

Pentóxido de nióbio eleva a resistência a compressão de espumas de vidro a partir de resíduos de vidro e hidróxido de sódio

Robson Couto da Silva (UTFPR) robson.materiais@gmail.com

Evaldo Toniolo Kubaski (UEPG) evaldotk@outlook.com

Sergio Mazurek Tebcherani (UTFPR) sergiom@utfpr.edu.br

Resumo:

O desenvolvimento de novos materiais que permitam um menor consumo energético visando um ganho econômico e ao mesmo tempo traga benefícios à sociedade e ao ambiente torna-se cada vez mais essencial na pesquisa de materiais tecnológicos. As espumas de vidro a partir de resíduos apresentam excelentes propriedades de isolamento térmico que possibilitam essa característica. Devido a isso, nesse trabalho foram produzidas espumas de vidro utilizando o NaOH como agente de expansão e compararam-se a morfologia e a resistência mecânica à compressão em função da adição de Nb_2O_5 como agente de reforço. As espumas foram caracterizadas a partir de difração de raios X (DRX), calorimetria diferencial de varredura (DSC) e termogravimetria (TG). A porosidade do material foi avaliada por picnometria no hélio e a estrutura foi avaliada via microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (FEG). Também foi realizada uma microanálise química por níveis de energia dispersiva de raios X (EDS). Como resultado, a adição de Nb_2O_5 proporcionou um aumento na resistência mecânica superior a 53%, além da formação de poros mais uniformemente distribuídos no formato esférico.

Palavras-chave: Espumas de vidro, Hidróxido de sódio, Pentóxido de nióbio, Resistência a compressão.

Niobium pentoxide increases the compressive strength of glass foams based on glass waste and sodium hydroxide

Abstract

The development of new materials to reduce the energetic consumption becomes increasingly essential in technological materials research. This enables an economic profit and, at the same time, brings benefits to society and environment. Glass foams made from waste have excellent thermal insulation properties that allow this feature. Based on these facts, glass foams were produced using sodium hydroxide as the foaming agent. Morphology and compressive strength were compared between samples with the addition of Nb_2O_5 and samples without this reinforcing agent. Foams were characterized by X-ray diffraction (XRD), differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetry (TG). Material porosity was evaluated by helium pycnometry and the microstructure was evaluated by field-emission scanning electron microscopy (FESEM). Chemical microanalysis by X-ray dispersive energy (EDS) was also performed. As a result, the addition of Nb_2O_5 provided an increase in the compressive strength greater than 53%. In addition, samples showed uniformly distributed spherical pores.

Key-words: Glass foam, Sodium hydroxide, Niobium pentoxide, compressive strength.

1. Introdução

Atualmente existe um grande crescimento na importância de desenvolvimentos que apresentem o caráter de sustentabilidade, permitindo com isso a obtenção de novos produtos capazes de trazer benefícios para a sociedade sem que se gere um passivo ambiental e aliado a isso a viabilidade econômica que permitirá a sua posterior industrialização e comercialização. Com isso, muitos pesquisadores procuram alternativas para que se tenha um ganho energético, tais como desenvolvimentos voltados para setores como os de biodiesel, catalisadores, biosensores e sistemas de armazenamento de energia (FAHMY, 2005; BATZIAS, SIONTOROU, 2012; MUSANGO, BRENT et al., 2012; NEGASH, RIERA, 2014; DA LUZ, DE FRANCISCO et al., 2016; HILT, WAGNER et al., 2016).

Salienta-se que além da obtenção do novo material, um dos grandes desafios consiste também na transferência de tecnologia entre os núcleos de inovação tecnológica e as empresas capazes de fabricar e comercializar tal produto. As dificuldades ocorrem porque além da transferência do conhecimento em si, também se devem ser avaliados os aspectos antropotecnológicos, ou seja, a adaptação da tecnologia a um contexto local onde se devem considerar os fatores culturais, geográficos, históricos, recursos humanos, entre outros (DOS SANTOS, 1997; SILVA, KOVALESKI et al., 2015).

Dessa forma, muitas vezes é necessário que o desenvolvimento considere o uso dos passivos ambientais locais assegurando o gerenciamento dos resíduos presentes em abundância (THOMAS, 1999), ou que se faça uso de um resíduo que possa ser encontrado em todos os lugares, com características semelhantes. Para esse tipo de passivo, destacam-se os resíduos de vidro, os quais podem ser formulados e tratados para utilização como matérias-primas para novos produtos.

Os resíduos de vidro, apesar de inertes, quando dispostos sem os devidos cuidados tornam-se um passivo nos aterros devido à grande possibilidade de acidentes. Além disso, a não reciclagem desses materiais acarreta em perdas energéticas, visto que tais resíduos apresentam temperaturas de fusão inferiores as das matérias-primas virgens. Esses resíduos podem ser utilizados tanto na fabricação de outros vidros como de outros produtos, tais como: asfalto, abrasivos, lã de vidro, espumas de vidro, entre outros (1993).

As espumas de vidro são bastante conhecidas como materiais para isolamento térmico desde a metade do século passado e o interesse em seu uso vêm crescendo significativamente devido ao aumento do preço dos combustíveis. Essa aplicação torna-se, portanto, muito importante em países da América do Norte e Europa, visto que o uso de isolamento térmico eficiente pode reduzir o uso de combustível para aquecimento em pelo menos 25% (MANEVICH, SUBBOTIN, 2008). A tabela 1 compara as propriedades de diferentes materiais utilizados como isolantes térmicos. Muitas outras aplicações para essa classe de materiais são citadas em diversos estudos, tais como filtros, catalisadores e isolantes acústicos (CAO, RAMBO et al., 2004; AYADI, STITI et al., 2011).

A fabricação das espumas de vidro pode ser feita por dois processos distintos. O primeiro consiste em insuflar gás em um vidro fundido, sendo essa técnica menos utilizada por ter um maior custo e requerer uma tecnologia mais sofisticada. O segundo processo constitui-se da utilização de um agente de expansão (agente de espumação) em um pó de vidro e posterior sinterização. Nessa técnica o pó de vidro e o agente de expansão são misturados e aquecidos. Conforme se aumenta a temperatura nesse processo, o pó de vidro ao atingir uma temperatura superior a sua transição vítrea (T_g) reduz sua viscosidade e passa a formar um corpo contínuo. Dessa forma, as partículas do agente de expansão ficam envoltas pelo vidro amolecido e a

uma determinada temperatura reage quimicamente ou se decompõem liberando gases, resultando na formação de poros no material e aumentando seu volume. Com o aumento progressivo da temperatura, a viscosidade do vidro fundido diminui, consequentemente a tensão superficial gerada por esse material é menor, exercendo menos pressão sobre as bolhas geradas pelo agente de expansão, as quais têm mais liberdade para seu crescimento. Ou seja, o controle do tamanho das bolhas formadas é altamente dependente da viscosidade do fundido (propriedade que varia com a composição do vidro utilizado), além do tipo e quantidade do agente de expansão.

Propriedade	Lã de vidro	Espuma polimérica	Espuma de vidro
Densidade (kg/m^3)	200	20 – 40	120 – 200
Resistência à compressão (kPa)	40 – 120	50 – 150	> 700
Condutividade térmica (W/m.K)	0,066 – 0,060	0,038	0,050 – 0,080
Máxima temperatura de uso ($^{\circ}\text{C}$)	100	70	450
Permeabilidade de vapor de água (g.m/Pa.h.m^2)	0,380 – 0,600	0,050	0,001 – 0,004
Inflamabilidade	baixa	alta	Não inflamável
Tempo de vida (anos)	7 – 10	10 – 12	Ilimitado

Fonte: Adaptado de Manevich (2008)

Tabela 1 – Propriedades de diferentes materiais utilizados como isolantes térmicos

Os agentes de expansão podem ser classificados em dois tipos: agentes de neutralização e agentes de oxirredução (redox). Os primeiros consistem em sais de carbonatos e sulfatos que se decompõem liberando CO_2 e SO_2 . A liberação de gás por esse tipo de agente é mais intensa e promove a quebra das paredes dos poros isolados, criando uma estrutura com poros interconectados o que leva a uma alta absorção de água dessas espumas além de um bom isolamento acústico. Os agentes do tipo redox são materiais contendo carbono como coque, carvão, negro de fumo, carvão de silício, entre outros. Nesse tipo de agente de expansão os poros fechados prevalecem, levando a menores absorções de água, conduções térmicas mais baixas e maiores resistências mecânicas (GIBSON, ASHBY, 1999; SPIRIDONOV, ORLOVA, 2003; MEAR, YOT et al., 2006; WU, BOCCACCINI et al., 2006; BERNARDO, CEDRO et al., 2007; MÉAR, YOT et al., 2007; FERNANDES, TULYAGANOV et al., 2009; LLAUDIS, TARI et al., 2009).

Diversas composições químicas de resíduos de vidro e diferentes agentes de expansão são relatados. Os resíduos necessitam de um elevado controle de sua composição química para que se tenham propriedades constantes. Geralmente, o percentual ótimo de utilização dos agentes de expansão varia entre 1,5% e 3%, porém existem relatos de usos superiores a 10% (SPIRIDONOV, ORLOVA, 2003; MEAR, YOT et al., 2006; WU, BOCCACCINI et al., 2006; BERNARDO, CEDRO et al., 2007; MÉAR, YOT et al., 2007; FERNANDES,

TULYAGANOV et al., 2009; LLAUDIS, TARI et al., 2009; BENTO, KUBASKI et al., 2013).

Agentes de expansão carbonosos foram utilizados em diversos estudos. O negro de fumo comercial foi utilizado em uma proporção de 0,5% em peso (BERNARDO, CEDRO et al., 2007) em um ciclo de queima de 850 °C com patamar de 30 minutos, produzindo uma espuma de vidro com cerca de 95% de porosidade fechada e densidade inferior a 0,3 g/cm³. Em outra pesquisa (WU, BOCCACCINI et al., 2006) obteve-se uma espuma de vidro com morfologia uniforme a partir do uso de 2% de SiC, em um ciclo de queima de 1000 °C por 5 minutos. A resistência à compressão das espumas obtidas variou entre 1,2 a 1,7 MPa. Nesse trabalho relata-se a elevada temperatura de decomposição do carbeto de silício (entre 950 °C e 1150 °C) como um fator negativo do processo.

Os carbonatos foram utilizados (FERNANDES, TULYAGANOV et al., 2009), que produziu espumas de vidro com lodos do corte de mármore que continham 99% de CaCO₃ e com CaMg(CO₃). Ambos os agentes de expansão foram utilizados em uma proporção de 2% em um ciclo de queima de 850 °C. Foram obtidos materiais com densidades na faixa de 0,36 g/cm³ e resistências à compressão de 2,4 MPa. Também foram obtidas espumas de vidro utilizando o Na₂CO₃ em proporções de 10% e 15% (LIAO, HUANG, 2012). Nesse estudo utilizaram-se duas temperaturas de sinterização (750 °C e 1050 °C) e esse aumento na temperatura diminuiu a densidade das amostras de 1,34 para 0,81g/cm³ e abaixou a resistência à compressão de 5,15 MPa para 1,07 MPa.

O uso de diferentes composições de vidro foram relatadas por outros pesquisadores (ÉIDUKYAVICHUS, MATSEIKENE et al., 2004) e Manevich (MANEVICH, SUBBOTIN, 2008), onde vidros como de janela e garrafas foram utilizados no processo de fabricação de espumas de vidro. Estudou-se a fabricação de espumas de vidro a partir de resíduos de embalagens tendo o silicato de sódio e a glicerina como agentes de expansão em um ciclo de queima de 850 °C por 15 minutos (LAKOV, TONCHEVA et al., 2013). Os poros da espuma obtida apresentaram tamanhos entre 0,25 e 2 mm, atingindo uma condutividade térmica de 0,02 a 0,08 W/mK que são valores compatíveis com os das espumas industriais. Utilizaram-se vidros de tubos de raios catódicos (MÉAR, YOT et al., 2006) para fabricação de espumas de vidro, a partir do SiC e TiN como agentes de expansão. Foram obtidas estruturas com distribuição homogênea de poros na faixa de 50 a 300 micra, com uma temperatura de sinterização de 750 °C. A utilização de vidros de tubos de raios catódicos é citada por outros trabalhos (BERNARDO, ALBERTINI, 2006; GUO, GONG et al., 2013), devido ao seu apelo de reciclagem de vidros contendo chumbo.

Em relação às propriedades mecânicas da espuma de vidro, de uma maneira geral, conforme a densidade da espuma diminui, a resistência à compressão também se torna mais baixa, porém essa propriedade não depende unicamente da densidade da espuma, pois fatores como tamanho, forma e distribuição dos poros são fundamentais para os valores obtidos (MORGAN, WOOD et al., 1981).

Outra maneira para se aumentar a resistência à compressão é incorporação de aditivos que podem penetrar na microestrutura do vidro como agentes de reforço, como estudado em uma pesquisa (TULYAGANOV, FERNANDES et al., 2006) onde se aumentou a resistência à compressão em 0,309 MPa para uma espuma de vidro fabricada a partir de aparas de vidro plano tendo o SiC como agente de expansão, a partir da adição de um pó de vidro de aluminossilicato alcalino terroso, o qual é intrinsecamente sujeito a cristalizar nas formas de anortita e diopsídio. Outros trabalhos também indicam o uso de agentes de reforço para

melhoria nas propriedades mecânicas das espumas de vidro (BOCCACCINI, TRUSTY, 1996; KOOPMAN, CHAWLA et al., 2006).

O uso de Nb_2O_5 como agente de reforço em espumas de vidros ainda não foi reportado em outros trabalhos, porém esse óxido foi utilizado em outro estudo (CHENU, LEBULLENGER et al., 2012) na síntese de vidros de fosfato a partir do ternário $\text{NaPO}_3 - \text{SnO} - \text{Nb}_2\text{O}_5$. Nesse estudo verificou-se que o aumento da proporção de pentóxido de nióbio aumentou a T_g devido à formação de ligações $\text{Nb} - \text{O} - \text{Nb}$ e $\text{Nb} - \text{O} - \text{P}$, as quais tornaram a rede do vidro mais coerente. Essas ligações fazem com que as unidades químicas estejam mais fortemente ligadas, abaixando também a amplitude das vibrações térmicas o que leva a uma redução no coeficiente de expansão térmica. Da mesma maneira, maiores valores de módulo elástico e módulo de cisalhamento foram observados com acréscimo de pentóxido de nióbio devido ao maior enrijecimento da rede do vidro. Diversos trabalhos relatam a respeito das melhores propriedades mecânicas obtidas a partir da adição do Nb_2O_5 em vidros a base de fosfato (MARTINELLI, SENE et al., 2000; SENE, MARTINELLI et al., 2004; FLAMBARD, VIDEAU et al., 2008; KOUDELKA, POSPÍŠIL et al., 2008), mas não se tem essa aplicação descrita para vidros de silicato onde predominam as fortes e estáveis ligações $\text{Si} - \text{O} - \text{Si}$.

O Nb_2O_5 também é descrito como agente de reforço em compósitos TiAl (ZHU, YANG et al., 2011) onde se obteve aumento na dureza, densidade e resistência mecânica do material.

Verificar as implicações da adição de Nb_2O_5 como agente de reforço em uma espuma de vidro obtida a partir de resíduos de vidro plano, utilizando o NaOH como agente de expansão é o foco desse estudo.

2. Procedimento experimental

Utilizou-se para fabricação da espuma de vidro os resíduos de vidro plano comerciais (Saint Gobain), os quais foram cominuídos em moinho de bolas e peneirados em uma granulometria de 37 micra (400 Mesh Tyler). Para preparo das amostras foi utilizado o pentóxido de nióbio CBMM – 99,3% e o hidróxido de sódio CRQ – 99%. As formulações utilizadas são demonstradas na tabela 2.

Composição	Vidro plano (%)	NaOH (%)	Nb_2O_5 (%)
1	91	9	-
2	86	9	5

Fonte: Os autores

Tabela 2 Formulações utilizadas para avaliação de agente de reforço

O resíduo de vidro foi misturado aos demais componentes das formulações a partir da formação de uma suspensão, a qual foi depositada em moldes redondos com 3,5 cm de diâmetro. As amostras foram secas em estufa a uma temperatura de 60 °C e após isso sinterizadas a uma temperatura de 800 °C por 15 minutos.

Para caracterizar as espumas de vidro utilizaram-se as técnicas de difratometria de raios X (DRX), análise termogravimétrica (TG), calorimetria diferencial de varredura (DSC), picnometria de hélio, ensaio de compressão, microscopia eletrônica de varredura de alta resolução (FEG) e microanálise química por níveis de energia dispersiva de raios X (EDS).

A DRX foi feita em um Difratorômetro XRD 6000 com radiação $\text{CuK}\alpha$ a 40 kV e 40 mA e uma taxa de varredura de $2^\circ/\text{min}$, de 10° a 90° .

As análises de TG e DSC foram realizadas em um equipamento de marca SETARAM INSTRUMENTATION, modelo LABSYS EVO, utilizando-se uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ em uma atmosfera de argônio.

Para a picnometria de hélio foi utilizado um equipamento marca QUANTACHROME INSTRUMENTS, modelo ULTRAPYCNOMETER 1000, sendo analisadas amostras de espuma de vidro nas condições obtidas após sinterização e também na forma de pó.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado em um equipamento de marca SHIMADZU modelo AUTOGRAPH AGS.

A FEG e EDS foram feitos em um microscópio eletrônico de varredura de alta resolução marca TESCAN modelo MIRA 3 LMH. Para realização desse ensaio as amostras foram lixadas e posteriormente passaram por um banho de ultrassom por 4 horas para então serem secas em estufa a 60°C . Somente após isso receberam uma deposição de ouro por *sputtering*.

Salienta-se que o levantamento bibliográfico desse trabalho foi feito utilizando a metodologia do Methodi Ordinatio (PAGANI, KOVALESKI et al., 2015).

3. Resultados e discussão

O resultado da difração de raios X para a amostra contendo 5 % de Nb_2O_5 (amostra 2) é demonstrado na figura 1. A partir do difratograma, percebe-se a presença de fase amorfa predominante, o que era esperado devido ao resíduo de vidro utilizado. Porém, alguns picos de maior intensidade referentes às fases cristalinas NbO_2 e Nb_2O_5 são evidenciados.

A presença de tais picos de cristalinidade indica que o pentóxido de nióbio encontra-se disperso ao longo da estrutura da espuma de vidro, ou seja, a temperatura do ciclo de queima utilizado não foi suficiente para que ele reagisse como um modificador de rede como ocorreu no caso de vidros de fosfato (MARTINELLI, SENE et al., 2000; SENE, MARTINELLI et al., 2004; FLAMBARD, VIDEAU et al., 2008; KOUDELKA, POSPÍŠIL et al., 2008; CHENU, LEBULLENGER et al., 2012). Assim, esse óxido deverá atuar como um agente de reforço disperso, como reportado em outros trabalhos (BOCCACCINI, TRUSTY, 1996; KOOPMAN, CHAWLA et al., 2006; TULYAGANOV, FERNANDES et al., 2006).

O difratograma da figura 1 não evidencia a presença do agente de expansão, isso indica que o NaOH reagiu com os outros óxidos presentes na composição, liberando o gás responsável pela espumação do material.

Os resultados referentes à análise termogravimétrica e calorimetria diferencial de varredura da amostra 2 são demonstrados na figura 2.

A perda de massa demonstrada na temperatura de 100°C acompanhada de um pico endotérmico (I) refere-se à perda de água residual por desidratação. Na faixa de 550°C observa-se uma alteração da linha base (VAISMAN, KETOV et al.), evidenciando a temperatura de transição vítrea do material. O pico exotérmico na faixa entre 700 e 800°C (III) está associada à eliminação de vapor de água referente a reação de eliminação de gases do agente de expansão utilizado.

A tabela 3 demonstra os resultados obtidos nos ensaios de picnometria de hélio e a resistência à compressão para as amostras. Os seus respectivos valores de porosidade foram calculados a

partir da equação 1 (MÉAR, YOT et al., 2007), onde ρ_A e ρ_R são respectivamente a densidade aparente e densidade real das espumas.

$$P = 1 - (\rho_A/\rho_R) \cdot 100\% \quad (1)$$

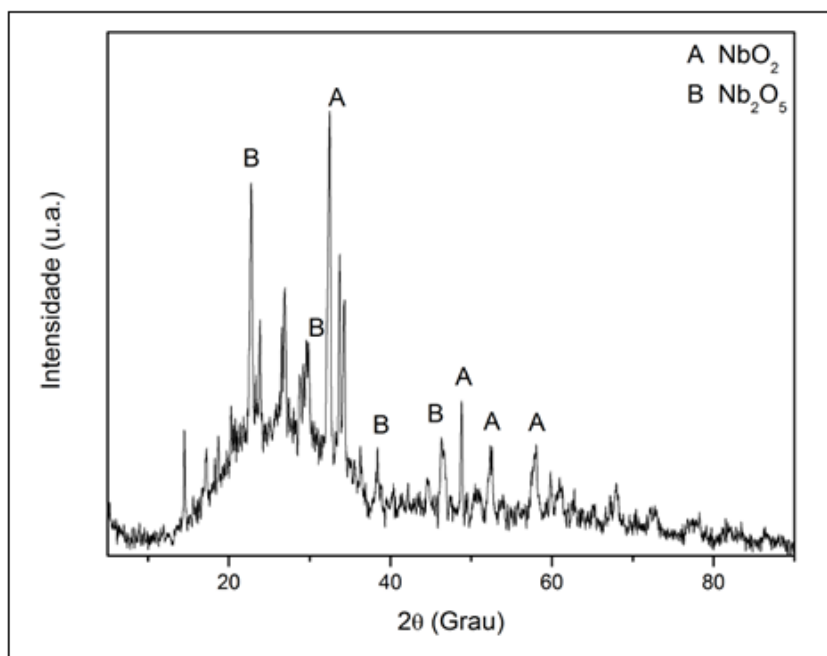


Figura 1 – Difratoograma de raios X de amostra de espuma de vidro contendo 5% de Nb_2O_5 em sua composição

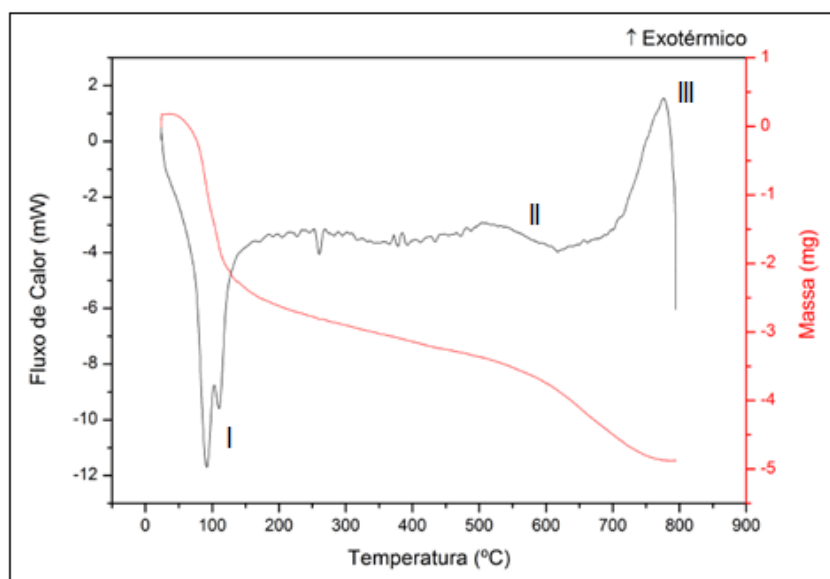


Figura 2 – Análise termogravimétrica e calorimetria diferencial de varredura de amostra de espuma de vidro contendo 5% de Nb_2O_5 em sua composição

A partir dos resultados da picnometria de hélio, verificou-se que a adição de Nb_2O_5 promoveu a formação de materiais mais densos que a espuma de vidro sem tal agente de reforço, o que refletiu na redução da porosidade em mais de 24%. Essa redução de porosidade refletiu drasticamente no resultado de resistência à compressão, visto que a menor porosidade da amostra 2 proporcionou um acréscimo superior a 53% em sua resistência mecânica.

Composição	Densidade real (g/cm^3)	Densidade aparente (g/cm^3)	Porosidade (%)	Resistência à Compressão (SILVA, KOVALESKI et al.)
1	2,47	0,69	72,06	1,02
2	2,55	1,33	47,84	1,57

Fonte: Os autores

Tabela 3 – Propriedades das espumas de vidro obtidas

Segundo Gibson (GIBSON, ASHBY, 1999) o mecanismo de fratura frágil para espumas sobre compressão ocorre em três estágios distintos: linear elástico, correspondendo à flexão da aresta das células da espuma; um patamar de tensão, correspondendo ao colapso progressivo das células por fratura frágil e, por último, a densificação, correspondendo ao colapso das células por todo o material e subsequente carregamento das arestas das células e faces, umas sobre as outras. Como os poros atuam como concentradores de tensão, agindo como defeitos para início da fratura, a menor incidência de porosidade da amostra 2 associada às partículas de Nb_2O_5 que dispersas na rede atuam como barreiras para o colapso das células, elevaram a resistência do material.

Os resultados da microscopia eletrônica de varredura de alta resolução para as duas formulações são demonstradas na figura 3. Na FEG da amostra contendo Nb_2O_5 (b) destaca-se a região onde se teve uma ampliação para posterior análise química.

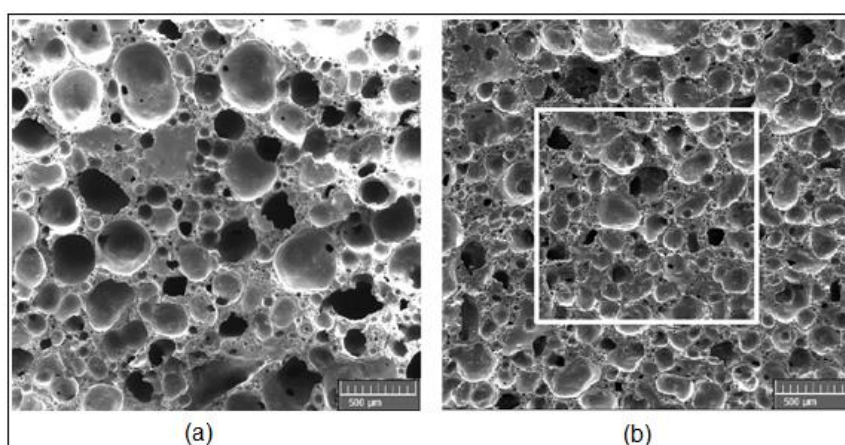


Figura 3 – Micrografia de espumas de vidro a) Amostra 1 b) Amostra 2, destacando região para microanálise química

A partir da FEG realizada em diferentes regiões da amostra, verifica-se que a amostra 1 apresenta poros com tamanhos maiores e com maior irregularidade quanto a sua forma, além de uma quantidade mais elevada de porosidade aberta. Para essa amostra obtiveram-se poros com tamanhos entre 50 μm e 1 mm. A amostra 2, mais densa, confirmando os resultados anteriores apresentou uma distribuição de tamanho de poros mais regular sobre as superfícies analisadas, com tamanhos de poros na faixa de 50 μm a 300 μm . Essas informações podem ser observadas por meio da análise da figura 3. Para a EDS selecionou-se uma região da amostra 2, a qual está destacada na figura 3b. Na figura 4 apresenta-se a microanálise química dessa região em destacada.

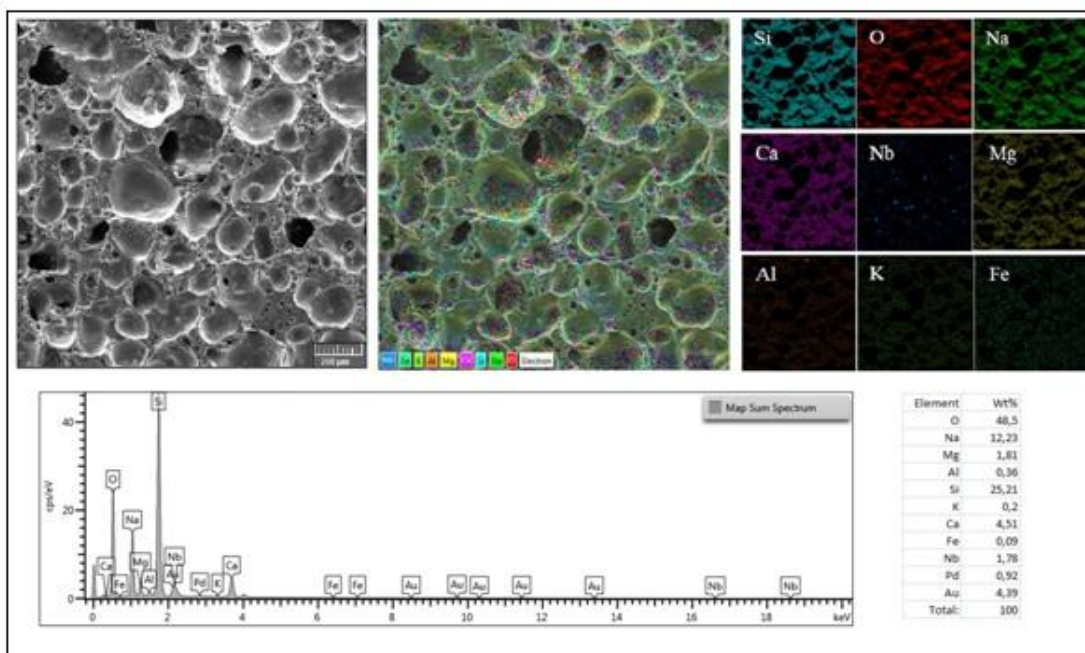


Figura 4 – Microanálise química de amostra contendo Nb_2O_5

Pode-se confirmar pelas micrografias da figura 3 e pelos resultados da tabela 3 que a adição de Nb_2O_5 diminuiu a espumação do material, reduzindo sua expansão volumétrica em relação à amostra sem agente de reforço, obtendo-se assim poros menores. Provavelmente, isto se deva ao fato de que a fase vítrea, sendo mais viscosa com a adição desse óxido, apresentou maior resistência ao crescimento das bolhas de gás geradas pelo agente de expansão e também à ruptura da parede do poro que está expandindo pela evolução da fase gasosa, reduzindo-se assim a incidência de porosidade aberta. Como resultado, os poros tiveram formato mais uniforme tendendo a esférico.

A microanálise química detectou a presença do Nióbio, o qual se encontra na forma de Nb_2O_5 e NbO_2 de acordo com o resultado da DRX apresentado anteriormente. A análise também mostra os outros elementos formadores e modificadores do vidro, os quais estão presentes na composição química dos resíduos utilizado: silício, oxigênio, cálcio, magnésio, potássio, alumínio, sódio e ferro.

Ambas as amostras apresentaram espumação a partir da utilização de NaOH , corroborando para confirmar sua eficiência como agente de expansão.

4. Conclusões

A utilização de Nb_2O_5 como agente de reforço promoveu a formação de um material com maior densidade do que a espuma que não usa tal óxido. Esse acréscimo na densidade é reflexo de uma menor porosidade do material, a qual foi provavelmente ocasionada pela influência da fase vítrea mais viscosa na amostra contendo o pentóxido de nióbio.

Tanto a menor porosidade como a presença do Nb_2O_5 disperso na rede do vidro proporcionaram um material com maior resistência mecânica à compressão, tendo-se um acréscimo nessa propriedade de mais de 53%.

A redução de porosidade aberta nas amostras estudadas, além de uma morfologia mais uniforme e esférica também são fatores que favoreceram o incremento na resistência mecânica da amostra contendo Nb_2O_5 . Porém é importante salientar que dependendo da aplicação a qual se destine o material, esse agente de reforço deve ser utilizado em menores proporções, pois a densificação é um fator a ser controlado para não afetar as propriedades da espuma de vidro.

Referências

- The McGraw-Hill Recycling Handbook. Booklist.* Vol. 89, n. 15, p. 1457+, 1993.
- AYADI, A., N. STITI, K. BOUMCHEDDA, H. RENNAI and Y. LERARI.** *Elaboration and characterization of porous granules based on waste glass.* Powder Technology Vol. 208, n. 2, p. 423-426, 2011.
- BATZIAS, F. A. and C. G. SIONTOROU.** *Thinking by Analogy for Technology Transfer from Catalysts to Biosensors and Vice versa—a Knowledge-based Approach.* Procedia Engineering Vol. 42, p. 1889-1896, 2012.
- BENTO, A. C., E. T. KUBASKI, T. SEQUINEL, S. A. PIANARO, J. A. VARELA and S. M. TEBCHERANI.** *Glass foam of macroporosity using glass waste and sodium hydroxide as the foaming agent.* Ceramics International Vol. 39, n. 3, p. 2423-2430, 2013.
- BERNARDO, E. and F. ALBERTINI.** *Glass foams from dismantled cathode ray tubes.* Ceramics International Vol. 32, n. 6, p. 603-608, 2006.
- BERNARDO, E., R. CEDRO, M. FLOREAN and S. HREGLICH.** *Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams.* Ceramics International Vol. 33, n. 6, p. 963-968, 2007.
- BOCCACCINI, A. R. and P. A. TRUSTY.** *Toughening and strengthening of glass by Al₂O₃ platelets.* Journal of Materials Science Letters Vol. 15, n. 1, p. 60-63, 1996.
- CAO, J., C. R. RAMBO and H. SIEBER.** *Preparation of Porous Al₂O₃-Ceramics by Biotemplating of Wood.* Journal of Porous Materials Vol. 11, n. 3, p. 163-172, 2004.
- CHENU, S., R. LEBULLENGER and J. ROCHERULLÉ.** *Microwave synthesis and properties of NaPO₃-SnO-Nb₂O₅ glasses.* Journal of Materials Science Vol. 47, n. 11, p. 4632-4639, 2012.
- DA LUZ, A. A., A. C. DE FRANCISCO, S. F. M. SANTOS, A. M. SOARES and J. L. KOVALESKI.** *Sustainable development and conscious consumption: A perception of undergraduate interns in the region of Campos Gerais, Parana, Brazil.* Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América Vol. 41, n. 5, p. 312-318, 2016.
- DOS SANTOS, N.** *Antropotecnologia: a ergonomia dos sistemas de produção.* Curitiba: Genesis Editora. 354p, 1997.
- ÉIDUKYAVICHUS, K. K., V. R. MATSEIKENE, V. V. BALKYAVICHUS, A. A. SHPOKAUSKAS, A. A. LAUKAITIS and L. Y. KUNSKAITE.** *Use of Cullet of Different*

Chemical Compositions in Foam Glass Production. Glass and Ceramics Vol. 61, n. 3, p. 77-80, 2004.

FAHMY, Y. M. *Catalysis role for sustainable industrial development in Egypt with prospective*. Technovation Vol. 25, n. 6, p. 645-655, 2005.

FERNANDES, H. R., D. U. TULYAGANOV and J. M. F. FERREIRA. *Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents*. Ceramics International Vol. 35, n. 1, p. 229-235, 2009.

FLAMBARD, A., J. J. VIDEAU, L. DELEVOYE, T. CARDINAL, C. LABRUGÈRE, C. A. RIVERO, M. COUZI and L. MONTAGNE. *Structure and nonlinear optical properties of sodium–niobium phosphate glasses*. Journal of Non-Crystalline Solids Vol. 354, n. 30, p. 3540-3547, 2008.

GIBSON, L. J. and M. F. ASHBY (1999). *Cellular solids: structure and properties*, Cambridge university press.

GUO, H. W., Y. X. GONG and S. Y. GAO. *Corrigendum to ‘Preparation of high strength foam glass-ceramics from waste cathode ray tube’ [Mater. Lett. 64 (2010) 997–999]*. Materials Letters Vol. 107, p. 9, 2013.

HILT, M. J., D. WAGNER, V. OSTERLEHNER and A. KAMPKER. *Agile Predevelopment of Production Technologies for Electric Energy Storage Systems – A Case Study in the Automotive Industry*. Procedia CIRP Vol. 50, p. 88-93, 2016.

KOOPMAN, M., K. K. CHAWLA, K. B. CARLISLE and G. M. GLADYSZ. *Microstructural failure modes in three-phase glass syntactic foams*. Journal of Materials Science Vol. 41, n. 13, p. 4009-4014, 2006.

KOUDELKA, L., J. POSPÍŠIL, P. MOŠNER, L. MONTAGNE and L. DELEVOYE. *Structure and properties of potassium niobato-borophosphate glasses*. Journal of Non-Crystalline Solids Vol. 354, n. 2–9, p. 129-133, 2008.

LAKOV, L., K. TONCHEVA, A. STANEVA, T. SIMEONOVA, Z. ILCHEVA, Z. ILCHEVA, T. SIMEONOVA, D. RUSEV, I. MARKOVSKA and M. LYUBCHEVA. *Composition, synthesis and properties of insulation foam glass obtained from packing glass waste*. Journal of Chemical Technology and Metallurgy Vol. 48, n. 2, p. 125-129, 2013.

LIAO, Y.-C. and C.-Y. HUANG. *Glass foam from the mixture of reservoir sediment and Na₂CO₃*. Ceramics International Vol. 38, n. 5, p. 4415-4420, 2012.

LLAUDIS, A. S., M. J. O. TARI, F. J. G. TEN, E. BERNARDO and P. COLOMBO. *Foaming of flat glass cullet using Si₃N₄ and MnO₂ powders*. Ceramics International Vol. 35, n. 5, p. 1953-1959, 2009.

MANEVICH, V. E. and K. Y. SUBBOTIN. *Foam glass and problems of energy conservation*. Glass and Ceramics Vol. 65, n. 3, p. 105-108, 2008.

MARTINELLI, J. R., F. F. SENE and L. GOMES. *Synthesis and properties of niobium barium phosphate glasses*. Journal of Non-Crystalline Solids Vol. 263–264, p. 263-270, 2000.

MEAR, F., P. YOT, M. CAMBON, R. CAPLAIN and M. RIBES. *Characterisation of porous glasses prepared from Cathode Ray Tube (CRT)*. Powder Technology Vol. 162, n. 1, p. 59-63, 2006.

MÉAR, F., P. YOT and M. RIBES. *Effects of temperature, reaction time and reducing agent content on the synthesis of macroporous foam glasses from waste funnel glasses*. Materials Letters Vol. 60, n. 7, p. 929-934, 2006.

MÉAR, F., P. YOT, R. VIENNOIS and M. RIBES. *Mechanical behaviour and thermal and electrical properties of foam glass*. Ceramics International Vol. 33, n. 4, p. 543-550, 2007.

- MORGAN, J. S., J. L. WOOD and R. C. BRADT.** *Cell size effects on the strength of foamed glass.* Materials Science and Engineering Vol. 47, n. 1, p. 37-42, 1981.
- MUSANGO, J. K., A. C. BRENT, B. AMIGUN, L. PRETORIUS and H. MÜLLER.** *A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa.* Technovation Vol. 32, n. 11, p. 639-651, 2012.
- NEGASH, M. and O. RIERA.** *Biodiesel value chain and access to energy in Ethiopia: Policies and business prospects.* Renewable and Sustainable Energy Reviews Vol. 39, p. 975-985, 2014.
- PAGANI, R. N., J. L. KOVALESKI and L. M. RESENDE.** *Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication.* Scientometrics Vol. 105, n. 3, p. 2109-2135, 2015.
- SENE, F. F., J. R. MARTINELLI and L. GOMES.** *Synthesis and characterization of niobium phosphate glasses containing barium and potassium.* Journal of Non-Crystalline Solids Vol. 348, p. 30-37, 2004.
- SILVA, L. C. S., J. L. KOVALESKI, S. GAIA, G. S. A. SEGUNDO and C. S. TEN CATEN.** *Processo de transferência de tecnologia em universidades públicas brasileiras por intermédio dos núcleos de inovação tecnológica.* Interciencia Vol. 40, n. 10, p. 664, 2015.
- SPIRIDONOV, Y. A. and L. A. ORLOVA.** *Problems of Foam Glass Production.* Glass and Ceramics Vol. 60, n. 9, p. 313-314, 2003.
- THOMAS, C.** *Waste management and recycling in Romania: a case study of technology transfer in an economy in transition.* Technovation Vol. 19, n. 6-7, p. 365-371, 1999.
- TULYAGANOV, D. U., H. R. FERNANDES, S. AGATHOPOULOS and J. M. F. FERREIRA.** *Preparation and characterization of high compressive strength foams from sheet glass.* Journal of Porous Materials Vol. 13, n. 2, p. 133-139, 2006.
- VAISMAN, I., A. KETOV and I. KETOV.** *Cellular glass obtained from non-powder preforms by foaming with steam.* Ceramics International Vol. 42, n. 14, p. 15261-15268, 2016.
- WU, J. P., A. R. BOCCACCINI, P. D. LEE, M. J. KERSHAW and R. D. RAWLINGS.** *Glass ceramic foams from coal ash and waste glass: production and characterisation.* Advances in Applied Ceramics Vol. 105, n. 1, p. 32-39, 2006.
- ZHU, J., W. YANG, H. YANG and F. WANG.** *Effect of Nb₂O₅ on the microstructure and mechanical properties of TiAl based composites produced by hot pressing.* Materials Science and Engineering: A Vol. 528, n. 21, p. 6642-6646, 2011.