



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Dissertação de Mestrado

Lucas Xavier Soares de Souza

**OBTENÇÃO DE ESPUMA DE ALUMÍNIO:** avaliação da influência da granulometria dos pós de metal base, da pressão de compactação e do tempo de encharque do tratamento térmico.

Belo Horizonte  
Novembro de 2018

Lucas Xavier Soares de Souza

**OBTENÇÃO DE ESPUMA DE ALUMÍNIO:** avaliação da influência da granulometria dos pós de metal base, da pressão de compactação e do tempo de encharque do tratamento térmico.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, na área de concentração de Ciência e Desenvolvimento de Materiais, na Linha de Pesquisa em Seleção, Processamento e Caracterização, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro  
Coorientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Belo Horizonte  
Novembro de 2018

S729o Souza, Lucas Xavier Soares de.  
Obtenção de espuma de alumínio : avaliação da influência da granulometria dos pós de metal base, da pressão de compactação e do tempo de encharque do tratamento térmico / Lucas Xavier Soares de Souza. – 2018.  
81 f. : il.  
Orientadora: Ivete Peixoto Pinheiro  
Coorientador: Sidney Nicodemos da Silva  
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2018.  
Bibliografia.

1. Alumínio. 2. Espuma de alumínio. 3. Metalurgia do pó. I. Pinheiro, Ivete Peixoto. II. Silva, Sidney Nicodemos da. III. Título.

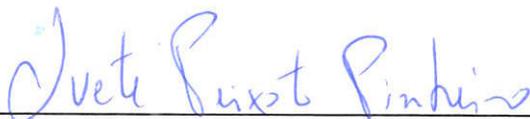
CDD: 671.3

*DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
“OBTENÇÃO DE ESPUMA DE ALUMÍNIO: AVALIAÇÃO  
DA INFLUÊNCIA DA GRANULOMETRIA DOS PÓS DE  
METAL BASE, DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO E DO  
TEMPO DE ENCHARQUE DO TRATAMENTO TÉRMICO”*

Autor: Lucas Xavier Soares de Souza

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



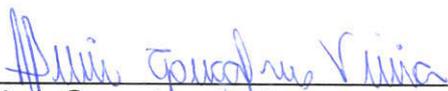
Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ivete Peixoto Pinheiro (ORIENTADORA)

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG



Prof. Dr. Almir Gonçalves Vieira

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG

Belo Horizonte, 01 de Novembro de 2018.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Maria e Vanderlei, pelo amor, serenidade e apoio incondicional durante toda a trajetória.

Aos meus irmãos, Marivan, Juliano e Lorena, pela paciência e amizade.

À minha orientadora, Ivete Peixoto Pinheiro pela orientação, carinho, atenção, conselhos. Sem ela não seria possível a realização desse trabalho.

Ao professor Sidney Nicodemos, pela coorientação, contribuição teórica, sugestões e confiança durante a realização deste trabalho.

À equipe da manutenção, especialmente Carlos Alberto de Oliveira Cosme, Geraldo Mercis de Oliveira e Rogério Morouço Coutinho pela atenção, dedicação e disponibilidade em ajudar.

À professora Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pelo auxílio, conselhos e amizade.

Ao professor Wellington Lopes, pela disponibilização e apoio junto ao Laboratório de Tratamentos Térmicos.

Ao professor Paulo Renato Perdigão Paiva, pela atenção e disponibilidade para realização de ensaios diversos no Laboratório de Cerâmicas Finas.

Ao professor Augusto Cesar da Silva Bezerra, pela ajuda e disponibilidade para realização de ensaios de compressão.

Ao Renato Siqueira pela atenção e apoio na caracterização de materiais.

Ao professor Marcello Rosa Dumont pelo comprometimento e disponibilidade.

À equipe do Laboratório de Caracterização de Materiais, pela presteza e dedicação.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, particularmente à Caroline Fernandes, pelo auxílio.

Aos colegas do mestrado em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, em especial Paulo Leite, Junia Bicalho, Steferson de Oliveira pela amizade e apoio e Arthur Izumi e Cristina Esteves pela grande ajuda na execução deste trabalho.

Ao CEFET-MG, pela disponibilidade de profissionais, instalações e laboratórios.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Ao CNPq, FAPEMIG e Fundação CEFETMINAS, pelo financiamento dos equipamentos e insumos disponíveis em laboratórios.

*“O homem só é feliz se puder desenvolver e utilizar todas as suas capacidades e possibilidades”*

*Jostein Gaarder – O Mundo de Sofia.*

## RESUMO

No contexto de eficiência energética na área de transporte como nas indústrias automobilísticas e aeronáuticas, a redução de peso em estruturas assume um papel importante. Como alternativa para isso, as espumas metálicas, mais especificamente, as espumas de alumínio, surgem com grande potencial para aplicação e, além de beneficiar em relação ao consumo de combustível, podem contribuir para segurança e conforto em carros e aeronaves. Isso se deve primeiramente às propriedades do alumínio que, em combinação com a estrutura em forma de espuma, pode potencializar as propriedades desse elemento para determinadas aplicações. Buscou-se com este trabalho, obter espuma de alumínio a partir de pós pela rota de pulverotecnologia, com a prensagem uniaxial a frio em matriz rígida como método de compactação e posteriormente, avaliar a influência de parâmetros como granulometria dos pós de metal base, pressão de compactação e tempo de encharque do tratamento térmico. O hidreto de titânio foi utilizado como agente expensor e para metal base foi utilizado alumínio comercialmente puro. A avaliação dos parâmetros foi feita de forma comparativa considerando valores de densidades relativas das amostras obtidas para cada condição de processamento. Espumas de alumínio com densidade relativa de 69 a 95% do valor da densidade do alumínio utilizado foram obtidas e a melhor espuma de alumínio obtida foi com alumínio com granulometria menor que  $45\mu\text{m}$  (tipo 1), pressão de compactação 500MPa e tempo de tratamento térmico de 10 minutos à uma temperatura de  $710^{\circ}\text{C}$ .

Palavras-chave: Espuma metálica; alumínio; espuma de alumínio; pulverotecnologia; densidade relativa.

## ABSTRACT

In the context of energy efficiency in the transport area as in the automobile and aeronautical industries, the reduction of weight in structures plays an important role. As an alternative to this, metallic foams, more specifically aluminum foams, come with great potential for application and, in addition to benefiting from fuel consumption, can contribute to safety and comfort in cars and aircraft. This is primarily due to the properties of aluminum which, in combination with the foam structure, can enhance the properties of this element for particular applications. The objective of this work was to obtain aluminum foam from powders by the pulverotechnology route, with cold uniaxial pressing in a rigid matrix as a compaction method and afterwards to evaluate the influence of parameters such as particle size of the metal base powders, pressure compaction and soak time of the heat treatment. Titanium hydride was used as the blowing agent and commercially pure aluminum was used for the metal base. The evaluation of the parameters was done in a comparative way considering values of relative densities of the samples obtained for each processing condition. Aluminum foams with a relative density of 69-95% of the value of aluminum density were obtained and the best aluminum foam obtained was aluminum with particle size less than 45 $\mu$ m (type 1), compression pressure 500MPa and heat treatment time of 10 minutes at a temperature of 710 °C

Keywords: Metallic foam; aluminum; aluminum foam; pulverotechnology; relative density.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Micrografia de espuma metálica com estrutura (a) fechada e (b) aberta.	25
Figura 2 – Campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo. ....	27
Figura 3 – Peça preenchida com espuma metálica.....	27
Figura 4 – Peça utilizada em sistema de absorção de impacto. ....	28
Figura 5 – Processos para obtenção de espumas metálicas.....	28
Figura 6 – Resistência a compressão de espumas de alumínio com a direção da expansão, orientada nas direções (a) perpendicular e (b) paralela à força exercida.	32
Figura 7– Resistência à compressão versus densidade de espumas de alumínio, com a direção da expansão, orientada nas direções (a) paralela e (b) perpendicular à força exercida.....	33
Figura 8 – Comparação da densidade de diferentes espumas de estrutura fechada. ....	34
Figura 9 - Tipos e formas de partículas metálicas.....	36
Figura 10 – Fluxograma básico dos processos pulverotecnologia e metalurgia do pó. ....	38
Figura 11 – Prensagem uniaxial de ação simples. ....	41
Figura 12 – Gradiente de pressão em corpos conformados por prensagem uniaxial de ação simples. ....	41
Figura 13 – Amostras de espuma de magnésio obtidas por metalurgia do pó.....	43
Figura 14 – Amostras de espumas de magnésio obtidas por pulverotecnologia. ....	44
Figura 15 – Amostras de espuma de alumínio obtidas por pulverotecnologia. ....	44
Figura 16 – Fluxograma dos experimentos. ....	45

Figura 17 – Pós utilizados nos experimentos: (a) alumínio tipo 1, (b) alumínio tipo 2, (c) hidreto de titânio e (d) estearato de zinco.....	47
Figura 18 – Misturador manual Y. ....	50
Figura 19 – Matriz utilizada na prensagem uniaxial. ....	51
Figura 20 – Desenho com dimensões da matriz, tampa inferior e pistão. ....	51
Figura 21 – Máquina universal de ensaios, modelo EMIC 23-300, marca INSTRON/EMIC. ....	52
Figura 22 – Prensa utilizada para produção das amostras. ....	53
Figura 23 – Desenho do suporte para desmolde da amostra compactada. ....	53
Figura 24 – Suporte para desmolde da amostra compactada. ....	54
Figura 25 – Metodologia de medição para método geométrico. ....	54
Figura 26 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de alumínio tipo 1.....	56
Figura 27 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de alumínio tipo 2.....	56
Figura 28 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de hidreto de titânio. ....	57
Figura 29 – Gráfico com curvas termogravimétrica e térmica diferencial do hidreto de titânio.....	58
Figura 30 – Imagem (MEV) da mistura do pó de alumínio tipo 1 com hidreto de titânio.....	58
Figura 31 – Imagem do mapeamento químico da mistura do pó de alumínio tipo 1 com hidreto de titânio evidenciando os elementos químicos (a) alumínio e (b) titânio. ....	59
Figura 32 – Imagem (MEV) da mistura do pó de alumínio tipo 2 com hidreto de titânio.....	59

Figura 33 – Imagem do mapeamento químico da mistura do pó de alumínio tipo 2 com hidreto de titânio evidenciando os elementos químicos (a) alumínio e (b) titânio. ....	60
Figura 34 – Curvas de compactação. ....	60
Figura 35 – Amostras produzidas com diferentes pressões de compactação para pós do tipo 1 (a) 200, (b) 350, (c) 500MPa, e para pós do tipo 2 (d) 200, (e) 350 e (f) 500MPa. ....	61
Figura 36 – Densidades relativas obtidas para cada tipo de alumínio em função da pressão de compactação. ....	62
Figura 37 – Corpos de prova (a) antes do tratamento térmico e (b) após o tratamento térmico. ....	64
Figura 38 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	66
Figura 39 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	66
Figura 40 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 30 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	66
Figura 41 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	67
Figura 42 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	67
Figura 43 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 30 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	67
Figura 44 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	68
Figura 45 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2. ....	68

Figura 46 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.....	68
Figura 47 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 500MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	70
Figura 48 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 350MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	70
Figura 49 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 200MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	70
Figura 50 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 500MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	72
Figura 51 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 350MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	72
Figura 52 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 200MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos. ....	72
Figura 53 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 10 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	74
Figura 54 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 20 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	74
Figura 55 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 30 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	74
Figura 56 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 10 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	75
Figura 57 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 20 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	76
Figura 58 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 30 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre valores de resistência específica entre alguns tipos de alumínio e outros materiais. ....	22
Tabela 2 – Principais aplicações do alumínio de acordo com sua composição química.....	23
Tabela 3 – Potenciais aplicações para espumas metálicas. ....	25
Tabela 4 – Parâmetros para obtenção das amostras. ....	47
Tabela 5 – Composição química dos pós de alumínio.....	48
Tabela 6 – Composição química do pó de hidreto de titânio.....	48
Tabela 7 – Granulometria dos pós de alumínio e de hidreto de titânio. ....	48
Tabela 8 – Parâmetros para ensaios de compactação.....	52
Tabela 9 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado e pressão de compactação. ....	63
Tabela 10 – ANOVA da densidade relativa das amostras compactadas.....	63
Tabela 11 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado.....	65
Tabela 12 – Teste t da densidade relativa das amostras expandidas com os diferentes tipos de alumínio. ....	65
Tabela 13 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com cada pressão de compactação para alumínio tipo 1 e variação do tempo. ....	69
Tabela 14 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com cada pressão de compactação para alumínio tipo 2 e variação do tempo. ....	71

Tabela 15 – ANOVA da densidade relativa das amostras expandidas para cada tipo de pó e pressão, com diferentes tempos de tratamento térmico. ....	73
Tabela 16 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tempo de tratamento térmico para alumínio tipo 1 e pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa. ....	73
Tabela 17 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tempo de tratamento térmico para alumínio tipo 2 e pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa. ....	75
Tabela 18 – ANOVA da densidade relativa das amostras expandidas para cada tipo de pó e com diferentes pressões de compactação .....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de variância

DTA – Análise térmica diferencial (*Differential Thermal Analysis*).

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

PM – Metalurgia do pó (*Powder Metallurgy*).

PMMA – Polimetilmetacrilato.

rpm – Rotações por minuto

TG – Termogravimetria.

## LISTA DE SÍMBOLOS

MPa – Mega Pascal.

$\rho$  – densidade.

Al – Alumínio.

TiH<sub>2</sub> – Hidreto de titânio.

$\mu\text{m}$  – Micrômetro.

$\alpha$  – grau de confiabilidade.

p – probabilidade de significância.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	18
2.	OBJETIVOS.....	20
2.1.	Objetivos gerais.....	20
2.2.	Objetivos específicos .....	20
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1.	Alumínio .....	21
3.1.1.	<i>Breve histórico.....</i>	21
3.1.2.	<i>Processo de obtenção de alumínio metálico.....</i>	21
3.1.3.	<i>Características, propriedades e aplicações usuais do alumínio.....</i>	21
3.2.	Espumas metálicas .....	23
3.2.1.	<i>Tipos de espumas metálicas e suas aplicações.....</i>	24
3.2.2.	<i>Processos para obtenção de espumas metálicas.....</i>	28
3.2.3.	<i>Agentes expansores.....</i>	30
3.2.4.	<i>Características e propriedades das espumas metálicas .....</i>	31
3.3.	Características dos pós metálicos .....	35
3.4.	Metalurgia do pó (PM) e pulverotecnologia .....	37
3.4.1.	<i>Conceitos.....</i>	37
3.4.2.	<i>Mistura dos pós.....</i>	39
3.4.3.	<i>Compactação dos pós.....</i>	39
3.4.4.	<i>Tratamento térmico.....</i>	42
3.5.	Parâmetros do processo de obtenção de espumas.....	42
4.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	45
4.1.	Descrição do trabalho .....	45
4.2.	Considerações iniciais .....	46
4.3.	Caracterização dos pós.....	49

<b>4.4.</b>	<b>Preparação dos pós</b> .....	<b>49</b>
<b>4.5.</b>	<b>Mistura dos pós</b> .....	<b>50</b>
<b>4.6.</b>	<b>Processo de compactação</b> .....	<b>50</b>
<b>4.7.</b>	<b>Desmolde</b> .....	<b>53</b>
<b>4.8.</b>	<b>Avaliação da densidade das amostras compactadas</b> .....	<b>54</b>
<b>4.9.</b>	<b>Expansão das amostras compactadas / obtenção da estrutura em forma de espuma</b> .....	<b>55</b>
<b>4.10.</b>	<b>Avaliação de estrutura e propriedades do produto final</b> .....	<b>55</b>
<b>4.11.</b>	<b>Análise estatística</b> .....	<b>55</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>56</b>
<b>5.1.</b>	<b>Aspecto geométricos dos pós de alumínio</b> .....	<b>56</b>
<b>5.2.</b>	<b>Decomposição do agente expensor</b> .....	<b>57</b>
<b>5.3.</b>	<b>Mistura dos pós</b> .....	<b>58</b>
<b>5.4.</b>	<b>Curvas de compactação</b> .....	<b>60</b>
<b>5.5.</b>	<b>Corpos de prova após compactação</b> .....	<b>61</b>
<b>5.6.</b>	<b>Obtenção da espuma alumínio</b> .....	<b>63</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>77</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>78</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>79</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Materiais porosos são encontrados naturalmente em estruturas como madeiras, ossos e são sinônimos de alta resistência relativa ao seu peso específico (KATSUYOSHI, 2012). Segundo Katsuyoshi (2012), a combinação de propriedades físicas e mecânicas oferecidas por metais porosos os tornam materiais atrativos para exploração, uma vez que as propriedades desses materiais não podem ser obtidas com metais densos, ou mesmo com polímeros ou cerâmicos densos ou porosos.

Surgem as espumas metálicas, que ao combinar as características de metais com esse tipo de estrutura, podem maximizar propriedades para determinados tipos de aplicação. De acordo com Banhart (2007, p.279), espumas metálicas, especialmente aquelas baseadas em metais com baixa densidade, são conhecidas pelas interessantes combinações de diferentes propriedades como resistência mecânica combinada à baixa densidade e a alta resistência à compressão combinada com a característica de absorção de energia. A primeira combinação pode contribuir para redução de massa e a última pode contribuir para uma maior segurança passiva de pessoas, por exemplo, em caso de colisões com automóveis. Segundo Geramipour e Oveisi (2017, p.1569), as espumas metálicas apresentam propriedades únicas como baixa densidade, alta resistência específica, alta capacidade de absorção de energia em impacto, absorção sonora e resistência a altas temperaturas, que as tornam materiais apropriados para diversas aplicações estruturais e funcionais nas indústrias automotiva, aeronáutica e construção civil.

Apesar da grande variedade de métodos para produção de espumas metálicas, a sua utilização ainda é restrita devido a fatores econômicos e ao controle da qualidade do produto final (KATSUYOSHI, 2012/ DUARTE, 2005). Por isso, diversas metodologias foram e estão sendo desenvolvidas para produção dessas espumas (GERAMIPOUR; OVEISI 2017, p.1569).

A maior parte das espumas metálicas disponíveis comercialmente são baseadas em metais ou ligas de alumínio, níquel, magnésio, chumbo, cobre, titânio, aço e até mesmo o ouro (KATSUYOSHI, 2012).

A ideia de utilizar, neste trabalho, alumínio como metal matriz para produção de espuma metálica se deu devido às propriedades como baixa densidade e alta ductilidade. Além disso, o custo competitivo também o torna um metal atrativo para produção de espumas metálicas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos gerais**

O objetivo deste trabalho foi obter espuma de alumínio a partir de pós e avaliar parâmetros termofísicos nessa obtenção conforme explicitado nos objetivos específicos.

### **2.2. Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Avaliar a influência da granulometria dos pós na etapa de prensagem.
- Avaliar a influência da pressão na densidade do corpo verde.
- Avaliar a influência da densidade do corpo verde na etapa de expansão.
- Avaliar a influência do tempo de tratamento térmico no processo de expansão.
- Obter espumas com densidade aparente na faixa de 50 a 75% do valor da densidade real da liga utilizada para produção das mesmas.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Alumínio

##### 3.1.1. Breve histórico

O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre e tornou-se economicamente competitivo em aplicações na engenharia no final do século XIX (DAVIS, 1993, p.3). Segundo Barbosa (2014, p.13),

o alumínio foi descoberto e isolado nas primeiras décadas do século XIX, mas somente com a criação de processos de refino, desenvolvido por Bayer para produção de alumina ( $Al_2O_3$ ) a partir da bauxita, o de Hall-Heroult, de obtenção de alumínio metálico a partir de alumina por eletrólise, ambos em 1886, foi possível produzi-lo em escala comercial.

De acordo com Barbosa (2014, p.13), a utilização industrial do alumínio é relativamente recente e segundo Davis (1993, p.3), as primeiras aplicações comerciais do alumínio foram em itens como armação para espelhos, números de casa e bandejas e, posteriormente, grande utilização em utensílios domésticos.

##### 3.1.2. Processo de obtenção de alumínio metálico

De acordo com Barbosa (2014, p.13), o alumínio pode ser definido entre primário e secundário; o primeiro é obtido a partir da matéria prima virgem (minério) e o segundo é originado por reciclagem.

Todo alumínio metálico é produzido baseado no processo Hall-Heroult, em que a alumina proveniente da bauxita é dissolvida em um banho criolítico e a eletrólise é feita através da passagem de uma corrente elétrica separando o oxigênio, que reage com o ânodo, do alumínio que é coletado no cátodo (DAVIS, 1993, p.3). Posteriormente o alumínio é removido por vácuo e transferido para produzir lingotes.

##### 3.1.3. Características, propriedades e aplicações usuais do alumínio

Uma das principais características do alumínio é sua versatilidade. De acordo com Davis (1993, p.6), além das propriedades físicas e mecânicas, a aparência, baixa

densidade, facilidade para fabricação de peças e resistência à corrosão tornam o alumínio um metal atrativo economicamente.

A tabela 1 apresenta valores comparativos de densidade e resistência específica (razão entre resistência e densidade) para diversos materiais e é possível verificar que, apesar do alumínio ter resistência menor que alguns materiais, a sua resistência específica pode ser maior e isso é devido à sua densidade que é 2,70g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 1 – Comparação entre valores de resistência específica entre alguns tipos de alumínio e outros materiais.

Material	Resistência à tração final típica (MPa)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Resistência específica
Alumínio (7178-T6)	606	2,82	215
Alumínio (7075-T6)	572	2,80	205
Alumínio (2024-T361)	496	2,80	177
Alumínio (5056-H18)	434	2,66	163
Alumínio (6066-T6)	393	2,71	145
Aço inoxidável 302	965	8,03	120
Alumínio (6061-T6)	310	2,71	114
Alumínio (3004-H38)	282	2,71	104
Fibra de vidro (valor médio)	131	1,43	91
Alumínio (1350-H19)	186	2,70	69
Alumínio (6063-T5)	186	2,74	68
Alumínio (3003-H14)	152	2,74	55
Aço carbono 1020	413	7,86	53
Bronze	413	8,39	49
Alumínio (5005-O)	124	2,71	46
Alumínio (3003-O)	110	2,74	40
PVC	52	1,40	37
Alumínio (1060-O)	69	2,70	26
Cobre	220	8,91	25
Porcelana	262	10,60	25

Fonte: Adaptada de Davis (1993).

Entre as propriedades físicas do alumínio, se destacam as excelentes condutividades elétrica e térmica. Além disso, é um elemento que não tem características ferromagnética, pirotécnica e tóxica (DAVIS, 1993, p.7).

A elevada resistência à corrosão se dá devido formação de uma fina camada de óxido de alumínio da superfície do sólido, fenômeno conhecido como passivação

(BARBOSA, 2014, p.14). A espessura da camada de óxido é dependente da temperatura e da atmosfera em que ele foi formado, especialmente a umidade (SCHAFFER, 2002, p.3279).

A tabela 2 apresenta as principais aplicações para alumínio de acordo com a composição química.

Tabela 2 – Principais aplicações do alumínio de acordo com sua composição química.

<b>Composição química</b>	<b>Aplicações principais</b>
Al comercialmente puro	Cabos de alumínio, utensílios domésticos, trocadores de calor, contatos elétricos
Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
Al-Mn e Al-Mn-Mg	Latas de bebidas, painéis
Al-Si	Metais de adição para solda, pistões forjados/fundidos de motores
Al-Mg	Aplicações náuticas, tanques para transportes de combustíveis e produtos especiais
Al-Mg-Si	Perfis arquitetônicos e componentes automotivos
Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáutica
Outras ligas (Al-Li, Al-Fe...)	Laminados finos (folhas) e outros para embalagens descartáveis

Fonte: Adaptada de Barbosa (2014).

### 3.2. Espumas metálicas

A ideia de produzir espumas metálicas surgiu nos anos 50, porém o seu uso foi limitado devido às dificuldades encontradas na sua fabricação e também aos elevados custos envolvidos na sua produção (DUARTE, 2005, p. 6). Apesar disto, segundo Duarte (2005), durante a Guerra Fria houve alguns desenvolvimentos e mesmo certas utilizações em aplicações militares e com o desenvolvimento das técnicas de produção, somente no princípio dos anos 90 é que se começou a ter algum interesse pelas espumas metálicas nas aplicações industriais correntes. Segundo Katsuyoshi (2012), apesar da comercialização de metais porosos ter ficado em segundo plano, a partir dos anos 90 houve um crescimento no desenvolvimento e pesquisa voltada para esses materiais.

Em seu sentido original, o termo “espuma” está reservado a uma dispersão de bolhas de gás em um líquido e essa morfologia pode ser preservada durante a solidificação, obtendo-se a “espuma sólida”, porém, para Bonaldi (2012), “as espumas são dispersões uniformes de uma fase gasosa em qualquer líquido ou um sólido” e de forma mais específica, as espumas metálicas são

uma classe especial de metais celulares que se originam de uma matriz metálica líquida e assim tem uma morfologia mais restrita. As células são fechadas, separadas umas das outras por uma fina membrana. [...] A expressão espuma metálica é válida para a fase líquida do produto, embora seja, usualmente, também utilizada para descrever o produto em sua fase sólida.

Ainda de acordo com Bonaldi (2012, p.5), estruturas metálicas de poros abertos são denominadas como esponjas metálicas, porém, essa nomenclatura não é muito utilizada.

Para Kitazono et al (2002, p. 128), as principais vantagens das espumas metálicas em relação às poliméricas são as elevadas temperaturas de fusão e resistência à compressão.

Segundo Neu et al (2011, p. 133), entre todas as espumas metálicas disponíveis, as espumas de alumínio são as mais preferidas devido ao seu baixo peso.

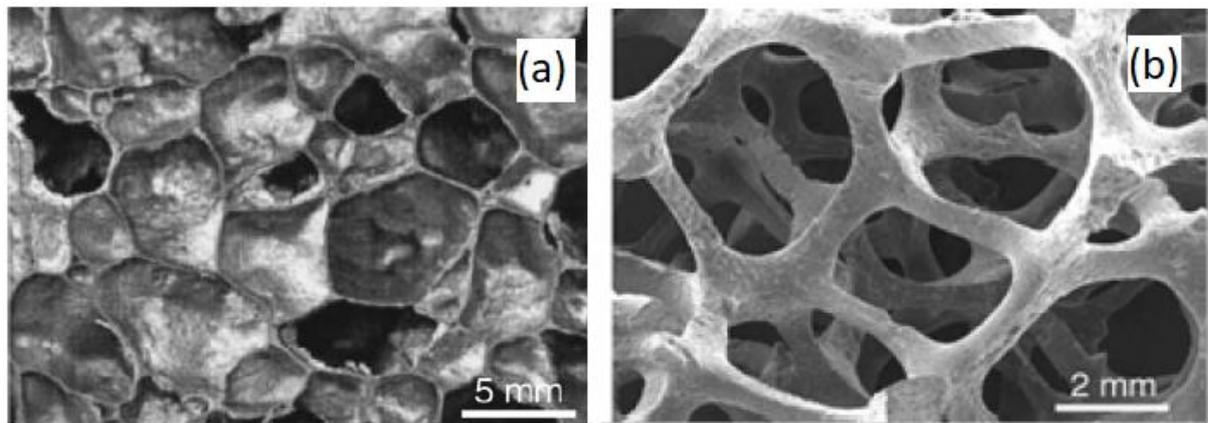
### **3.2.1. Tipos de espumas metálicas e suas aplicações**

Katsuyoshi (2012) diferencia os metais porosos de espumas metálicas da seguinte forma: os primeiros são considerados metais com grande volume de porosidade, entre 75 a 95% e o último como poros integrados propositalmente ao metal por meio do processo de espumagem.

As espumas metálicas podem ser divididas de acordo com sua estrutura porosa, a qual poderá ser constituída por células fechadas e/ou células abertas. Essas morfologias (forma e tamanho dos poros) podem ser obtidas através da escolha de um processo de fabricação adequado ou através da manipulação dos parâmetros de um determinado processo para adequar a espuma à aplicação desejada (DUARTE, 2005). Segundo Katsuyoshi (2012), na estrutura fechada, os poros que estão preenchidos com gás, são separados uns dos outros por uma camada metálica e

esse tipo de espuma é geralmente utilizada em aplicações estruturais. Da-Wu et al (2011, p.346) sugerem que espumas com este tipo de estrutura são materiais compostos consistindo de fases sólidas e um gás. Na estrutura aberta, em que os poros são interligados, as espumas se mostram com resistência menor do que na primeira e assim são geralmente utilizadas em aplicações funcionais em que a natureza contínua da porosidade é explorada (KATSUYOSHI, 2012). Os dois tipos de estrutura de espuma podem ser observados na figura 1 e as principais aplicações e seus atributos relevantes na tabela 3.

Figura 1 – Micrografia de espuma metálica com estrutura (a) fechada e (b) aberta.



Fonte: Katsuyoshi (2012).

Tabela 3 – Potenciais aplicações para espumas metálicas.

<b>Aplicação</b>	<b>Atributos relevantes</b>
Estruturas leves	Excelente relação rigidez/peso quando carregado em flexão
Amortecimento	Capacidade de amortecimento de até 10 vezes em comparação com o metal sólido
Controle de vibração	Painéis de espuma tem maior frequência natural de vibração do que folhas sólidas de mesma massa por unidade de área
Absorção acústica	Espumas metálicas de célula aberta tem capacidade de absorção acústica
Absorção de energia	Habilidade para absorver energia com pressão quase constante
Trocador de calor	Espumas com células abertas tem grande área de superfície o que promove excepcional habilidade para transferência de calor
Insertos biocompatíveis	Os poros possibilitam crescimento de células
Filtros	Espumas com células abertas para gases a altas temperaturas e para filtragem de fluidos

Fonte: Adaptada de Katsuyoshi (2012).

As espumas metálicas de estrutura fechada são utilizadas principalmente na indústria automobilística, onde a sua aplicação tem como fatores mais importantes o

baixo peso, elevada resistência ao impacto, elevada capacidade de isolamento ao ruído e boa capacidade de amortecimento de vibrações podendo ser utilizados em componentes como para-choques com contribuição para absorção de energia em colisões, bem como diminuição do consumo de combustível devido à redução do peso (DUARTE, 2005, p. 6). Para Bonaldi (2012), a crescente demanda por segurança no setor automotivo e a redução no consumo de combustível, impulsionaram a busca por veículos mais resistentes e mais leves. Uma das potenciais aplicações das espumas metálicas é a sua utilização nas estruturas de absorção de energia, como por exemplo, durante uma colisão entre veículos (KANAHASHI et al, 2001, p. 283).

As espumas metálicas podem ser utilizadas como isolantes térmicos, pois apresentam baixa condutividade devido a fatores como baixa fração em volume de fase sólida existente nas espumas e reduzido tamanho de células que suprime os fenômenos de convecção e radiação através da absorção repetida e refletida pelas paredes celulares.

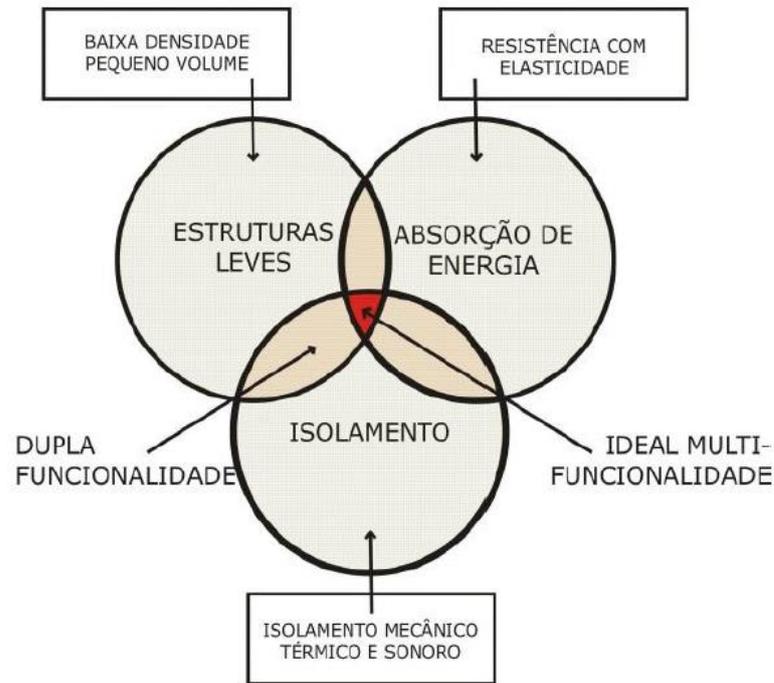
Em relação à indústria aeronáutica, além dos benefícios citados para a indústria automobilística, as espumas metálicas podem ser produzidas em formatos especiais (BONALDI, 2012).

Segundo Duarte (2005, p. 7) as espumas metálicas de estrutura aberta têm a sua principal aplicação no domínio da indústria química, como por exemplo, em filtros onde a sua aplicação inclui fatores importantes como a porosidade aberta e a elevada área específica.

Além disso, de acordo com Bi (2015, p.583), muitas aplicações médicas como enchimento e *scaffolds* para defeitos ósseos necessitam de materiais porosos (de estrutura aberta), pois esse tipo de material permite o transporte de nutrientes e drogas para o tecido danificado, e assim agiliza o processo de adaptação do implante.

Especificamente no setor automotivo, as espumas podem ter várias aplicações diferentes. Os campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo podem ser observados na figura 2.

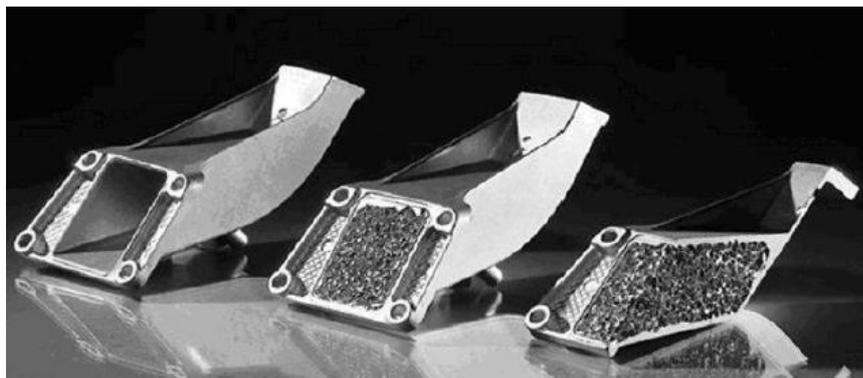
Figura 2 – Campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.



Fonte: Bonaldi (2012).

Um exemplo de uma estrutura preenchida com espuma metálica é exibido na figura 3 e na figura 4 pode ser observada uma peça utilizada em sistema de absorção de impacto.

Figura 3 – Peça preenchida com espuma metálica.



Fonte: Bonaldi (2012).

Figura 4 – Peça utilizada em sistema de absorção de impacto.

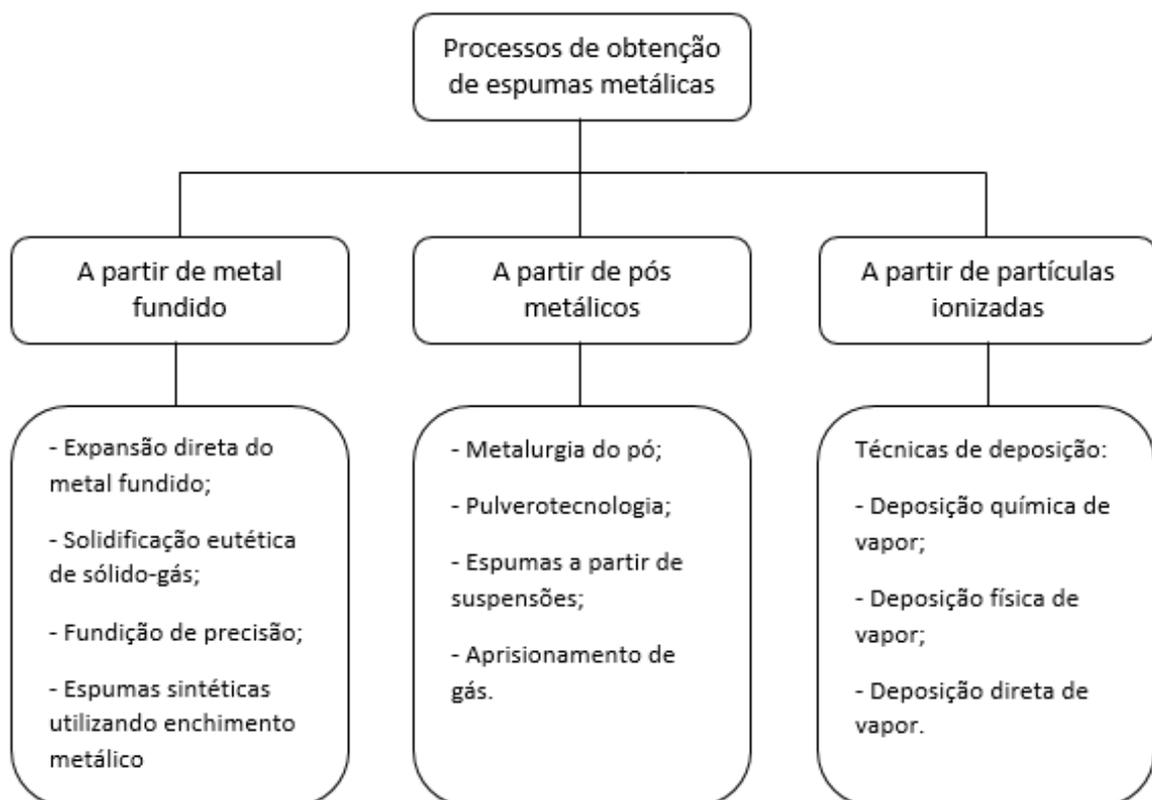


Fonte: Bonaldi (2012).

### 3.2.2. Processos para obtenção de espumas metálicas

De acordo com o estado inicial do metal, os processos de fabricação das espumas metálicas podem ser divididos em três grupos: a partir do metal fundido, a partir de pós metálicos e a partir de partículas ionizadas (DUARTE, 2005, p. 9). Os processos usuais para obtenção de espumas metálicas estão organizados na figura 5.

Figura 5 – Processos para obtenção de espumas metálicas.



Fonte: Adaptada de Duarte (2005).

Para Katsuyoshi (2012), existem diferentes formas de produzir metais porosos e espumas metálicas e podem ser classificadas em quatro diferentes tipos de produção: utilizando metal fundido, pós metálicos, metal vaporizado ou íons metálicos. Ainda segundo Katsuyoshi (2012), se pós de um metal ou liga metálica puderem ser prensados e sinterizados, existe uma grande possibilidade de produzir metal poroso ou espuma metálica com esse material.

Segundo Kucharczyk et al (2017), dependendo do método de produção, uma grande variedade de porosidades e tamanhos de poros podem ser obtidas. Além disso, uma porosidade específica assegurará rigidez apropriada e adequada resistência à espuma. Apesar desses vários processos demonstrados na figura 5, segundo Bonaldi (2012, p. 5), existem dois métodos principais para obtenção de espumas metálicas que são o método de injeção de gás e a obtenção a partir de pós.

De acordo com Duarte (2005), a produção de espumas de alumínio a partir de pós pode ser feita por pulverotecnologia e este processo consiste na compactação de mistura de pós de metal e agente expensor por meio de prensagem, seguida do processo de expansão em que acontece o desenvolvimento da estrutura porosa a qual ocorre a temperaturas acima da temperatura de fusão do metal. Os métodos de metalurgia do pó e pulverotecnologia não se confundem, pois no primeiro a expansão se dá por meio de sinterização em temperaturas abaixo da de fusão do material e predominância de fase sólida e no segundo método o desenvolvimento da espuma acontece com o material na fase líquida, ou seja, a temperaturas acima da de fusão do material. De acordo com Duarte (2005, p.17), “as espumas metálicas resultantes do processo de pulverotecnologia têm uma estrutura porosa fechada e uma superfície densa que aumenta as propriedades mecânicas destes materiais”.

Alguns estudos mostram que espumas de alumínio e magnésio e suas ligas podem ser produzidas por vários métodos, como por exemplo, injeção de argônio, solidificação eutética de sólido-gás, fundição em gesso (BI; ZHENG; LI, 2015, p. 583; ČAPEK; VOJTĚCH, 2013, p. 564).

De acordo com Hao, Han e Li (2008), a metalurgia do pó é o melhor processo para fabricar espumas de magnésio por causa da alta reatividade deste elemento. Além

disso, segundo Čapek e Vojtěch (2013), esse processo minimiza a quantidade de impurezas prejudiciais no produto final. Além disso, as propriedades mecânicas de um material podem ser alteradas a partir da variação do tamanho e da distribuição dos poros que, por sua vez, podem ser alterados ao manipular e controlar o tamanho e a forma dos pós e as condições de produção como pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização (ČAPEK; VOJTĚCH, 2013, p. 564). Segundo Neu et al (2011), a pulverotecnologia é o mais importante processo de obtenção de espumas metálicas, uma vez que este processo permite a produção de espumas em diferentes geometrias. De acordo com Banhart (2007, p.280), existem 2 formas principais para produzir espumas de alumínio, direta e indiretamente. A forma direta se baseia no metal fundido contendo partículas não metálicas dispersas uniformemente em que o gás é injetado para a formação da espuma; a forma indireta se dá por meio de sólidos compactados contendo agentes expansores (como hidretos metálicos) que depois de fundidos geram as espumas.

### **3.2.3. Agentes expansores**

Os agentes expansores, como o próprio nome sugere, são utilizados para expandir a matriz e, assim, gerar os poros que formarão a estrutura da espuma metálica. Segundo Čapek e Vojtěch (2014, p. 21), qualquer material sólido pode ser utilizado como agente expensor, porém, na prática, a seleção do agente expensor é limitada porque este material deve ser removido ou agregado ao produto final de forma que não prejudique as características deste. De acordo com Duarte (2005, p. 47), os agentes expansores geralmente utilizados no processo de metalurgia do pó e pulverotecnologia para formação de espumas com células fechadas são os hidretos metálicos, que são compostos formados entre o hidrogênio molecular e os metais de transição.

Entre os agentes expansores utilizados para produção de espumas de alumínio, pode-se destacar hidreto de titânio ( $TiH_2$ ), polimetilmetacrilato (PMMA), ureia ( $CO(NH_2)_2$ ), bicarbonato de amônia ( $NH_4HCO_3$ ), cloreto de sódio (NaCl).

De acordo com Čapek e Vojtěch (2013), uréia e bicarbonato de amônia são comumente utilizados como partículas expansoras na produção de espumas de

alumínio porque eles podem ser removidos por decomposição térmica ou lixiviação. Hao, Han e Li (2008), removeram as partículas de ureia por meio da lixiviação ao mergulhar a amostra compactada em uma solução de 0,001mol/L de NaOH (hidróxido de sódio).

Segundo Duarte (2005, p. 47), o hidreto de titânio apresenta melhores propriedades para expandir o alumínio e suas ligas. Resultados de Duarte (2005, p. 90-92) apontam a temperatura inicial de decomposição do hidreto de titânio em 380 °C com picos acentuados de liberação de hidrogênio entre 500 e 690 °C. Outros autores indicam o início da decomposição do hidreto de titânio com a consequente liberação do hidrogênio gasoso em temperaturas em torno de 390 e 490°C de acordo com Matijasevic-Lux et al (2006) e Kennedy (2002, apud ZHANG et al, 2014) respectivamente. Segundo Matijasevic-Lux et al (2006), um tratamento térmico pode aumentar essa temperatura para início de liberação do hidrogênio. De acordo com Kadoi et al (2009, p.727), a decomposição do hidreto de titânio se inicia em temperatura em torno de 420°C podendo ir até temperaturas superiores a 800°C, porém, a maior parte do hidrogênio é liberado entre 500 e 700°C

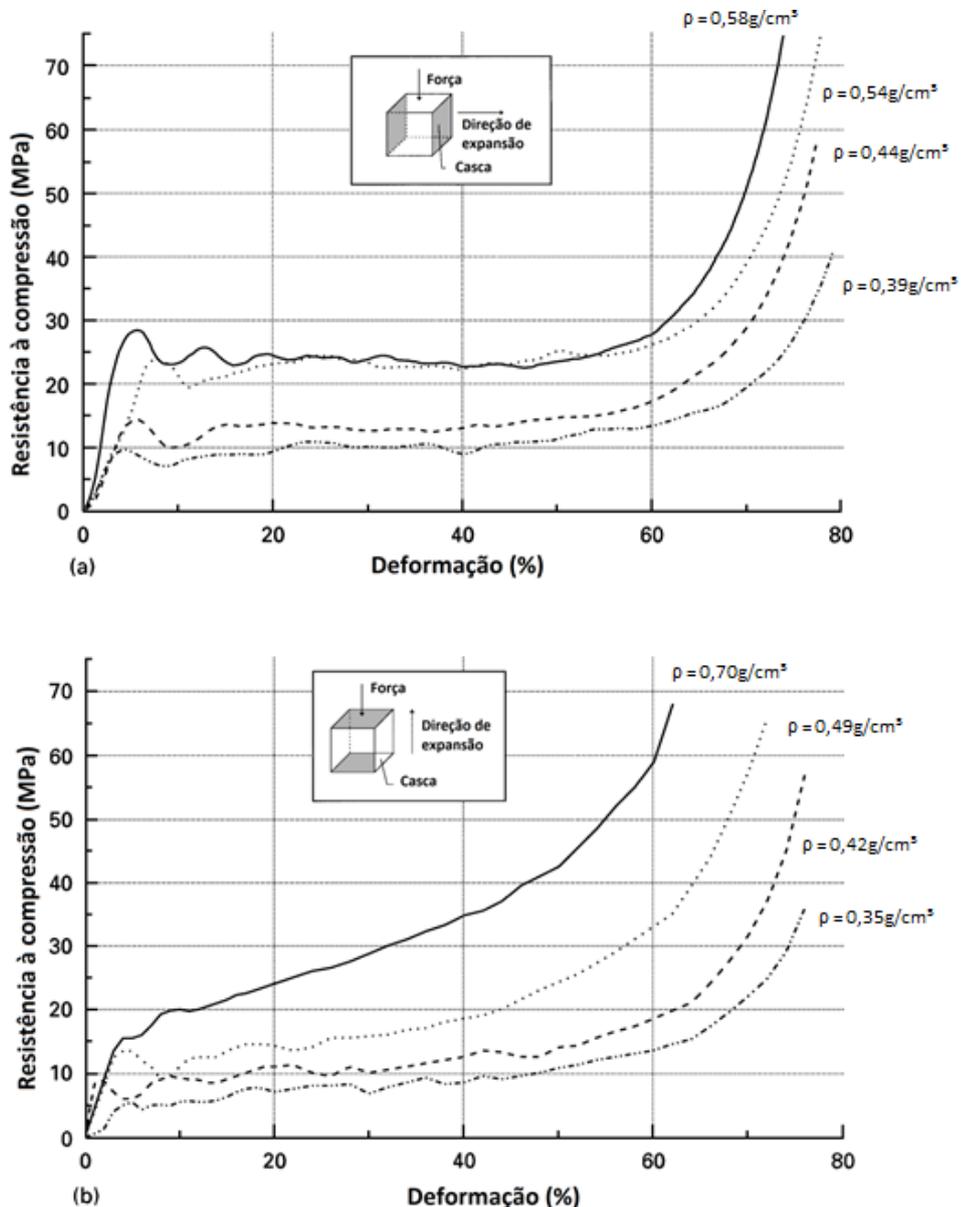
Segundo Bi, Zheng e Li (2015), na ausência de oxigênio, a decomposição térmica do PMMA se dá em uma temperatura em torno de 360°C. O PMMA é utilizado na produção de aço inoxidável austenítico microporoso, bem como na produção de titânio com porosidade de até 50%.

### **3.2.4. Características e propriedades das espumas metálicas**

Entre as propriedades das espumas metálicas, pode-se destacar a densidade e as propriedades mecânicas, térmicas, elétricas e acústicas. Segundo Duarte (2005), as características estruturais da espuma como a forma e o tamanho das células, a forma em que o sólido é distribuído entre as arestas e as faces e as propriedades da matriz metálica são determinantes para as propriedades da espuma. Além disso, ainda de acordo com Duarte (2005), a porcentagem de células abertas e fechadas e a anisotropia de forma são importantes para determinar as propriedades da espuma metálica. A anisotropia está diretamente relacionada com a direção de expansão e, como pode ser visto nos gráficos da figura 6, essa característica influencia na

resistência à compressão da espuma (BANHART; BAUMEISTER, 1998, p.1431). Tanto na figura 6(a) em que a força aplicada na espuma é perpendicular à direção de expansão, quanto na figura 6(b) em que a força aplicada na espuma é paralela à direção de expansão, é verificado que espumas com maior densidade oferecem maior resistência à compressão. Além disso, pode-se verificar que na figura 6(a), durante um determinado intervalo de deformação a resistência à compressão se mantém constante, diferentemente do que ocorre na figura 6(b) em que a resistência à compressão varia com a deformação.

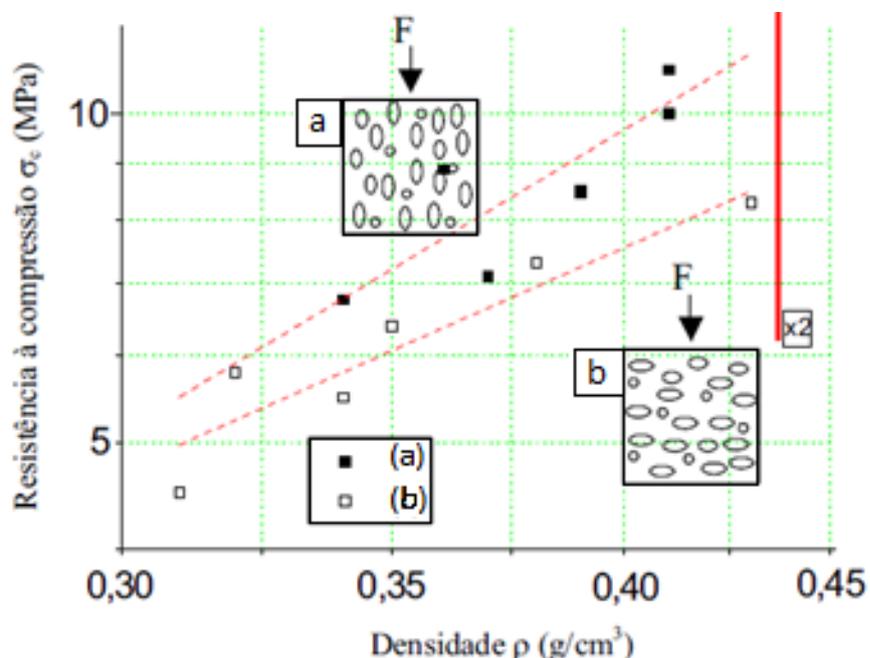
Figura 6 – Resistência a compressão de espumas de alumínio com a direção da expansão, orientada nas direções (a) perpendicular e (b) paralela à força exercida.



Fonte: Adaptada de Banhart e Baumeister (1998).

A densidade das espumas tem relação com a baixa fração de sólidos nesses materiais, sendo que a mais importante propriedade da espuma é a sua densidade relativa que é definida como o quociente entre a densidade aparente da espuma e a densidade do material de base (DUARTE, 2005). O gráfico da figura 7 apresenta valores de resistência à compressão obtidos para espumas de alumínio de acordo com a densidade da mesma e pode ser observado que a densidade tem muita influência na resistência à compressão em espumas de alumínio. Além disso, a influência da anisotropia na resistência à compressão em espumas pode ser verificada ao variar a direção da aplicação da carga, entre paralela e perpendicular à direção de expansão da espuma. As espumas se mostram mais resistentes à compressão quando a carga aplicada nela é paralela à sua direção de expansão, como pode ser verificado na figura 7(a).

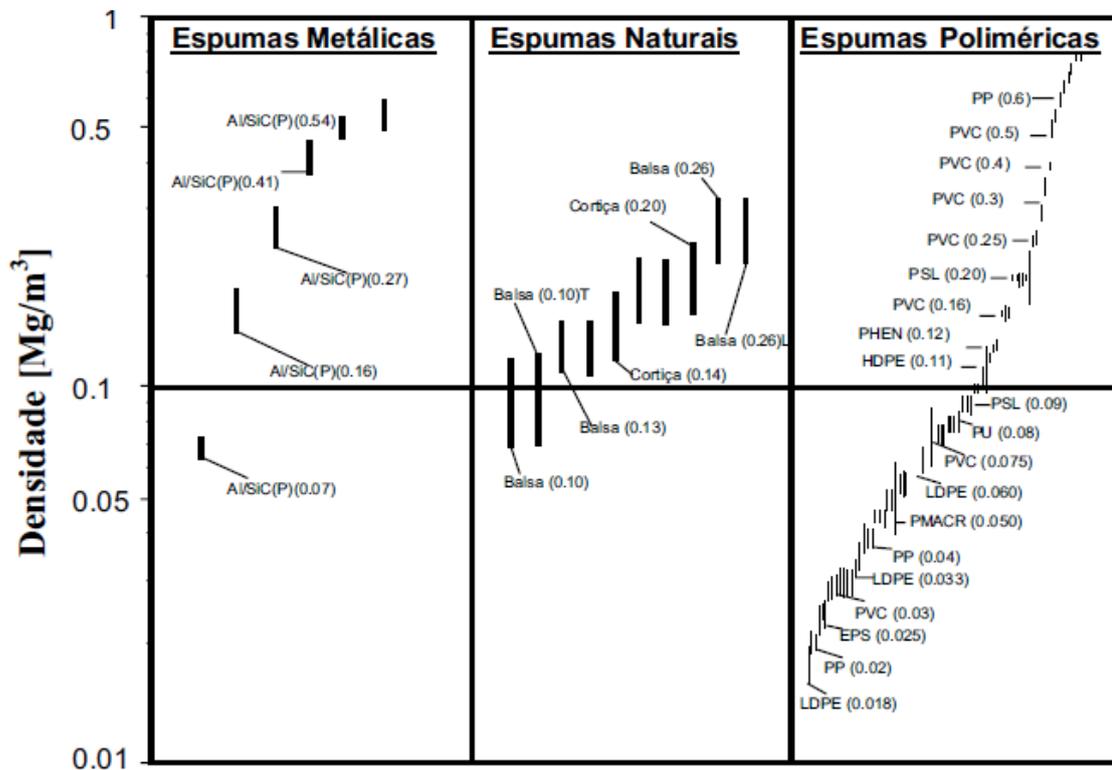
Figura 7– Resistência à compressão versus densidade de espumas de alumínio, com a direção da expansão, orientada nas direções (a) paralela e (b) perpendicular à força exercida.



Fonte: Adaptada de Duarte (2005).

De forma comparativa, as densidades de espumas metálicas, naturais e poliméricas são apresentadas na figura 8. Nesta figura pode-se verificar que as espumas metálicas se equiparam em relação à densidade, com algumas espumas naturais e com algumas espumas poliméricas.

Figura 8 – Comparação da densidade de diferentes espumas de estrutura fechada.



Fonte: Duarte (2005).

As propriedades de uma espuma metálica é resultado da combinação entre as propriedades do material da matriz e as propriedades da forma da espuma como geometria, forma e espessura da estrutura porosa. No caso das espumas com células fechadas, além dos itens citados, deve ser considerado o tipo de atmosfera aprisionada nas células. Devido às suas aplicações mais usuais, as propriedades mecânicas geralmente avaliadas em uma espuma metálica são as relativas à compressão, tração, flexão e impacto e essas propriedades dependem fortemente da densidade aparente da espuma (DUARTE, 2005, p. 27).

A baixa condutividade térmica relacionada com a característica porosa das espumas é fator determinante para as propriedades térmicas desses materiais. Baixa fração em volume de fase sólida e um reduzido tamanho de células que suprime os fenômenos de convecção e de radiação através de absorção repetida pelas paredes celulares contribuem para isso e, dessa forma, a condutividade das espumas metálicas pode ser atribuída apenas às paredes metálicas das células, que por sua vez depende da condutividade térmica do material base. A condutividade térmica de uma espuma diminui com a redução da densidade relativa. (DUARTE, 2005).

Em uma espuma metálica, as paredes celulares tendem a serem cobertas com filmes de óxidos. Esses óxidos afetam diretamente as propriedades elétricas de uma espuma metálica uma vez que eles são maus condutores elétricos. Em espumas com estrutura celular fechada, a atmosfera gasosa auxilia no isolamento elétrico.

A energia sonora, a velocidade de amortecimento e a frequência são as principais propriedades acústicas geralmente avaliadas em espumas metálicas (DUARTE, 2005).

### **3.3. Características dos pós metálicos**

De acordo com Chiaverini (2001, p.26),

[...] o que se procura na determinação das características dos pós metálicos é compreender com a necessária profundidade o comportamento do pó em serviço, determinar a tolerância nas especificações relacionadas com as propriedades e, o mais importante, assegurar a reprodução do comportamento do pó durante o seu processamento. As principais características dos pós metálicos são os seguintes:

- pureza e composição química;
- microestrutura da partícula;
- tamanho da partícula e composição granulométrica;
- porosidade da partícula;
- densidade aparente;
- velocidade de escoamento;
- superfície específica;
- compressibilidade;
- resistência verde.

Segundo Chiaverini (2001, p. 28), o principal objetivo de conhecer a composição química está relacionado com as condições de compactação e sinterização uma vez que cada elemento possui características próprias que podem afetar esses processos.

A microestrutura da partícula se relaciona com seu comportamento durante compactação e sinterização e também com as propriedades do produto final (CHIAVERINI, 2001, p. 29).

O tamanho e a forma das partículas estão intimamente relacionados e são as mais importantes características dos pós metálicos (CHIAVERINI, 2001, p. 30). A figura 9 apresenta os tipos e formas de partículas metálicas e nela pode-se notar que a maioria das partículas apresenta uma forma irregular. Em relação ao tamanho das partículas é necessário avaliar a distribuição das dimensões da partícula (CHIAVERINI, 2001 p. 30). Outra característica importante dos pós metálicos é a presença (ou não) de porosidade. De acordo com Chiaverini (2001, p. 33), essa característica pode afetar a densidade aparente, a compressibilidade e a porosidade da peça acabada.

Figura 9 - Tipos e formas de partículas metálicas.



Fonte: Chiaverini (2001).

A densidade aparente de um pó metálico, que é a relação do peso para um certo volume de pó solto com a densidade do material metálico sólido, é outra importante característica pois ajuda a determinar a cavidade da matriz de compactação bem

como o comprimento do curso da prensa necessários para compactar os pós (CHIAVERINI, 2001, p. 33). Essa densidade aparente tem influência direta do tamanho e da forma das partículas.

Para produção em grandes quantidades, a qual depende essencialmente da rapidez, uniformidade e consistência de enchimento da cavidade da matriz, é conveniente avaliar a característica velocidade de escoamento (CHIAVERINI, 2001, p. 37).

Segundo Chiaverini (2001, p. 40), o processo de sinterização pode ser afetado pela superfície específica da partícula que é uma relação entre área superficial e volume da partícula.

A compressibilidade é uma característica que relaciona a densidade aparente do compactado verde à densidade real do material e pode variar com fatores como dureza, forma, tamanho, porosidade e composição granulométrica das partículas bem como com a pressão de compactação (CHIAVERINI, 2001, p. 41).

Outra característica importante, que é relativa aos pós compactados antes da sinterização, é a resistência a verde, que permite verificar a habilidade que os pós compactados têm de manter a forma e as dimensões antes da sinterização (CHIAVERINI, 2001, p. 42).

### **3.4. Metalurgia do pó (PM) e pulverotecnologia**

#### **3.4.1. Conceitos**

Segundo Chiaverini (2001, p.3), a metalurgia do pó é um processo metalúrgico de fabricação de peças metálicas com as seguintes características:

[...] utilização de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas, possibilidade de obtenção de peças com características estruturais especiais como porosidade controlada, ausência de fase líquida ou apenas parcial de fase líquida durante o processo de fabricação, produção de peças com formas definitivas ou parcialmente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento e obtenção de peças em grandes séries, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais.

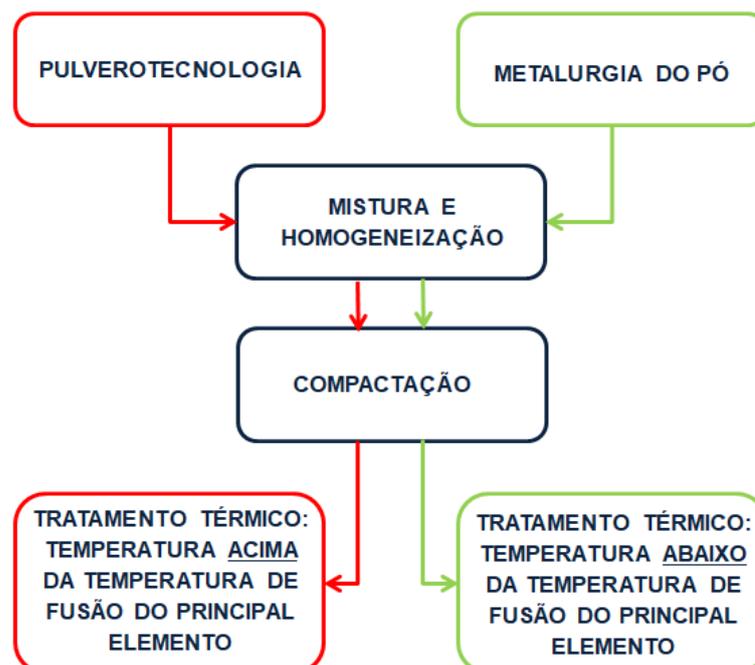
A partir dos pós metálicos, Chiaverini (2001, p.3), divide o processo de metalurgia do pó em duas etapas fundamentais:

[...] moldagem ou compactação pela aplicação de pressão nos pós, à temperatura ambiente, no interior de matrizes, cujas cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais e aquecimento ou sinterização a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições controladas de temperatura, tempo e ambiente.

Além dessas duas etapas, Chiaverini (2001, p.4) também cita a mistura e homogeneização dos pós antes da compactação e a calibração ou calibragem após sinterização como etapas do processo de metalurgia do pó.

Pulverotecnologia é o processo de fabricação de espumas metálicas que foi desenvolvido no princípio dos anos 90 no Fraunhofer Institute for Applied Materials Research em Bremen na Alemanha (DUARTE, 2005, p. 17). A principal diferença com relação ao método de metalurgia do pó é que na etapa de expansão e desenvolvimento da espuma, as temperaturas utilizadas são acima da temperatura de fusão do material compactado com grande presença de fase líquida. O fluxograma básico de cada processo indicando as semelhanças e diferenças entre metalurgia do pó e pulverotecnologia pode ser verificado na figura 10.

Figura 10 – Fluxograma básico dos processos pulverotecnologia e metalurgia do pó.



Fonte: Autoria própria.

### **3.4.2. Mistura dos pós**

Segundo Chiaverini (2001, p. 45), mistura é a operação em que dois ou mais pós de composições diferentes são intimamente misturados. Essa operação aumenta o contato entre as partículas e o resultado depende do tamanho e da forma das partículas. Quanto maior a uniformidade do tamanho de partícula do material a ser misturado, tanto maior a possibilidade de obterem-se resultados uniformes e consistentes, pois partículas maiores têm forte tendência a segregar (CHIAVERINI, 2001 p. 45).

### **3.4.3. Compactação dos pós**

Esta é a primeira das operações de consolidação dos pós. De acordo com Chiaverini (2001, p. 52), seus objetivos são os seguintes:

- conformar o pó na forma projetada;
- conferir as dimensões finais, ou aproximadamente finais, especificadas, considerando as possíveis alterações dimensionais que possam ocorrer durante a sinterização;
- conferir adequada densidade verde ao compactado;
- conferir a resistência mecânica necessária para o manuseio posterior;
- proporcionar o necessário contato entre as partículas de pó para que a operação de sinterização seja efetuada de modo mais eficiente.

Além dos objetivos citados, Duarte (2005), sugere que a compactação serve para romper as camadas de óxido na superfície dos pós, com a finalidade de estabelecer uma ligação metalúrgica inicial, e aprisionar os pós de agente expensor.

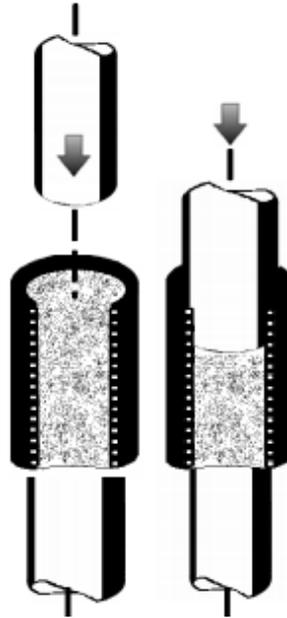
Entre os processos de compactação, Chiaverini (2001, p. 52) destaca compressão em matrizes rígidas, compressão isostática, laminação, extrusão e forjamento.

Considerando compactação por pressão em matriz rígida, pode-se dividir o comportamento dos pós submetidos à compressão em 3 estágios de acordo com Chiaverini (2001, p. 53) e Reed (1995, p. 427). São eles:

- Estágio 1 – início da densificação com rearranjo dos pós de modo a eliminar parcialmente os vazios.
  
- Estágio 2 – predominância de deformação plástica das partículas. Neste estágio ocorre a maior densificação com grande eliminação ou redução do tamanho dos poros.
  
- Estágio 3 – neste estágio as pressões são mais elevadas e, devido ao encruamento das partículas ocorrido majoritariamente no estágio 2, essas partículas tendem a ficar frágeis podendo quebrar e formar fragmentos menores com ocorrência, em menor escala do que no estágio 2, de eliminação e redução de poros.

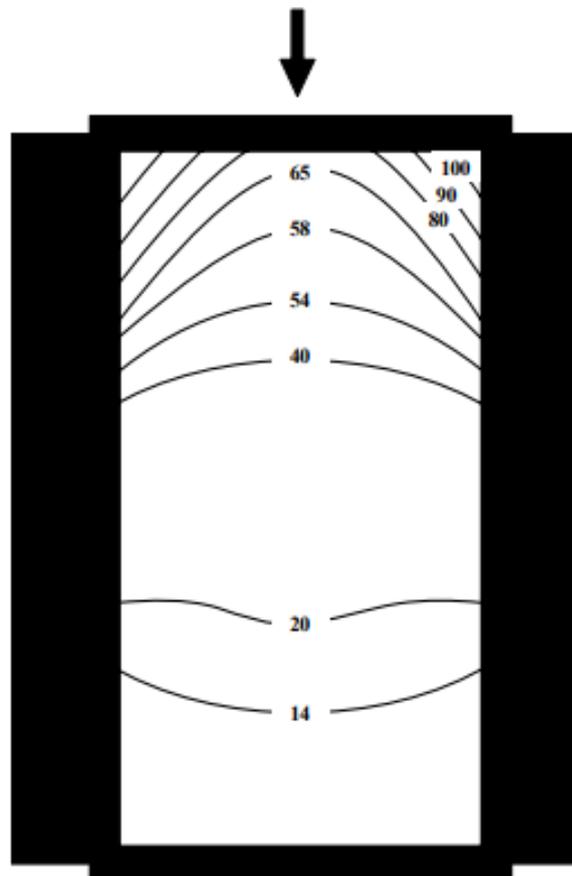
Na compactação em matriz rígida, especificamente no caso de prensagem uniaxial de ação simples, como mostrado na figura 11, parte da pressão aplicada é transferida para a parede da matriz (REED, 1995, p. 436). Segundo Reed (1995), a resistência produzida pelo atrito entre partículas e a parede da matriz geram gradientes de pressão e conseqüente gradientes de densidade no corpo compactado. Além disso, também há forças de atrito entre as partículas, o que agrava esse efeito (SANTOS, 2012, p. 26). De acordo com Santos (2012), esse “gradiente de densidade provoca, durante a sinterização, retração diferenciada na peça, criando tensões internas e podendo chegar à formação de trincas” na mesma. Um modelo indicando os gradientes de pressão formados na prensagem uniaxial de ação simples está ilustrado na figura 12. Nesta figura, os valores indicados nas linhas estão em percentuais e indicam que quanto mais próximo do ponto de aplicação de carga, maior a pressão e, conseqüentemente, maior a densidade

Figura 11 – Prensagem uniaxial de ação simples.



Fonte: Albero (2000).

Figura 12 – Gradiente de pressão em corpos conformados por prensagem uniaxial de ação simples.



Fonte: Albero (2000).

#### **3.4.4. Tratamento térmico**

Para a metalurgia do pó, o tratamento térmico utilizado é a sinterização que consiste no aquecimento dos compactados verdes, obtidos na operação de compactação, a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada, sob condições controladas de tempo, temperatura e meio ambiente (CHIAVERINI, 2001, p. 97).

Na pulverotecnologia, as temperaturas utilizadas ultrapassam a temperatura do ponto de fusão do principal constituinte da mistura (DUARTE, 2005).

#### **3.5. Parâmetros do processo de obtenção de espumas**

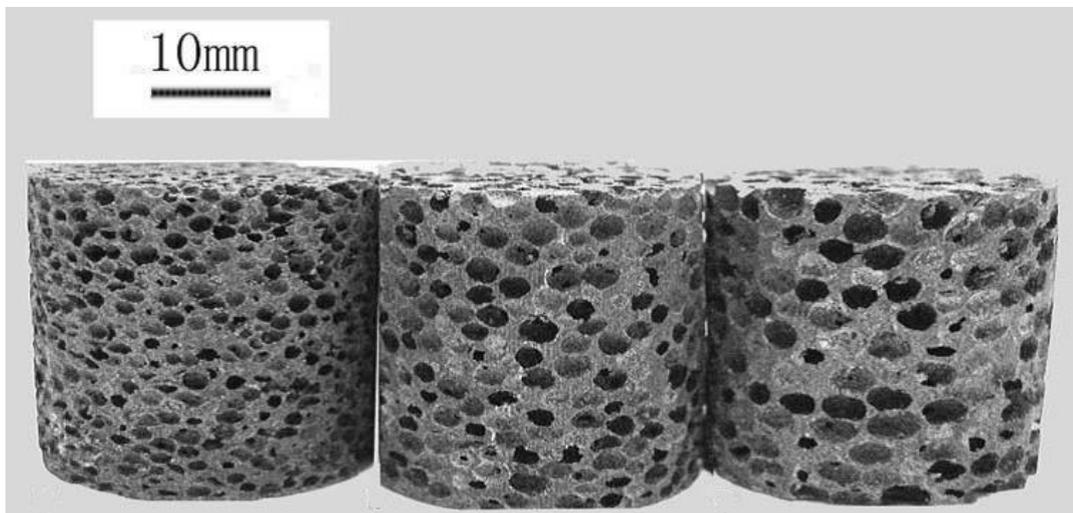
Segundo Čapek e Vojtěch (2014, p. 22), as propriedades mecânicas de espuma de alumínio são influenciadas não somente pela porosidade total, mas também pelo tamanho, forma e distribuição dos poros e também pela conexão entre as partículas do metal base. Fatores como pressão de compactação, temperatura e tempo de expansão são críticos para determinar as propriedades mecânicas das espumas. De acordo com Čapek e Vojtěch (2013), a pressão de compactação deve ser suficiente para quebrar as camadas de óxido no alumínio, mas não tão grande que deforme as partículas expansoras. A quantidade de agente expensor na mistura também é fator determinante.

Para obter espumas de magnésio, Bi, Zheng e Li (2015) misturaram magnésio puro com PMMA para atuar como agente expensor, fizeram compactação uniaxial a frio dos pós com uma pressão de 300MPa (esta pressão foi mantida por 15 minutos) e depois sinterizaram o material compactado. O processo de sinterização se deu da seguinte forma: primeiramente, os compactados foram aquecidos, a uma taxa de 3°C/min, até 400°C e mantidos nesta temperatura por 2 horas em um forno com vácuo; posteriormente, o forno foi preenchido com argônio de alta pureza e o material foi aquecido, a uma taxa de 15°C/min, até 550°C e mantidos nesta temperatura por mais 2 horas; para finalizar, o material foi resfriado até temperatura ambiente no forno na atmosfera com argônio. De acordo com resultados de Bi, Zheng e Li (2015), os pós de PMMA começam e finalizam sua decomposição em

260°C e 400°C, respectivamente. A decomposição desse agente expensor forma vários compostos moleculares como H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>3</sub>COOH. Além disso, no processo de decomposição desse agente expensor, MgO pode ser formado. Resultados desses autores mostram que com 30% em peso de PMMA na mistura com pós de magnésio puro, pela rota de metalurgia do pó, formam espumas com densidade aparente 40% menor do que a densidade do magnésio.

Hao, Han e Li (2008) indicam pressões entre 200 e 300MPa como ideais para compactação da mistura entre pós de ureia e magnésio. Em relação à temperatura e tempo de sinterização, os autores consideram que a temperatura ótima está na faixa de 610 a 630°C com uma duração de 2 horas e 30 minutos. Hao, Han e Li (2008), conseguiram produzir espumas de magnésio, com células abertas, com densidade aparente entre 40 e 80% de acordo com a variação da quantidade do agente expensor utilizado, no caso, uréia. Amostras produzidas por estes autores são apresentadas na figura 13.

Figura 13 – Amostras de espuma de magnésio obtidas por metalurgia do pó.

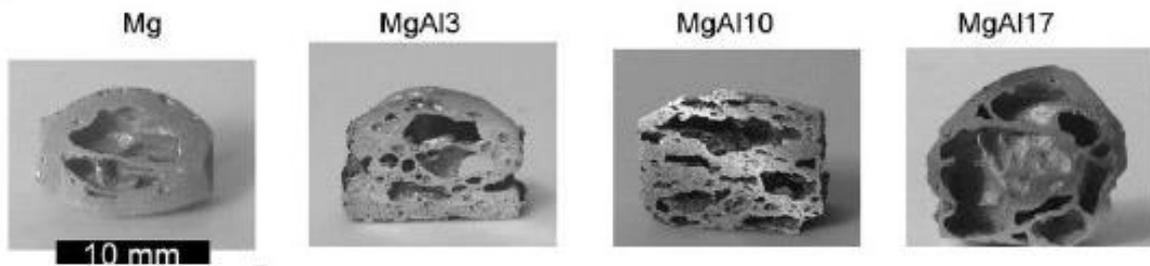


Fonte: Hao, Han e Li (2008).

Neu et al (2011) obtiveram espuma a partir de pós de magnésio puro misturados com diferentes quantidades de pós de alumínio puro; utilizou 300MPa em prensagem uniaxial durante 15 minutos à uma temperatura de 400°C e para o processo de expansão ele indica temperaturas na faixa de 100°C acima da temperatura *liquidus* da liga utilizada. Neu et al (2011) trataram termicamente o

hidreto de titânio para aumentar a temperatura de início da decomposição desse material. Estes autores conseguiram produzir espumas de magnésio com 60 a 70% de porosidade utilizando 0,5% em peso de  $TiH_2$  na mistura. Amostras produzidas por Neu et al (2011), para diferentes misturas entre magnésio e alumínio (Mg, MgAl3, MgAl10 e MgAl17), são apresentadas na figura 14.

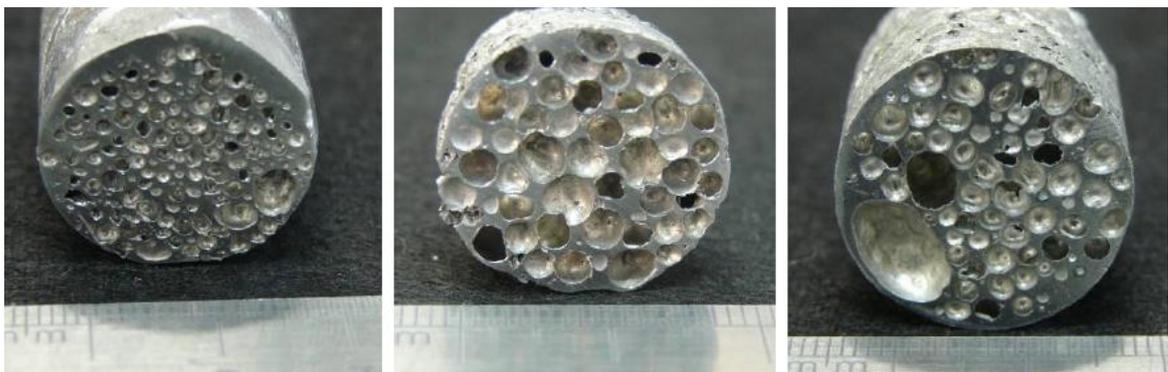
Figura 14 – Amostras de espumas de magnésio obtidas por pulverotecnologia.



Fonte: Neu et al (2011).

Bonaldi (2012) obteve melhores resultados na produção de espuma de alumínio, por meio de pulverotecnologia, utilizando uma pressão de 450MPa na prensagem uniaxial a frio e temperatura de expansão de 710°C. Ao utilizar a rota supracitada e com 1,0% em peso de  $TiH_2$ , o autor obteve espumas de alumínio com 70% de poros. Amostras destas espumas estão apresentadas na figura 15.

Figura 15 – Amostras de espuma de alumínio obtidas por pulverotecnologia.



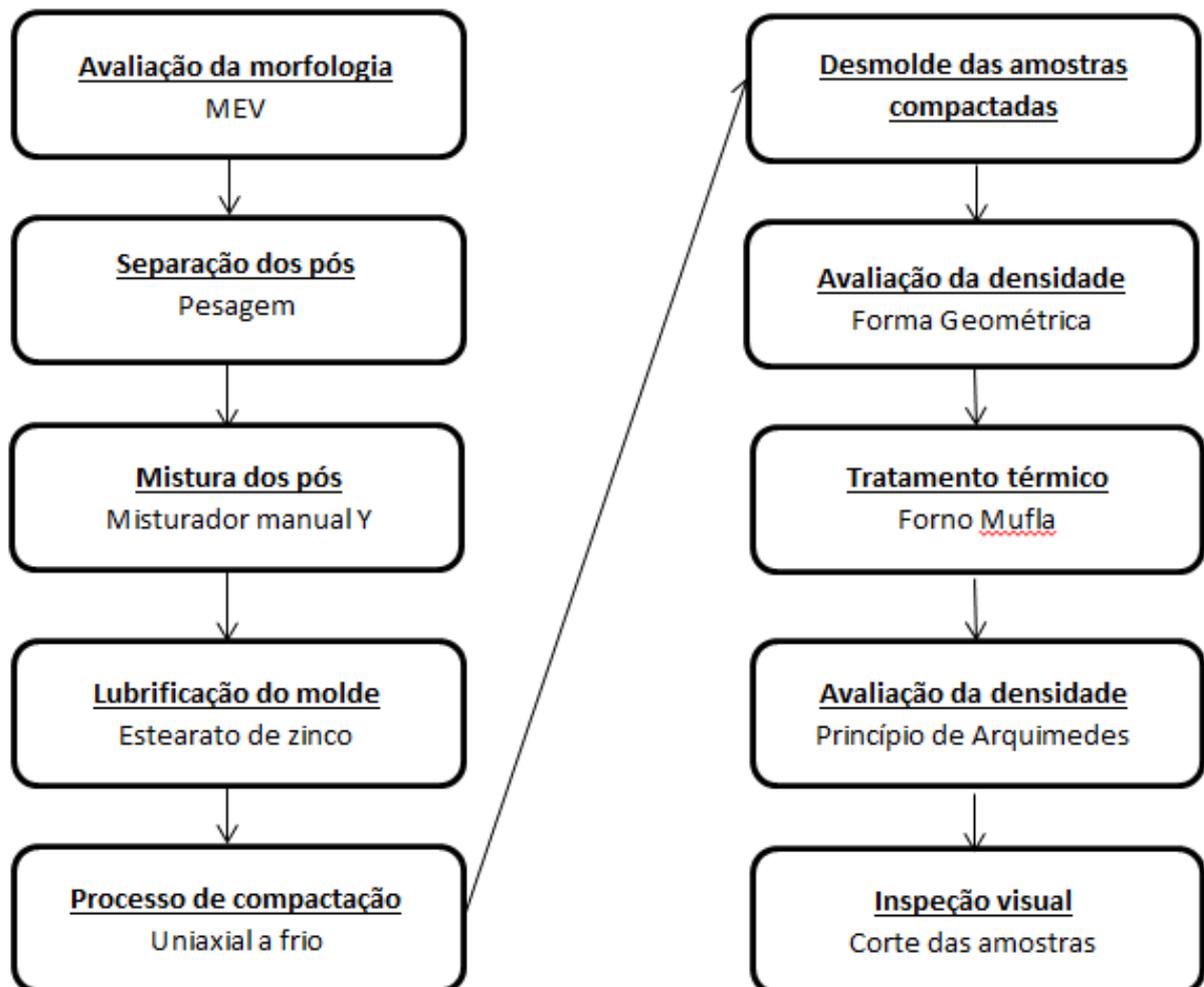
Fonte: Bonaldi (2012).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Descrição do trabalho

Após a revisão bibliográfica para fundamentação teórica do trabalho, os pós obtidos foram caracterizados e organizados conforme informações experimentais e dados obtidos de fornecedores. Posteriormente foi fabricada uma matriz para em seguida fazer experimentos iniciais com o objetivo de definir quais as melhores pressões de compactação. A parte experimental deste trabalho foi feita de acordo com o fluxo de atividades descrito na figura 16. Após produção, as amostras de espuma obtidas foram analisadas e os resultados discutidos.

Figura 16 – Fluxograma dos experimentos.



Fonte: Autoria própria.

## 4.2. Considerações iniciais

Para o presente trabalho, o termo espuma foi utilizado para identificar tanto os materiais porosos de estrutura celular aberta quanto os com estrutura fechada. O metal base utilizado foi alumínio comercialmente puro. Hidreto de titânio foi utilizado como agente expensor no quantitativo de 1% em peso na mistura. Este quantitativo de agente expensor foi definido de acordo com estudos anteriores como o de Bonaldi (2012), em que o autor obteve espumas de alumínio de boa qualidade utilizando 1% em peso de hidreto de titânio em mistura com alumínio. Os pós da mistura foram compactados através de prensagem uniaxial a frio com simples ação, em matriz rígida. A obtenção da espuma de alumínio se deu por meio do processo de pulverotecnologia, em que o corpo verde gerado na etapa de prensagem foi submetido a uma temperatura superior à temperatura de fusão do metal base. Bonaldi (2012) avaliou as temperaturas de 690, 710 e 730°C na obtenção de espumas de alumínio e considerou os melhores resultados para a temperatura 710°C, por isto este valor foi definido para o presente trabalho.

Foram produzidos 18 corpos de prova com diferentes condições conforme tabela 4. Cada corpo de prova teve mais 2 repetições totalizando o total de 54 corpos de prova. Conforme pode ser visto na tabela 4, as variáveis do presente trabalho foram a granulometria do metal base, pressão de compactação e o tempo do tratamento térmico. Os pós de alumínio foram separados em relação à granulometria como tipo 1 e tipo 2, sendo o primeiro menor que 45 $\mu$ m e o segundo menor que 297 $\mu$ m. Foram avaliadas três diferentes pressões de compactação: 200, 350 e 500MPa. Em relação ao tratamento térmico, três tempos de encharque diferentes foram avaliados: 10, 20 e 30 minutos.

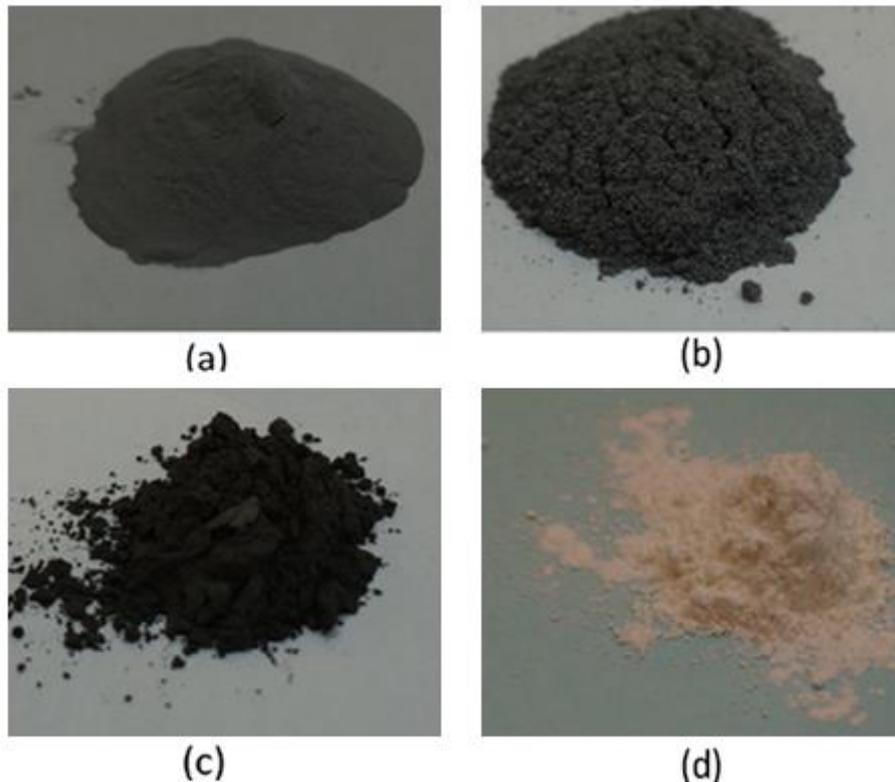
Com o intuito de evitar ou amenizar o agarramento de material na parede do molde e danos do mesmo, foi utilizado estearato de zinco em pó como lubrificante. Com a finalidade de evitar a mistura do lubrificante com o material que formará a espuma, foi utilizado um pincel para fazer a lubrificação superficial no molde. A figura 17 apresenta os pós que foram utilizados no presente trabalho.

Tabela 4 – Parâmetros para obtenção das amostras.

Amostra	Tipo de metal base	Pressão de compressão (MPa)	Temperatura de expansão (°C)	Tempo de expansão (min)
1	Tipo 1	500	710	10
2	Tipo 1	500	710	20
3	Tipo 1	500	710	30
4	Tipo 1	350	710	10
5	Tipo 1	350	710	20
6	Tipo 1	350	710	30
7	Tipo 1	200	710	10
8	Tipo 1	200	710	20
9	Tipo 1	200	710	30
10	Tipo 2	500	710	10
11	Tipo 2	500	710	20
12	Tipo 2	500	710	30
13	Tipo 2	350	710	10
14	Tipo 2	350	710	20
15	Tipo 2	350	710	30
16	Tipo 2	200	710	10
17	Tipo 2	200	710	20
18	Tipo 2	200	710	30

Fonte: Autoria própria.

Figura 17 – Pós utilizados nos experimentos: (a) alumínio tipo 1, (b) alumínio tipo 2, (c) hidreto de titânio e (d) estearato de zinco.



Fonte: Autoria própria.

Os pós de alumínio tipos 1 e 2 foram obtidos dos fornecedores US Research Nanomaterials e Willer Pos, respectivamente, e a análise semiquantitativa da composição química indicadas pelos fornecedores estão apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 – Composição química dos pós de alumínio.

<b>Alumínio</b>			
<b>Tipo 1</b>		<b>Tipo 2</b>	
Al	>99,5%	Al	>99%
Outros elementos	< 0,5%	Outros elementos	< 1%

Fonte: US Research Nanomaterials e Willer Pos.

O pó de hidreto de titânio (TiH<sub>2</sub>) que foi utilizado como agente expensor, foi obtido junto à empresa US Research Nanomaterials e a análise semi quantitativa sobre a composição química, apresentada pelo fornecedor, está indicada na tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do pó de hidreto de titânio.

<b>Hidreto de titânio</b>	
TiH <sub>2</sub>	>99,5%
Outros elementos	< 0,5%

Fonte: US Research Nanomaterials.

A granulometria informada pelos fornecedores para os pós de alumínio e de hidreto de titânio estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 – Granulometria dos pós de alumínio e de hidreto de titânio.

<b>Material</b>	<b>Granulometria (µm)</b>	<b>Fornecedor</b>
Alumínio Tipo 1	<45	US Research Nanomaterials
Alumínio Tipo 2	<297	Willer Pos
Hidreto de titânio	<20	US Research Nanomaterials

Fonte: Autoria própria.

### **4.3. Caracterização dos pós**

Os pós de alumínio foram caracterizados em laboratório com relação ao aspecto geométrico.

Em relação aos pós do agente expensor, a caracterização foi feita de forma a avaliar composição química, granulometria, aspecto geométrico e temperatura de início de decomposição com consequente liberação de hidrogênio.

#### **4.3.1. Aspecto geométrico dos pós**

Os aspectos geométricos dos pós foram avaliados utilizando imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo SSX-550.

#### **4.3.2. Temperatura de decomposição do agente expensor**

A avaliação da temperatura de decomposição do agente expensor, no caso o hidreto de titânio ( $TiH_2$ ), foi feita por meio da avaliação das curvas de termogravimetria (TG) e da análise térmica diferencial (DTA).

Para esta análise foi utilizado um equipamento DTG 60 da Shimadzu em atmosfera de Nitrogênio com fluxo de 50mL/minuto a uma rampa de temperatura a 10 °C/minuto de 30 °C até 850 °C em cadinho de alumina.

### **4.4. Preparação dos pós**

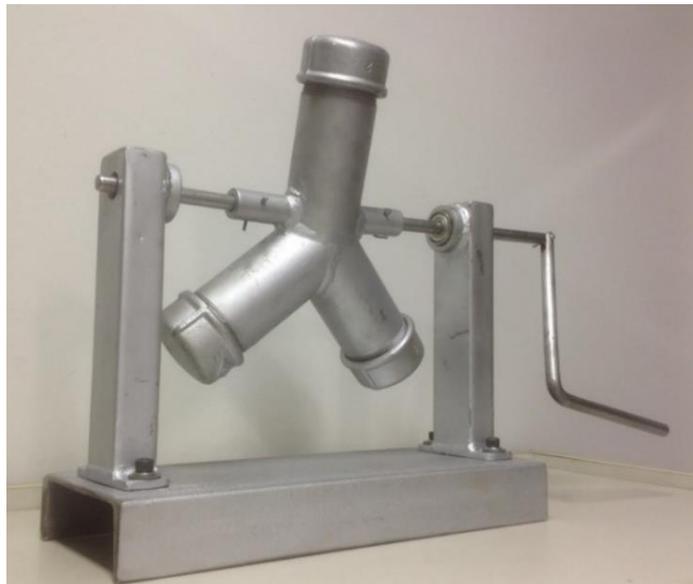
As amostras foram produzidas com aproximadamente 10g de pós com o intuito de produzir amostras com valor de diâmetro similar à altura, e assim, minimizar os efeitos de gradientes de densidades resultantes do processo de prensagem uniaxial bem como efeitos indesejáveis no tratamento térmico. Os pós foram separados de forma que as quantidades percentuais em peso estejam em acordo com o estabelecido para produção das amostras que é 1% em peso de hidreto de titânio.

Esse valor foi definido a partir de trabalhos anteriores de outros autores. Foi utilizado uma balança eletrônica de precisão com graduação de 0,0001g.

#### 4.5. Mistura dos pós

Após a separação dos pós de acordo com percentual em peso, eles foram misturados em um misturador Y manual. O misturador foi fabricado especialmente para este trabalho de forma que possa ser feito misturas de pequenas quantidades de material (no máximo 600 gramas). Esse misturador é mostrado na figura 18. Foi adotado o padrão de rotação de 80 rotações por minuto (rpm) com duração de 10 minutos para garantir homogeneidade da mistura. Para checar a homogeneidade da mistura, foram feitas imagens no MEV em conjunto com mapeamento químico. Foi utilizado um equipamento da marca Shimadzu, modelo SSX-550.

Figura 18 – Misturador manual Y.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.6. Processo de compactação

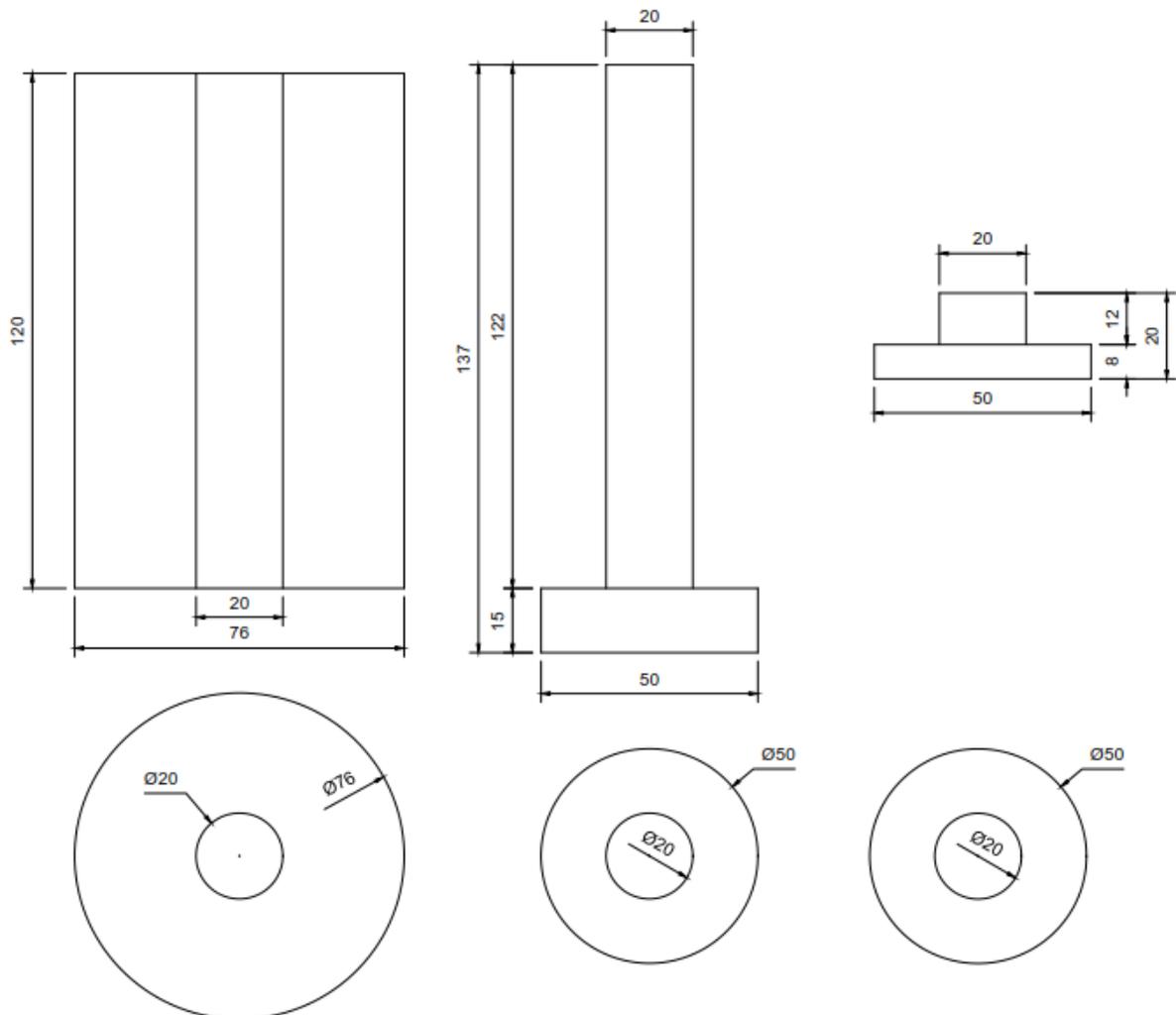
Para a prensagem uniaxial a frio em matriz rígida, foi desenvolvida uma matriz com tampa inferior e pistão para compressão, todos fabricados em aço carbono SAE 1045. A matriz fabricada está apresentada na figura 19 e a mesma foi fabricada de acordo com desenho da figura 20.

Figura 19 – Matriz utilizada na prensagem uniaxial.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Desenho com dimensões da matriz, tampa inferior e pistão.



Fonte: Autoria própria.

Em relação à pressão de compactação, foram realizados ensaios com o intuito de gerar as curvas de compactação para avaliar o comportamento dos pós durante a prensagem. Para isso foi utilizada uma máquina universal de ensaios modelo EMIC 23-300, eletromecânica, microprocessada, marca INSTRON/EMIC com capacidade de 300kN (figura 21). Nesse equipamento pode-se ter o controle de velocidade de prensagem e fazer ensaios com maior controle sobre a pressão. Foram realizados 2 ensaios de acordo com os parâmetros da tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros para ensaios de compactação.

Ensaio	Metal base	Quantidade de mistura (g)	Temperatura (°C)	Pressão máxima (MPa)	Velocidade da prensagem uniaxial (mm/min)
1	Tipo 1	Aprox. 10	18	530	25
2	Tipo 2	Aprox. 10	18	530	25

Fonte: Autoria própria.

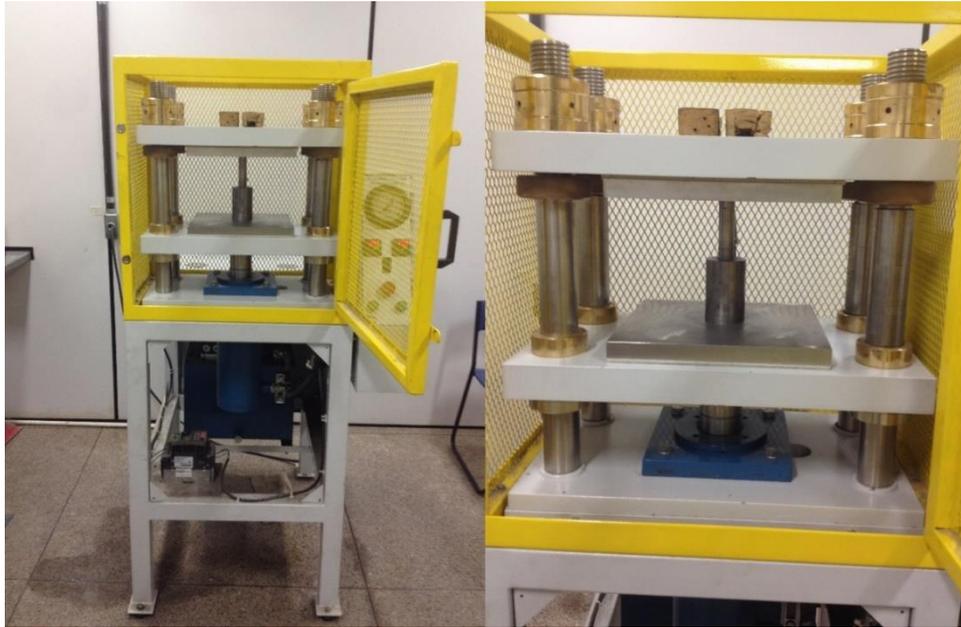
Figura 21 – Máquina universal de ensaios, modelo EMIC 23-300, marca INSTRON/EMIC.



Fonte: Autoria própria.

Para a produção das amostras, foi utilizada uma prensa hidráulica modelo SL12 do fabricante SOLAB CIENTÍFICA com capacidade de 20 toneladas (figura 22). A prensagem foi feita em movimento único até a pressão desejada para cada corpo de prova.

Figura 22 – Prensa utilizada para produção das amostras.

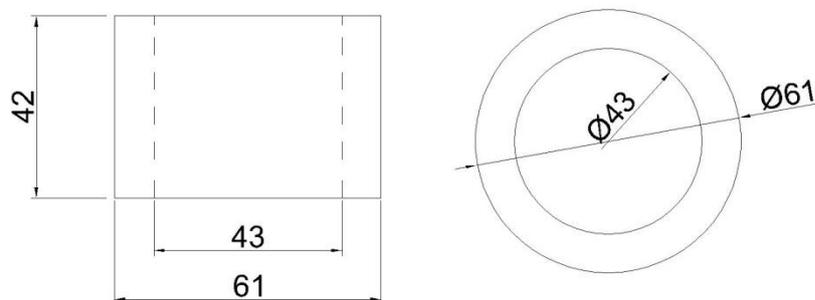


Fonte: Autoria própria.

#### 4.7. Desmolde

O desmolde foi feito com a aplicação de uma carga uniaxial na mesma direção e sentido em que foi feito a prensagem. Para isso a matriz foi posicionada sobre um suporte em forma de um cilindro vazado fabricado em aço carbono 1045. As dimensões desse cilindro estão especificadas na figura 23 e na figura 24 é apresentada uma foto do suporte utilizado

Figura 23 – Desenho do suporte para desmolde da amostra compactada.



Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – Suporte para desmolde da amostra compactada.

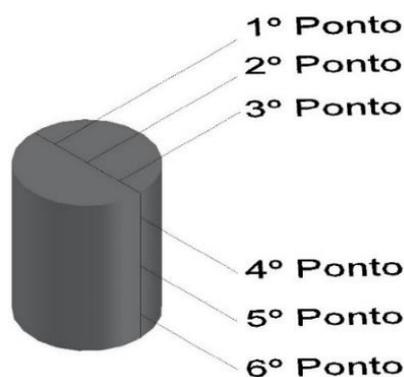


Fonte: Autoria própria.

#### 4.8. Avaliação da densidade das amostras compactadas

Para avaliação de densidade das amostras produzidas, foram utilizados dois métodos. O primeiro método utilizado foi baseado no princípio de Arquimedes e o meio utilizado foi água destilada. Para este método, com a finalidade de não danificar a amostra devido à absorção de água, foi utilizado filme plástico de PVC recobrando cada amostra. O segundo, chamado método geométrico, consistiu em verificar a dimensão das amostras. Essa verificação foi feita utilizando um micrômetro de 0-25mm com graduação de 0,01mm. Foram realizadas medidas em três pontos da altura (1º, 2º e 3º pontos) e três pontos do diâmetro (4º, 5º e 5º pontos), conforme figura 25. Para o cálculo do volume foi utilizada a média aritmética simples do diâmetro e da altura. A análise da densidade pelo método geométrico também foi feita com a amostra recoberta com filme plástico. Para os dois métodos utilizou-se uma balança eletrônica de precisão com graduação de 0,0001g.

Figura 25 – Metodologia de medição para método geométrico.



Fonte: Autoria própria.

#### **4.9. Expansão das amostras compactadas / obtenção da estrutura em forma de espuma**

Para processamento térmico, os corpos de prova compactados foram encaminhados ao forno mufla pré-aquecido à temperatura de 710°C. Foi utilizado um tabuleiro de inox para inserir os corpos de prova no forno. O tempo de permanência dos corpos de prova foram 10, 20 e 30 minutos. Foi utilizado um forno elétrico mufla da marca Magnus.

#### **4.10. Avaliação de estrutura e propriedades do produto final**

As avaliações da estrutura e propriedades das espumas obtidas foram feitas utilizando o princípio de Arquimedes para obter a densidade e inspeção visual para avaliar a morfologia dos macroporos. Para inspeção visual das amostras, foram feitos cortes das mesmas utilizando uma máquina de corte laboratorial da marca AROTEC, modelo AROCOR 80, que foi equipada com o disco de corte, marca FORTEL, do tipo FORTEL V para materiais não ferrosos.

#### **4.11. Análise estatística**

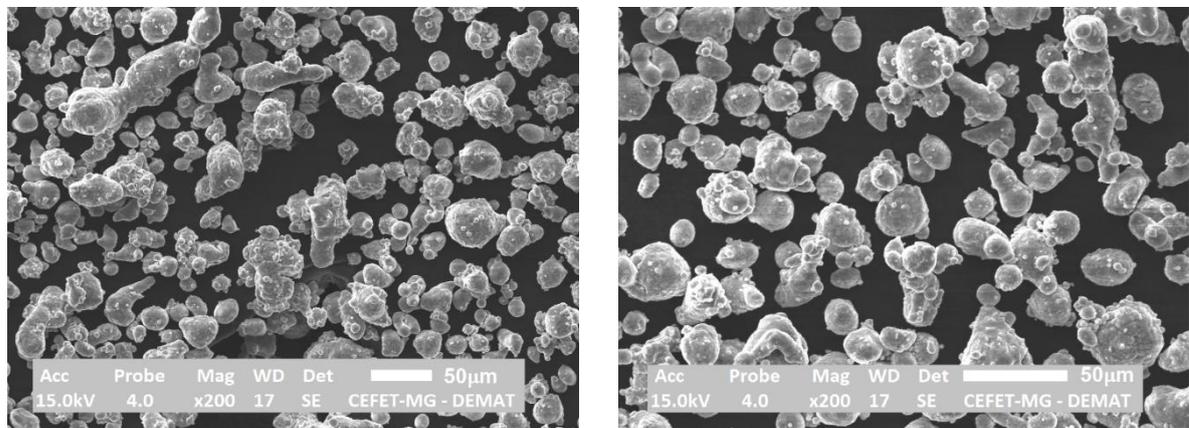
Os resultados obtidos nos experimentos foram tratados estatisticamente por meio de média, mediana e desvio padrão e por teste t bicaudal ou análise de variância (ANOVA) para avaliar as variáveis utilizadas – tipo de pós de alumínio, pressão de compactação e tempo de tratamento térmico. O teste t foi utilizado para comparar duas populações diferentes enquanto a ANOVA para comparações com três ou mais populações. Para o teste t rejeita-se a hipótese nula ( $H_0$ ) de que as médias são iguais para valor de probabilidade de significância ( $p$ ) menor que o grau de confiabilidade ( $\alpha$ ), ou seja, para  $p < 0,05 = \alpha$ , se aceita a hipótese de que as médias de cada população são estatisticamente diferentes. Para a ANOVA, diferenças foram consideradas significativas para  $p < 0,05 = \alpha$  e  $F > F_{\text{crítico}}$ . A ferramenta Microsoft Excel 2010 foi utilizada para fazer a ANOVA.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Aspecto geométricos dos pós de alumínio

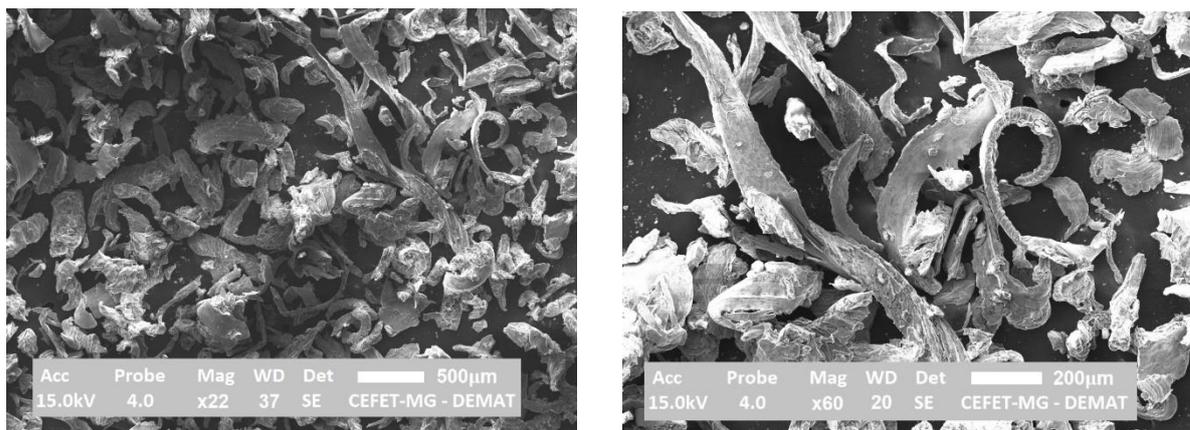
Os aspectos geométricos dos pós de alumínio tipo 1 estão apresentados na figura 26 e do alumínio tipo 2 na figura 27. Estas imagens foram obtidas por MEV. Por este meio também foram obtidos os aspectos geométricos para os pós de hidreto de titânio que estão ilustrados na figura 28.

Figura 26 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de alumínio tipo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de alumínio tipo 2.

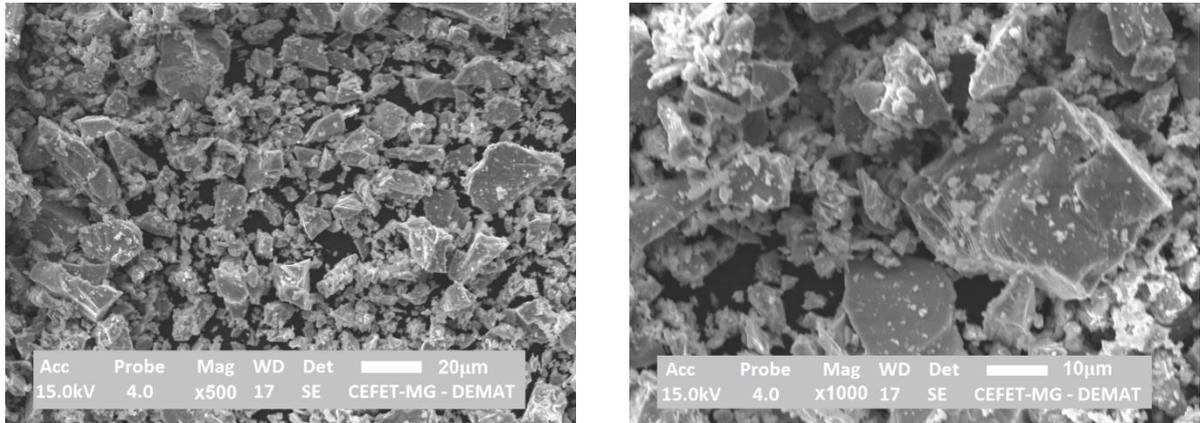


Fonte: Autoria própria.

Pode ser verificado que as partículas do alumínio tipo 1 são predominantemente esféricas o que facilita o empacotamento entre elas e as partículas do alumínio tipo 2 apresentam geometrias variadas com tendência irregular. Esse empacotamento

entre as partículas pode influenciar a densidade do corpo compactado uma vez que parte da energia utilizada no processo de compressão será perdida com deformação e atrito entre as partículas.

Figura 28 – Imagem (MEV) com aspecto geométrico do pó de hidreto de titânio.



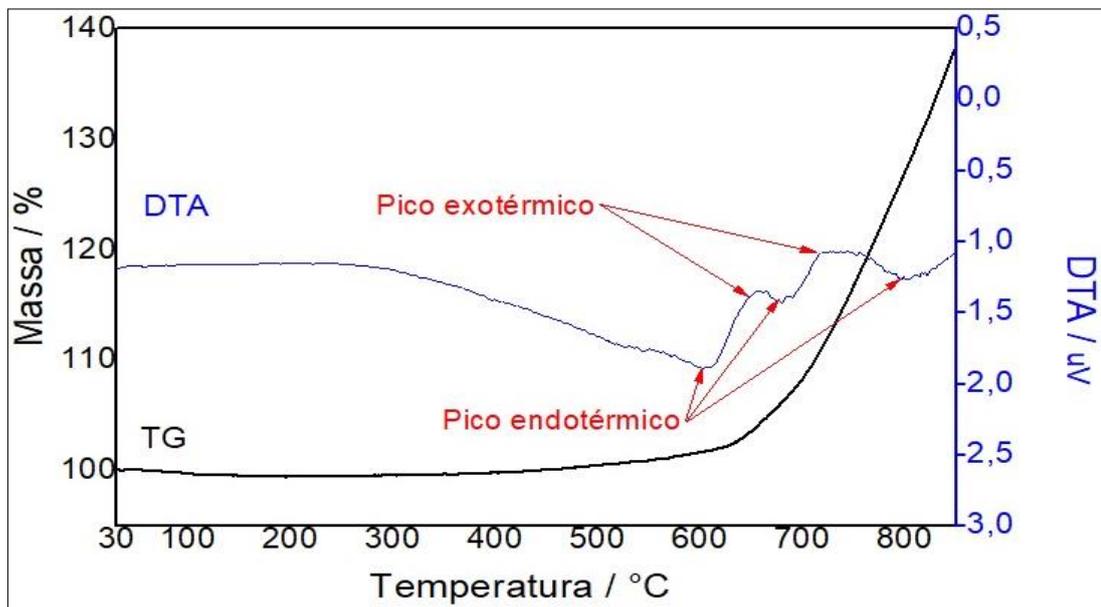
Fonte: Autoria própria.

Os pós de hidreto de titânio apresentam formato irregular e/ou escamosa com presença de quinas. Devido ao seu tamanho reduzido, em comparação com o tamanho dos pós de metal base, e à quantidade utilizada desse material, a morfologia do hidreto de titânio pode não ter influência no processo.

## 5.2. Decomposição do agente expansor

A figura 29 apresenta o gráfico com as curvas TG e DTA para o hidreto de titânio utilizado neste trabalho. Com a curva de TG gerada não foi possível identificar de forma clara o início da decomposição do hidreto de titânio. Ao analisar a curva DTA pode-se verificar picos endotérmicos próximos de 600, 700 e 800°C que de acordo com Nery et al (2016, p.747) é relativo à dehidrogenação do  $TiH_2$  correspondente à decomposição do mesmo. Os picos exotérmicos em temperaturas próximas de 650 e 750°C correspondem à formação de oxihidreto de titânio. O resultado de termogravimetria obtido está condizente com o resultado de Nery et al (2016, p.747) em que a partir da temperatura de 650°C inicia um ganho acentuado de massa na amostra. Esse início de ganho de massa coincide com o pico endotérmico visível na curva DTA.

Figura 29 – Gráfico com curvas termogravimétrica e térmica diferencial do hidreto de titânio.

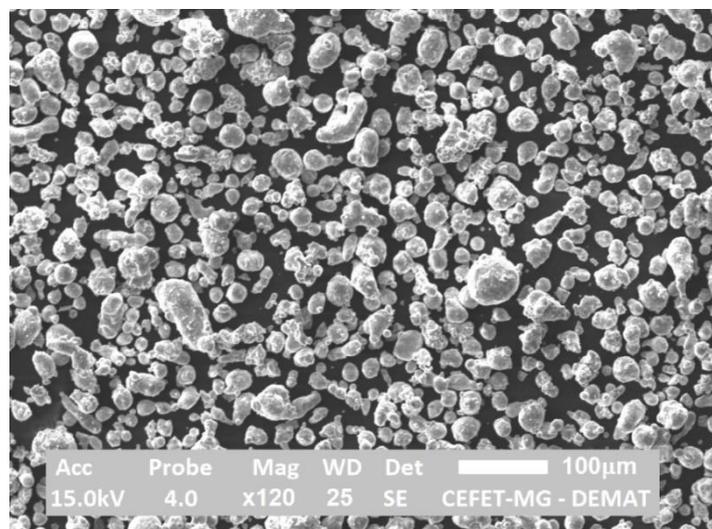


Fonte: Autoria própria.

### 5.3. Mistura dos pós

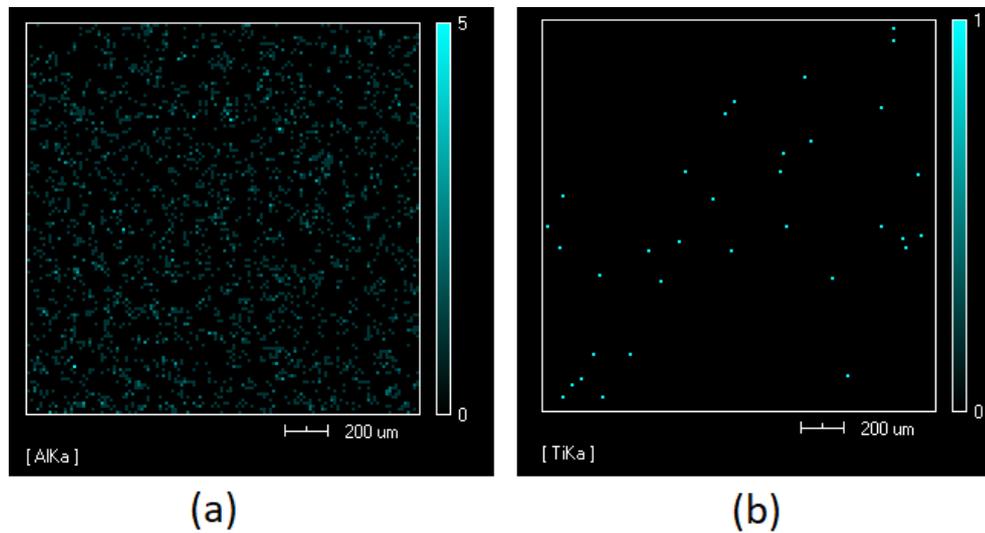
A figura 30 apresenta imagem de MEV do pó de alumínio tipo 1 misturado com o hidreto de titânio e na figura 31 pode-se observar no mapeamento químico, que o hidreto de titânio está distribuído homogeneamente na amostra.

Figura 30 – Imagem (MEV) da mistura do pó de alumínio tipo 1 com hidreto de titânio.



Fonte: Autoria própria.

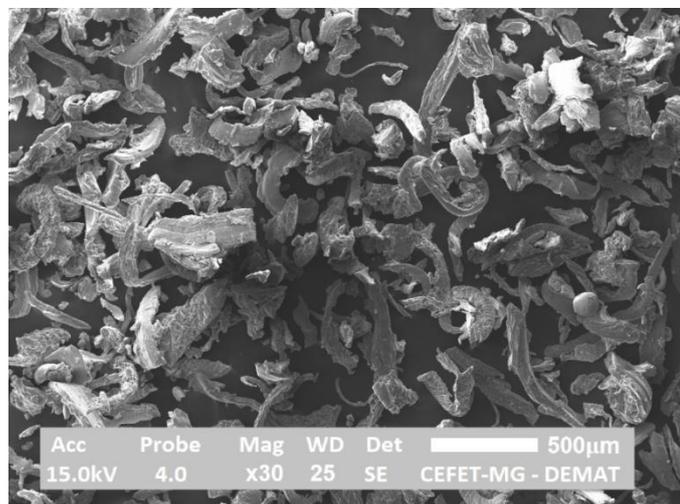
Figura 31 – Imagem do mapeamento químico da mistura do pó de alumínio tipo 1 com hidreto de titânio evidenciando os elementos químicos (a) alumínio e (b) titânio.



Fonte: Autoria própria.

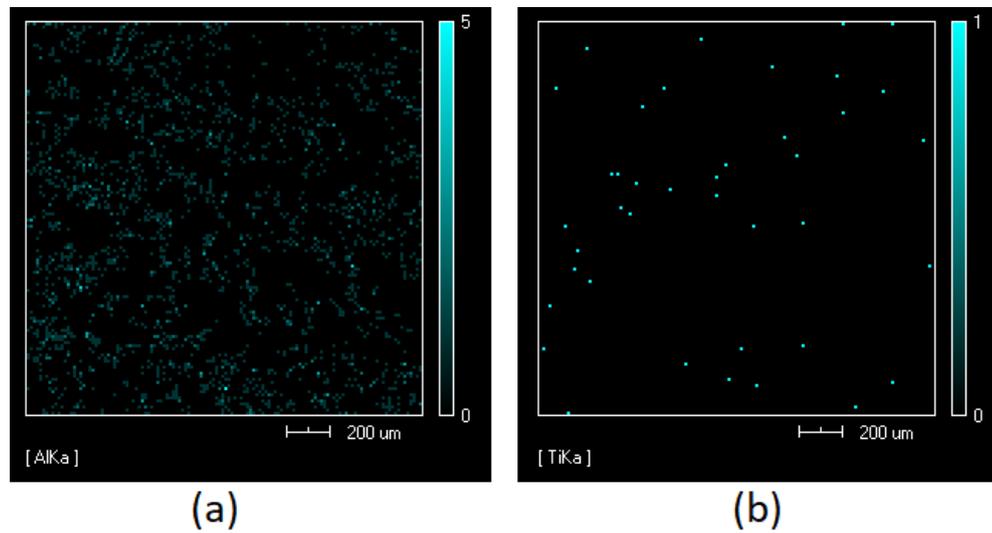
A imagem de MEV do pó de alumínio tipo 2 misturado com o hidreto de titânio é apresentada na figura 32 e na figura 33 é possível observar no mapeamento químico, como o hidreto de titânio está distribuído na amostra, indicando alguns locais com excesso de hidreto contrapondo outros locais sem a presença do agente expansor. Essa diferença na mistura entre o hidreto e os pós de alumínio pode ser explicada pela diferença no tamanho das partículas uma vez que partículas com dimensões próximas tendem a minimizar o efeito da segregação.

Figura 32 – Imagem (MEV) da mistura do pó de alumínio tipo 2 com hidreto de titânio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Imagem do mapeamento químico da mistura do pó de alumínio tipo 2 com hidreto de titânio evidenciando os elementos químicos (a) alumínio e (b) titânio.

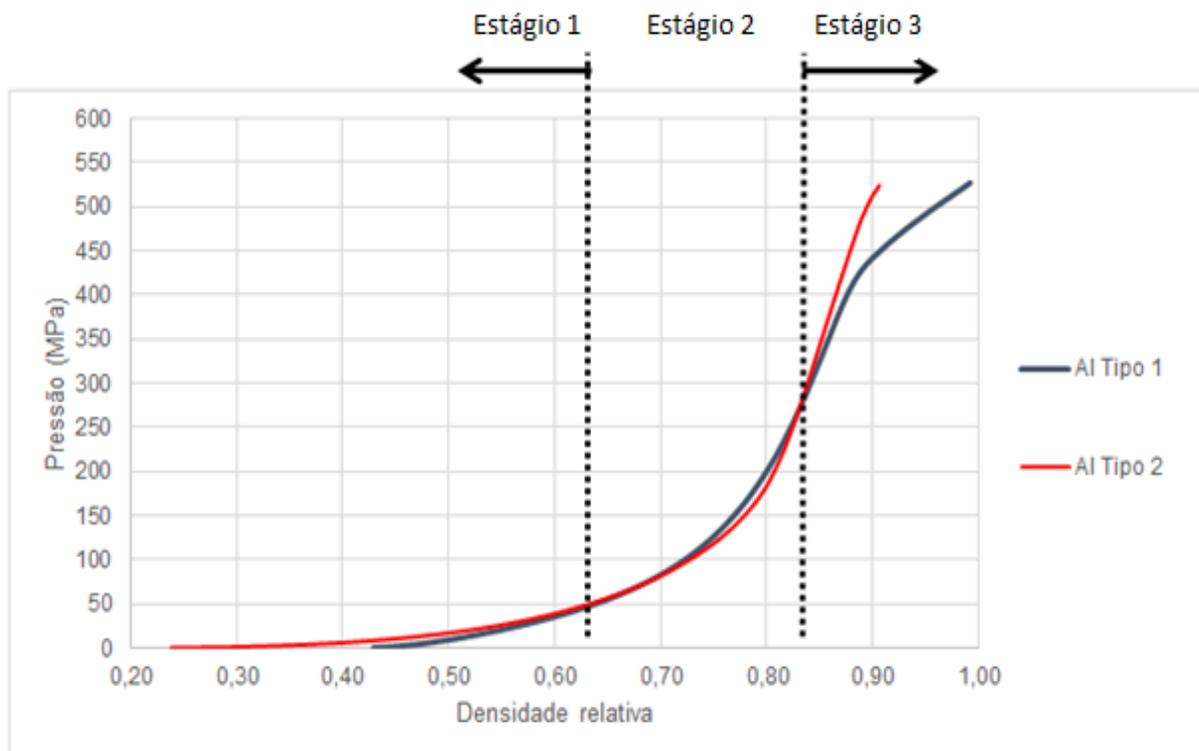


Fonte: Autoria própria.

#### 5.4. Curvas de compactação

As curvas de compactação estão apresentadas no gráfico da figura 34.

Figura 34 – Curvas de compactação.



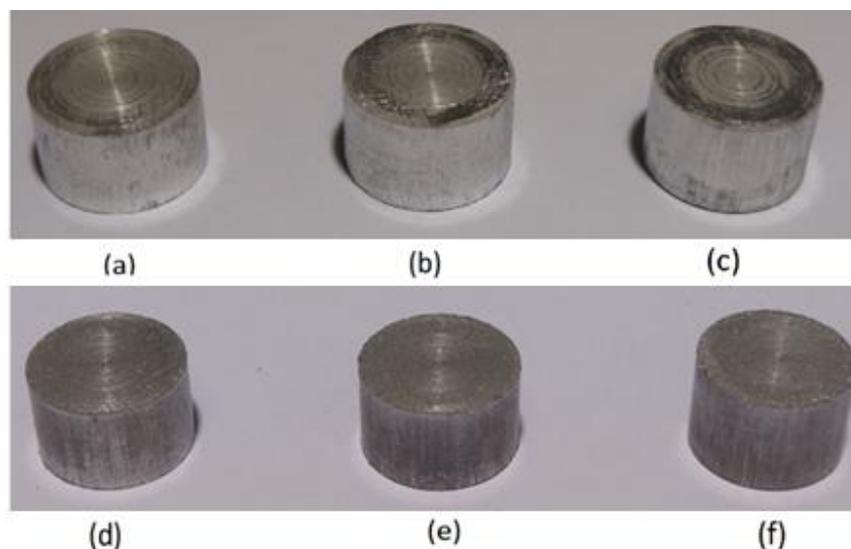
Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar no gráfico da figura 34 os três estágios da compactação com o início da densificação no estágio 1, predominância da deformação plástica, grande eliminação ou redução do tamanho dos poros no estágio 2 e eliminação e redução do tamanho dos poros em elevadas pressões no estágio 3. Além disso, ao analisar as curvas pode-se verificar que para pressões maiores que 300MPa, os pós do alumínio tipo 1 obtêm maiores densidades relativas, para uma mesma pressão, do que o alumínio tipo 2. Isso se deve ao tamanho das partículas e à geometria das mesmas. Partículas menores e com formas regulares tendem a se acomodar mais facilmente sem necessidade de deformação para acomodação.

### 5.5. Corpos de prova após compactação

Foram produzidos corpos de prova com três pressões de compactação diferentes, 200, 350 e 500MPa. Na avaliação visual, não é possível verificar grandes diferenças entre os corpos de prova com a variação da pressão de compactação e do tipo de pó utilizado, como pode ser visto na figura 35. Porém ao analisar a densidade, foi verificado que esta varia tanto com a pressão utilizada na compactação, quanto com o tipo de pó utilizado. Podem-se observar na figura 36 gráficos com a variação de densidade de acordo com a pressão e o tipo de pó utilizado.

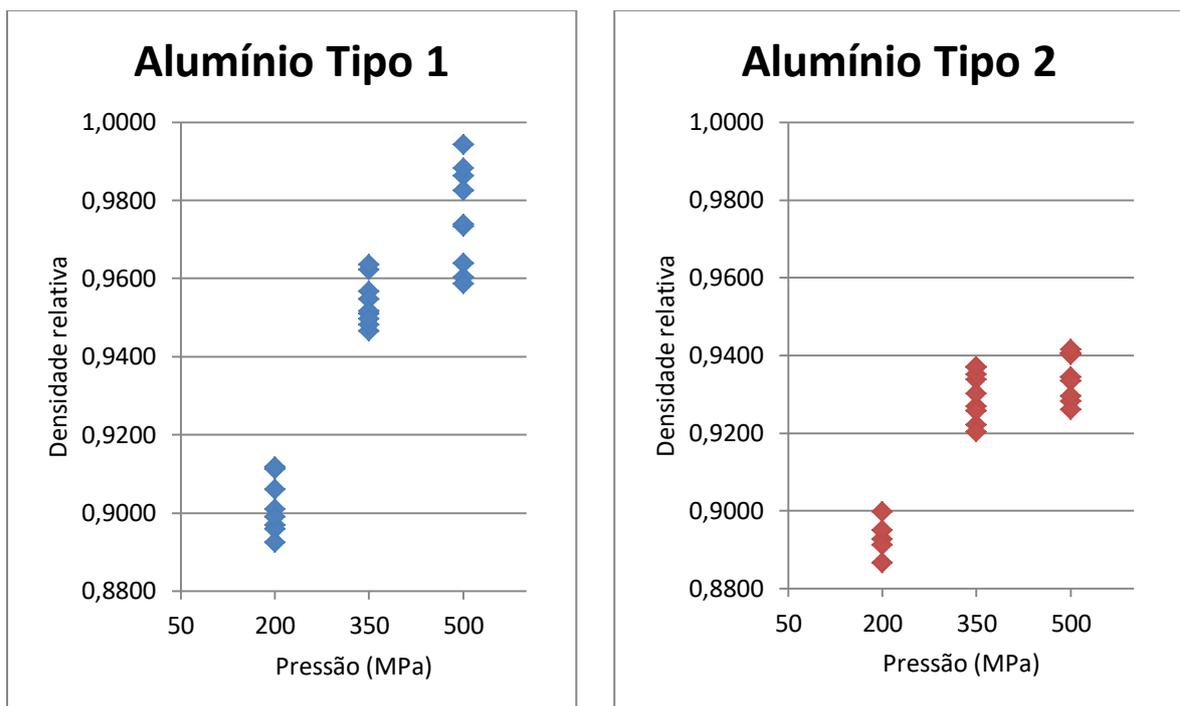
Figura 35 – Amostras produzidas com diferentes pressões de compactação para pós do tipo 1 (a) 200, (b) 350, (c) 500MPa, e para pós do tipo 2 (d) 200, (e) 350 e (f) 500MPa.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos para os corpos verde estão apresentados na figura 36 e eles confirmam os resultados que foram obtidos com as curvas de compactação. Pode ser observado na figura 36 que a densidade relativa igual ou superior a 0,95 foi obtida para o pó de alumínio tipo 1 com pressões de 350 e 500MPa. Por meio de compactação uniaxial a frio, com a finalidade de alcançar densidades relativas, para o corpo verde, superiores a 0,95, Bonaldi (2012) aplicou pressão de 450MPa. Os pós de alumínio puro utilizados por Bonaldi (2012) tinham diâmetro médio de  $40\mu\text{m}$  e forma arredondada. Entretanto, pode ser observado nos gráficos da figura 36, que utilizando pressões de 500MPa, não foi possível obter corpos verdes com densidade relativa de 0,95 para o alumínio do tipo 2. Tal fato pode ser explicado pela granulometria e pela morfologia irregular deste material (Figura 27, p.56).

Figura 36 – Densidades relativas obtidas para cada tipo de alumínio em função da pressão de compactação.



Fonte: Autoria própria.

A tabela 9 apresenta os valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado e pressão de compactação.

Tabela 9 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado e pressão de compactação.

Alumínio	Pressão de compressão (MPa)	Densidade Relativa		
		Média	Mediana	Desvio Padrão
Tipo 1	500	0,9757	0,9336	0,0122
Tipo 1	350	0,9538	0,9516	0,0057
Tipo 1	200	0,9028	0,9009	0,0070
Tipo 2	500	0,9349	0,9344	0,0057
Tipo 2	350	0,9298	0,9301	0,0060
Tipo 2	200	0,8868	0,8866	0,0077

Fonte: Autoria própria.

A tabela 10 apresenta a análise de variância (ANOVA) de fator duplo para as densidades relativas obtidas. Para  $p < 0,05$  e  $F > F_{\text{crítico}}$ , os valores das médias das densidades relativas são considerados diferentes, ou seja, a densidade relativa das amostras compactadas varia com a pressão e com o tipo de pó utilizado.

Tabela 10 – ANOVA da densidade relativa das amostras compactadas.

Propriedade	Variável	p-valor	$\alpha$	F	F crítico	Resultado
Densidade relativa	Tipo de pó	0,0000	0,0500	146,2311	4,0427	Diferentes
	Pressão de compactação	0,0000	0,0500	271,1415	3,1907	Diferentes
	Interação das duas variáveis	0,0001	0,0500	10,7452	3,1907	Diferentes

Fonte: Autoria própria.

Comparando os dados obtidos nos corpos de prova com os da curva de compactação e com resultados de Bonaldi (2012), é possível afirmar que a compactação de pós com dimensões maiores e irregulares requerem maiores cargas para alcançar a mesma densidade de corpos de prova produzidos com pós de dimensões menores e esféricos ou arredondados. Pós menores e regulares (esféricos ou arredondados) tendem a se acomodar entre eles com mais facilidade.

## 5.6. Obtenção da espuma alumínio

Pode-se observar na figura 37 fotos das amostras antes (a) e após tratamento térmico (b). Nesta figura é possível observar que algumas amostras apresentam

pequenas esferas na superfície. Estas amostras são de alumínio tipo 2 e isso ocorre devido à presença de alumina (óxido de alumínio) no interior da amostra, onde parte do material que fundiu não consegue aderir à alumina e escapam para a superfície, pois esta ainda se manteve sólida devido ao seu alto ponto de fusão (SCHAFFER, 2002). Esse fenômeno é conhecido como exsudação.

Figura 37 – Corpos de prova com pó de alumínio tipo 2 (a) antes do tratamento térmico e (b) após o tratamento térmico.



Fonte: Autoria própria

### **5.6.1. Influência do processo de compactação e da granulometria dos pós**

Valor mínimo e valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado podem ser observados na tabela 11. Os valores informados na tabela 11 indicam que, no total de amostras, a menor densidade relativa média obtida foi para alumínio do tipo 2, porém a menor densidade absoluta obtida foi com alumínio do tipo 1. A menor densidade das amostras de alumínio tipo 2 se deve à baixa densidade obtida na etapa de compactação e na exsudação ocorrida, indicando que as pressões utilizadas não foram suficientes para compactar e quebrar a camada de óxido nos pós do tipo 2 e isso é devido ao maior tamanho das partículas do alumínio tipo 2 em comparação com o tipo 1. A tabela 12 apresenta o teste t bicaudal para as densidades relativas

obtidas após expansão para cada tipo de pó. Para  $p < 0,05$  os valores das médias das densidades relativas são considerados diferentes, ou seja, a população de amostras expandidas do tipo 1 é estatisticamente diferente da população de amostras produzidas com alumínio tipo 2 em relação em relação à densidade relativa, evidenciando que a granulometria dos pós de metal base tem influência direta no produto final.

Tabela 11 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tipo de pó utilizado.

Alumínio	Densidades Relativa			
	Mínimo	Média	Mediana	Desvio Padrão
Tipo 1	0,69033	0,8600	0,8746	0,0695
Tipo 2	0,78867	0,8268	0,8266	0,0187

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 – Teste t da densidade relativa das amostras expandidas com os diferentes tipos de alumínio.

Propriedade	p-valor	$\alpha$	Resultado
Densidade relativa	0,0318	0,05	Diferentes

Fonte: Autoria própria

Neu et al (2011) compararam o efeito de dois métodos de compactação, compressão uniaxial e extrusão, na densidade relativa do corpo verde e no processo de expansão e, segundo o autor, as médias das densidades relativas obtidas com extrusão foram superiores às obtidas com pressão uniaxial e, conseqüentemente, as amostras expandidas que foram compactadas por extrusão tiveram menores densidades relativas e estrutura de espuma mais homogênea. De acordo com Neu et al (2011), uma compactação ineficaz pode gerar trincas no momento do tratamento térmico, e isso pode facilitar a perda de gás pelo corpo de prova fazendo com que a expansão da mesma seja menor. Esse pode ser um dos motivos de que os corpos de prova produzidos com menor pressão na etapa de compactação uniaxial a frio, não obtiveram expansão considerável no tratamento térmico.

Pode ser observado nas figuras 38 a 46, comparativamente, amostras produzidas com tipos de pós com granulometria diferentes para condições de processamento

iguais em cada figura. Pode-se observar que nas amostras obtidas com alumínio do tipo 1 há alguma formação de cavidades geradas pela decomposição do hidreto, diferentemente das amostras do tipo 2 em que não é possível verificar formação de bolhas. Isso pode ser explicado pelo aprisionamento ineficaz do agente expansor entre os pós de metal base para as amostras do tipo 2, e assim o hidrogênio liberado pela decomposição do hidreto escapa das amostras podendo ocasionar o fenômeno da exsudação.

Figura 38 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 39 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 40 – Amostras produzidas com pressão de compactação 500MPa, tempo de tratamento térmico de 30 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 41 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 42 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 43 – Amostras produzidas com pressão de compactação 350MPa, tempo de tratamento térmico de 30 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 44 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 45 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 20 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

Figura 46 – Amostras produzidas com pressão de compactação 200MPa, tempo de tratamento térmico de 10 minutos e pó de alumínio (a) tipo 1 e (b) tipo 2.



Fonte: Autoria própria

### **5.6.2. Influência do tempo de encharque do tratamento térmico**

Pode-se observar na tabela 13 os resultados das densidades relativas (média, mediana e desvio padrão) para amostras produzidas com alumínio tipo 1 com pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa e variação do tempo de tratamento

térmico. As figuras 47, 48 e 49 ilustram estes resultados. Ao analisar a tabela 13, é possível verificar que o tempo tem influência relevante somente quando se utiliza pressão de compactação de 500MPa e isso pode ser visualizado na figura 47 em que a amostra (a) apresenta maior expansão. Isso se dá porque com essa pressão foram obtidos corpos de prova com maior densidade, em que os pós de hidreto de titânio são aprisionados entre os pós de alumínio e ao se decompor, liberando o hidrogênio, este continua aprisionado e formam bolhas. Com o aumento do tempo essas bolhas podem coalescer e causar o colapso da espuma com formação de caminhos preferenciais que facilitam que o hidrogênio escape do corpo de prova. Em pressões de compactação de 350 e 200MPa não é possível avaliar a influência do tempo pois não houve variação significativa no valor médio da densidade relativa e pode ser observado nas figuras 48 e 49 que os espaços vazios gerados são poucos e não caracterizam formação de espuma.

Tabela 13 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com cada pressão de compactação para alumínio tipo 1 e variação do tempo.

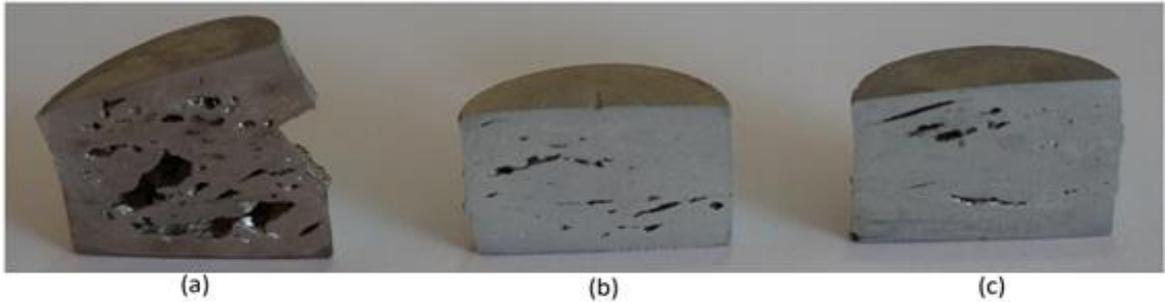
<b>Alumínio Tipo 1 – Densidades Relativas</b>			
<b>Pressão de compactação 500MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,6924	0,6906	0,0028
20 min	0,8655	0,9028	0,0541
30 min	0,8448	0,8484	0,0267
<b>Pressão de compactação 350MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,9290	0,9332	0,0117
20 min	0,9096	0,8960	0,0315
30 min	0,9082	0,9179	0,0208
<b>Pressão de compactação 200MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,8624	0,8561	0,0145
20 min	0,8659	0,8698	0,0091
30 min	0,8623	0,8635	0,0041

Fonte: Autoria própria.

Experimentos de Bonaldi (2012), para avaliar a influência do tempo de encharque revelam que para tempos de tratamento térmico de 8, 10 e 12 minutos, as menores densidades obtidas foram para os corpos de prova produzidos com 12 minutos, ou seja, com o aumento do tempo houve diminuição da densidade. Porém, para Duarte (2005), o aumento do tempo de tratamento térmico diminuiu a densidade do corpo

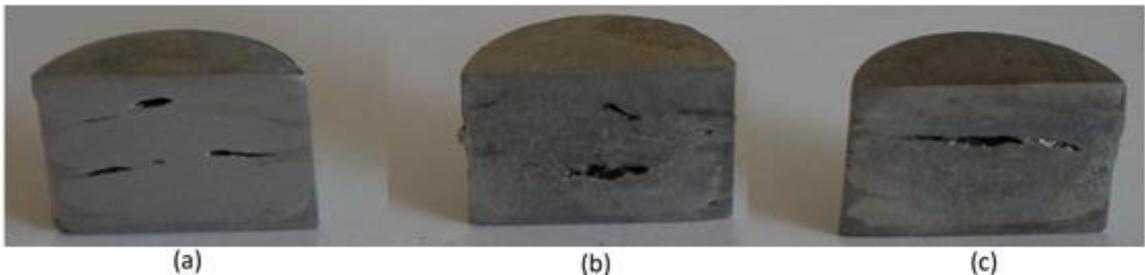
de prova até um determinado momento, seguido por aumento da densidade com o aumento do tempo. Segundo Duarte (2005), isso acontece devido ao coalescimento e posterior colapso das espumas após atingir da expansão máxima.

Figura 47 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 500MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



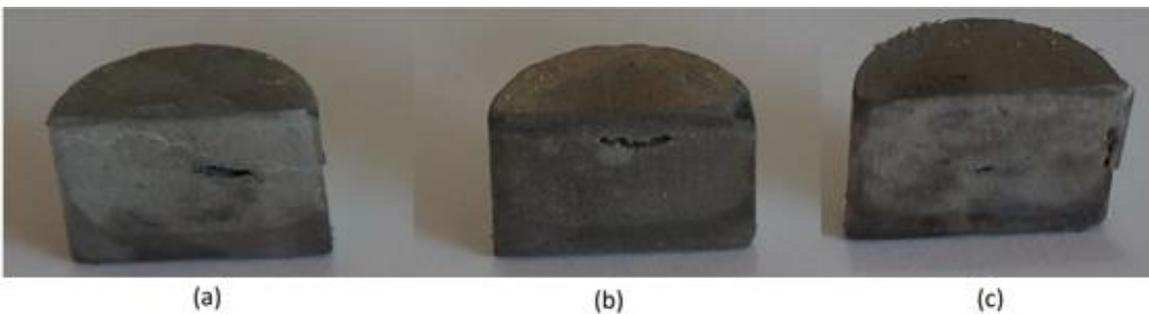
Fonte: Autoria própria.

Figura 48 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 350MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, pressão de compactação 200MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



Fonte: Autoria própria.

De forma similar ao que foi feito para o alumínio tipo 1, a tabela 14 apresenta resultados das densidades relativas (média, mediana e desvio padrão) para amostras produzidas com alumínio tipo 2 com pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa e variação do tempo de tratamento térmico. As figuras 50, 51 e 52 ilustram estes resultados.

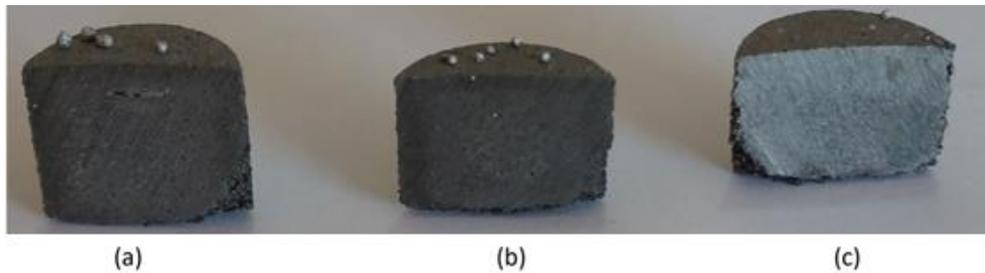
Não foi verificada variação considerável nas densidades em amostras produzidas com alumínio do tipo 2 com a variação do tempo. Isso pode ser explicado pela densidade inicial verificada em corpos de prova verde obtidos com esse tipo de alumínio. A baixa densidade pode causar o não aprisionamento dos pós de hidreto entre os pós do metal, e esse, ao decompor, libera gás hidrogênio que pode ter escapado da amostra. Além disso, conforme pode ser visto nas figuras 50, 51 e 52, ocorreu exsudação nas amostras. Essa exsudação pode ajudar a formar caminhos para escape do gás hidrogênio.

Tabela 14 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com cada pressão de compactação para alumínio tipo 2 e variação do tempo.

<b>Alumínio Tipo 2 – Densidades Relativas</b>			
<b>Pressão de compactação 500MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,8441	0,8490	0,0189
20 min	0,8203	0,8212	0,0089
30 min	0,8364	0,8266	0,0218
<b>Pressão de compactação 350MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,8424	0,8425	0,0084
20 min	0,8245	0,8251	0,0137
30 min	0,8347	0,8338	0,0079
<b>Pressão de compactação 200MPa</b>			
Tempo	Média	Mediana	Desvio Padrão
10 min	0,8081	0,8093	0,0060
20 min	0,8011	0,8014	0,0100
30 min	0,8300	0,8299	0,0025

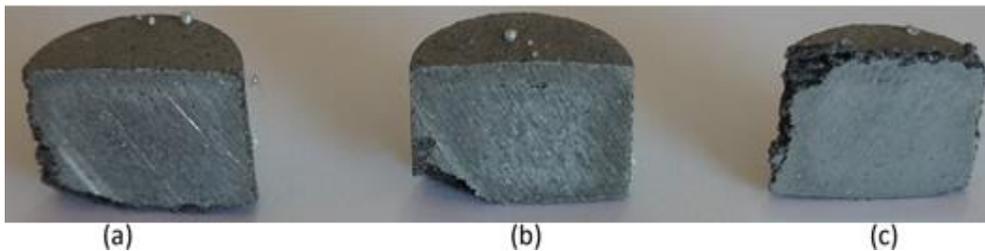
Fonte: Autoria própria.

Figura 50 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 500MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



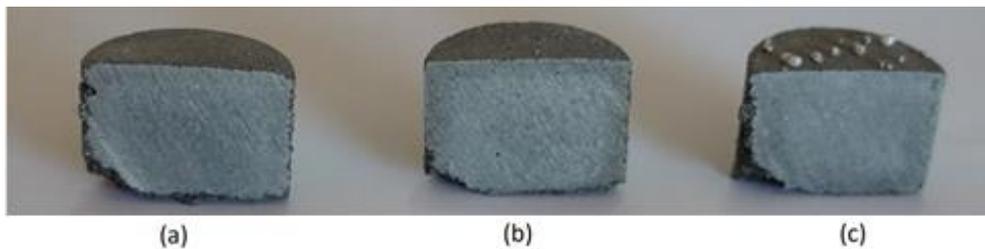
Fonte: Autoria própria.

Figura 51 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 350MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 52 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, pressão de compactação 200MPa e com tempo de tratamento térmico (a) 10, (b) 20 e (c) 30 minutos.



Fonte: Autoria própria.

A análise estatística, feita por meio da ANOVA, para verificar a atuação do tempo na produção das amostras está indicada na tabela 15 e compactua com a informação anterior de que é possível verificar que o tempo tem influência relevante quando se utiliza pressão de compactação de 500MPa para alumínio tipo 1. Estatisticamente, para  $p < 0,05$  e  $F > F_{\text{crítico}}$ , a variação do tempo influi para valores de densidades relativas para as amostras produzidas com alumínio tipo 1 e 500MPa e para amostras produzidas com alumínio tipo 2 e 200MPa. Para as outras condições estudadas, o tempo não influenciou de forma significativa.

Tabela 15 – ANOVA da densidade relativa das amostras expandidas para cada tipo de pó e pressão, com diferentes tempos de tratamento térmico.

Propriedade	Alumínio	Pressão (MPa)	p-valor	$\alpha$	F	F crítico	Resultado
Densidade relativa	Tipo 1	500	0,0049	0,0500	14,6728	5,1433	Diferentes
		350	0,6193	0,0500	0,5195	5,1433	Iguais
		200	0,9218	0,0500	0,0825	5,1433	Iguais
	Tipo 2	500	0,4303	0,0500	0,9737	5,1433	Iguais
		350	0,2970	0,0500	1,4967	5,1433	Iguais
		200	0,0135	0,0500	9,5951	5,1433	Diferentes

Fonte: Autoria própria.

### 5.6.3. Influência da pressão de compactação

Ao comparar as amostras com a variação da pressão de compactação, é perceptível que a pressão/densidade tem papel decisivo na qualidade e na produção de espumas de alumínio. A tabela 16 apresenta resultados de densidades relativas (média, mediana e desvio padrão) para amostras produzidas com alumínio tipo 1, tempo de tratamento térmico de 10, 20 e 30 minutos e variação da pressão de compactação. Esses resultados são ilustrados nas figuras 53, 54 e 55.

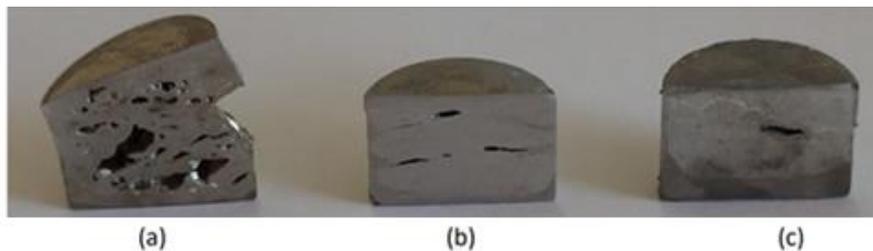
Tabela 16 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tempo de tratamento térmico para alumínio tipo 1 e pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa.

<b>Alumínio Tipo 1 – Densidades Relativas</b>			
<b>10 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,6924	0,6906	0,0028
350	0,9290	0,9332	0,0117
200	0,8624	0,8561	0,0145
<b>20 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,8655	0,9028	0,0541
350	0,9096	0,8960	0,0315
200	0,8659	0,8698	0,0091
<b>30 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,8448	0,8484	0,0267
350	0,9082	0,9179	0,0208
200	0,8623	0,8635	0,0041

Fonte: Autoria própria.

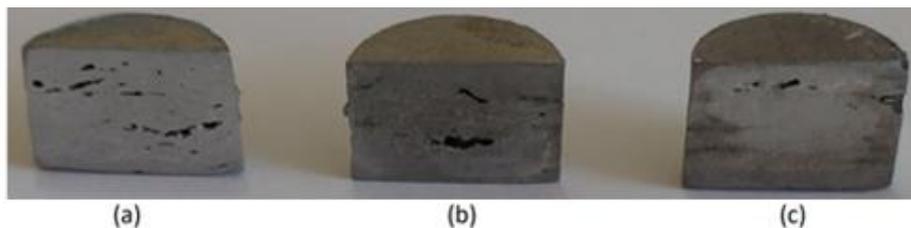
Os resultados obtidos inferem que a pressão de compactação de 500MPa gerou as melhores amostras para os pós do alumínio tipo 1, independente do tempo de tratamento térmico, mas de forma acentuada no tempo de 10 minutos, como pode ser visualizado na figura 53(a). Essa pressão de compactação tem relação direta com a densidade do corpo verde e os bons resultados para essa pressão pode ser justificada pelo melhor aprisionamento dos pós de hidreto entre os pós do metal base bem como pela quebra das camadas de óxido dos pós de alumínio. Na figura 55(c) podem-se observar algumas pequenas esferas formadas na superfície da amostra devido ao fenômeno da exsudação.

Figura 53 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 10 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



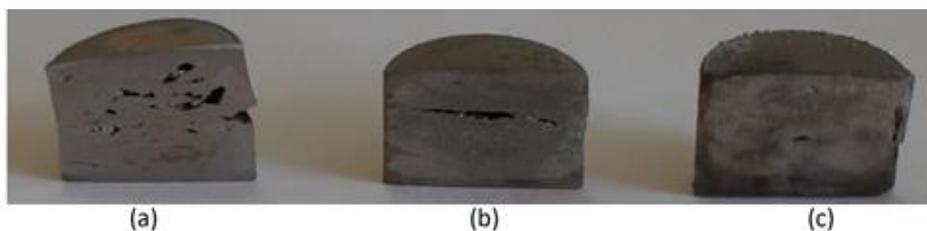
Fonte: Autoria própria.

Figura 54 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 20 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 55 – Amostras produzidas com pós do tipo 1, tempo de tratamento térmico 30 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



Fonte: Autoria própria.

As densidades relativas (média, mediana e desvio padrão) para amostras produzidas com alumínio tipo 2, tempo de tratamento térmico de 10, 20 e 30 minutos e variação da pressão de compactação estão apresentadas na tabela 17. Esses resultados são ilustrados nas figuras 56, 57 e 58.

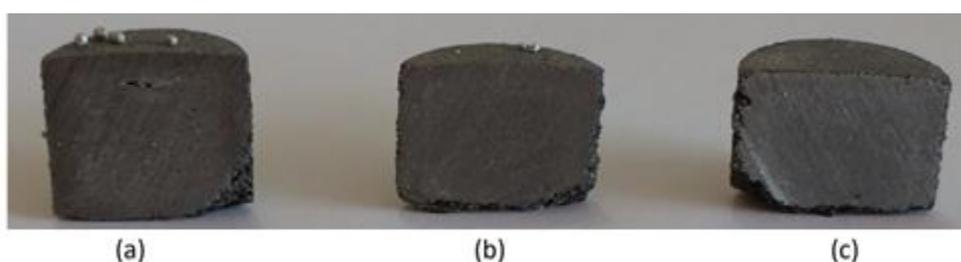
Tabela 17 – Valores de média, mediana e desvio padrão para as densidades relativas obtidas de acordo com tempo de tratamento térmico para alumínio tipo 2 e pressão de compactação de 500, 350 e 200MPa.

<b>Alumínio Tipo 2 – Densidades relativas</b>			
<b>10 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,8441	0,8490	0,0189
350	0,8424	0,8425	0,0084
200	0,8081	0,8093	0,0060
<b>20 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,8203	0,8212	0,0089
350	0,8245	0,8251	0,0137
200	0,8011	0,8014	0,0100
<b>30 minutos de tratamento térmico</b>			
Pressão (MPa)	Média	Mediana	Desvio Padrão
500	0,8364	0,8266	0,0218
350	0,8347	0,8338	0,0079
200	0,8300	0,8299	0,0025

Fonte: Autoria própria.

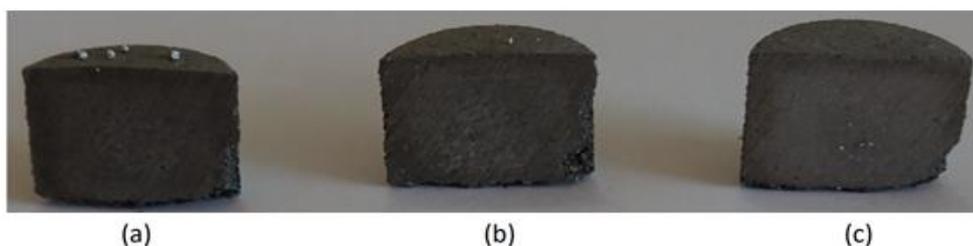
A variação que houve para as densidades relativas das amostras obtidas com alumínio do tipo 2 não se mostrou conclusiva. Isso indica que as pressões utilizadas para esse material não se mostraram eficaz, ou seja, não foram capazes de quebrar camadas de óxidos e de aprisionar o hidreto entre os pós do metal base.

Figura 56 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 10 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



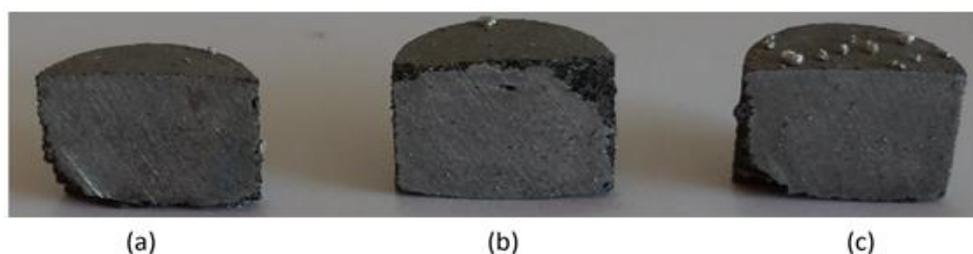
Fonte: Autoria própria.

Figura 57 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 20 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



Fonte: Autoria própria.

Figura 58 – Amostras produzidas com pós do tipo 2, tempo de tratamento térmico 30 minutos, com variação da pressão (a) 500, (b) 350 e (c) 200MPa.



Fonte: Autoria própria.

Pode ser observada na tabela 18 a análise estatística, feita por meio da análise de variância (ANOVA), que as amostras produzidas com variação da pressão, para cada tempo de encharque determinado, que para  $p < 0,05$  e  $F > F_{\text{crítico}}$ , formam produtos com densidades relativas diferentes. Na tabela 18 pode-se verificar que a variação da pressão teve influência nas densidades relativas de amostras produzidas com alumínio tipo 1 com 10 e 30 minutos de expansão, e nas amostras de alumínio tipo 2 com 10 e 20 minutos de expansão.

Tabela 18 – ANOVA da densidade relativa das amostras expandidas para cada tipo de pó e com diferentes pressões de compactação

Propriedade	Alumínio	Tempo (minutos)	p-valor	$\alpha$	F	F crítico	Resultado
Densidade relativa	Tipo 1	10	0,0000	0,05	251,3672	5,1433	Diferentes
		20	0,4266	0,05	0,9851	5,1433	Iguais
		30	0,0433	0,05	5,5406	5,1433	Diferentes
	Tipo 2	10	0,0468	0,05	5,3226	5,1433	Diferentes
		20	0,1584	0,05	2,5445	5,1433	Diferentes
		30	0,0433	0,05	0,1238	5,1433	Iguais

Fonte: Autoria própria.

## 6. CONCLUSÃO

- A pulverotecnologia se mostrou um processo viável tecnicamente para produção de espumas de alumínio.
- A granulometria e geometria dos pós de alumínio são fatores que interferem na pressão necessária para compressão uniaxial a frio em matriz rígida, uma vez que foi verificado que para pós de granulometria e morfologia diferentes e compactados com pressões iguais, a densidade obtida para corpo verde é diferente.
- A pressão de compactação e conseqüentemente densidade do corpo verde são fatores preponderantes para obtenção de espumas de alumínio. Deve-se obter densidade suficiente para aprisionamento dos pós de agente expensor dentro dos pós de alumínio. Além disso, as pressões devem ser suficientes para quebrar as camadas de óxido nos pós de alumínio.
- O tempo do tratamento térmico é um parâmetro que influenciou na qualidade da espuma. Tempos de tratamento térmico longos podem promover a coalescência e o colapso de poros formando caminhos preferenciais para saída de gases gerados pela decomposição do agente expensor.
- Foram obtidas espumas de alumínio com densidade relativa de 69 a 95% do valor da densidade do alumínio utilizado. Os melhores resultados obtidos neste trabalho foram para alumínio com tipo 1, pressão de compactação 500MPa e tempo de tratamento térmico de 10 minutos à uma temperatura de 710°C.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Na realização deste trabalho foram encontradas muitas limitações que influenciaram na obtenção de espumas de alumínio. Apresentam-se algumas sugestões para novos trabalhos:

- Avaliar novas formas de compactação dos pós metálicos como, por exemplo, a extrusão ou pressão uniaxial a quente.
- Utilização de fornos com atmosfera controlada para evitar oxidação dos pós durante o tratamento térmico.
- Avaliar obtenção de espumas provenientes de pós de ligas de alumínio ou mistura de pós de alumínio com pós de outros elementos.
- Verificar a influência do parâmetro temperatura no tratamento térmico.
- Estudar a possibilidade de utilizar outros tipos de hidretos metálicos para agente expensor.
- Preenchimento de peças ou tubos com espuma de alumínio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERO, J. L. A. A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial - Parte I: o preenchimento das cavidades do molde. **Cerâmica Industrial**, v. 5, p.23-28, set. 2000.
- BANHART, J. **Metal foams: from fundamental research to applications**. 2007
- BARBOSA, C. **Metais não ferrosos e suas ligas: microestrutura, propriedades e aplicações**. Rio de Janeiro: E-papers, 2014. 532 p.
- BANHART, J. BAUMEISTER, J. Deformation characteristics of metal foams. **Journal of Materials Science**, v.33, p.1431-1440, 1998.
- BI, Y; ZHENG, Y.; LI, Y. Microstructure and mechanical properties of sintered porous magnesium using polymethyl methacrylate as the space holder. **Material Letters**, v.161, p.583-586, Sep. 2015.
- BONALDI, P. O. **Obtenção de espuma de alumínio através do processo de metalurgia do pó e propriedades mecânicas de estrutura sanduíche**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- ČAPEK, J.; VOJTĚCH, D. Effect of sintering conditions on the microstructural and mechanical characteristics of porous magnesium materials prepared by powder metallurgy. **Materials Science and Engineering C**, v.35, p.21-28, Oct. 2013.
- ČAPEK, J.; VOJTĚCH, D. Properties of porous magnesium prepared by powder metallurgy. **Materials Science and Engineering C**, v.33, p.564-569, Apr. 2012.
- CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó**. 4. ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001. 326 p.
- DAVIS, J.R. **ASM specialty handbook: aluminum and aluminum alloys**. Ohio: Materials Park. ASM International, 1993. 784 p.
- DA-WU, L. et al. Preparation and characterization of aluminum foams with ZrH<sub>2</sub> as foaming agent. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 21, p.346-352, Oct. 2010.
- DUARTE, I. M. A. **Espumas metálicas: processo de fabricação, caracterização e simulação numérica**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
- GERAMIPOUR, T.; OVEISI, H. Effects of foaming parameters on microstructure and compressive properties of aluminum foams produced by powder metallurgy method. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 27, p.1569-1579, Feb. 2017.

HAO, G. L.; HAN, F. S.; LI, W. D. Processing and mechanical properties of magnesium foams. **J Porous Mater.** v.16, p.251-256, Mar. 2008.

KADOI, K. et al. Heat treatment of TiH<sub>2</sub> powder to control decomposition phenomenon for aluminum foam fabrication by melt route. **Materials Transactions**, v. 50, p.727-733, Mar. 2009.

KATSUYOSHI, K. **Powder metallurgy**. InTech: Rijeka, 2012. 124p.

KITAZONO, K. et al. Solid-state diffusion bonding of close-cell aluminum foams. **Materials Science and Engineering A**, v.327, p.128-132, Jun. 2002.

MATIJASEVIC-LUX, B. et al. Modification of titanium hydride for improved aluminum foam manufacture. **Acta Materialia**, v. 54, p.1887-1900, Feb. 2006.

NERY, F. et al. Preparação e caracterização de um biocompósito obtido pela mistura de hidreto de titânio com nitrato de cálcio para implantes dentários. **Revista Matéria**, v. 21, p.742-755, 2016.

NEU, T. R. et al. Magnesium and magnesium alloy foams. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POROUS METALS AND METALLIC FOAMS, 7., 2011, Busan, Korea. **Proceedings...** Busan, Korea: [S.I.], 2011. p. 133-140.

REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1995. 658 p.

SANTOS, A. A. **Estudo das variáveis no processo de compactação de pós a base de alumina**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2012.

SCHAFFER, G. B.; HALL, B.J. The influence of the atmosphere on the sintering of aluminum. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 33, p.3279-3284, Oct. 2002.

ZHANG et al. The influence of titanium hydride pretreatment on the compressive properties of aluminum foam. **Materials Science**, v. 20, p.424-428, Nov. 2014.