

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 17/03/2019.

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO, UTILIZANDO A
METODOLOGIA DO PROCESSO ALPORAS E CARBONATO DE CÁLCIO COMO
AGENTE ESPUMANTE**

MAURÍCIO DE OLIVEIRA FILHO

Guaratinguetá, SP

2017

MAURÍCIO DE OLIVEIRA FILHO

**ESTUDO DA PRODUÇÃO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO, UTILIZANDO A
METODOLOGIA DO PROCESSO ALPORAS E CARBONATO DE CÁLCIO COMO
AGENTE ESPUMANTE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia
do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área
de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini
Co-orientador: Prof. Dr. Wesley Luiz da Silva Assis

Guaratinguetá, SP

2017

O48e	Oliveira Filho, Maurício de Estudo da produção de espumas de alumínio, utilizando a metodologia do processo alporas e carbonato de cálcio como agente espumante / Maurício de Oliveira Filho – Guaratinguetá, 2017. 153 f : il. Bibliografia: f. 113 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017. Orientador: Prof. Dr. Peterson Luiz Ferrandini Co-orientador: Prof. Dr. Wesley Luiz da Silva Assis 1. Processos de fabricação. 2. Análise de imagem. 3. Espuma. 4. Drenagem. I. Título CDU 67.02(043)
------	---

MAURICIO DE OLIVEIRA FILHO

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

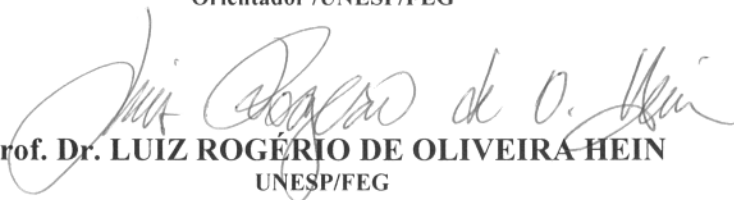


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
Orientador /UNESP/FEG



Prof. Dr. LUIZ ROGÉRIO DE OLIVEIRA HEIN
UNESP/FEG



Prof. Dr. RICARDO RISSO CHAVES
UNIFEI

Março de 2017

DADOS CURRICULARES

MAURÍCIO DE OLIVEIRA FILHO

NASCIMENTO	07.07.1987 – RESENDE/RJ
FILIAÇÃO	Aldair Reis de Oliveira Maurício de Oliveira
2009/2015	Curso de Graduação Bacharelado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense do Campus da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda.
2015/2017	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e minha família que, por entre as brumas, acalmaram meu ser e colocaram pessoas que elucidaram as possíveis dificuldades ao longo do curso.

Agradeço aos técnicos pelos conselhos e pela disposição em ajudar.

Agradeço ao meu amigo e aluno de IC Antonio Carlos pela força nos experimentos, e por acreditar e aceitar a missão. Aos meus amigos Marcelo Yuzo, Alexander, Marcelo, Sarah, Taise, Larissa, Samia, Luiza e Eduardo, pois sempre estiveram comigo.

Agradeço aos Professores José Victor, Sérgio Francisco Santos, Rogério Hein, Manoel Cleber e Marcos Valério por ajudar-me com conselhos e disponibilidade.

Agradeço ao meu Coorientador Wesley Luiz da Silva Assis, mesmo que distante fisicamente, por estar sempre me aconselhando quando necessário.

Agradeço ao meu orientador Peterson Luiz Ferrandini pelas enormes contribuições e disposição em ajudar, se o qual não teria viabilizado o projeto.

Agradeço a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para essa dissertação.

Obrigado!

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Obrigado!

*"Por ser estreita a senda - eu não declino,
Nem por pesada a mão que o mundo espalma;
Eu sou dono e senhor do meu destino;
Eu sou o comandante de minha alma"*

(William E Henley)

A mente que se abre a uma nova ideia jamais retornará ao seu tamanho original.

(Albert Einstein)

RESUMO

Uma opção de material estrutural ainda pouco utilizada são as espumas metálicas, em particular as espumas de alumínio produzidas pela metodologia Alporas. Esses materiais têm estruturas mais leves e podem ser obtidos sem perda de propriedades mecânicas, sendo sua utilização muito interessante para vários setores industriais, tais como indústrias de veículos especiais, de móveis e naval. Este trabalho visa, primeiramente, obter um equipamento que é capaz de cumprir suas expectativas e suportar todas as etapas de seu processo de produção, de modo a serem posteriormente avaliados utilizando-se as seguintes etapas para sua produção: aquecimento da matriz metálica de alumínio silício hipereutética até 700°C; adição de 3,5% em massa de carbonato de cálcio particulado, dispersão do particulado com o auxílio de um rotor com pás a 1000 rpm e retirada do rotor com pás do banho após 3 min de mistura; estabilização do material dentro do forno para expansão da espuma por diferentes tempos (150, 300, 450 s); remoção do forno; e resfriamento ao ar ambiente. 9 amostras (3 para cada tempo de expansão) foram seccionadas transversalmente de 20 em 20 mm, sendo o primeiro corte realizado a 20 mm da base da amostra, somando-se 4 cortes com diferentes alturas, totalizando 36 amostras. As densidades, aparente e relativa, e porosidades dos materiais seccionados foram avaliadas. A parte superior de cada amostra foi analisada através do *software* ImageJ, obtendo-se morfologia, tamanho de poros, e dispersão da fração porosa. No ensaio de compressão, 9 amostras com 30x30x40 mm foram analisadas a uma taxa de compressão de 1,5 mm/min (3 para cada tempo de expansão). Neste, os resultados obtidos foram energia absorvida e eficiência de absorção de energia. A significância do tempo de processo, em circularidade, diâmetro dos poros e convexidade de área foram verificados por análise de variância com intervalo de confiança de 95% e através do teste Tukey. Por análise de efeitos, a menor média de diâmetro foi obtida em um tempo de expansão de 300 s e o melhor tempo de processo foi 450 s obtido pela análise morfológica. Através dos resultados do teste de compressão, a maior eficiência de absorção média foi obtida com um tempo de expansão de 450 s e, para magnitude média de energia de absorção, 450 s foi o melhor tempo.

Palavras-chave: Espumas metálicas. Comportamento mecânico. Drenagem. Morfologia dos poros. Análise de imagem.

ABSTRACT

Metallic foams, more specifically Alporas aluminium foams, is a new option of structural material which has not been widely used in mechanical structures. These materials meet a few needs, have lighter structures and do not lose their mechanical properties, which is very attractive to various industrial sectors, such as special automobile, furniture and naval industries. This work firstly aims to obtain an equipment that is able to withstand and meet all the requirements of aluminium foam production processes by the Alporas methodology. Afterwards, the equipment and process are going to be evaluated by following these steps: heating the metal matrix composite Al-Si hypereutectic to 700°C; adding 3.5 w.t % particulate calcium carbonate powder by an rotor with blades at 1000 rpm; then removing it from the bath after about 3 min; stabilizing the material in the furnace to expand the foam for different times (150, 300, 450 s); and removing the material from the furnace, followed by fresh air cooling. 9 samples (3 for each expanding time) were cross-sectioned at every 20 mm, where the first section was 20 mm from its base. The other 3 sections had different heights, totaling 36 samples. The sectioned samples were evaluated according to gradual density (apparent and relative) and porosity. Afterwards, the top of each sample was analyzed via the ImageJ software in order to obtain morphology, pore size and dispersion of the porous fraction. In the compression test, 9 samples with 30x30x40 mm were analyzed, resulting in a compression ratio of 1,5 mm.min⁻¹ (3 for each expanding time). The obtained results were the absorbed energy and energy absorption efficiency. Significance of process time, circularity, pore diameter and solidity were verified by the analysis of variance at 95% confidence level, and the Tukey test. The smallest average diameter obtained by the analysis of effects was after 300s of expanding time and the morphological analysis revealed optimal process time of 450 s. According to compression test results, the greatest efficiency of average absorption was obtained at an expanding time of 300 s, and the greatest magnitude of average absorption was obtained at 450 s.

Key-words: Metal foam. Mechanical behavior. Drainage. Morphology. Image analysis.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Esquema da dispersão de uma fase misturada em uma outra fase, no qual cada uma destas pode estar em um dos três diferentes estados da matéria.</i>	22
<i>Figura 2- Diferentes tipos de sólidos celulares: (a) células fechadas; (b) mistura de poros abertos e fechados; (c) células abertas ou poros interconectados; (c) poros com pouca interconexão.</i>	23
<i>Figura 3- Aplicações comerciais das espumas de alumínio; (a) saia lateral do chassi da Ferrari 360 e 430 Spider, (b) atenuador de impacto de trem na Holanda e (c) fachada de igreja protestante em Terassa, Espanha.</i>	24
<i>Figura 4 – Diagrama esquemático dos grupos comercialmente mais relevantes dos métodos de produção de espumas metálicas.</i>	24
<i>Figura 5 - Desenho esquemático de todo o processo de confecção de espumas do tipo Alporas: (a) fusão da liga; (b) adição de particulado e homogeneização do agente estabilizador; (c) adição e homogeneização do agente espumante (TiH₂); (d) e (e) crescimento e resfriamento.</i>	26
<i>Figura 6 – Radiografias e gráfico mostrando a influência da atmosfera na produção das espumas de alumínio.</i>	27
<i>Figura 7 - Efeito do tempo de mistura em função de unidade de área.</i>	29
<i>Figura 8 - Imagem por microscópio óptico dos aglomerados de óxidos e desenho esquemático da dispersão de óxidos pela parede do poro.</i>	30
<i>Figura 9 - Relação de expansão em função de tempo e temperatura das espumas de alumínio analisado via metalurgia do pó.</i>	31
<i>Figura 10- Influência da taxa de resfriamento na interconectividade, onde a parte colorida são poros isolados. (a) solidificado a -1,7 K.s⁻¹ com 80% de conectividade; (b) solidificado a -0,7 K.s⁻¹ com 95% de conectividade e (c) solidificada a -15 K.s⁻¹ com 14% de conectividade.</i>	32
<i>Figura 11 – Imagens do efeito do SiC em espumas de alumínio, sendo (a) a micrografia por microscópio eletrônico de varredura do material sem deformação; (b) e (c) a microscopia das espumas com deformação por compressão de 50%.</i>	34
<i>Figura 12 – Seções cortadas de espumas com diferentes agentes estabilizadores por diferentes tempos de expansão.</i>	35
<i>Figura 13 -Análise de perda de gás do TiH₂ quando é adicionado ao alumínio fundido em diferentes temperaturas, onde (a) são isotermas da perda de gás por longos tempos e (b) são curvas com tempos de até 50 segundos.</i>	36
<i>Figura 14 – Curvas geradas por análise diferencial de temperatura de TiH₂, CaCO₃, MgCO₃ e</i>	38
<i>Figura 15 – Imagens geradas por raios-x da imersão de agentes espumantes (a) TiH₂; (b) CaCO₃ sem revestimento; (c) CaCO₃ com revestimento com seus respectivos ângulos de molhabilidade.</i>	39
<i>Figura 16 – Desenho esquemático da adição de CaCO₃ em alumínio fundido contendo Mg.</i>	40
<i>Figura 17 – Curvas termogravimétricas para CaCO₃ e pó de hidreto de titânio (conforme recebido e tratados termicamente a 400°C por 24 hr + a 500°C por 1 hr). O experimento foi realizado em atmosfera de argônio a uma taxa de 20°C min⁻¹.</i>	44

Figura 18- Gráfico obtido por análise de vazamento de ligas de alumínio com diferentes concentrações de silício a diferentes temperaturas. _____	44
Figura 19 – Drenagem gerada por forças de capilaridade nas paredes das espumas. _____	45
Figura 20 - Modelo típico do efeito de drenagem em espumas de Alumínio _____	46
Figura 21- Radiografias de amostras de Al-6Si-4Cu com 1,6% em massa de TiH ₂ como agente espumante: (a) Microgravidade; (b) Gravidade da Terra _____	46
Figura 22 – Ilustração esquemática do escoamento do fluido em diferentes posições da parede da célula na expansão, (a) posição vertical e (b) posição horizontal _____	47
Figura 23 – Dinâmica da coalescência de dois poros vizinhos. _____	48
Figura 24 – Descrição esquemática do papel dos particulados aderidos sobre a redução da pressão de capilaridade no sistema do filme líquido. _____	49
Figura 25 – Ilustração esquemática do efeito da molhabilidade do particulado na estabilidade do filme. (a) partículas com boa molhabilidade, sendo o líquido em preto e partículas em cinza; (b) partículas com pouca molhabilidade, sendo líquido em preto e partículas em cinza; (c) partículas com pouca molhabilidade, sendo partículas em preto e líquido em cinza. _____	50
Figura 26- Tomografia 2D da imagem da espuma. (a) imagem original em escala de cinza; (b) imagem booleana e (c) imagem com filtro watershed _____	51
Figura 27 – Morfologia dos poros em relação a altura: (a) amostra A; (b) amostra B; e (c) amostra C foram produzidas com 1; 1,4 e 1,8 % em massa de TiH ₂ e 60 segundos de tempo de expansão antes do resfriamento. (d) Amostra D; e (e) Amostra E foram produzidas com 1,4 e 1,8 % em massa de TiH ₂ e resfriadas logo após a adição do agente espumante. _____	53
Figura 28 – Gráfico correspondendo as densidades relativas em função da altura das Amostras A;B;C;D;E na Figura 27. _____	54
Figura 29 – Representação do efeito do tempo de espumação na morfologia das espumas (a) espuma produzida com SiC; (b) espuma produzida com Ca e (c) gráfico correlacionando as amostras produzidas. _____	55
Figura 30 – Influência do torque na porosidade da espuma de alumínio. _____	56
Figura 31- Efeito da adição de agente espumante na porosidade e eficiência do processo de espumação. _____	56
Figura 32 – Número dos poros por unidade de área das espumas da liga de alumínio com diferentes agentes estabilizadores em função de diferentes tempos de expansão. _____	57
Figura 33 – Fotos demonstrando a diferença de circularidade entre processos de confecção de espuma (a) espuma produzida por TiH ₂ , (b) espuma produzida por NaCl e Al em pó e (c) espuma produzida com injeção de gás. _____	59
Figura 34 – Circularidade em função de diâmetro equivalente _____	59
Figura 35-Modo utilizado pelo ImageJ para obter as áreas côncavas e convexas _____	60
Figura 36 – Curva característica de tensão X deformação das características e dos valores em teste de compressão de materiais porosos ou materiais celulares _____	62
Figura 37 – Influência do tamanho dos poros com amostra deformada com vários percentuais de deformação. _____	63

Figura 38- Forno vertical antes da modernização	65
Figura 39- Deslocamento da posição do motor. (a) posição anterior e (b) posição após a modernização.	66
Figura 40 - Desenho esquemático do sistema de mistura.	67
Figura 41-Sistema térmico do forno vertical. (a) forno antigo e (b) forno modernizado	68
Figura 42- Painel de controle do forno e do motor de mistura. (a) foto frontal e (b) foto lateral	69
Figura 43 - Frequência do tamanho de partículas de CaCO_3	71
Figura 44- Análise de difratometria de raios X do agente espumante	72
Figura 45- Gráfico de análise termogravimétrica	72
Figura 46- Fornos utilizados durante o processo. (a) forno para fusão; (b) forno para mistura e expansão do material	73
Figura 47- Imagem formada pela sequência de 625 fotos de uma amostra A450-20	76
Figura 48- Microscópio Zeiss Imager.Z2m, utilizado para aquisição das imagens por mapeamento	76
Figura 49-Sequência de imagens representando os filtros utilizados em uma amostra A-40-300. (a) set scale; (b) maximum e minimum; (c) threshold; (d) Fill the holes e (e) analyse particles	77
Figura 50- Representação esquemática das dimensões do corpo de prova e a direção da aplicação da força no ensaio de compressão	78
Figura 51- Foto representativa da posição do operador no momento em que o sistema de mistura foi retirado durante o processo.	80
Figura 52- Desgaste gerado por sucessivos processos no mecanismo inferior do forno vertical	81
Figura 53- Foto do carbonato de cálcio retido nos poros da amostra	82
Figura 54- Corte longitudinal das espumas diferenciando-se zona repleta de bolhas de zona livre de bolhas.	83
Figura 55- Influência na superfície externa devido a coalescência e desestabilidade da estrutura porosa	83
Figura 56- Gráfico comparativo de densidade aparente por região com os respectivos desvios por altura e tempo de processo.	85
Figura 57- Gráfico comparativo de densidade relativa por região com os respectivos desvios por altura e tempo de processo	86
Figura 58- Gráfico comparativo da porosidade entre alturas similares por diferentes tempos de expansão, com os respectivos desvios por altura e tempo de processo	88
Figura 59- Comparativo de resina sem (a) e (b) com corante	88
Figura 60- Efeitos em espumas de alumínio silício hipereutético, (a) coalescência dos poros; (b) efeito de encolhimento	89
Figura 61- Imagens de amostras com 150 s de tempo de expansão por diferentes alturas. (a) A150-20; (b) A150-40; (c) A150-60; (c) A150-80	90
Figura 62- Gráfico da frequência do diâmetro médio dos poros nas amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas (20,40,60 e 80 mm). (a) Diâmetros de 0 a 5 mm; (b) diâmetros de 1,75 a 25 mm.	91
Figura 63- Gráfico da frequência do diâmetro médio dos poros nas amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas (20,40,60 e 80 mm): (a) diâmetros de 0 a 5 mm; (b) diâmetros de 1,75 a 19 mm.	92

<i>Figura 64- Gráfico da frequência do diâmetro médio dos poros nas amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas (20,40,60 e 80 mm): (a) diâmetros de 0 a 5 mm; (b) diâmetros de 1,75 a 25 mm.</i>	93
<i>Figura 65- Gráfico da frequência da circularidade média: (a) amostra com 150 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura; (b) 300 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura; (c) 450 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura</i>	95
<i>Figura 66- Gráfico de frequência da convexidade de área por diferentes alturas e por diferentes tempos de expansão.</i>	97
<i>Figura 67- Efeito da interconectividade dos poros na análise por convexidade de área</i>	98
<i>Figura 68- Poros da amostra A450-20 sob efeito de coalescência</i>	99
<i>Figura 69- Análise dos efeitos do tempo de processo e altura (a) no diâmetro médio; (b) na circularidade média; (c) na convexidade de área média</i>	100
<i>Figura 70- Conversão de imagens das espumas A150-20 em matrizes imagens de intensidade. (a), (c) e (e) são imagens adquiridas por microscopia motorizada; (b), (d) e (f) são imagens geradas pela matriz dos níveis de cinza</i>	101
<i>Figura 71- Representação dos efeitos em imagens individuais da pilha</i>	102
<i>Figura 72- Interferência de imagens vizinhas na análise de fração porosa: (a) foto macro gerada pelo microscópio; (b) imagem da fração porosa por região</i>	103
<i>Figura 73- Imagem sequencial da amostra com 150 s de tempo de expansão sob ensaio de compressão. (a) primeiro pico de tensão; (b) com deformação de 10%; (c) com deformação de 20%; (d) com deformação de 30%; (e) com deformação de 40%; (f) com deformação de 50%</i>	104
<i>Figura 74- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 150 s de tempo de expansão.</i>	105
<i>Figura 75- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 300 s de tempo de expansão.</i>	105
<i>Figura 76- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 450 s de tempo de expansão.</i>	106
<i>Figura 77-Análise do efeito do tempo nas propriedades mecânicas: (a) efeito na energia absorvida; (b) efeito na eficiência de absorção</i>	107

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 - Propriedades das espumas de alumínio, com diferentes temperaturas de fabricação (850, 875 e 900 °C respectivamente) e com CaCO₃ como agente estabilizador e agente espumante.</i>	<i>41</i>
<i>Quadro 2 - Propriedades de espumas de alumínio produzidas com diferentes ligas de alumínio e CaCO₃ como agente estabilizador e agente espumante.</i>	<i>42</i>
<i>Quadro 3 - Propriedades das espumas de alumínio com diferentes tamanhos de particulados de CaCO₃ (agente estabilizador e agente espumante).</i>	<i>43</i>
<i>Quadro 4 - Condutibilidade térmica da placa Kaowool BK por temperatura</i>	<i>67</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1- Relação do inversor de frequência com a rotação do motor.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 2- Médias dos elementos da liga de alumínio hipereutético</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 3- Análise dos compostos químicos do CaCO₃ por espectrômetro de fluorescência de raios X.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 4-Tabela de referência das amostras por diferentes tempos de expansão e diferentes alturas.</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 5- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 6- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 7- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>84</i>
<i>Tabela 8- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 9- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 10- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 11- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 12- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 13- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas.....</i>	<i>87</i>
<i>Tabela 14 – Características das espumas analisadas por ensaio de compressão</i>	<i>106</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al_2O_3 ----- Alumina

Ca ----- Cálcio puro

CaO ----- Óxido de cálcio

Al_4Ca ----- Fase intermetálica alumínio cálcio

Al_4C_3 ----- Carbetto de alumínio

Al_3Ti ----- Tri-alumineto de titânio

$ZrSiO_4$ ----- Silicato de zircônio

TiH_2 ----- Hidreto de titânio

ZrH_2 ----- Hidreto de zircônio

fps ----- *Frames por segundo*

$NaCl$ ----- Cloreto de sódio

SiO_2 ----- Dióxido de silício

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	GERAL	21
2.2	ESPECÍFICOS	21
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1	ESPUMAS METÁLICAS	22
3.1.1	Rota líquida	25
3.1.1.1	Alporas	25
3.1.1.1.1	<i>Primeira etapa: Aquecimento</i>	<i>28</i>
3.1.1.1.2	<i>Segunda etapa: Aumento da viscosidade do banho metálico</i>	<i>28</i>
3.1.1.1.3	<i>Terceira etapa: Adição do agente espumante</i>	<i>28</i>
3.1.1.1.4	<i>Quarta etapa: Expansão da espuma</i>	<i>30</i>
3.1.1.1.5	<i>Quinta etapa: Resfriamento do material produzido</i>	<i>31</i>
3.2	MUDANÇAS NO PROCESSO	32
3.2.1	Agente estabilizador	33
3.2.2	Agente espumante	36
3.3	INFLUÊNCIAS DA VISCOSIDADE EM LIGAS DE ALUMÍNIO SILÍCIO	44
3.4	EFEITOS DURANTE A EVOLUÇÃO DA ESPUMA	45
3.4.1	Efeito de Drenagem	45
3.4.2	Redução do efeito de drenagem	47
3.4.3	Coalescência	48
3.5	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL POROSO	50
3.5.1	Caracterização por imagem	50
3.5.2	Densidade aparente	52
3.5.2.1	Densidade relativa	52

3.5.2.2	Densidade gradual.....	52
3.5.3	Porosidade	55
3.5.4	Circularidade.....	58
3.5.5	Convexidade de área.....	60
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	61
3.7	Propriedades mecânicas	61
3.7.1	Padrão da curva tensão deformação para espumas	61
3.7.1.1	Dimensões do corpo de prova e taxa de compressão.....	62
3.7.1.2	Influência durante o ensaio de compressão.....	62
3.7.1.3	Energia de absorção e eficiência da absorção	63
4	MATERIAIS E MÉTODO	65
4.1	MATERIAIS PARA MODERNIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PRODUÇÃO DE ESPUMAS	65
4.1.1	Parte mecânica	66
4.1.2	Isolamento térmico.....	67
4.1.3	Sistema elétrico.....	68
4.2	MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DE ESPUMAS	69
4.3	METODOLOGIA DE MODERNIZAÇÃO	73
4.4	METODOLOGIA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	73
4.5	METODOLOGIA PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS.....	74
4.5.1	Análises físicas do material	74
4.5.2	Análise por processamento digital de imagens.....	75
4.5.2.1	Análise morfológica e diâmetro de poros	75
4.5.2.2	Análise da dispersão dos poros	78
4.5.3	Análise mecânica das espumas.....	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1	MODERNIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO	80

5.1.1	Sistema de mistura	80
5.1.1.1	Desgastes do equipamento	81
5.1.2	Isolante térmico	81
5.2	ANÁLISE INICIAL DO PROCESSO.....	82
5.3	ANÁLISE DE DENSIDADE APARENTE	84
5.4	ANÁLISE DE DENSIDADE RELATIVA E POROSIDADE	85
5.5	ANÁLISE POR IMAGEM	88
5.5.1	Análise morfológica dos poros	91
5.5.2	Matriz fração porosa	101
5.6	ANÁLISE MECÂNICA	103
6	CONCLUSÕES.....	109
7	SUGESTÕES FUTURAS	111
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	112
	APÊNDICE A – Peças do mecanismo.....	121
	APÊNDICE B – Montagem	132
	APÊNDICE C- Análise de imagens digitais.....	136
	ANEXO A – Laudo químico	148
	ANEXO B – Comportamento mecânico.....	149

1 INTRODUÇÃO

Espumas de alumínio são estruturas metálicas com alto índice de vazios, combinando propriedades típicas dos materiais metálicos celulares com as dos metais convencionais. Conforme Banhart (2013a) e García-Moreno (2016) esse tipo de estrutura de material foi obtida inicialmente em 1943, mas o interesse industrial pelo mesmo só foi despertado na década de 1970 com a crise do petróleo e o aumento da procura por materiais mais leves com boas propriedades mecânicas. Como essas espumas oferecem um aumento significativo na performance de elementos estruturais, como menor peso, boa absorção de energia mecânica e magnética, boa absorção acústica, isolamento térmico, sendo recicláveis e não tóxicas, as mesmas já vem sendo aplicadas de maneira consolidada nas linhas de produção de veículos de alto valor agregado, como o Audi Q7 e a Ferrari 360 Spider e 430.

Existem atualmente várias rotas de obtenção de espumas metálicas com grande influência no produto final. Dentre essas vias de produção, o método com o nome comercial Alporas, desenvolvido pela empresa japonesa Shinko Wire®, se apresenta como um processo interessante por ser um processo com produção em larga escala que se dá com uma distribuição mais homogênea dos poros, menor quantidade de vazios interligados e patente expirada. Esta metodologia utiliza rota líquida com adição de cálcio puro como agente estabilizador e de hidreto de titânio como agente espumante. Como o produto final deste processo tem boa homogeneidade dos poros e pouca interligação, isto lhe confere boa propriedade de isolamento térmico e de absorção de energia mecânica, conforme demonstradas por Kheradmand et al. (2013), aumentando assim a possível empregabilidade deste material em vários nichos de mercado.

No entanto, a utilização dos agentes estabilizadores, como Ca e SiC, é importante para a morfologia, redução de efeito de drenagem e coalescência dos poros, e o agente espumante convencional do processo Alporas (TiH_2), encarecem o material produzido, visto que a matéria prima tem custo considerável e acrescenta mais etapas ao processo de fabricação. Tais fatores dificultam a consolidação e disseminação das espumas em vários setores da indústria. Todavia, com o conhecimento de fenômenos associados ao processo, foi possível obter espumas com custo inferior, não só pelos materiais utilizados no processo, como também pela redução do tempo de produção. De acordo com Nakamura et al. (2002), o carbonato de cálcio é uma ótima opção como substituto do TiH_2 , por não haver a necessidade da adição de um

agente estabilizador, pois o mesmo provoca a oxidação necessária para aumentar a viscosidade do metal líquido e a tensão superficial das paredes dos poros, não havendo assim a necessidade de uma das etapas do processo, consequentemente o custo do material final é mais baixo. Contudo, para que seja um agente espumante substituto do processo convencional, este necessita gerar material poroso com homogeneidade e boas características morfológicas e mecânicas, mesmo que este seja submetido as influências do ambiente e do equipamento durante o processo de fabricação.

Atualmente o Brasil é o nono maior produtor de veículos no mundo (OICA, 2016). Como a liga de alumínio silício hipereutética tem sido amplamente utilizada e devido ao fato de que no Brasil não há grupos que dominem a técnica de produção Alporas, é um tema que começa a despertar grande interesse no meio acadêmico, assim torna-se interessante avaliar e desenvolver um equipamento para produzir este material poroso, com a utilização de carbonato de cálcio como agente espumante e liga de alumínio mencionada anteriormente, de modo a agregar conhecimento de produção sobre matéria prima em abundância e de menor custo. No entanto, a morfologia das espumas produzidas deve ser analisada, pois é necessário entender as influências dos efeitos do tempo de expansão no efeito drenagem e coalescência das bolhas, para assim identificar como esses parâmetros vão modificar a morfologia dos poros das espumas de modo a correlacionar tais parâmetros morfológicos com suas propriedades mecânicas por ensaio de compressão.

6 CONCLUSÕES

Em virtude dos resultados obtidos e das discussões elaboradas, as seguintes conclusões podem ser tiradas:

1. O equipamento mordenizado resistiu as solicitações do processo e cumpriu todos os objetivos para os quais foi projetado.
2. O processo utilizando CaCO_3 e liga de alumínio-silício hipereutética apresentou-se viável para aplicação.
3. O efeito de drenagem apareceu em todas as amostras. Para as ligas de alumínio-silício hipereutéticas, a zona livre de bolhas foi mais perceptível nas alturas de 20 mm. Portanto, para esta liga com baixa viscosidade, a utilização de agentes estabilizadores pode ser uma tratativa viável para reduzir tal efeito.
4. O efeito de drenagem, teve forte influência nas densidades aparente e relativa, e porosidade. Em todos os tempos, as amostras com até 20 mm da base tiveram porosidade de 23% em média, deste modo não sendo consideradas como espuma. Contudo, todas as demais regiões obtiveram porosidade acima de 70%, podendo assim serem considerizadas como espuma.
5. O diâmetro dos poros tiveram variação significativa em relação à altura, já que os efeitos de coalescência e recalescência podem estar relacionados à esta variação. Na circularidade, a altura e o tempo não foram significativos no processo. Porém o tempo interfere neste parâmetro. A convexidade de área, o tempo e a altura não foram significantes. Contudo, pela análise de variância, a altura teve interferência neste parâmetro. Isto pode ter relação com o efeito de encolhimento, normalmente provocado por efeito de drenagem e baixa taxa de resfriamento.
6. Com as imagens dos mapas de fração porosa, foi possível observar, que mesmo em amostras com a mesma altura e tempo de processo, a fração porosa não foi uniforme pela secção. Além disto, é possível notar como a fração porosa aumentou em regiões superiores da amostra.

7. Quanto aos resultados de energia absorvida, a menor média foi de 150 s e a média de 300 s foi um pouco maior a de 450 s. Porém, com 300 s, houve maior desvio padrão em relação a de 450 s. Para eficiência de absorção, a maior média foi obtida nas amostras com 450 s, seguido das amostras com 300 e 150 s.
8. Por análise dos efeitos, em relação à análise do diâmetro dos poros, circularidade e convexidade de área, as amostras com tempos de 300 e 450 s obtiveram valores muito próximos, porém as amostras com 300 s teve menores diâmetros e com 450 s obtiveram maiores circularidades, demonstrando assim como a circularidade teve influência nas propriedades mecânicas, visto que as amostras com 450 s tiveram as melhores eficiências de absorção. As amostras com 150 s tiveram as maiores médias de diâmetro e as menores circularidades, conferindo a elas menor média de energia absorvida e eficiência de absorção. A convexidade de área praticamente não teve diferença em relação ao tempo de processo, mas teve influência em relação à altura, demonstrando desta forma como o efeito de drenagem, seguido de efeito de encolhimento, influenciou este parâmetro morfológico. Portanto, para a fabricação de espumas de alumínio-silício hipereutético com CaCO_3 como agente espumante e usando a metodologia Alporas, para os parâmetros de processo utilizados, os melhores tempos de processo foram os de 450 s e, os piores valores obtidos foram para as amostras com 150 s.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABORAIA, M.; SHARKAWI, R.; DOHEIM, M. A. Production of aluminium foam and the effect of calcium carbonate as a foaming agent. **Journal of Engineering Sciences**, 2011.

Agency of Industrial Science and Technology (Tokyo); Shinko Kosen Kogyo Kabushiki Kaisha (Amagasaki). Shigeru Akiyama et al.. **FOAMED METAL AND METHOD OF PRODUCING SAME**. US 4713277. 18 jul. 1986 ,15 dez. 1987. United States Patent.

Alcan International Limited(Canada). Iljoon Jin (KINGSTON); Lorne D. Kenny (KINGSTON); Harry Sang (KINGSTON). **Method of producing lightweight foamed metal**. US 4973358. 6 set. 1989, 27 nov. 1990

Alcoa Inc. (Pittsburgh). Daniel Bryant et al.. **Method for producing foamed aluminum products by use of selected carbonate decomposition products**. US 7452402 B2, 29 abri. 2005, 18 nov. 2008.

ASHBY, M. F.; EVANS, A.; FLECK, N. A.; Metal foams: a design guide. **Materials & Design**, v. 23, n. 1, p. 119, 2002.

BABCSÁN, N. **Ceramic Particles Stabilized Aluminum Foams**, 2003. University of Miskolc. Ph. D. Dissertation – Ph.D. School Kerpeley Antal, Miskolc, 2003.

BANHART, J. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. **Progress in Materials Science**, 2001..

BANHART, J. Metal Foams: production and stability. **Advanced Engineering Materials**, v. 8, n. 9, p. 781–794, 2006.

BANHART, J. Light-metal foams-history of innovation and technological challenges. **Advanced Engineering Materials**, v. 15, n. 3, p. 82–111, 2013.

BANHART, J.; BLEUET, P.; GOLOSIO, B.;. **Advanced Tomographic Methods in Materials Research and Engineering**. New York: Oxford University Press Incs, 2008.

BAUER, B.; KRALJ, S.; BUŠIĆ, M. Production and application of metal foams in casting technology. **Tehnicki Vjesnik/ Technical Gazette**, 2013.

Bay Zoltan Alkalmazott Kutatási (Budapest). Nobert Babcsani et al.. **Method of producing a metal foam by oscillations and thus obtained metal foam product**. US 20110262766 A1. 4 dez. 2009, 27 out. 2011.

BEKOZ, N.; OKTAY, E. Effects of carbamide shape and content on processing and properties of steel foams. **Journal of Materials Processing Technology**, 2012.

BYAKOVA, A.; KARTUZOV, I.; GNYLOSKURENKO, S.; NAKAMURA, T. The Role of Foaming Agent and Processing Route in Mechanical Performance of Fabricated Aluminum Foams. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2014.

BYAKOVA, A.; SIRKO, A.; MYKHALENKOV, K.. Improvements in Stabilisation and Cellular Structure of Al based Foams with Novel Carbonate Foaming Agent. **High Temperature Materials and Processes**, 2007.

BYAKOVA, A. V.; GNYLOSKURENKO, S. V.; SIRKO, A. I.; MILMAN, Y. V.; NAKAMURA, T. The Role of Foaming Agent in Structure and Mechanical Performance of Al Based Foams. **Materials Transactions**, 2006.

CAMBRONERO, L. E. G.; RUIZ-ROMAN, J. M.; CORPAS, F. A.; RUIZ PRIETO, J. M. Manufacturing of Al-Mg-Si alloy foam using calcium carbonate as foaming agent. **Journal of Materials Processing Technology**, 2009.

CEASA CAMPINAS, **Dica da semana**, Disponível em : <http://www.ceasacampinas.com.br/novo/DicasVer.asp?id=1416>>. Acesso: 07/04/2017.

CRUZ, T. G.. **Monitoramento por microscopia óptica e processamento digital de imagens do processo de conformação cerâmica por conformação com amidos comerciais**. 2007. 132 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

CRUZ, T. G.; HEIN, L. R. O.; SIQUEIRA, R. H. M.; CARVALHO, K. C. C. Digital Light Microscopy of Macroporous Ceramics Processed by consolidation casting with mixtures of native starches. **Macroporous ceramics**, 2008.

DUNKHAN, N. **Metal Foams: fundamentals and applications**. Pennsylvania: DEStech, 2013.

EDWIN RAJ, R.; DANIEL, B. S. S. Customization of closed-cell aluminum foam properties using design of experiments. **Materials Science and Engineering A**, 2011.

EDWIN RAJ, R.; PARAMESWARAN, V.; DANIEL, B. S. S. Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam. **Materials Science and Engineering A**, 2009.

ELAHI, S. H.; ABDI, H.; SHAHVERDI, H. R. Investigating viscosity variations of molten aluminum by calcium addition and stirring. **Materials Letters**, 2013.

GARCÍA-MORENO, F. Commercial Applications of Metal Foams: Their Properties and Production. **Materials**, 2016.

GARCIA-MORENO, F.; MUKHERJEE, M.; JIMÉNEZ, C.; RACK, A.; BANHART, J. Metal Foaming Investigated by X-ray Radioscopy. **Metals**, 2011.

GARCIA-MORENO, F.; SOLÓRZANO, E.; BANHART, J. Kinetics of coalescence in liquid aluminium foams. **Soft Matter**, 2011.

GERGELY, V.; CLYNE, T. W. Drainage in standing liquid metal foams: modelling and experimental observations. **Acta Materialia**, 2004.

GERGELY, V.; CURRAN, D. C.; CLYNE, T. W. The FOAMCARP process: Foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. **Composites Science and Technology**, 2003.

GNYLOSKURENKO, S.; NAKAMURA, T.; BYAKOVA, A.; Development of lightweight Al alloy and technique. **Canadian Metallurgical Quarterly**, 2005.

GOLESTANIPOUR, M.; MASHHADI, H. A.; ABRAVI, M. S.; MALEKJAFARIAN, M. M.; SADEGHIAN, M. H. Manufacturing of Al/SiC p composite foams using calcium carbonate as foaming agent. **Materials Science and Technology**, 2011.

GROEN, J. C.; PEFFER, L. A.; PÉREZ-RAMÍREZ, J. Pore size determination in modified micro- and mesoporous materials. Pitfalls and limitations in gas adsorption data analysis. **Microporous and Mesoporous Materials**, 2003.

GROVE, C.; JERRAM, D. A. jPOR: An ImageJ macro to quantify total optical porosity from blue-stained thin sections. **Computers & Geosciences**, 2011.

GUDEN, M.; YÜKSEL, S. SiC-particulate aluminum composite foams produced from powder compacts: Foaming and compression behavior. **Journal of Materials Science**, 2006.

HE, S.-Y.; ZHANG, Y.; DAI, G.; JIANG, J.-Q. Preparation of density-graded aluminum foam. **Materials Science and Engineering A**, 2014.

HEIM, K.; VINOD-KUMAR, G. S.; GARCÍA-MORENO, F.; RACK, A.; BANHART, J. Stabilisation of aluminium foams and films by the joint action of dispersed particles and oxide films. **Acta Materialia**, 2015.

IP, S. W.; WANG, Y.; TOGURI, J. M. Aluminum foam stabilization by solid particles. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v. 38, n. 1, p. 81–92, 1999.

International Organization for Standardization; **ISO13314**, Mechanical testing of metals, ductility testing, compression test for porous and cellular metals, Suiça, 2011.

RACK A., GARCIA-MORENO F., BAUMBACH T., BANHART J. Synchrotron-based radiography employing spatio-temporal micro-resolution for studying fast phenomena in liquid metal foams. **Synchrotron Radiation**, 2009.

KADOI, K.; NAKAE, H. Relationship between Foam Stabilization and Physical Properties of Particles on Aluminum Foam Production. **Materials Transactions**, 2011.

KEVORKIJAN, V. Low cost aluminium foams made by CaCO_3 particulates. **Association of Metallurgical Engineers of Serbia AMES**, 2010.

KHERADMAND, B.; OTROJ, S.; SOLEIMANPOUR, Z.; BEIGYFAR, M. Comparison between methods used for manufacturing of aluminum foam. **Life Science Journal**, 2013.

KOERNER, C. **Integral Foam Molding of Light Metals**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

KOZA, E.; LEONOWICZ, M.; WOJCIECHOWSKI, S.; SIMANCIK, F. Compressive strength of aluminium foams. **Materials Letters**, 2004.

KUMAR, S.; PANDEY, O. P. Role of fine size zircon sand ceramic particle on controlling the cell morphology of aluminum composite foams. **Journal of Manufacturing Processes**, 2015.

LÁZARO, J.; SOLÓRZANO, E.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, M. A.. Heat Treatment of Aluminium Foam Precursors: Effects on Foam Expansion and Final Cellular Structure. **Procedia Materials Science**, 2014.

LÁZARO, J.; SOLÓRZANO, E.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, M. A. Clues for Cellular Structure Optimization in Aluminum Foams. **Advanced Engineering Materials**, 2016.

LÁZARO, J.; SOLÓRZANO, E.; DE SAJA, J. A.; RODRÍGUEZ-PÉREZ, M. A. Early anisotropic expansion of aluminium foam precursors. **Journal of Materials Science**, 2013.

LU, G. Q.; HAO, H.; WANG, F. Y.; ZHANG, X. G. Preparation of closed-cell Mg foams using SiO₂-coated CaCO₃ as blowing agent in atmosphere. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, 2013.

MALEKJAFARIAN, M.; SADRNEZHAAD, S. K. Closed-cell Al alloy composite foams: Production and characterization. **Materials & Design**, 2012.

MARINZULI, G.; FILIPPIS, L. A. C. DE; SURACE, R.; LUDOVICO, A. D. Effect of Processing Parameters on Morphology and Plateau Stress of AlSi and AlSiMg Foams. **Procedia Materials Science**, 2014.

MILMAN, Y. V.; BYAKOVA, A. V.; SIRKO, A. I.; GNYLOSKURENKO, S.; NAKAMURA, T. Improvement of Structure and Deformation Behaviour of High Strength Al-Zn-Mg Foam. **Materials Science Forum**, 2006.

MONDAL, D. P.; JHA, N.; GULL, B.; DAS, S.; BADKUL, A. Microarchitecture and compressive deformation behaviour of Al-alloy (LM13)–cenosphere hybrid Al-foam prepared using CaCO₃ as foaming agent. **Materials Science and Engineering A**, 2013.

MONDAL; JHA, N.; BADKUL, A.; et al. Effect of age hardening on compressive deformation behavior of Al-alloy (LM13)–cenosphere hybrid foam prepared using CaCO₃ as a foaming agent. **Journal of Materials Research**, 2013.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5 ed. LTC, 2002.

MU, Y.; YAO, G.; LUO, H. Effect of cell shape anisotropy on the compressive behavior of closed-cell aluminum foams. **Materials and Design**, 2010.

MUKHERJEE, M.; GARCIA-MORENO, F.; BANHART, J. Defect generation during solidification of aluminium foams. **Scripta Materialia**, 2010a.

MUKHERJEE, M.; GARCIA-MORENO, F.; BANHART, J. Solidification of metal foams. **Acta Materialia**, 2010b.

MYAGOTIN, A.; HELFEN, L.; BAUMBACH, T. Quantitative coalescence measurements for foaming metals by in situ radiography. **Scripta Materialia**, 2012.

NAKAMURA, T.; GNYLOSKURENKO, S. V.; SAKAMOTO, K.; BYAKOVA, A. V.; ISHIKAWA, R. Development of New Foaming Agent for Metal Foam. **Materials Transactions**, 2002.

NAYEBI, B.; BAHMANI, A.; ASL, M. S.. Characteristics of dynamically formed oxide films in aluminum–calcium foamable alloys. **Journal of Alloys and Compounds**, 2016.

OICA. **Production Statistics**. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/>>. Acesso em: 30/07/2016.

OLSON, E. Particle Shape Factors and Their Use in Image Analysis-Part 1: theory. **Journal of GXP Compliance**, 2011.

OROVIČÍK, L.; NOSKO, M.; ŠVEC, P.. Effect of the TiH₂ pre-treatment on the energy absorption ability of 6061 aluminium alloy foam. **Materials Letters**, 2015.

PRAVEEN KUMAR, T. N.; SURESH, N.; VENKATESWARAN, S.; SEETHARAMU, S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Compressive Strength of Eutectic Al-Si Alloy Closed Cell Foam. **American Journal of Materials Science** , 2015.

PRAVEEN KUMAR, T. N.; VENKATESWARAN, S.; SEETHARAMU, S. Effect of Grain Size of Calcium Carbonate Foaming Agent on Physical Properties of Eutectic Al-Si Alloy Closed Cell Foam. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, 2015.

RAJ, R. E.; DANIEL, B. S. S. Prediction of compressive properties of closed-cell aluminum foam using artificial neural network. **Computational Materials Science**, 2008.

RAJ, R. E.; DANIEL, B. S. S. Structural and compressive property correlation of closed-cell aluminum foam. **Journal of Alloys and Compounds**, 2009.

RANIERI, K. **Processamento Semissólido de Liga Hipoeutética Al - Si Reforçada com Al₂O₃**. 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RASOOLI, A.; DIVANDARI, M.; SHAHVERDI, H. R.; BOUTORABI, M. A. Kinetics and mechanism of titanium hydride powder and aluminum melt reaction. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, 2012.

RAVI KUMAR, N. V.; RAMACHANDRA RAO, N.; SUDHAKAR, B.; GOKHALE, A. A. Foaming experiments on LM25 alloy reinforced with SiC particulates. **Materials Science and Engineering A**, 2010.

SALVO, L.; MARTIN, G.; SUARD, M.; et al. Processing and structures of solids foams. **Comptes Rendus Physique**, 2014.

SARAJAN, Z.; SEDIGH, M. Influences of Titanium Hydride (TiH₂) Content and Holding Temperature in Foamed Pure Aluminum. **Materials and Manufacturing Processes**, 2009.

SARAJAN, Z.; SOLTANI, M.; KAHANI KHABUSHAN, J. Foaming of Al-Si by TiH₂. **Materials and Manufacturing Processes**, 2011.

SOLOKI, A.; ESMAILIAN, M. Carbonate-Foaming Agents in Aluminum Foams: Advantages and Perspectives. **Metallurgical and Materials Transactions B**, 2015.

SONG, Z.; NUTT, S. Expansion mechanisms in foaming aluminum melts. **Metallurgical and Materials Transactions A : Physical Metallurgy and Materials Science**, 2008.

SURACE, R.; FILIPPIS, L. A. C. Investigation and Comparison of Aluminium Foams Manufactured by Different Techniques. **Advanced Knowledge Application in Practice**, 2010.

TAHERISHARGH, M.; BELOVA, I. V.; MURCH, G. E.; FIEDLER, T. Low-density expanded perlite-aluminium syntactic foam. **Materials Science and Engineering A**, 2014.

THERMAL CERAMICS. **Especificações técnicas Placa Kaowool BK**. Disponível em: <<http://www.refipar.net/upload/arquivos/82e26315d2f14a6a9b6e640f88c723f9.pdf>>. Acesso em: 25/07/2014.

TSURU, T.; HINO, T.; YOSHIOKA, T.; ASAEDA, M. Permporometry characterization of microporous ceramic membranes. **Journal of Membrane Science**, 2001.

VERRAN, G. O.; PALOSCHI, J. J.; ARAUJO, E. N. Um método alternativo para avaliação da fluidez em ligas Al-Si e Al-Mg. CONGRESSO EM CIÊNCIAS DE MATERIAIS DO MERCOSUL, 2002, Joinvile, **Anais do SULMAT 2002**.

VINOD KUMAR, G. S.; CHAKRABORTY, M.; GARCIA-MORENO, F.; BANHART, J. Foamability of MgAl₂O₄ (Spinel)-Reinforced Aluminum Alloy Composites. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 2011.

XIA, X.; FENG, J.; DING, J.; et al. Fabrication and characterization of closed-cell magnesium-based composite foams. **Materials & Design**, 2015.

YANG, C. .; NAKAE, H. Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam. **Journal of Alloys and Compounds**, 2000.

YANG, C. C.; NAKAE, H. The effects of viscosity and cooling conditions on the foamability of aluminum alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, 2003.

YANG, D.; CHEN, J.; WANG, H.; et al. Effect of Decomposition Kinetics of Titanium Hydride on the Al Alloy Melt Foaming Process. **Journal of Materials Science & Technology**, 2015.

YANG, D. H.; HUR, B. Y.; HE, D. P.; YANG, S. R. Effect of decomposition properties of titanium hydride on the foaming process and pore structures of Al alloy melt foam. **Materials Science and Engineering A**, 2007.

ZHOU, X.; LIU, X.; LI, J.; LIU, H. Novel foaming agent used in preparation process of aluminum foams. **Journal of University of Science and Technology Beijing: mineral metallurgy materials (Eng Ed)**, 2008.