8,90	3,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,20	6,20	10,60	2,20	11,50	9,10
MnO	0,08	0,04	0,93	1,93	0,71	0,34
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,57	0,86	11,10	4,86	7,57	3,86
Na <sub>2</sub> O	1,89	14,10	2,20	11,30	2,42	9,80
K <sub>2</sub> O	0,94	0,85	0,18	0,62	1,11	1,65
TiO <sub>2</sub>	0,35	0,13	0,05	0,05	0,25	0,35
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,26	3,64	0,62	4,80	0,15	5,62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,68	0,42	0,42	0,18
Outros	0,05	0,18	0,04	0,01	0,02	0,02

### 2.2 Fusão das Misturas

As misturas produzidas foram fundidas, durante 50min, em um Forno Detroit (em escala de laboratório) fabricado pela Combustol. Para cada uma das seis misturas formadas foram adotadas três temperaturas de vazamento do material (1.400°C, 1.450°C e 1.500°C), produzindo um total de dezoito amostras. Tal medida visou uma maior aproximação dos valores praticados nas indústrias vidreiras, uma vez que a temperatura de vazamento pode variar dependendo da composição química da mistura ou da aplicação do produto final.

### 2.3 Ensaio de Viscosidade Herty

Apesar do nome, o Viscosímetro Herty mede a fluidez do material. Esta técnica consiste no vazamento de uma amostra líquida em um aparelho constituído de uma entrada no formato de um cone e um canal horizontal interno. Um desenho esquemático deste viscosímetro, em escala de laboratório, pode ser observado na Figura 1.

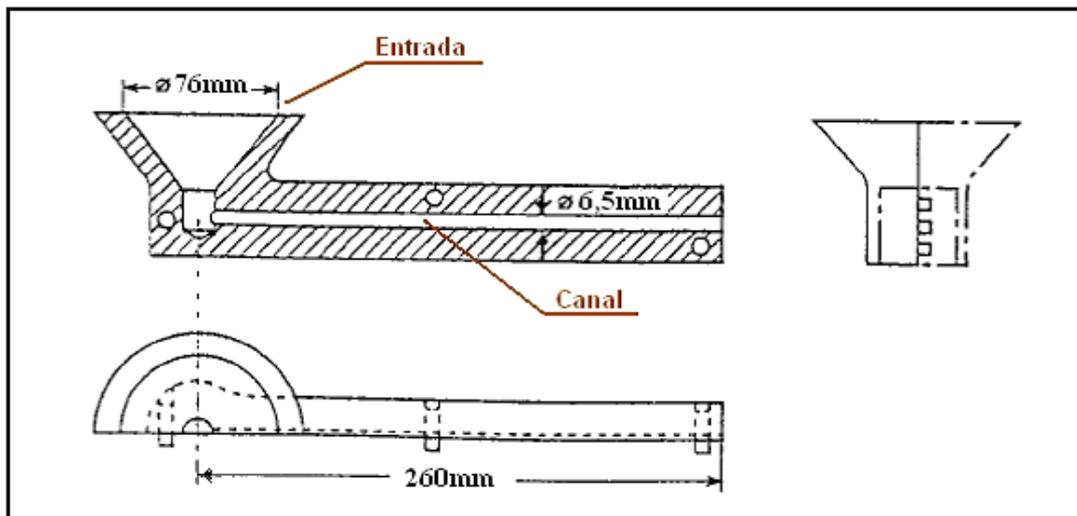


Figura 1. Desenho esquemático de um Viscosímetro Herty.<sup>(9)</sup>

Amostras com cerca de 250 g das diferentes misturas produzidas foram vazados, diretamente do forno, sobre o cone de entrada do Viscosímetro Herty (processo demonstrado na Figura 2), o material fluiu pelo canal, até o momento da solidificação deste. Durante este processo a temperatura foi registrada através da utilização de um pirômetro óptico do tipo Minolta/Land, tendo sido a emissividade ajustada para 0,45.



Figura 2. Processo de vazamento do material, diretamente do forno, sobre o Viscosímetro Herty.

Após o resfriamento do material despejado no viscosímetro (Figura 3), uma haste metálica graduada (escala em centímetros) foi utilizada para medir o espaçamento entre o início do canal do viscosímetro e o ponto final até o qual o material fluiu. Este procedimento forneceu a fluidez do material com precisão em centímetros. Para cada uma das seis misturas realizadas foram adotadas três temperaturas de vazamento do material (1.400°C, 1.450°C e 1.500°C), produzindo um total de dezoito medidas.



Figura 3. Viscosímetro Herty após o resfriamento do material vertido sobre ele.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Segundo Akerman,<sup>(10)</sup> durante a conformação, o vidro é resfriado e com isso ganha viscosidade. Quando a peça já está na sua forma definitiva, o vidro tem que estar viscoso o bastante para não continuar a fluir. Nos ensaios realizados neste trabalho foi observada esta característica nos produtos formados. Para todos os materiais, quando a temperatura de vazamento foi abaixada (de 1.500°C para 1.450°C, e depois para 1.400°C) obteve-se uma maior viscosidade.

A temperatura máxima de fusão é definida como sendo aquela na qual o vidro que está sendo elaborado atinja uma fluidez tal que permita a retirada de bolhas e a homogeneização química necessária para o produto. Para o início da conformação, a viscosidade deve apresentar valores que permitam a deformação do vidro sem grandes esforços. Ao final da conformação, a viscosidade deve estar em um nível que mantenha a forma final da peça.<sup>(11)</sup>

A fluidez dos fundidos é claramente um fator importante na formação vítrea. A cristalização será fortemente impedida se o fundido apresentar uma baixa fluidez na temperatura de fusão. Quando se adiciona alumina (óxido de alumínio) em uma formulação de vidro silicato-alcálico, o vidro se torna mais viscoso (ou seja, diminui-se a fluidez) em temperaturas elevadas.<sup>(8)</sup>

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de Viscosidade Herty (fluidez) encontrados para os diferentes tipos de materiais formados.

**Tabela 2.** Resultados dos ensaios de Viscosidade Herty (Fluidez) registrados.

Misturas	Matéria-Prima Principal	Temperatura de Vazamento	Viscosidade Herty (Fluidez)
A	Resíduo de granito	1400°C	<b>4 cm</b>
		1450°C	<b>5 cm</b>
		1500°C	<b>7 cm</b>
B	Resíduo de granito	1400°C	<b>3 cm</b>
		1450°C	<b>5 cm</b>
		1500°C	<b>7 cm</b>
C	Escória de aciaria	1400°C	<b>12 cm</b>
		1450°C	<b>15 cm</b>
		1500°C	<b>18 cm</b>
D	Escória de aciaria	1400°C	<b>14 cm</b>
		1450°C	<b>17 cm</b>
		1500°C	<b>20 cm</b>
E	Resíduo de granito + Escória de aciaria	1400°C	<b>11 cm</b>
		1450°C	<b>13 cm</b>
		1500°C	<b>16 cm</b>
F	Resíduo de granito + Escória de aciaria	1400°C	<b>10 cm</b>
		1450°C	<b>11 cm</b>
		<b>1500°C</b>	<b>13 cm</b>

Durante os ensaios realizados, foi possível observar que os materiais fabricados a partir do resíduo do corte de granito constituíram valores de fluidez abaixo dos demais. A explicação para tal fato é a alta quantidade de alumina (19,27%) presente neste resíduo, uma vez que este elemento é responsável pelo aumento da viscosidade, e portanto diminuição da fluidez.

Através da análise da Tabela 2 pode-se comprovar que o excesso de alumina presente nos produtos que tiveram o resíduo do corte de granito (14,20% para a mistura “A” e 6,20% para a mistura “B”) afetou a fluidez destes materiais.

Para os produtos obtidos através da mistura “A” a fluidez registrada variou de 4 cm (para o vazamento a 1.400°C) até 7 cm (para o vazamento a 1.500°C). A mistura “B” gerou produtos com fluidez de 3 cm (para vazamento a 1.400°C) até 7 cm (para vazamento a 1.500°C).

A Tabela 2 também mostra que os valores da fluidez aumentaram proporcionalmente com o aumento da temperatura de vazamento. Os materiais que apresentaram a maior variação da fluidez com o aumento da temperatura foram os produzidos com a escória de aciaria como matéria-prima principal. Para as misturas “C” e “D” ocorreu uma variação de 6 cm com o aumento da temperatura de vazamento de 1.400°C para 1.500°C.

Os maiores valores de fluidez foram registrados pelo produto da mistura “D”, que teve a escória de aciaria como matéria-prima principal. Para este material foram registrados os valores de 14 cm (vazamento a 1.400°C), 17 cm (vazamento a 1.450°C) e 20cm (vazamento a 1.500°C). Tal fato pode ser explicado pela relação entre os óxidos que favorecem a fluidez e os que aumentam a viscosidade do material. O componente que mais favorece a fluidez de um material vítreo é o óxido de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), sendo que, 11,30% foi a porcentagem deste óxido encontrada na composição química do material. Como dito anteriormente, a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é o óxido que implica no maior aumento da viscosidade de um material, sendo que, deste componente foi registrado um teor de 2,20% na composição química do

material citado. Portanto, a relação  $\text{Na}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$  registrada para os produtos da mistura “D” foi de, aproximadamente, 5% de óxido de sódio para cada 1% de alumina encontrada, sendo esta a maior relação entre todos os produtos obtidos.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que:

- 1 - O uso do resíduo do corte de granito como matéria-prima principal para a produção de materiais vítreos mostrou-se restrito devido aos valores de fluidez apresentados no momento do vazamento do material.
- 2 - A utilização da escória de aciaria como matéria-prima principal para a produção de vidros apresentou uma fluidez satisfatória, sendo recomendável a utilização deste resíduo para tal.
- 3 - Os produtos originados da associação entre o resíduo do granito e a escória de aciaria como matérias-primas principais apresentou valores de fluidez que enquadra esta mistura como eficiente para a formação de vidros.

#### Agradecimentos

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

#### REFERÊNCIAS

- 1 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.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de Resíduo de Serragem de Granito Proveniente do Estado do Espírito Santo em Cerâmica Vermelha, *Cerâmica*, v. 49, n. 312, pp. 262-267, 2004.
- 5 RIBEIRO, R. C. C. ; CARRISSO, R. C. C. ; CARVALHO, M. R. S. Aplicação de Feldspatos Extraídos de Resíduos de Pedreiras de Granito nas Indústrias de Cerâmica e Vidro, Buscando-se as Tecnologias Limpas. In: XII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO CETEM, 2004, Rio de Janeiro. XII Jornad de Iniciação Científica do CETEM, 2004.
- 6 BANSAL, N.P.; DOREMUS, R.H. Handbook of Glass Properties. Academic Press Inc., London, England, 1986.
- 7 HARA, S.; INOUE, K.; TANAKA, T. Viscosity of molten slags containing iron oxide Molten Slags. Iron and Steel Society Fluxes and Salts '97 Conference, p. 515, Sydney, Australia, 1997.
- 8 DOREMUS, R.H. Glass Science. John Wiley & Sons Includes, New York, U.S.A., 1994.

- 9 KEENE, B. J. Slag Atlas. 2nd ed., p. 512, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, Alemanha, 1995.
- 10 AKERMAN, M. Natureza, Estrutura e Propriedades do Vidro. In: PALESTRA NO CENTRO TÉCNICO DE ELABORAÇÃO DO VIDRO, Saint-Gobain Vidros Brasil, 2000.
- 11 CHAUDHARI, P.; GIESSEN, B. C. ; TURNBULL, D. Metallic Glasses. Scientific American, v. 242 (4): p. 84-96, 1980.