

## DESENVOLVIMENTO DE ESPUMA VÍTREA EMPREGANDO RESÍDUO DESCONTAMINADO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES

Isaac dos S. Nunes<sup>1\*</sup>, Daniel T. Pagnussat<sup>2</sup>, Maria F. Nunes<sup>2</sup>, Venina dos Santos<sup>1</sup>,  
Carlos. P. Bergmann<sup>3</sup>, Rosmary N. Brandalise<sup>1</sup>

(1) Universidade de Caxias do Sul (UCS), Centro de Ciências Exatas e  
Tecnologia (CCET), Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130. CEP 95070-560.  
Caxias do Sul/RS [\\*isaac.eq@gmail.com](mailto:*isaac.eq@gmail.com)

(2) Universidade de Caxias do Sul (UCS), Centro de Artes e Arquitetura (CEAA).

(3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Escola de Engenharia,  
Laboratório de Materiais Cerâmicos, Porto Alegre/RS.

### RESUMO

*Os problemas ambientais decorrentes da produção e descarte inadequado de resíduos tem sido motivo de preocupação. Dentre os diversos resíduos gerados, os de vidro apresentam potencial de aplicação, podendo ser 100 % reciclados, sem perda de suas propriedades. Os vidros de lâmpadas fluorescentes são resíduos vítreos que possuem limitações de reutilização devido à contaminação do material, que contém metais pesados. Este trabalho visa produzir espumas vítreas preparadas a partir de vidro de lâmpadas fluorescentes compactas. As espumas vítreas foram desenvolvidas empregando carbonato de cálcio (3 e 7 % em massa), como agente espumante, e solução 5 % de poli(álcool vinílico), como agente ligante. Foram utilizadas duas temperaturas de queima (800 e 850 °C). Os resultados mostram que a combinação de fatores que apresentou o melhor percentual de expansão foi com 7 % de carbonato de cálcio, queimada em 800 °C.*

Palavras-chave: espuma vítrea, agente espumante, resíduo, lâmpada fluorescente.

### INTRODUÇÃO

O crescimento de problemas ambientais decorrentes da produção e descarte inadequado de resíduos é motivo de preocupação, sobretudo diante do potencial de reciclagem destes, ou da utilização como matéria-prima em processos de produção de novos artefatos, diminuindo, conseqüentemente, os volumes destinados a aterros domésticos e industriais. Na atual concepção da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010), a qual versa sobre a necessidade de adoção de tecnologias que relacionem os processos e os produtos, como também

os rejeitos, busca-se a redução ou até a eliminação dos descartes, incentivando a busca por novas tecnologias que auxiliem na gestão dos resíduos.

Dentre os diversos resíduos gerados, os resíduos de vidro possuem enorme potencial de aplicação, podendo ser 100 % reciclados sem perdas de material, nem de suas propriedades <sup>(1)</sup>, e reintroduzidos em processos produtivos, implicando na redução da utilização de matérias-primas, bem como em economia energética no processo de fundição para produção de novos vidros <sup>(2)</sup>. No entanto, muitos dos resíduos vítreos possuem limitações de reciclagem, devido à sua origem, podendo, ter contaminantes ou oferecerem risco, caso reutilizados. Os vidros de bulbos de lâmpadas fluorescentes, as quais utilizam vapor de mercúrio, são um exemplo de resíduo que apresenta limitações de reutilização, devido a potencial contaminação do vidro <sup>(3,4)</sup>.

Para evitar o descarte de tão abundante resíduo, faz-se necessário o desenvolvimento de tecnologia que possibilite a inserção desse material em um produto, no qual ele não ofereça riscos de contaminação, tanto ao ser humano, quanto ao ambiente. Algumas pesquisas utilizaram pós de bulbos de lâmpadas fluorescentes com aplicações destinadas à construção civil na substituição de agregados em concretos <sup>(5)</sup>, para a produção de massas cerâmicas <sup>(6)</sup> e preparação de telhas <sup>(2)</sup>, bem como para acabamento de peças cerâmicas <sup>(1)</sup>.

Outra potencial aplicação para os resíduos vítreos das lâmpadas fluorescentes é a preparação de espumas vítreas <sup>(7)</sup>. Tal tipo de espuma possui grande aplicação na construção civil, devido às baixas taxas de transferência de calor, conferindo ao material a característica de isolante térmico, além de suas propriedades de isolamento acústico <sup>(8-11)</sup>. As espumas vítreas, em comparação às espumas poliméricas, que são convencionalmente usadas, apresentam como vantagens a maior resistência e estabilidade a altas temperaturas, à oxidação e a maioria dos reagentes industriais, podendo ser aplicadas como suporte para catalisadores <sup>(12,13)</sup>.

A preparação de espumas vítreas é feita por meio de prensagem de uma combinação de partículas finamente moídas de vidro com um agente espumante que, com o tratamento térmico promove liberação de gás no vidro fundido, ocasionando porosidade ao corpo expandido, que pode chegar a valores acima de 90 % <sup>(8)</sup>. Neste contexto se insere este trabalho que visa avaliar a influência da temperatura de queima e do percentual de agente espumante empregado na formulação de corpos vítreos expandidos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Materiais:

Na preparação das formulações foi utilizado resíduo vítreo de lâmpadas fluorescentes compactas, descontaminado pela empresa Apliquim Brasil Recycle. Como agente espumante utilizou-se carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) comercial e empregou-se solução de poli(álcool vinílico) (PVA) 5 % em massa como agente ligante.

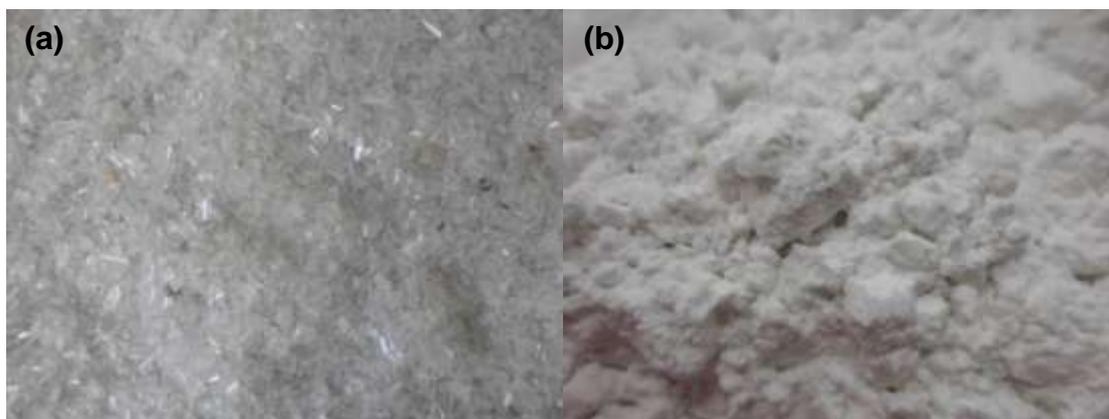


Figura 1. Vidro de lâmpadas fluorescentes compactas descontaminado, (a) antes e (b) após a moagem em moinho de bolas.

### Métodos - Análise granulométrica do vidro

A análise granulométrica do vidro foi realizada por peneiramento (peneiras  $\frac{1}{4}$ , 4, 6, 8, 10, 14 e 20 *mesh*), e devido à heterogeneidade de tamanhos de partículas do resíduo, a análise granulométrica foi executada em três amostras diferentes da massa total de vidro recebida.

### Métodos - Moagem

Devido ao fato do resíduo vítreo não possuir granulometria compatível com a aplicação proposta no estudo, o mesmo foi moído em moinho de bolas (volume do jarro de 7 L, 80 rpm, com 20 bolas cerâmicas de 2,9 cm e 20 bolas cerâmicas de 2,3 cm), por 2h, e novamente peneirado. A fração de resíduo passante pela peneira 100 *mesh* (149  $\mu\text{m}$ ) foi separada para ser empregada na preparação das espumas. Após a moagem em moinho de bolas a fração de partículas passantes pela peneira

100 *mesh* (> 149 µm) foi analisada em um granulômetro por dispersão a *laser* (CILAS modelo 1180, LIQUID) com faixa de análise de 0,04 a 2500 µm.

#### Métodos - Preparação dos corpos de prova

As formulações foram preparadas em misturador planetário Pavitest (modelo C 3010) misturando o pó de vidro com quantidades de carbonato de cálcio em teores de 3 e 7 % (em massa), durante 5 min. Foram adicionados 30 mL de solução de PVA 5 % para cada 100 g de sólidos, a mistura foi homogeneizada novamente, no misturador planetário, por 5 min. Após a homogeneização, procedeu-se a pesagem de 70 g de mistura para ser prensada no molde (diâmetro de 5,3 cm). Os corpos de prova foram prensados em presa hidráulica uniaxial Bovenau 10 t (curso hidráulico de 130 mm), com pressão de 40 MPa. Após a conformação os corpos de prova foram secos em temperatura ambiente, em capela (20 °C), por 24 h e após secos em estufa (Quimis modelo Q-317B 252), em 105 °C, por 24 h. Os corpos de prova foram submetidos à queima em forno mufla (Quimis modelo Q.318.24), nas temperaturas de 800 e 850 °C, com tempo de patamar de 30 min. A preparação dos corpos de prova seguiu planejamento experimental 2<sup>K</sup>, com três repetições de cada formulação para cada temperatura, totalizando 12 corpos de prova analisados.

#### Métodos – Caracterização dos corpos de prova

A massa e o volume dos corpos de prova foram aferidos antes e após o tratamento térmico para a determinação da massa específica e do percentual de expansão dos mesmos. A massa dos corpos de prova foi aferida em balança analítica (Marte modelo AL500) e o volume antes da queima ( $V_{inicial}$ ) foi calculado com base na altura e diâmetro dos mesmos. As medidas da altura e diâmetro foram realizadas com paquímetro digital (Mitutoyo modelo CD-8" C). O volume após a queima ( $V_{final}$ ) foi determinado pelo método de deslocamento de massa, inserindo o corpo de prova em um recipiente com um volume pré-determinado de água destilada. O percentual de expansão dos corpos de prova foi calculado pela Equação (A).

$$\% \text{ Expansão} = \left( \frac{V_{final} - V_{inicial}}{V_{inicial}} \right) * 100 \quad \text{Equação (A)}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização do vidro

A análise granulométrica do vidro de lâmpadas fluorescentes compactas descontaminado, antes da moagem, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Análise granulométrica do vidro antes da moagem em moinho de bolas

Peneira ( <i>mesh</i> )	Diâmetro Di (mm)	Massa retida (g)			Fração retida média (%)
		Análise 1	Análise 2	Análise 3	
¼	6,35	6,4	12,0	5,3	1,6
4	4,76	25,1	35,5	20,6	5,4
6	3,36	70,9	96,6	59,5	15,1
8	2,38	116,0	116,4	121,4	23,6
10	2,00	51,3	49,9	56,1	10,5
14	1,41	180,7	155,1	203,5	36,0
20	0,841	41,8	30,5	29,5	6,8
<b>FUNDO</b>	< 0,841	7,7	4,0	4,1	1,1
<b>SOMA</b>		<b>500,0</b>	<b>500,0</b>	<b>500,0</b>	<b>100,0</b>

Os resultados apresentados na Tabela 1 mostraram que a maior fração de tamanho de partículas (56 %) fica retida nas peneiras de *mesh* entre ¼ e 10, com tamanhos de partícula muito elevados (entre 6,35 e 2,00 mm). Uma fração significativa (36 %) da amostra ficou retida na peneira de *mesh* 14 (1,41 mm). Tais tamanhos de partículas não são adequados para a preparação de espumas vítreas, por não permitirem o adensamento adequado na conformação dos corpos de prova. Para a preparação de espumas, os resíduos de vidro devem ser submetidos a moagem que resulte em tamanhos de partículas de até 150  $\mu\text{m}$  <sup>(14)</sup>.

A Figura 2 mostra a análise granulométrica diferencial da fração passante da peneira 100 *mesh*. O diâmetro médio do vidro moído foi de 26,92  $\mu\text{m}$  ( $D_{10} = 5,26 \mu\text{m}$ ,  $D_{50} = 26,97 \mu\text{m}$  e  $D_{90} = 47,55 \mu\text{m}$ ).

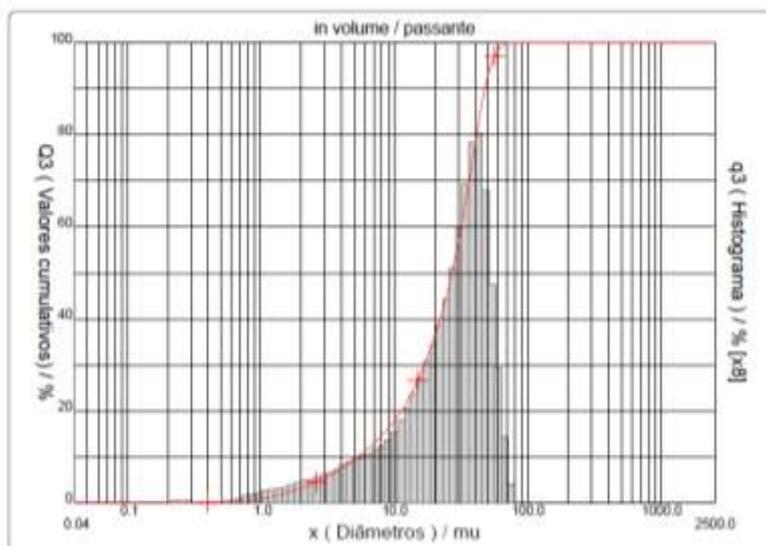


Figura 2. Distribuição granulométrica por difração a *laser* do pó de vidro moído, passante pela peneira 100 *mesh*, utilizado na preparação das espumas vítreas.

### Expansão dos corpos de prova

A Figura 3 apresenta os resultados da expansão dos corpos de prova de 3 e 7 % de  $\text{CaCO}_3$ , queimados em 800 e 850 °C. Os resultados expressos na Figura 3 mostraram que, para os corpos de prova preparados com 3 % de  $\text{CaCO}_3$  ocorreu aumento significativo no valor médio de expansão, de 27,3 % para 61,37 %, quando a temperatura de queima foi alterada de 800 para 850 °C. Com os corpos de prova preparados com 7 % de  $\text{CaCO}_3$ , ocorreu diminuição do volume final dos corpos de prova após a queima em temperatura mais elevada, sendo que em 800 °C o valor médio de expansão foi de 153,4 %, enquanto que para a temperatura de 850 °C, o valor atingido foi de 87,5 %. De acordo com resultados obtidos por POKORNY; VICENZI e BERGMANN (2007) <sup>(15)</sup>, a máxima expansão de corpos de prova formulados com 3 e 5 % de calcário dolomítico (agente espumante) ocorreu na temperatura de 800 °C, e logo após este valor, o volume dos corpos vítreos diminuiu.

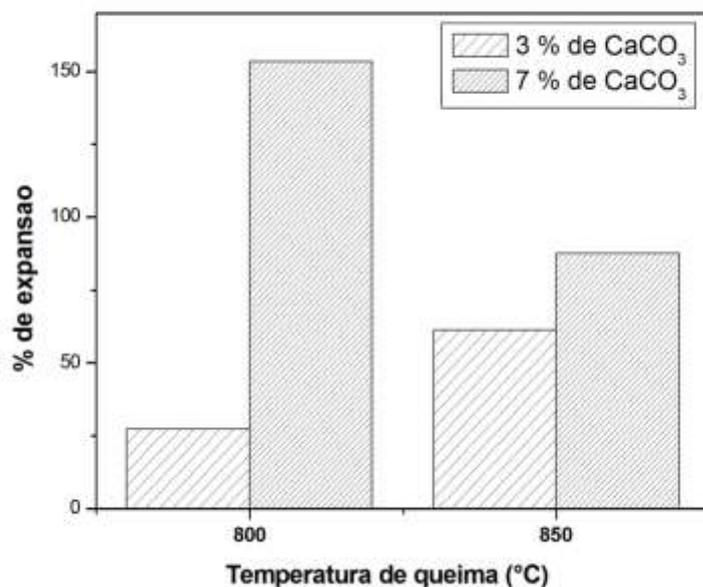


Figura 3. Expansão volumétrica das espumas vítreas preparadas com 3 e 7 % de CaCO<sub>3</sub>, queimadas em 800 e 850 °C.

A diminuição da expansão dos corpos vítreos preparados com 7 % de carbonato, em relação ao aumento da temperatura de queima, de 800 para 850 °C, pode ser justificada devido à diminuição da viscosidade do vidro e pela formação de grande quantidade de fase gasosa, oriunda da liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na queima do CaCO<sub>3</sub>. Com o aumento da pressão do gás no interior da célula ocorre a evolução do mesmo para fora da fase sólida <sup>(16)</sup>, colapsando o corpo cerâmico, reduzindo o volume final do corpo expandido.

A quantidade de 3 % de agente espumante produziu menor expansão nos corpos em comparação aos preparados com 7 % de CaCO<sub>3</sub>. Em relação à temperatura de queima efetuada nestes, houve maior expansão com o aumento da temperatura de 800 para 850 °C. A ocorrência deste fato pode ser consequência do menor volume de gás produzido pela quantidade menor de CaCO<sub>3</sub> adicionada na mistura, o que gera menor pressão do gás no interior da célula, dificultando a evolução do gás para o exterior do corpo cerâmico.

A Figura 4 apresenta a superfície de resposta obtida com os dados experimentais de percentual de expansão atingido pelos corpos de prova. De acordo com o expresso na superfície de resposta da imagem, a combinação de 7 % de

CaCO<sub>3</sub> com 800 °C como temperatura de queima apresentou o maior percentual de expansão (valores entre < 140 % e < 160 %).

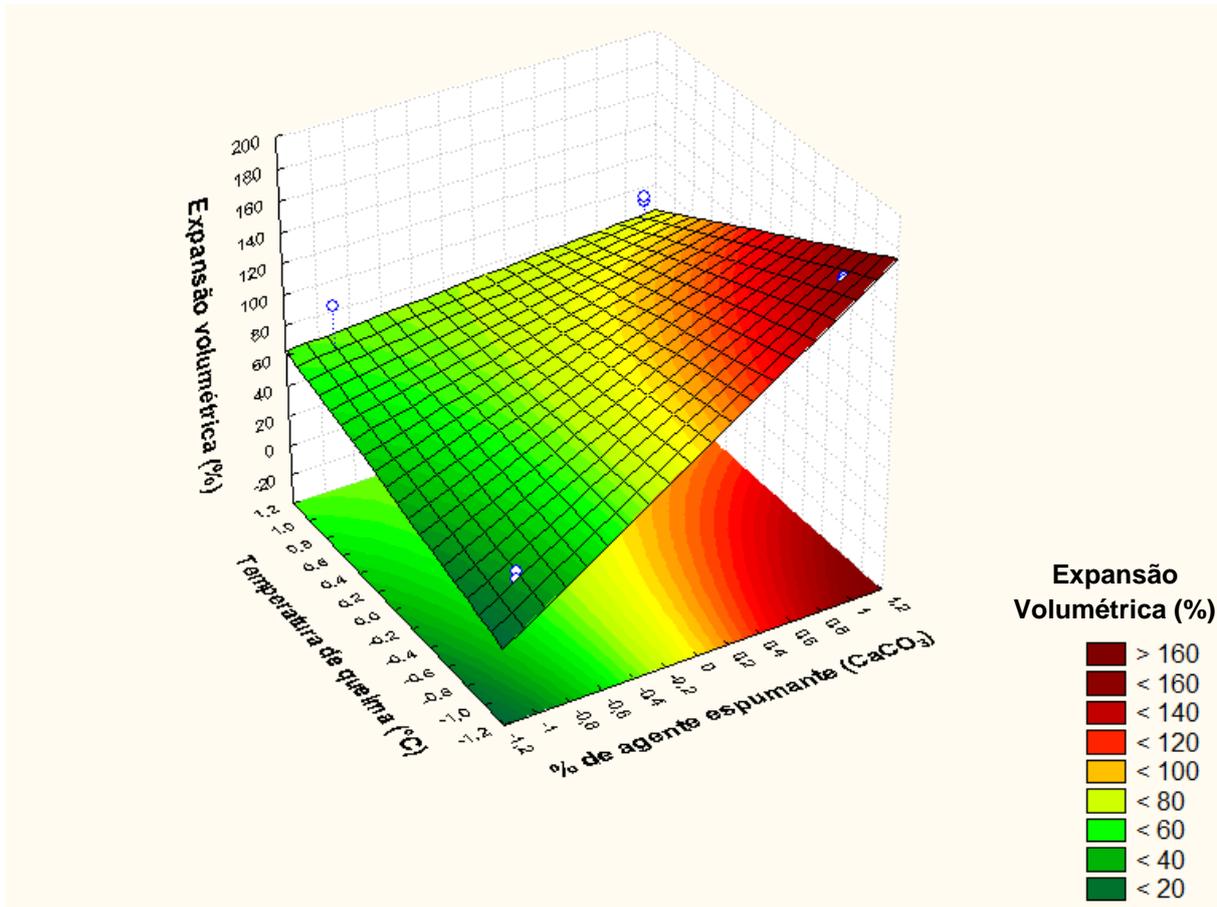


Figura 4. Efeito da temperatura de queima e do percentual de agente espumante na expansão volumétrica dos corpos de prova de espumas vítreas.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise estatística da expansão dos corpos vítreos preparados com 3 e 7% de CaCO<sub>3</sub> e queimados em 800 e 850 °C.

Tabela 2. Tabela ANOVA de análise dos dados de expansão dos corpos de prova

	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	Teste F	P
% CaCO <sub>3</sub>	17370,59	1	17370,59	29,403	0,0006
Temperatura	759,38	1	759,38	1,285	0,2897
Interação	7486,01	1	7486,01	12,672	0,0074
Erro	4726,20	8	590,77		
Soma	30342,18	11			

Os dados da Tabela 2 revelaram que a variável % de  $\text{CaCO}_3$  e a interação desta variável com a temperatura de queima foram significativas na expansão dos corpos vítreos, enquanto o efeito da temperatura de queima não representou significância, quando analisado isoladamente.

## CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que foi possível obter espumas vítreas a partir de pó de vidro de lâmpadas fluorescentes compactas empregando carbonato de cálcio como agente espumante. A expansão dos corpos de prova variou em função da quantidade de agente espumante e da temperatura de queima praticada. Os melhores resultados, em termos de percentual de expansão, foram obtidos para os corpos de prova preparados com 7 % de  $\text{CaCO}_3$ , mesmo em temperaturas de queima diferentes. Em relação à temperatura de queima, o melhor valor, para o teor de 3 % de carbonato de cálcio, é de 850 °C, que produz maior expansão, enquanto que para o teor de 7 % de carbonato a temperatura de 800 °C apresentou maior percentual de expansão do corpo cerâmico.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade de Caxias do Sul (UCS), à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Apliquim Brasil Recicle pelo financiamento do Projeto.

## REFERÊNCIAS

- (1) DAL BÓ, M.; SILVA, L.; OLIVEIRA, V. de Fabricação de Vetrosas com a Utilização de Resíduos de Vidro Plano e Vidro de Bulbo de Lâmpadas. *Cerâmica Industrial*, v.14, p. 29-33, 2009.
- (2) FURLANI, E.; TONELLO, G.; MASCHIO, S. Recycling of steel slag and glass cullet from energy saving lamps by fast firing production of ceramics. *Waste Management*, v. 30, p. 1714-1719, 2010.
- (3) HU, Y.; CHENG, H. Mercury risk from fluorescent lamps in China: Current status and future perspective. *Environment International*, v. 40, p. 141-150, 2012.
- (4) REY-RAAP, N.; GALLARDO, A. Determination of mercury distribution inside spent compact fluorescent lamps by atomic absorption spectrometry. *Waste Management*, v. 32, p. 944-948, 2012.

- (5) SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUEZ, D. Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 91–100, 2000.
- (6) FURLANI, E.; TONELLO, G.; MASCHIO, S.; ANEGGI, E.; MINICHELLI, D.; BRUCKNER, S.; LUCCHINI, E. Sintering and characterization of ceramics containing paper sludge, glass cullet and different types of clayey materials. *Ceramics International*, v. 37 p. 1293–1299, 2011.
- (7) AABØE, R.; OISETH, E. Foamed glass: na alternative lightweight and insulating material. *International Symposium organized by the concrete and masonry research*, p. 167-176, 2004.
- (8) FERNANDES, H.R.; TULYAGANOV, D. U.; FERREIRA, J. M. F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents. *Ceramics International*, v. 35, p. 229–235, 2009.
- (9) AYADI, A.; STITI, N.; BOUMCHEDDA, K.; RENNAI, H.; LERARI, Y. Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass. *Powder Technology*, v. 211, p. 423-426, 2011.
- (10) YOT, P. G.; MÉAR, F. O. Characterization of lead, barium and strontium leachability from foam glasses elaborated using waste cathode ray-tube glasses. *Journal of Hazardous Materials*, v. 185, p. 236–241, 2011.
- (11) BENGLINI, G. A.; BUSTO, M.; FANTONI, M.; FINO, D. Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA. *Waste Management*, v. 32, p. 1000–1008, 2012.
- (12) BOCCACCINI, A. R., ROSSETTI, M.; ROETHER, J. A.; ZEIN, S. H. S.; FERRARIS, M. Development of titania coatings on glass foams. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 2554–2558, 2009.
- (13) SOUSA, E. de; RAMBO, C. R.; ORTEGA, F. S., OLIVEIRA, A. P. N. de, PANDOLFELLI, V. C. Espumas vítreas do sistema  $\text{Li}_2\text{O-ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  produzidas pelo processo *gelcasting*. *Cerâmica*, v. 55, p. 157-162, 2009.
- (14) LIMBACHIYA, M. MEDDAH, M. S.; FOTIADOU, S. Performance of granulated foam glass concrete. *Construction and Building Materials*, v. 28, p. 759–768, 2012.
- (15) POKORNY, A.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Influência da granulometria das matérias-primas na microestrutura e nas propriedades de espumas vítreas. In: *Congresso SAM/CONAMET 2007*, San Nicolás, Buenos Aires, Argentina, 2007. Anais do congresso, p.1027-1032. Disponível em: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET-SAM2007/sam%20conamet%2007/pdf/T%C3%B3picos%20biblioteca/09-26%20PokornyA%20con%20correcoes%20por%20el%20autor.pdf>. Acesso em maio de 2012.
- (16) POKORNY, A.; VICENZI, J.; BERGMANN, C. P. Influência da adição de alumina na microestrutura da espuma vítrea. *Cerâmica*, v. 54, p. 97-102, 2008.

## ABSTRACT

*The environmental problems of production and improper disposal of waste has been a concern. Among the various waste generated, the glasses have a potential application, and can be 100 % recycled without loss of its properties. Glass of fluorescent lamps is a glassy residue which has limited reuse due to contamination of the material which contains heavy metals. This work aims to produce foam glass prepared from glass from compact fluorescent lamps. The foam glass was carried out using calcium carbonate (3 to 7 % wt) as foaming agent, and 5 % solution of poly (vinyl alcohol) as a binder. Were used two firing temperatures (800 and 850 °C). The results shows that the combination of factors which showed the best expansion was 7 % calcium carbonate, fired at 800 °C.*

Keywords: foam glass, foaming agent, waste, fluorescent lamp.