

**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

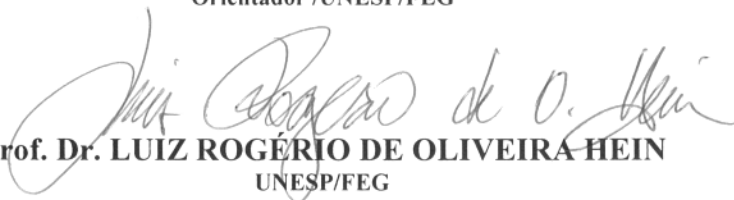


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

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 CaCO_3 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 CaCO_3 como agente estabilizador e agente espumante.</i>	<i>42</i>
<i>Quadro 3 - Propriedades das espumas de alumínio com diferentes tamanhos de particulados de CaCO_3 (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.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Avaliar a produção de espumas de alumínio-silício hipereutético através da metodologia Alporas com a utilização de agente espumante (CaCO_3) e sem a adição de agente estabilizador, com o intuito de buscar um maior domínio e melhores parâmetros para o processamento deste material

2.2 ESPECÍFICOS

Mordenizar o equipamento utilizado na tese de doutorado de Ranieri (2009) de modo a suportar altas temperaturas e o desgaste do processo com rigidez e dinamismo.

Analisar a aplicação do CaCO_3 em liga de alumínio silício hipereutético através da metodologia Alporas.

Analisar e observar as variações na densidade aparente e relativa, e porosidade do material produzido em diferentes tempos e alturas;

Avaliar a influência da drenagem, tempo de processo e altura na circularidade, diâmetro dos poros e convexidade de área;

Utilizar a dispersão da fração porosa por análise de imagens para comparar a uniformidade das amostras;

Analisar o efeito do tempo de processo na magnitude dos resultados de energia absorvida e eficiência de absorção através de ensaios de compressão;

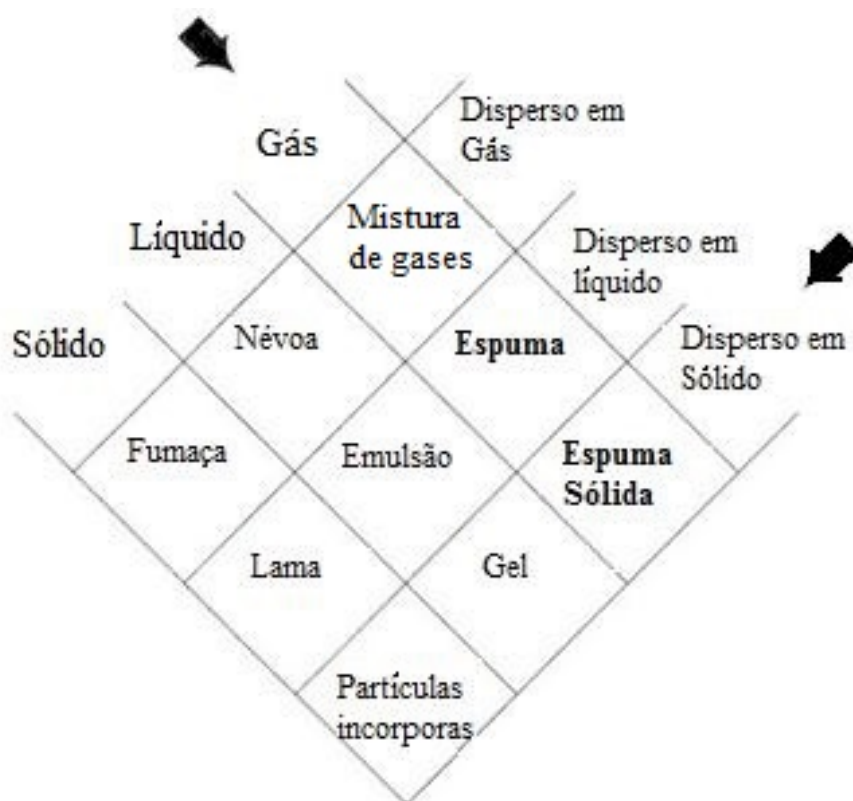
Avaliar, com o auxílio de ferramentas estatísticas, as melhores condições de processo utilizando-se os parâmetros analisados;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ESPUMAS METÁLICAS

Conforme Banhart (2001), o termo espumas nem sempre é devidamente utilizado, todavia esses materiais necessitam ser bem definidos. Portanto, como pode ser observado na Figura 1, as espumas são dispersões de uma fase gasosa em um líquido ou em um sólido, já que essa morfologia de espuma é preservada durante o processo de solidificação, formando-se “espuma sólida” ou “sólidos celulares”.

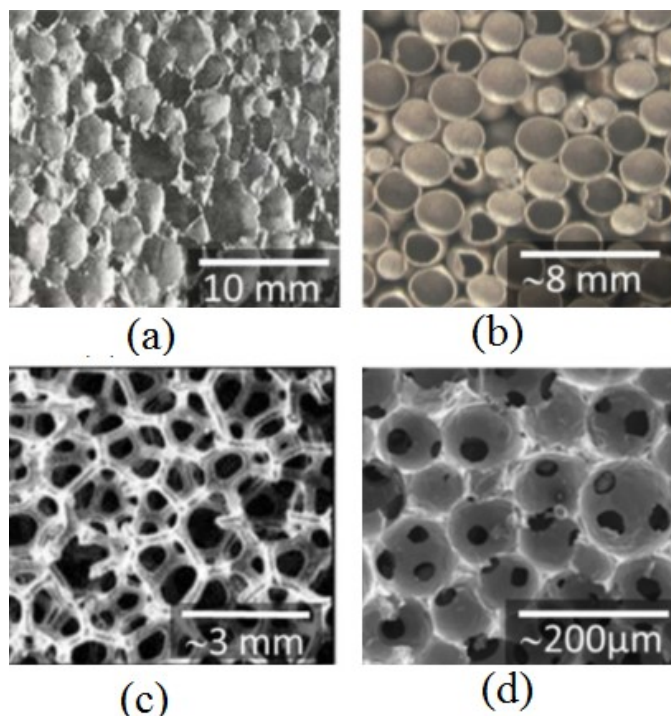
Figura 1 – Esquema da dispersão de uma fase misturada em uma outra fase, no qual cada uma destas pode estar em um dos três diferentes estados da matéria.



Fonte: Editado de Banhart (2001)

De acordo com Salvo Martin e Suard (2014), os sólidos celulares podem ser divididos em dois grupos: células abertas e células fechadas, como pode ser observado na Figura 2, onde (a) é a baixa conectividade entre os poros ou poros fechados; (b) mistura de poros interconectados e não conectados; (c) alta conexão ou poros abertos; e (d) poros parcialmente conectados. Há também a possibilidade da mistura de poros com poros abertos e fechados onde há somente algumas conexões entre os poros.

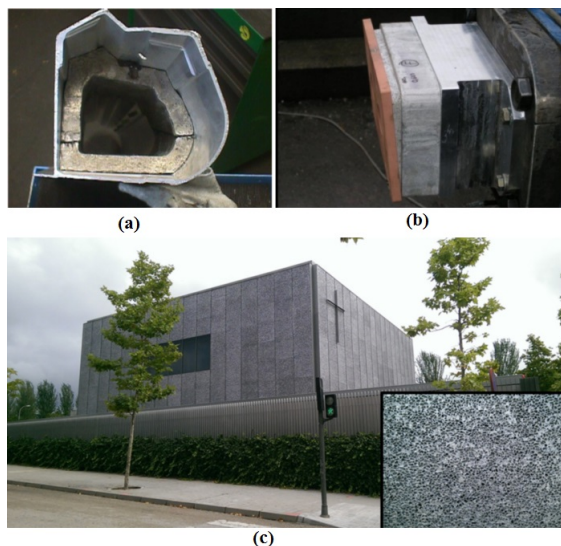
Figura 2- Diferentes tipos de sólidos celulares: (a) células fechadas; (b) mistura de poros abertos e fechados; (c) células abertas ou poros interconectados; (d) poros com pouca interconexão.



Fonte: Editado de Salvo Martin e Suard (2014)

De acordo com Bauer, Kralj e Bušić (2013), devido à sua alta porosidade, as espumas têm ótimas características de absorção acústica, térmica, vibração mecânica e resistência ao impacto, além de apresentarem-se em diferentes formatos e quantidades de vazios, cujas diferenças também influenciam na sua empregabilidade. Quanto maior a quantidade de vazios, mais regular é sua distribuição, o tamanho dos poros diminui, melhor é a qualidade do material produzido e maior é sua porosidade. Deste modo, para ser considerado espuma, o material deve ter porosidade acima ou igual a 70%. Porém, Yang; Nakae (2000) reporta que as espumas podem exibir porosidade próximas a 90%, consequentemente, devido à grande redução de peso, este material tem sido muito atrativo para alguns setores da indústria. Tal fato pode ser observado na Figura 3, no qual (a) é a aplicação estrutural (resistência mecânica e redução de peso); (b) o atenuador de impacto (absorção de energia mecânica quando submetido a compressão); e (c) sua aplicação em fachadas (resistência a intempéries, absorção acústica).

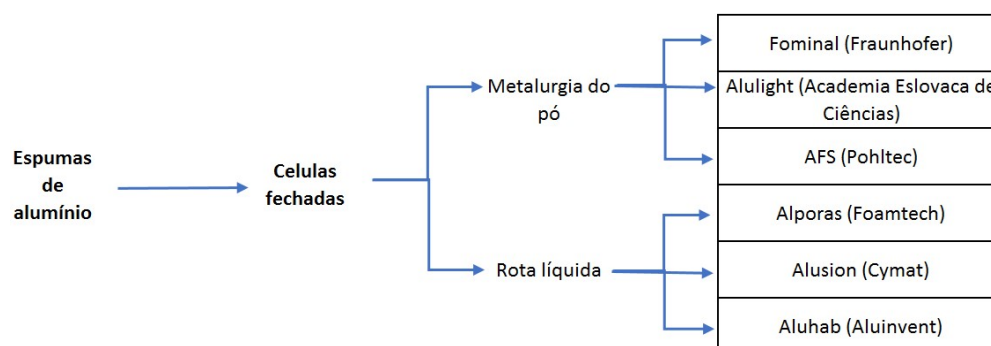
Figura 3- Aplicações comerciais das espumas de alumínio; (a) saia lateral do chassi da Ferrari 360 e 430 Spider, (b) atenuador de impacto de trem na Holanda e (c) fachada de igreja protestante em Terassa, Espanha.



Fonte: Adaptado de García-Moreno (2016)

Existem atualmente inúmeras vias para confeccionar espumas metálicas. No entanto, de acordo com García-Moreno (2016), as espumas com poros fechados são conhecidas por ser comercialmente mais viáveis em virtude de suas características. Espumas com baixa conexão entre poros podem ser divididas em duas principais famílias: fabricadas por metalurgia do pó e rota líquida. Estas famílias podem ser observadas na Figura 4, onde os processos comerciais de maior relevância são indicados para cada família.

Figura 4 – Diagrama esquemático dos grupos comercialmente mais relevantes dos métodos de produção de espumas metálicas.



Fonte: Editado de García-Moreno (2016)

Conforme Raj e Daniel (2008), a rota líquida tem um grande potencial comercial, pois tem alta produtividade. Assim, de acordo com Kumar et al. (2015), seus custos de produção são menores em comparação a metalurgia do pó, cujas peças têm tamanho reduzido.

3.1.1 Rota líquida

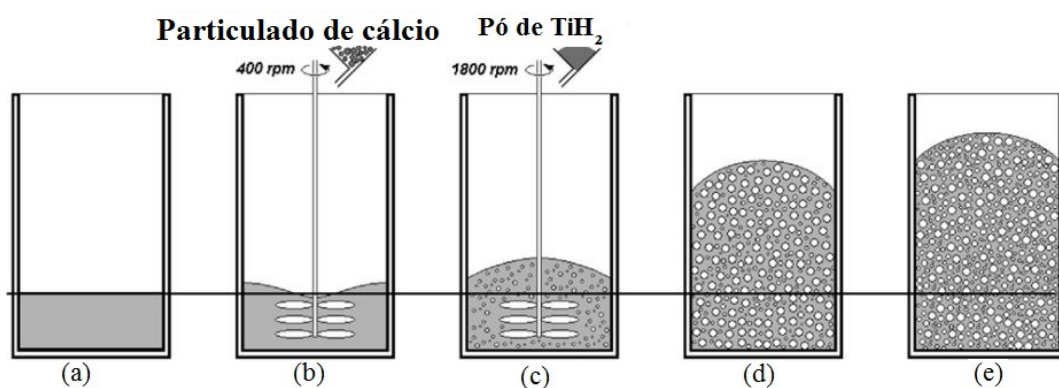
Na confecção de espumas de alumínio via rota líquida para poros fechados, três metodologias de processo se distinguem, como pode ser observado na Figura 4, por serem comercialmente favoráveis. O processo Alporas que, conforme a patente atualmente expirada de Agency of Industrial Science and Technology e Shinko Kosen Kogyo Kabushiki Kaisha (1987). Nesse processo, o agente espumante (TiH_2) que gera gás por dissociação é adicionado ao alumínio líquido que é homogeneizado com o auxílio de um misturador mecânico. Esse processo gera blocos de espuma com ótima homogeneidade de poros. O processo é o Alusion que, de acordo com a patente de Alcan International Limited (1990), tem alta produtividade, entretanto sua produção só possibilita a confecção de placas, reduzindo assim sua empregabilidade. Neste processo, são produzidas espumas com um misturador mecânico que libera gás pelas extremidades das hélices. As bolhas geradas levitam no banho por terem menor densidade e formam a espuma na parte superior do líquido de forma contínua. O processo Aluhab, patenteado por Bay Zoltan Alkalmazott Kutatasi (2011), tem boa produção e ótima homogeneidade dos poros, onde tubos no fundo de um cadinho com alumínio líquido liberam gás com o auxílio de ondas mecânicas. Estas bolhas levitam para a parte superior do líquido por diferença de densidade. Devido ao auxílio das ondas mecânicas, é possível controlar o tamanho dos poros da espuma produzida. Espumas geradas via metodologia Alporas são produzidas com TiH_2 como agente espumante. O hidreto de titânio dificulta a produção das espumas por ser um insumo de custo considerável. No entanto, conforme García-Moreno (2016), o processo Alporas está com a patente expirada (não havendo custos adicionais). De acordo com Salvo Martin e Suard (2014), esse processo tem alta produtividade e geram um produto de boa qualidade e, conforme Dunkhan (2013), o preço do processo de fabricação das espumas vem caindo continuamente, principalmente pela utilização de novos materiais. Com isso, essa via de fabricação tornou-se uma alternativa interessante de produção e popularização desse material.

3.1.1.1 Alporas

Existem vários processos comerciais de fabricação de espumas metálicas via metal fundido. O processo de fabricação Alporas se distingue dos processos via líquido, pois é adicionado agente espumante em pó ao metal fundido através desta metodologia de processo, sendo que este é misturado com auxílio de um misturador mecânico. O processo convencional se divide em cinco etapas: (i) aquecimento do alumínio puro até sua fusão; (ii) adição de particulados de Ca , como aquele utilizado por Elahi, Abdi e Shahverdi (2013), ao alumínio

fundido. Estes particulados são misturados e homogeneizados por um rotor com pás, a uma rotação pré-estabelecida e por um tempo determinado; (iii) após o tempo necessário para homogeneização, TiH_2 é adicionado ao metal fundido e misturado a altas rotações, pois altas temperaturas fazem com que o hidrogênio se dissocie em bolhas no TiH_2 , e a altas rotações auxiliam essas bolhas a terem tamanho reduzido e dispersão homogênea pela massa metálica fundida. Tais bolhas não tem energia suficiente para romper a tensão superficial do líquido, pois a mesma foi aumentada com a adição do agente estabilizador; (iv) o número de bolhas aumenta com o tempo até que elas ocupem a totalidade do reservatório; (v) o cadinho é retirado e resfriado e a massa metálica repleta de vazios se solidifica, conforme pode ser observado esquematicamente na Figura 5.

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 (TiH_2); (d) e (e) crescimento e resfriamento.

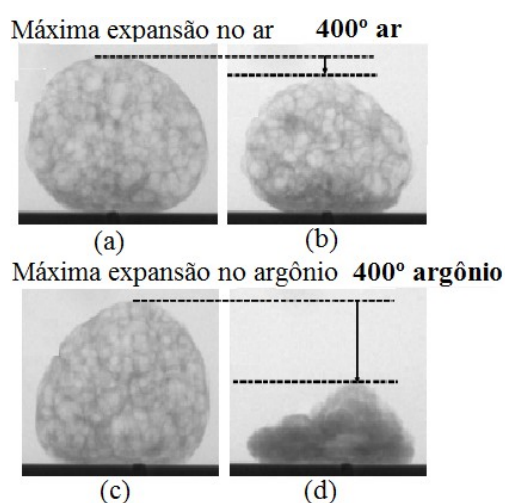


Fonte: Editado de Song; Nutt (2008)

Garcia-Moreno et al. (2011) reportou que a utilização de atmosfera de argônio levou ao colapso do material (rápida perda de bolhas para o meio externo) e a utilização de atmosfera normal levou a pouca perda de hidrogênio, como pode ser observado na Figura 6. Nesta, as espumas produzidas com 0,5% de TiH_2 e via metalurgia do pó foram analisadas por radiografias, onde as amostras (a) e (b) foram espumas produzidas sem atmosfera controlada, sendo que (a) é a radiografia na máxima expansão do material e (b) é aquela após o material atingir 400° C durante a solidificação; (c) e (d) são espumas confeccionadas em atmosfera controlada (argônio), no qual (c) é a radiografia na máxima expansão e (d) é a imagem obtida após o resfriamento até atingir 400°C. Na Figura 7, é possível observar as relações de áreas entre as amostras apresentadas na Figura (6) durante o processo de fabricação e em suas respectivas atmosferas, onde o material produzido em atmosfera não controlada é

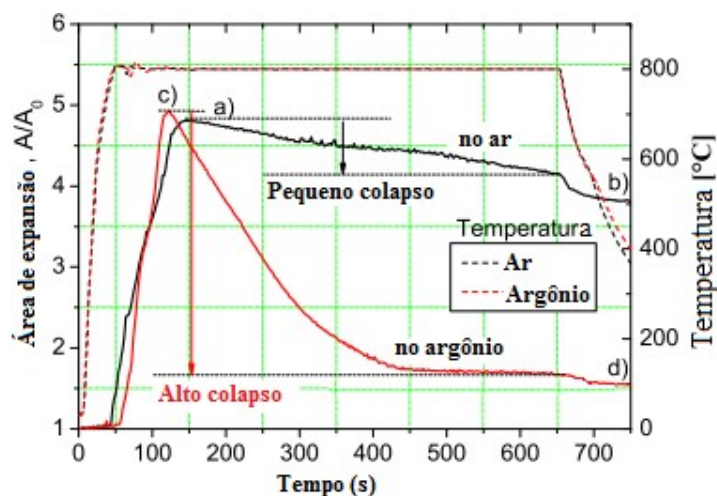
representado com uma linha de cor preta e o produzido em argônio em vermelho. Portanto, pela relação das áreas de expansão, tempo de processo e temperatura, foi possível notar como a atmosfera de argônio (gás inerte) não auxiliou na estabilidade da espuma, assim não prevenindo o colapso prematuro do material precursor. Isto ocorreu durante a confecção do material, onde a atmosfera inerte não promoveu películas de óxido na parte externa e nas paredes das bolhas, deste modo promovendo o colapso do material quando a tensão superficial das bolhas foi ultrapassada pela pressão do gás dentro da bolha.

Figura 6 – Radiografias e gráfico mostrando a influência da atmosfera na produção das espumas de alumínio.



Fonte: Editado de Garcia-Moreno et al. (2011)

Figura 7 – Radiografias e gráfico mostrando a influência da atmosfera na produção das espumas de alumínio.



Fonte: Editado de Garcia-Moreno et al. (2011)

3.1.1.1.1 Primeira etapa: Aquecimento

Temperatura é parâmetro importantíssimo, tanto para a adição do agente estabilizador da espuma, como para o agente espumante. Por ser um processo rápido, torna-se inviável trabalhar com diferentes patamares de temperatura durante o processo devido ao fato de ter grande influência na dissociação do agente espumante, pois elevadas temperaturas levam a perda de massa. Portanto, utilizam-se temperaturas próximas a de fusão do alumínio.

3.1.1.1.2 Segunda etapa: Aumento da viscosidade do banho metálico

Outra etapa fundamental para o processo é o aumento da viscosidade, pois é responsável por não permitir que as bolhas produzidas na dissociação do hidrogênio superem a tensão superficial do líquido e pela estabilidade do banho no início da etapa de expansão. De acordo com Nayebe, Bahmani e Asl (2016), é necessário adicionar granulado de Ca de 0,8 a 8 % em massa, apesar do fato de que, tipicamente, é utilizado 1,6 % em massa, como reportado por Dunkhan (2013). Após a adição, o metal líquido e o material particulado são normalmente misturados conforme demonstrado por Song e Nutt (2008) a rotações de 400 a 500 rpm, aumentando-se assim a viscosidade do metal de $3,5 \times 10^{-3}$ Pa.s para $5,5 \times 10^{-3}$ Pa.s. Segundo Raj e Daniel (2008), esta agitação tem duração de 8 a 12 minutos. Com essa faixa de velocidade de rotação, o comportamento do fluido tende a não ser turbulento e o contato do fluido com o particulado aumenta, facilitando assim as reações para formação de óxidos, conforme as Equações (1) e (2). Esses óxidos são importantes para a formação de espumas metálicas, como reportou Heim et al. (2015).



3.1.1.1.3 Terceira etapa: Adição do agente espumante

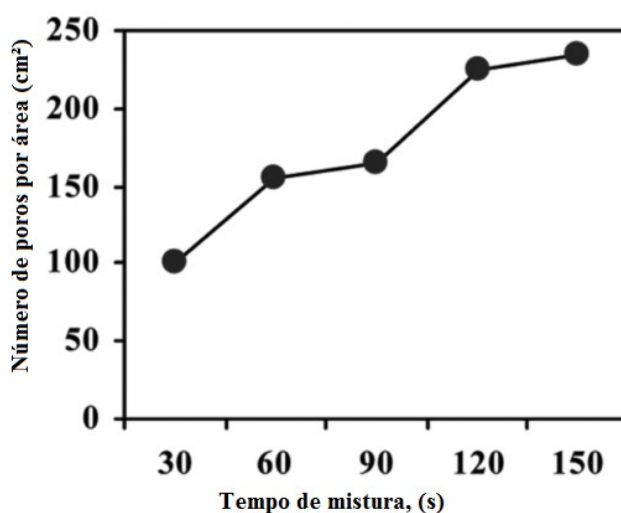
Na terceira etapa, agente espumante é adicionado à matriz de alumínio fundida. É interessante salientar que a temperatura, durante a adição, deve estar próxima a temperatura de fusão do material, visto que a decomposição do TiH_2 via análise termogravimétrica

começa por volta de 500°C, como reportado por Edwin, Parameswaran e Daniel (2009). Segundo Byakova et al. (2006), devido a esse aumento de temperatura, TiH_2 começa a perder H_2 na forma de gás, conforme a Equação (3), e essa dissociação pode acontecer antes do material ser misturado ao metal líquido.



O TiH_2 dentro da matriz metálica começa a liberar gás e formar bolhas, desta forma, este material é disperso pela matriz com o auxílio de um misturador mecânico. Portanto, como utilizado nos trabalhos de Um, Yao e Luo (2010) e Raj e Daniel (2009), o particulado (agente espumante) é adicionado ao metal líquido a rotações de 1000 a 2000 rpm. O tempo de mistura influencia a quantidade dos poros, pois o misturador rompe bolhas maiores, transformando-as em bolhas menores e favorecendo a quebra dos aglomerados de agente espumante, conforme reportado por Edwin Raj e Daniel (2011). A relação tempo de mistura em função da quantidade dos poros por área pode ser observada na Figura 7, onde é possível ressaltar como maiores tempos de mistura aumentam a quantidade dos poros por área.

Figura 7 - Efeito do tempo de mistura em função de unidade de área.



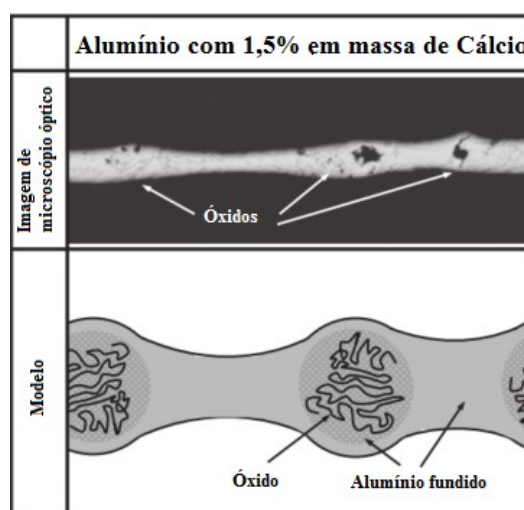
Fonte: Editado de Sarajan, Soltani e Kahani Khabushan (2011)

Com isso, as bolhas começam a surgir e crescer e o misturador é posteriormente retirado do banho metálico, como pode ser observado na Figura 5 (c).

3.1.1.1.4 Quarta etapa: Expansão da espuma

Após a retirada do misturador, o volume do material começa a aumentar pela dissociação do hidreto de titânio e formação de bolhas, conforme demonstrado esquematicamente na Figura 5 (d). Por diferença de densidade, as primeiras bolhas formadas sobem e se estabilizam na parte superior do metal fundido, como reportado por Ashby, Evans, Fleck (2002). O material fica a temperatura constante até que o processo de formação de espuma (líquida) se complete, conforme esquematizado na Figura 5 (e). Nesta etapa, a adição de Ca, ocorrida na segunda etapa do processo, auxiliou na formação de óxidos, como demonstrado na Equação (2), fazendo com que as bolhas não se rompam e coalescam durante a dissociação do TiH_2 , conforme reportado por Edwin Raj e Daniel (2011). A representação esquemática da dispersão dos óxidos nas paredes dos materiais celulares de alumínio pode ser observada na Figura 8, na qual estes tendem a formar aglomerações em determinados pontos das paredes.

Figura 8 - Imagem por microscópio óptico dos aglomerados de óxidos e desenho esquemático da dispersão de óxidos pela parede do poro.



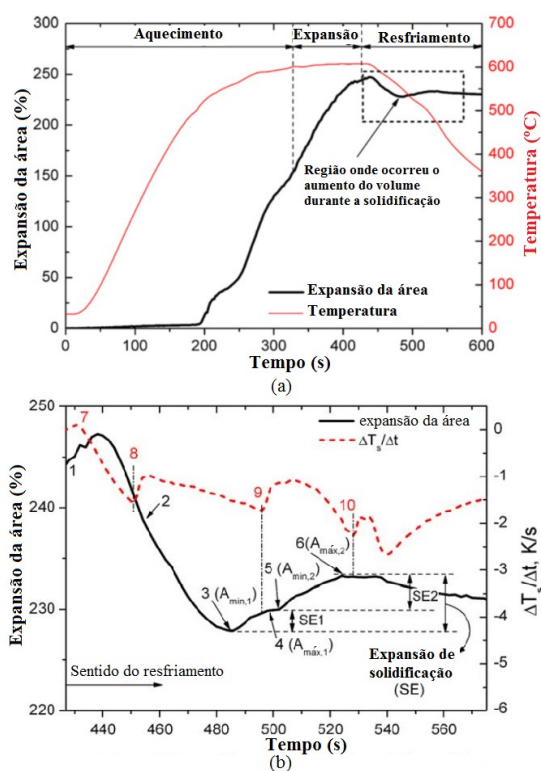
Fonte: Editado de Kadoi; Nakae (2011)

Esses óxidos são muito importantes, pois aumentam a viscosidade e/ou dificultam a coalescência dos poros, deste modo aumentando a tensão superficial da parede do poro, e também auxiliando na redução do efeito de drenagem, pois formam uma barreira natural que dificulta o escoamento do líquido pelas paredes do poro.

3.1.1.1.5 Quinta etapa: Resfriamento do material produzido

A solidificação é uma etapa muito importante para a produção de espumas de alumínio que pode ocasionar muitos problemas no seu decorrer. Assim, é importante que a solidificação da espuma formada ocorra rapidamente, que é facilitada pelo fato de que a temperatura de processamento é normalmente muito próxima a temperatura de solidificação da liga. De acordo com o trabalho de Mukherjee, Garcia-Moreno e Banhart (2010a, 2010b), efeitos de aumento de volume foram observados para liga AlSi_6Cu_4 . Esses efeitos podem ser observados na Figura 9 (a) para a liga analisada. Durante a solidificação, houveram regiões de ganho e perda de volume. Já a Figura 9 (b) mostra a ampliação da região demarcada na Figura 9 (a). Nesta ilustração, é possível observar mais detalhadamente um aumento de volume entre 480 a 520 s. Mukherjee, Garcia-Moreno e Banhart (2010b) reportou que o aumento de volume ocorre por mecanismos de perda e ganho de volume. Ganho de volume acontece por produção de gás pelo TiH_2 (agente espumante), precipitação do hidrogênio no metal fundido e efeitos de recalescência. A perda de volume ocorre por efeito de encolhimento da matriz, encolhimento do gás, perda de hidrogênio para o meio e ruptura das bolhas.

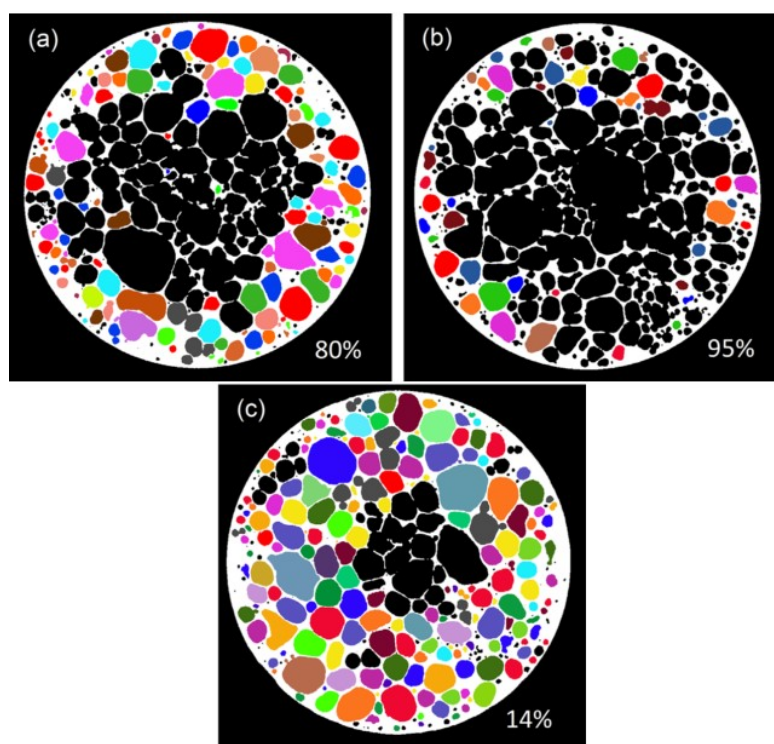
Figura 9 - Relação de expansão em função de tempo e temperatura das espumas de alumínio analisado via metalurgia do pó.



Fonte: Editado de Mukherjee, Garcia-Moreno e Banhart (2010b)

Essas mudanças de volume pontuais podem gerar distorções na organização das bolhas, promovendo ruptura durante a solidificação e podendo gerar colapso da espuma. Como reportado por Lázaro, Solórzano e Rodríguez-Pérez (2016), o efeito de encolhimento ocorre com o material ainda em seu estado líquido. Devido a alta fluidez (baixa viscosidade), durante a solidificação, as paredes dos poros reduzem sua espessura e as bolhas são reorganizadas, gerando maiores danos na estrutura da espuma. Em contrapartida, a ruptura das paredes ocorre quando o material está em sua fase semi-sólida com baixa fluidez. Com isso, como pode ser observado na Figura 10, maiores taxas de resfriamento reduzem o efeito de ruptura da parede.

Figura 10- Influência da taxa de resfriamento na interconectividade, onde a parte colorida são poros isolados. (a) solidificado a $-1,7 \text{ K.s}^{-1}$ com 80% de conectividade; (b) solidificado a $-0,7 \text{ K.s}^{-1}$ com 95% de conectividade e (c) solidificada a -15 K.s^{-1} com 14% de conectividade.



Fonte: Editado de Lázaro, Solórzano e Rodríguez-Pérez (2016)

3.2 MUDANÇAS NO PROCESSO

De acordo com Gnyloskurenko, Nakamura e Byakova (2005), existem dois pontos que dificultam a empregabilidade das espumas metálicas: as dificuldades no controle do processo

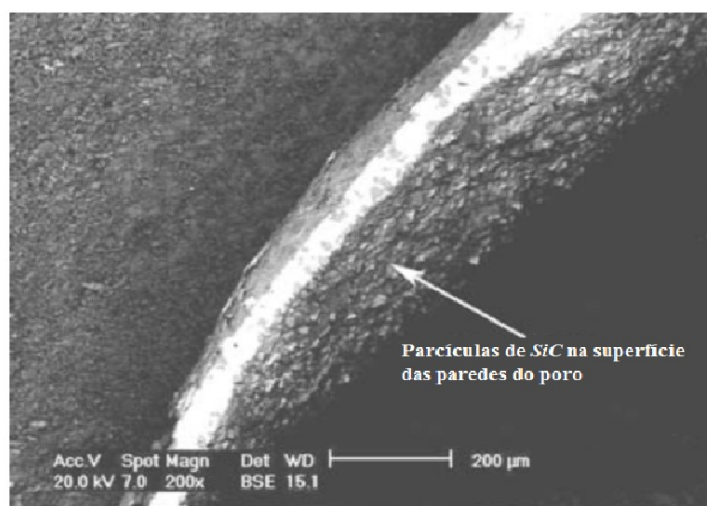
e os elevados custos de produção. Portanto, é necessário buscar novas metodologias de confecção e novos insumos que reduzam o custo de produção e minimizem as variabilidades durante o processo. Com isso, como reportado por Banhart (2013), o processo convencional Alporas é uma opção para a produção das espumas, pois há a possibilidade de variação de parâmetros através dele. Vários pesquisadores analisaram os efeitos de tempo de mistura, tempo de estabilização, diferentes ligas da matriz metálica e substituição do Ca por outros elementos químicos na morfologia e propriedades mecânicas do material.

3.2.1 Agente estabilizador

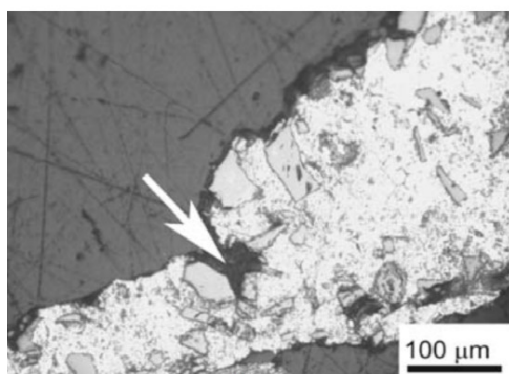
Como reportado por Banhart (2006), devido à dinâmica de processo, existe uma grande dificuldade na análise de espumas geradas através do processo Alporas *in situ*. Desta maneira, vários estudos relatam a viscosidade como propriedade importante para a confecção desse material. De acordo com Yang e Nakae (2003), a análise de viscosidade é uma boa ferramenta para a produção de um material com uniformidade na estrutura de poros. Sarajan, Soltani e Kahani Khabushan (2011) utilizou a análise do torque gerado pelo misturador para mensurar e monitorar a viscosidade. Assim, por análise de potência consumida do motor, é possível prever e quantificar a mudança da viscosidade durante o processo. No entanto, vários grupos não utilizam a análise de potência consumida pelo motor para avaliar a viscosidade. Kadoi e Nakae (2011) focaram em outros parâmetros de processo para avaliar a estrutura e morfologia dos poros, mesmo considerando-se a viscosidade como sendo uma propriedade importante e sabendo-se que esta tem uma grande influência durante todo o processo. Entretanto, para que haja espuma, é necessário um aumento da viscosidade. Um dos métodos para aumentá-la é com a adição de um agente estabilizador. Segundo Banhart (2006), para obter tal efeito, deve-se utilizar particulados cerâmicos, tais como SiC. Desta forma, os primeiros trabalhos sobre a formação de espuma com o carbetto de silício foram da Alcan e Hydro Aluminium na década de 80. Tal particulado cerâmico auxilia na estabilidade da espuma e previne um colapso prematuro do material. Porém, espumas produzidas por esse material são menos estáveis do que as produzidas por Ca, como reportado por Kadoi e Nakae (2011), além disso, foi demonstrado que o SiC produz um sistema mais frágil devido à formação de aglomerados. Conforme Babcsán (2003), o tamanho do particulado no local pode chegar a espessura da parede, mas normalmente ele é quatro vezes menor que essa espessura. Porém, de acordo com Kadoi e Nakae (2011), para obter bons resultados utilizando particulados cerâmicos, é necessário que o tamanho da parede do poro seja de duas a três vezes maior que o diâmetro do particulado, ademais, a relação de fração volumétrica deve ser respeitada. Estes particulados

cerâmicos tendem a se depositar nas paredes das bolhas, como pode ser observado na Figura 11, onde (a) é a imagem por microscópio eletrônico de varredura da dispersão de particulados de carbeto de silício nas paredes do poro; (b) a representação de rachadura (evidenciado por seta) no contorno do particulado de SiC; e (c) a dobra intensificada pela fragilidade gerada pelo contorno entre o particulado e a parede do poro (evidenciado por setas) em deformação de até 50%.

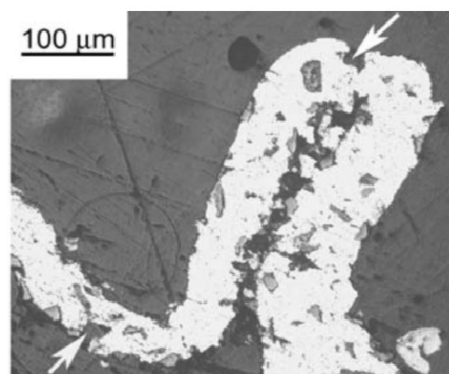
Figura 11 – Imagens do efeito do SiC em espumas de alumínio , sendo (a) a micrografia por microscópio eletrônico de varredura do material sem deformação; (b) e (c) a microscopia das espumas com deformação por compressão de 50% .



(a)



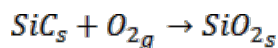
(b)



(c)

Fonte: Editado de Guden; Yüksel (2006)

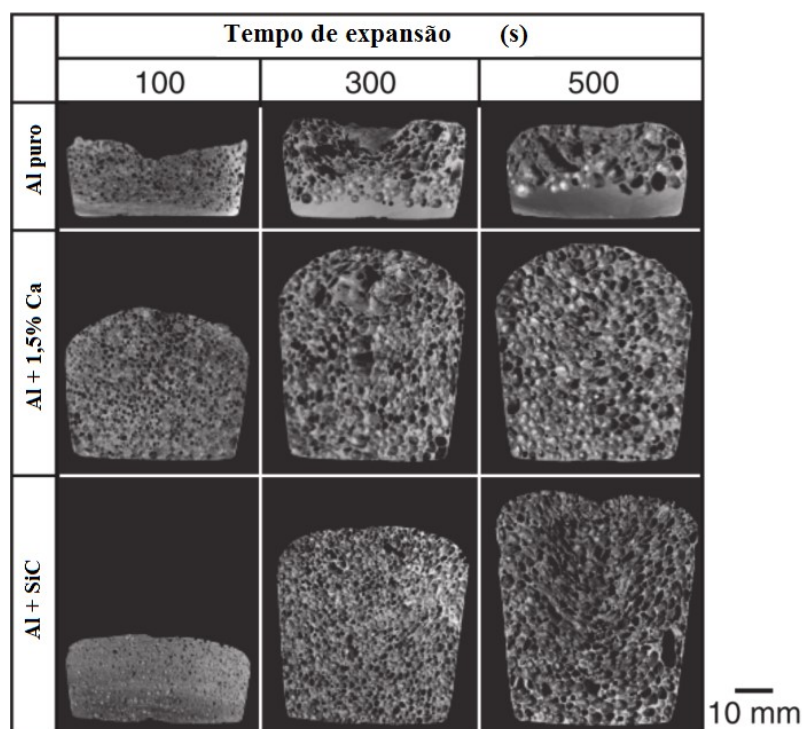
Para reduzir a formação de aglomerados, Malekjafarian e Sadrnezhad (2012) propõem um tratamento térmico (900°C por uma hora e 650°C por duas horas) dos particulados cerâmicos, onde foi produzida uma película de óxido no SiC, conforme a Equação (4), com a finalidade de reduzir o ângulo de molhabilidade e, conseqüentemente, aumentar o contato entre o líquido e o particulado.



(4)

O tratamento térmico dos particulados de SiC proporcionou boa estabilidade para a espuma, fazendo com que as espumas tivessem maiores tempos de expansão, como pode ser observado na Figura 12. Nesta, o processo de espuma foi confeccionado sem adição de agente estabilizador, com adição de Ca e a adição de SiC, pois há pouca formação de espuma e uma grande região livre de bolhas (efeito de drenagem) sem a utilização de agente estabilizador. Com a adição de Ca, a espuma foi estável, até mesmo com grandes tempos de expansão, e as produzidas com SiC tiveram uma boa expansão, porém esta teve uma dispersão de poros mais homogênea e mais lenta do que as espumas produzidas com Ca.

Figura 12 – Secções cortadas de espumas com diferentes agentes estabilizadores por diferentes tempos de expansão.



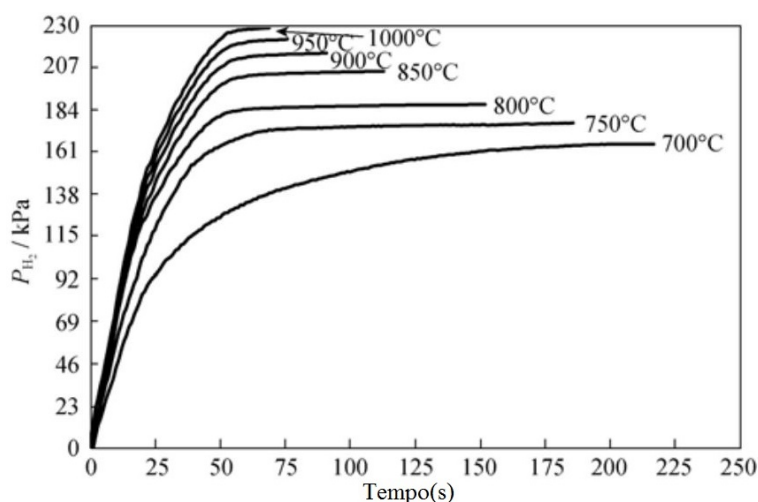
Fonte: Editado de Kadoi; Nakae (2011)

No entanto, a associação de pré-tratamento térmico aumenta o custo do agente estabilizador. Além disso, de acordo com Mondal et al. (2013), as partículas de SiC geralmente têm tamanho reduzido, ou seja, entre 10 a 20 μm . Além disso, segundo Surace e Filippis (2010), alta dureza auxilia no desgaste das pás do misturador, aumentando assim o custo do processo de produção do material.

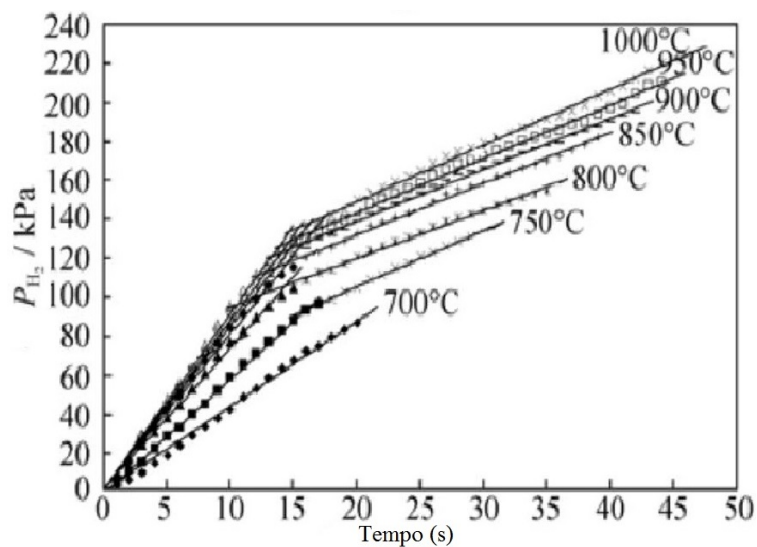
3.2.2 Agente espumante

Conforme Sarajan e Sedigh (2009), o agente espumante deve gerar uma quantidade desejada de bolhas de gás com o tamanho adequado e o alumínio fundido deve ao mesmo tempo ter uma certa viscosidade de modo a reter as bolhas até a solidificação ser completada. O TiH_2 , como pode ser observado na Equação (3), perde massa na forma de moléculas de H_2 quando submetido ao aquecimento. No trabalho de Rasooli et al. (2012), com um sistema isolado do meio externo e com auxílio de um sensor de pressão, foi possível avaliar a quantidade de gás perdida ao ser liberada na atmosfera quando o hidreto de titânio é adicionado ao metal líquido. As medidas foram realizadas em diferentes temperaturas, como pode ser observado na Figura 13, em que (a) demonstra as respectivas perdas de gás por diferentes isothermas durante longos períodos e (b) demonstra as respectivas perdas de gás por diferentes isothermas durante períodos curtos. Em (b), é possível observar que são retas, indicando quase ou nenhuma reação do hidreto de titânio e do alumínio foi realizada. Nesta figura, é possível notar que a perda de gás para a atmosfera é mais crítica em maiores temperaturas, sendo assim mais interessante utilizar ligas com pontos de fusão menores.

Figura 13 -Análise de perda de gás do TiH_2 quando é adicionado ao alumínio fundido em diferentes temperaturas, onde (a) são isothermas da perda de gás por longos tempos e (b) são curvas com tempos de até 50 segundos.



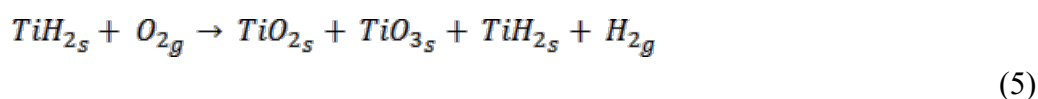
(a)



(b)

Fonte: Editado de Rasooli et al. (2012)

Portanto, Orovčík, Nosko e Švec (2015) reporta um tratamento térmico no qual o hidreto de titânio é colocado em um forno aquecido de 400°C a 500°C por até duas horas. Esse tratamento forma óxidos nas paredes do particulado, conforme a Equação (5), que retarda sua dissociação e melhora sua molhabilidade. Outra via, de acordo com Yang, Chen e Wang (2015) e Zhou et al. (2008), é utilizar ligas com pontos de fusão menores onde o hidreto será adicionado a temperaturas mais baixas e reduzirá custos operacionais, pois o forno trabalhará a temperaturas inferiores. Entretanto, o titânio remanescente no banho, como pode ser observado na Equação (3), forma a fase frágil Al_3Ti . Segundo Byakova et al. (2006), esta fase prejudica a ductilidade e fragiliza as paredes do poro. Todavia, como reportado por Kevorkijan (2010), com intuito de gerar espumas de alumínio com menor custo e como o TiH_2 tem um custo elevado devido à sua alta pureza e pequenos tamanhos, o pré-tratamento por oxidação também aumentará o custo de produção.

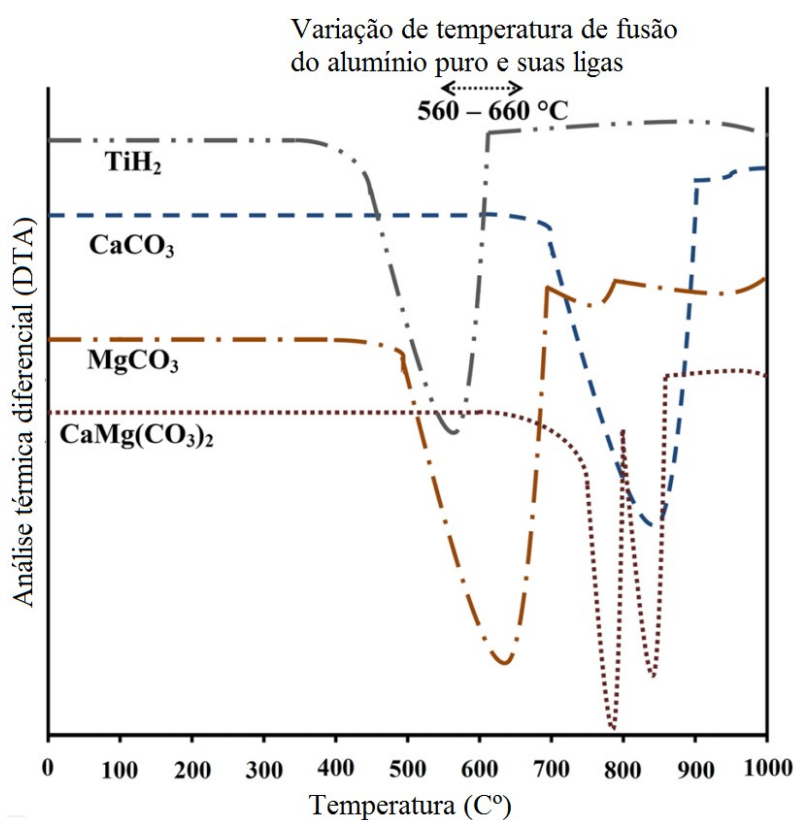


Conforme Banhart (2013) e Xia, Feng e Ding (2015), uma forma de produzir espumas de alumínio pelo processo Alporas com custo inferior é através da utilização de $CaCO_3$ como agente espumante. De acordo com Dunkhan (2013), a redução de custo seria de \$0,65 por kg para o agente espumante. O carbonato de cálcio tem perda de massa a temperaturas maiores em comparação ao TiH_2 , como pode ser observado na Figura 14. Mondal et al. (2013)



reportou que o CaCO_3 se dissocia de 650°C a 900°C , como expresso na Equação (6). Portanto, devido a essa característica, o carbonato pode ser utilizado a maiores temperaturas de processo. Todavia, de acordo com o trabalho de Mondal et al. (2013), somente de 30% a 40% em massa de CaCO_3 se decompõe, portanto, quantidades maiores de carbonatos são requeridos para a utilização desse material. Para que esse processo não seja mais custoso, é necessário um bom conhecimento dos efeitos desse particulado em metais fundidos de modo a melhor aproveitar a dissociação desse material.

Figura 14 – Curvas geradas por análise diferencial de temperatura de TiH_2 , CaCO_3 , MgCO_3 e $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

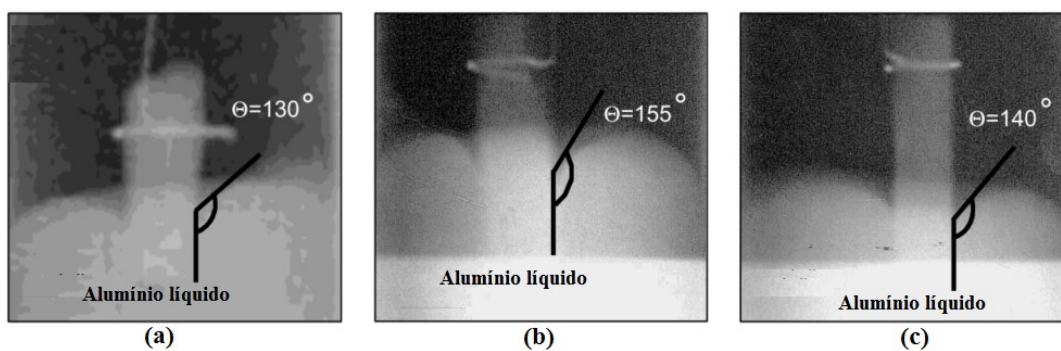


Fonte: Adaptado de Soloki; Esmailian (2015)

Inicialmente, no processo com CaCO_3 , era utilizado Ca como agente estabilizador, como no trabalho de Nakamura et al. (2002). Neste trabalho, foi analisado como os efeitos do ângulo de contato interferem na distribuição do particulado no banho, visto que este problema é geralmente solucionado com revestimento do particulado. Neste artigo foram utilizadas imagens adquiridas via raios X durante a adição ao metal líquido, conforme a Figura 15; no qual (a) são tabletes de TiH_2 ; (b) CaCO_3 sem revestimento; e (c) CaCO_3 com revestimento. Fazendo-se uma comparação entre (b) sem revestimento e (c) com revestimento, é possível observar uma redução no ângulo de contato com 15° de diferença, chegando muito próximo ao (a) TiH_2 . A utilização de revestimento não só reduziu o efeito de drenagem como também

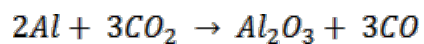
as densidades foram comparáveis a das espumas produzidas por TiH_2 . Contudo, uma outra maneira de promover propriedades de molhabilidade e dispersão do particulado, conforme Malekjafarian e Sadrnezhaad (2012), é aquecer o material até 200°C por duas horas para assim remover umidade e absorver gases. Byakova et al. (2006) reportou que o CaCO_3 , em relação ao TiH_2 em amostras com a mesma porosidade, conseguiu maior energia de absorção, tornando-o não só uma via de menor custo mas também com boas propriedades mecânicas.

Figura 15 – Imagens geradas por raios-x da imersão de agentes espumantes (a) TiH_2 ; (b) CaCO_3 sem revestimento; (c) CaCO_3 com revestimento com seus respectivos ângulos de molhabilidade.

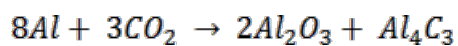


Fonte: Editado de Nakamura et al. (2002)

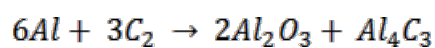
No entanto, conforme Gnyloskurenko, Nakamura e Byakova (2005) e Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007), para ligas de alumínio-silício, a adição de Ca como agente estabilizador formou as fases $\text{Al}_{10}\text{Ca}_4\text{Si}_{10}$ e Al_2CaSi_2 , respectivamente, que promovem fratura frágil nas paredes de algumas células. A partir de 2007, alguns pesquisadores reportam que a utilização de agentes estabilizadores não é necessária, como Alcoa Inc. (2008), visto que o carbonato de cálcio no metal líquido começa a gerar gás e formar bolhas, conforme indicado na Equação (6). Esses particulados aprisionados dentro das bolhas começam a gerar mais gás e aumentar o tamanho da bolha, conforme esquematizado na Figura 16. Essas bolhas, geradas pelo CO_2 dissociado, reagem com o alumínio líquido, auxiliando assim na formação de óxidos que por sua vez aumentam a viscosidade e a estabilidade da espuma em reações representadas nas Equações (7); (8) e (9), de acordo com Alcoa Inc. (2008) e Gergely, Curran e Clyne (2003). A oxidação converte o alumínio fundido em um material semi-líquido de elevada viscosidade, deste modo retardando a drenagem e coalescência das células.



(7)

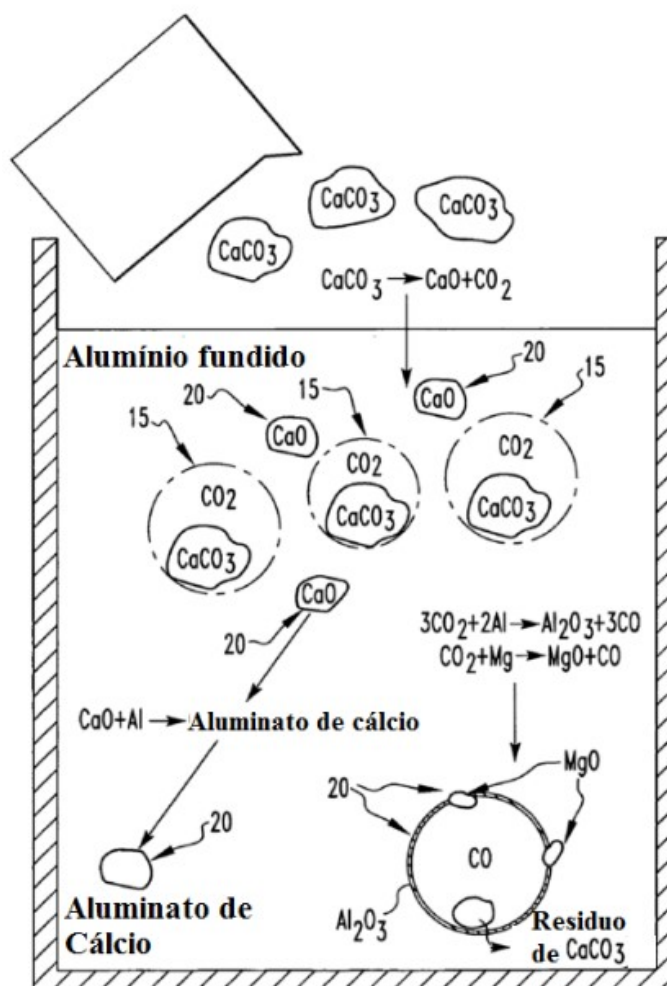


(8)



(9)

Figura 16 – Desenho esquemático da adição de $CaCO_3$ em alumínio fundido contendo Mg.



Fonte: Editado de Alcoa Inc. (2008)

Portanto, a utilização de CaCO_3 como agente espumante permite reduzir uma etapa do processo para aumentar a viscosidade, reduzindo assim tempo de processo e gasto com consumíveis, tais como o Ca puro. De acordo com Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007), o carbonato de cálcio tem a característica de ser melhor distribuído no banho devido às suas características de estabilidade que prolonga a existência da espuma líquida. No processo convencional Alporas, inúmeras variáveis de produção foram analisadas e quantificadas. Deste modo, as influências do carbonato de cálcio como agente espumante e suas variáveis devem ser analisadas. Segundo Kumar e Pandey (2015), o material foi produzido com Al-7Si, 2 % em massa de CaCO_3 misturado a 650 rpm por 5 minutos e a diferentes temperaturas de processo (850, 875 e 900°C). Posteriormente, o líquido repleto de bolhas é retirado do forno e resfriado ao ar livre. Os pesquisadores verificaram que a temperatura tem grande influência na sua estrutura, sendo que temperaturas elevadas (900°C) promovem poros com maiores diâmetros, que é provocado pela coalescência e maior dissociação de gás do CaCO_3 , conforme pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 - Propriedades das espumas de alumínio, com diferentes temperaturas de fabricação (850, 875 e 900 °C respectivamente) e com CaCO_3 como agente estabilizador e agente espumante.

Liga	Tamanho de particulado (μm)	Média do tamanho dos poros (mm)	Média de espessura da parede (μm)	Densidade (g/cm^3)
Al - 7Si	1 - 25	0,62	150	0,62
Al - 7Si	1 - 25	0,69	200	0,69
Al - 7Si	1 - 25	0,9	300	0,9

Fonte: Editado de Kumar e Pandey (2015)

Conforme Milman et al. (2006), Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007) e Byakova et al. (2014), as ligas também influenciam o material final, conforme pode ser observado no Quadro 2, onde o particulado de CaCO_3 foi tratado quimicamente para formar uma película externa de CaF_2 . Para a liga Al – Zn – Mg, foi adicionado 2% em massa de carbonato de

cálcio que foi misturado com um aumento gradual da rotação (700 rpm até 1000 rpm) por 78 s a um tempo de expansão de 330 s e temperatura de 946°C. Para Al – 7Si, foi adicionado 2% em massa de agente espumante e foi misturado o particulado no alumínio com um aumento gradual da rotação (700 rpm até 1000 rpm) a um tempo de expansão de 2 min e temperatura de 680°C. Foi reportado por Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007) que temperaturas mais elevadas aumentam a reação de formação de óxido, auxiliando no aumento da viscosidade. Posteriormente, o material é retirado do forno e é resfriado por ar forçado.

Quadro 2 - Propriedades de espumas de alumínio produzidas com diferentes ligas de alumínio e CaCO₃ como agente estabilizador e agente espumante.

Liga	Tamanho do particulado (μm)	Média do tamanho dos poros (mm)	Densidade relativa (g/cm ³)
Al - 7 Si	8	1,7±0,6	0,18 - 0,27
Al - Zn - Mg	8	1,2±0,6	0,2 - 0,33

Fonte: Editado de Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007) e Byakova et al. (2014)

Segundo Praveen Kumar et al. (2015), Praveen Kumar, Venkateswaran e Seetharamu (2015) e Cambroner et al. (2009), os tamanhos do particulado de CaCO₃ interferem nas propriedades finais das espumas produzidas, como listados no Quadro 3. Cada amostra com a mesma liga de alumínio (Al-11,8Si) foi produzida com diferentes tamanhos de grão de agente espumante (150, 106, 75 e 53μm). Portanto, para a produção desse material, o metal líquido a 700°C foi pré-agitado (400 a 500 rpm) por um período de 30 a 40 segundos. Posteriormente, continuando a agitação, foi adicionado o particulado a uma rotação de 200 a 400 rpm por um período de 2 a 3 minutos. Em seguida, o material foi deixado ao forno por 3 a 5 min para a expansão do material semi-líquido. Com isso, o material foi retirado do forno e resfriado ao ar ambiente. Praveen Kumar, Venkateswaran e Seetharamu (2015) reportou que espumas com estrutura mais uniforme foram observadas nas espumas produzidas com o particulado com tamanho médio de 75μm.

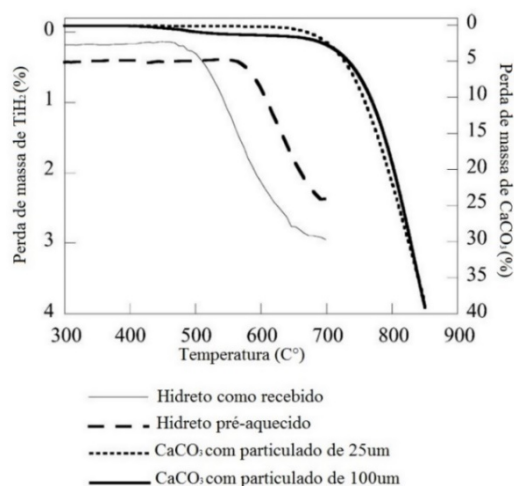
Quadro 3 - Propriedades das espumas de alumínio com diferentes tamanhos de particulados de CaCO_3 (agente estabilizador e agente espumante).

Liga	Tamanho do particulado (μm)	Poros por polegada	Densidade (g/cm^3)	Densidade relativa (g/cm^3)	Porosidade (%)	Resistência por Compressão (Mpa)
Al-11,8Si	53	20	0,91	0,34	65,66	11,72
Al-11,8Si	75	18	0,75	0,28	71,69	11,32
Al-11,8Si	106	14	0,6	0,22	77,35	10,56
Al-11,8Si	150	11	0,56	0,21	78,88	7,82

Fonte: Editado de Praveen Kumar, Venkateswaran e Seetharamu (2015) e Venkateswaran; et al. (2015)

O tamanho dos particulados de agente espumante (carbonato de cálcio), de acordo com o trabalho de Gergely, Curran e Clyne (2003), não promoveu diferença significativa na perda de massa, como pode ser ressaltado pela Figura 17. Neste, o particulado de CaCO_3 analisado obteve 99,5% de pureza com 25 μm de tamanho e 99,3% de pureza com tamanho de 100 μm . A partir desses particulados, foram produzidas espumas com utilização de 10% em massa de SiC (13 μm) como agente estabilizador, 1 kg de alumínio (Al-9%Si-0,5%Mg com 0,2% em massa de Cu, Mg e Ti) misturados ao alumínio (Al-11Si) durante 10 s. Logo após, foi adicionado 3,5% em massa de CaCO_3 a 650°C com o misturador a 1200 rpm durante 90 s. O tempo de expansão foi de 15 min, demonstrando que a camada de óxido gerada pelo carbonato de cálcio preveniu o colapso e gerou a estabilidade necessária para a parede dos poros. Com essa metodologia de trabalho, foi possível obter espumas próximas a 95% de porosidade.

Figura 17 – Curvas termogravimétricas para CaCO_3 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 $20^\circ\text{C min}^{-1}$.

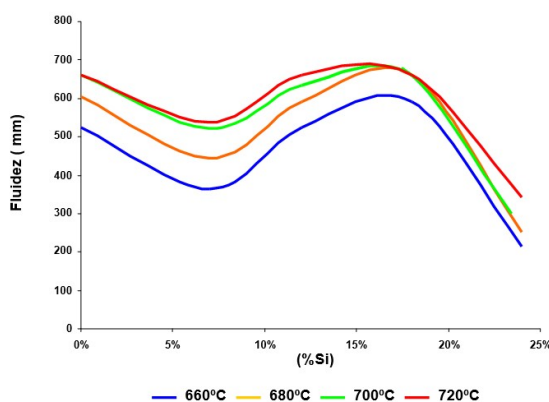


Fonte: Editado de Gergely, Curran e Clyne (2003)

3.3 INFLUÊNCIAS DA VISCOSIDADE EM LIGAS DE ALUMÍNIO SILÍCIO

Ligas de alumínio-silício são muito utilizadas na confecção de espumas de alumínio. Segundo Verran, Paloschi e Araujo (2002), sua fluidez ou sua viscosidade são bastante influenciadas pela temperatura e também pela concentração de silício, como pode ser observado na Figura 18. Nesta, é possível notar tanto a influência da temperatura como da concentração de silício, sendo que maior fluidez é encontrada a 720°C e com concentrações de silício acima de 10%.

Figura 18- Gráfico obtido por análise de vazamento de ligas de alumínio com diferentes concentrações de silício a diferentes temperaturas.



Fonte: Verran, Paloschi e Araujo (2002)

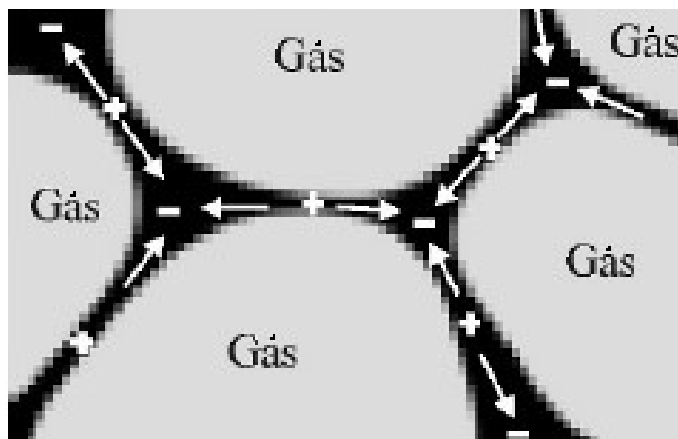
3.4 EFEITOS DURANTE A EVOLUÇÃO DA ESPUMA

Conforme Milman et al. (2006), durante a fabricação de espumas de alumínio, uma das grandes dificuldades está na obtenção de reprodutibilidade do processo Alporas. Portanto, ter um bom entendimento dos efeitos durante a confecção do material e um bom conhecimento dos tipos de análise desse material são de suma importância.

3.4.1 Efeito de Drenagem

Em espumas de células fechadas, as bolhas são caracterizadas por vazios contendo gás e separadas do metal fundido por películas sólidas de óxidos. Gergely e Clyne (2004) reportaram que o metal fundido tem mobilidade necessária para escoar por entre essas bolhas, conforme esquematizado na Figura 19. A diferença entre as pressões da região das paredes entre dois poros e intersecção entre três poros, devido à própria expansão de gás gerada na bolha, promove um afinamento da parede entre as bolhas e uma concentração de líquido no *plateau border* e/ou intersecção. O *plateau border* é definido pela região entre as 3 bolhas.

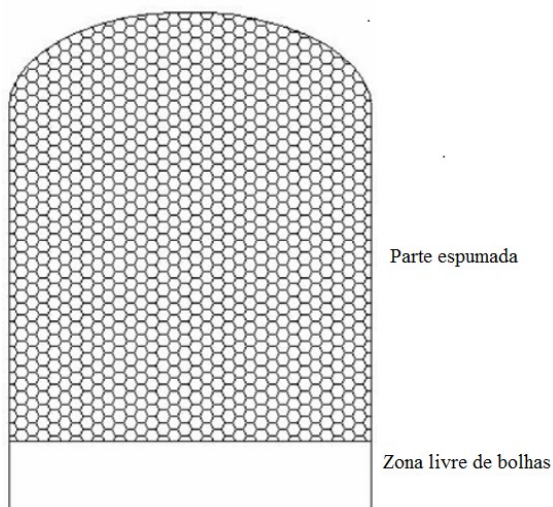
Figura 19 – Drenagem gerada por forças de capilaridade nas paredes das espumas.



Fonte: Editado de Koerner (2008)

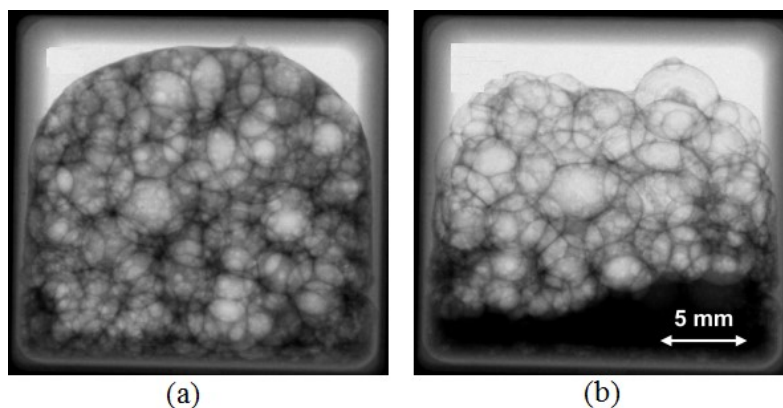
Devido ao efeito da gravidade sobre o líquido, o mesmo tende a escoar por entre as bolhas e se depositar no fundo do cadinho, conforme ilustrado na Figura 20. Este efeito foi observado quando a espuma produzida por metalurgia do pó foi analisada via raios X em gravidade normal e em microgravidade, como esboçado na Figura 21.

Figura 20 - Modelo típico do efeito de drenagem em espumas de Alumínio



Fonte: Editado de Zhou et al. (2008)

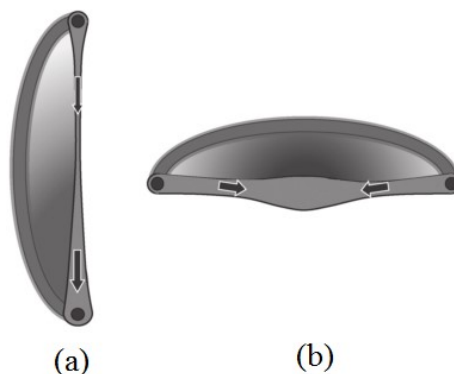
Figura 21- Radiografias de amostras de Al-6Si-4Cu com 1,6% em massa de TiH_2 como agente espumante: (a) Microgravidade; (b) Gravidade da Terra



Fonte: Editado de Garcia-Moreno, Francisco et al. (2011)

Conforme Koehler et al. (1998), a drenagem das espumas líquidas envolve a interação de gravidade, tensão superficial e forças de viscosidade. Portanto, é interessante ter um bom controle da viscosidade e de defeitos, como zona livre de bolhas, conforme reportado por Sarajan, Soltani e Kahani Khabushan (2011). Com o efeito de drenagem, o líquido escoar de maneira diferente dependendo da posição da parede do poro. Paredes verticais tendem a afinar e horizontais tendem a concentrar líquido no centro da parede, o que provoca um engrossamento, como pode ser observado na Figura 22. Isto provoca diferenças de geometria, logo um material pouco homogêneo.

Figura 22 – Ilustração esquemática do escoamento do fluido em diferentes posições da parede da célula na expansão, (a) posição vertical e (b) posição horizontal



Fonte: Editado de Kadoi; Nakae (2011)

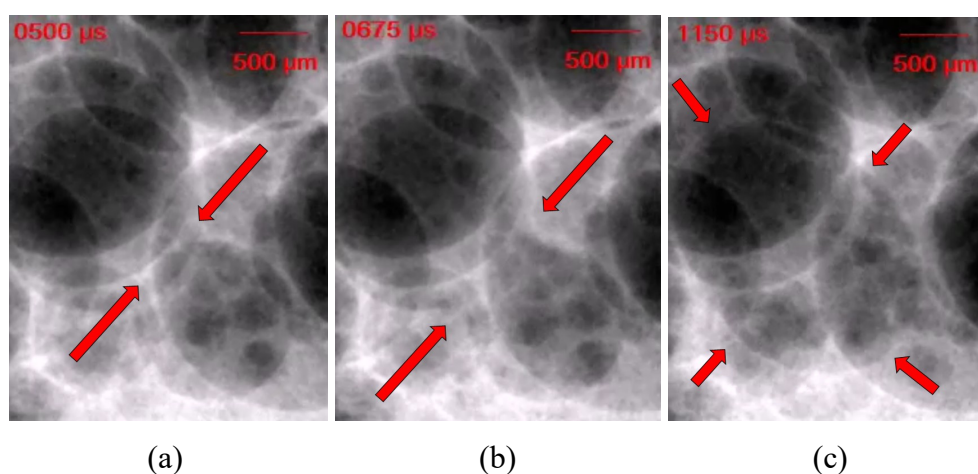
3.4.2 Redução do efeito de drenagem

Várias pesquisas observaram o efeito de drenagem na produção de espumas, com o intuito de entender as influências e formas de reduzir tal efeito. Segundo Heim et al. (2015), a atmosfera, bem como a formação de óxidos, tem um papel fundamental na formação de espumas de alumínio. No entanto, vários pesquisadores, tais como Garcia-Moreno, Solórzano e Banhart (2011), Gergely e Clyne (2004), Kadoi e Nakae (2011), Malekjafarian e Sadrnezhad (2012), Mondal D. P. et al. (2013a), e Surace e Filippis (2010), reportaram a utilização de partículas estabilizadoras para aumentar a viscosidade e assim reduzir o efeito de drenagem. Segundo Zhou et al. (2008), não foi observada zona livre de bolhas com adições de agente espumante (ZrH_2) superiores a 1,4% em massa. Conforme reportou Gergely e Clyne (2004), três fatores têm grande influência na redução do efeito de drenagem: (i) alta porosidade que suprime o efeito de drenagem; (ii) amostras com tamanho/altura reduzido; e (iii) agente espumante com dissociação de gás maior. Assim, a amostra cresce mais rápido e reduz o tempo de drenagem, visto que esse efeito é o escoamento do fluido por um determinado tempo.

3.4.3 Coalescência

A estabilização de filmes metálicos, de acordo com Garcia-Moreno et al. (2011), bem como a estabilidade destes nas paredes das células de espumas líquidas, previnem a coalescência dos poros, portanto, a estabilidade do material líquido poroso é aumentada. Nayeibi, Bahmani e Asl (2016) reporta que a coalescência pode ser proporcionada pelo alongamento de duas bolhas vizinhas durante a inflação das bolhas e/ou dobras, rugas e fissuras originadas durante o fluxo turbulento entre a camada de óxido e metal fundido, e pelas diferenças de expansão térmica entre a película de óxido e a liga fundida. De acordo com o trabalho de Myagotin, Helfen e Baumbach (2012) e Garcia-Moreno et al. (2011), após atingir uma espessura crítica, a ruptura e a coalescência das bolhas vizinhas são geradas, conforme pode ser observado na Figura 23 na qual, com a utilização de radioscopia por raios X, é possível notar a coalescência de duas bolhas vizinhas onde, com auxílio de setas, é possível compreender que, para que a coalescência aconteça: (a) as bolhas devem se aproximar, gerando assim um afunilamento das paredes dos poros; (b) a película da parede que não suportou a tensão aplicada ocorreu o rompimento; (c) de modo que as bolhas se unam e formem um novo poro. Outro efeito de coalescência, segundo Lázaro et al. (2013), foi notado próximo à superfície onde há um rompimento da parede de uma bolha externa que afeta a estrutura interna, podendo assim ocasionar coalescência de bolhas.

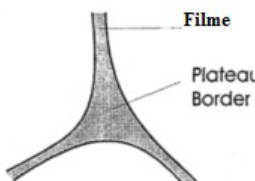
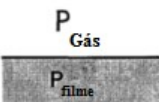
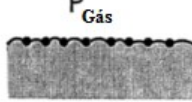
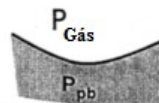
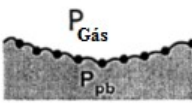
Figura 23 – Dinâmica da coalescência de dois poros vizinhos, (a) poros próximo a coalescência, (b) coalescência dos poros e (c) poro maior, após a coalescência.



Fonte: Adaptado de Rack (2009)

Uma das soluções para reduzir tal efeito é a utilização de partículas sólidas, pois elas tendem a se depositar nas paredes das células que, conforme Kumar e Pandey (2015) aumentam a tensão superficial da bolha. A teoria de Ip, Wang e Toguri (1999) se baseia no fato de que a película de óxido se rompe com maior dificuldade e suporta maiores pressões de gás, como representado na Figura 24.

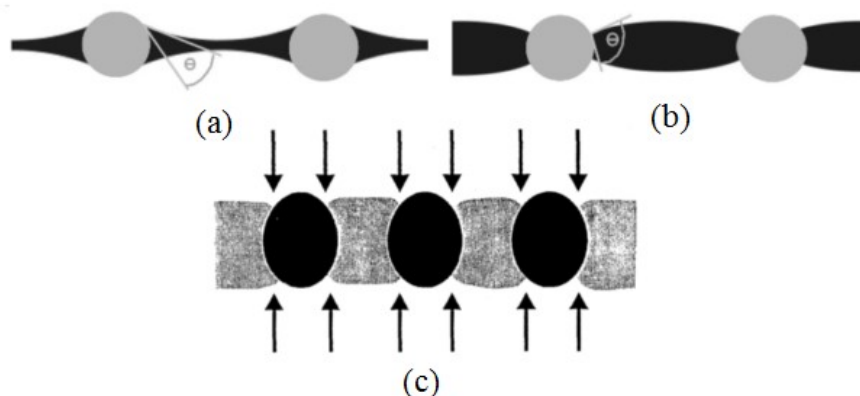
Figura 24 – Descrição esquemática do papel dos particulados aderidos sobre a redução da pressão de capilaridade no sistema do filme líquido.

Sem partículas		Com partículas	
			
Filme			
Plateau Border			
$P_{\text{Gás}} \approx P_{\text{Filme}} > P_{\text{pb}}$		$P_{\text{Gás}} > P_{\text{Filme}} \approx P_{\text{pb}}$	

Fonte: Editado de Ip, Wang e Toguri (1999)

No entanto, conforme Koerner (2008) e Ip, Wang e Toguri (1999), a molhabilidade do particulado tem grande efeito sobre a estrutura da parede, pois muda a estabilidade do filme no qual ela se deposita. Na Figura 25, é possível observar tal efeito, onde (a) indica que ângulos menores demonstram melhor molhabilidade; (b) ângulos maiores têm pouca molhabilidade; (c) pouca molhabilidade provoca regiões que facilitam a ruptura da bolha, sendo esta representada por setas.

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.



Fonte: Editado de Koerner (2008) e Ip, Wang e Toguri (1999).

Portanto, conforme reportado por Myagotin, Helfen e Baumbach (2012), a excessiva coalescência de bolhas deve ser evitada e estudos de coalescência experimentais são necessários para obter boa homogeneidade e boas propriedades mecânicas.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL POROSO

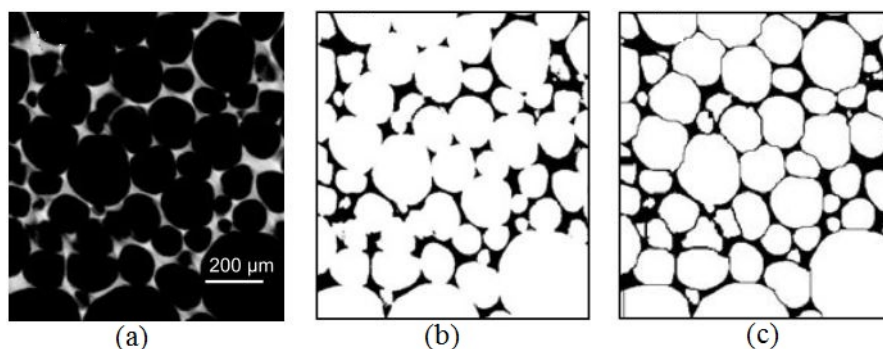
Existem atualmente quatro técnicas mais utilizadas, conforme Andreola (2000), para a obtenção das propriedades de materiais porosos: a técnica do Princípio de Arquimedes é simples e de baixo custo, mas não leva em consideração poros fechados; a Porosimetria com Mercúrio que determina somente os poros abertos e conectados à superfície externa da amostra; a Picnometria por Hélio que mede poros fechados e abertos, mas não é possível obter diâmetro de poro; ou a distribuição deste. Todavia, tais técnicas praticamente só analisam um parâmetro, ou seja, porosidade, e todas não conseguem obter outros parâmetros, tais como fração de área, tamanho médio dos poros e distribuição do tamanho médio. Contudo, conforme Groen, Peffer e Pérez-Ramírez (2003) e Tsuru et al. (2001), tais análises quantitativas podem ser obtidas por análise de imagens.

3.5.1 Caracterização por imagem

A microscopia quantitativa, de acordo com o trabalho de Cruz et al. (2007), é uma ferramenta poderosa, que pode chegar a intervalos de confiança de 95%. Com o advento de computadores mais potentes, tornou-se uma técnica simples, de baixo custo e confiável.

Andreola (2000) chegou a valores comparáveis a picnometria por hélio, sendo esta uma técnica interessante para obter parâmetros globais dos poros. Segundo Marinzuli et al. (2014), a caracterização morfológica é feita em dois estágios, uma inspeção qualitativa e uma análise quantitativa dos poros. Para a obtenção destas informações, algumas técnicas são bem consolidadas para espumas, como corte da amostra, preenchimento com resina opaca, que foi reportado por Ashby, Evans e Fleck (2002), Byakova et al. (2006), Bekoz e Oktay (2012), a utilização de epoxi preto (para dar contraste com as paredes da célula), lixamento e polimento. Grove, Jerram e Jpor (2011) reportam a utilização da resina com corante azul para análise via microscopia óptica, cujo procedimento obteve o contraste necessário para o tratamento da imagem. De acordo com o trabalho de Banhart (2001), a princípio, a aquisição da imagem deve ser em escala de cinza, para depois transformar a imagem em binário e posteriormente inverter cores. Todavia, de acordo com Banhart, Bleuet e Golosio (2008), dependendo da forma através da qual a imagem foi adquirida e de quais são as características da amostra, é necessário utilizar alguns filtros e/ou máscaras a fim de evidenciar a informação necessária, como pode ser observado na Figura 26. Nesta ilustração, é possível ressaltar como o filtro *watershed* preencheu as paredes não ligadas.

Figura 26- Tomografia 2D da imagem da espuma. (a) imagem original em escala de cinza; (b) imagem booleana e (c) imagem com filtro watershed



Fonte: Adaptado de Banhart, Bleuet e Golosio (2008)

Conforme Byakova, Sirko e Mykhalenkov (2007), para reduzir efeitos de ruído, foi escaneada uma sequência de 150 imagens dos poros. Sarajan e Sedigh (2009) reportou a utilização de macrografias para a caracterização morfológica da estrutura dos poros. Portanto, a partir desses procedimentos, é possível quantificar parâmetros, tais como circularidade, diâmetro dos poros e solidity (convexidade de área). Contudo, com o processamento digital de imagens, é possível mapear linhas de tendência dos poros e realizar uma reconstrução 3D do material, conforme realizado no trabalho de Cruz (2008).

3.5.2 Densidade aparente

Densidade é um parâmetro importantíssimo no estudo de espumas metálicas, pois é o principal atrativo na aplicação deste material em componentes estruturais. Atualmente existem duas técnicas mais utilizadas: o princípio de Arquimedes, que não consegue avaliar espumas com poros fechados, e a massa dividida pelo volume, sendo muito utilizada em diversos trabalhos, tais como aqueles conduzidos por Aboraia, Sharkawi e Doheim (2011), Gnyloskurenko, Nakamura e Byakova (2005), Koza et al. (2004), Kumar et al. (2010) e Taherishargh et al. (2014).

3.5.2.1 Densidade relativa

De acordo com o trabalho de Edwin Raj e Daniel (2011), densidade relativa é um parâmetro muito significativo para a determinação das propriedades mecânicas da espuma. No entanto, parâmetros de processo, tais como a granulometria do agente espumante, podem modificar a densidade relativa. Praveen Kumar, Venkateswaran e Seetharamu (2015) reportou que maiores granulometrias de CaCO_3 produziram espumas com menores densidades relativas, como pode ser observado no Quadro 3. Conforme Salvo Martin e Suard (2014) essa relação se dá pela densidade do material celular em função da densidade do material constituinte, conforme definido na Equação (10) :

$$\rho = \rho^* / \rho_s \quad (10)$$

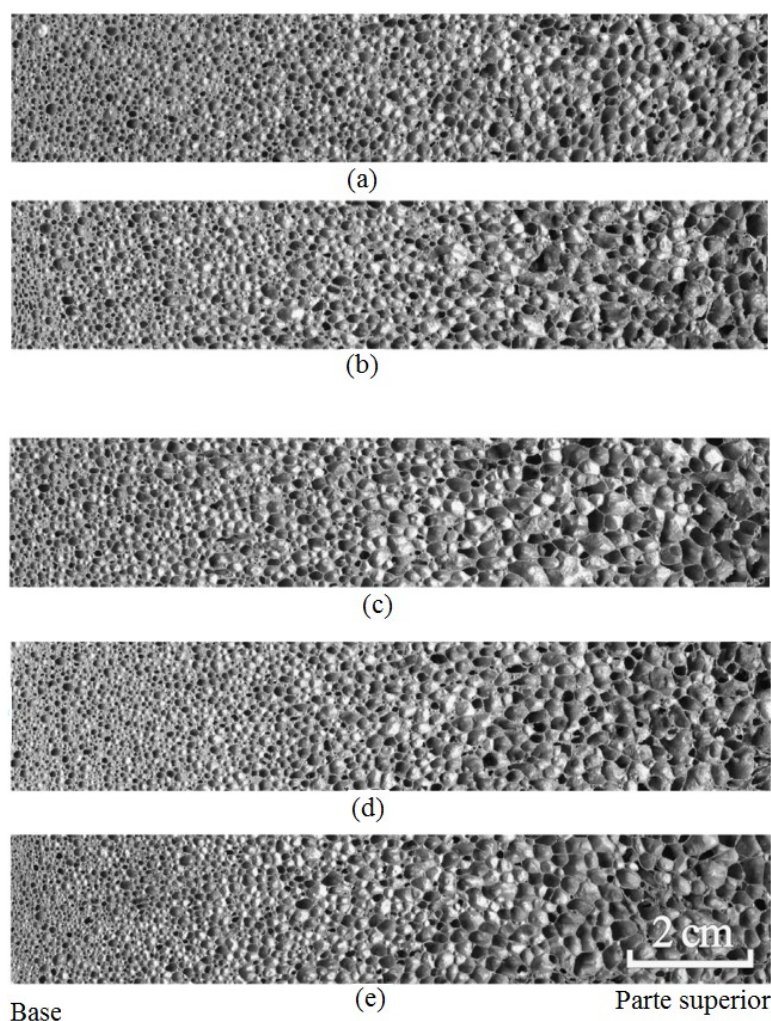
Onde ρ é a densidade relativa, ρ^* é a densidade da espuma e ρ_s é a densidade do material constituinte.

3.5.2.2 Densidade gradual

Conforme He et al. (2014), as espumas variam sua densidade em relação à altura. Isto foi influenciado por diferentes taxas de resfriamento, quantidade de agente espumante e tempos de expansão, como pode ser observado na Figura 27. Nesta, é possível notar que menores poros ficam localizados no fundo do cadinho (lado esquerdo), ou seja, no mesmo local onde o sistema de resfriamento está localizado. De acordo com Alcoa Inc. (2008), o

efeito de drenagem aumenta o gradiente de densidade dentro da espuma líquida, resultando na perda de uniformidade estrutural da espuma.

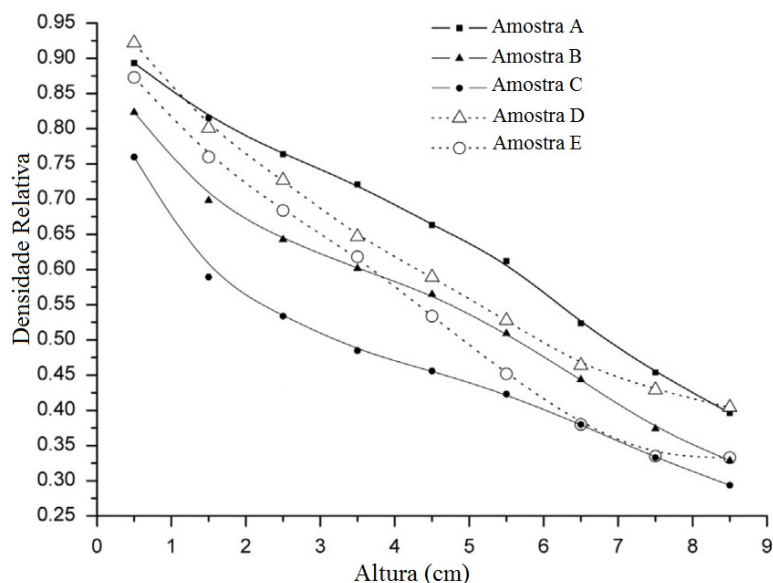
Figura 27 – Morfologia dos poros em relação a altura: (a) amostra A; (b) amostra B; e (c) amostra C foram produzidas com 1; 1,4 e 1,8 % em massa de TiH_2 e 60 segundos de tempo de expansão antes do resfriamento. (d) Amostra D; e (e) Amostra E foram produzidas com 1,4 e 1,8 % em massa de TiH_2 e resfriadas logo após a adição do agente espumante.



Fonte: Editado de He et al. (2014)

As amostras da Figura 27 foram seccionadas por eletroerosão no formato de bolachas. Essas bolachas foram pesadas e sua densidade foi determinada pela divisão da massa pelo volume. Com isso, foi possível plotar um gráfico de densidade em função de altura, representado na Figura 28.

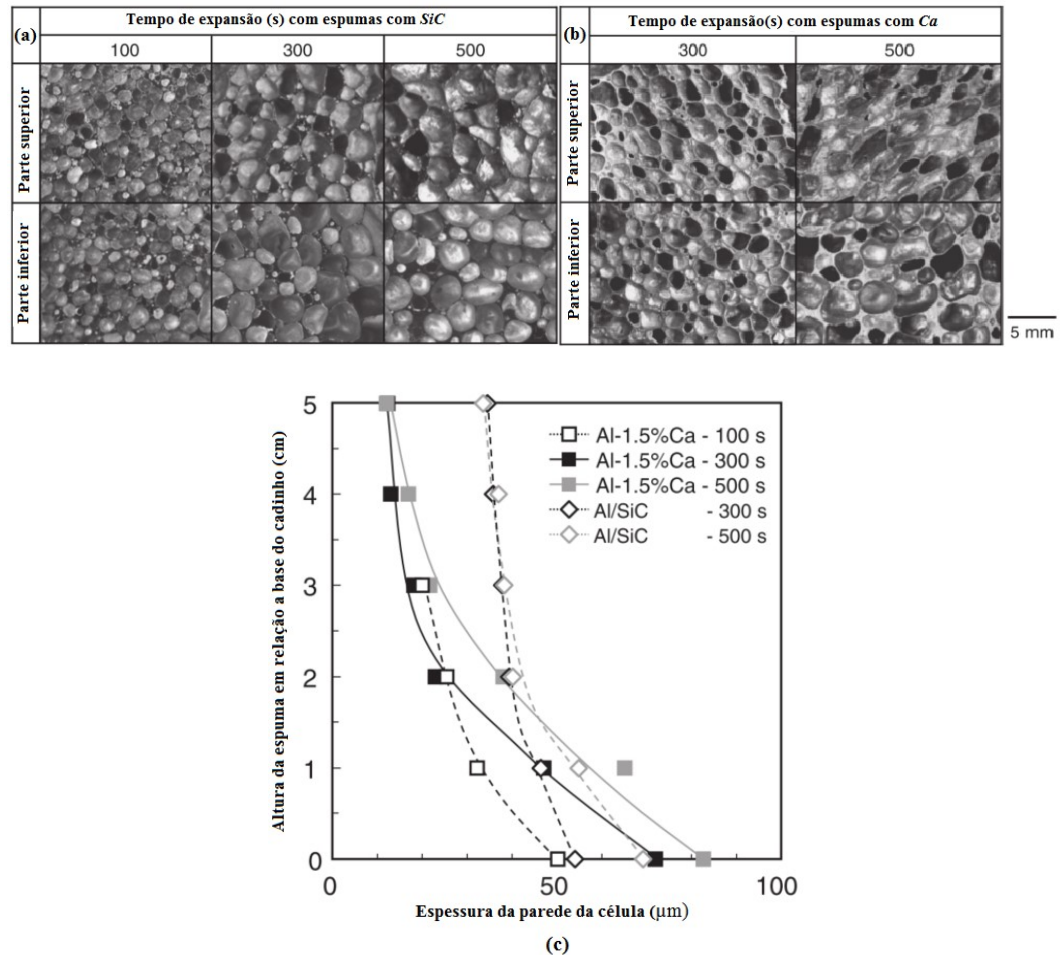
Figura 28 – Gráfico correspondendo as densidades relativas em função da altura das Amostras A;B;C;D;E na Figura 27.



Fonte: Editado de He et al. (2014)

As amostras (b) e (d) foram produzidas com a mesma quantidade de agente espumante, porém com diferentes tempos de expansão. Na Figura 28, é possível observar a diferença das densidades destas amostras, demonstrando assim que o material ainda estava em expansão. Como não houve tempo suficiente, a Amostra D teve densidades superiores. Kadoi e Nakae (2011) reportaram que a espessura da parede aumentou em regiões mais próximas ao fundo do cadinho, como pode ser observado na Figura 29 em que espumas produzidas via metodologia Alporas foram (a) produzidas com SiC como agente espumante, representadas pela base do cadinho e parte superior em diferentes tempos de expansão (100, 300 e 500 s); (b) produzidas com Ca como agente espumante, representadas em diferentes alturas pela base do cadinho e parte superior em diferentes tempos de expansão (300 e 500 s); e pelo (c) gráfico comparativo das amostras da espessura de parede em função da altura.

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.

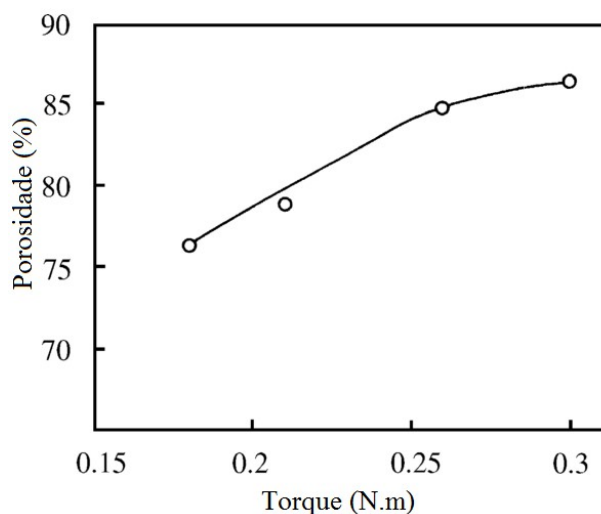


Fonte: Editado de Kadoi; Nakae (2011)

3.5.3 Porosidade

Densidade nem sempre é um parâmetro apropriado. Entretanto, porosidade é a relação de nível de poros na matriz, visto que essa medida pode ser afetada durante o processo de várias formas. De acordo com o trabalho de Yang e Nakae (2003), o aumento da viscosidade auxiliou no aumento da porosidade, como pode ser observado na Figura 30. A partir da análise de potência consumida pelo motor durante o processo de fabricação, foi possível correlacionar porosidade com viscosidade. Torque ótimo foi de 0,29Nm que corresponde a 1,7 vezes mais que o torque original para uma liga AL-7Si-0,45Mg a 630°C.

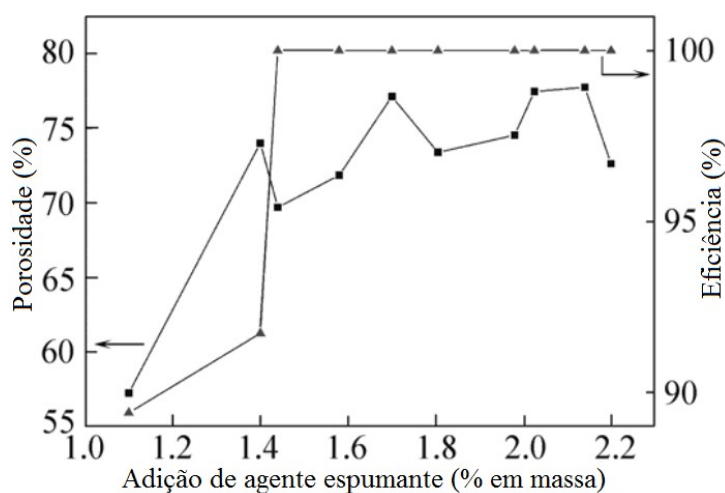
Figura 30 – Influência do torque na porosidade da espuma de alumínio.



Fonte: Editado de Yang; Nakae (2003)

Segundo Zhou et al. (2008), a porosidade aumentou com o acréscimo de agente espumante (ZrH_2), como pode ser observado na Figura 31 onde, a partir de 1,4 % em massa do agente espumante, a espuma teve 100 % de eficiência, ou seja, sem zona livre de bolhas.

Figura 31- Efeito da adição de agente espumante na porosidade e eficiência do processo de espumação.

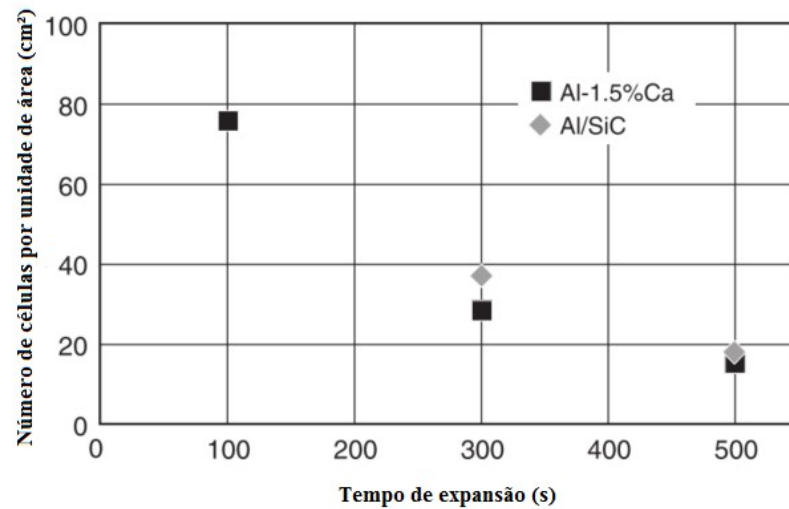


Fonte: Editado de Zhou et al. (2008)

Conforme reportado por Sarajan e Sedigh (2009), a temperatura durante o tempo de expansão influencia na porosidade do material, visto que o agente espumante estando em contato com o líquido em maiores temperaturas tende a dissociar uma maior quantidade de gás. Também foi reportado que um aumento de porosidade foi obtido através do aumento do tamanho médio dos poros. Assim, maiores temperaturas na etapa de expansão promoveram

maior quantidade de gás dissociado e menores viscosidades, favorecendo assim a coalescência dos poros. Conforme Kadoi e Nakae (2011), o tempo de expansão ajuda a gerar coalescência de bolhas, tornando as bolhas maiores e diminuindo a quantidade de bolhas por área, como pode ser observado na Figura 32 onde espumas produzidas pelo processo Alporas, embora seja com a utilização de agente estabilizador Ca ou SiC, foram analisadas utilizando-se a quantidade de células por área em relação ao tempo de expansão.

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.



Fonte : Editado de Kadoi; Nakae (2011)

Portanto, existem inúmeras influências durante o processo na porosidade do material. Com isso, novas maneiras de analisar e quantificar a porosidade são necessárias. De acordo com Vinod Kumar et al. (2011), a porosidade pode ser obtida por técnicas de análise de imagem. Todavia, para que a análise seja representativa, o material analisado deve ser uniforme. Essa propriedade também pode ser obtida por análises físicas. Segundo Byakova et al. (2006), a porosidade pode ser encontrada utilizando-se a Equação (11)

$$\Theta = 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \quad (11)$$

Onde Θ é a porosidade, ρ é a densidade da espuma e ρ_s é a densidade da matriz.

Para Yang et al. (2007), o plano de porosidade da amostra pode ser expresso pela Equação (12)

$$Pr_p = \frac{\sum A_i}{A} \times 100 \quad (12)$$

Onde Pr_p é a porosidade na área analisada, A_i é a área do poro e A é a medida área seccionada. Todavia, esta é uma análise que pode conter erros pois, no caso de uma amostra não uniforme, a área analisada pode não representar o todo.

Conforme Lu et al. (2013), a porosidade, pode ser obtida utilizando-se a Equação (13).

$$P = \left(1 - \frac{m}{\rho \times V} \right) \quad (13)$$

Onde P é a porosidade, m é a massa da matriz, ρ é a densidade do material da matriz e V é o volume da espuma.

3.5.4 Circularidade

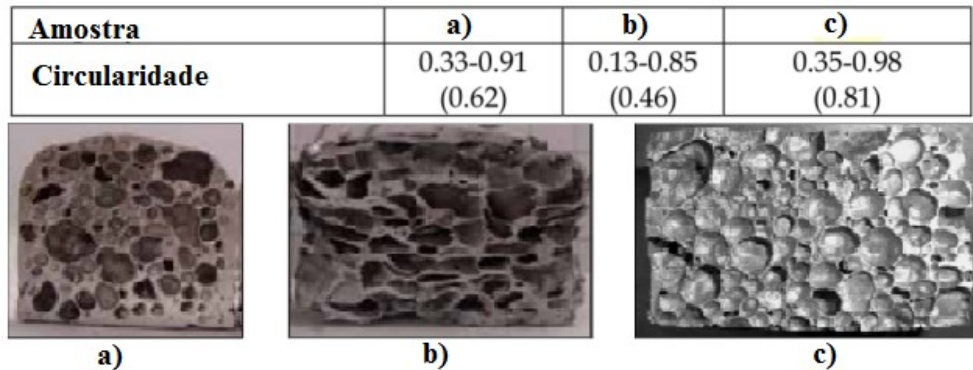
A porosidade da espuma é um parâmetro muito importante, porém ela não pode ser totalmente representativa pois, em espumas para utilização mecânica, a estrutura da célula (formato) pode ter influência nas propriedades mecânicas. Portanto, a circularidade é uma das maneiras de analisar o formato de um elemento que é o formato do poro no caso de espumas. Para Lázaro, Solórzano e Rodríguez-Pérez (2014), Marinzuli et al. (2014) e Vinod kumar et al. (2011), a circularidade tem a finalidade de diferenciar a qualidade estrutural do material produzido. Esta é uma ferramenta muito utilizada em várias áreas da ciência. De acordo com Cruz et al. (2007), esta é uma medida de fator de forma que representa o alongamento do objeto, ou seja, uma relação entre área e perímetro ao quadrado. Com isso, mudanças no perímetro do objeto têm maior influência. Esta variável resposta (adimensional) é calculada através da Equação (14).

$$C = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (14)$$

Onde C é a circularidade, A é a área da célula e P é o perímetro da célula, visto que a circularidade C (0,1], com valores próximos a 1, demonstram que a célula tem um valor mais

circular e, quando o elemento se distancia de um tendendo a zero, ele tende a ser menos circular, conforme pode ser observado na Figura 33.

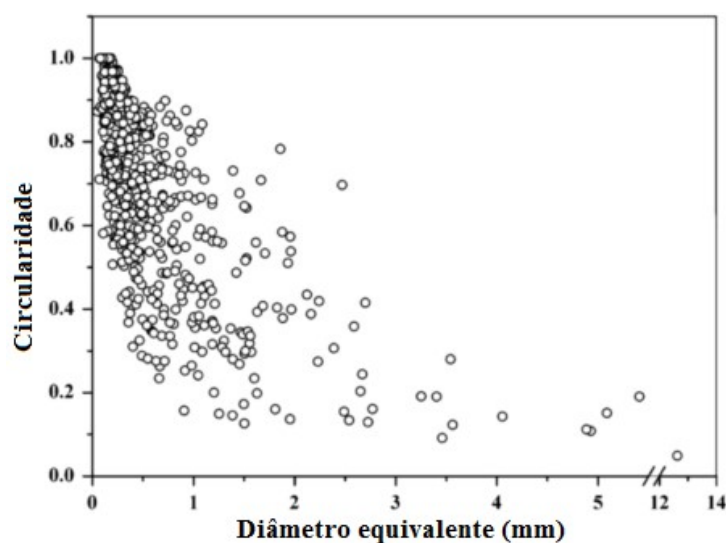
Figura 33 – Fotos demonstrando a diferença de circularidade entre processos de confecção de espuma (a) espuma produzida por TiH_2 , (b) espuma produzida por NaCl e Al em pó e (c) espuma produzida com injeção de gás.



Fonte: Editado de Surace; Filippis (2010)

Conforme reportado por Vinod Kumar et al. (2011), circularidade próxima ao valor 1 foi obtida por poros menores, como pode ser observado na Figura 34, através de um processo similar ao Alporas, no qual o agente espumante é o TiH_2 que utiliza o Mg e SiO_2 como agentes estabilizadores.

Figura 34 – Circularidade em função de diâmetro equivalente

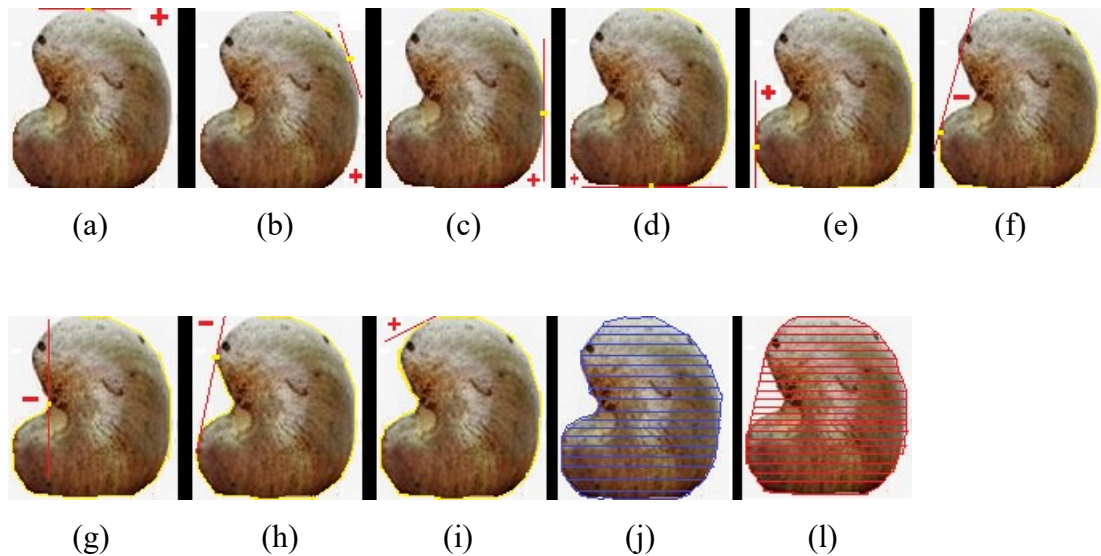


Fonte: Editado de Vinod kumar et al. (2011)

3.5.5 Convexidade de área

Conforme Olson (2011), o *solidity* ou convexidade de área é uma medida adimensional que representa a concavidade global do elemento. Essa medida é obtida com auxílio de um algoritmo que testa a orientação da derivada ao longo do perímetro do objeto, definindo como côncavo os trechos entre transições de sinal, que pode ser observado na Figura 35 na qual é demonstrada a lógica do algoritmo através de sementes de caju para reconhecer trechos côncavos, (a); (b); (c); (d); (e), que representam derivadas de sinal positivo, sendo portanto trechos convexos. Todavia, (f);(g); (h) estão em trechos com sinal negativo de derivada, estando assim em trechos côncavos. Pelas derivadas, é obtida a área côncava do objeto, representada pela letra (j), com os pontos de inversão das derivadas e as derivadas de sinal negativo mais a área obtida por todas as derivadas, sendo assim obtida a área convexa, representada pela letra (l). Deste modo obtendo a convexidade de área, cuja propriedade é definida pela Equação (15).

Figura 35-Modo utilizado pelo ImageJ para obter as áreas côncavas e convexas



Fonte: Adaptado de CEASA CAMPINAS

$$S = \frac{A_{côncava}}{A_{convexa}} \quad (15)$$

Onde S é o solidity do objeto, $A_{côncava}$ é a sua área côncava e $A_{convexa}$ é a área convexa.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

De acordo com Montgomery e Runger (2002), estatística é a ciência que auxilia em tratativas em ambientes com variabilidade. Quando esse ambiente tem grande quantidade de dados gerados, é interessante gerar um histograma, pois este será uma distribuição das frequências. Portanto, para analisar esses dados, é interessante obter um intervalo de classes sendo que, quanto maior o número de observações, maior o número de intervalos de classe. Com isso, para obter os intervalos conforme Montgomery e Runger (2002), é utilizada a Equação (16).

$$K = \sqrt{n} \quad (16)$$

Onde K é o número de classes e n é o número de observações.

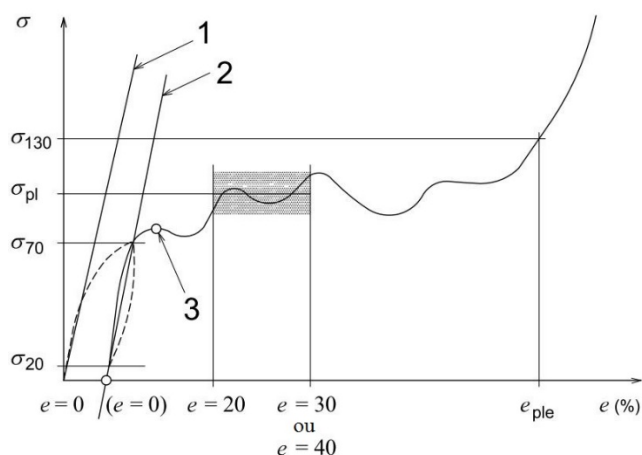
3.7 Propriedades mecânicas

A propriedade mecânica da espuma é um parâmetro muito importante. Atualmente existem diversas formas de analisar mecanicamente as espumas produzidas, tais como por ensaio de deflexão, torção e compressão, visto que esse material tem sido bastante utilizado como atenuador de impacto e em estruturas. Assim, a análise por ensaio de compressão tem sido muito utilizada para tal propósito pois, a partir dessa análise, é possível observar a energia que o material pode absorver, entre outros parâmetros. Portanto, um bom conhecimento desta propriedade de modo a saber como ela é afetada pelas modificações de processo é de suma importância.

3.7.1 Padrão da curva tensão deformação para espumas

As espumas metálicas se diferenciam de outros materiais sob compressão axial, conforme Dunkhan (2013), pois a curva de tensão X deformação é composta por três áreas bem distintas: (i) regime elástico; (ii) região do platô e (iii) região de densificação. Conforme a norma ISO 13314 (2011), é inicialmente necessário definir a tensão de platô ou tensão de planalto (σ_{pl}), definida pela tensão média aplicada (deformação de 20 a 30% ou de 20 a 40%). A partir desse resultado, é possível obter a tensão de platô final (σ_{130}), que é obtida multiplicando-se a tensão de platô por 1,3. A zona elástica é definida pela região de σ_0 até o ponto com 70% da tensão do planalto, nomeado σ_{70} . Para encontrar σ_0 , é necessário prolongar a linha entre os pontos σ_{20} (20% da tensão de platô) e σ_{70} , conforme representado pela Figura 36.

Figura 36 – Curva característica de tensão X deformação das características e dos valores em teste de compressão de materiais porosos ou materiais celulares



Fonte: ISO 13314 (2011)

3.7.1.1 Dimensões do corpo de prova e taxa de compressão

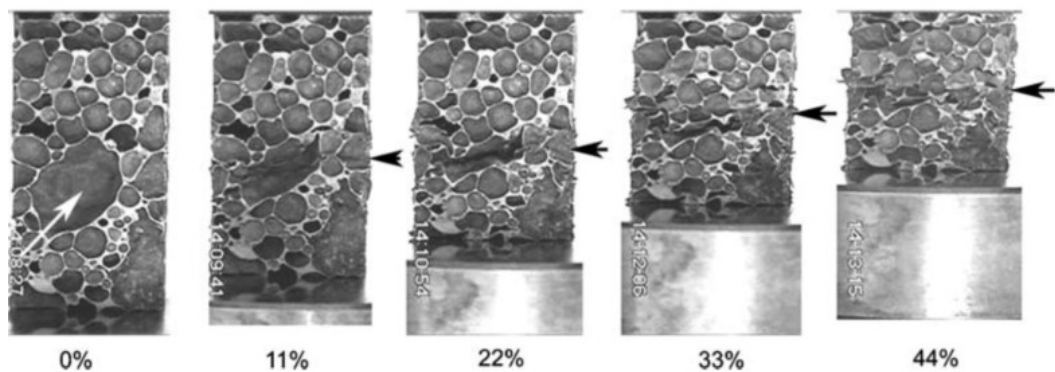
Segundo a norma ISO 13314 (2011), o material obtido pode ser cortado com qualquer equipamento, desde que este não afete as propriedades do material. No entanto, Malekjafarian e Sadrnezhaad (2012) reportam a utilização de eletroerosão para o corte do material. A quantidade de amostras testadas para a obtenção de resultados válidos deve ser no mínimo três, sendo recomendadas cinco amostras. No qual a menor dimensão deve ser dez vezes a média do tamanho dos poros e as amostras não devem ser menores que dez milímetros. Com isso, o corpo de prova a ser ensaiado deve ser paralelo e ter altura igual ou até duas vezes a largura e/ou comprimento, conforme determinado pela ISO 13314 (2011). Para espumas produzidas utilizando CaCO_3 como agente espumante, Golestanipour et al. (2011), Malekjafarian e Sadrnezhaad (2012) reportam a utilização de amostras com 30 mm X 30 mm X 40 mm e com taxa de compressão constante de $0,5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Já Byakova et al. (2014) reportou 20 x 20 x 30 mm ou 30 x 30 x 45 mm de dimensão e taxa de compressão de $1,5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

3.7.1.2 Influência durante o ensaio de compressão

Morfologia tem uma forte influência nas propriedades mecânicas do material. Conforme Milman et al. (2006), os picos gerados na análise por compressão e as espumas geradas com CaCO_3 tiveram magnitude superior a das espumas confeccionadas por TiH_2 . Uma das explicações é que os poros produzidos pelo CaCO_3 tiveram diâmetros médios

inferiores ao do TiH_2 . Portanto, o tamanho do poro é importante para melhores propriedades por compressão. De acordo com o trabalho de Guden e Yüksel (2006), durante o ensaio de compressão, a deformação se inicia em locais com poros de maior dimensão, como pode ser observado na Figura 37, onde a seta preta demonstra a região frágil após a deformação dessa região com menor resistência, ponto onde começa a ocorrer a deformação nas demais regiões.

Figura 37 – Influência do tamanho dos poros com amostra deformada com vários percentuais de deformação.



Fonte: Guden; Yüksel (2006)

3.7.1.3 Energia de absorção e eficiência da absorção

Uma propriedade importante para aplicação de espumas de alumínio é a capacidade de energia de absorção. Segundo Aboraia, Sharkawi e Doheim (2011), densidade tem uma grande influência, pois quanto maior a densidade relativa, maior a resistência a deformação, portanto gerando maior energia de absorção. Conforme a ISO13314 (2011), a energia de absorção por volume é obtida pela Equação (17).

$$W = \frac{1}{100} \int_0^{e_0} \sigma de \quad (17)$$

Onde W é a energia de absorção por unidade de volume (MJ/m^3), e_0 é o limite da tensão de compressão (%) e σ é a tensão de compressão (N/mm^2). Já a eficiência de absorção de energia pode ser obtida pela Equação (18).

$$W_e = \frac{W}{\sigma_0 \times e_0} \times 10^4 \quad (18)$$

Onde, W_e é a eficiência de absorção de energia, σ_0 é a tensão de compressão com no mínimo 50% de deformação até a região de densificação.

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 MATERIAIS PARA MODERNIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PRODUÇÃO DE ESPUMAS

O forno para fabricação de espumas (resistivo e sem atmosfera controlada) empregado na mistura e tempo de expansão das espumas foi fabricado por Ranieri (2009) para obtenção de compósitos de matriz metálica. Como a produção desse material requer rotações inferiores a 400 rpm, o mecanismo não suportava valores superiores de rotação. Com isso, algumas modernizações foram necessárias.

O mecanismo (forno mais sistema de mistura) detém duas áreas de acesso: a parte superior para mistura e adição de material e a parte inferior para entrada e retirada do cadinho, como pode ser observado na Figura 38, no qual é possível observar o motor (WEG CFW 08 Plus), o painel elétrico e uma placa de alumínio na parte inferior no qual estava fixado o relé sólido.

Figura 38- Forno vertical antes da modernização

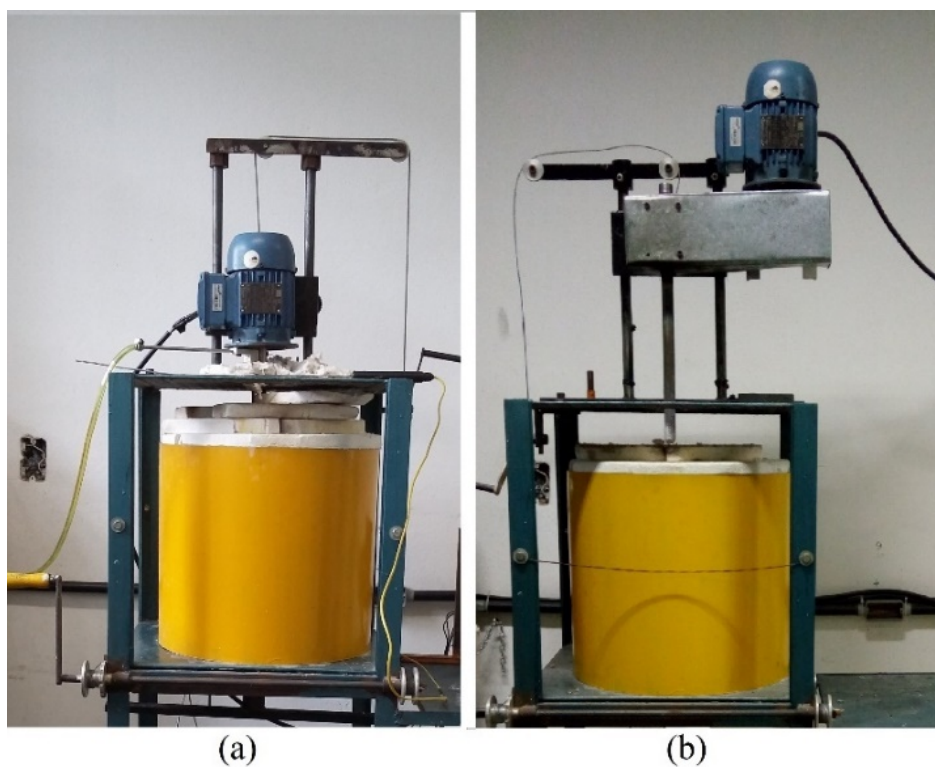


Fonte: Autoria própria

4.1.1 Parte mecânica

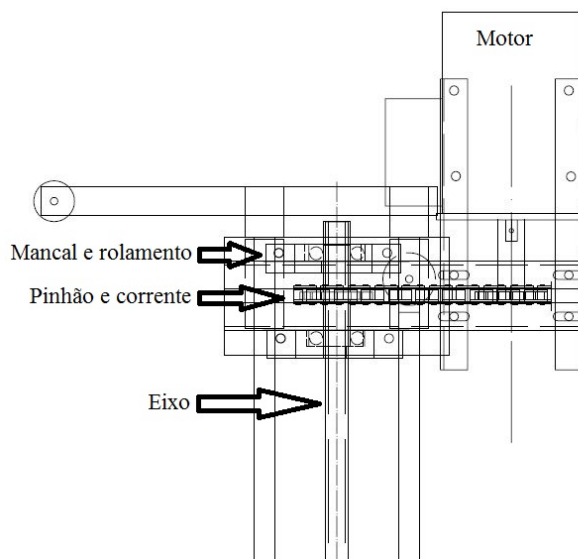
Para a modernização do sistema mecânico, foram escolhidos materiais que dessem maior mobilidade, resistência ao desgaste, que suportassem altas temperaturas e dessem rigidez ao sistema. Para o sistema de mistura, o motor foi deslocado para direita, saindo da região de acesso ao forno, como pode ser observado na Figura 39. Neste sistema, para suportar altas rotações (podendo chegar a 2000 rpm), foi montado um eixo (inox 304) com 2 rolamentos (6205 ZZ), 3 buchas de alumínio (para fixação dos rolamentos e do pinhão) e 2 mancais (alumínio). Para ligação do motor ao sistema de mistura, foram utilizadas 4 cantoneiras de aço carbono. Com isso, para transmitir o torque do motor, foram utilizados 2 pinhões (Rifel 125 CC.) e corrente de motocicleta, como pode ser observado esquematicamente na Figura 40. O sistema de mistura conta com uma carenagem de aço galvanizado para proteger o operador durante o processo. Para a hélice de mistura, foi escolhido aço rápido devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste. Os desenhos das peças modernizadas seguem no APÊNDICE A – Peças do mecanismo.

Figura 39- Deslocamento da posição do motor. (a) posição anterior e (b) posição após a modernização.



Fonte: Autoria própria

Figura 40 - Desenho esquemático do sistema de mistura.



Fonte: Autoria Própria

Para a parte inferior, foi fixado junto ao sistema inferior um termopar do tipo K. Esse sistema é responsável pela dinâmica de entrada e saída do cadinho e pela estabilização do cadinho enquanto o misturador está atuando na amostra.

4.1.2 Isolamento térmico

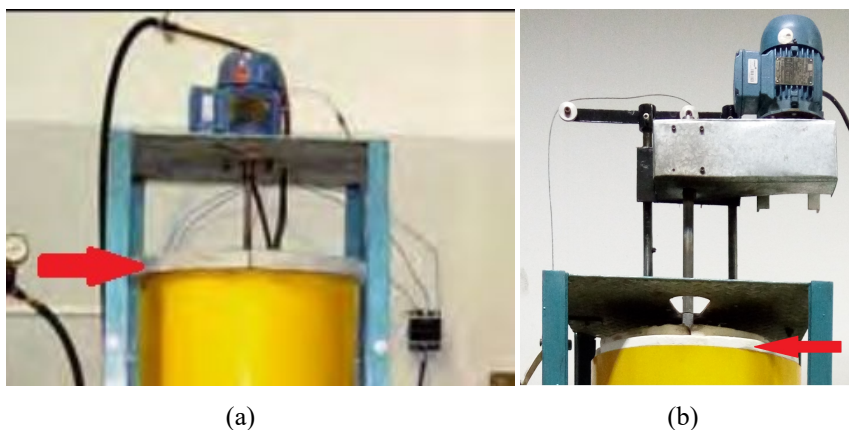
Para o isolamento térmico, foi substituído o cimento refratário na parte superior e inferior do forno de modo a reduzir perdas e aumentar a estabilidade térmica do mecanismo por placas Kaowool BK, como pode ser observado na Figura 41 na qual, com o auxílio de setas, (a) é possível observar o cimento refratário utilizado antes da modernização; (b) é possível observar a placa Kaowool BK utilizada como isolante térmico. O coeficiente térmico da placa Kaowool BK é representado no Quadro 1.

Quadro 4 - Condutibilidade térmica da placa Kaowool BK por temperatura

Temperatura (K)	Condutividade Térmica (W/mm.K)
533	0.00007
811	0.0001
1089	0.00015
1366	0.00021

Fonte: Editado de Thermal Ceramics

Figura 41-Sistema térmico do forno vertical. (a) forno antigo e (b) forno modernizado

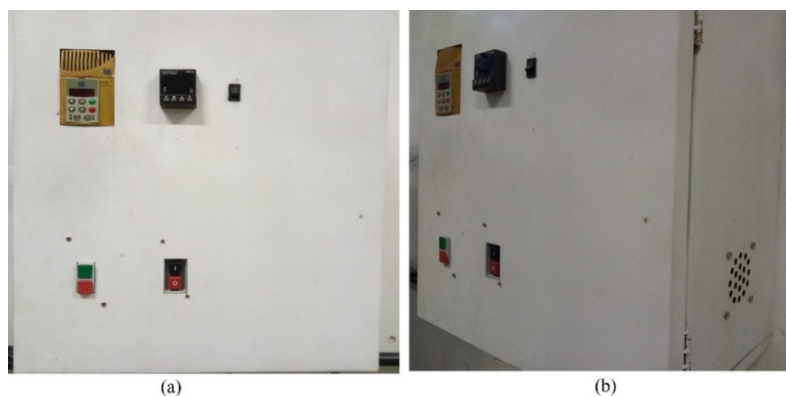


Fonte: (a) Editado de Ranieri (2009); (b) Autoria própria

4.1.3 Sistema elétrico

Foi desenvolvido um painel elétrico para o mecanismo com o intuito de proteger e retirar toda a parte elétrica da região do forno, assim prevenindo acidentes, protegendo o operador e o equipamento. Como pode ser observado na Figura 38, toda a fiação era exposta, a posição do relé sólido era ineficiente (placa de alumínio na parte inferior do forno) e o inversor de frequência (WEG CFW 08) e controlador de temperatura (SENSU CTM45) estavam muito próximos ao forno. Neste painel, conforme Figura 42 na qual (a) do lado esquerdo estão o inversor de frequência e o botão de comando do sistema do motor (inversor e motor) e do lado direito estão o controlador de temperatura do forno e do botão de comando do sistema do forno (controlador de temperatura, relé sólido e forno). Em (b), é possível notar que o sistema de ventilação forçada (contínua) para o relé sólido está fixado a um sistema aletado de alumínio. Todo o sistema foi aterrado, onde o aterramento do forno foi realizado na estrutura do forno e o aterramento do motor foi realizado na estrutura do painel elétrico. Para a relação da rotação do motor em função da frequência do inversor, a calibração foi obtida com um tacômetro óptico. Tais resultados podem ser observados na Tabela 1.

Figura 42- Pannel de controle do forno e do motor de mistura. (a) foto frontal e (b) foto lateral



Fonte: Autoria Própria

Tabela 1- Relação do inversor de frequência com a rotação do motor

Motor (rpm)	Inversor de frequência
500	571,2
600	675,6
700	780,6
800	885,6
900	990,6
1000	1099
1100	1200
1200	1302
1300	1405
1400	1508
1500	1613
1600	1716
1700	1819
1800	1923

4.2 MATERIAIS PARA PRODUÇÃO DE ESPUMAS

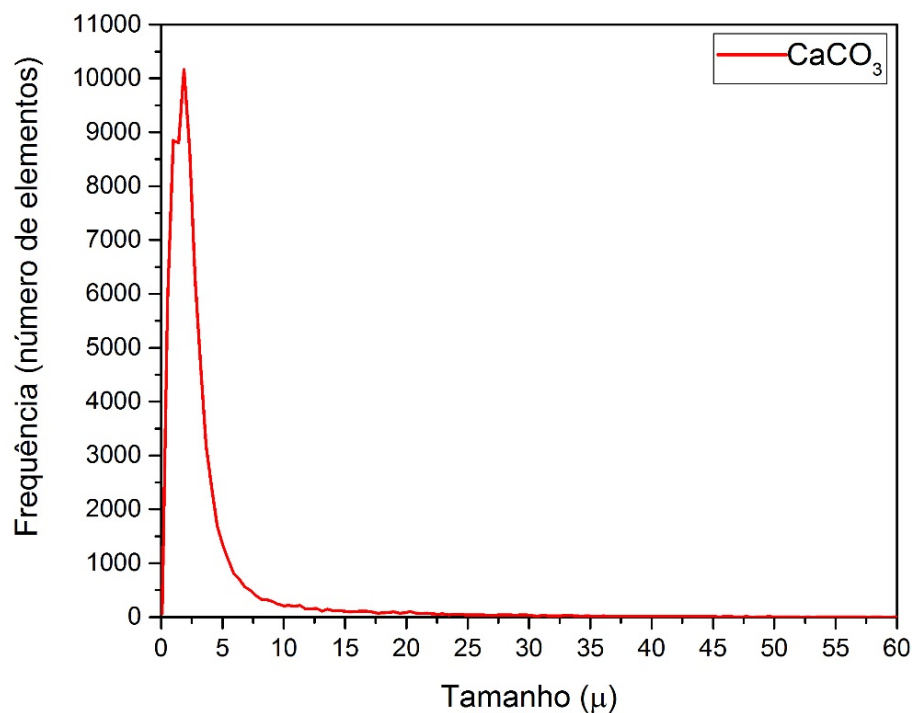
Para a produção das espumas, foi utilizada uma liga de alumínio silício hipereutética comprada em retíficas. A composição química dos pistões pode ser observada na Tabela 2, que foi determinada por espectrometria de emissão óptica utilizando-se um espectrômetro Ametek Spectromaxx, modelo LMF05, pertencente ao Laboratório de Materiais da Fatec, Sorocaba. Esta liga foi selecionada pela sua alta disponibilidade e baixa viscosidade.

Tabela 2- Médias dos elementos da liga de alumínio hipereutético

Elementos químicos	Concentração (%)
Si	13,53
Fe	0,20525
Cu	0,8955
Mn	0,0359
Mg	0,93375
Cr	0,00805
Ni	1,2
Zn	0,01665
Ti	0,07295
Sn	0,00965
Pb	0,007825
Al	83,05

Fonte: Produção do próprio autor

O carbonato de cálcio foi doado pela empresa Labsynth produtos para laboratórios Ltda, localizada em Diadema-SP. Foi utilizada microscopia óptica de luz transmitida para a obtenção do tamanho do particulado. A partir das imagens geradas pelo microscópio Zeiss Axioskop 40, localizado no laboratório de microscopia óptica do LAIMat, foi possível obter a frequência dos tamanhos dos particulados, como pode ser observado na Figura 43. Pode-se ressaltar que a maior parte dos particulados está dimensionado entre 0 e 5 μ . Os teores dos compostos químicos podem ser observados na Tabela 3, que foram obtidos por espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Bruker, modelo S8 Tiger. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1020 °C por 2h, e o laudo do resultado segue no item ANEXO A – Laudo químico. Os valores foram normalizados a 100%. Pela análise de difração de raios X, segundo Figura 44, o CaCO₃ doado pela Labsynth se comportou de acordo com os picos das fases formadas, assim como o padrão do carbonato de cálcio. Para a análise de raios X, os parâmetros de análise foram: 2 θ = 10 a 90°; 25 mA; 40KV; passo de 0,02°; tempo de contagem de 0,35; fenda de 0,6 mm e a 15 rpm.

Figura 43 - Frequência do tamanho de partículas de CaCO_3 

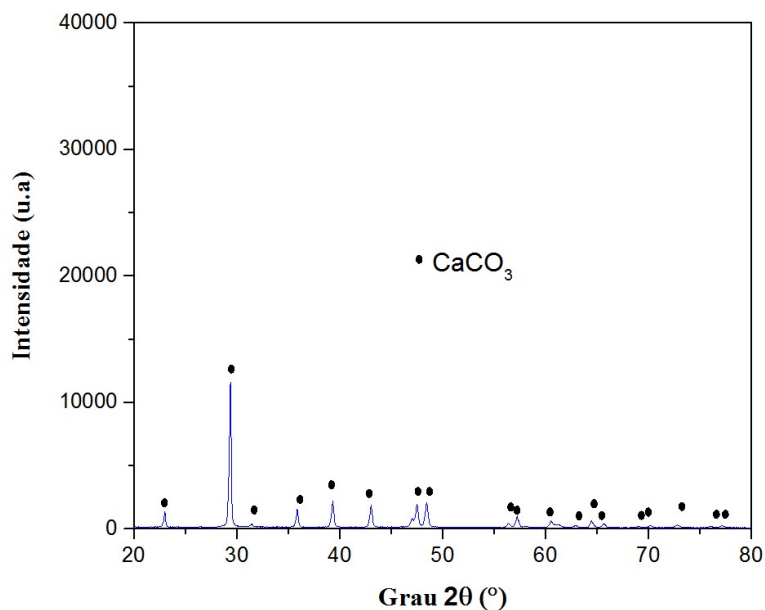
Fonte: Autoria Própria

Tabela 3- Análise dos compostos químicos do CaCO_3 por espectrômetro de fluorescência de raios X

Composto químico	Composição química (%)
MgO	0,189
Al_2O_3	0,025
SiO_2	0,151
P_2O_5	0,554
SO_3	0,012
Cl	0,03
K_2O	0,007
CaO	55,2
Fe_2O_3	0,016
SrO	0,254
ZrO_2	0,006
PF	43,5

Fonte: Laboratório de caracterização Tecnológica, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

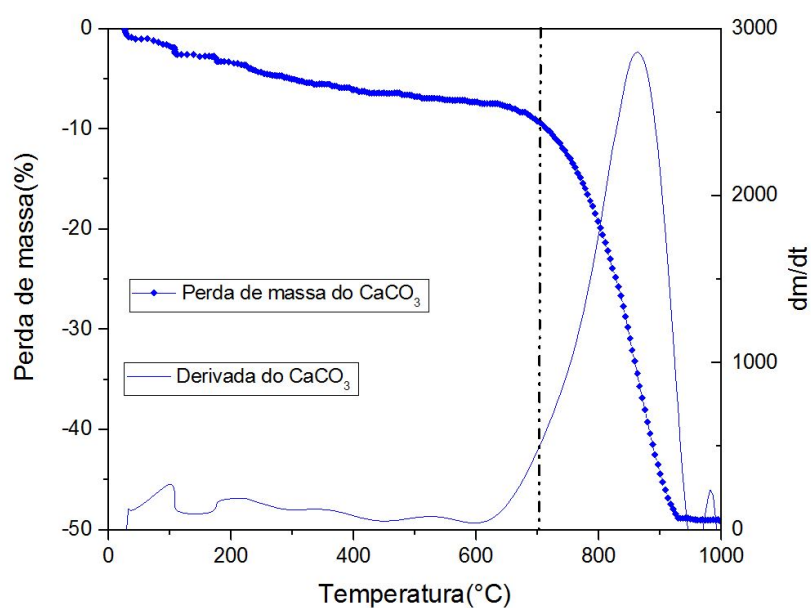
Figura 44- Análise de difratometria de raios X do agente espumante



Fonte: Autoria própria

A análise termogravimétrica do CaCO₃ é uma ferramenta necessária para identificar o comportamento do material quando submetido a variação térmica, como pode ser observado na Figura 45 com a qual é possível notar a influência da temperatura na perda de massa do carbonato de cálcio utilizado. A análise foi realizada em atmosfera não controlada, com taxa de aquecimento de 3,5°C/min e temperatura de até 1000°C.

Figura 45- Gráfico de análise termogravimétrica



Fonte: Autoria própria

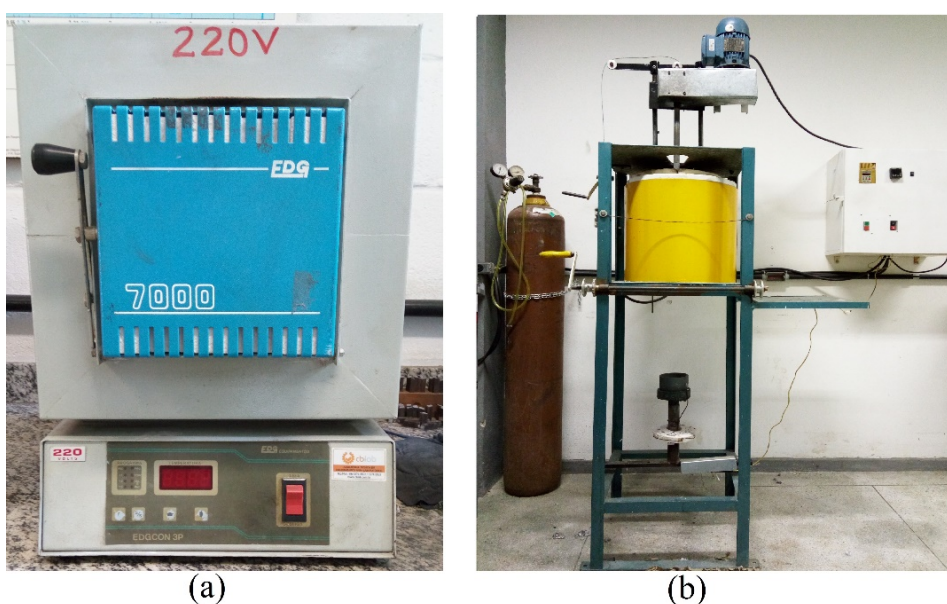
4.3 METODOLOGIA DE MODERNIZAÇÃO

Para modernização, usinagem dos mancais e buchas de fixação do eixo, foi utilizado o torno mecânico Imor, eletroerosão por penetração da marca ENGEMAQ EDM 200 NC, eletroerosão a fio marca AgieCharmilles, modelo EDM FW2U e fresa mecânica modelo MB CROMAT 4B. Todos os equipamentos utilizados estão localizados no centro de usinagem e fresamento da Unesp, campus de Guaratinguetá. O desenho das peças usinadas seguem no APÊNDICE A – Peças do mecanismo.

4.4 METODOLOGIA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Para a fabricação das espumas de alumínio, foram utilizados dois fornos resistivos, como pode ser observado na Figura 46, sendo (a) o forno mufla que é responsável pela fusão da matriz de alumínio e (b) o forno vertical que serve para a mistura do particulado e tempo de expansão (fabricação da espuma).

Figura 46- Fornos utilizados durante o processo. (a) forno para fusão; (b) forno para mistura e expansão do material



Fonte: Autoria própria

O processo foi dividido em quatro etapas, sendo estas similares aos utilizados por Gergely e Clyne (2004) e Gergely, Curran e Clyne (2003): (i) secagem do carbonado de cálcio (200°C por duas horas) e fusão de aproximadamente 0,45 kg da liga de alumínio em cadinho de carbetto de silício (700°C); (ii) 3,5% em massa de carbonato de cálcio é polvilhado no fundo do cadinho de aço, o alumínio líquido é vertido neste cadinho (de aço carbono com 82 mm de

diâmetro), e este é colocado ao forno a 700°C. O material é misturado a 1000 rpm por 180 s; (iii) após ter sido completada a mistura, o sistema de mistura é erguido e o material (alumínio mais CaCO_3) é deixado no forno por três tempos de expansão diferentes, 150, 300 e 450 s; (iv) após a mistura, o material é retirado do forno para resfriar ao ar ambiente.

4.5 METODOLOGIA PARA ANÁLISE DAS AMOSTRAS

Após a fabricação, as amostras foram seccionadas em cortes longitudinais, onde o centro da amostra foi mantido como centro do material seccionado, transformando-o de uma secção circular para uma secção quadrada. A espessura e a largura das amostras cortadas foram de 40 X 40 mm. Os cortes foram realizados com uma máquina de corte de fita, marca ROMARFRA, modelo RMF, 400-S, utilizando-se uma lâmina para alumínio de 5/16 com 4 dentes/pol.

4.5.1 Análises físicas do material

Para as análises de densidade aparente, densidade relativa, porosidade e densidade gradual, as amostras do item 4.5 foram cortadas em 4 cortes transversais. O primeiro corte foi realizado a partir de 20 mm da base e os demais cortes foram realizados de 20 em 20 mm. Para análise de imagem, foram confeccionadas 9 amostras (3 amostras por tempo de processo), totalizando 36 corpos de prova. Para a realização desses cortes, foi utilizada uma máquina de corte de disco, marca Arotec, modelo Arocor 40, com disco modelo Arotec AA3 0613225 a 2000 rpm. Posteriormente, as amostras foram levadas a uma estufa a 200°C para secagem. Durante o processo de secagem, o material foi pesado sucessivamente e, uma vez que a massa estivesse estabilizada, foram obtidas as medições do peso e das respectivas dimensões com auxílio de uma balança de precisão marca Marte e modelo Al500C e um paquímetro. Para a análise de densidades aparente e gradual, os resultados foram obtidos conforme o item 3.5.2. Na análise de densidade relativa, foi utilizada a Equação (10). A porosidade foi obtida utilizando-se as Equações (16) e (17). A sequência de organização segue conforme Tabela 4, onde a altura de 20 mm representa o primeiro corte a 20 mm da base, 40 mm é o segundo corte a 40 mm da base da amostra, e 60 e 80 mm seguiram o mesmo padrão.

Tabela 4-Tabela de referência das amostras por diferentes tempos de expansão e diferentes alturas.

Tempo de expansão (s)	Altura (mm)	Referência
150	20	A150-20
	40	A150-40
	60	A150-60
	80	A150-80
300	20	A300-20
	40	A300-40
	60	A300-60
	80	A300-80
450	20	A450-20
	40	A450-40
	60	A450-60
	80	A450-80

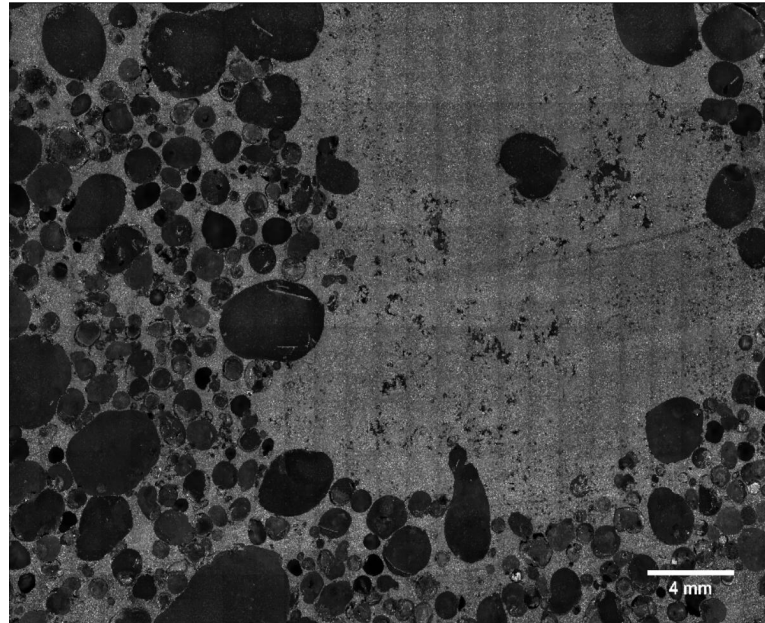
4.5.2 Análise por processamento digital de imagens

Para caracterização por imagem, a parte superior das amostras do item 4.5.1 foi impregnada com uma mistura de 10 ml de resina acrílica, Arotec para embutimento a frio, 30 gotas de corante alimentício azul e 5 ml de líquido auto-polimerizante, Arotec. Após a cura da resina, as amostras foram desbastadas com lixas de carbetto de sílcio com granulometrias de 400, 600, 800, 1200, 1500.

4.5.2.1 Análise morfológica e diâmetro de poros

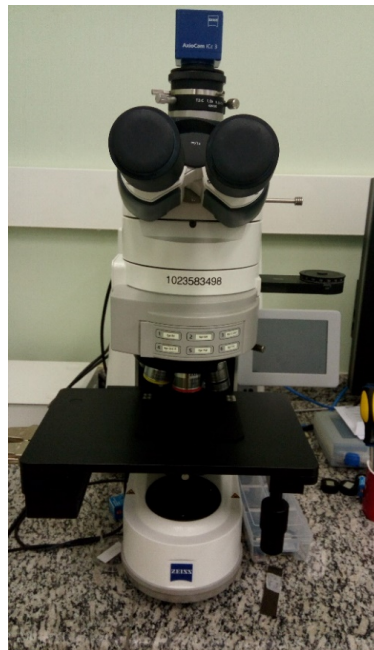
Nas amostras desbastadas no item 4.5.2, foi realizado o mapeamento com 25 x 25 imagens, gerando assim dois tipos de arquivo: um com uma pilha de 625 imagens e o outro com uma única imagem de 625 fotos, como pode ser observado na Figura 47. Todas imagens foram geradas em escala de cinza. Para a realização da sequência de imagens, foi utilizado um microscópio motorizado, marca Zeiss, modelo Imager.Z2m, conforme apresentado na Figura 48. Os espécimes A150-20, A300-20 e A450-20, foram obtidos em campo escuro e as demais amostras foram em campo claro.

Figura 47- Imagem formada pela sequência de 625 fotos de uma amostra A450-20



Fonte: Autoria própria

Figura 48- Microscópio Zeiss Imager.Z2m, utilizado para aquisição das imagens por mapeamento

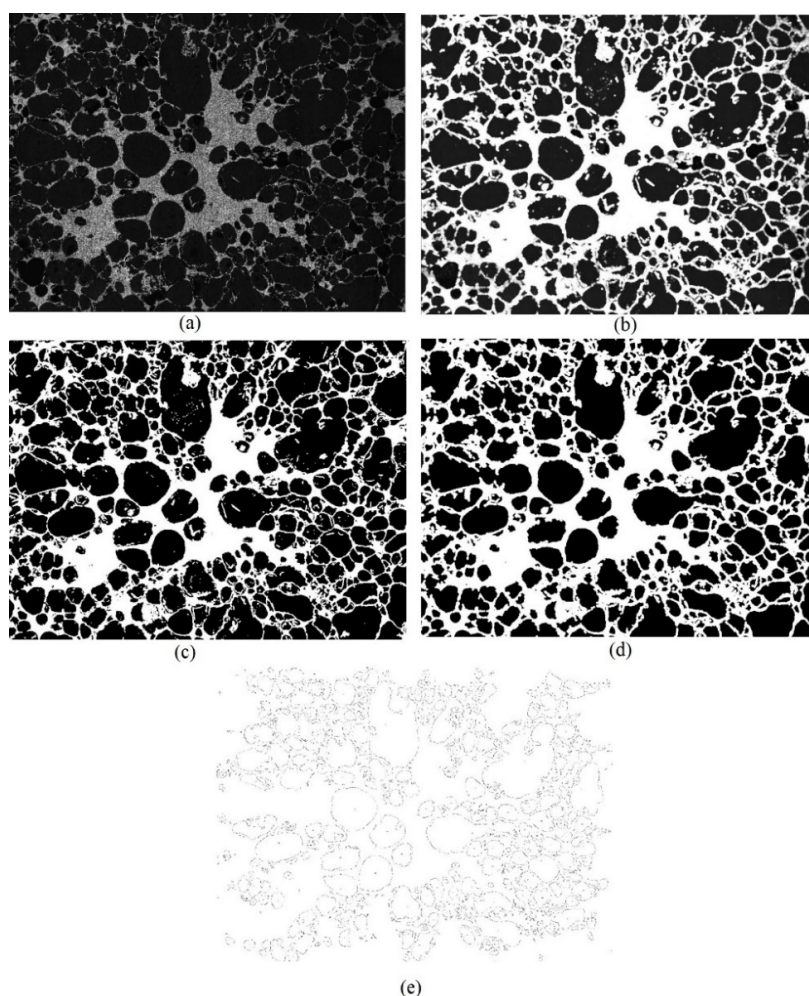


Fonte: Autoria própria

Após a montagem das 625 imagens em uma única imagem, estas foram manipuladas com o *software* ImageJ através dos seguintes passos: foi aberta a imagem no ImageJ e o *set scale* foi processado (vinculando o pixel a uma medida conhecida); três sequências de filtro *maximum*, raio de 2, *mininum*, raio de 1; *threshold* (transforma a imagem em binário); *Fill*

Holes e *analyse particles* (ferramenta para obter as variáveis respostas), como pode ser observado na Figura 49, em que (a) representa a imagem como obtida, (b) a sequência de filtros *maximum* e *minimum*, (c) filtro *Threshold*, (d) Filtro *Fill the holes* e (e) *Analyse particles* onde é obtido o diâmetro equivalente (obtido pela área do poro), circularidade e solidity de cada um dos poros. Posteriormente, foi gerado um arquivo Exel com o respectivo resultado. Os resultados foram tratados e as relações por tempo e altura de processo foram obtidas. Para obtenção do intervalo de classes, a Equação (19) foi utilizada.

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*



Fonte: Autoria própria

Todos os resultados obtidos foram analisados pela Análise de variância (ANOVA), com índice de confiança de 95%, pelo teste de Tukey e análise dos efeitos.

4.5.2.2 Análise da dispersão dos poros

Para a dispersão dos poros, foi utilizada a pilha de imagem (com 625 fotos) conforme item 4.5.2.1. Nessa pilha, foi realizada a análise da fração de área da imagem. Como os níveis de cinza são de 0 a 255, foi possível correlacionar a fração de área (P e $\bar{P}$) com o nível de cinza com o auxílio da Equação (19). A partir dessa relação de níveis de intensidade, foi montada uma matriz (25x25) onde cada elemento é representado pela intensidade de nível de cinza. Posteriormente, essa matriz de intensidade foi convertida em uma matriz imagem de níveis de cinza. Cada um desses níveis foi correlacionado a uma cor, gerando uma imagem colorida da densidade da distribuição da fração porosa da secção analisada.

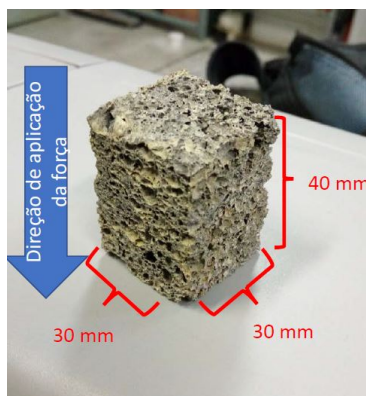
$$A_{ij} = \left[255 \cdot \left(\frac{P_{ij} - \bar{P}}{\bar{P}} \right) \right] + 127 \quad (19)$$

Onde A_{ij} é o valor do nível de cinza correlacionado com a fração de área de um elemento, P_{ij} é a fração de área de uma imagem, $\bar{P}$ é a fração de área média das 625 imagens.

4.5.3 Análise mecânica das espumas

A análise mecânica foi realizada em 9 amostras (3 de cada tempo de expansão), conforme item 4.5, que foram novamente seccionadas, de modo que tenham uma dimensão de 30 x 30 x 40 mm, conforme Figura 50. Para esses cortes, foi utilizado a mesma máquina de eletroerosão descrita no item 4.3. O ensaio de compressão foi realizado com uma máquina universal Shimadzu a uma taxa de compressão 1,5 mm/ min utilizando-se uma célula com carga de 50 kN.

Figura 50- Representação esquemática das dimensões do corpo de prova e a direção da aplicação da força no ensaio de compressão



Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados, foi obtida a tensão de platô, a energia de absorção e eficiência de absorção do material através das Equações (17) e (18), respectivamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MODERNIZAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Todo o sistema se comportou muito bem, mesmo com inúmeras repetições de processo, visto que foram realizados mais de 130 ensaios, embora alguns desgastes e folgas tenham sido notados. A montagem do sistema de mistura está descrita no APÊNDICE B – Montagem.

5.1.1 Sistema de mistura

O posicionamento do motor tornou-se muito interessante, visto que sua temperatura de serviço (durante todo o processo) ficou por volta de 40°C, ou seja, temperatura recomendada pelo fabricante. Na posição anterior, esta temperatura estava compreendida entre 70 à 90 °C.

O eixo montado com buchas não demonstrou ser adequado. Em alguns experimentos, principalmente os iniciais, o eixo cedia e fazia com que as hélices esbarrassem na base do cadinho, rasgando assim sua parede. Desta forma, o alumínio vazou na base do sistema inferior (do forno) e o experimento foi fracassado.

O sistema com pinhão, corrente, mancal rolamentado, motor e eixo provou ser adequado. Mesmo em rotações de até 2000 rpm, a vibração do sistema era baixa. A carenagem foi importante, pois o operador teve segurança durante o processo. A posição entre a fase de mistura e expansão foi ao lado do sistema de mistura, pois é o local onde está posicionada a alavanca para erguer o sistema de mistura, como pode ser observado na Figura 51.

Figura 51- Foto representativa da posição do operador no momento em que o sistema de mistura foi retirado durante o processo.



Fonte: Autoria própria

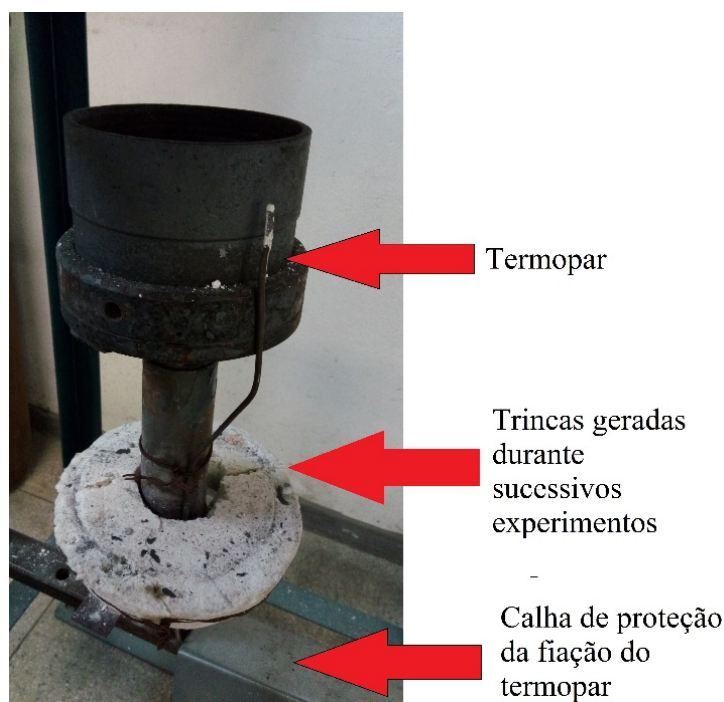
5.1.1.1 Desgastes do equipamento

Em relação ao sistema de mistura, foi notado desgaste, principalmente do rolamento próximo ao forno que ficou com folga e chegou a travar em certos momentos, o que se tornou um empecilho para o processo. Nas demais peças, não foram notadas diferenças.

5.1.2 Isolante térmico

A utilização das placas térmicas Kaawool Bk se mostrou uma via adequada. Todavia, algumas influências do processo foram notadas. Devido à dinâmica de processo, ocorreram trincas nas placas, como pode ser observado na Figura 52, o que ajudou a promover troca convectiva do forno, tornando-o menos estável termicamente e reduzindo a temperatura durante o processo. Nesta figura, é possível notar a posição do termopar cuja localização foi interessante devido ao fato do termopar e das amostras estarem na mesma região térmica do forno. Nessa imagem, também pode-se observar a calha de proteção da fiação do termopar. Essa peça foi necessária, para proteger a fiação, quando ocorria vazamento/rompimento das paredes do cadinho.

Figura 52- Desgaste gerado por sucessivos processos no mecanismo inferior do forno vertical



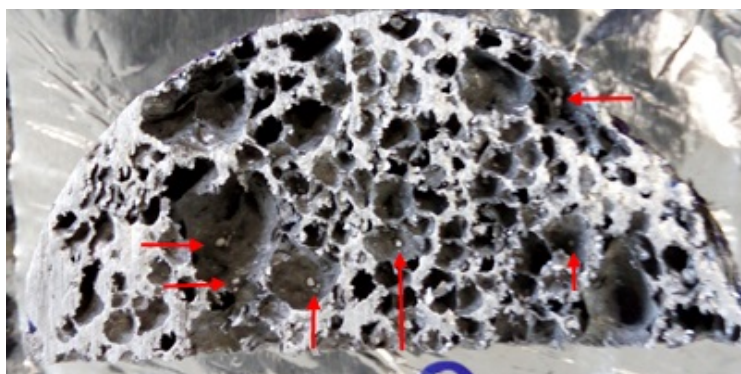
Fonte: Autoria própria

5.2 ANÁLISE INICIAL DO PROCESSO

O processo similar ao utilizado por Gergely e Clyne (2004) e Gergely, Curran e Clyne (2003) se tornou uma ótima opção, pois mesmo com diferenças do processo que são importantes para a produção de alumínio através da metodologia Alporas, como quantidade de alumínio, geometria de hélice, tempo de expansão, tamanho de particulado, entre outros, foi possível produzir espumas com repetibilidade de produção.

A partir das amostras produzidas durante o seccionamento lateral, algumas influências do processo e do agente espumante foram notadas. Primeiramente, o comportamento do CaCO_3 . Em todas as amostras, foram registrados resíduos deste agente que são similares aos apresentados pela patente Alcoa Inc. (2008), como ressaltado por setas na Figura 53. Estes resíduos são reportados por Mondal et al. (2013) e podem ser explicados pelas próprias análises termogravimétricas e pela perda ao fogo, representadas na Figura 45 e Tabela 3 respectivamente, no qual o material tem menos de 10% de perda de massa a 700°C (temperatura de processo).

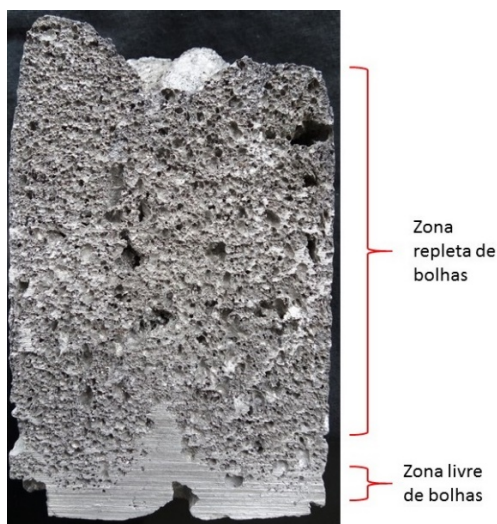
Figura 53- Foto do carbonato de cálcio retido nos poros da amostra



Fonte: Autoria própria

Conforme reportado por Zhou et al. (2008), outra influência é o efeito de drenagem que pode ser reconhecido pelo surgimento da zona livre de bolhas, notado em todas as amostras produzidas, conforme pode ser observado pela Figura 54.

Figura 54- Corte longitudinal das espumas diferenciando-se zona repleta de bolhas de zona livre de bolhas.



Fonte: Autoria própria

A influência na superfície externa pode ser observada na Figura 55 com o surgimento de macro poros próximos à superfície da espuma. A face externa dessa região apresenta um relevo diferenciado das demais que foi provocado por coalescência e reorganização dos poros. Isto desestabiliza a estrutura que leva a esta característica, fato reportado por Lázaro et al. (2013).

Figura 55- Influência na superfície externa devido a coalescência e desestabilidade da estrutura porosa



Fonte: Autoria própria

5.3 ANÁLISE DE DENSIDADE APARENTE

Devido ao efeito de drenagem intensificado pela baixa viscosidade da liga, se faz necessário analisar o material de forma gradual, conforme He et al. (2014). Para a análise por densidade aparente, os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-150	Densidade aparente g/cm ³			Média g/cm ³	Desvio padrão g/cm ³
20 mm	1,61	2,05	2,27	1,98	0,34
40 mm	0,40	0,42	0,45	0,42	0,02
60 mm	0,33	0,26	0,28	0,29	0,03
80 mm	0,25	0,21	0,20	0,22	0,03

Tabela 6- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas

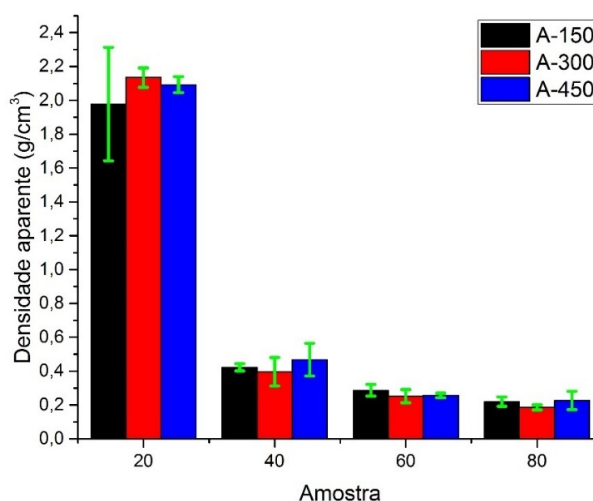
Amostra A-300	Densidade aparente g/cm ³			Média g/cm ³	Desvio padrão g/cm ³
20 mm	2,07	2,16	2,17	2,13	0,06
40 mm	0,47	0,31	0,41	0,40	0,08
60 mm	0,30	0,23	0,23	0,25	0,04
80 mm	0,20	0,19	0,17	0,19	0,01

Tabela 7- Resultados de densidade aparente, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-450	Densidade aparente g/cm ³			Média g/cm ³	Desvio padrão g/cm ³
20 mm	2,09	2,04	2,14	2,09	0,05
40 mm	0,36	0,50	0,55	0,47	0,10
60 mm	0,24	0,27	0,26	0,26	0,01
80 mm	0,19	0,29	0,20	0,23	0,05

A partir dos resultados obtidos, é possível plotar um gráfico com as médias e seus respectivos desvios padrão, conforme Figura 56 através da qual é possível observar a influência do efeito de drenagem por densidade aparente. Regiões próximas à base tiveram densidades maiores, como reportado por He et al. (2014), visto que esta foi sendo reduzida com acréscimo da altura.

Figura 56- Gráfico comparativo de densidade aparente por região com os respectivos desvios por altura e tempo de processo.



Fonte: Autoria própria

Para o cálculo da ANOVA para densidade aparente, o $F_{\text{crítico}}$ é de 1,76 para o grau de liberdade do fator 2 com grau de liberdade de erro de 6. No intervalo de 20 mm, pela ANOVA, o F resultou em 38,02, logo maior que o $F_{\text{crítico}}$. Portanto, através do teste Tukey para altura, foi possível observar que as amostras de 150 s tiveram diferença significativa em relação às amostras com 300 e 450 s. Contudo, não houve diferença significativa entre 300 e 450 s.

5.4 ANÁLISE DE DENSIDADE RELATIVA E POROSIDADE

Os efeitos observados na densidade aparente podem ser observados tanto na densidade relativa como na porosidade. Uma vez que a forma de calcular-se a densidade aparente aproxima-se das Equações (10) e (11), as respostas por análise estatística serão as mesmas, portanto, não há necessidade de realizá-las novamente. Contudo, os resultados por análise de densidade relativa seguem nas Tabelas (8), (9) e (10). A partir desses resultados, é possível plotar um gráfico de densidade média por tempo de processo e região, e seus desvios padrão, como pode ser observado Figura 57.

Tabela 8- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-150	Densidade Relativa			Média	Desvio padrão
20	0,59	0,76	0,84	0,73	0,12
40	0,15	0,15	0,16	0,16	0,01
60	0,12	0,09	0,10	0,11	0,01
80	0,09	0,08	0,07	0,08	0,01

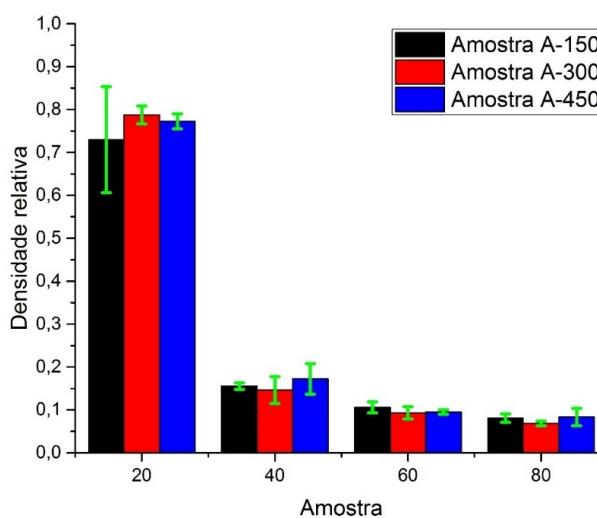
Tabela 9- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-300	Densidade Relativa			Média	Desvio padrão
20	0,76	0,80	0,80	0,79	0,02
40	0,18	0,11	0,15	0,15	0,03
60	0,11	0,08	0,08	0,09	0,01
80	0,07	0,07	0,06	0,07	0,01

Tabela 10- Resultados de densidade relativa, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-450	Densidade Relativa			Média	Desvio padrão
20	0,77	0,75	0,79	0,77	0,02
40	0,13	0,18	0,20	0,17	0,04
60	0,09	0,10	0,10	0,09	0,00
80	0,07	0,11	0,08	0,08	0,02

Figura 57- Gráfico comparativo de densidade relativa por região com os respectivos desvios por altura e tempo de processo



Fonte: Autoria própria

Nas análises de porosidade, as amostras apresentaram diferentes porosidades por altura. Todas as regiões de 20 mm tiveram redução de porosidade devido ao efeito de drenagem e ao aumento da espessura das paredes, como reportado por Kadoi e Nakae (2011), no qual tais efeitos são intensificados em regiões próximas ao fundo. Isto gerou menores porosidades, onde a média geral das amostras (A150-20, A300-20 e A450-20) foi de 23,67%. Para todas as regiões e tempos, a média de porosidade foi de 72,57%. Os resultados das porosidades por região, tempo de processo e seus respectivos desvios padrão podem ser observados nas Tabela 11, Tabela 12 e Tabela 13. Com os resultados obtidos, foi possível plotar um gráfico da porosidade média por tempo de processo e região, como pode ser observado na Figura 58. Nesta, pode-se notar que nas regiões de 40, 60 e 80 mm, o material obteve porosidades elevadas, acima de 80%, e as porosidades chegaram a valores superiores a 90% em 80 mm.

Tabela 11- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 150 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-150	Porosidade (%)			Média (%)	Desvio padrão
20	40,53	24,29	16,24	27,022	0,12
40	85,11	84,59	83,57	84,422	0,01
60	88,01	90,52	89,69	89,403	0,01
80	90,82	92,11	92,79	91,906	0,01

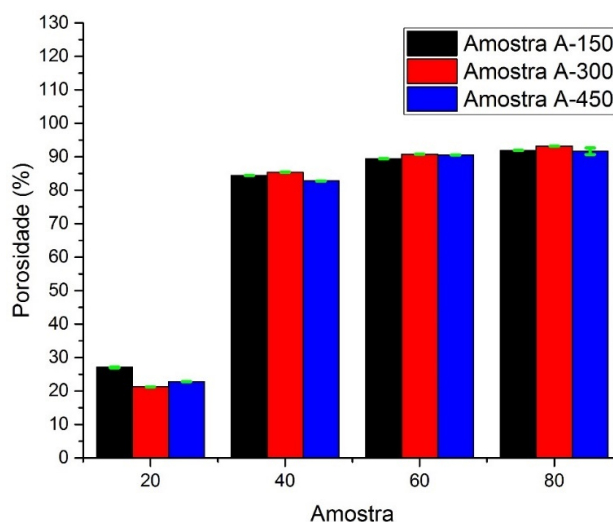
Tabela 12- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 300 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-300	Porosidade (%)			Média (%)	Desvio padrão
20	23,67	20,22	19,81	21,234	0,02
40	82,50	88,64	84,96	85,369	0,03
60	89,06	91,52	91,51	90,698	0,01
80	92,61	93,08	93,70	93,131	0,01

Tabela 13- Resultados de porosidade, média e desvio padrão para amostras com 450 s de tempo de expansão em diferentes alturas

Amostra A-450	Porosidade (%)			Média	Desvio padrão
20	22,714	24,554	21,054	22,774	0,018
40	86,734	81,658	79,873	82,755	0,036
60	91,100	90,211	90,264	90,525	0,005
80	93,122	89,348	92,461	91,644	0,980

Figura 58- Gráfico comparativo da porosidade entre alturas similares por diferentes tempos de expansão, com os respectivos desvios por altura e tempo de processo



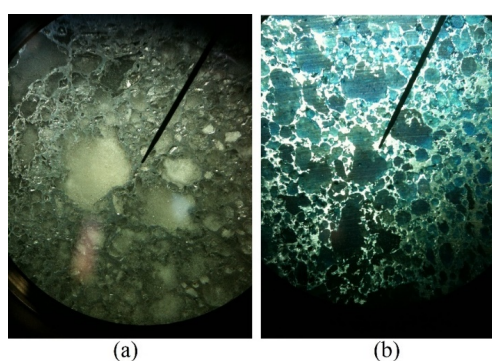
Fonte: Autoria própria

Para a análise de porosidade média por tempo de expansão, não foi utilizada caracterização por imagem conforme Vinod Kumar et al. (2011), pois o material produzido não obteve uniformidade da matriz porosa, como pode ser observado nas Figura 56, 57 e Figura 58.

5.5 ANÁLISE POR IMAGEM

Para a aquisição das imagens, a metodologia por embutimento a frio associado à utilização de corante se tornou muito interessante, que pode ser observado na Figura 59 onde (a) é sem corante e (b) é com corante. O corante auxiliou em todas as análises para a aquisição por morfologia global dos poros, pois ele deu o contraste necessário durante a realização do *Threshold*.

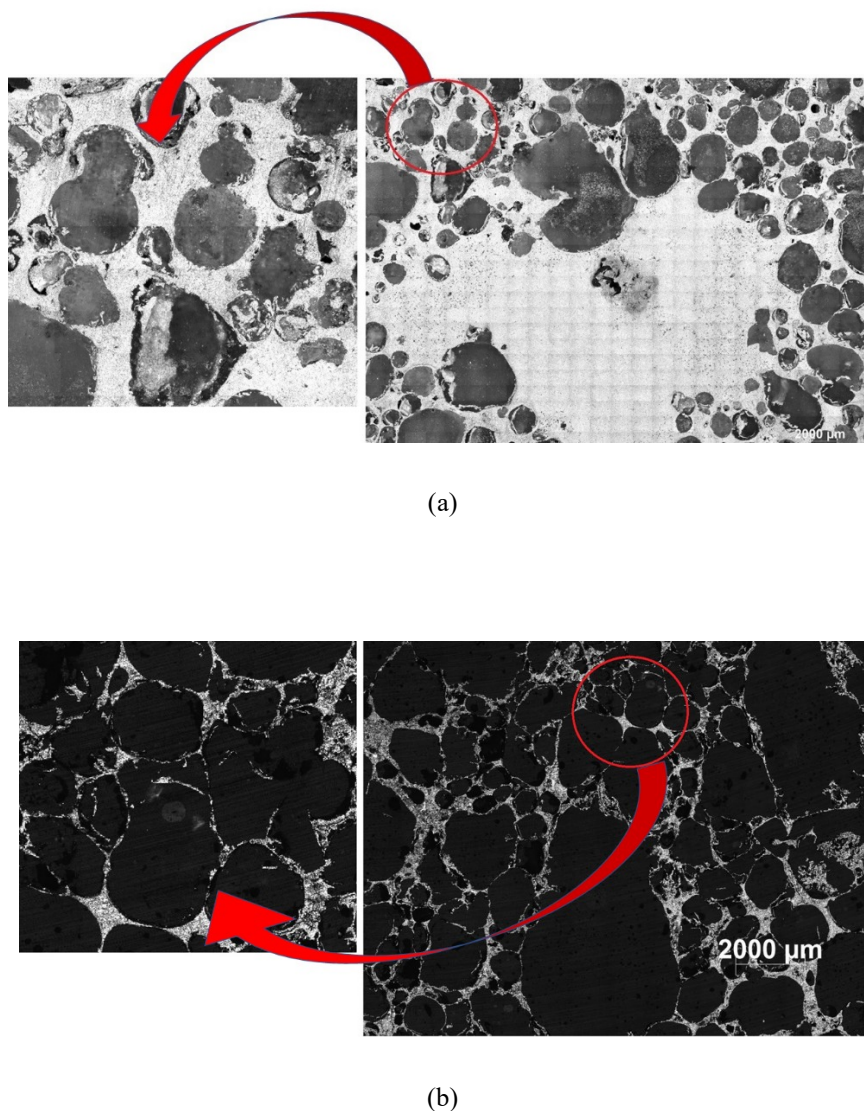
Figura 59- Comparativo de resina sem (a) e (b) com corante



Fonte: Autoria Própria

Durante a análise por imagem, algumas influências do processo de fabricação foram notadas, como pode ser observado na Figura 60 onde (a) pode ser apontado o efeito de coalescência dos poros e (b) o efeito de encolhimento, ambos indicados respectivamente por seta. Pode-se notar o afunilamento das paredes e o *plateau border* através de uma região com concentração de líquido, como reportado por Koerner (2008).

Figura 60- Efeitos em espumas de alumínio silício hipereutético, (a) coalescência dos poros; (b) efeito de encolhimento



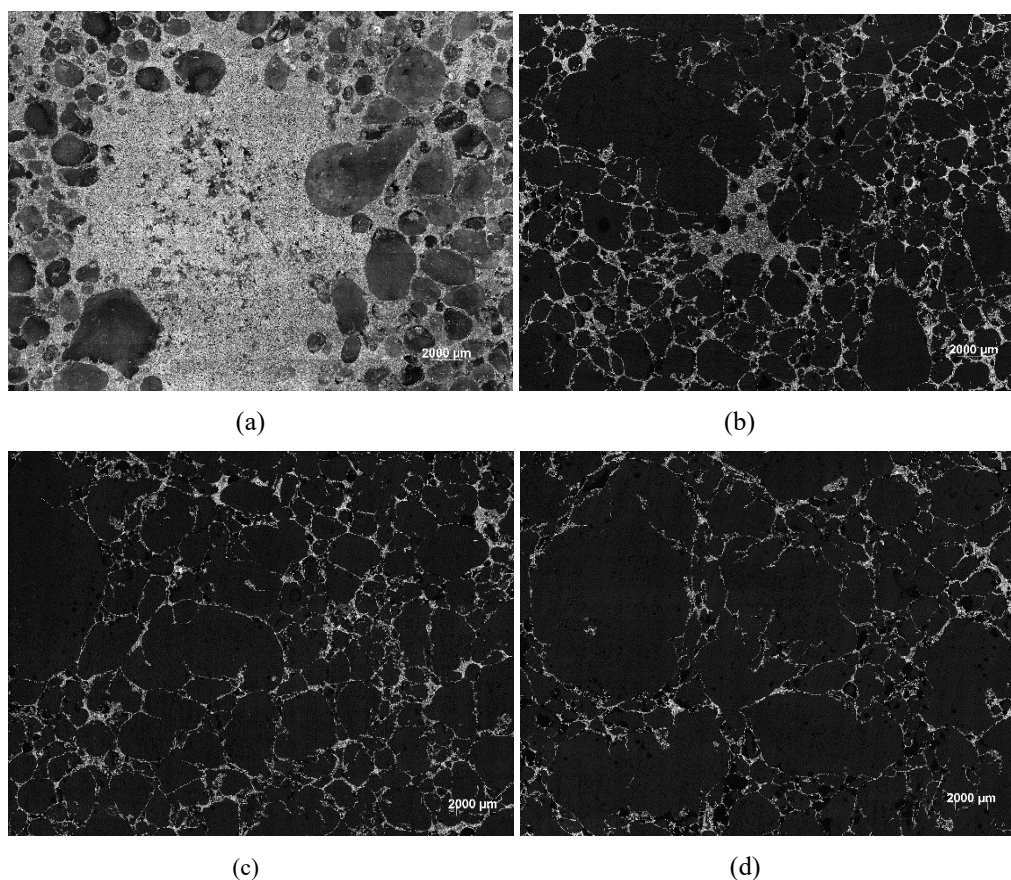
Fonte: Autoria própria

O efeito de encolhimento foi perceptível em todos os tempos de fabricação. Esse foi mais aparente em amostras com 40, 60 e 80 mm, como pode ser observado pelas imagens no APÊNDICE C – Análise de imagens digitais.

Outro efeito que teve grande influência, uma vez que a liga utilizada tem baixa viscosidade, foi o de drenagem. Este efeito foi mais aparente nas amostras das regiões de 20 e 40 mm, como pode ser observado na Figura 61. Nessas imagens, pode-se observar a influência sobre os poros e como eles estão dispersos pela matriz: (a) imagem a 20 mm da base; (b) 40 mm da base; (c) 60 mm da base; (d) 80 mm da base. As demais amostras estão no APÊNDICE C – Análise de imagens digitais.

Figura 61- Imagens de amostras com 150 s de tempo de expansão por diferentes alturas.

(a) A150-20; (b) A150-40; (c) A150-60; (d) A150-80



Fonte: Autoria própria

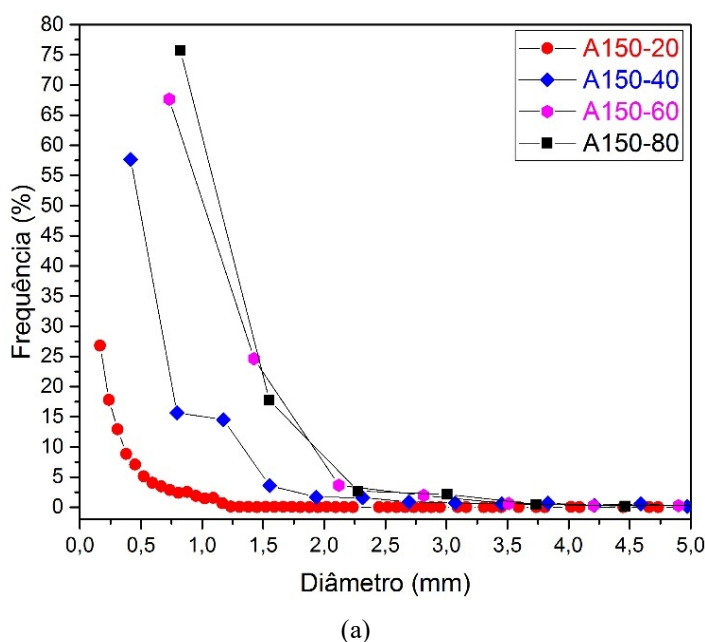
Esta diferença de fração de área foi analisada pela ANOVA, avaliando-se o tempo e a altura como fatores separados. Nesta a altura foi um fator significativo. O F da altura resultou em 142,99 e o $F_{\text{crítico}}$ em 4,76. O tempo não foi significativo, pois seu F resultou em 1,54. Por teste de Tukey, foi possível perceber que as alturas de 20 mm tem diferença significativa com as de 40, 60 e 80 mm. As de 40 mm, tem diferença significativa com as de 60 e 80 mm. As alturas de 60 e 80mm não apresentaram diferença significativa entre elas.

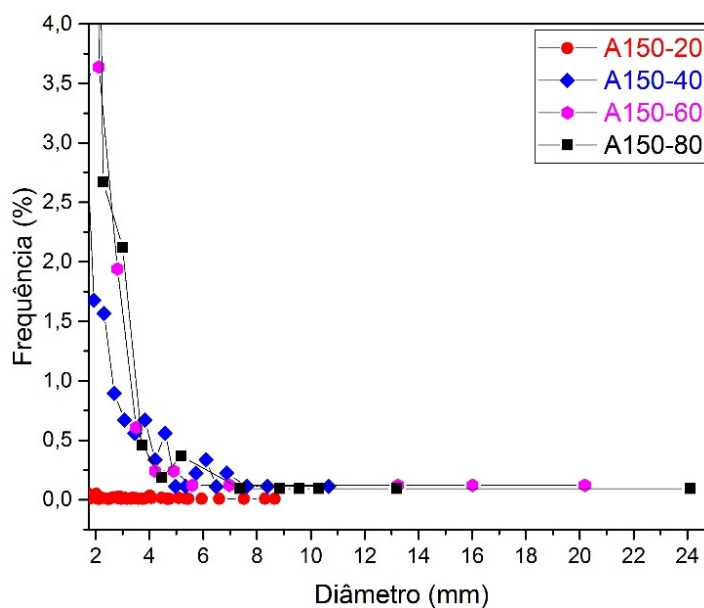
5.5.1 Análise morfológica dos poros

Para análise por morfologia dos poros, inicialmente todas as medidas foram divididas em intervalos de classes. Assim, com esses intervalos, é possível obter a frequência dos diâmetros, circularidade e convexidade de área por tempo de processo e região.

A frequência dos intervalos de classe dos diâmetros com 150 s de tempo de expansão podem ser observados na Figura 62 onde (a) são as classes de 0 a 5 mm de diâmetro e (b) são as classes de 2 a 20 mm de diâmetro. Assim, é possível distinguir melhor as regiões com poros pequenos e poros com elevados diâmetros. Em (a), é possível observar que tanto as amostras de 60 e 80 mm tiveram uma alta frequência de classes dos poros pequenos. Contudo, em (b), pode ser observada uma repetição maior de classes dos poros com maiores diâmetros, mesmo em frequências baixas. Portanto, esse fato acontece pela redução da espessura de parede, como reportado por Myagotin, Helfen e Baumbach (2012) e Garcia-Moreno et al. (2011), onde pequenas espessuras de parede aumentam e favorecem a coalescência dos poros e promovem a interconectividade entre eles. As regiões de 20 e 40 mm tiveram maiores repetições de classes com elevada frequência dos poros pequenos.

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.

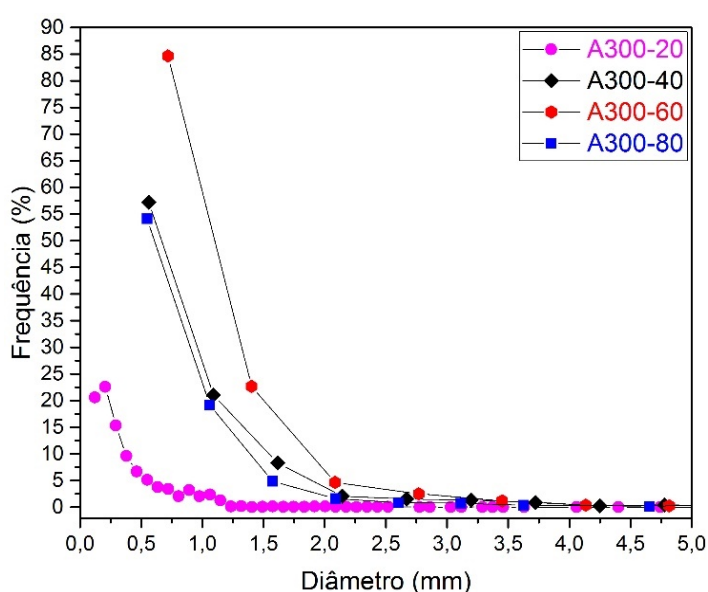




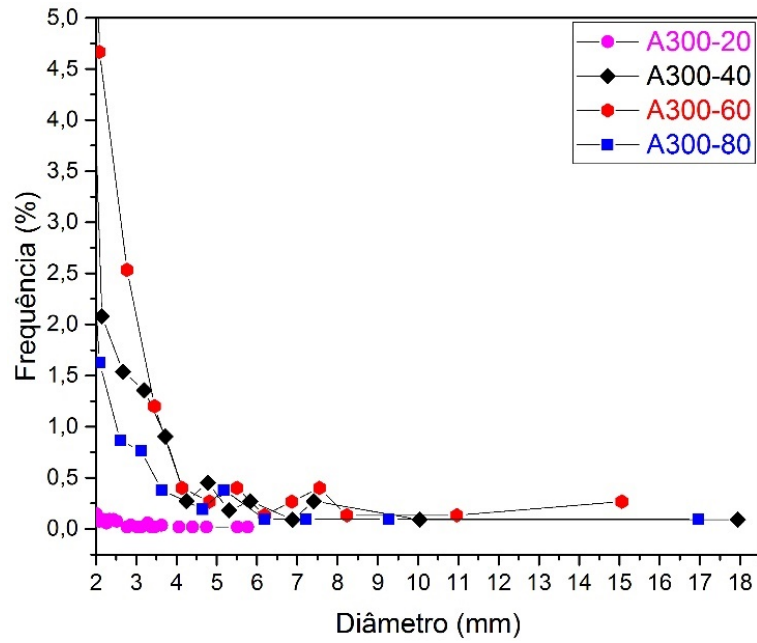
(b)

A frequência dos intervalos de classes do diâmetro para 300 s pode ser observada na Figura 63 onde (a) são regiões de 40 e 80 mm que tiveram características próximas a frequência de pequenos poros. A região de 60 mm apresentou pouca repetição de classes, mas obteve 85% de frequência de poros com aproximadamente 1 mm; (b) A300-20 apresentou baixa frequência de poros com maiores tamanhos.

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.

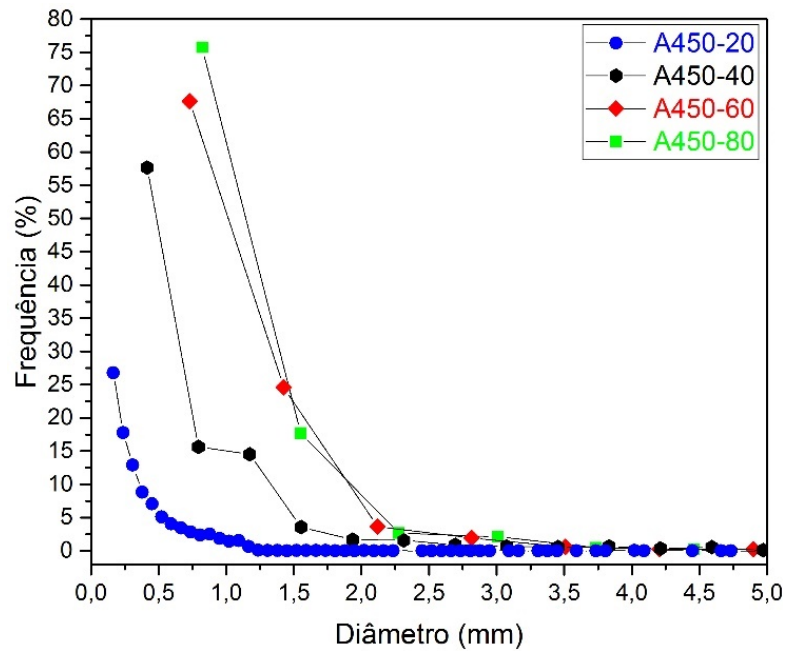


(a)

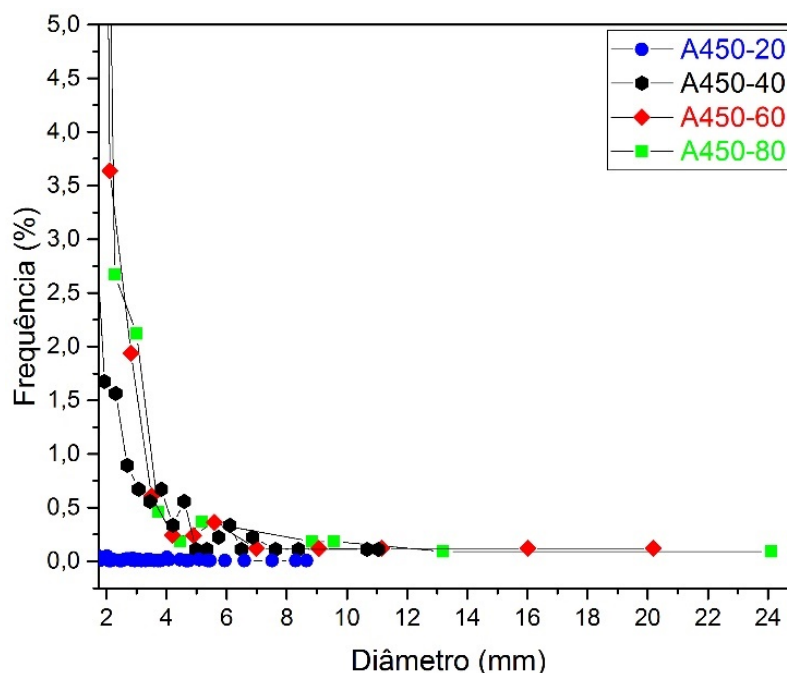


(b)

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.



(a)



(b)

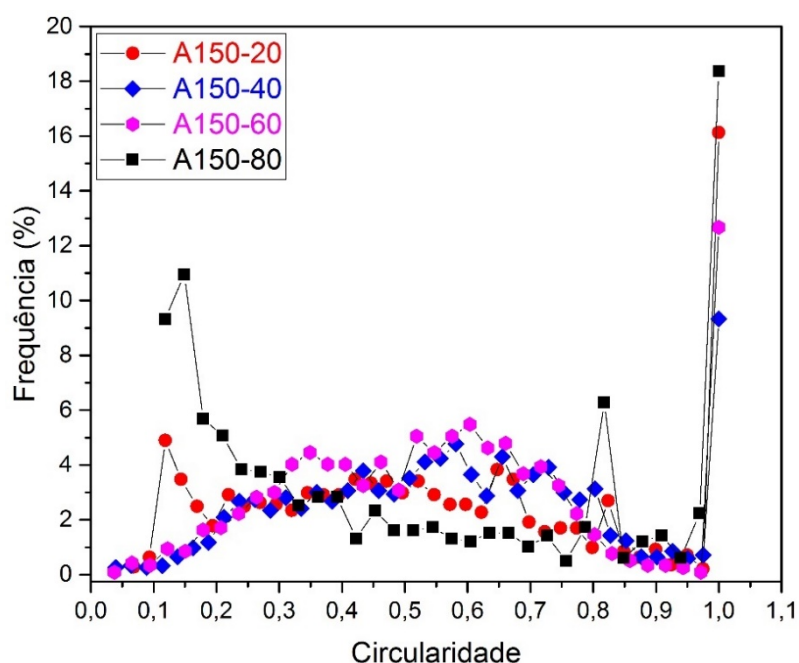
Por análise de variância do diâmetro médio, conclui-se que o tempo não foi significativo, mas a altura foi pois o F resultou em 10,07 e o crítico é $F_{0,05, 3, 6} = 4,76$, assim demonstrando que a altura da amostra tem influência significativa no diâmetro médio do poro. Através do teste Tukey, a altura de 20 mm apresentou diferença significativa em relação as demais alturas. As alturas de 40, 60, 80 mm não apresentaram diferença significativa entre elas.

Comparando-se os gráficos das Figura 62, Figura 63 e Figura 64, algumas características podem ser ressaltadas. As curvas das amostras A150 e A450 tiveram comportamentos semelhantes, principalmente com poros inferiores a 5 mm. A150 ainda está sob o efeito da expansão, contudo A450 deverá estar sob a influência do efeito de recalcância, conforme o trabalho de Mukherjee, Garcia-Moreno e Banhart (2010a). Assim, ambos estão dissociando mais CaCO_3 . Esta relação entre as curvas não pode ser considerada como efeito de encolhimento durante o resfriamento, pois as amostras foram resfriadas seguindo o mesmo procedimento. Portanto, este efeito foi igual, ou muito próximo em todas as amostras que apresentaram poros maiores nas regiões de 60 e 80 mm. Contudo, as amostras A300 apresentaram poros com tamanho considerável em alturas de 40 mm.

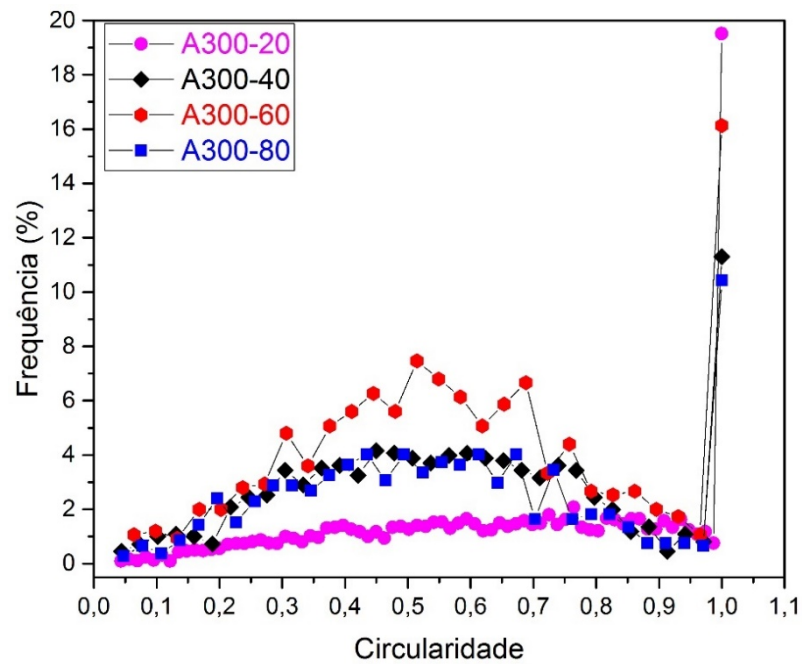
A frequência dos intervalos da circularidade média pode ser observada na

Figura 65 onde todas as regiões apresentaram grande quantidade de intervalos de classe próximos ou igual a 1. Em (a), pode-se notar a influência do misturador pela circularidade. Conforme Edwin Raj e Daniel (2011), o misturador tem influência no tamanho dos poros, contudo este também influencia na circularidade do material visto que a curva de 20 e 80 mm se distingue das demais curvas em (b) e (c). Portanto, as bolhas não tiveram tempo hábil para se organizar e se estabilizar no banho. Em (b) e (c) pode-se perceber uma grande quantidade de repetições de classes com baixa circularidade nas regiões de 40, 60 e 80 mm. Isto pode ter ocorrido devido à associação do efeito de drenagem com a coalescência das bolhas. Essas regiões tiveram espessura de parede menor, o que tende a aumentar a influência de um poro sob o outro, favorecendo assim a coalescência. Porém, a região de 60 mm acompanhada da região de 40 mm apresentaram as maiores frequências. Essas são regiões de transição de bolhas que, por efeito de densidade, são geradas e tendem a subir. Isto favorece as distorções, dobramentos e coalescência das bolhas, como reportado por Nayebi, Bahmani e Asl (2016).

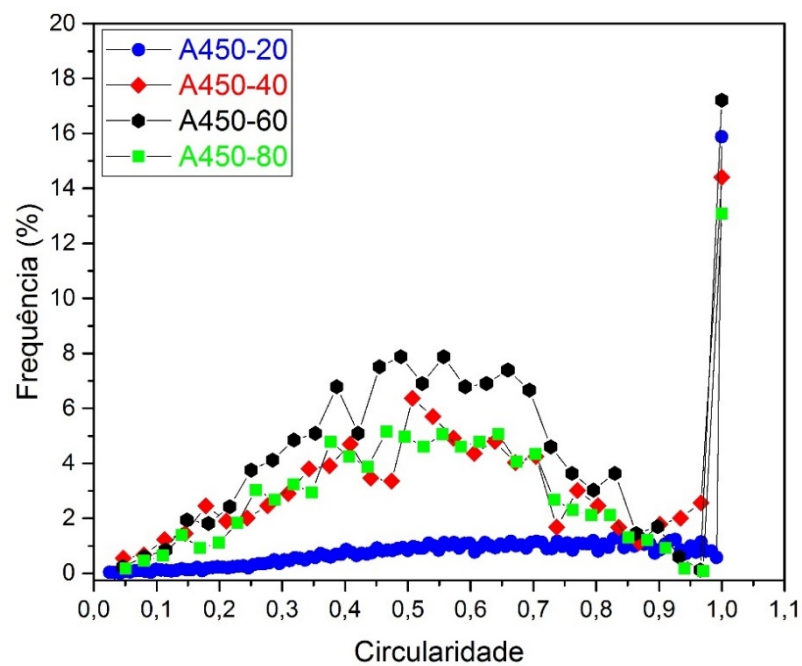
Figura 65- Gráfico da frequência da circularidade média: (a) amostra com 150 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura; (b) 300 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura; (c) 450 s com 20, 40, 60 e 80 mm de altura



(a)



(b)



(c)

Por análise estatística, a altura e o tempo não foram significativos na circularidade. Contudo, o F do tempo resultou em 2,10, isto é acima de 2. Portanto, ele não é significativo, mas interfere na circularidade.

A distribuição das classes da convexidade de área por frequência pode ser observada na Figura 66 onde a maior parte das frequências foram acima de 0,8. Algumas alturas apresentaram convexidades de área menores que este valor. Essas amostras foram A150-80, A450-80, A300-60 e A450-40. Esses valores podem ter sido encontrados devido ao efeito de drenagem e encolhimento. Com a redução da espessura das paredes, alguns poros ficaram interconectados, modificando a morfologia dos poros a assim mudando a convexidade de área, como pode ser observado na Figura 67. Nesta, uma sucessão de poros foram influenciados pelos efeitos comentados anteriormente, obtendo-se paredes com espessuras muito pequenas e/ou poros interligados. Deste modo, quando é realizado o *fill holes* durante o tratamento da imagem, essa interligação é evidenciada. Isto aumentou a influência da área convexa, o que reduziu a convexidade de área destes elementos. Onde (a) é a imagem sem tratamento e (b) é a imagem da análise global das variáveis resposta. O poro com convexidade de área de 0,5 está indicado pela seta.

Figura 66- Gráfico de frequência da convexidade de área por diferentes alturas e por diferentes tempos de expansão.

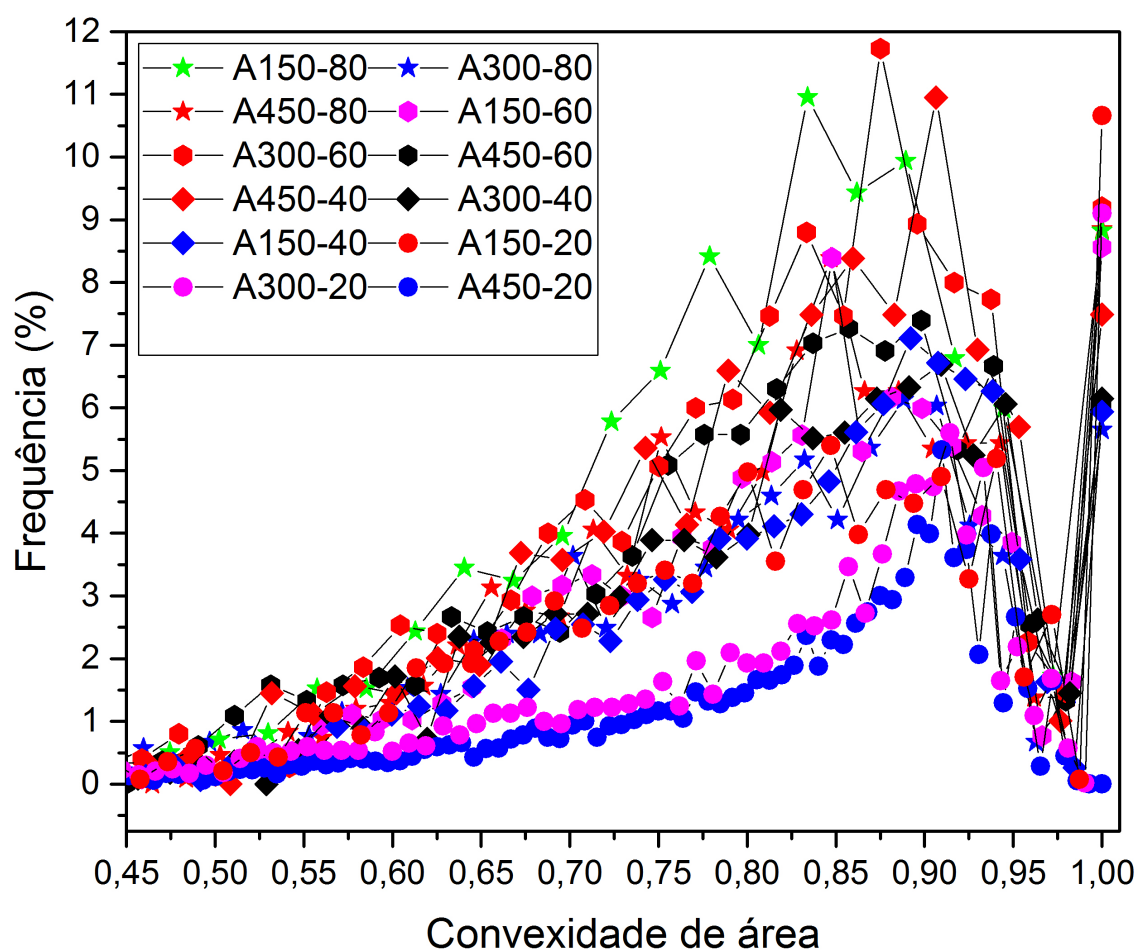
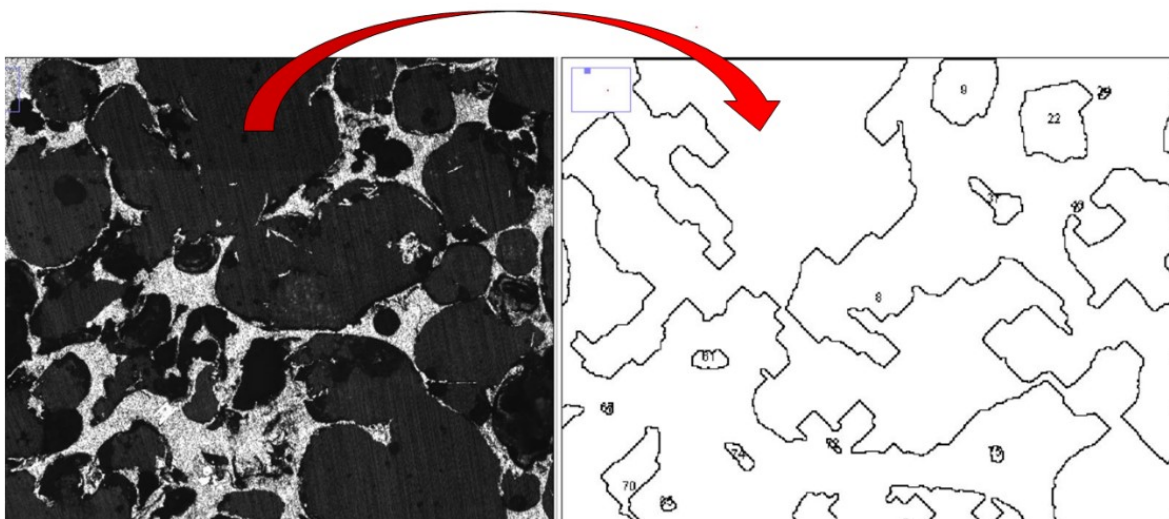


Figura 67- Efeito da interconectividade dos poros na análise por convexidade de área

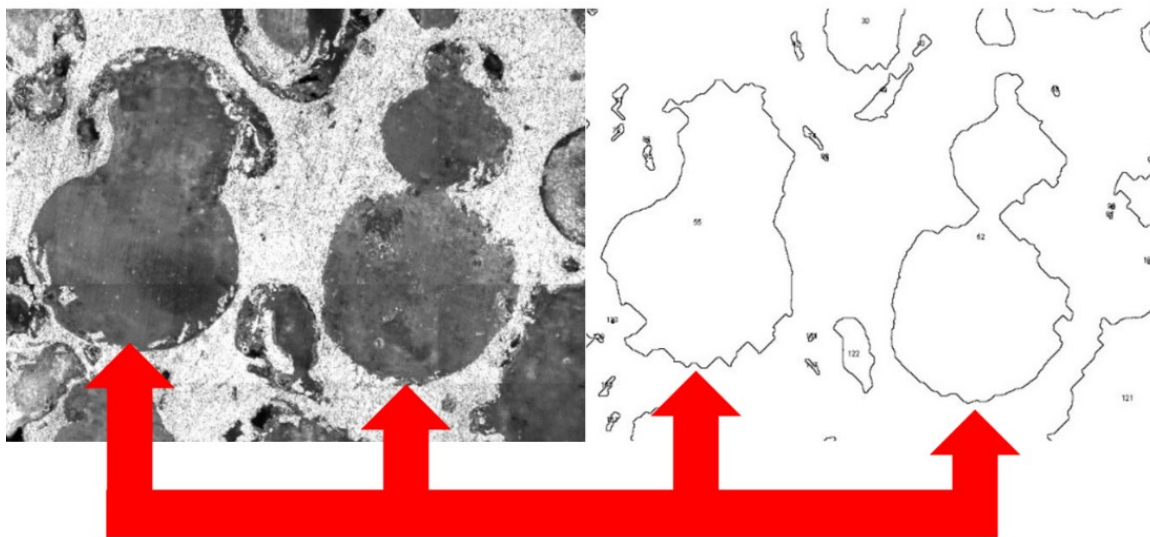


Fonte: Autoria própria

Por análise de variância, o tempo e a altura não foram significativos na convexidade de área. Entretanto, o F da altura resultou em 2,13, portanto ela tem interferência no processo, porém não significativamente.

Quanto aos parâmetros morfológicos, foi notado que a coalescência dos poros tem uma influência maior na circularidade do que na convexidade de área, como pode ser ressaltado pela Figura 68 onde a esquerda é da amostra sem tratamento de imagem e a da direita é com tratamento. Os dois poros tiveram circularidade de 0,46 e 0,456 da esquerda para a direita, respectivamente. Contudo, a convexidade de área destes poros foi de 0,822 e 0,765 da esquerda para a direita, respectivamente. Com a coalescência, há um alongamento do elemento analisado (poro), assim reduzindo sua circularidade. A relação da área côncava com a área convexa também pode ser observada na Figura 68, pois o poro da direita obteve um valor de convexidade de área menor ao da esquerda.

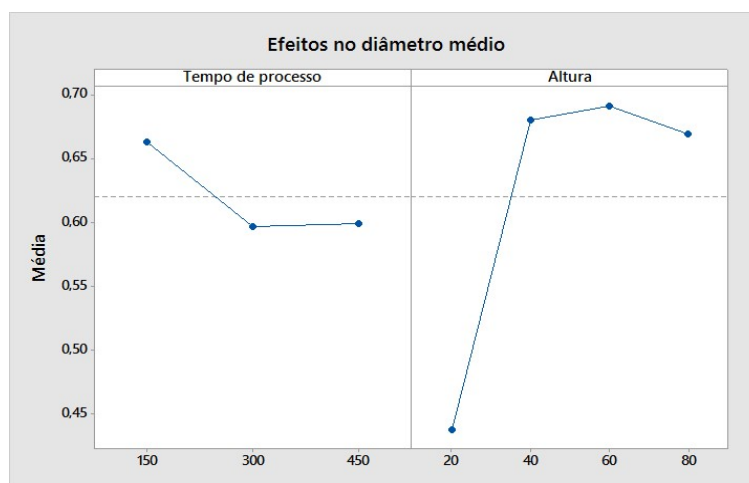
Figura 68- Poros da amostra A450-20 sob efeito de coalescência



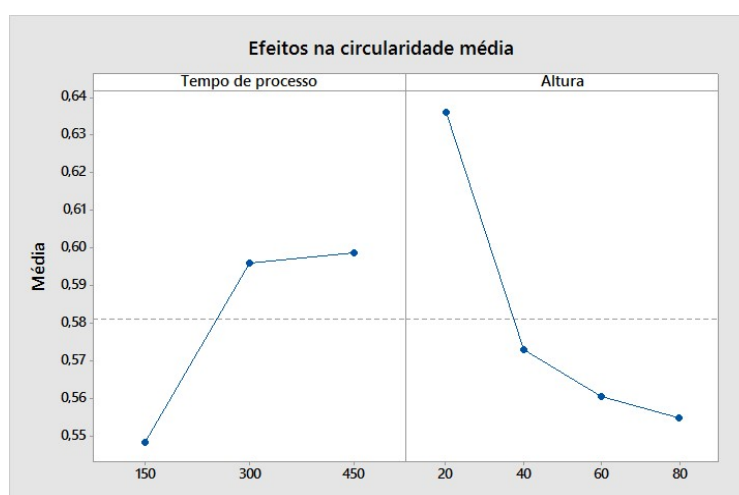
Fonte: Autoria própria

Por análise de efeitos, é possível analisar graficamente como cada parâmetro de processo interfere no produto final, como pode ser observado na Figura 69. Assim, para obter menores médias de poros, as amostras de 300 s de expansão são as melhores. Entre 20 e 60 mm., as menores médias de circularidade foram de 150, seguidos de 300 e 450 s. Os maiores valores de média de circularidade foram obtidos com 20 a 40, 60 e 80 mm sucessivamente. Pode-se observar que o fator tempo influenciou o processo, como pode ser observado pela análise de Tukey, onde o F resultou em 2,10. A altura auxiliou na coalescência dos poros através do alongamento destas bolhas e redução de suas circularidades. Para 150 s, o CaCO_3 ainda estava gerando gás, logo o material não teve tempo necessário para reorganizar as bolhas, portanto resultando em circularidades menores. Através da análise de convexidade de área, o tempo teve pouca influência nas amostras, porém os maiores valores foram nas amostras com 300 s. Em relação a altura, quanto mais perto da base, maiores são os valores da convexidade de área, o que pode ser explicado pelo F da altura na convexidade de área, que resultou em 2,13. Com alturas menores, como reportado por Kadoi e Nakae (2011), o material tende a ter maiores espessuras de parede, logo auxiliando na prevenção do efeito de encolhimento.

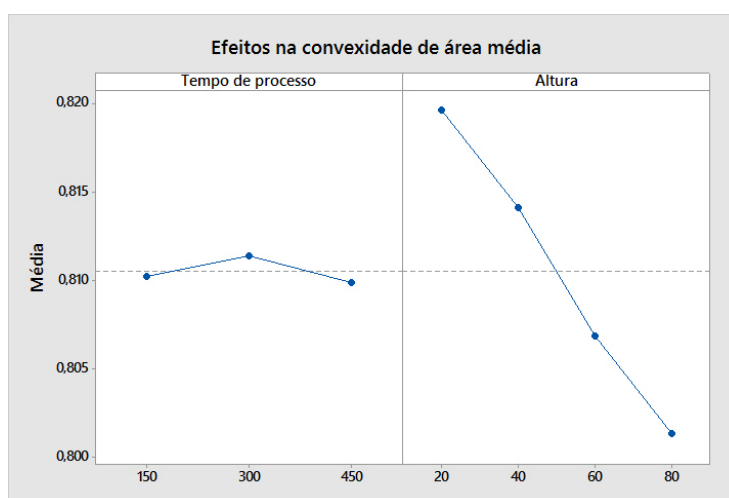
Figura 69- Análise dos efeitos do tempo de processo e altura (a) no diâmetro médio; (b) na circularidade média; (c) na convexidade de área média



(a)



(b)

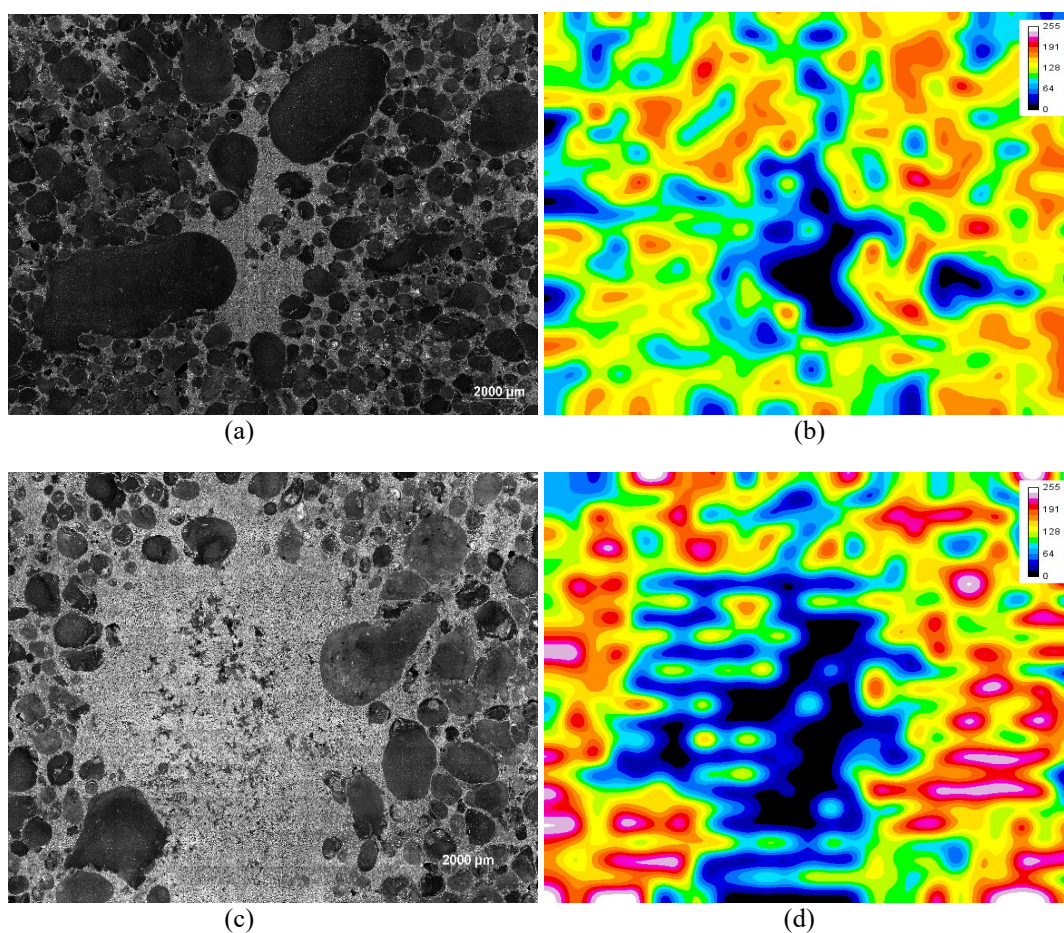


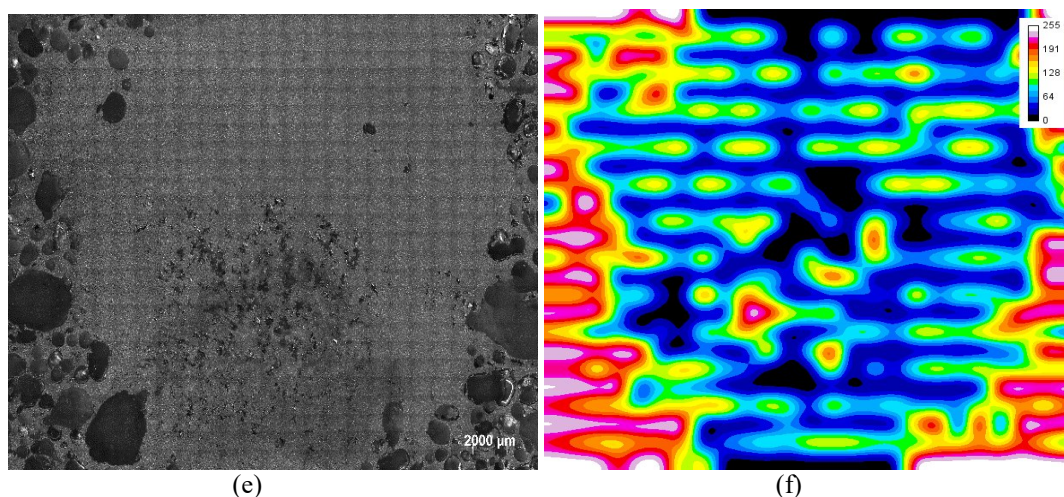
(c)

5.5.2 Matriz fração porosa

A morfologia dos poros é uma análise muito importante, contudo a disposição dos poros pela matriz deve ser averiguada, visto que as espumas produzidas não tiveram uniformidade, como pode ser observado na Figura 70 onde todas as amostras produzidas foram com o tempo de 150 s de expansão e mesma altura, ou seja, 20 mm da base. (a), (c) e (e) são imagens das espumas adquiridas via microscopia óptica e (b), (d) e (f) são imagens das matrizes dos níveis de cinza das amostras adquiridas a partir da densidade de fração porosa, sendo estas convertidas em níveis de cores para que sejam visualmente mais representativas. Nestas, as regiões com brilho mais intenso são aquelas com alta fração porosa (256) e as regiões com brilho menos intenso (0) possuem baixa fração porosa. As demais regiões seguem no APÊNDICE C – Análise de imagens digitais.

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

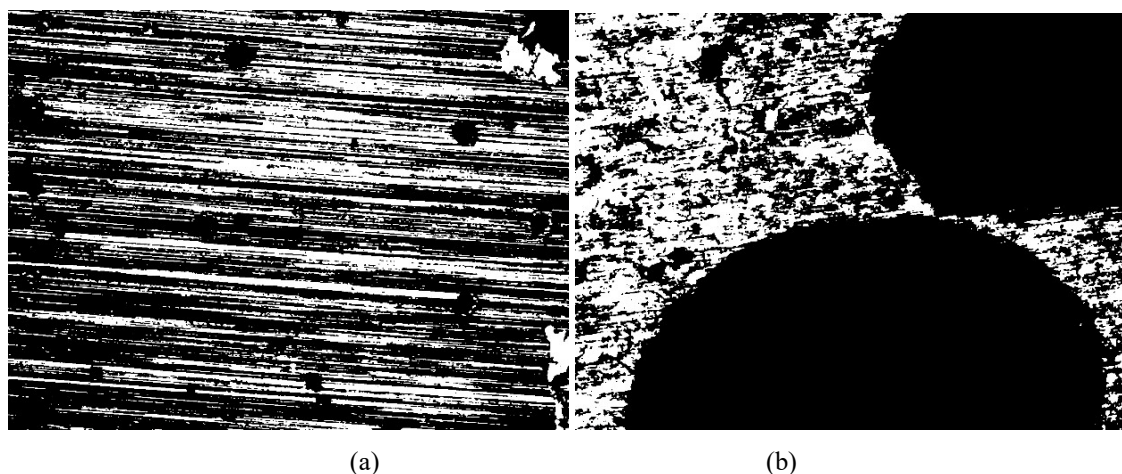




Fonte: Autoria própria

A partir do uso da técnica de transformação de fração porosa em imagens coloridas em níveis de cinza, algumas interferências durante a análise foram registradas. Na imagem macro (25X25), alguns defeitos não foram notados. Porém, na análise individual das imagens da pilha, estes foram mais perceptíveis. Para amostras em campo claro, devido a saturação luminosa, alguns defeitos foram evidenciados, como pode ser observado na Figura 71 onde (a) é o efeito da lixa e (b) o efeito da parede do poro. Com isso, uma análise padronizada de aplicação de máscaras não foi possível, havendo assim a necessidade de analisar-se cada imagem individualmente.

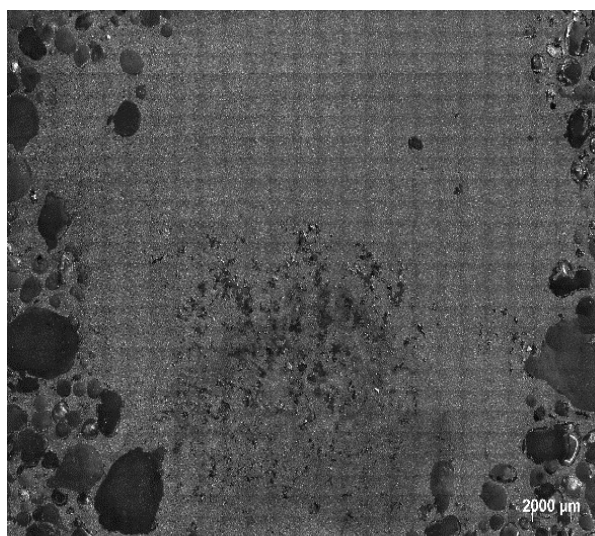
Figura 71- Representação dos efeitos em imagens individuais da pilha



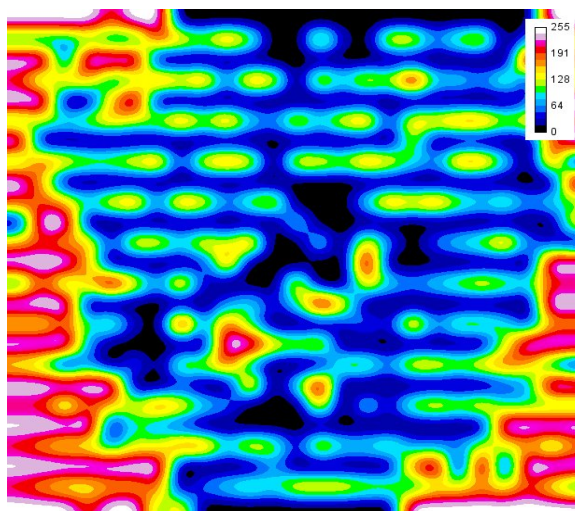
Fonte: Autoria própria

Também foi percebido o efeito provocado entre imagens vizinhas, como pode ser percebido na Figura 72 onde (a) é a imagem macro realizada pelo microscópio e (b) é a imagem gerada pela matriz de fração porosa

Figura 72- Interferência de imagens vizinhas na análise de fração porosa: (a) foto macro gerada pelo microscópio; (b) imagem da fração porosa por região



(a)



(b)

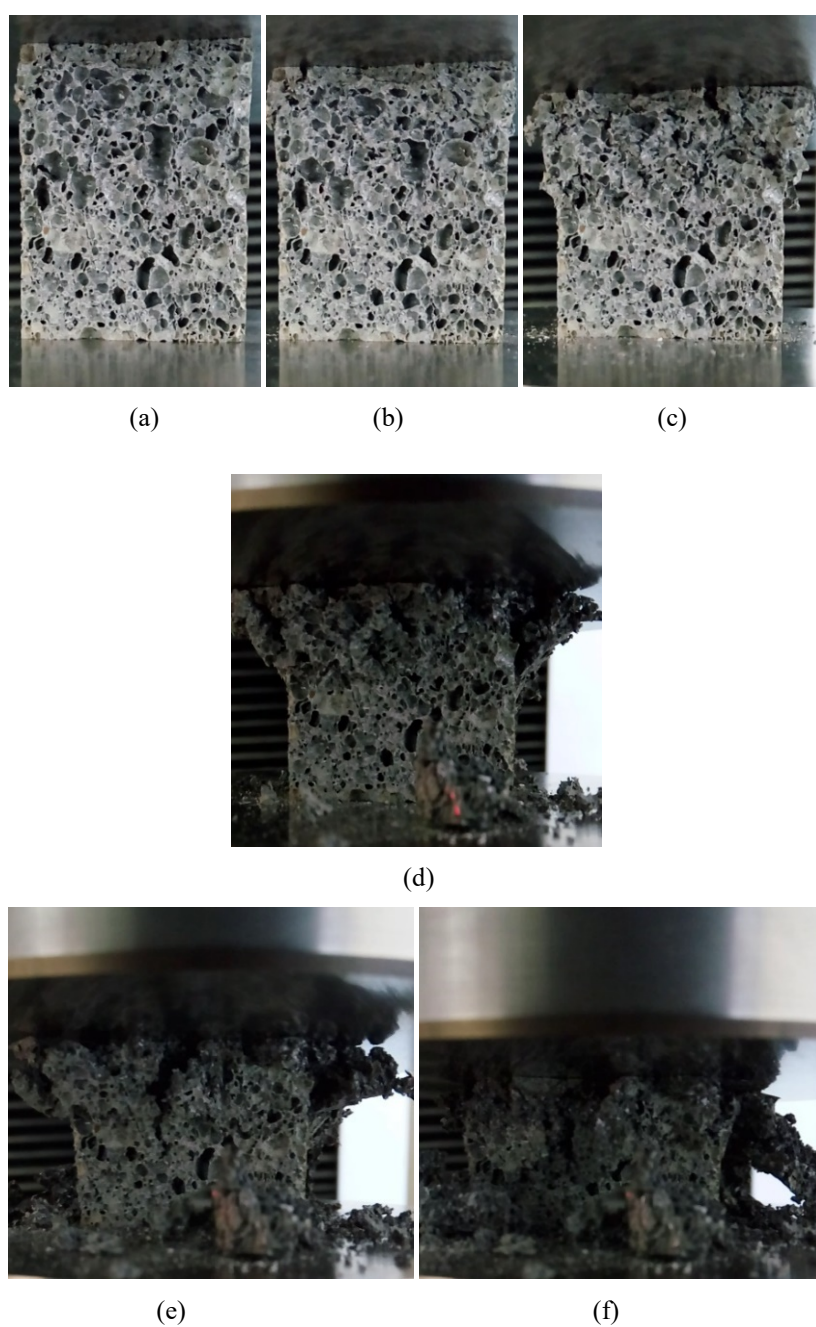
Fonte: Autoria Própria

5.6 ANÁLISE MECÂNICA

Na análise mecânica, foi possível perceber o comportamento da espuma de alumínio silício hipereutético com a utilização de CaCO_3 como agente espumante. Sua característica de deformação pode ser observada na Figura 73 onde imagens da amostra A150-1 foram obtidas

em diferentes momentos: (a) primeiro pico tensão; (b) 10% de deformação; (c) 20% de deformação; (d) 30% de deformação; (e) 40% de deformação; (f) 50% de deformação. A curva tensão deformação da amostra A150-1 pode ser observada na Figura 74 onde o gráfico das curvas tensão-deformação das amostras produzidas com 150 s de tempo de expansão estão representadas.

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%



Fonte: Autoria própria

A partir dos ensaios, é possível obter as curvas tensão-deformação das amostras, como pode ser observado nas Figura 74, Figura 75 e 76, que foram analisadas com até 55% de deformação, pois a análise de eficiência e energia absorvida consideram deformações até 50%.

Figura 74- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 150 s de tempo de expansão.

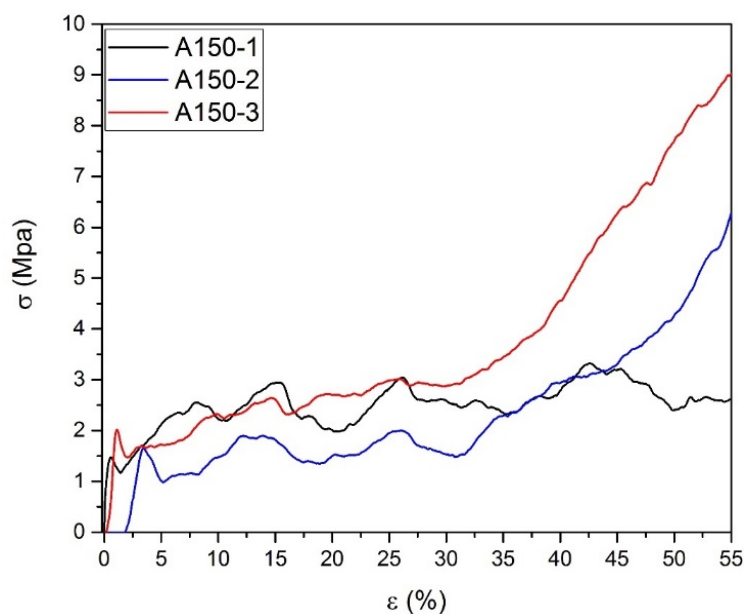


Figura 75- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 300 s de tempo de expansão.

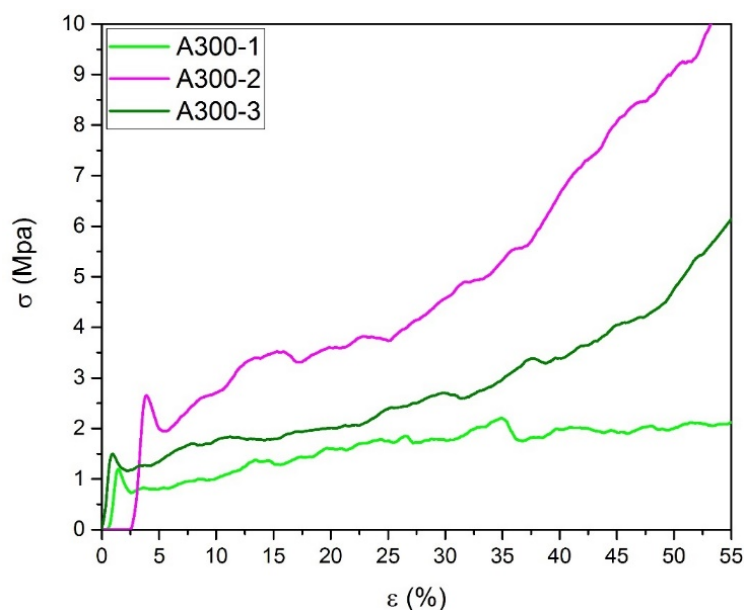
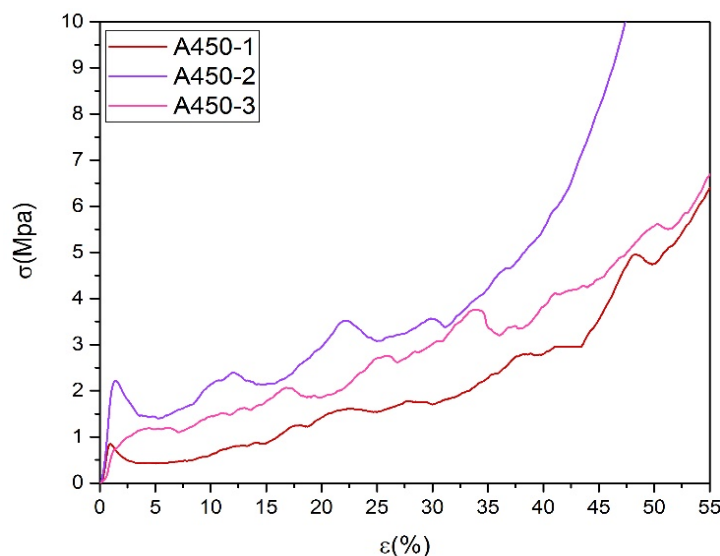


Figura 76- Gráfico das curvas tensão-deformação das amostras com 450 s de tempo de expansão.



A partir dos gráficos, foi possível obter alguns parâmetros para caracterização e análise mecânica das espumas ensaiadas, como pode ser observado na Tabela 14. A partir desses dados, foi possível discutir e analisar a influência do processo nas propriedades mecânicas por análise estatística. As curvas tensão-deformação das amostras individualmente seguem no ANEXO B – Comportamento mecânico. Neste, as curvas já estão com a integral de 0 a 50% de deformação para cálculo de energia de absorção.

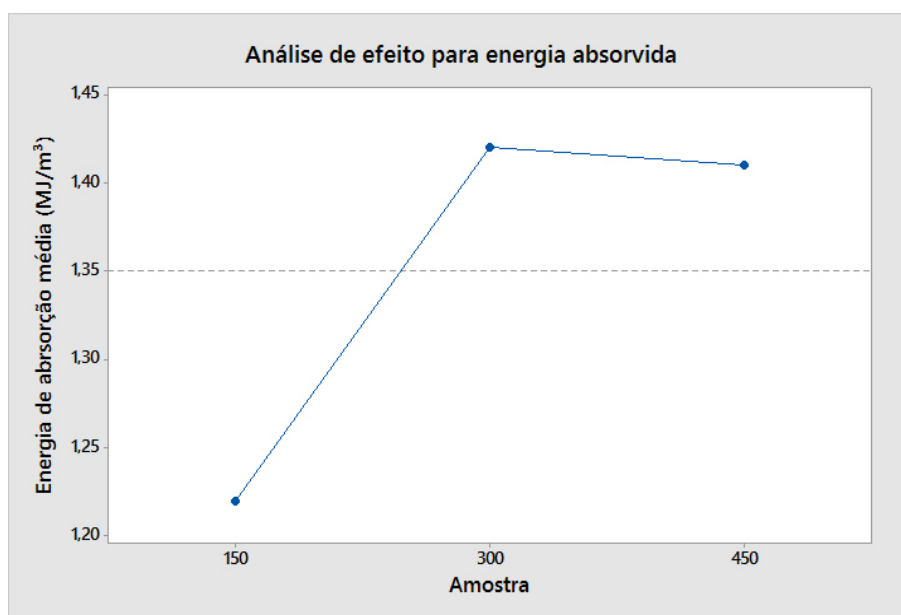
Tabela 14 – Características das espumas analisadas por ensaio de compressão

Amostra	ρ (g/cm ³)	Porosidade (%)	Primeiro pico de tensão (Mpa)	σ_{pl} (Mpa)	σ_e (Mpa)	ϵ_{ple} (%)	W (MJ/m ³)	W _e (%)
C150-1	0,66	75,64	0,66	1,70	2,21	34,18	0,99	131,16
C150-2	0,60	77,70	1,49	2,53	3,28	42,15	0,99	71,67
C150-3	0,55	79,68	2,02	2,85	3,71	36,45	1,67	123,68
Média	0,61	77,67	1,39	2,36	3,07	37,59	1,22	108,84
Desvio	0,05	2,02	0,69	0,59	0,77	4,11	0,39	32,41
C300-1	0,35	87,02	1,19	1,72	2,24	34,96	0,78	99,23
C300-2	0,79	70,93	2,65	3,93	5,11	34,19	2,22	126,87
C300-3	0,55	79,85	1,50	2,33	3,03	34,19	1,26	121,14
Média	0,56	79,26	1,78	2,66	3,46	34,45	1,42	115,75
Desvio	0,22	8,06	0,77	1,14	1,48	0,44	0,73	14,59
C450-1	0,62	77,13	0,85	1,63	2,11	33,98	0,91	127,18
C450-2	0,80	70,42	2,22	3,29	4,27	35,18	1,99	132,27
C450-3	0,50	81,57	1,20	2,26	2,94	29,53	1,33	152,98
Média	0,64	76,37	1,42	2,39	3,11	32,90	1,41	137,48
Desvio	0,15	5,61	0,71	0,84	1,09	2,98	0,54	13,66

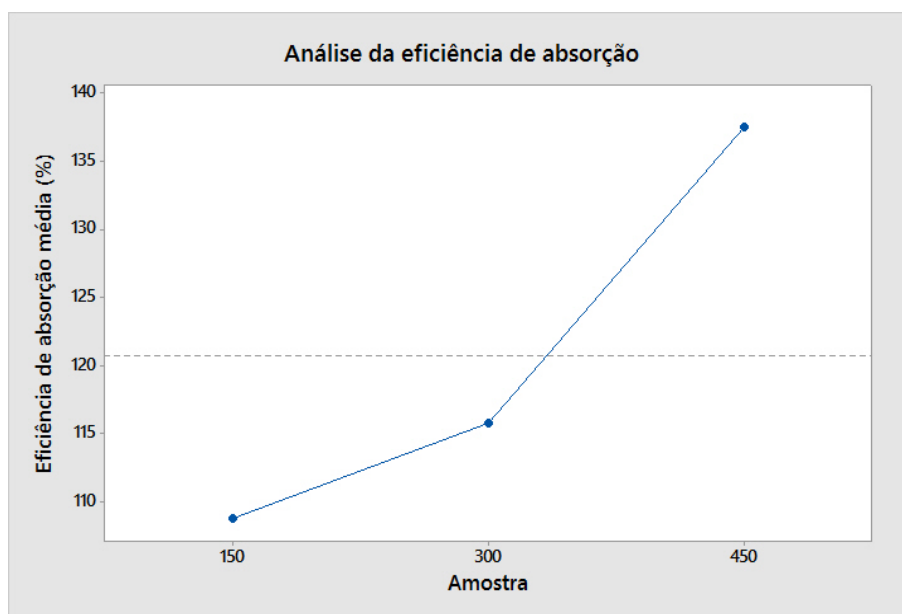
A partir dos dados obtidos pelo teste Tukey, não foi encontrada variação significativa da energia absorvida e variação da eficiência de absorção em relação ao tempo de processo, sendo que F-energia absorvida resultou em 0,12 e F-eficiência de absorção resultou em 1,39.

A análise dos efeitos do tempo na energia absorvida e eficiência de absorção podem ser observadas na Figura 77 no qual (a) é a análise energia absorvida média com amostras com diferentes tempos de expansão e (b) é a eficiência de absorção média para amostras com diferentes tempos de expansão. Em relação à energia de absorção média, as amostras com 300 e 450 s tiveram pouca diferença. Contudo, as amostras com 150 s apresentaram a menor média de magnitude de energia de absorção e a menor eficiência de absorção média. Isso pode ser explicado pelo item 5.5.1 - Análise morfológica dos poros, pois a maior média de diâmetro dos poros (para a altura do ensaio de compressão) foi para as amostras com 150 s. As amostras com 300 e 450 s não tiveram muita diferença no diâmetro dos poros, já na circularidade, as amostras com 150 s tiveram os menores valores, seguidos pelas amostras com 300 e 450 s. Portanto, como reportado na literatura, menores diâmetros e maiores circularidades conferem melhores propriedades mecânicas.

Figura 77-Análise do efeito do tempo nas propriedades mecânicas: (a) efeito na energia absorvida; (b) efeito na eficiência de absorção



(a)



(b)

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.

7 SUGESTÕES FUTURAS

Para dar prosseguimento a esta linha de pesquisa, o autor propõe os seguintes temas:

1. Automatização do equipamento de modo a reduzir influências do operador durante o processo.
2. Redução do tempo de mistura e aumento da velocidade de rotação.
3. Utilizar diferentes geometrias de hélice durante o processo.
4. Utilizar ligas com diferentes concentrações de silício
5. Analisar efeito de corrosão em espumas produzidas com CaCO_3 como agente espumante utilizando conceitos da patente US 2011/0274942 A1.
6. Analisar a morfologia da espuma por cortes longitudinais
7. Fazer análise de raios X das espumas produzidas para verificar se ocorreu formação frágil no material produzido

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.

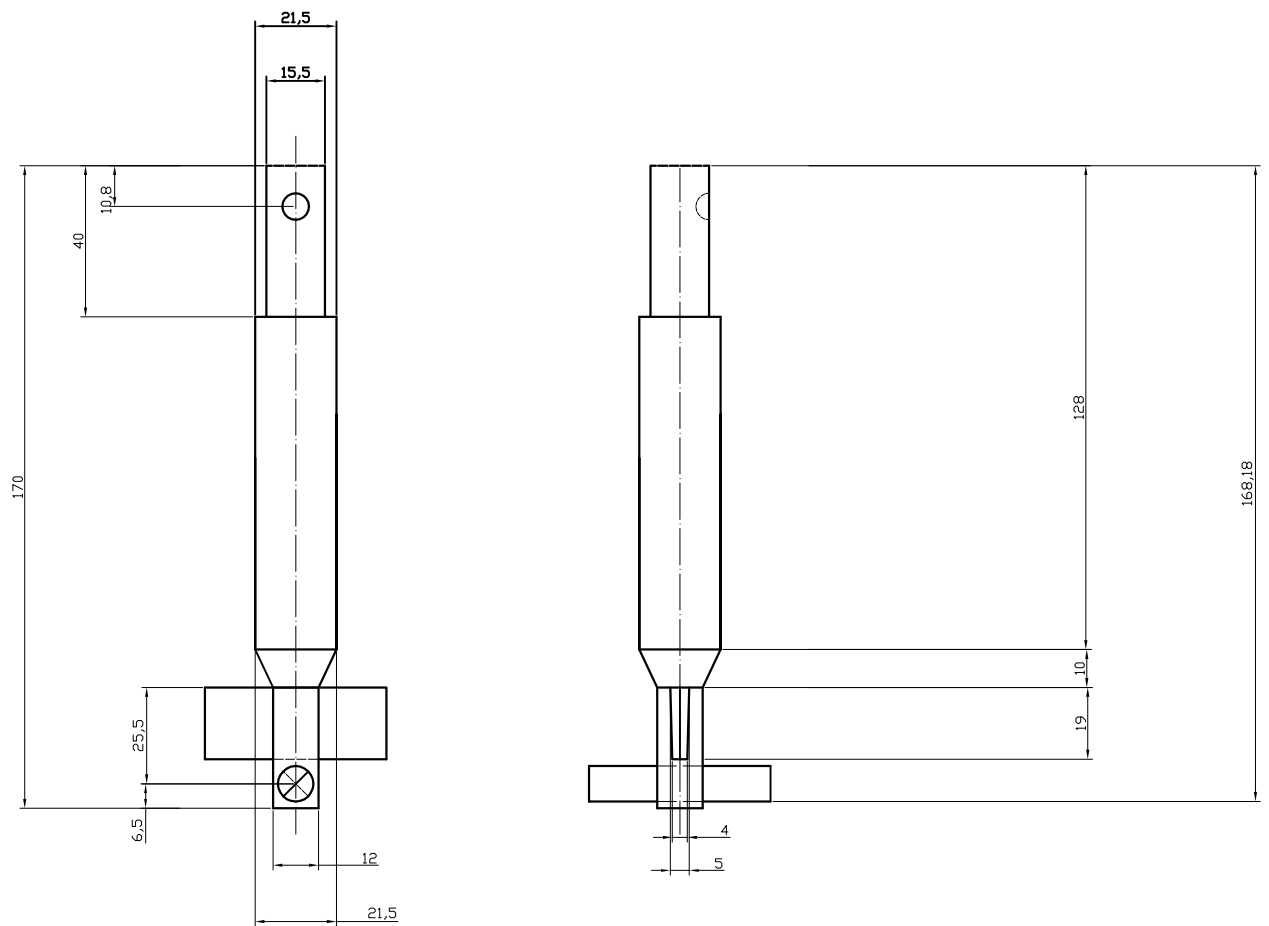
YANG, C. .; NAKAE, H. Foaming characteristics control during production of aluminum alloy foam. **Journal of Alloys and Compounds**, 2000.

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

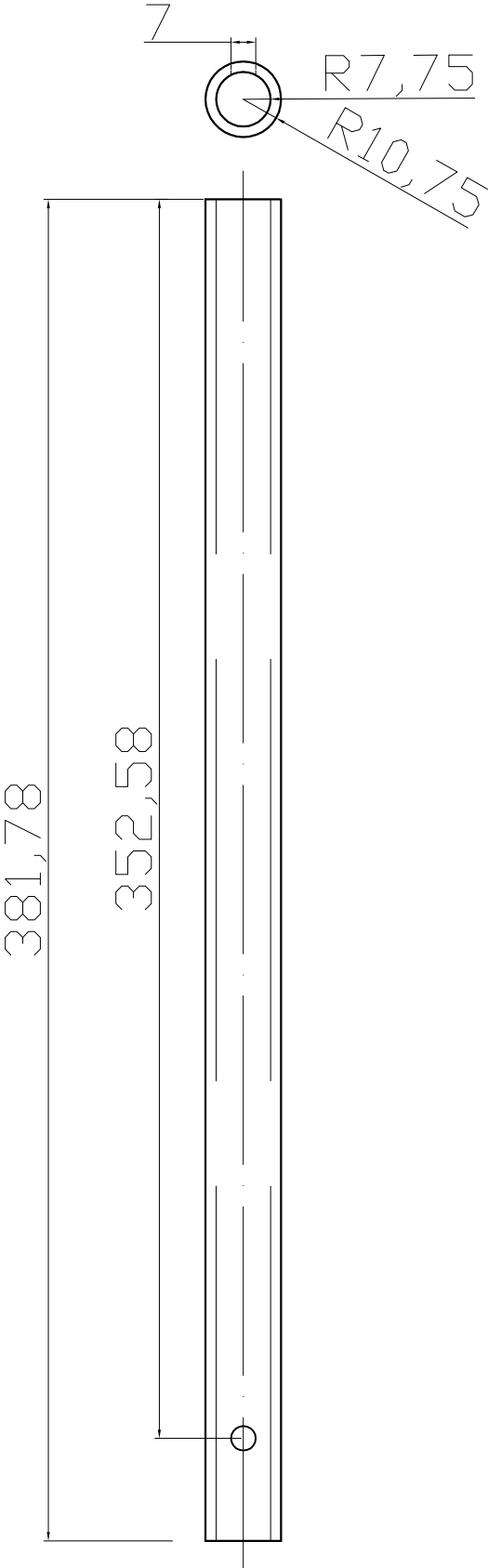
YANG, D.; CHEN, J.; WANG, H.; et al. Effect of Decomposition Kinetics of Titanium Hydride on the Al Alloy Melt Foaming Process. **Journal of Materials Science & Technology**, 2015.

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.

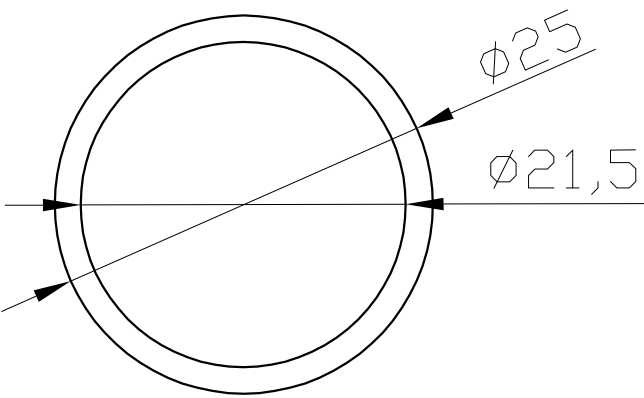
ZHOU, X.; LIU, X.; LI, J.; LIU, H. Novel foaming agent used in preparation process of aluminum foams. **Journal of University of Science and Technology Beijing: mineral metallurgy materials (Eng Ed)**, 2008.



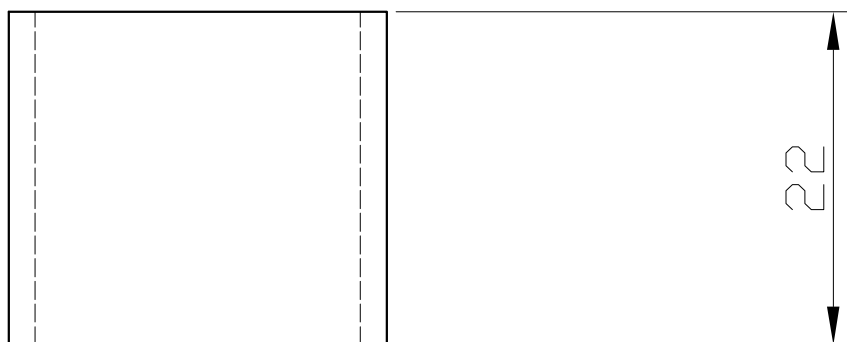
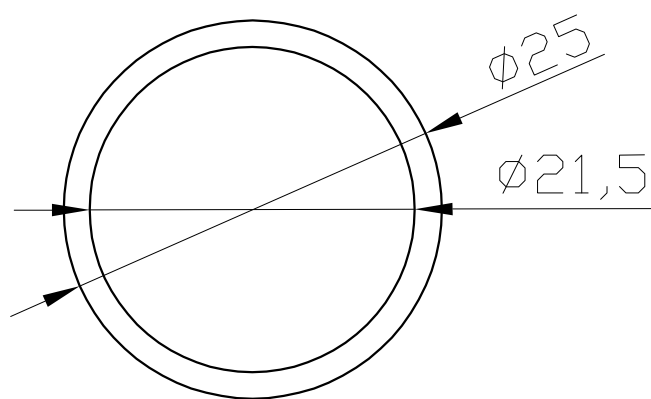
Quantidade: Uma	Peça: Eixo misturador	Escala: 1:2
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Inox 304	Unidade: mm



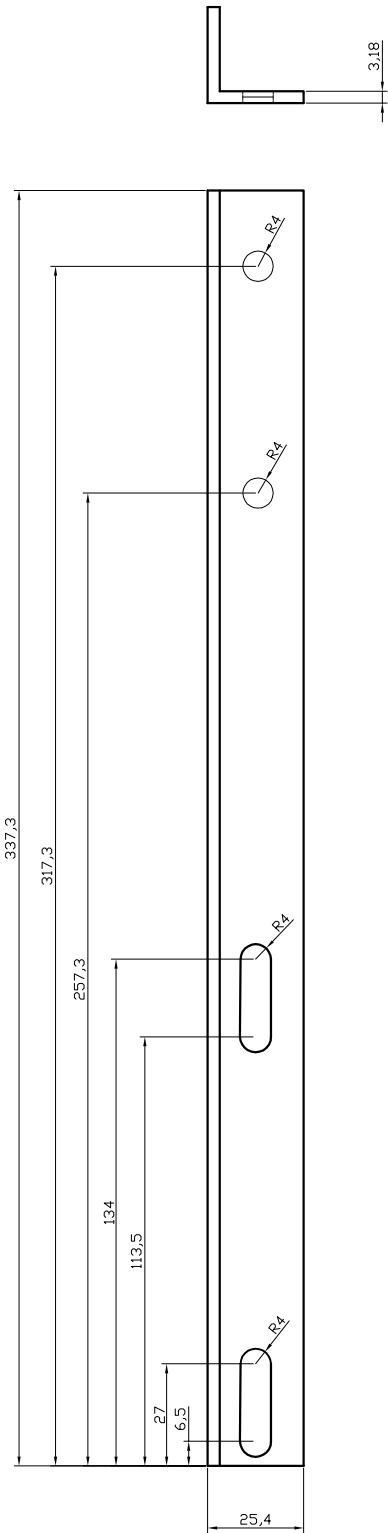
Quantidade: Um	Peça: Eixo de mistura	Escala: 1:2
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Aço inox 304	Unidade: mm



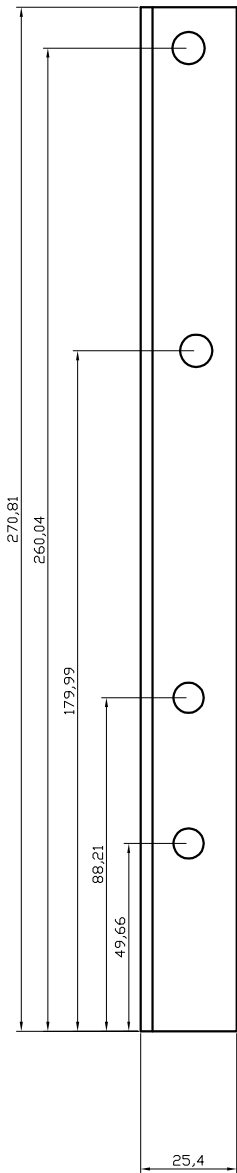
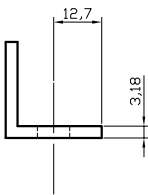
Quantidade: Uma	Peça: Bucha de alumínio rolamento	Escala: 2:1
Projetado por MAURÍCIO	Diedro:	
	Material: Alumínio	Unidade: mm



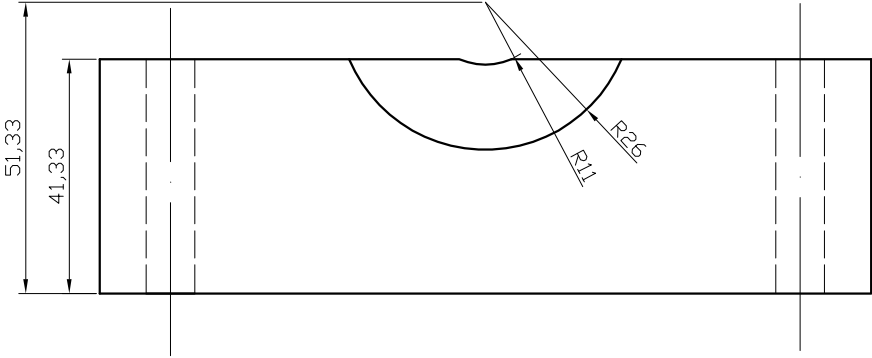
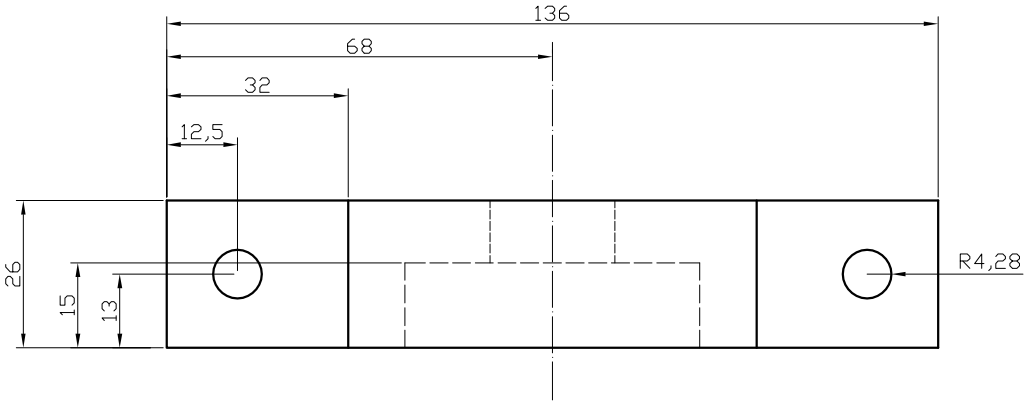
Quantidade: Uma	Peça: Bucha de alumínio pinhão	Escala: 2:1
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Alumínio	Unidade: mm



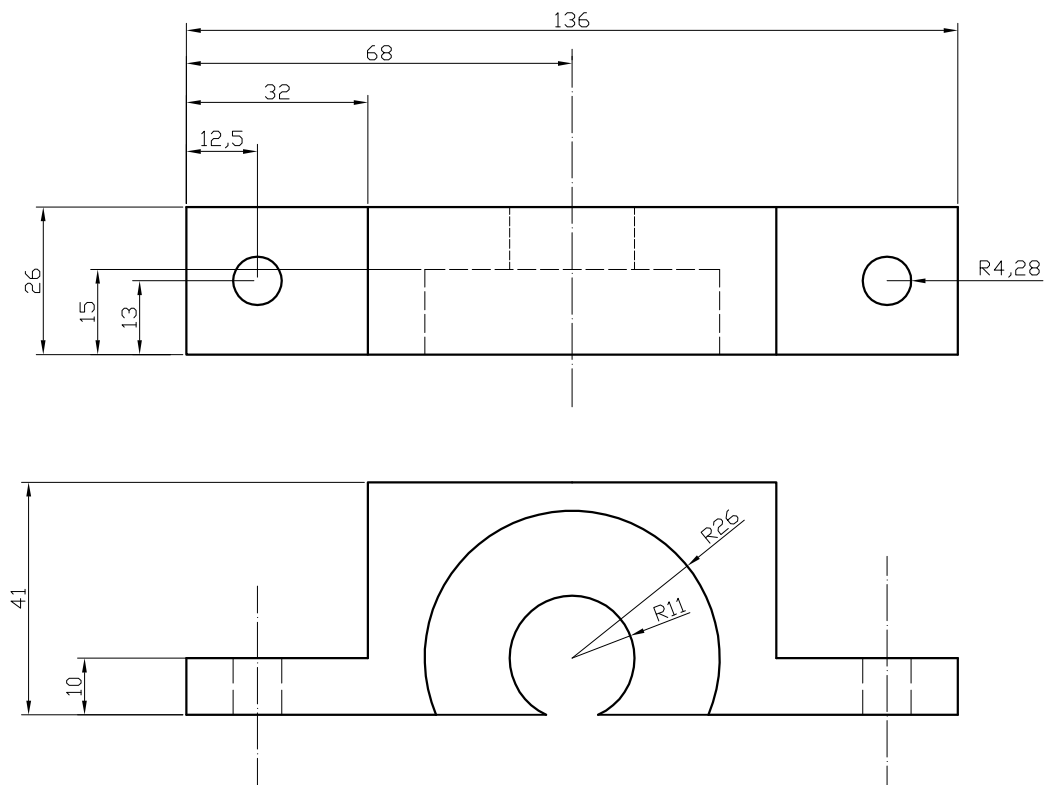
Quantidade: Duas	Peça: Cantoneira de ligação motor ao sistema de mistura	Escala: 1:2
Projetado por MAURÍCIO		Diedro: 
Material: Aço		Unidade: mm



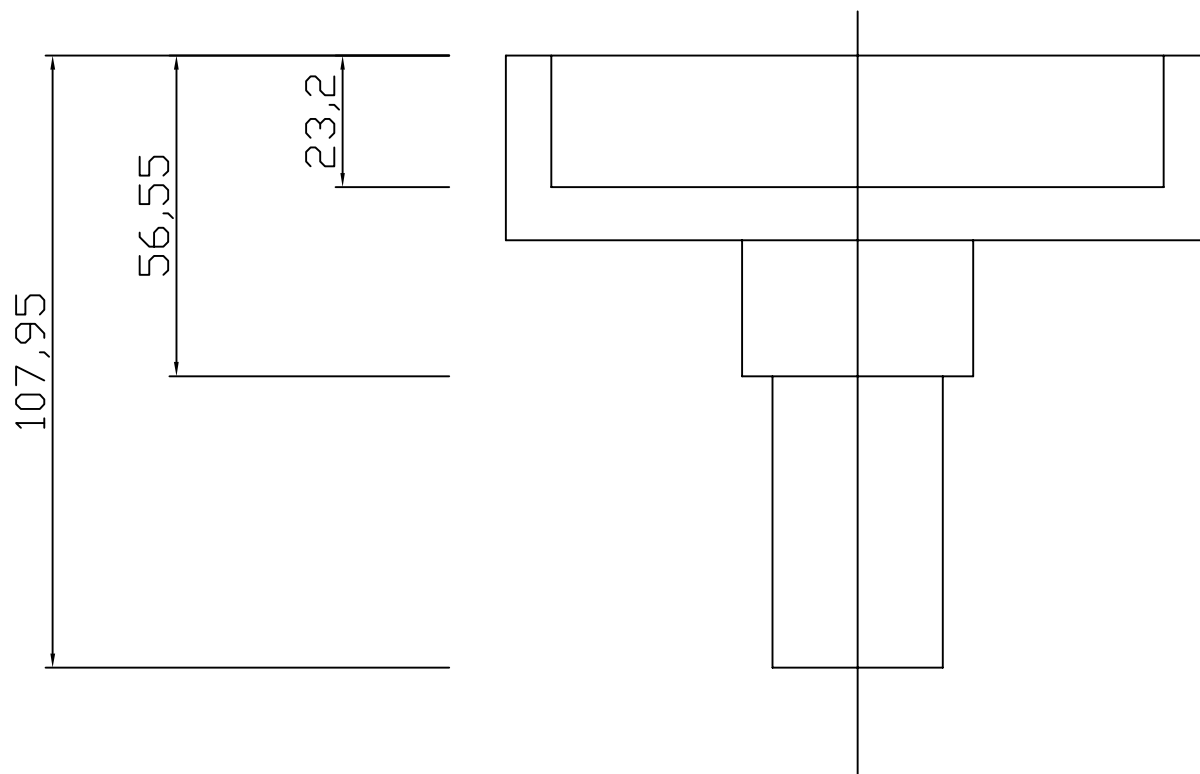
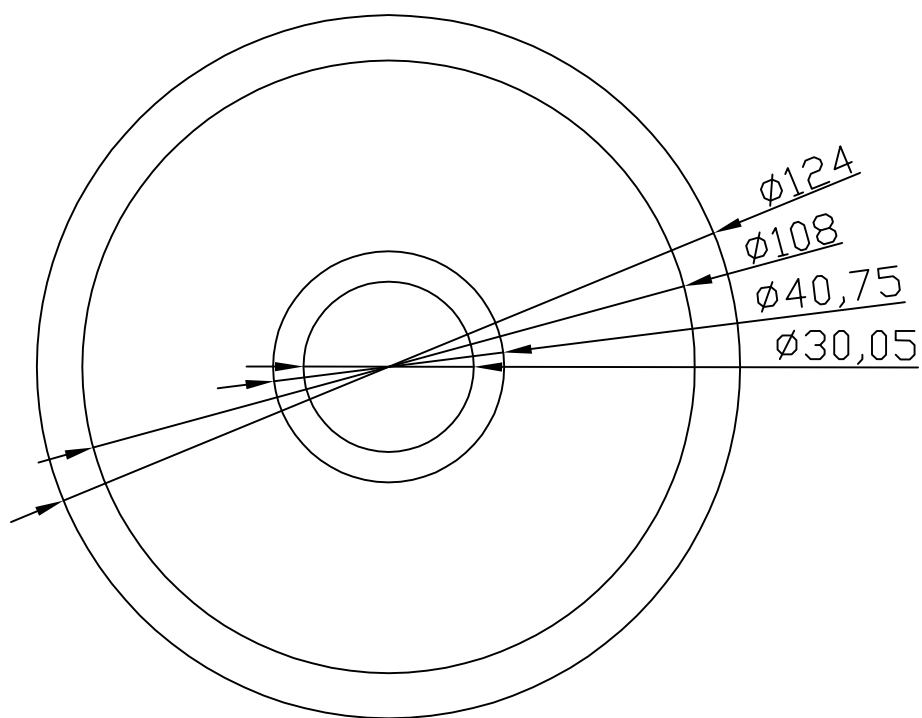
Quantidade: Duas	Peça: Cantoneira de ligação motor ao sistema de mistura	Escala: 1:2
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Aço	Unidade: mm



Quantidade: Duas	Peça: Parte inferior do mancal	Escala: 3:4
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Alumínio	Unidade: mm



Quantidade: Duas	Peça: Parte superior do mancal	Escala: 3:4
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Alumínio	Unidade: mm



Quantidade: Uma

Peça: Suporte cadinho

Escala: 3:4

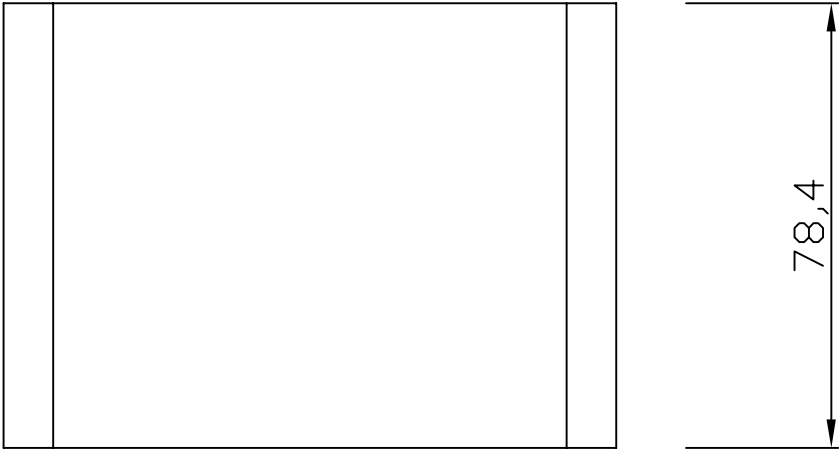
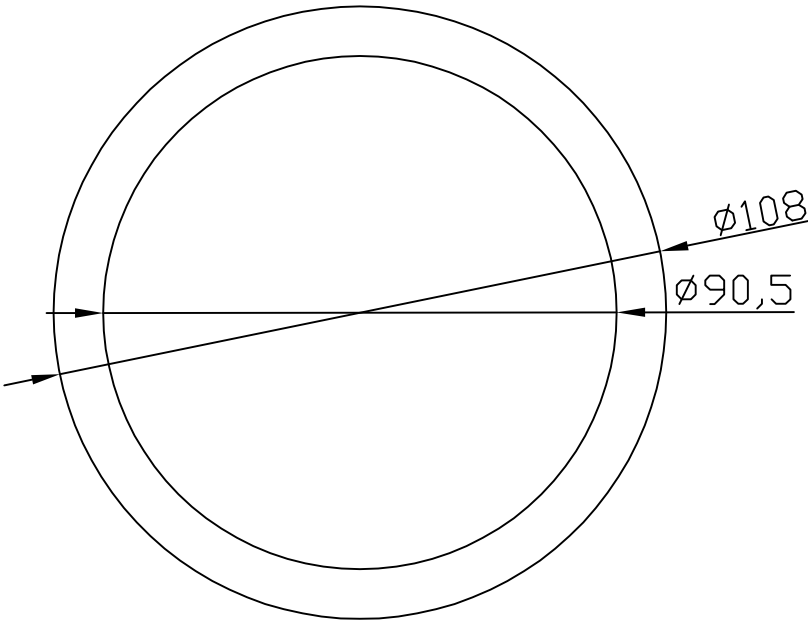
Projetado por

MAURÍCIO

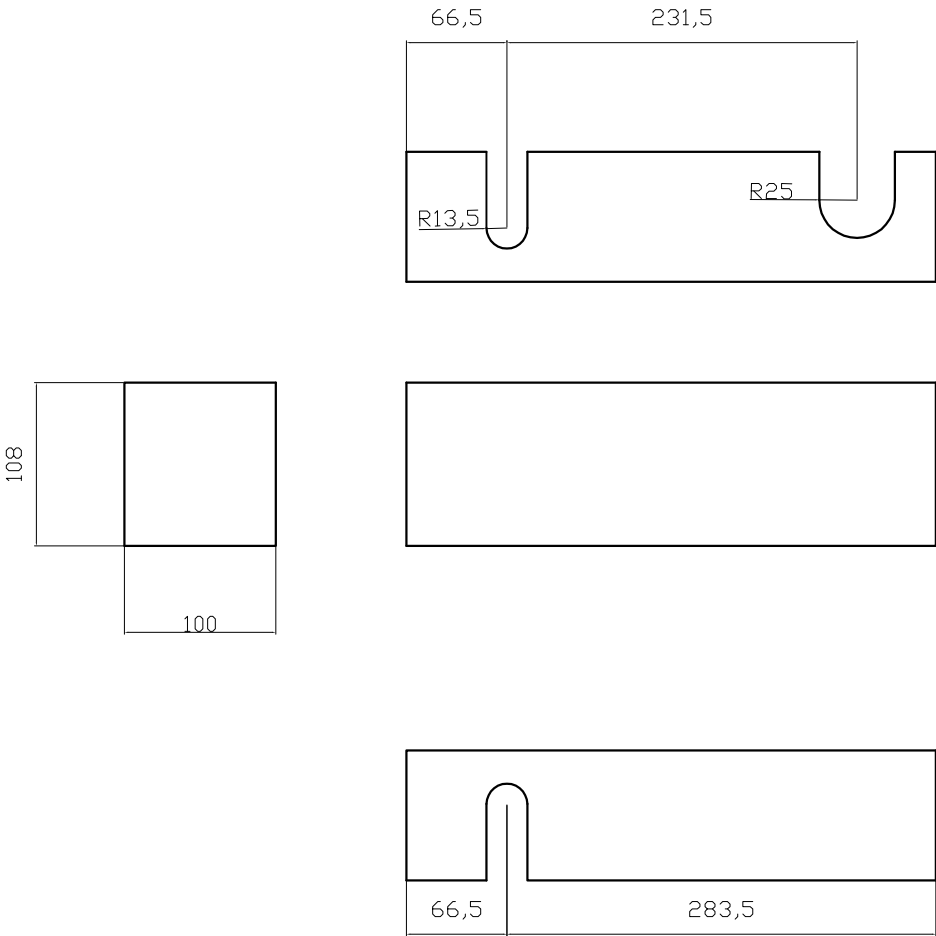
Diedro: 

Material: Aço

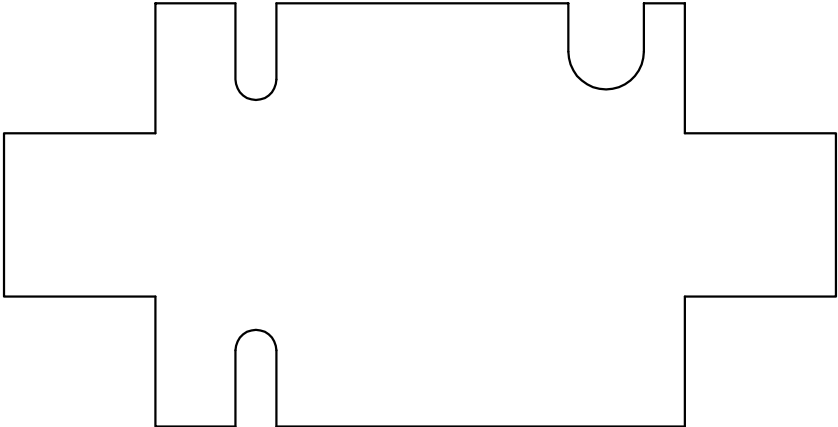
Unidade: mm



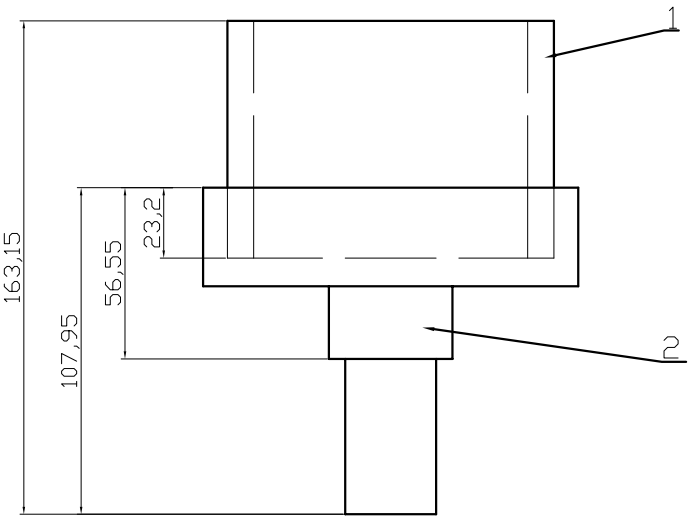
Quantidade: Uma	Peça: Anel suporte cadinho	Escala: 3:4
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Aço	Unidade: mm



Planificação da peça

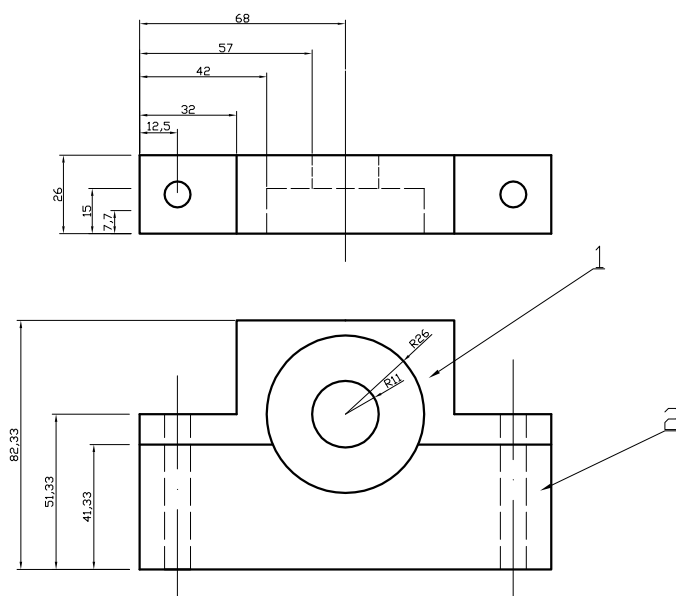


Quantidade: Uma	Peça: Carenagem de proteção do sistema de mistura	Escala: 1:5
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Aço galvanizado	Unidade: mm



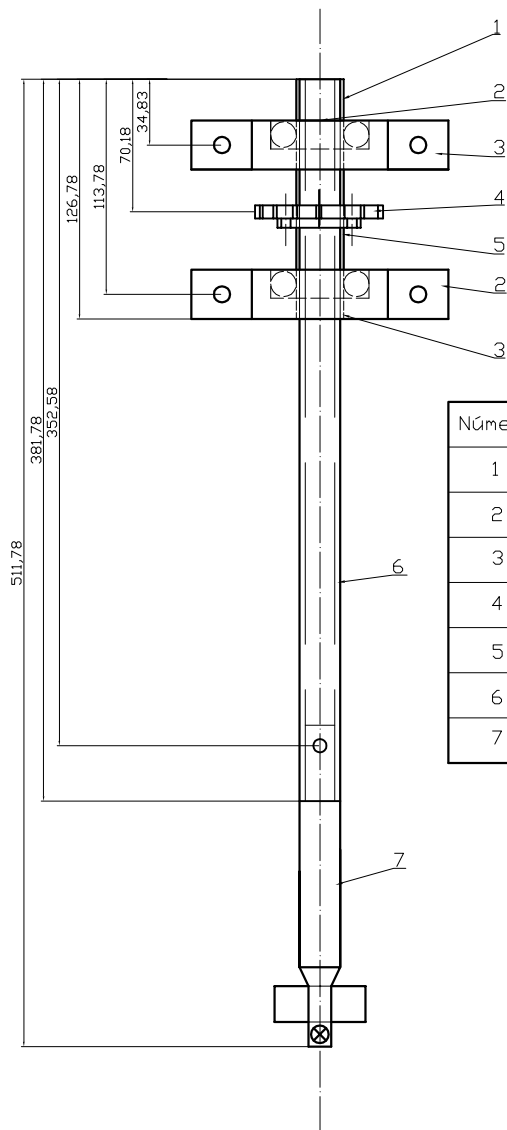
Número	Denominação	Quantidade	Referência	Material
1	Anel do suporte	1	Anel de fixação do suporte cadinho	Aço
2	Base do suporte	1	Suporte cadinho	Aço

Quantidade: Uma	Peça: Suporte cadinho	Escala: 2:5
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Aço	Unidade: mm



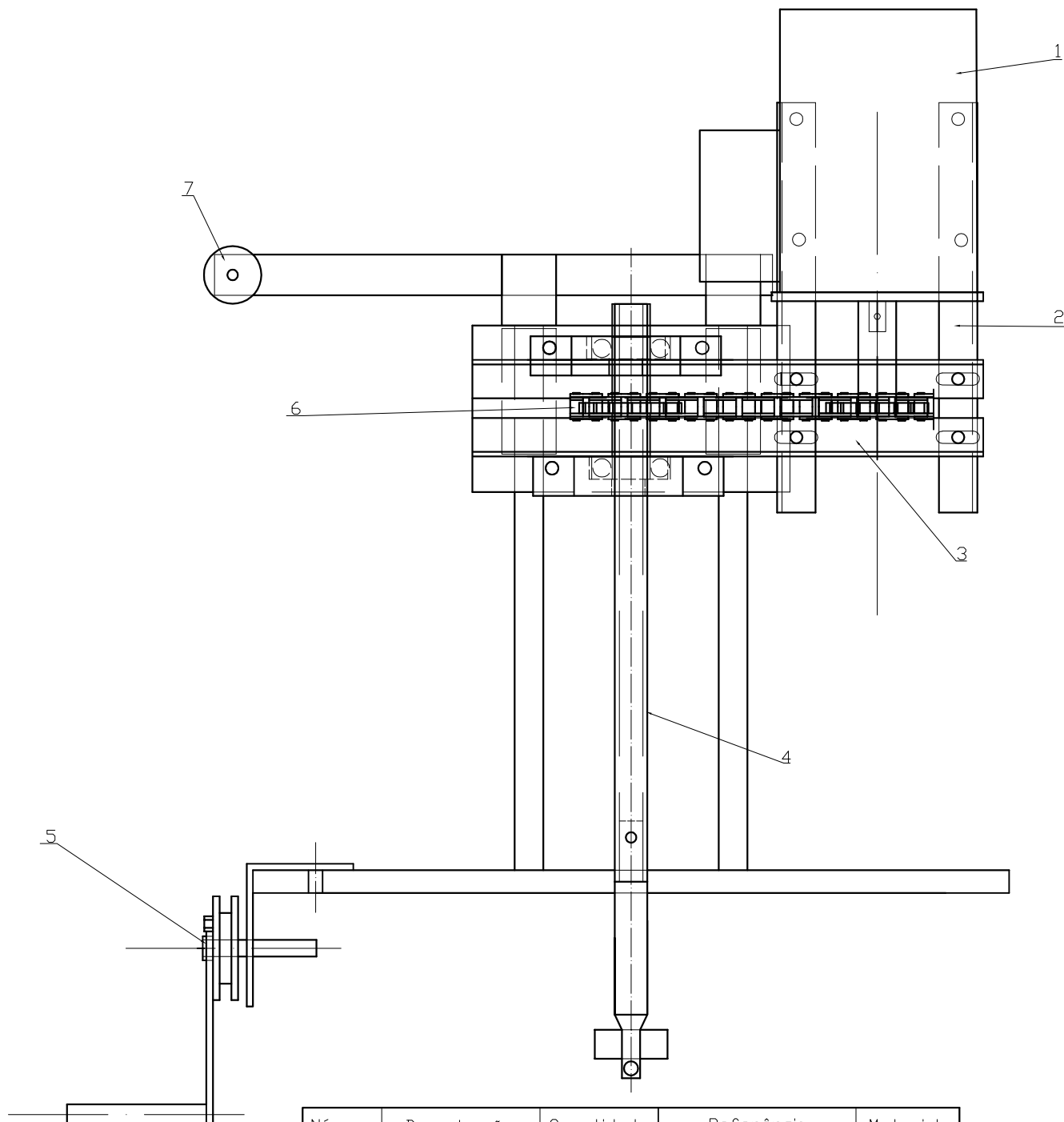
Número	Denominação	Quantidade	Referência	Material
1	Parte superior	2	Parte superior mancal	Alumínio
2	Parte inferior	2	Parte inferior do mancal	Alumínio

Quantidade: Duas	Peça: Mancal	Escala: 3:4
Projetado por MAURÍCIO	Diedro: 	
	Material: Alumínio	Unidade: mm



Número	Denominação	Quantidade	Referência	Material
1	Bucha rolamento	1	Bucha rolamento	Alumínio
2	Rolamento	2	6205 ZZ	Vários
3	Mancal	2	Montagem mancal	Alumínio
4	Pinhão	1	Riffel 125 CC.	Aço
5	Bucha pinhão	1	Bucha pinhão	Alumínio
6	Eixo	1	Eixo de mistura	Inox 304
7	Eixo misturador	1	Eixo misturador	Inox 304

Quantidade: Uma	Peça: Montagem do eixo	Escala: 1:4
Projetado por MAURÍCIO		Diedro: 
		Unidade: mm



Número	Denominação	Quantidade	Referência	Material
1	Motor	1	WEG CFW 08 PLUS	Vários
2	Cantoneira motor	2	Cantoneira suporte motor	Aço
3	Cantoneira de ligação	2	Cantoneira de ligação motor ao eixo de mistura	Aço
4	Eixo	1	Montagem do eixo	Vários
5	Alavanca de içamento	1	Ranieri (2009)	Vários
6	Corrente	1	Corrente de motocicleta	Vários
7	Roldana para içamento	1	Ranieri (2009)	Alumínio

Quantidade: Uma

Peça: Montagem sistema de mistura

Escala: 1:4

Projetado por

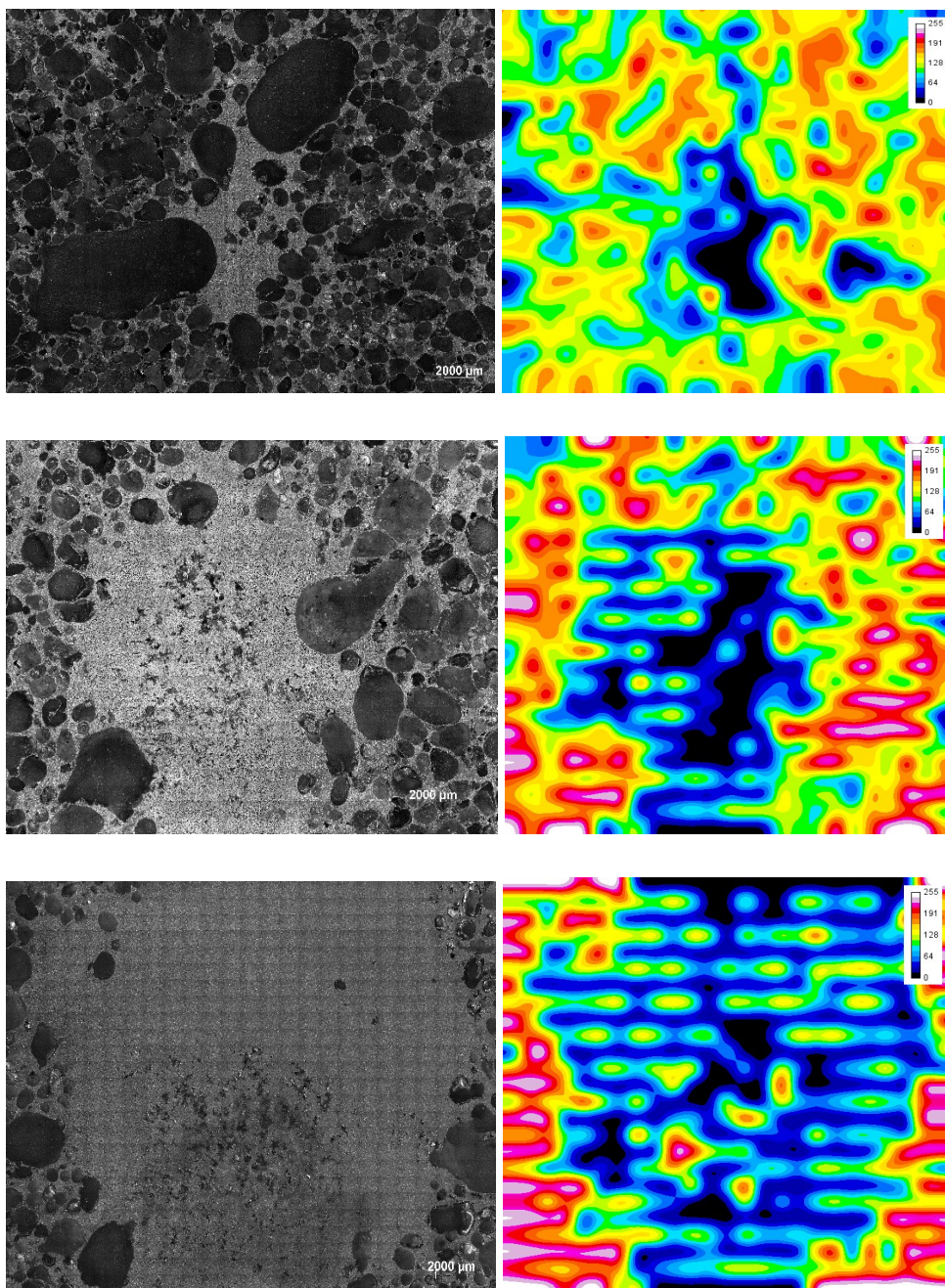
MAURÍCIO

Diedro:

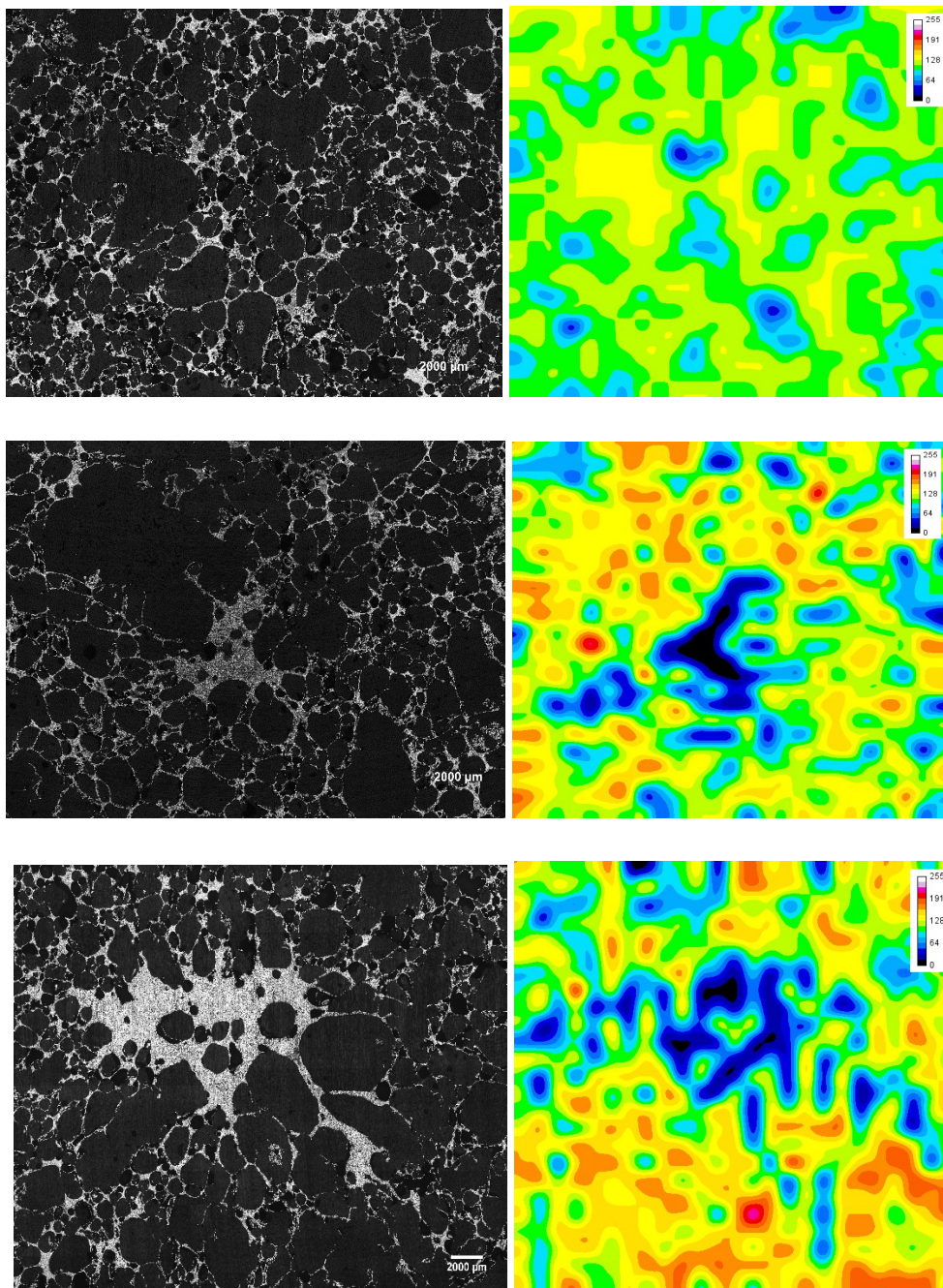
Unidade: mm

APÊNDICE C- Análise de imagens digitais

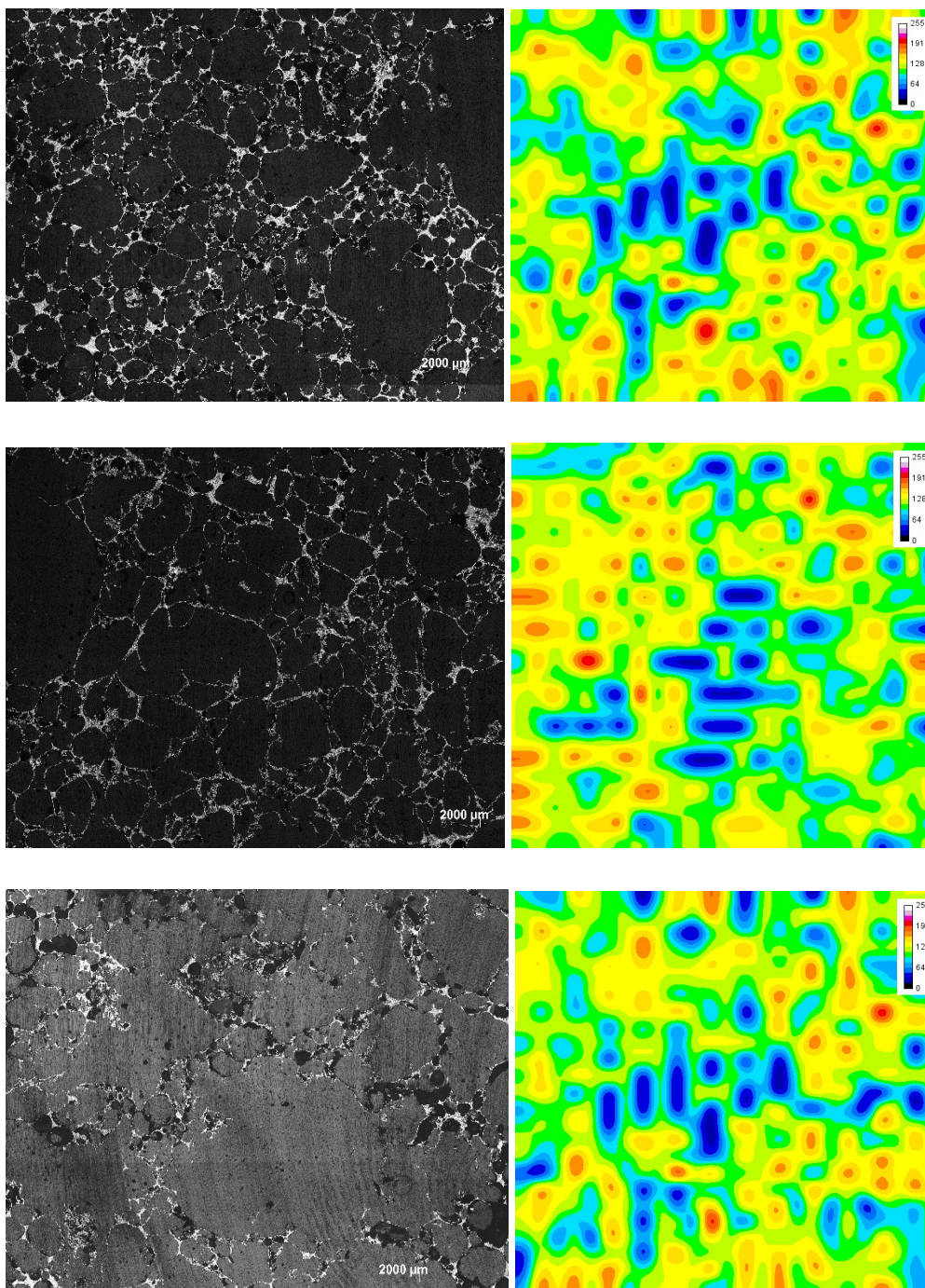
Amostras de 150 segundos de tempo de expansão e 20 mm de altura.



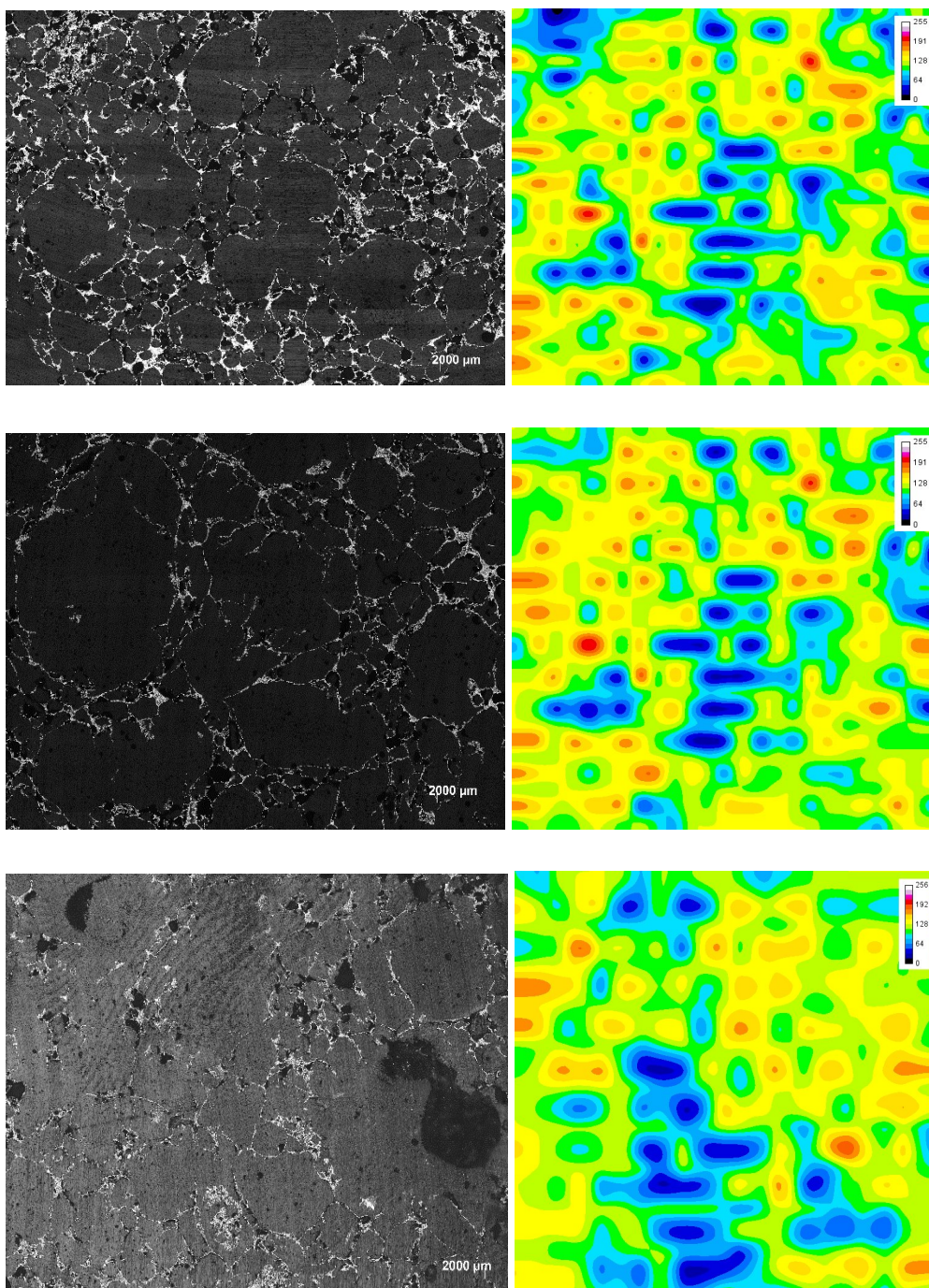
Amostras de 150 segundos de tempo de expansão e 40 mm de altura



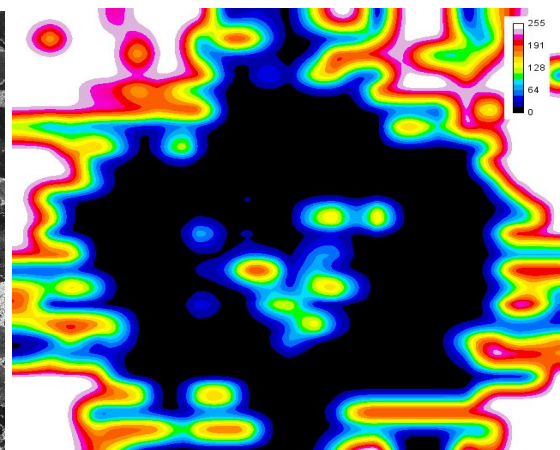
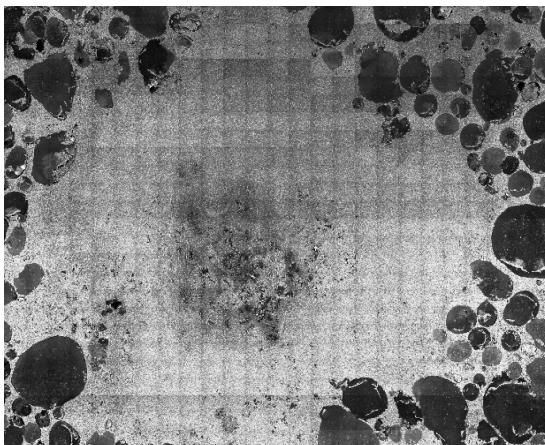
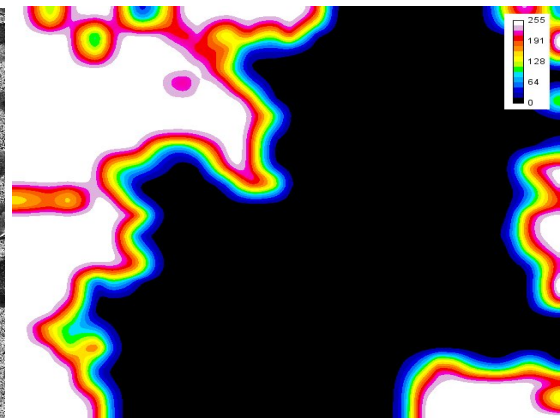
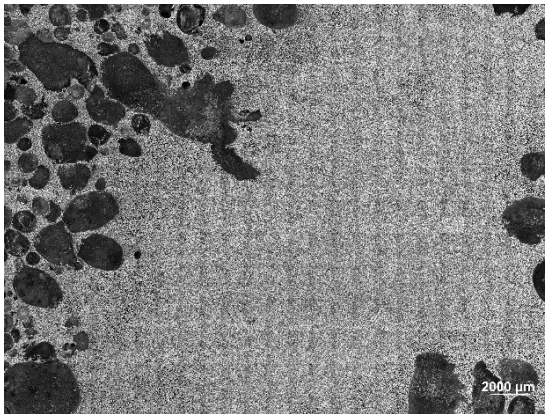
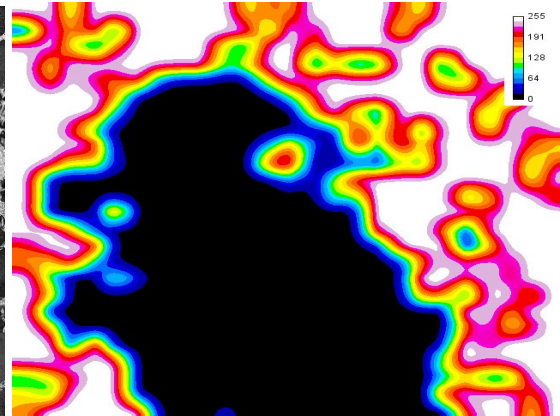
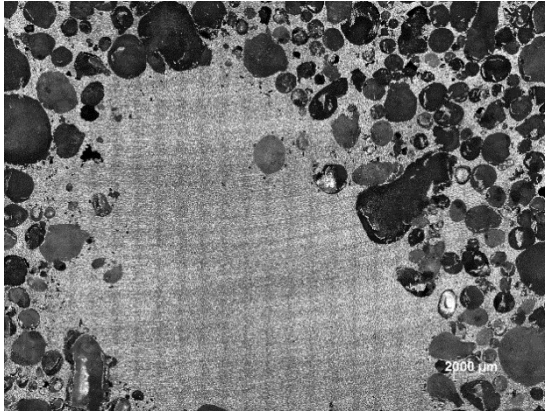
Amostras de 150 segundos de tempo de expansão e 60 mm de altura



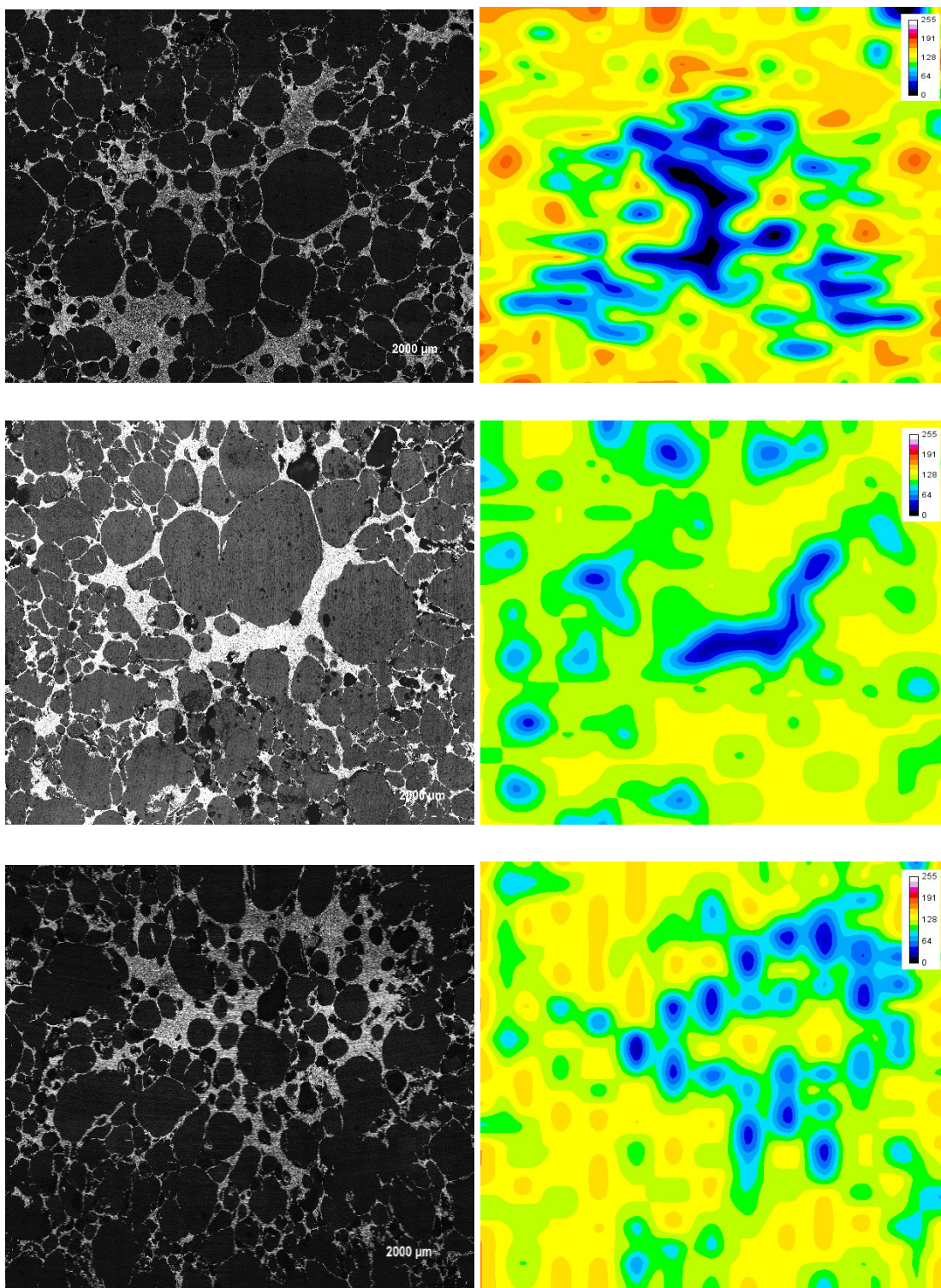
Amostras de 150 segundos de tempo de expansão e 80 mm de altura



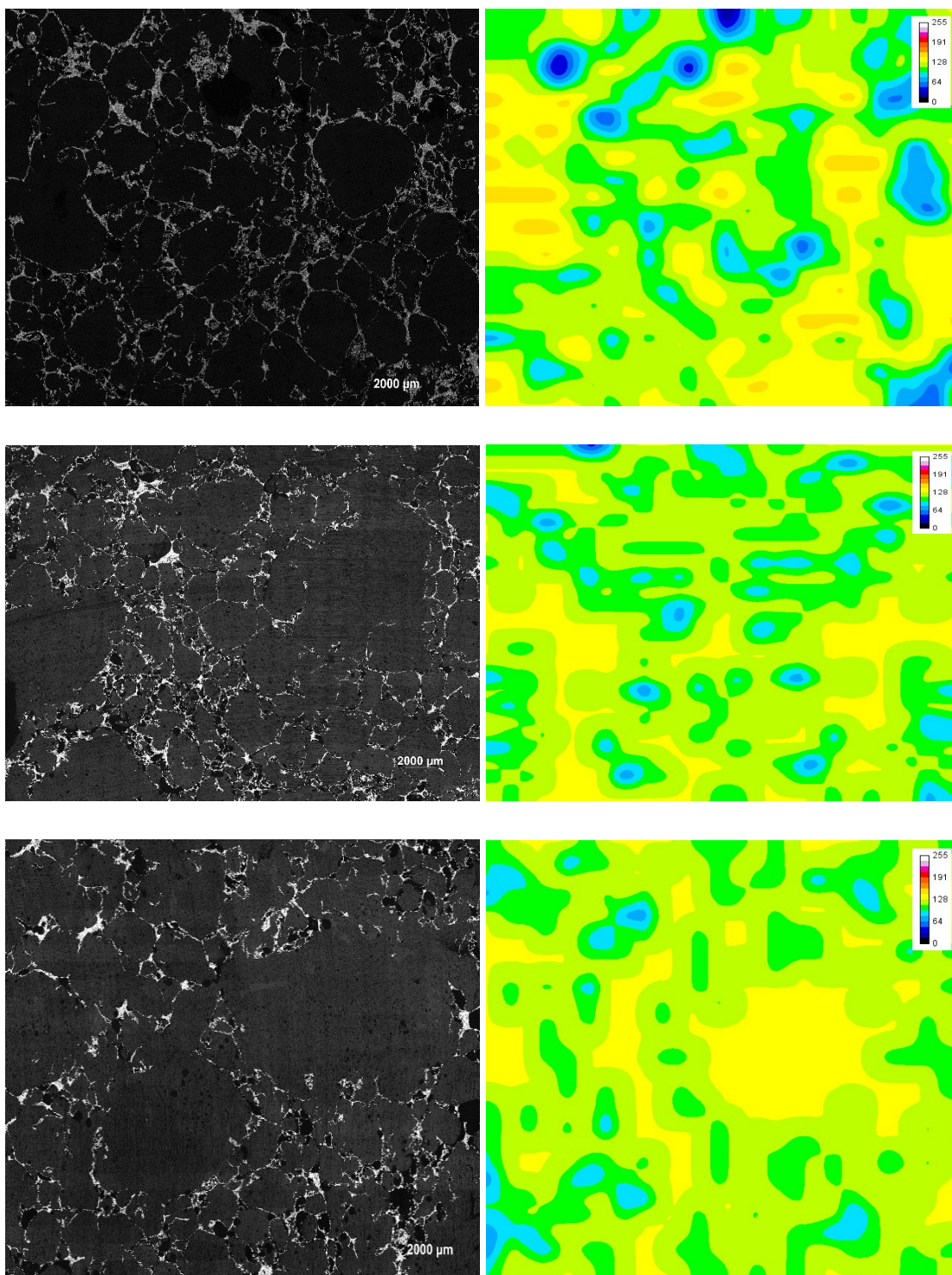
Amostras de 300 segundos de tempo de expansão e 20 mm de altura



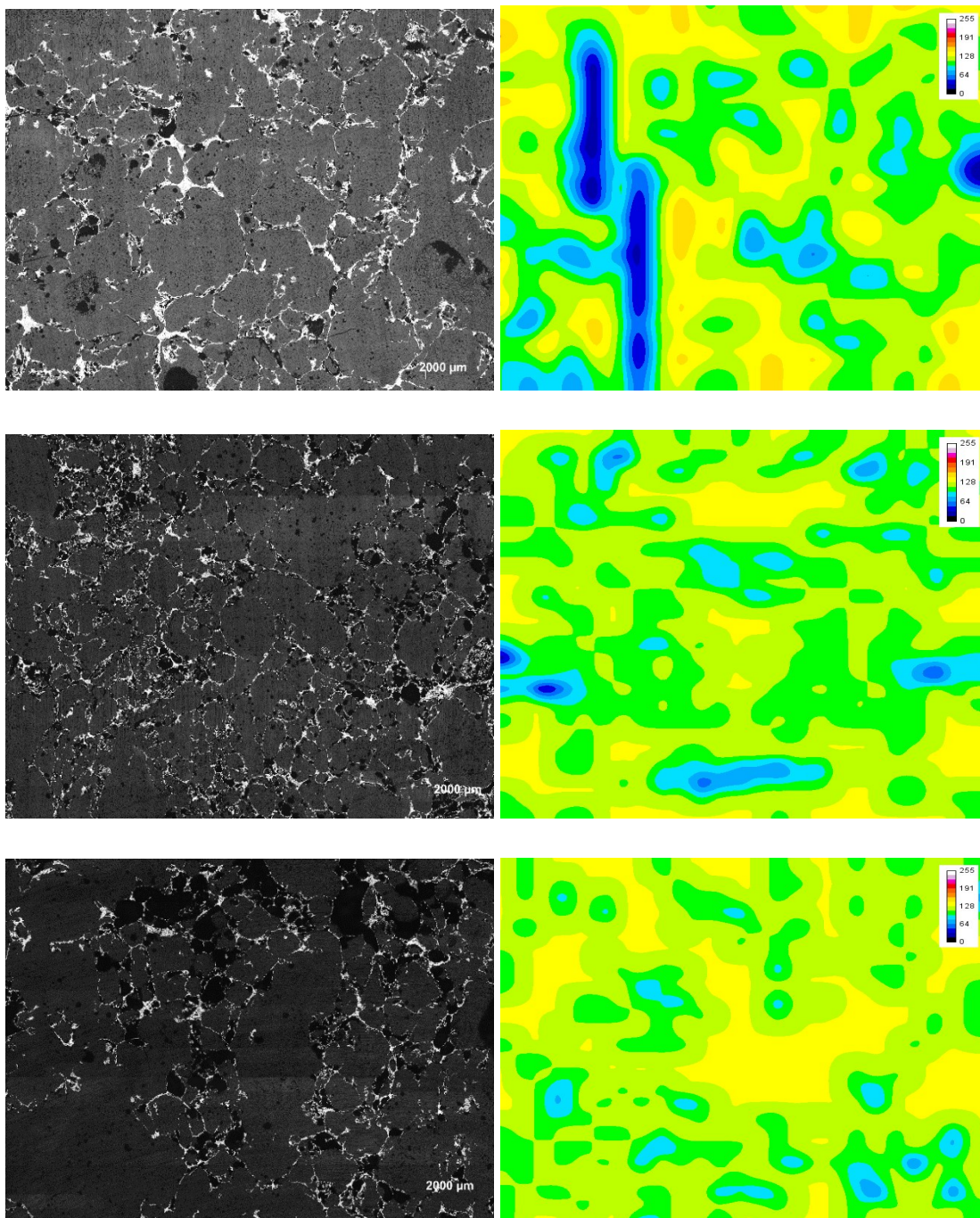
Amostras de 300 segundos de tempo de expansão e 40 mm de altura.



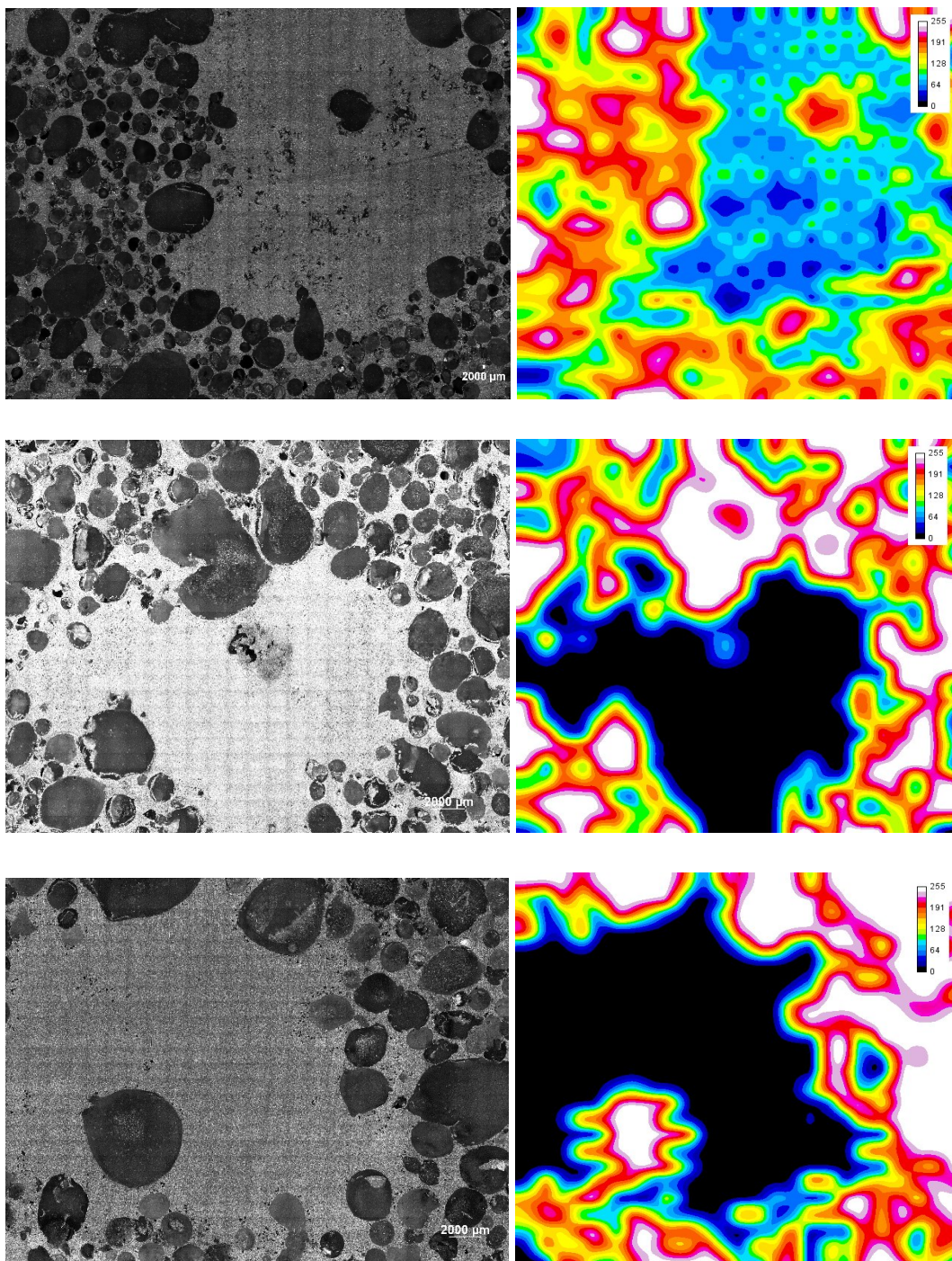
Amostras de 300 segundos de tempo de expansão e 60 mm de altura



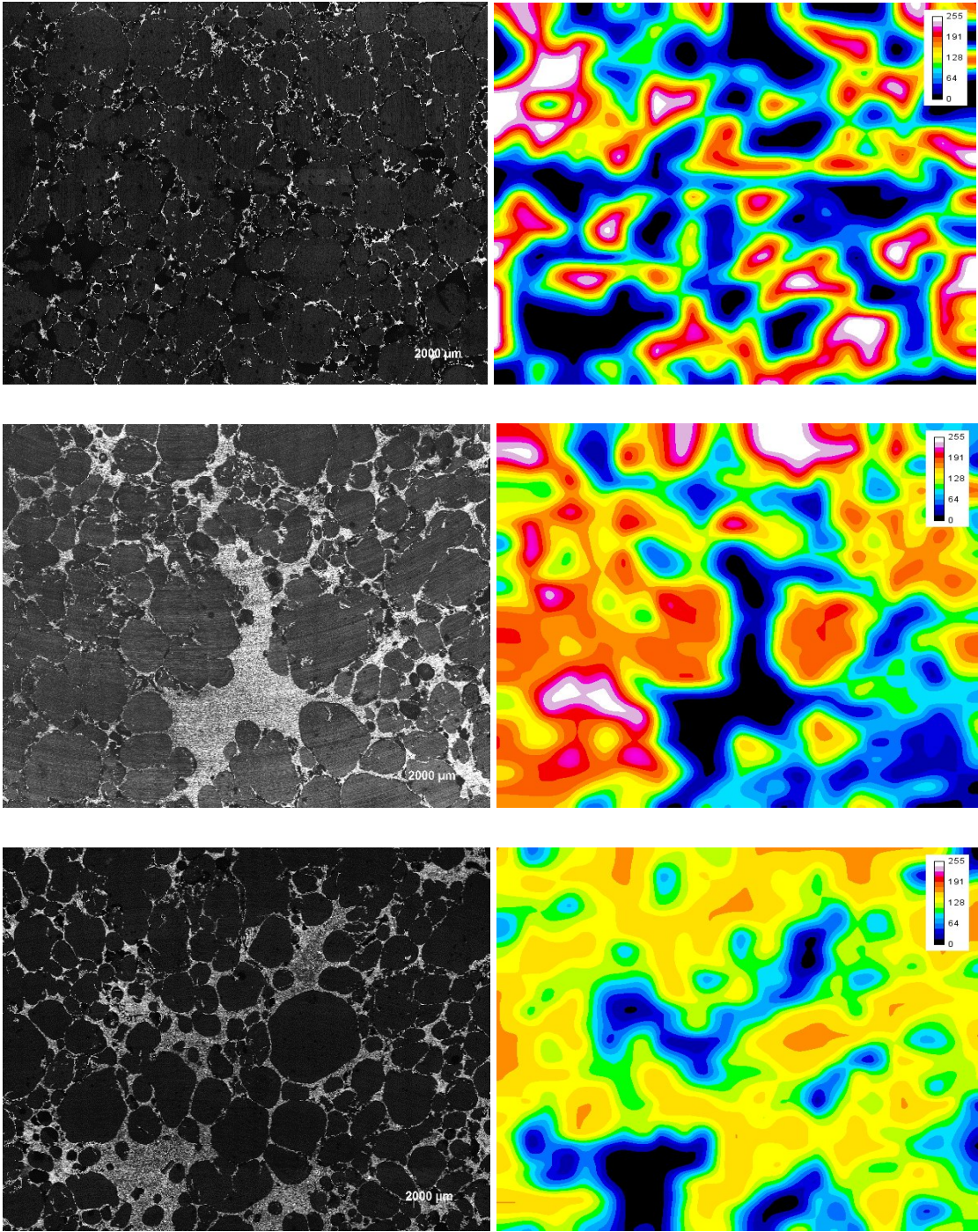
Amostras de 300 segundos de tempo de expansão e 80 mm de altura



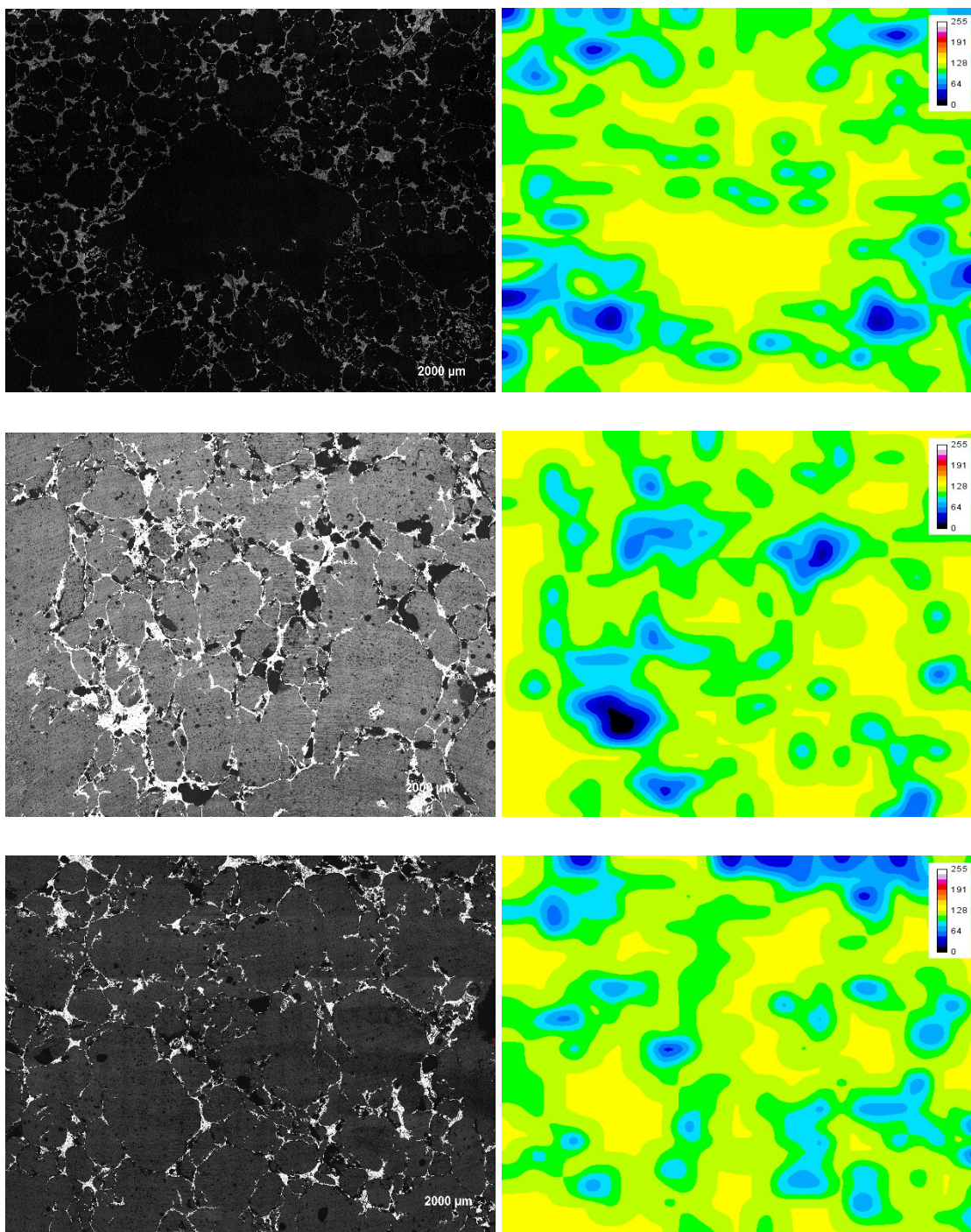
Amostras de 450 segundos de tempo de expansão e 20 mm de altura



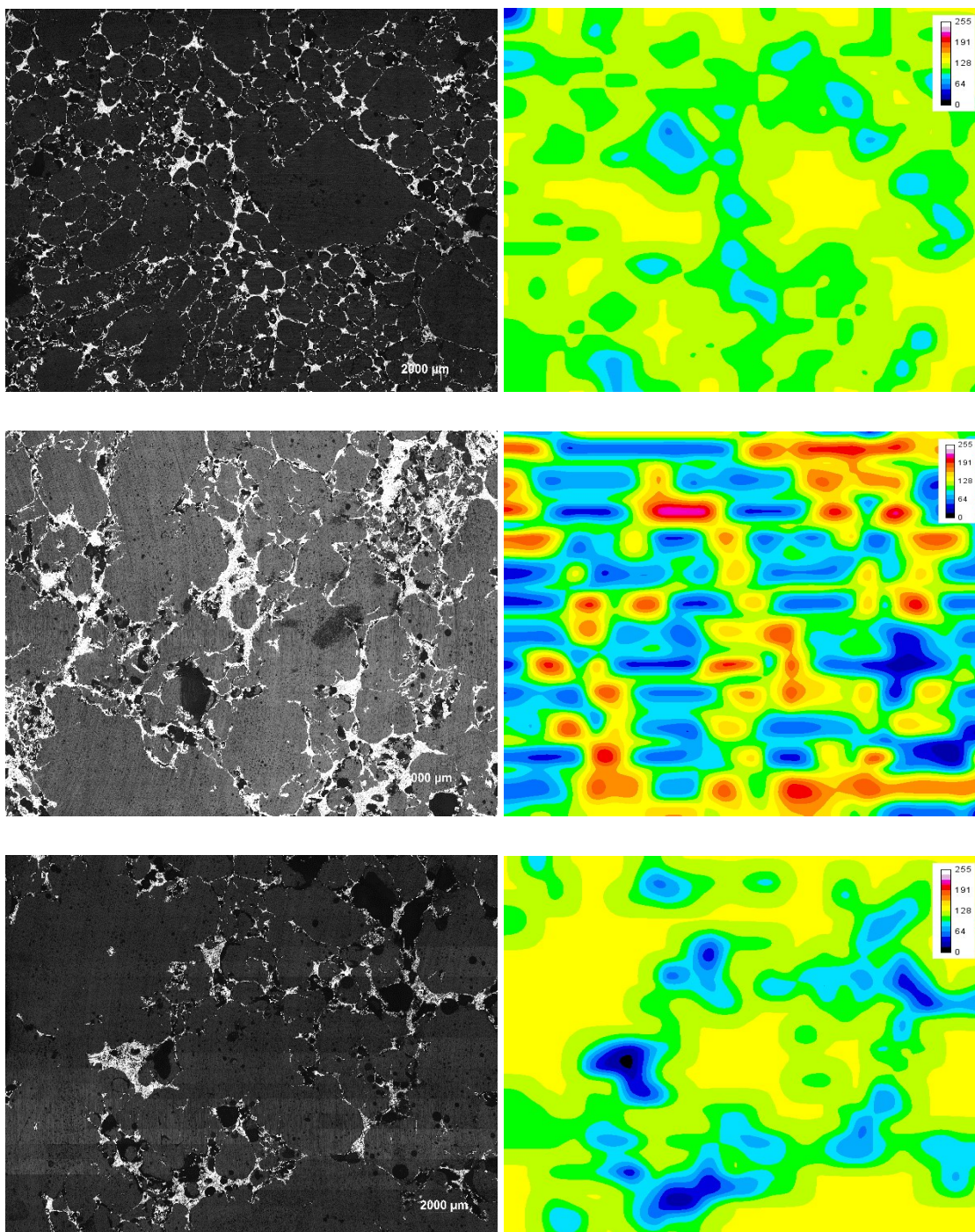
Amostras de 450 segundos de tempo de expansão e 40 mm de altura



Amostras de 450 segundos de tempo de expansão e 60 mm de altura



Amostras de 450 segundos de tempo de expansão e 80 mm de altura



ANEXO A – Laudo químico



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo
Laboratório de Caracterização Tecnológica
Av. Prof. Mello Moraes, 2373 CEP 05508-030 São Paulo - SP www.lct.pol.usp.br
Tel: 1º 3091-5151 e-mail: lct@lct.pol.usp.br



RESULTADOS DE ANÁLISE QUÍMICA

RELATÓRIO: AQ 0911-16

REQ: 01065-16

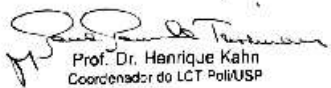
DATA: 20/12/2016

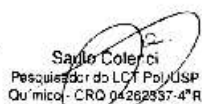
CLIENTE: Mauricio de Oliveira Filho

1. MÉTODO: Os teores apresentados foram determinados em amostra prensada, na calibração STD-1 (Standardless), relativa a análise sem padrões dos elementos químicos compreendidos entre o flúor e o urânio, em espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Bruker, modelo S8 Tiger. A perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1.020°C por 2h. Os valores expressos foram normalizados a 100%.

2. RESULTADOS:

Nº LCT	6435
Amostra	Carbonato de Cálcio
MgO (%)	0,189
Al ₂ O ₃ (%)	0,025
SiO ₂ (%)	0,151
P ₂ O ₅ (%)	0,551
SO ₃ (%)	0,012
Cl (%)	0,030
K ₂ O (%)	0,007
CaO (%)	55,2
Fe ₂ O ₃ (%)	0,016
SrO (%)	0,254
ZrO ₂ (%)	0,006
PF (%)	43,5


Prof. Dr. Henrique Kahn
Coordenador do LCT Pol/USP


Sayla Colefci
Pesquisador do LCT Pol/USP
Químico - CRO 04262937-4ºR


Paulo A. Feldbaum
Pesquisador do LCT Pol/USP
Químico - CRO 04182927-4ºR

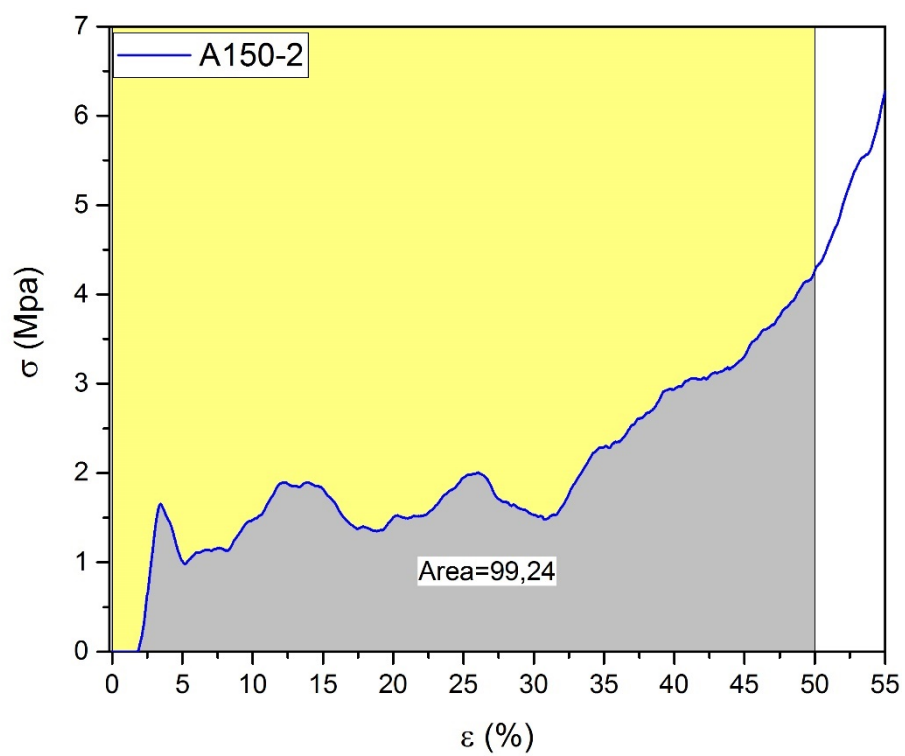
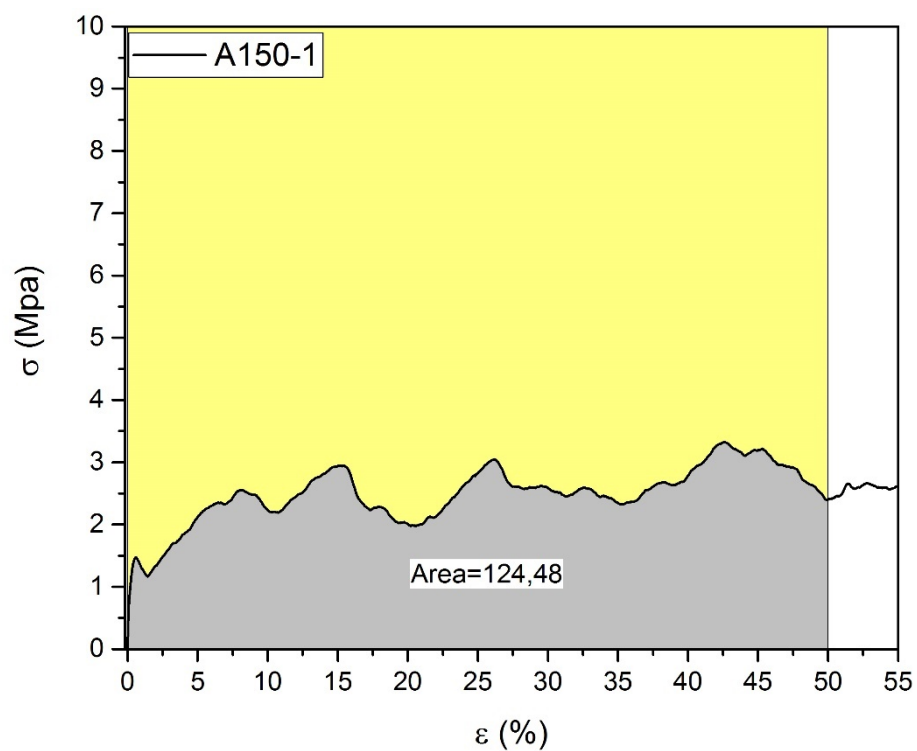
NOTA: Os resultados expostos acima referem-se apenas à(s) amostra(s) enviada(s) ao LCT, a representatividade da(s) amostra(s) é de inteira responsabilidade do cliente.

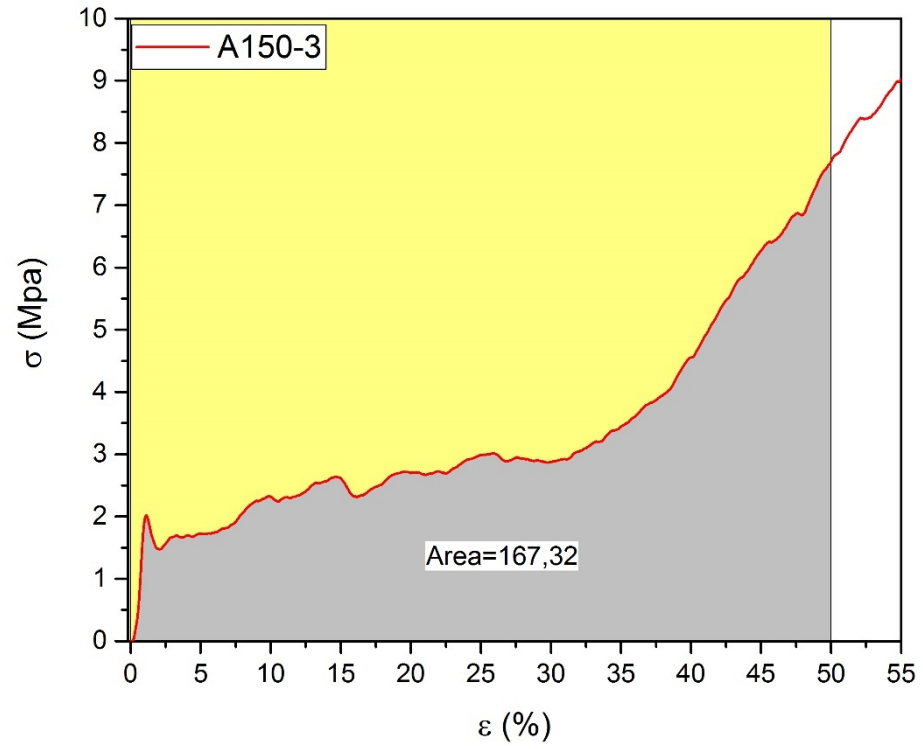
Relatório AQ 0911-16

Página 1 de 1

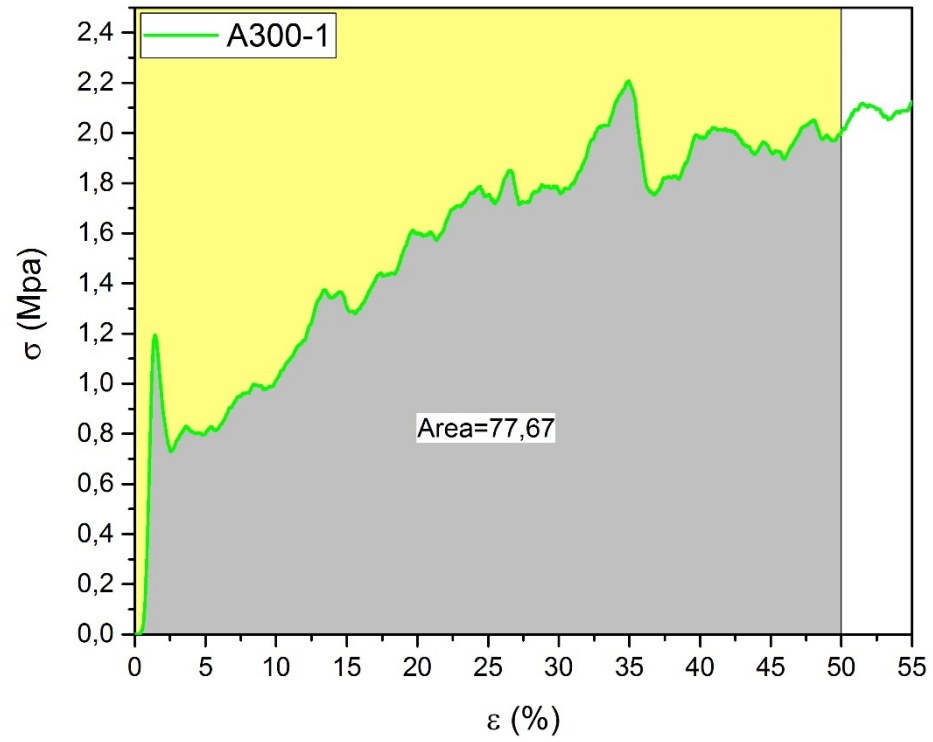
ANEXO B – Comportamento mecânico

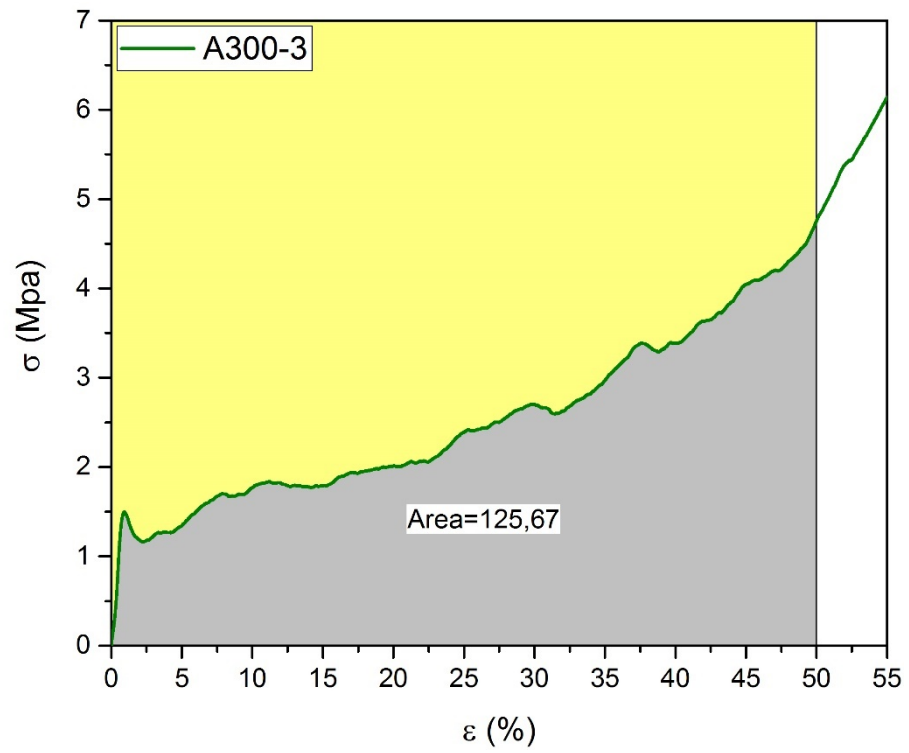
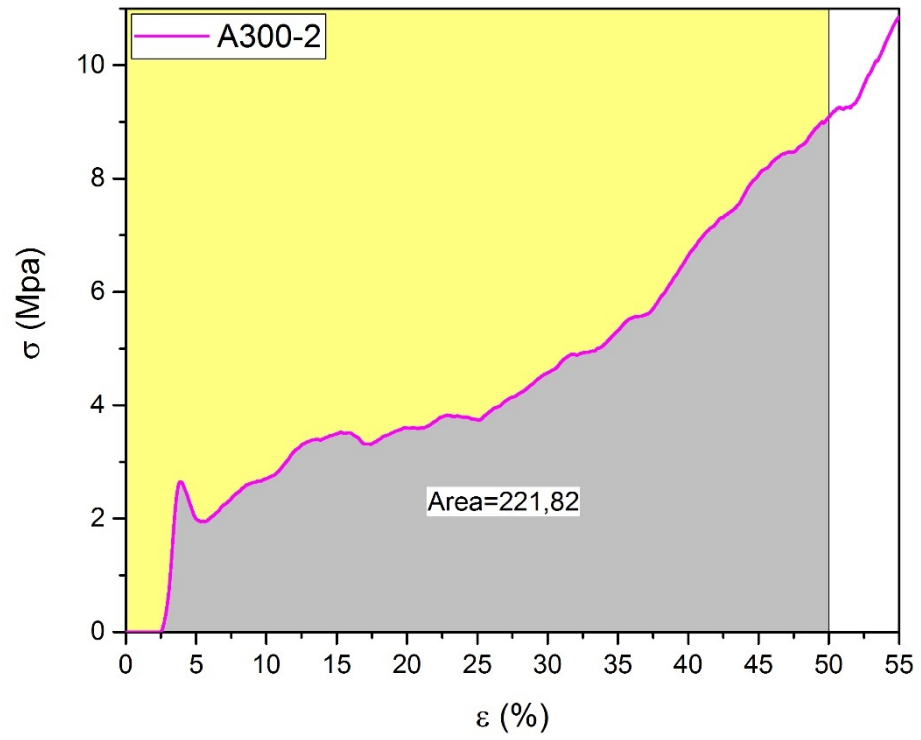
Integral das amostras processadas a 150 segundos





Integral das amostras processadas a 300 segundos





Integral das amostras processadas a 450 segundos

