

PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ESPUMAS DE AÇO E ALUMÍNIO SOB ALTAS TEMPERATURAS*

Miguel de Morais Tavares¹
Luiz Carlos Marcos Vieira Junior²
Saulo José de Castro Almeida³
Stefan Szyniszewski⁴

Resumo

No presente trabalho são avaliadas e discutidas as propriedades mecânicas de espumas metálicas de aço e alumínio de porosidade fechada sob altas temperaturas. As espumas metálicas são metais celulares que podem ser aplicados, por exemplo, como núcleos de painéis sanduíche para a construção leve ou absorvedores de impacto graças à alta compressibilidade deste tipo de materiais (até 90% de deformação). Foram testadas à compressão espumas compostas por esferas de aço ocas e espumas de alumínio fabricadas pelo processo da Metalurgia do Pó, sujeitas às temperaturas de 24°C, 100°C, 150°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 550°C e 700°C. As espumas de aço mantiveram as suas propriedades até 400°C, enquanto que as espumas de alumínio viram suas propriedades se degradarem apenas para 150°C. Apesar dos fatores de redução da tensão de platô terem seguido a mesma tendência do Eurocode verificadas para o aço e alumínio sólido, a oxidação do ferro registrada entre 150 e 300°C produziu uma coloração azul nas espumas de aço, resultando em um aumento da sua rigidez para esse intervalo de temperaturas.

Palavras-chave: Espumas de aço; Espumas de alumínio; Análise térmica; Compressão.

MECHANICAL PERFORMANCE OF STEEL AND ALUMINUM FOAMS AT HIGH TEMPERATURES

Abstract

We report and discuss the mechanical properties of closed-cell steel and aluminum foams at elevated temperatures. Metallic foams are cellular metals with applications in cores of sandwich panels for lightweight construction and crash absorbers due to their high compressibility (up to 90% strain). We tested mechanical properties of hollow sphere (HS) steel foams and powder metallurgy aluminum foams under compressive loads at a range of temperatures: 24°C, 100°C, 150°C, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C, 550°C and 700°C. Steel foams maintained their properties up to 400°C, while aluminum foams began to soften at 150°C only. Although plateau stress retention factors followed Eurocode reductions for bulk steel and aluminum in general, oxidation of Fe at 150-300°C produced distinct blue discoloration of the steel foam samples. These samples showed slight increase in their stiffness at that temperature range.

Keywords: Steel foams; Aluminum foams; Thermal analysis; Compression

¹ Universidade de Lisboa, Mestre em Engenharia Civil, Mestrando em Engenharia Civil, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

² Johns Hopkins University, Doutor em Engenharia Civil, Professor MS3.1, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

³ Universidade de São Paulo, Doutor em Engenharia Civil, Professor MS3.1, Departamento de Estruturas, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.

⁴ University of Florida, Doutorem Engenharia Civil, Lecturer, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Surrey, Surrey, London, United Kingdom.

1 INTRODUÇÃO

As espumas metálicas são metais porosos com vazios introduzidos intencionalmente que podem variar desde nanômetros até alguns milímetros. Parâmetros físicos como a porosidade podem ser controlados e, conseqüentemente, o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento podem ser ajustados para as necessidades de cálculo. As diversas técnicas de fabricação desenvolvidas até hoje permitem a produção de espumas cuja dispersão de vazios tanto poderá ser irregular, caso do painel sanduíche composto por chapas de aço e núcleo de espuma de alumínio, Figura 1 (a), como poderá ser constituída por uma estrutura mais homogênea, caso da espuma de esferas de aço ocas, Figura 1 (b).

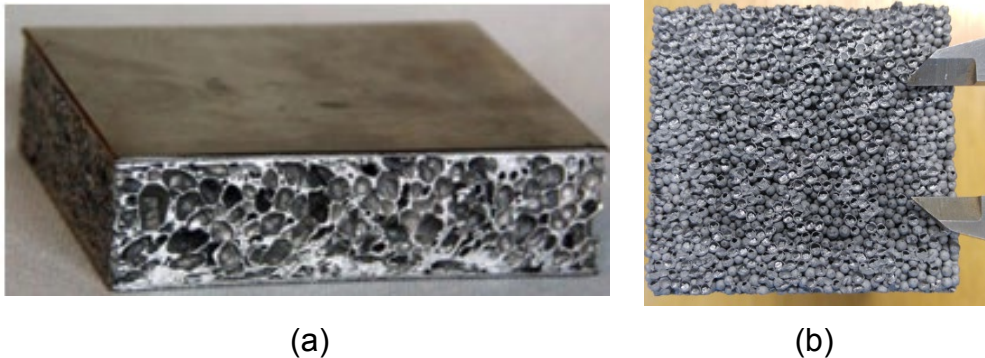


Figura 1.(a) Painel sanduíche metálico com núcleo de espuma de alumínio [1] e (b) espuma de esferas de aço ocas.

A utilização deste tipo de espumas está relacionada com o seu comportamento, que depende sobretudo da configuração como o sólido se distribui na estrutura porosa, a qual poderá ser constituída por células fechadas e/ou células abertas. Atualmente, os campos de aplicação das espumas metálicas se situam sobretudo no domínio da engenharia mecânica, automobilística e aeroespacial [2]. As espumas metálicas apresentam um bom desempenho no que respeita ao quociente entre a rigidez e o peso quando sujeitas a esforço de flexão. Efetivamente, painéis sanduíche com núcleo de espuma metálica apresentam uma maior rigidez do que chapas metálicas de aço sólido com o mesmo peso [3]. As espumas metálicas são reconhecidas também pela sua compressibilidade de até 90% de deformação [4], o que lhes confere uma excelente capacidade de dissipação de energia [5], característica que tem sido explorada na indústria automobilística para fabricação de componentes absorvedores de impacto [6]. Moradi [7] expõe algumas aplicações estruturais das espumas metálicas na engenharia civil tendo em conta a incerteza geométrica e física inerente a este tipo de materiais. Nesse trabalho é demonstrado que as espumas metálicas têm potencial para serem aplicadas como fusíveis na ocorrência de um sismo, uma vez que os metais celulares proporcionam mais ductilidade ao sistema estrutural e funcionam como amortecedores histeréticos, atenuando a resposta dinâmica.

A este tipo de materiais estão também associadas propriedades não estruturais como a permeabilidade a gases e fluídos, no caso de espumas de porosidade aberta, e a elevada capacidade de isolamento térmico e acústico. Por exemplo, as espumas metálicas são usadas nos permutadores de calor devido ao escoamento turbulento que se verifica nas cavidades irregulares internas em conjunto com a elevada área específica e condutividade térmica do metal base. As espumas metálicas são usadas também em células de combustível. De fato, a grande área

superficial e a boa capacidade de mistura de fluidos aumentam a interação entre o catalisador e o meio fluido [8].

As propriedades mecânicas de uma espuma metálica diferem bastante do metal base que a constitui. As espumas de aço são compressíveis após o escoamento [9] ao contrário do aço sólido que no regime plástico apenas exibe deformação por corte e é incompressível. À tração, as espumas sofrem fraturas para deformações bem mais baixas que as deformações de densificação quando comprimidas [10], exigindo uma análise específica quanto ao critério de falha.

A resistência à compressão pode ficar comprometida caso as espumas metálicas sejam submetidas a temperaturas elevadas. Kovacic et al. [11] estudou à compressão e sob temperaturas elevadas (20-500 °C) espumas de alumínio fabricadas pelo processo da metalurgia do pó; foi observado uma diminuição da resistência e capacidade de absorção de energia com o aumento de temperatura, além do aumento da deformação de densificação (aumento da fase de platô), para amostras de densidade constante. Kovacic et al. [11] concluiu também que o tempo de exposição às temperaturas elevadas não influencia o comportamento à compressão das espumas metálicas.

Taherishargh et al. [12] analisou espumas sintéticas de perlite-alumínio expandido sob temperaturas elevadas (25, 125, 250, 375 e 500 °C) e comparou os resultados obtidos com os da matriz sólida testada sob as mesmas condições. Módulo de elasticidade, tensão de escoamento, tensão de platô e absorção de energia foram avaliados para todas as amostras. Os resultados indicaram que as propriedades das espumas quando submetidas a altas temperaturas são controladas pela degradação da matriz sólida, registrando-se também um aumento da ductilidade da espuma.

BekozeOktay [13] estudaram as propriedades mecânicas de espumas de aço de baixa liga produzidas através da metalurgia do pó, tanto para a temperatura ambiente como para 200, 400 e 600 °C. Ao contrário das espumas de alumínio, BekozeOktay [13] reportaram um aumento da tensão de escoamento e aumento da rigidez na compressão quando a temperatura aumentou até 400 °C e uma degradação dessas propriedades para temperaturas superiores. O mesmo autor apontou o endurecimento por envelhecimento da liga de aço como responsável pela melhoria das propriedades mecânicas que se verificou até 400 °C.

O objetivo deste trabalho é o estudo das propriedades mecânicas de espumas metálicas submetidas a esforço de compressão axial sob altas temperaturas. O estudo foca em dois tipos de espumas metálicas, (i) espumas de esferas de aço ocas e (ii) espumas de alumínio.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Seguindo as disposições da norma ISO 13314:2011 [14], foram preparadas 11 amostras cilíndricas de espuma de esferas de aço ocas (diâmetro = 25 mm; comprimento = 50 mm) procedentes de um bloco de dimensão 22 x 5.2 x 5.2 [cm] fornecido pelo FraunhoferInstitute (Alemanha). Tendo por base as dimensões e o volume de cada corpo de prova obteve-se uma porosidade média de 85% para a espuma de esferas ocas de aço. A informação do fabricante indicou que o metal base era composto por um aço macio constituído por 0.3 a 0.5% de carbono e 0.5% de fósforo. Considerando essa composição química, foi estimado uma tensão de escoamento de 250 MPa para o aço [15]. A espuma de alumínio foi fornecida pelo FraunhoferInstitute for Machine Tools and Forming Technology IWU, Chemnitz, Alemanha. A amostra base tinha as dimensões 14.5 x 6.0 x 6.0 e foi dividida em 8

amostras cilíndricas para teste (diâmetro = 25 mm, comprimento = 50 mm), Figura 2, seguindo igualmente as disposições da norma ISO 13314:2011 [14]. Dada à heterogeneidade deste tipo de espumas devido ao processo de fabricação, obteve-se uma porosidade entre 71.4 e 81.8 % para as 8 amostras. O metal base foi reportado pelo fabricante como sendo um alumínio comum da liga AW-6060 (AlMgSi0.5).

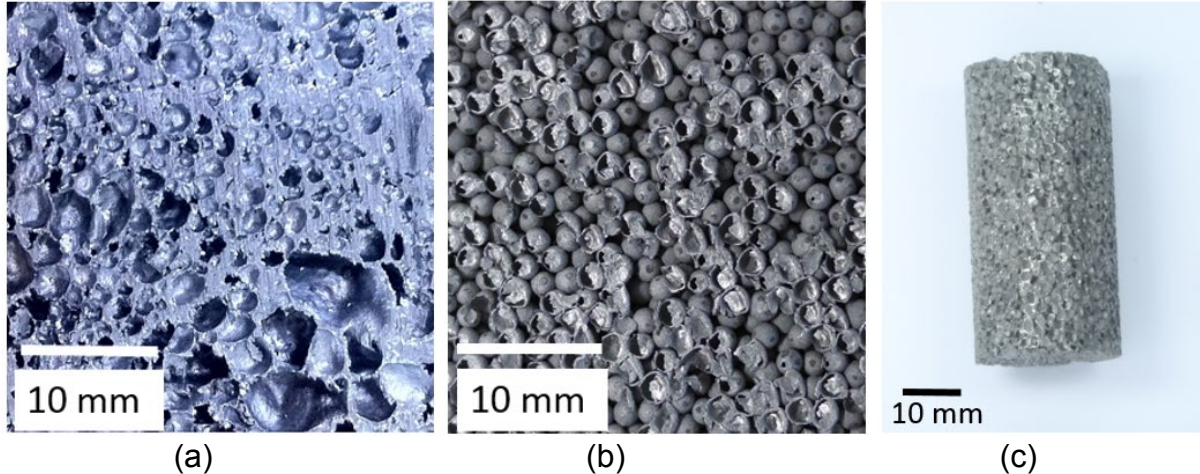


Figura 2. Espumas metálicas: (a) alumínio, (b) espuma de esferas de aço ocas e (c) corpo de prova de espuma de esferas de aço ocas.

Os equipamentos usados nos testes experimentais foram uma máquina universal servo-hidráulica MTS Modelo 810 com 100 kN de capacidade de carga de compressão, um aquisitor de dados Flex Test e um forno elétrico que possibilitava uma elevação de temperatura de até 1000 °C garantindo a temperatura constante com precisão de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (Figura 3). Aplicou-se uma carga axial de compressão nas amostras cilíndricas a uma velocidade constante de 0.025 mm/s. A tensão de compressão foi obtida dividindo a força aplicada, F , pela área de seção transversal medida antes do carregamento, enquanto que a deformação de compressão, ε , foi obtida dividindo o deslocamento do atuador pelo comprimento original do corpo de prova.

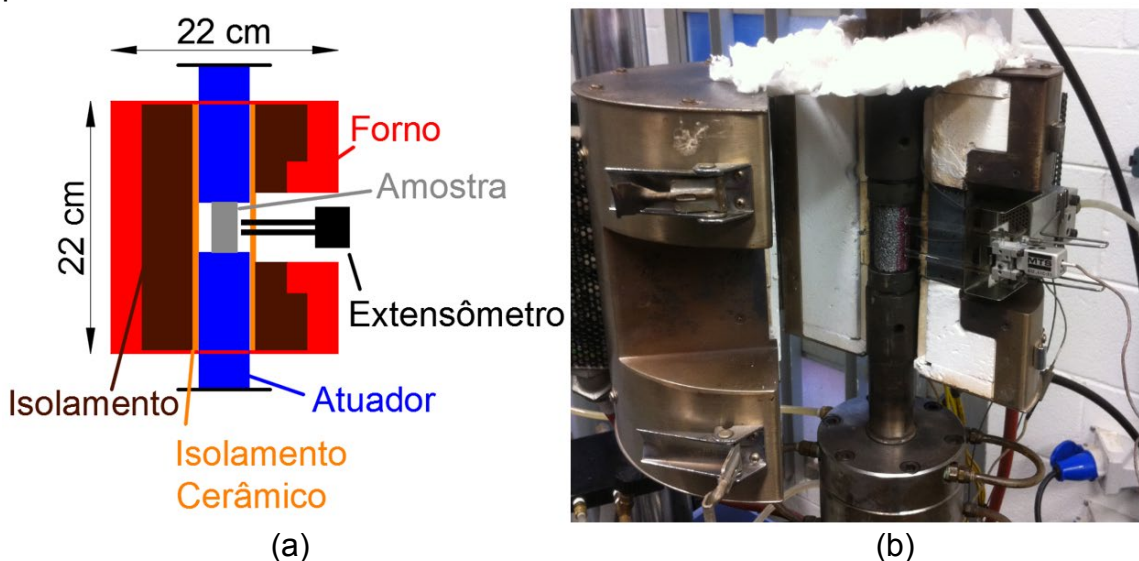


Figura 3. Aparato experimental: (a) representação esquemática em corte e (b) vista com o forno aberto (Laboratório de Engenharia Mecânica – UNICAMP).

A Tabela 1 apresenta as condições de temperatura e tempo de exposição dos ensaios realizados. A temperatura foi controlada por um termopar instalado junto da amostra. O forno foi previamente aquecido sem a amostra até à temperatura desejada; uma vez que a temperatura foi alcançada, a amostra foi colocada dentro do forno; o ensaio de compressão apenas começou quando a amostra esteve sob temperatura constante durante o tempo requerido.

Tabela 1. Temperatura e tempos de exposição testados durante os ensaios

Temperatura	Espuma de aço	Espuma de alumínio
24 °C	∞	∞
150 °C	15 & 30 min	15 & 30 min
200 °C	15 & 30 min	15 & 30 min
300 °C	15 & 30 min	15 & 30 min
400 °C	15 & 30 min	-
500 °C	-	15 min
550 °C	15 min	-
700 °C	15 min	-

3 RESULTADOS

3.1 Espuma de Aço

A curva tensão-deformação das espumas metálicas apresenta três regiões distintas. Primeiro, uma fase elástica em que existe uma relação linear entre a compressão e a deformação. Segundo, uma fase de patamar (platô) na qual a deformação é plástica e, portanto, irreversível. Terceiro, uma fase de densificação, onde para ocorrer deformação é necessário um aumento significativo de tensão de compressão. A Figura 4 apresenta a curva tensão-deformação para os testes realizados para 15 minutos de tempo de exposição da espuma de aço, onde é possível visualizar as 3 fases distintas da curva tensão-deformação.

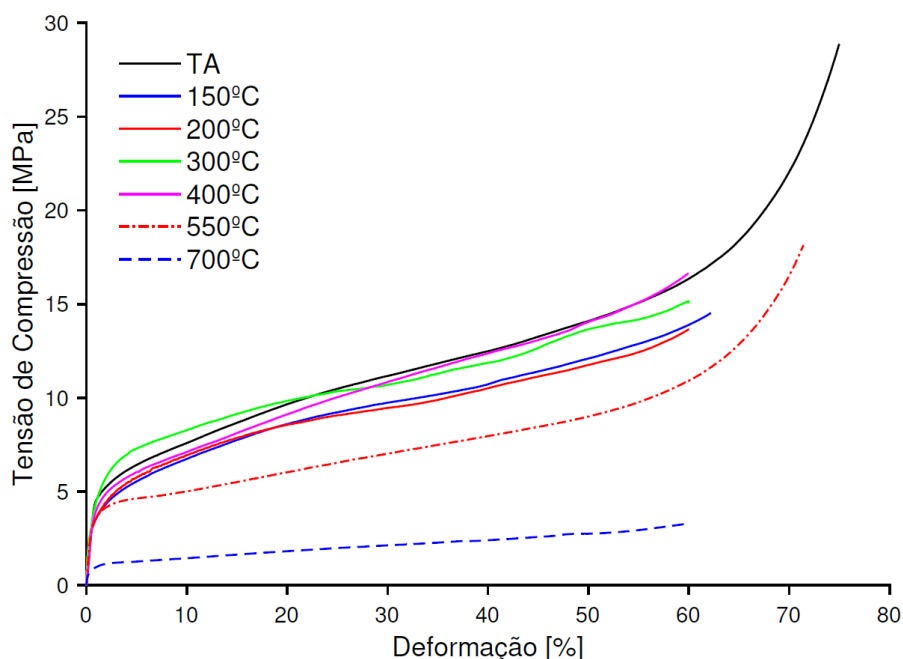


Figura 4. Gráfico Tensão versus Deformação das espumas de esferas de aço ocas após 15 minutos de tempo de exposição a determinada temperatura estacionária (de 24 a 700 °C).

É possível observar que não foi registrada uma perda significativa da capacidade de carga dos corpos de prova até 400°C; foi registrada uma queda moderada para 550°C e verifica-se que as propriedades mecânicas são severamente afetadas para a temperatura de 700°C.

A Figura 5 apresenta a relação das propriedades mecânicas estudadas para a espuma de aço com a temperatura. É importante referir que o cálculo das propriedades mecânicas teve por base a norma ISO 13314:2011 [14].

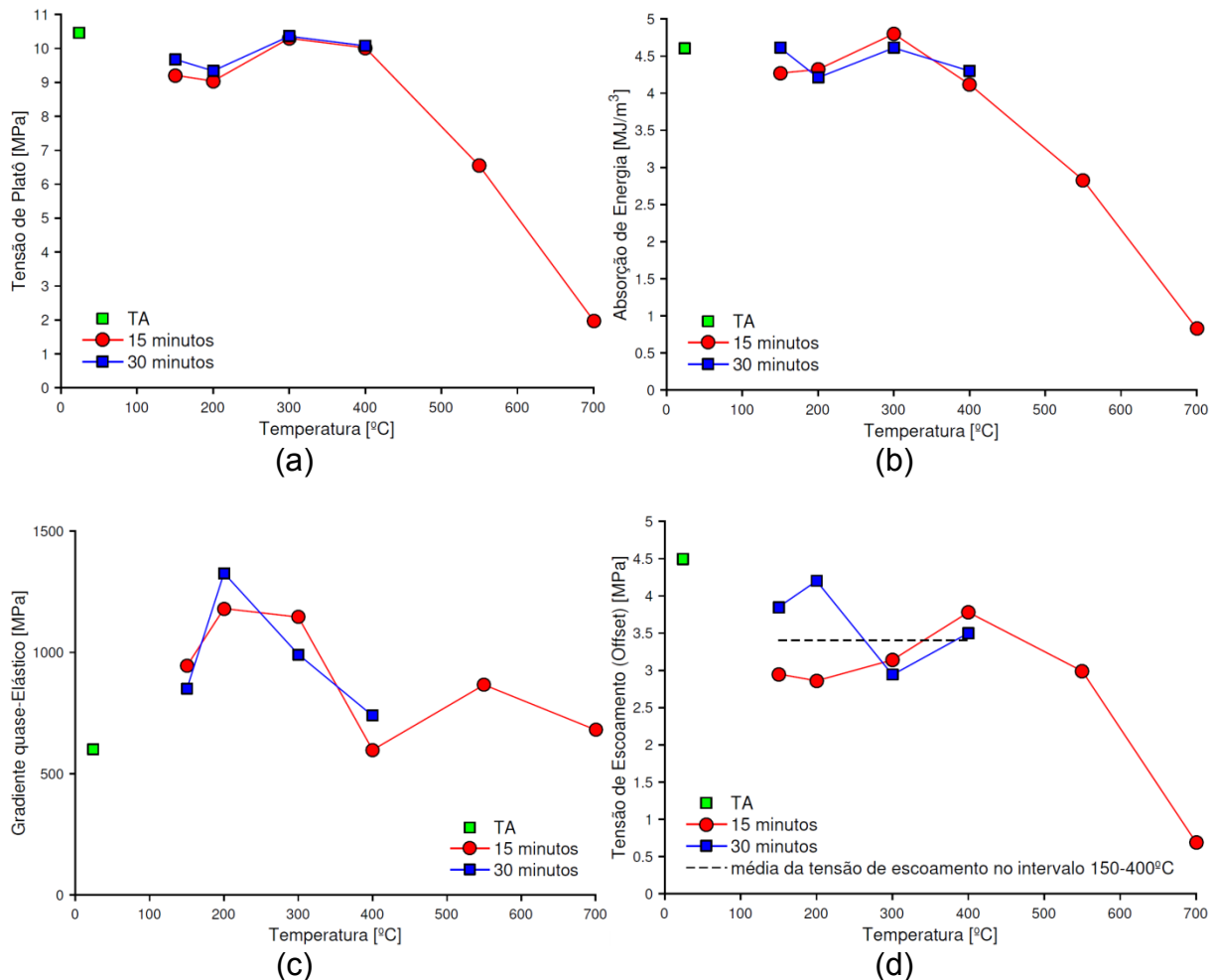


Figura 5. Propriedades Mecânicas *versus* Temperatura para a espuma de aço: (a) tensão de platô, (b) absorção de energia, (c) gradiente quase-elástico e (d) tensão de escoamento obtida pelo método do offset.

Verifica-se que não existe uma diferença relevante entre os valores medidos das propriedades mecânicas para 15 e 30 minutos de tempo de exposição. A maioria das propriedades mecânicas não se degrada até 400 °C (30% do ponto de fusão do aço sólido), no entanto, para temperaturas superiores, tanto a tensão de platô (Figura 5a), como a absorção de energia (Figura 5b) e a tensão de escoamento (Figura 5d) sofrem uma redução significativa. Já para o gradiente quase-elástico (Figura 5c) constata-se um comportamento diferente: aumentou consideravelmente no intervalo da temperatura ambiente até à temperatura de 200 °C e seguidamente diminuiu até 400 °C onde se verificou um valor ligeiramente abaixo do registrado para 24 °C. É, portanto, relevante assinalar que para os testes de 150, 200 e 300 °C foram observados gradientes quase-elásticos maiores que o observado para a temperatura ambiente.

O aumento de rigidez registrado no intervalo de temperaturas entre 150 e 300 °C está associado ao conhecido fenômeno de rigidez azul (*blue brittleness range*). Este fenômeno ocorre em ligas de aço sujeitas a temperaturas no intervalo de 180 °C até 370 °C[16] e é caracterizado pela formação de um filme azul de óxido de ferro na superfície do metal. O material resultante tem uma rigidez maior embora menor ductilidade quando comparada com a liga metálica original. As amostras de espumas de aço testadas a temperaturas elevadas apresentaram a coloração azul conforme se pode verificar na Figura 6.



Figura 6. À esquerda, uma amostra antes de ser submetida ao ensaio, à direita uma amostra após o ensaio a 300 °C – 30 min. A coloração azul se evidenciou após a exposição à temperatura elevada.

3.2 Espuma de Alumínio

A Figura 7 apresenta a curva tensão-deformação dos testes realizados para 15 minutos de tempo de exposição a temperaturas elevadas da espuma de alumínio. A porosidade das amostras de alumínio variou de 71.4% até 81.8%, o que resultou em alguma dispersão dos resultados obtidos.

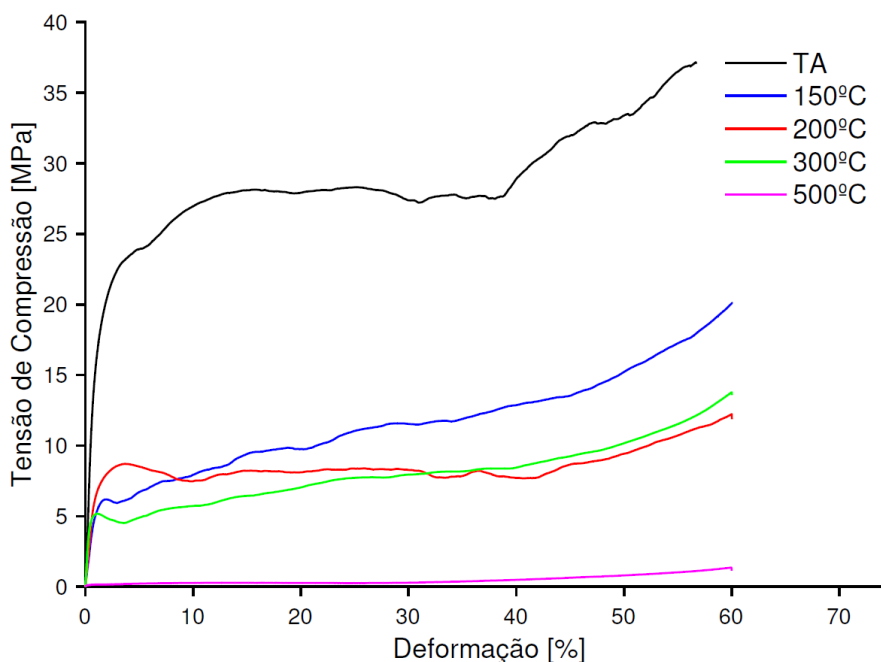


Figura 7. Gráfico Tensão versus Deformação das espumas de alumínio após 15 minutos de tempo de exposição a determinada temperatura estacionária (de 24 a 500 °C).

Quando comparado ao ensaio à temperatura ambiente (TA), observa-se uma perda significativa da capacidade de carga das espumas ensaiadas a temperaturas elevadas, onde para 500 °C a resistência à compressão da espuma de alumínio é praticamente inexistente.

Na Figura 8 são apresentadas as propriedades mecânicas estudadas para as espumas de alumínio em função da temperatura.

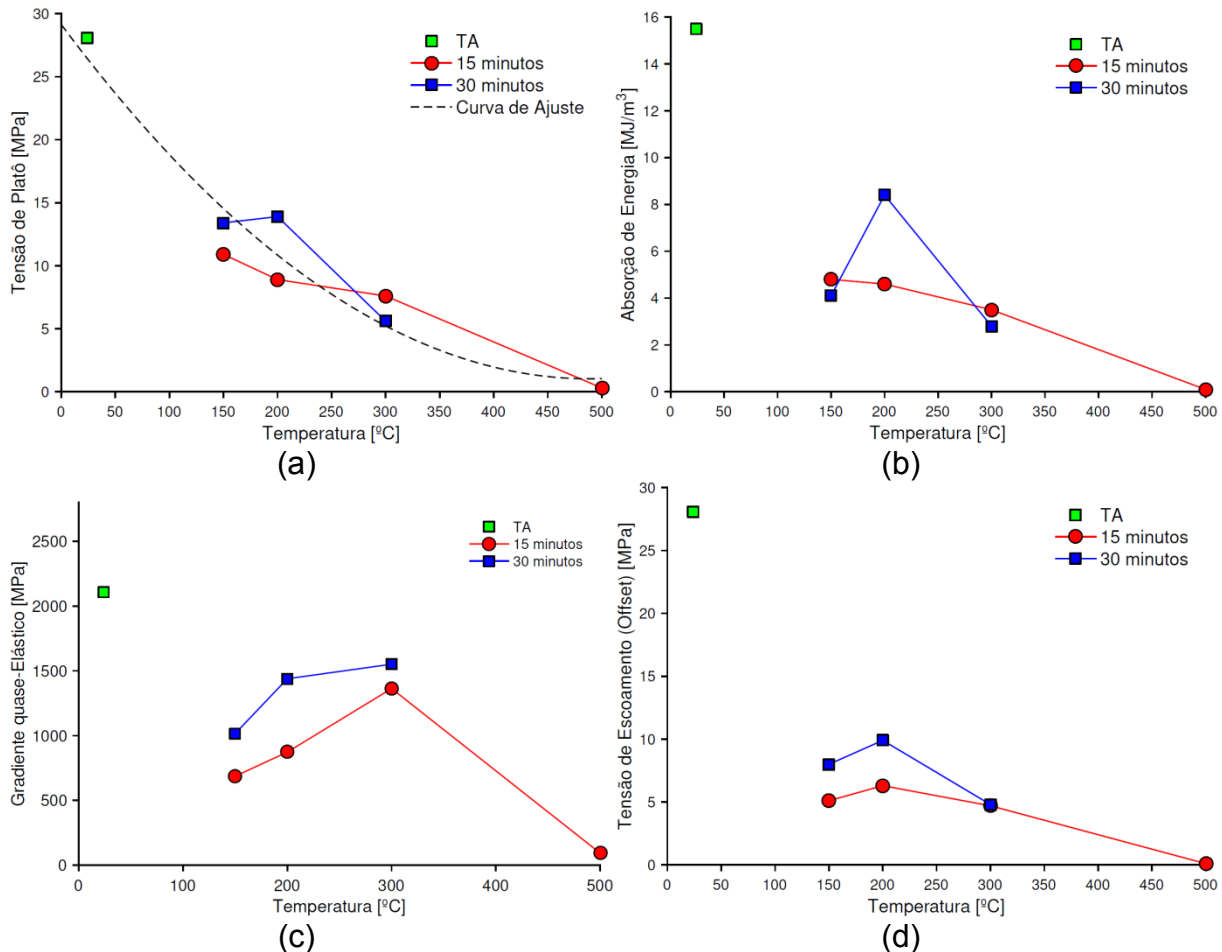


Figura 8. Propriedades Mecânicas *versus* Temperatura para a espuma de alumínio: (a) tensão de platô, (b) absorção de energia, (c) gradiente quase-elástico e (d) tensão de escoamento obtida pelo método do offset.

As espumas de alumínio demonstraram uma redução significativa da tensão de platô logo para 150 °C (23% do ponto de fusão do alumínio sólido) e apenas retiveram 20% da tensão de platô para 300 °C (Figura 8a). Para 500 °C de temperatura de exposição, a tensão de platô praticamente se reduziu a zero. O tempo de exposição (15 ou 30 minutos) não teve influência na degradação das propriedades da espuma. Quanto à absorção de energia, também para 150 °C se observou uma deterioração significativa conforme se pode verificar no gráfico da Figura 8b. Uma das amostras registrou um aumento pontual na absorção de energia para 200 °C porém causado pela menor porosidade dessa amostra em particular. Similarmente, a tensão de escoamento obtida pelo método do offset sofreu uma redução considerável para 150-200 °C e praticamente se anulou a 500 °C de temperatura (Figura 8d).

Enquanto que na espuma de aço registrou-se um aumento no gradiente quase-elástico para temperaturas elevadas até 400 °C, na espuma de alumínio a maior rigidez foi obtida para a temperatura ambiente (Figura 8c). Ainda assim é

interessante assinalar a tendência crescente do gradiente quase-elástico verificada de 150 °C até 300 °C, o que vai contra o senso comum de que o gradiente quase-elástico se degrada com o aumento da temperatura nas espumas de alumínio.

4 DISCUSSÃO

Após analisadas as principais propriedades mecânicas das espumas de aço e alumínio é interessante fazer uma comparação com o comportamento dos materiais sólidos base também quando sujeitos a altas temperaturas.

Na Figura 9 é feita uma comparação entre o fator de redução da tensão de platô da espuma de esferas de aço ocas com o fator de redução da tensão de escoamento do aço sólido apresentado no Eurocode (EN 1993-1-2:2005) [17]. Apesar de não se verificar uma tendência perfeita nos pontos obtidos experimentalmente para a espuma de aço, é possível constatar que é seguida a mesma curva do fator de redução para o aço sólido. É importante notar que o Eurocode não se refere a tempos de exposição às temperaturas elevadas mas reporta que os fatores de redução apresentados para o aço sólido são obtidos para ensaios com taxas aquecimento entre 2 °C/min a 50 °C/min. Os resultados apresentados no presente trabalho, realizados para uma temperatura estacionária durante 15 ou 30 minutos, não demonstraram nenhuma sensibilidade para com o tempo de exposição.

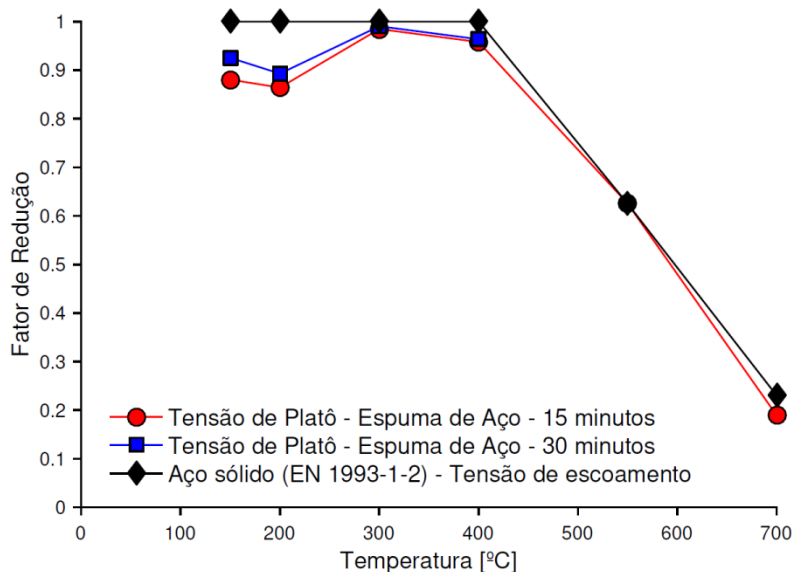


Figura 9. Comparação do fator de redução da tensão de platô da espuma de aço com os valores propostos na EN1993-1-2:2005 [17] para a tensão de escoamento do aço sólido.

Fazendo a mesma análise para as espumas de alumínio constata-se que o alumínio sólido perde as suas propriedades mecânicas para temperaturas muito mais baixas do que o aço de acordo com a EN 1999-1-2:2007 [18]. A tensão de escoamento do alumínio diminui 20% quando sujeito a 150 °C e 90% para 300 °C. Os testes realizados no presente trabalho permitem deduzir a mesma tendência para a espuma de alumínio, com reduções ainda mais significativas da tensão de platô (até 50%) para a temperatura de 150 °C (Figura 10). A performance mecânica do alumínio praticamente se torna negligenciável para temperaturas excedendo 300 °C. Pode-se afirmar que, de um modo geral, verificaram-se os mesmos efeitos da temperatura na resistência à compressão, absorção de energia e gradiente quase-elástico em estudos anteriores realizados em espumas de alumínio [11-12].

Taherishargh et al. [12] também reportou que a degradação das propriedades da espuma de alumínio seguiu a mesma tendência que a do material sólido. A independência das propriedades mecânicas face ao tempo de exposição observada no presente trabalho foi consistente com o reportado no trabalho de Kovacik et al. [11].

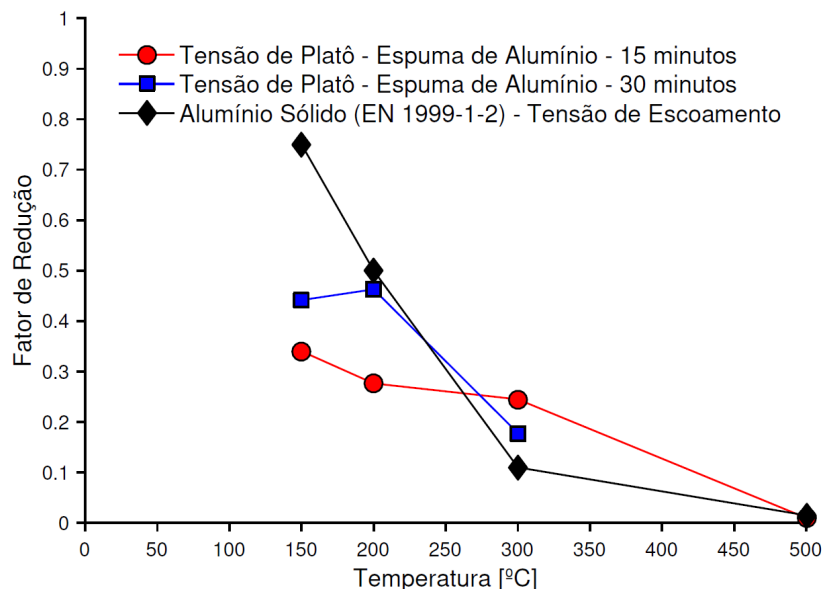


Figura 10. Comparação do fator de redução da tensão de platô da espuma de alumínio com os valores propostos na EN1999-1-2:2007 [18] para a tensão de escoamento do alumínio sólido.

Ainda que o processo de fabricação das espumas de esferas de aço ocas seja mais oneroso devido aos custos energéticos acrescidos derivados do ponto de fusão mais alto do aço, a performance mecânica sob altas temperaturas é claramente superior à do alumínio. A mesma observação foi constatada no trabalho de BekozeOktay [13]. As espumas de aço não mostraram uma redução significativa das suas propriedades mecânicas até 400 °C. Mesmo para 550 °C ainda retiveram 60% da sua resistência, o que permite garantir a capacidade de carga dos componentes constituídos por espumas de aço, tendo em conta os fatores de segurança tipicamente considerados no dimensionamento.

O aparecimento de um óxido azul durante o aquecimento das espumas de aço aumentou a rigidez das amostras. Considerando a elevada área específica das espumas metálicas, as reações químicas poderão ter um impacto significativamente positivo na performance termo-mecânica das espumas. BekozeOktay [13] também reportou um aumento na tensão de escoamento e na rigidez de espumas de aço fabricadas pela Metalurgia do Pó com o aumento da temperatura até 400 °C e uma diminuição após essa temperatura. Essa mesma referência aponta o efeito de *age-hardening* como fator de melhoria das propriedades mecânicas verificadas até 400 °C, porém não detectou nenhum aumento de resistência à compressão para temperaturas superiores e velocidades de aplicação de carga mais altas.

5 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram testadas à compressão e sob temperaturas elevadas espumas compostas por esferas de aço ocas e espumas de alumínio fabricadas pelo processo da metalurgia do pó. As espumas de aço foram comprimidas a 150 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 550 °C e 700 °C e as espumas de alumínio foram

testadas a 150 °C, 200 °C, 300 °C, 500 °C. Ambas as espumas foram também testadas à temperatura ambiente (24 °C). O carregamento de compressão foi aplicado após 15 ou 30 minutos de tempo de exposição à temperatura requerida em regime estacionário. Propriedades mecânicas tais como a tensão de platô, tensão de escoamento obtida pelo método do offset, absorção de energia e gradiente quasi-elástico foram analisadas e o seu comportamento com relação à temperatura foi estabelecido.

As espumas compostas por esferas de aço ocas demonstraram resistir a condições de temperaturas elevadas sendo que praticamente asseguraram as suas propriedades mecânicas até 400 °C. A espuma de aço reteve ainda 60% da sua resistência e capacidade de absorção de energia a 550 °C, porém se deteriorou e reteve 10% das suas propriedades mecânicas quando a temperatura atingiu 700 °C. A espuma de alumínio teve 50% de redução das suas propriedades mecânicas logo para uma temperatura de 150 °C e reteve apenas 10 a 20% da sua capacidade de carga para 300 °C.

Ambas as curvas dos fatores de redução seguiram a mesma tendência dos respectivos materiais sólidos base apresentadas no Eurocode, EN1993-1-2:2005 [17] para o aço e EN 1999-1-2:2007 [18] para o alumínio.

Para o intervalo de temperaturas entre 150 e 300 °C registrou-se o aparecimento de um óxido azul na superfície da espuma de aço, o que resultou num aumento do gradiente quase-elástico. É interessante mencionar que a pré-oxidação da liga FeCrAl é usada comercialmente para aumentar a resiliência térmica das espumas de alumínio, pelo que as reações químicas ocorrentes nas espumas metálicas sob altas temperaturas deverá ser um tópico de pesquisa futura.

A elevada resistência térmica das espumas de aço poderá facilitar as aplicações em casos onde a temperatura de serviço exclui a possibilidade de aplicação de espumas poliméricas ou mesmo de alumínio. Este estudo faz parte de uma ampla investigação para o desenvolvimento de materiais celulares metálicos com relevância para aplicações aeroespaciais, automotivas, de energia e do setor da engenharia civil.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores estão extremamente gratos aos Institutos Fraunhofer IWU em Chemnitz e Fraunhofer IFAM em Dresden pela colaboração e ajuda contínua neste estudo. As discussões com Dr. Quadback, Dr. Anderson, Dr. Hipke e Dr. Vogel contribuíram de sobremaneira para a valorização deste trabalho.

Este trabalho teve suporte financeiro da Comissão Europeia no âmbito do programa *Career/Integration Grant* número 631827.

REFERÊNCIAS

- 1 Stefan Szyniszewski, PhD, PE | Bespoke Materials and Structures [página da internet]. [acesso em 22 jun. 2018]. Disponível em <http://www.szyniszewski.com/>.
- 2 Smith B, Szyniszewski S, Hajjar J, Schafer B, Arwade S. Steel foam for structures: a review of applications, manufacturing and material properties. *Journal of Constructional Steel Research*. 2012;71:1-10.

- 3 Banhart J, Seeliger H. Aluminum foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications. *Advance Engineering Materials*. 2008;10:793-802.
- 4 Gibson L, Ashby M. Cellular solids: structure and properties. London: Cambridge University Press; 2000.
- 5 Ashby M, Evans A, Fleck N, Gibson L, Hutchinson J, Wadley H. Metal foams: a design guide. Woburn: Butterworth Heinemann; 2000.
- 6 Lefebvre L, Banhart J, Dunand D. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments. *Advanced Engineering Materials*. 2008;10:775-787.
- 7 Moradi M. Structural applications of metal foams considering material and geometrical uncertainty [tese de doutorado]. Amherst: University of Massachusetts; 2011.
- 8 Yuan W, Tang Y, Yang X, Wan Z. Porous metal materials for polymer electrolyte membrane fuel cells - a review. *Applied Energy*. 2012;94:309-329.
- 9 Deshpande V, Fleck N. Isotropic constitutive models for metallic foams. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 2000;48:1253-83.
- 10 Reyes A, Hopperstad O, Berstad T, Hanssen A, Langseth M. Constitutive modeling of aluminum foam including fracture and statistical variation of density. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2003;22:815-835.
- 11 Kovacic J, Orovcik L, Jerz J. High-temperature compression of closed cell aluminium foams. *Kovové Materiály*. 2016;54:429-440.
- 12 Taherisharg M, Linul E, Broxtermann S, Fiedler T. The mechanical properties of expanded perlite-aluminium syntactic. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018;737: 590-596.
- 13 Bekoz N, Oktay E. High temperature mechanical properties of low alloy steel foams produced by powder metallurgy. *Materials and Design*. 2014;53:482-489.
- 14 International Organization for Standardization. Mechanical testing of metals - Ductility testing - Compression test for porous and cellular metals - ISO 13314:2011.
- 15 Cobb M. World Wide Guide to Equivalent Irons and Steels. Ohio: ASM International; 1987.
- 16 Xiong M, Liew J. Mechanical properties of heat-treated high tensile structural steel at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*. 2016;98:169-176.
- 17 European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design - EN 1993-1-2: 2005.
- 18 European Committee for Standardization. Eurocode 9: Design of Aluminum Structures, Part 1-2: Structural Fire Design - EN 1999-1-2:2007.