

**Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais**



**Dissertação de Mestrado**

**Cristina Aparecida Esteves**

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO VIA  
METALURGIA DO PÓ**

**Novembro de 2018**



Cristina Aparecida Esteves

### **Obtenção e Caracterização de Espumas de Alumínio Via Metalurgia do Pó**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Ciência e Desenvolvimento de Materiais

Linha de pesquisa: Seleção, Processamento e Caracterização

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Belo Horizonte, Novembro de 2018

Esteves, Cristina Aparecida.  
E79o Obtenção e caracterização de espumas de alumínio via metalurgia  
do pó / Cristina Aparecida Esteves. - 2018.  
83 f. : il., fotos, grafs.

Orientador: 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. Metalurgia do pó. 3. Hidretos. I. Silva, Sidney  
Nicodemos da. II. Título.

CDD: 669.722

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**“Obtenção e Caracterização de Espumas de Alumínio Via Metalurgia do Pó”**

Autor: Cristina Aparecida Esteves

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

---

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva (Orientador)

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG

---

Prof. Dra. Ivete Peixoto Pinheiro

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG

---

Prof. Dr. Sandro Cardoso Santos

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do CEFET-MG

---

Prof. Dra. Michelle Cristiane da Silva Duarte

Centro Universitário Newton Paiva

## **AGRADECIMENTOS**

Título de mestre se constrói ao longo dos anos, as vezes décadas, iniciando na graduação, onde se ganha parceiros da vida acadêmica, os quais auxiliam e orientam a linha da vida a ser seguida. Então, primeiramente agradeço a Deus por toda esta conquista e por ter colocado só pessoas boas no meu caminho, fundamentais para a conquista deste título.

Agradeço aos meus pais, irmãos, tias e alguns familiares, pelo eterno apoio e confiança, todos sempre fazem o impossível para que eu possa alcançar qualquer objetivo. São grandes exemplos de luta e determinação.

Agradeço ao meu companheiro gigante Eduardo Fernandes (marido...), é um parceiro inigualável, grande responsável por este título, sempre apoiando qualquer idéia.

Agradeço ao meu orientador Sidney Nicodemos, segundo pai, é um orientador dos estudos e principalmente da vida. Meu perfil acadêmico e profissional foi lapidado por ele, foram muitos ensinamentos durante todos estes anos.

Agradeço toda a equipe do Demat, em especial Ivete Pinheiro, Geraldo Mercis, Feijão, Rogério, Carlinhos, Sr. Antônio, Sr. Zé, Marinete entre outros que me acompanharam desde a Iniciação Científica até o Mestrado, dando todo apoio técnico necessário.

Agradeço aos amigos conquistados no CEFET MG, foram vários que em cada momento cumpriram seu papel de parceria. Em especial, a doce Cássia Barbosa, Artur Izumi e Nicolás, nos últimos tempos fizeram tudo que puderam para ajudar.

Agradeço a equipe da Phosther Tecnologia, que colaboraram desde um cafezinho da Elízia Duarte, apoio da equipe de laboratório Daniel Ladislau, Gabriela Moreira, Daniel Mendes, Agrimar com o corte dos CPs até aos ensinamentos do Lupércio Tarcísio, incentivando que todos devem estudar.

Enfim, sou agradecida por ser rodeada de tantas pessoas boas que me apoiam sempre!

## RESUMO

A literatura mostra que as espumas de alumínio possuem um vasto campo de aplicações como material de uso estrutural principalmente nas indústrias aeronáutica e automobilística, devido às propriedades físicas de isolamento térmico e acústico, além da capacidade de absorver esforços mecânicos de compressão e/ou torção, dentre outras características com: a redução de peso e economia de energia. Este trabalho visa contribuir com os estudos relacionados com parâmetros para a obtenção de espumas de alumínio via rota da metalurgia do pó empregando a conformação mecânica por compactação a frio. Um molde de aço SAE 1045 trefilado foi usinado e tratado termicamente (têmpera e revenimento) na busca do endurecimento superficial, necessário para suportar as altas cargas utilizadas na compressão uniaxial dos pós (alumínio e hidreto de titânio), utilizados na matriz de experimentos propostos. As matérias primas consistiam de pó de alumínio (Al), hidreto de titânio ( $\text{TiH}_2$ ) em pó como agente espumante e estearato de zinco como agente desmoldante. Produziu-se 15 corpos de prova verdes, divididos em 5 lotes, denominados de A, B, C, D e E, com concentração de agente expensor 0,00%, 0,80%, 1,00%, 1,20% e 1,50% respectivamente. À priori, a compactação ocorreu em pressão de 350 MPa, após os CPs verdes foram sinterizados a uma taxa de aquecimento de  $16^\circ\text{C}/\text{minuto}$  até a temperatura de  $710^\circ\text{C}$  em ambiente inerte, argônio, permanecendo nesta temperatura por 8 minutos. Utilizou-se nas caracterizações físico-química das materiais e CPs as técnicas: Granulometria a Laser (CILAS) para determinar o tamanho das partículas, a Análise Termogravimétrica (DTG) especificamente para o hidreto de titânio, a fim de verificar as temperaturas de liberação de gás hidrogênio, Difração de Raios X (DRX) para verificação da estrutura cristalina, a Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (EDX) para análise da composição química, e por fim a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para análise da morfologia da superfície dos corpos de prova. Os seguintes parâmetros de processamento das espumas e o molde se mostraram eficazes. Os materiais produzidos apresentaram valores de densidades relativas entre 0,44 e 0,73, com o volume aumentando até 126%, para os parâmetros estudados de compactação com 350MPa, tratamento térmico  $710^\circ\text{C}/8$  min em atmosfera inerte.

Palavras-chave: Espumas de Alumínio, Metalurgia do Pó, Hidreto de Titânio.

## ABSTRACT

The literature shows that aluminum foams have a wide range of applications as structural material mainly in the aeronautical and automotive industries due to the physical properties of thermal and acoustic insulation, as well as the ability to absorb mechanical stresses of compression and / or torsion, among other characteristics such: weight reduction and energy saving. This work aims to contribute to the studies related to parameters to obtain aluminum foams via the route of powder metallurgy using the cold conformation mechanical compaction. A drawn SAE 1045 steel mold was machined and heat treated (quenching and tempering) in the quest for surface hardening required to withstand the high loads used in the uniaxial compression of the powders (aluminum and titanium hydride) used in the proposed experiments matrix. The raw materials consisted of aluminum powder (Al), powdered titanium hydride (TiH<sub>2</sub>) as foaming agent and zinc stearate as the release agent. Fifteen green test specimens, divided into 5 batches, denominated A, B, C, D and E, with expander concentration 0.00%, 0.80%, 1.00%, 1.20% and 1.50% respectively. A priori, compaction occurred at a pressure of 350 MPa, after the green CPs were sintered at a heating rate of 16 ° C / min to the temperature of 710 ° C in an inert atmosphere, argon, remaining at this temperature for 8 minutes. The physicochemical characterization of materials and CPs were used to determine the particle size, the Thermogravimetric Analysis (DTG) specifically for titanium hydride, in order to verify the release temperatures of X-Ray Diffraction (XRD) for the verification of crystalline structure, X-ray Fluorescence Spectroscopy (EDX) for analysis of chemical composition, and finally Scanning Electron Microscopy (SEM) for analysis of surface morphology proof bodies. The following foaming processing parameters and the mold have proven to be effective. The materials produced presented values of relative densities between 0.44 and 0.73, with the volume increasing up to 126%, for the studied parameters of compaction with 350MPa, heat treatment 710°C / 8 min in inert atmosphere.

Keywords: Aluminum foams, metallurgy of the powder, Titanium Hydride.

## SUMÁRIO

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                                   | <b>13</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b>                                                                    | <b>15</b> |
| 2.1 Objetivo Geral                                                                    | 15        |
| 2.2 Objetivos Específicos                                                             | 15        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                                        | <b>16</b> |
| 3.1 Espumas Metálicas                                                                 | 16        |
| 3.2 Processos de Obtenção da espuma metálica                                          | 19        |
| 3.2.1 Produção de Espumas Metálicas a Partir do Metal Fundido                         | 21        |
| I) Expansão Direta do Metal Fundido                                                   | 21        |
| II) Solidificação Eutética de Sólido-Gás                                              | 22        |
| III) Fundição de Precisão                                                             | 23        |
| IV) Espumas Sintéticas Usando Enchimentos Metálicos                                   | 24        |
| 3.2.2 Produção de Espumas Metálicas a Partir de Pós                                   | 25        |
| I) Pulverotecnologia                                                                  | 25        |
| II) Sinterização                                                                      | 26        |
| III) Aprisionamento de Gás                                                            | 27        |
| 3.2.3 Produção de Espuma Metálica a Partir de Partículas Ionizadas                    | 27        |
| 3.3 Espuma de Alumínio                                                                | 28        |
| 3.3.1 Fatores que Influenciam a Qualidade da Espuma                                   | 29        |
| 3.3.2 Processo de Fabrico da Espuma de Alumínio Utilizando a Rota da Metalurgia do Pó | 29        |
| 3.3.3 Propriedades mecânicas                                                          | 31        |
| I) Absorvedores de energia                                                            | 33        |
| 3.4 Aplicações da Espuma de Alumínio                                                  | 39        |
| 3.4.1 Indústria Automotiva                                                            | 39        |
| 3.4.2 Absorção de Energia em Caso de Impacto                                          | 40        |

|                                                                               |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.3 Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário .....         | 40        |
| 3.4.4 Outras Aplicações .....                                                 | 41        |
| 3.5 Caracterizações de partículas de alumínio e de hidreto de titânio .....   | 41        |
| 3.5.1 Difração de Raios X – DRX .....                                         | 41        |
| 3.5.2 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X – EDX .....                  | 42        |
| 3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura .....                               | 42        |
| 3.5.4 Distribuição granulométrica a laser – CILAS .....                       | 43        |
| 3.5.5 Analisador Termogravimétrico Diferencial - DTG .....                    | 43        |
| 3.6 Tecnologia CDIO utilizada no desenvolvimento do molde de compressão ..... | 43        |
| <b>4 MATERIAIS E METODOS .....</b>                                            | <b>45</b> |
| 4.1 Descrição do Trabalho .....                                               | 45        |
| 4.2 Materiais .....                                                           | 46        |
| 4.3 Caracterizações físico-química dos pós metálicos .....                    | 46        |
| 4.4 Confeção do molde de compactação .....                                    | 48        |
| 4.4.1 Tratamento Térmico do Molde .....                                       | 49        |
| 4.5 Mistura dos pós (Homogeneização) .....                                    | 50        |
| 4.6 Compactação dos corpos de prova verdes .....                              | 51        |
| 4.7 Sinterização .....                                                        | 52        |
| 4.8 Caracterizações dos corpos verdes compactados e sinterizados .....        | 53        |
| 4.9 Corte dos corpos de prova sinterizados .....                              | 54        |
| 4.9.1 Ensaio de Microdureza Vickers .....                                     | 54        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                                        | <b>56</b> |
| 5.1 Ensaio preliminares .....                                                 | 56        |
| 5.2 Caracterização dos pós metálicos .....                                    | 56        |
| 5.2.1 Difração de Raios X .....                                               | 57        |
| 5.2.2 Fluorescência de Raios X .....                                          | 58        |
| 5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura .....                               | 59        |

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.2.4 Distribuição Granulométrica.....                      | 60        |
| 5.2.5 Análise Termogravimétrica do Hidreto de Titânio ..... | 61        |
| 5.2.6 Homogeneização do agente expensor .....               | 62        |
| 5.3 Análise dos corpos de prova verde .....                 | 63        |
| 5.4 Início da formação dos poros .....                      | 66        |
| 5.5 Análise dos corpos de prova sinterizados .....          | 67        |
| 5.5.1 Microdureza Vickers .....                             | 74        |
| <b>6 CONCLUSÃO. ....</b>                                    | <b>76</b> |
| <b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. ....</b>             | <b>78</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                     | <b>79</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Fabricação de espuma de alumínio por fase volátil. ....                                                                                                              | 16 |
| Figura 2 - Diagrama de fases do sistema Al-Si. ....                                                                                                                             | 18 |
| Figura 3 - Exemplos de aplicações de espuma metálica de estrutura fechada (A) e de estrutura aberta (B). ....                                                                   | 19 |
| Figura 4 - Processo de fabricação.....                                                                                                                                          | 20 |
| Figura 5 - Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de produção.....                                                  | 21 |
| Figura 6 - Processo de espumagem. ....                                                                                                                                          | 22 |
| Figura 7 - Solidificação eutética de sólido-gás. ....                                                                                                                           | 23 |
| Figura 8 - Solidificação eutética de sólido-gás. ....                                                                                                                           | 24 |
| Figura 9 - Processo de fabrico de espumas sintéticas. ....                                                                                                                      | 24 |
| Figura 10 - Processo de Pulverotecnologia.....                                                                                                                                  | 25 |
| Figura 11 - Processo de aprisionamento de gás para espuma porosa de titânio.....                                                                                                | 27 |
| Figura 12 - Obtenção de espuma de níquel através de eletrodeposição. ....                                                                                                       | 28 |
| Figura 13 - Processo de produção de espuma via metalurgia do pó. ....                                                                                                           | 30 |
| Figura 14 - Secção do tubo sem e com preenchimento de espuma metálica em compressão.....                                                                                        | 32 |
| Figura 15 - Curva típica tensão deformação para espuma metálica em compressão. ....                                                                                             | 33 |
| Figura 16 - Curva real e ideal de tensão – deformação na compressão. ....                                                                                                       | 34 |
| Figura 17 - Energia absorvida por unidade de volume de espumas de liga AlSi12 após deformação de compressão de 20%, 40% e 60%.....                                              | 35 |
| Figura 18 - Comportamento de compressão de três espumas de liga AlSi12 com diferentes densidades e áreas coloridas correspondendo a mesma quantidade de energia absorvida. .... | 36 |
| Figura 19 - Fases do mecanismo de deformação para espumas de células abertas (A) e fechadas (B). ....                                                                           | 37 |
| Figura 20 - Deformação e absorção de energia da espuma metálica cilíndrica e tubo metálico. ....                                                                                | 38 |
| Figura 21 - Gráfico de Força compressiva por deslocamento axial de uma espuma (1), tubo vazio (2), tubo preenchido (3), soma da curva 1 e 2 (4). ....                           | 39 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22 - Campos de aplicação de espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.....                                                   | 40 |
| Figura 23 - Chapa sanduíche aplicada em utensílios domésticos.....                                                                                  | 41 |
| Figura 24 - Fluxograma de produção das espumas de alumínio.....                                                                                     | 45 |
| Figura 25 - Projeto do Molde para compactação de corpos verde.....                                                                                  | 49 |
| Figura 26 - Adesão do pó de alumínio no molde, corpo (A) e eixo (B).....                                                                            | 50 |
| Figura 27 - Prensa Hidráulica SL-12/20 com capacidade máxima de 20 toneladas.                                                                       | 52 |
| Figura 28 - Forno utilizado na sinterização.....                                                                                                    | 53 |
| Figura 29 - Cortadora metalográfica.....                                                                                                            | 54 |
| Figura 30 - Trincas geradas no corpo verde. ....                                                                                                    | 56 |
| Figura 31 - Difratoograma do pó de alumínio. ....                                                                                                   | 57 |
| Figura 32 - Difratoograma do pó de hidreto de titânio. ....                                                                                         | 58 |
| Figura 33 - Morfologia das partículas de alumínio.....                                                                                              | 59 |
| Figura 34 - Morfologia das partículas de hidreto de titânio.....                                                                                    | 60 |
| Figura 35 - Análise termogravimétrica do hidreto de titânio. ....                                                                                   | 61 |
| Figura 36 - Análise EDS da mistura dos pós. A) Concentração de alumínio, vermelho. B) Concentração de titânio, verde. C) Espectro de elementos..... | 63 |
| Figura 37 - Corpos de prova verde defeituosos. ....                                                                                                 | 64 |
| Figura 38 - Corpos de prova verde prensados. ....                                                                                                   | 65 |
| Figura 39 - Nucleação de poros em corpo de prova sinterizado até 400°C. ....                                                                        | 67 |
| Figura 40 - Aumento percentual do volume e densidade final dos CPs sinterizados. ....                                                               | 69 |
| Figura 41 - Corpos de prova após sinterização.....                                                                                                  | 70 |
| Figura 42 - Corpos de prova sinterizado sem adição de agente expensor, A, e com 1,50% de TiH <sub>2</sub> .....                                     | 70 |
| Figura 43 - Seção de corte dos corpos de prova sinterizados: lotes A, B, C, D e E...71                                                              |    |
| Figura 44 - Corpo de prova dentro do cilindro de aço. ....                                                                                          | 73 |
| Figura 45 - Corpo de prova sinterizado e cortado na seção longitudinal.....                                                                         | 74 |
| Figura 46 – Variação da Dureza Vickers.....                                                                                                         | 75 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Lotes produzidos de Alumínio com Hidreto de Titânio. ....                            | 51 |
| Tabela 2 - Composição química do alumínio e hidreto de titânio em estudo. ....                  | 59 |
| Tabela 3 - Distribuição granulométrica do alumínio e do hidreto de titânio. ....                | 60 |
| Tabela 4 - Características das amostras prensadas dos Lotes A, B, C, D e E. ....                | 66 |
| Tabela 5 - Aumento percentual do volume das amostras sinterizadas dos Lotes A, B, C, D e E..... | 68 |

## LISTA DE ABREVIATURAS

CDIO – *Conceiving, Designing, Implementing, Operating* (Conceituando, Projetando, Implementando, Operando).

CP – Corpo de Prova.

CVD – Processo químico a vapor.

DRX – Difração de raios X.

DTG – Análise termogravimétrica.

EDE – Energia de falha de empilhamento.

EDX – Espectroscopia de raios X.

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva.

JCPDS – Comitê de padrões de difração.

MEV – Microscopia eletrônica de varredura.

MSDS – Data Sheet.

PVD – Processo físico a vapor.

SAE – Society of automotive engineers.

SE – Elétrons secundários.

## 1 INTRODUÇÃO

As espumas metálicas são materiais metálicos porosos com massa reduzida, aplicáveis em situações de absorção de impactos e isolamento acústico e elétrico. Isto se dá pela combinação de suas propriedades físicas e mecânicas, advindas de sua natureza metálica e estrutura celular (aberta ou fechada), garantindo-lhe alta rigidez e baixa massa específica (BONALDI, 2012).

Analisando-se propriedades como densidade, resistência mecânica e módulo de Young entre espumas metálicas e outros materiais os quais podem ser substituídos por ela, nota-se uma densidade menor. Como exemplos têm os metais, cerâmicas e polímeros, com densidade relativa maior comparada a espumas metálica (DUARTE, 2005).

Apesar do aparecimento dos primeiros estudos científicos relacionados aos processos de fabricação de espumas metálicas remeterem aos anos 50, diferentemente das espumas poliméricas ou cerâmicas, estas espumas apresentam enormes dificuldades processamento, além de elevados custos na sua obtenção, sendo somente em meados da década de 90 que ocorreram desenvolvimentos consideráveis viabilizando algumas aplicações estruturais nas indústrias e em diversos outros produtos tecnológicos (DUARTE, 2005).

As espumas metálicas podem ser formadas por fundição, metalurgia do pó, deposição de vapor metálico e deposição eletroquímica. Atualmente a metalurgia do pó é o método mais estudado, consiste basicamente na compactação de pós metálicos (uma mistura de pó de alumínio e um agente espumante), e posterior tratamento térmico (sinterização), onde ocorre a formação de espuma a uma dada temperatura geralmente, com aquecimento acima do ponto de fusão da liga (ASHBY, 2000).

Embora existam estudos com outros agentes espumantes, o hidreto de titânio ( $TiH_2$ ) se mostra um agente adequado para formação de espumas de alumínio, ele libera hidrogênio do  $TiH_2$  em torno de 400°C, temperatura inferior ao ponto de fusão de ligas de alumínio comerciais (GIBSON, 1997).

O número das aplicações de espumas metálicas tem aumentado nos diferentes setores industriais à medida que as propriedades são estudadas e aprimoradas, a viabilidade de aplicação leva em conta os seguintes fatores (DUARTE, 2005):

- Morfologia: estrutura das células aberta ou fechada; percentagem de porosidade; distribuição de tamanho de poros.
- Metalurgia: composição química; microestrutura do material metálico.
- Processo de fabrico: seleção consoante o tipo de geometria pretendida para o componente.
- Economia: custos do processo; viabilidade em larga escala.

O presente trabalho teve como meta a obtenção e caracterização de espumas de alumínio via metalurgia do pó utilizando com o agente expensor o hidreto de titânio. Sendo estudados as concentrações de agente expensor entre 0,0 a 1,5%, avaliando a densidade média obtida para estas concentrações de hidreto de titânio para uma mesma pressão e condição de tratamento térmico. No entanto, à priori, foram realizados estudos preliminares para otimização dos parâmetros de compactação com pressão entre 120 a 450MPa, tratamento térmico entre 550 a 750°C em atmosfera comum e inerte, tempos de até 30 minutos na temperatura máxima e diferentes rampas de temperatura.

Dentre vários processos de produção de espuma de alumínio, o interesse em estudar o processo da metalurgia do pó se dá pela viabilidade do processo juntamente com o interesse em explorar esta área da ciência com o material de escolha, alumínio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Desenvolvimento de rota de obtenção de espumas de alumínio via metalurgia do pó tendo como agente expensor hidreto de titânio, por prensagem uniaxial, variando os parâmetros de processamento para confecção de corpos de prova (CPs) porosos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

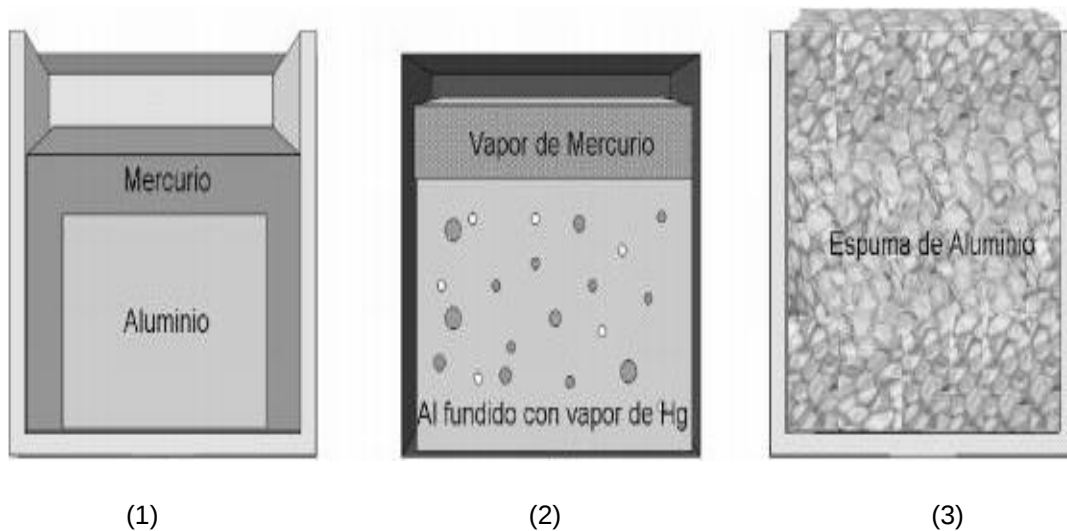
- Desenvolver moldes de baixo custo (aço-carbono SAE 1045 tratados termicamente) para processamento de espumas de alumínio por prensagem uniaxial (emprego da iniciativa CDIO);
- Caracterizar os pós de alumínio e o agente expensor hidreto de titânio -  $\text{TiH}_2$ ;
- Otimizar parâmetros de processamento por técnica de metalurgia do pó;
- Caracterizar os corpos de prova sinterizado, determinando os melhores parâmetros da espumagem como a concentração de agente expensor em função da distribuição de poros;

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Espumas Metálicas

O início dos estudos para produção de espuma metálica remontam ao ano de 1948, com a patente (USPTO - US2434775A) de Benjamín Sosnick denominada de “Processo para fazer massa de espuma metálica”, utilizando o método de aquecimento em altas pressões da liga de alumínio juntamente com um metal volátil, exemplificado na Figura 1 pelo mercúrio, que após sua temperatura de vaporização, gera altas pressões até que a liga de alumínio se funda e ocorra a liberação da pressão, vapor volátil e consequente espumagem. Entretanto, esse método se mostrou pouco eficaz, devido ao difícil controle e reprodutibilidade do processo e velocidade de espumagem, produzindo pequenas quantidades de poros com espumas metálicas irregulares com poros predominantemente fechados (GUTIÉRREZ- VÁZQUEZ, 2008).

Figura 1 - Fabricação de espuma de alumínio por fase volátil.



Fonte: Gutiérrez-Vásquez (2008).

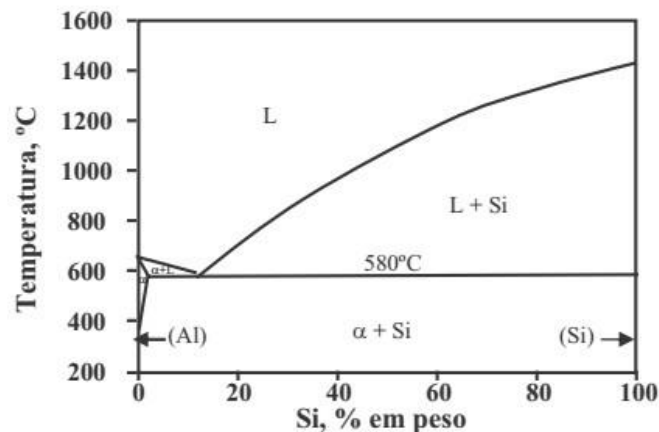
Em 1958, as primeiras espumas metálicas de poros abertos produzidas pela inserção de partículas de sal no alumínio fundido e posteriormente dissolvidas originavam os poros abertos na estrutura. No ano seguinte em 1959, patentes de produção via metalurgia do pó foram registradas pelo Reino Aircraft Corporation, consistindo na mistura do pó metálico com o agente expensor, os quais após serem compactados e

extrudados, são aquecidos produzindo gases por decomposição em altas temperaturas (GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ, 2008). No mesmo ano a patente (USPTO - US2983597A) de John C Elliott denominada “Espuma de metal e método para fazer”, descreve um método de produção de um corpo de prova metálico com células fechadas com uma massa específica aparente ligeiramente menor que do 1, compreendendo misturas de um hidreto metálico com grânulos de magnésio, alumínio, lítio e/ou misturas dos mesmos, mantendo por algum tempo a mistura numa temperatura superior ao ponto de fusão do metal, produzindo uma espuma metálica heterogênea com poros irregulares, a partir do resfriamento do metal fundido impregnado com bolhas de hidrogênio.

Em 1990, a redescoberta da rota de produção via metalurgia do pó, no Instituto de Pesquisa Fraunhoufer em Bremen, Alemanha, levou a um considerável nível de sofisticação para fabricação de espumas e seus componentes estruturais (BONALDI, 2012).

Com o aquecimento do material precursor, a matriz metálica inicialmente em estado sólido, progressivamente se transforma em estado líquido, até atingir temperatura de fusão. Em dado momento coexistem duas fases, sólida e líquida, chamado estado semi-sólido. Um exemplo é o aquecimento de uma liga de alumínio contendo 7% em peso de silício, entre a temperatura *solidus* e *liquidus* (577°C e 618°C respectivamente) apresenta duas fases, alfa e líquido, como mostrado na Figura 2. A fração de sólidos (em volume) é o principal parâmetro sobre o comportamento reológico da mistura em fusão (DUARTE, 2005).

Figura 2 - Diagrama de fases do sistema Al-Si.



Fonte: Duarte (2005).

Para a matriz da espuma, ligas com base no sistema Al-Si são utilizadas e atualmente a liga  $\text{AlSi}_6\text{Cu}_x$  (sendo  $x = 3 \dots 7$ ) é preferida, devido a sua temperatura de solidificação ser mais baixa e ao bom comportamento na formação de espuma (BONALDI, 2012).

As espumas metálicas estão sendo classificadas como uma nova classe de materiais, por apresentarem uma estrutura porosa, sendo estas de células abertas ou fechadas, a qual permite uma ampla faixa de aplicações na indústria e confere um excelente desempenho nestas diversas aplicações (SCHMITZ, 2006).

Estruturas fechadas (Figura 3A) estão ligadas a resistência ao impacto, isolamento acústico, baixo peso e amortecimento de vibrações. Isto faz com que sejam aplicadas na indústria de transportes, proporcionando uma redução no consumo de combustível e segurança passiva dos passageiros (GREGOLIN, 2000).

Estruturas abertas (Figura 3B) estão ligadas a porosidade aberta e elevada área específica, isto garante baixo peso e faz com que sejam aplicadas na indústria química, como filtros, reservatórios de fluidos e permutadores de calor (GREGOLIN, 2000).

Figura 3 - Exemplos de aplicações de espuma metálica de estrutura fechada (A) e de estrutura aberta (B).



(A)



(B)

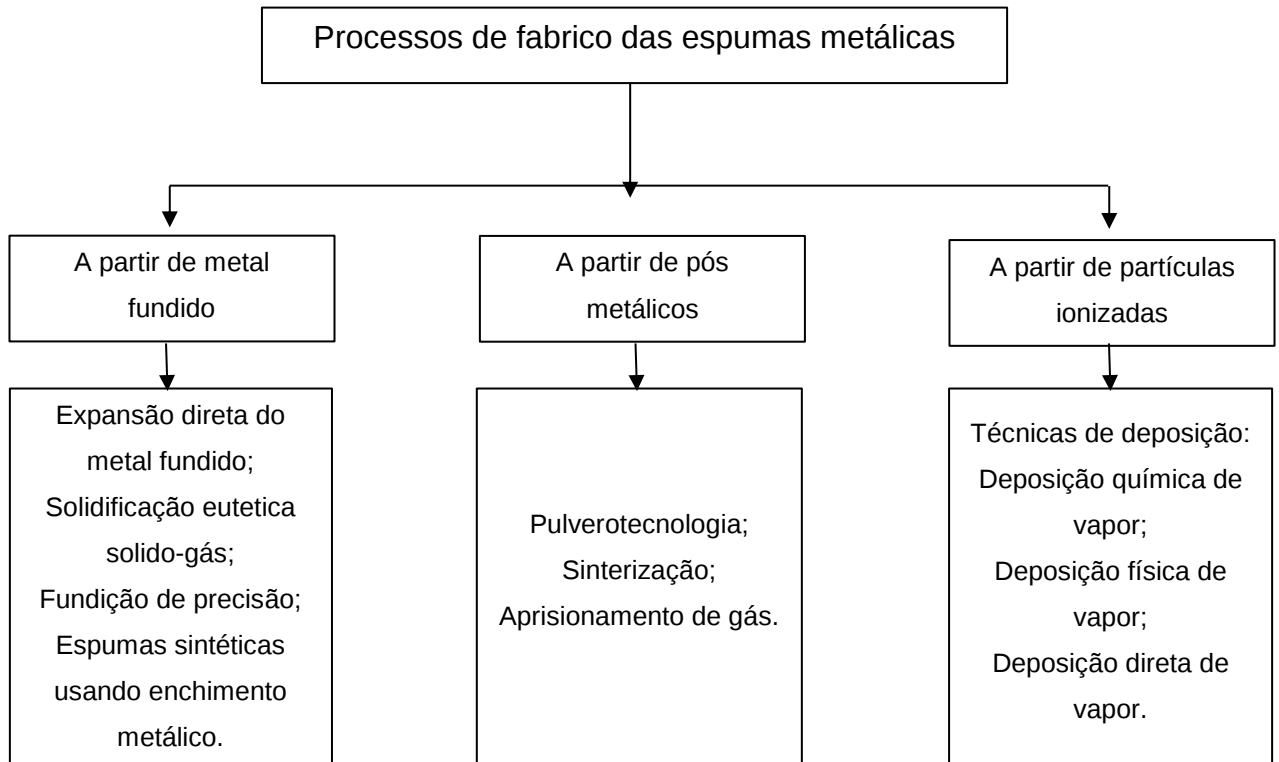
Fonte: Gregolinm (2000).

Observa-se na figura 3 estruturas ou componentes alveolares com ou sem conectividade de poros, apresentando uma significativa redução da massa específica para valores inferiores até 40% em relação ao metal denso processado por fundição (DUARTE, 2005).

### 3.2 Processos de Obtenção da espuma metálica

O processo de fabricação das espumas metálicas pode ocorrer conforme a figura 4, partindo do metal fundido, do metal em pó ou de partículas ionizadas. Em cada uma destas opções existem os diferentes processos de produção (CURRAN, 2003).

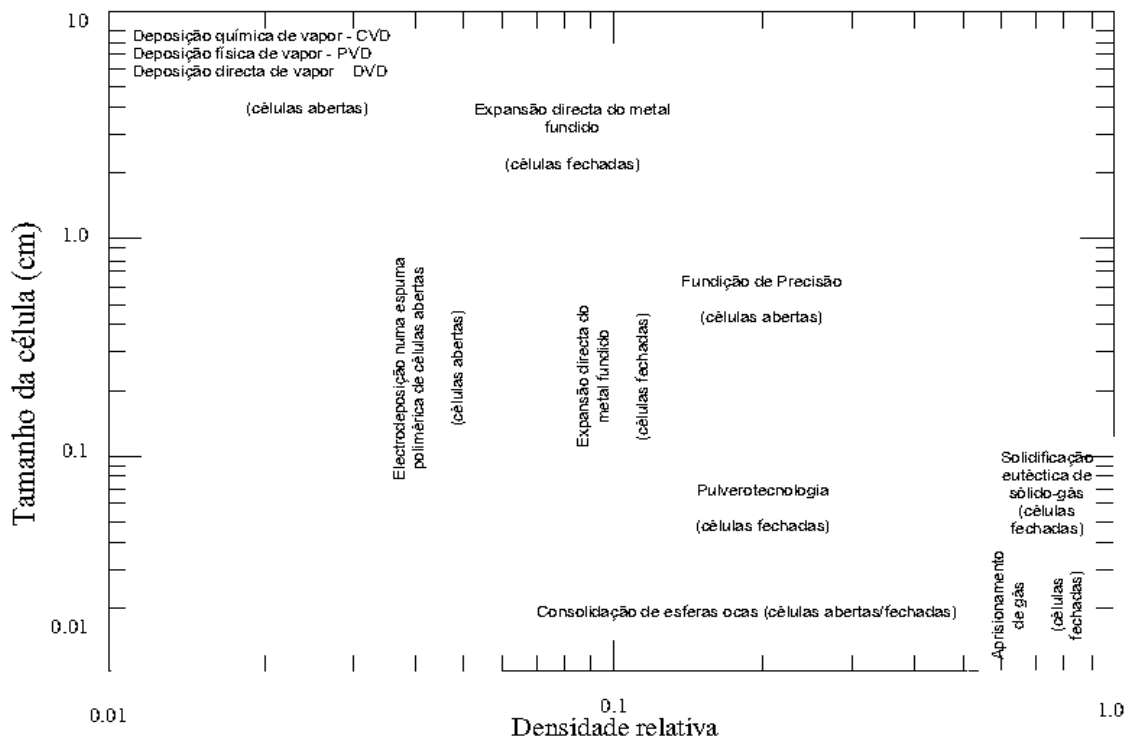
Figura 4 - Processo de fabricação.



Fonte: Adaptado de Curran et al. (2003)

Dependendo do processo usado, podem-se obter diferentes estruturas e várias densidades, conforme a Figura 5 (ASHBY, 2000):

Figura 5 - Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de produção.



Fonte: Ashby (2000).

Dentro deste escopo de seleção e utilizações de materiais as principais aplicações das espumas metálicas estão relacionadas, sobretudo com a sua estrutura celular - aberta ou fechada. Em aplicações estruturais são geralmente usadas espumas metálicas de porosidade fechada, sendo aplicadas principalmente nas indústrias de transporte, de construção de máquinas e de biomedicina (DUARTE, 2005).

### 3.2.1 Produção de Espumas Metálicas a Partir do Metal Fundido

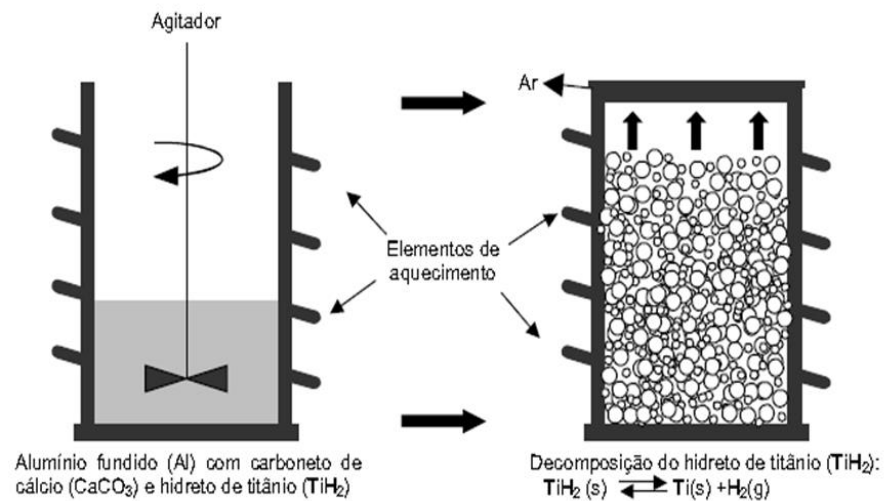
Neste processo pode ser injetado gás diretamente no interior do metal fundido ou adicionar o agente expensor, o qual irá se decompor termicamente liberando o gás (GIBSON, 1977).

#### I) Expansão Direta do Metal Fundido

Neste processo, demonstrado na Figura 6, obtêm-se espumas metálicas por injeção de gás no interior do metal fundido ou adicionando um agente expensor, o qual sofrerá decomposição térmica liberando gás. Este gás pode atingir rapidamente a superfície

o líquido, para evitar isto, são adicionados pós cerâmicos finos, sendo assim, a viscosidade do material poderá ser controlada, controlando também a velocidade da saída do gás (VERRAN, 2005).

Figura 6 - Processo de espumagem.

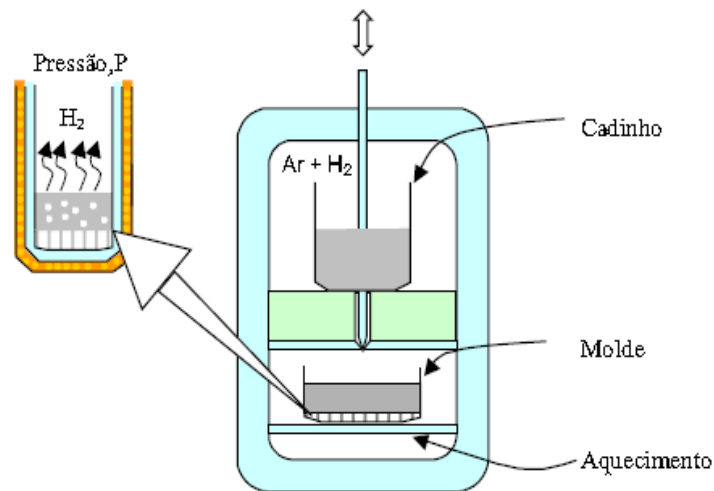


Fonte: Verran (2005)

## II) Solidificação Eutética de Sólido-Gás

O processo de solidificação eutética de sólido-gás, demonstrado na Figura 7, consiste na fusão do metal numa atmosfera de hidrogênio, sendo arrefecida através do ponto eutético.

Figura 7 - Solidificação eutética de sólido-gás.



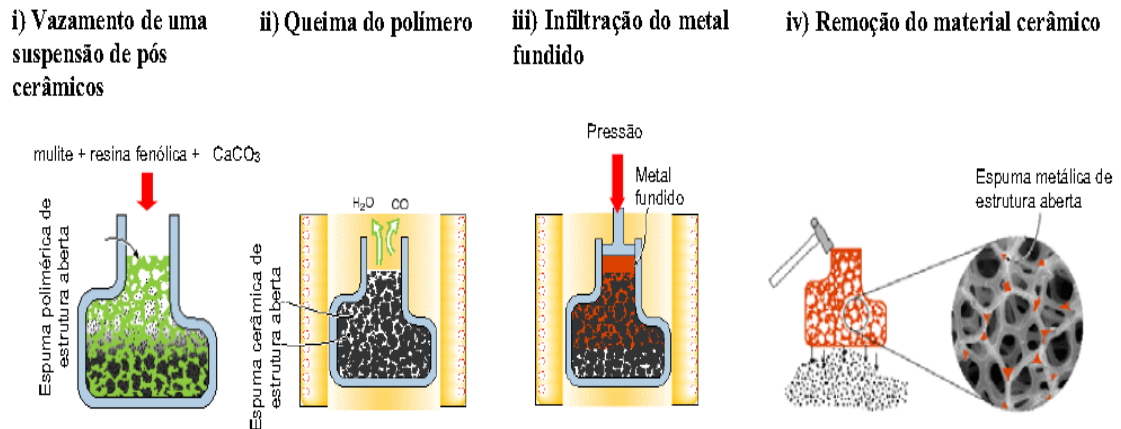
Fonte: Bell (2009).

Após a difusão do hidrogênio gasoso no metal líquido ocorre a solidificação e nucleação dos poros. Este processo permite a obtenção de materiais porosos com uma estrutura celular uniforme através da manipulação da temperatura e da pressão, podendo produzir uma porosidade graduada ou um sólido alternativo com camadas porosas alternadas (KLAVZAR, 2015).

### III) Fundição de Precisão

Neste processo, demonstrado na Figura 8, utiliza-se uma espuma polimérica, sendo que a estrutura final metálica deve apresentar a mesma geometria e porosidade. A espuma polimérica é preenchida por uma suspensão de um material resistente ao calor, em seguida a mistura é seca e a espuma polimérica é removida por simples aquecimento, resultando em uma espuma cerâmica. O metal líquido é vazado para o interior da espuma cerâmica e, após o material cerâmico é retirado, obtendo a espuma metálica final (KLAVZAR, 2015).

Figura 8 - Solidificação eutética de sólido-gás.

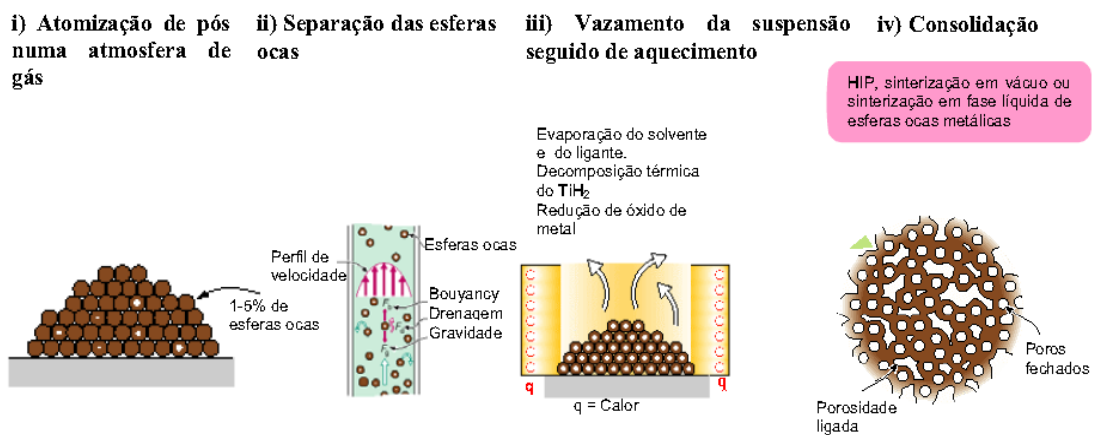


Fonte: Klavzar (2015).

#### IV) Espumas Sintéticas Usando Enchimentos Metálicos

Material de porosidade leve pode ser produzido através do vazamento de metal fundido para o interior de grânulos ocios de baixa densidade, segundo o processo apresentado na Figura 9. A condutividade térmica dos grânulos ocios é baixa, não perturbando o escoamento do metal fundido. Porém, devido à elevada tensão superficial do fundente, o molhamento dos grânulos se torna difícil, podendo não preencher totalmente os interstícios entre os grânulos, sendo assim, é feito um vácuo para facilitar a infiltração do fundido (GATAMORTA, 2009).

Figura 9 - Processo de fabrico de espumas sintéticas.



Fonte: Gatamorta (2009).

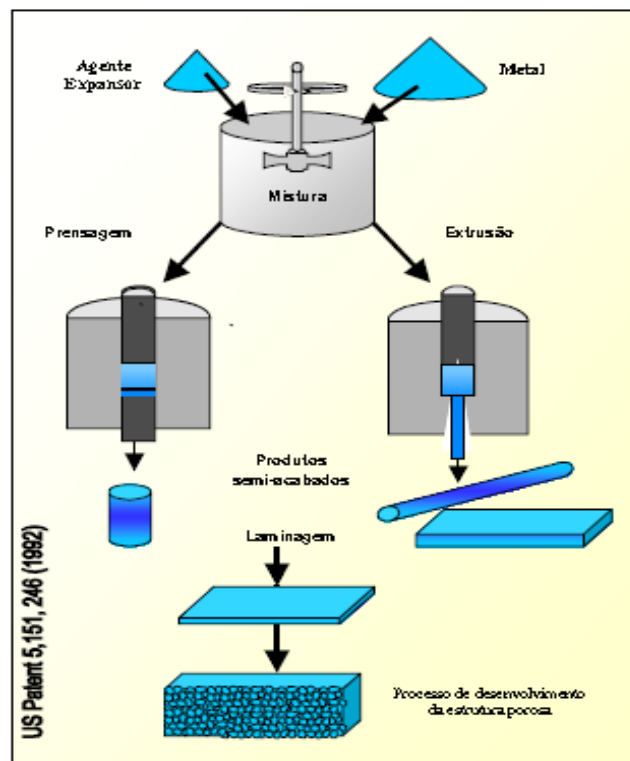
### 3.2.2 Produção de Espumas Metálicas a Partir de Pós

As espumas metálicas podem ser produzidas a partir de pós metálicos por meio de pulverotecnologia, pelo método de aprisionamento de gás ou sinterização (BANHART, 2005).

#### I) Pulverotecnologia

O processo, demonstrado na Figura 10, consiste na compactação a quente de uma mistura de pós metálicos e de agente expensor, obtendo no final o compactado a verde. A compactação pode ser por prensagem uniaxial, prensagem isostática e extrusão, os produtos semi acabados podem ainda ser laminados. Segue-se para a etapa de expansão, onde o compactado a verde é submetido a um aquecimento acima da temperatura de fusão do metal. As espumas resultantes deste processo apresentam estrutura porosa fechada com uma superfície densa, consequentemente, as propriedades mecânicas são aprimoradas (BANHART, 2005).

Figura 10 - Processo de Pulverotecnologia.



Fonte: Banhartl (2005).

## II) Sinterização

A sinterização é uma etapa do processo de metalurgia do pó em que pós compactados, recebem tratamento térmico com a temperatura de processamento menor que a sua temperatura de fusão, onde se controla tempo de permanência, velocidade de resfriamento/aquecimento e atmosfera. Este processo altera a estrutura microscópica do elemento base, devido a um ou mais métodos chamados “mecanismos de transporte”. Durante o processo ocorrem várias reações no estado sólido do elemento que são ativadas termicamente. Algumas podem ocorrer espontaneamente quando a base atinge uma temperatura determinada (BANHART; SEELIGER, 2000).

A compactação convencional pode ser realizada em prensas mecânicas ou hidráulicas. Uma quantidade predeterminada de pó é colocada numa cavidade formada pela matriz e macho, e é então compactada por uma série de deslocamentos dos punções superiores e inferiores, matriz e macho, à temperatura ambiente (RAMOS; GADINO, 2013).

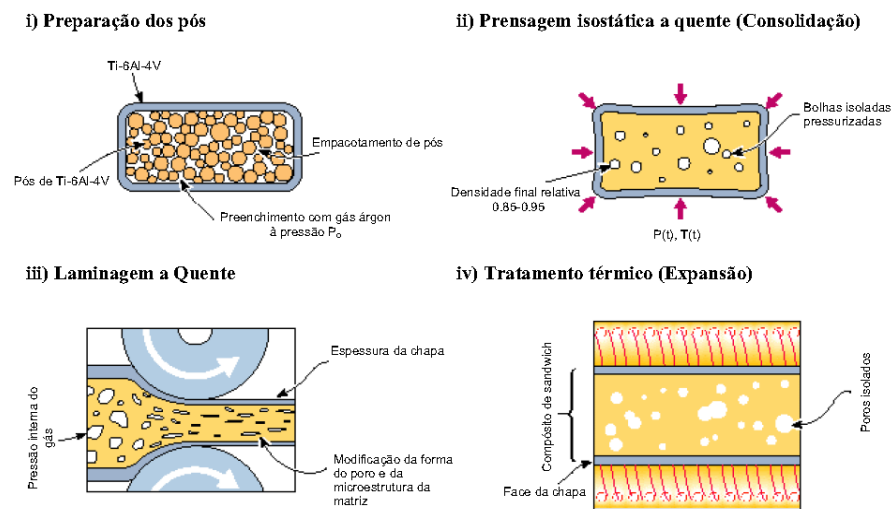
Em diversos casos, a temperatura de sinterização é suficientemente alta para fundir um ou mais componentes do material, caracterizando a chamada sinterização com fase líquida. Sob o ponto de vista de economia e funcionalidade do processo, o desejável é ter o produto sinterizado acabado após esta operação. Entretanto, quando certas características físicas e dimensionais não são atingidas, pode-se promover operações subsequentes de recompressão, resinterização, infiltração com metais de mais baixo ponto de fusão, etc. Os efeitos da sinterização sobre as propriedades do produto final são muito importantes e seu conhecimento útil na sua correta aplicação funcional. A sinterização é comumente processada em fornos contínuos, caracterizados por três zonas de operação: pré-aquecimento, manutenção e resfriamento (BANHART; SEELIGER, 2000).

A sinterização é um dos métodos mais utilizado para produção de materiais porosos de células abertas. A densidade relativa varia entre 40 a 60% da densidade teórica (LEFEBVRE; BANHART; DUNAND, 2008).

### III) Aprisionamento de Gás

Neste processo, demonstrado na Figura 11, não se utiliza agente expensor, o gás é aprisionado na matriz metálica durante a compactação de pós metálicos.

Figura 11 - Processo de aprisionamento de gás para espuma porosa de titânio.



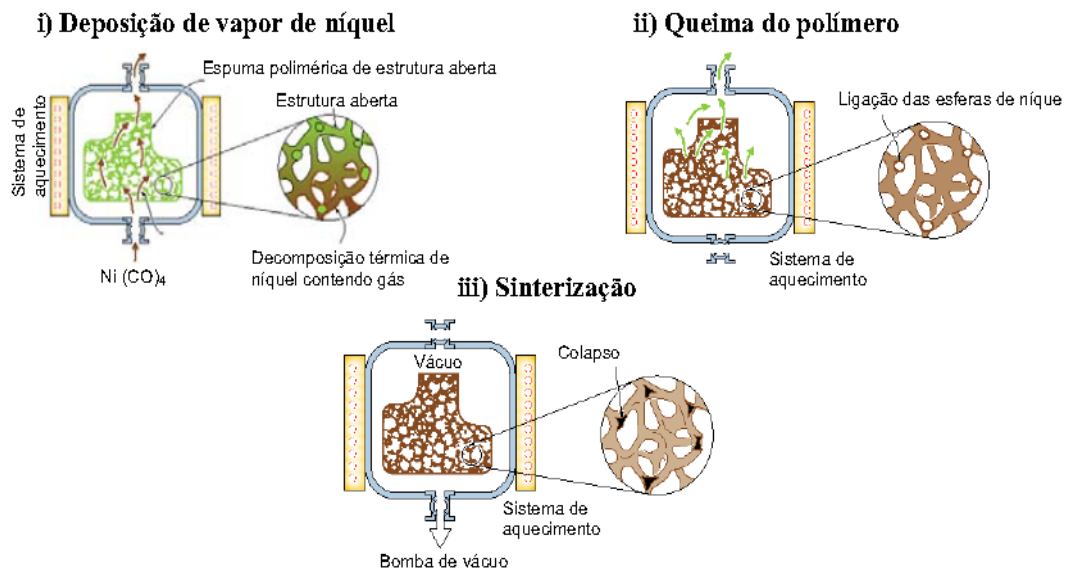
Fonte: Ashby (2000).

O aquecimento do material origina a expansão do metal devido à pressão interna criada pelo gás aprisionado (BANHART; SEELIGER, 2000).

#### 3.2.3 Produção de Espuma Metálica a Partir de Partículas Ionizadas

Este processo pode ser feito por CVD (processos químicos a vapor) ou PVD (processos físicos a vapor). Como exemplo, pode ser citada a metalização de uma espuma de poliuretano de estrutura aberta, na qual a espuma é revestida por uma camada elétrica condutiva por técnicas de PVD. Por fim, remove-se o substrato de poliuretano por decomposição térmica restando a espuma de níquel no formato da espuma polimérica inicial. A Figura 12 ilustra um processo de obtenção de espuma por eletrodeposição (ASHBY, 2000).

Figura 12 - Obtenção de espuma de níquel através de eletrodeposição.



Fonte: Ashby (2000).

### 3.3 Espuma de Alumínio

A espuma de alumínio é um material metálico, geralmente de poros esféricos fechados, que ocupam de 50% a 90% do volume total e com propriedades mecânicas e físicas, relativamente isotrópicas, com forte dependência de sua densidade, a qual varia geralmente entre  $0,4 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a  $0,8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ, 2008).

Apesar da possibilidade de processo de espumagem de diversos metais, a espuma de alumínio apresenta grande aplicação industrial, principalmente automotiva. A partir da rota da metalurgia do pó, o processo para a obtenção da espuma começa com a mistura do pó de alumínio com um agente espumante, em seguida a mistura é compactada confirmando a inexistência de qualquer poro aberto. Após o material ser compactado obtém-se a espuma. Durante o aquecimento, o gás é formado a partir do agente expensor, formando bolhas na liga fundida resultando em uma estrutura porosa com menor densidade que o compactado verde (RAMAMURTY, 2003).

### 3.3.1 Fatores que Influenciam a Qualidade da Espuma

O processo de produção de espumas de alumínio por compactação e mistura dos pós de alumínio com agente de expansão apresenta custos ainda relativamente elevados, necessitando de melhorias no processo (BANHART; SEELIGER, 2000).

A estrutura das células da espuma quando apresenta tamanho homogêneo e forma esférica melhoram as propriedades mecânicas do composto. A densidade está diretamente ligada às propriedades da matriz, como módulo de elasticidade e resistência da espuma. A velocidade de espumagem deve ser controlada durante o aquecimento, pois uma rápida expansão pode gerar defeitos nas paredes dos poros (RAMAMURTY, 2003).

De acordo com Bonaldi (2012) para se obter espumas de alumínio porosas por meio da metalurgia do pó deve-se seguir alguns parâmetros, descritos a seguir:

- a) devem ser estudados o comportamento de fusão da liga metálica e as características do agente expensor. Após a fusão parcial da liga, o gás do agente expensor é liberado levando a formação de poros esféricos;
- b) o perfil de aquecimento junto com a velocidade de aquecimento determina também a qualidade final. Perfil de temperatura em torno do ponto de fusão do compactado influencia na evolução da espuma;
- c) o uso de material impuro com sujeira ou água adsorvida alteram o processo de compactação, pois os mesmos podem entrar na peça durante a compactação e atuar como núcleos de grandes poros na espuma final, alterando assim resistência do produto acabado.

### 3.3.2 Processo de Fabrico da Espuma de Alumínio Utilizando a Rota da Metalurgia do Pó

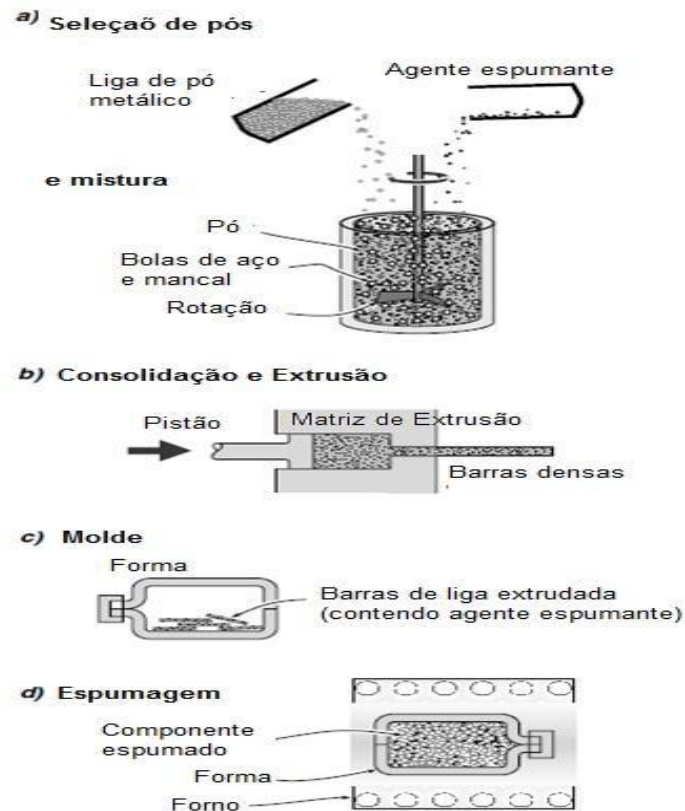
Banhart et al. (2003) descreveram a técnica de obtenção via metalurgia do pó, utilizando na etapa de compactação o processo de extrusão. O processo inicia-se com a mistura de pós de alumínio metálico com um agente espumante, podendo este ser hidreto de titânio, hidreto de zircônia, carbonato de cálcio, entre outros. Após a mistura dos pós, devem-se ser compactados por prensagem, laminação ou extrusão. Esta

compactação deve ser suficiente para que não tenha nenhuma porosidade aberta ou trinca seja formada no molde.

O tamanho, a forma e a distribuição dos grãos são parâmetros importantes na confecção de peças sintetizadas. Os métodos de obtenção que podem ser mecânicos, químicos, físicos e físico-químicos, dependem do que pretende obter de características finais. Sendo um dos métodos físicos mais utilizados, o processo de atomização é o vazamento do metal líquido por uma abertura do forno formando um filete líquido que é atingido por jatos de ar, de gás ou de água produzindo grânulos de tamanhos variados de metal sólido (ASHBY, 2000).

A Figura 13 ilustra o processo de obtenção de espuma via metalurgia do pó, detalhado posteriormente.

Figura 13 - Processo de produção de espuma via metalurgia do pó.



Fonte: Ashby (2000).

Dentre os métodos mecânicos, o mais utilizado para obtenção de pós é a moagem, feita em um equipamento denominado de moinho de bolas, que consiste num tambor rotativo contendo esferas metálicas ou cerâmicas de material resistente ao desgaste. Quando o tambor gira, as esferas chocam-se e atritam-se umas contra as outras, desintegrando gradativamente o material que se encontra no interior do tambor (ASHBY, 2000).

O molde compactado deve ser aquecido acima da temperatura de fusão da liga metálica, ou seja, o processo de espumagem, fase em que se formam as bolhas. Durante o aquecimento o gás evolui a partir do agente expensor formando bolhas, o resultado é uma estrutura altamente porosa. O agente expensor se decompõe criando espaços vazios com uma alta pressão interna. Os poros crescem continuamente durante o aquecimento e pode ser controlado pela deposição do agente expensor e pela taxa de aquecimento (BENOUALI, 2002).

De acordo com Ashby (2000), para que a compactação seja efetiva e as partículas unam-se, é necessária que a densidade final seja maior que 95% da densidade do metal sólido. Ou seja, a densidade do alumínio sólido é  $2700 \text{ Kg/m}^3$ , então a densidade do compactado deve ser no mínimo igual a  $2560 \text{ Kg/m}^3$ .

Bonaldi (2012) obteve espuma metálica a partir da mistura dos pós de alumínio e hidreto de titânio. A vantagem em utilizar a técnica de obtenção de espuma via metalurgia do pó é a possibilidade de obter peças de baixa densidade e próximas da forma final de uso. Para isso é necessário garantir uma distribuição homogênea do agente espumante.

### 3.3.3 Propriedades mecânicas

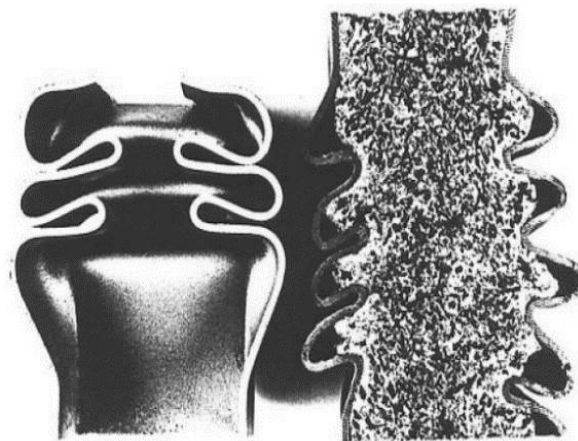
As propriedades mecânicas das espumas metálicas estão interligadas a um complexo sistema macro e micro estrutural. A microestrutura é dependente da composição da liga, as condições de espumagem, resfriamento e a possibilidade de um tratamento térmico pós-espumagem do material. Já a morfologia macroscópica, tamanho do poro, sua morfologia aberta ou fechada ou curvatura das paredes das células, têm uma influência acentuada na resposta mecânica (BANHART, 2005).

O tratamento térmico dos corpos de prova pode variar a força de compressão de espumas de ligas de alumínio em um fator de até três vezes (BANHART, 2005).

Das propriedades mecânicas das espumas metálicas, a resistência ao impacto se destaca na utilização em estruturas de absorção de energia. Por meio do comportamento Tensão x Deformação das espumas pode-se selecionar o metal base, a morfologia (geometria celular) e densidades relativas ideais para cada aplicação (DUARTE, 1999).

Em compressões uniaxiais as estruturas de tubos metálicos com paredes finas são absorvedoras eficazes de energia e a deformação ocorre provocando ondulações, como uma série de anéis regulares com dobras na superfície tubular (Figura 14). Este processo de deformação se difere das espumas metálicas, onde as paredes das células se deformam sob tensão quase constante até que as paredes da célula colidam e se inicie a densificação (BONALDI, 2012).

Figura 14 - Secção do tubo sem e com preenchimento de espuma metálica em

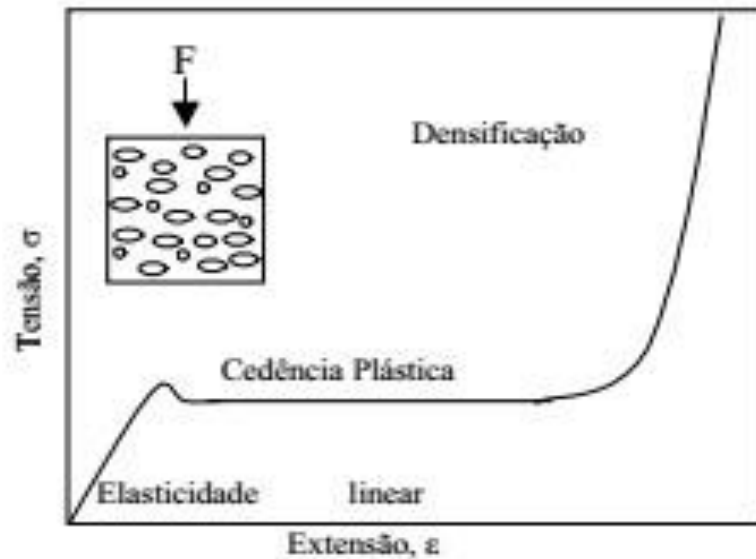


compressão.

Fonte: Ashby (2000).

Os mecanismos de deformação no ensaio de compressão apresentam três fases distintas como mostrado na Figura 15, sendo elas (DUARTE, 2005):

Figura 15 - Curva típica tensão deformação para espuma metálica em compressão.



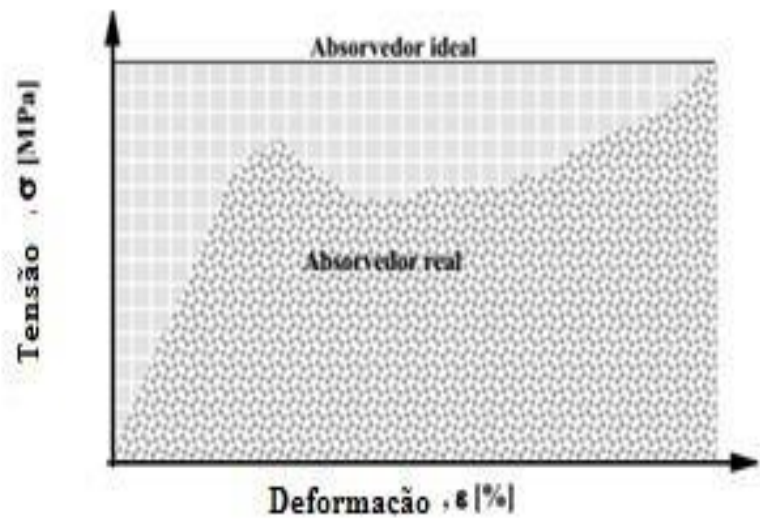
Fonte: Duarte (2005).

1. **Elasticidade Linear:** Fase inicial onde ocorre a flexão das arestas. A deformação se caracteriza ainda como reversível e pode - se calcular seu módulo elástico de Young, o qual está relacionado a força de ligação entre átomos do material e sua densidade relativa.
2. **Patamar ou Platô de Cedência Plástica:** Ocorre devido a diversos mecanismos de deformação, havendo a decomposição das forças de compressão nas paredes celulares, o qual inicia uma instabilidade elástica, causando tensões elevadas e consequentemente deformação plástica.
3. **Densificação:** Fase em que acontece o colapso das paredes celulares, em pontos mais fracos, concentradores de tensões causando a densificação do material e maior proximidade com o seu respectivo sólido ao final desta fase, elevando as tensões de compressão ao máximo (DUARTE, 2005).

#### I) Absorvedores de energia

Segundo Baumeister (1997) a eficiência de um absorvedor de energia, é a comparação entre um componente, material real e um absorvedor “ideal” de energia, sendo este “ideal” representado pela área retangular, onde a tensão máxima é mantida constante durante toda a deformação, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Curva real e ideal de tensão – deformação na compressão.



Fonte: Duarte (2005).

Deste modo, a eficiência de dado absorvedor pode ser calculada como a área da curva do componente real dividida pela área ideal, segundo a relação (equação 1):

$$\eta = \frac{\int_0^s F(s') ds'}{F_{max}(s)s} \quad (1)$$

Onde  $F_{max}(s)$  é a maior força em decorrência da deformação  $s$ .

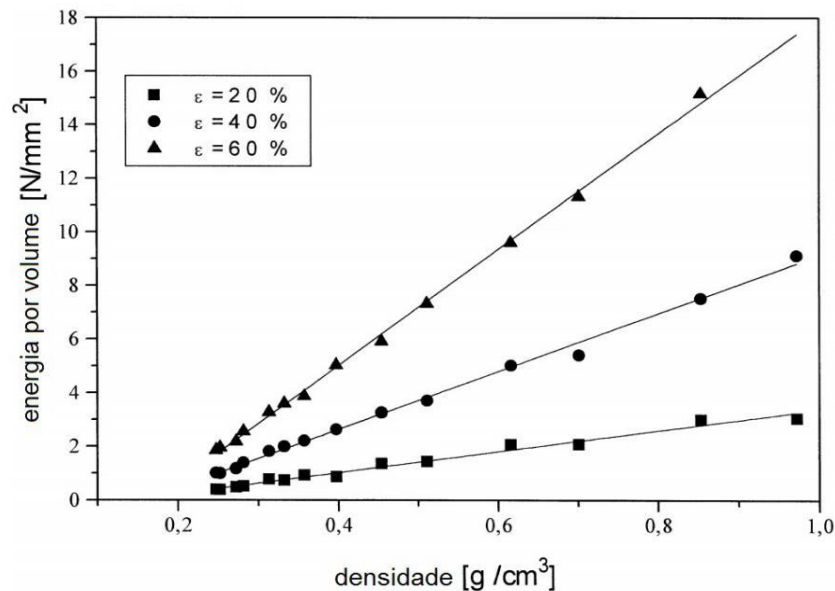
Materiais reais tendem a apresentar tensões de compressão variáveis, deste modo sua eficiência também varia, considerando a natureza da curva apresentada no ensaio de compressão. Dependendo da liga e densidade da espuma de alumínio, a eficiência chegando próxima a 90% nos primeiros 60% da deformação compressiva (patamar de cedência plástica), havendo uma queda brusca na eficiência na fase seguinte de densificação (BAUMMEISTER, 1997).

Desta maneira a eficiência de energia absorvida é um parâmetro importante e permite tirar algumas conclusões sobre as propriedades da espuma metálica, no entanto para a escolha do material mais apropriado para cada aplicação é necessário avaliar a energia de falha de empilhamento (EDE). A EDE é tanto maior quanto menor for a distância entre as discordâncias parciais do metal utilizado na prensagem. Como

essas discordâncias têm seu movimento restrito ao plano da falha, o deslizamento cruzado nesse caso é dificultado e exige condições energéticas favoráveis, como é o caso dos metais com baixa EDE. Esses materiais apresentam distâncias entre discordâncias parciais da ordem de 10 a 20 vezes o comprimento do vetor de Burgers, elevadas se comparadas às distâncias de uma vez observadas nos materiais de alta EDE. Nos metais de alta EDE, a recombinação das discordâncias parciais é efetuada com níveis menores de tensão, facilitando o deslizamento cruzado (BAUMMEISTER, 1997).

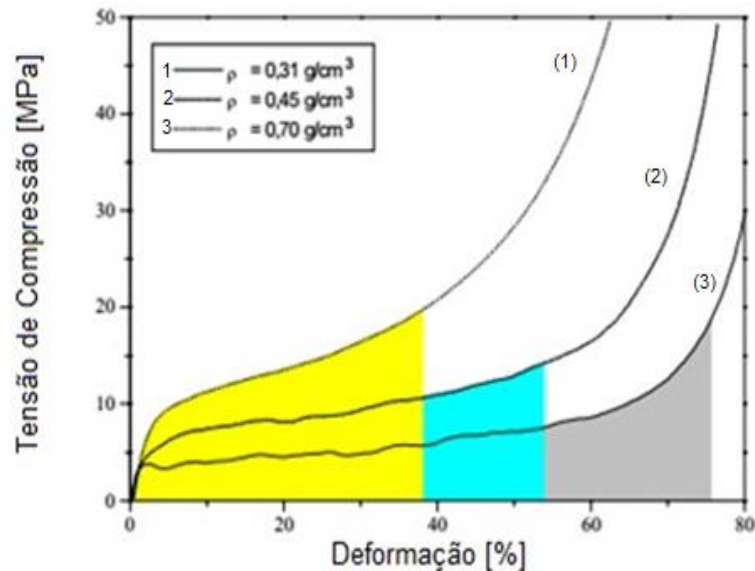
O peso dos componentes estruturais adicionais, para um veículo, por exemplo, é uma preocupação comum e a análise da energia absorvida por unidade de volume em deformações iniciais em função da densidade como pode ser visto na Figura 17 e a tensão na Figura 18, onde nota-se a forte dependência com a densidade ou com a tensão de compressão.

Figura 17 - Energia absorvida por unidade de volume de espumas de liga AlSi12 após deformação de compressão de 20%, 40% e 60%.



Fonte: Baummeister (1997).

Figura 18 - Comportamento de compressão de três espumas de liga AlSi12 com diferentes densidades e áreas coloridas correspondendo a mesma quantidade de energia absorvida.



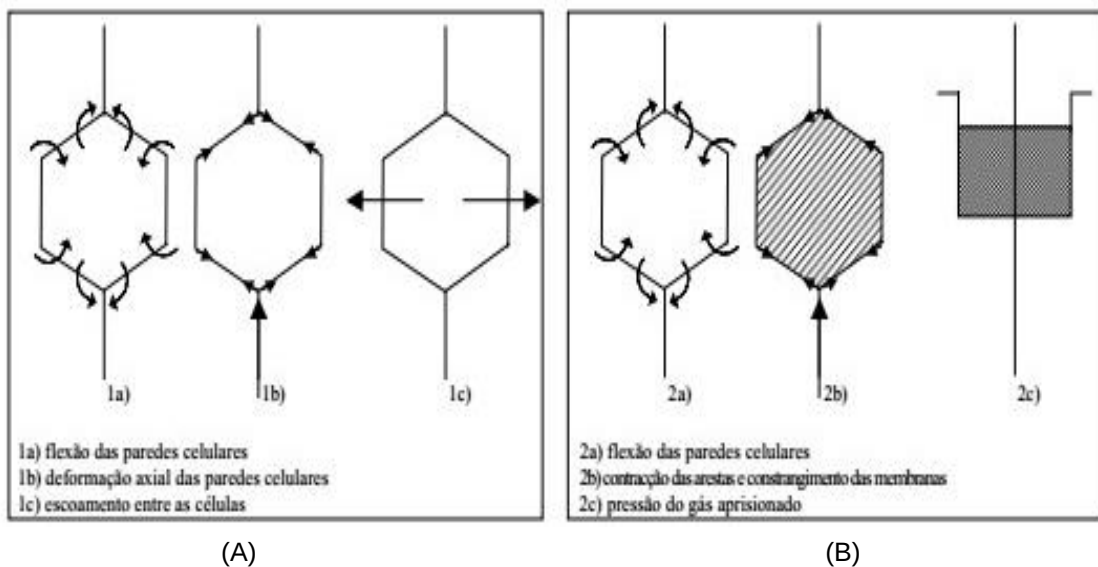
Fonte: Adaptado de Duarte (2005).

Segundo Baummeister, (1997) espumas próximas do ideal devem absorver o máximo de energia com as menores deformações. A Figura 18 apresentada anteriormente ilustra esta idéia, apresentando o comportamento compressivo de três espumas de diferentes densidades e comparando as áreas coloridas, as quais possuem a mesma quantidade de energia absorvida  $W^*$ . A margem direita de cada área nos mostra a deformação necessária para absorver esta quantidade de energia. Analisando a espuma de maior densidade (área cinza) nota-se que a deformação avança após o patamar de tensão constante e alcança valores significativos ao final. Já a espuma de menor densidade (área amarela) apresenta patamar de tensão constante muito reduzido e também atinge altos valores de tensão de compressão final. Por outro lado, a espuma de densidade média apresenta para a mesma energia  $W^*$  absorvida, uma menor tensão de compressão final é atingida e tem-se a predominância do patamar de tensão constante. Deste modo, para uma dada energia de impacto pode-se determinar a melhor espuma que apresente a menor tensão de compressão máxima durante a deformação (BAUMMEISTER,1997).

Na região elástica, os mecanismos de deformação são dependentes da natureza das

células da espuma, como ilustrado na Figura 19, sendo abertas (A) ou fechadas (B). Enquanto nas espumas de estruturas abertas temos a predominância da flexão das paredes celulares da aresta na deformação, nas espumas com poros fechados ocorrem também tração e contração das arestas celulares e contração das membranas que formam as paredes da célula (DUARTE, 2005).

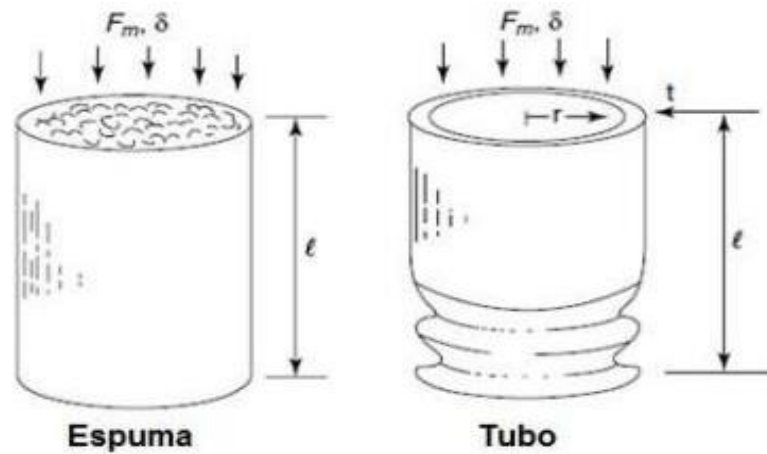
Figura 19 - Fases do mecanismo de deformação para espumas de células abertas (A) e fechadas (B).



Fonte: Duarte (2005).

A Figura 20 mostra as curvas de compressão de um tubo vazio e preenchido por espuma. Tubos de metal com paredes finas são absorvedores de energia eficiente quando esmagados axialmente, ou seja, absorvem quantidade elevada de energia por unidade de volume. Quando a espuma é comprimida, as paredes da célula deformam e continuam se deformando com uma tensão quase constante até que as faces das células colidam. O tubo se comporta de uma maneira diferente: a deformação ocorre em uma série de anéis regulares como dobras até que as faces das dobras entrem em contato (ASHBY, 2000).

Figura 20 - Deformação e absorção de energia da espuma metálica cilíndrica e tubo metálico.



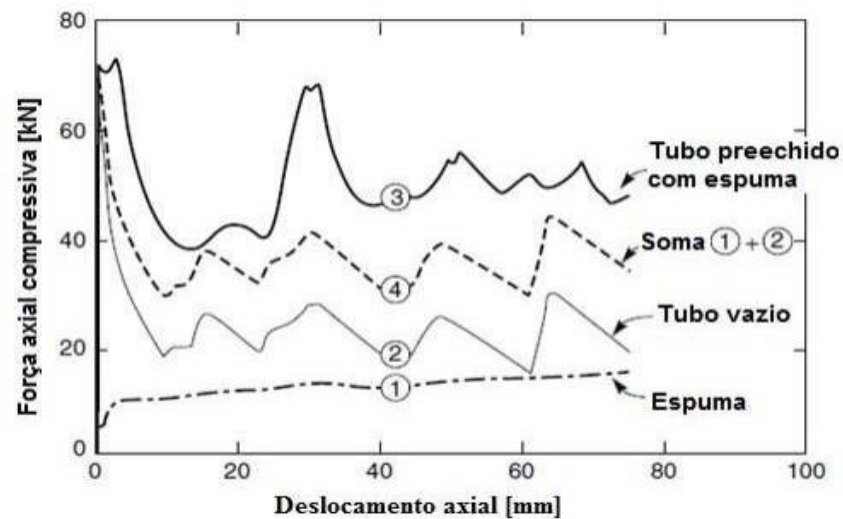
Fonte: Ashby (2000).

Um ganho de eficiência é perceptível quando acontece o preenchimento de espuma em tubos de metal. A figura 21 demonstra a soma de cada uma das cargas transportadas por um tubo e uma espuma, com um dado deslocamento, e compara o resultado médio com a inserção da espuma. Essa melhora sinérgica é descrita pela energia adicional absorvida,  $W_v^{Int}$ , a qual tem origem na interação entre o tubo e espuma (equação 2) (ASHBY, 2000).

$$W_v^{Tubopreenchido} = W_v^{Tubo} + W_v^{Espuma} + W_v^{Int} \quad (2)$$

Isto ocorre porque a espuma fornece suporte interno para a parede do tubo, encurtando o comprimento de onda das dobras.

Figura 21 - Gráfico de Força compressiva por deslocamento axial de uma espuma (1), tubo vazio (2), tubo preenchido (3), soma da curva 1 e 2 (4).



Fonte: Ashby (2000).

Desde que a densidade da espuma seja adequadamente escolhida o aumento da carga de colapso é tal que a energia aumenta em até 30% (ASHBY, 2000).

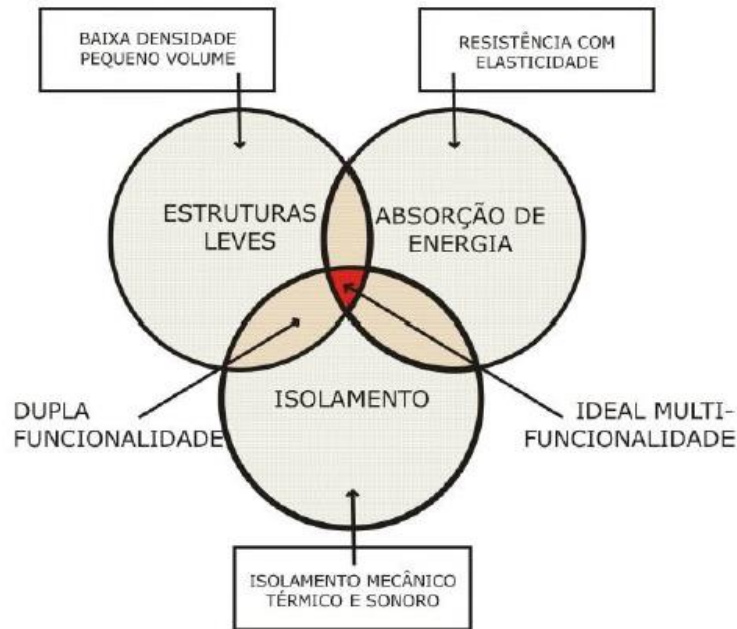
### 3.4 Aplicações da Espuma de Alumínio

#### 3.4.1 Indústria Automotiva

A indústria automotiva é um dos setores mais promissores na utilização de espuma de alumínio. Está em estudo a produção em massa de forma mais econômica para o grande mercado. A indústria busca por tecnologias de veículos mais resistentes e mais leves ao mesmo tempo, além da necessidade de reduzir as emissões acústicas decorrentes do carro. De acordo com Banhart (2008), a solução destes problemas pode ser encontrada nas espumas de alumínio, conforme apresenta a Figura 21.

Assim, as espumas atuam como reforço estrutural, absorvedores de impacto, amortecimento de vibrações, elementos filtrantes, além da redução de peso que está diretamente ligada a melhoria do desempenho e do consumo de combustível (DELBIN, 2006).

Figura 22 - Campos de aplicação de espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.



Fonte: Banhart (2003).

### 3.4.2 Absorção de Energia em Caso de Impacto

Segundo Banhart (2003), junto com a absorção de energia está a exploração da deformação plástica. Pode-se observar que, sob pressão, a espuma possui uma fase inicial elástica, seguida por uma zona de transição, um platô e uma densificação. Segundo Ashby (2000), espumas de alumínio apresentam baixo “*ricochete*” em situações de impacto dinâmico, com índice menor que 3%, isto comprova sua aplicação em casos de absorção de energia em impactos.

### 3.4.3 Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário

Segundo Banhart (2003), as espumas de alumínio são aplicadas na indústria aeronáutica, substituindo painéis sanduíche com melhor performance e menores gastos econômicos. As espumas também estão avaliadas para reforço estrutural de satélites. Na indústria naval é aplicada devido a leveza associada ao custo, como as espumas requerem menor quantidade de material metálico para um mesmo volume final que um material denso, ela é totalmente benéfica ao meio ambiente. Na indústria

ferroviária, devido as mesmas características da espuma, como absorção da energia de impacto, isolamento e rigidez aliada a leveza, as espumas são amplamente aplicadas.

#### 3.4.4 Outras Aplicações

As espumas também possuem propriedades térmicas e acústicas, podendo ser usada como trocadores de calor e até utensílios de cozinha (Figura 23) devido à boa distribuição de calor.

Figura 23 - Chapa sanduíche aplicada em utensílios domésticos.



Fonte: Ramamurty (2003).

### 3.5 Caracterizações de partículas de alumínio e de hidreto de titânio

#### 3.5.1 Difração de Raios X – DRX

Segundo Waseda e Matsubara (2013) esta técnica baseia-se na presença de uma rede cristalina no material e determina espectros característicos a cada fase presente. Consiste na emissão de raios X sobre a amostra variando-se o ângulo de incidência. Essa varredura permite que o detector identifique os ângulos das orientações cristalográficas de cada fase ( $2\theta$ ). Cada ângulo detectado corresponde a uma família de planos cristalográficos, e o conjunto de picos equivale a uma fase presente no material identificando e quantificando a fase cristalina existente.

### 3.5.2 Espectroscopia de Fluorescência de Raios X – EDX

Segundo Cullity (2005), a fluorescência é um fenômeno de emissão de luz, não necessariamente visível a olho nu, por um objeto excitado por alguma fonte de energia. Na fluorescência de raios X, é usada uma fonte de raios X com energia suficiente para ionizar os níveis internos dos átomos por efeito fotoelétrico, e no regresso ao estado fundamental é liberada uma radiação característica de cada elemento. A radiação emitida pela amostra fornece informações sobre sua constituição atômica elementar para elementos de número atômico acima de 13. Os detectores captam informações de fótons e energia, e os dados são quantificados com base nas curvas de calibração do equipamento determinando a concentração dos elementos químicos presentes na amostra.

### 3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Segundo Goodhew (2011) o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é uma ferramenta capaz de gerar imagens topográficas de alta ampliação e resolução. Seu princípio de funcionamento é a transcodificação da energia emitida por um feixe de elétrons de pequeno diâmetro que interage com a superfície da amostra.

O feixe primário de elétrons pode ser gerado por um canhão de elétrons de emissão termoiônica ou por emissão de campo. O mais tradicional é de emissão termoiônica por um filamento de tungstênio. Esse filamento é aquecido pela passagem de uma corrente, e constitui o catodo pelo qual são emitidos elétrons de energia controlada. O feixe primário é então, corrigido e direcionado por lentes eletromagnéticas antes de atingir a amostra, o que permite uma varredura da superfície.

De acordo com Goodhew (2011), a emissão preponderante da interação do feixe é de elétrons secundários (baixa energia) e elétrons retroespalhados (energia variável, gerados por espalhamento elástico), os mais usados pelo MEV na geração de imagens. A medida que os elétrons penetram na matéria, deixam de seguir a orientação original e passam a se difundir aleatoriamente. A penetração depende da tensão de aceleração e do número atômico do material.

Cada um dos sinais gerados pela interação do feixe com a amostra requer um detector adequado. As imagens geradas por elétrons secundários fornecem informações de morfologia, enquanto que as imagens geradas por elétrons retroespalhados mostram diferença de densidade pelo número atômico, permitindo análise de contraste químico, por exemplo. O limite de resolução do equipamento é determinado pelo diâmetro da região da amostra que, excitado pelo feixe primário, emite o sinal considerado (JAKUBOWICZ, 2015).

#### 3.5.4 Distribuição granulométrica a laser – CILAS

A granulometria a laser é uma técnica de análise de tamanho de partícula. Para realizar a análise, uma pequena fração da amostra é agitada em mistura com água. Após uma boa diluição e distribuição pelo equipamento, uma parte da suspensão é submetida a dois feixes de laser. Esses feixes atravessam a suspensão ou colidem com as partículas e são difratados. As partículas maiores desviam o raio incidente de maneira diferente das partículas menores e o espalhamento da luz é detectado e processado. O equipamento utiliza o método *Fraunhofer* que considera todas as partículas esféricas, e fornece dados de distribuição granulométrica do material.

#### 3.5.5 Analisador Termogravimétrico Diferencial - DTG

Na análise termogravimétrica derivada (DTG), a derivada da variação de massa em relação ao tempo ( $dm/dt$ ) é registrada em função da temperatura ou tempo, equação 3.

$$dm/dt = f(T \text{ ou } t) \quad (3)$$

Portanto, neste método são obtidas curvas que correspondem à derivada primeira da curva TG e nos quais os degraus são substituídos por picos que delimitam áreas proporcionais às alterações de massa sofridas pela amostra.

### 3.6 Tecnologia CDIO utilizada no desenvolvimento do molde de compressão

A Iniciativa CDIO (CDIO é um inicialismo de marca registrada para "Conceive, Design, Implement e Operate") é um quadro educacional que enfatiza os fundamentos de

engenharia estabelecidos no contexto de conceber, projetar, implementar e operar sistemas e produtos do mundo real. Ao redor do planeta, os colaboradores da iniciativa adotaram o CDIO como o quadro de seu planejamento curricular e avaliação baseada em resultados (CDIO Initiative, 2017).

O conceito CDIO foi originalmente concebido pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) no final da década de 1990. Recentemente, tornou-se uma organização de colaboração internacional, transformando-se numa plataforma global de aprimoramento e desenvolvimentos de produtos e processos aplicados nas engenharias, e no ensino de engenharia com as melhores universidades de todo o mundo adotando o mesmo conceito para pequenos e/ou grande projetos envolvendo o desenvolvimento de quaisquer novas tecnologias (CDIO Initiative, 2017; PEREIRA, BARRETO E PAZETI, 2017).

De acordo com a CDIO Initiative (2017), atualmente os colaboradores ao redor do mundo mantêm um diálogo sobre o que funciona e o que apresenta dificuldades, e permanentemente continuam refinando o projeto. A partir desta cooperação internacional membros do CDIO colaboram num processo gerenciado por um Conselho composto por membros fundadores e novos associados.

O *establishment* do CDIO consiste em quatro partes: conhecimento técnico e raciocínio; competências pessoais e profissionais; habilidades interpessoais e o Conselho do CDIO (CDIO Initiative, 2017).

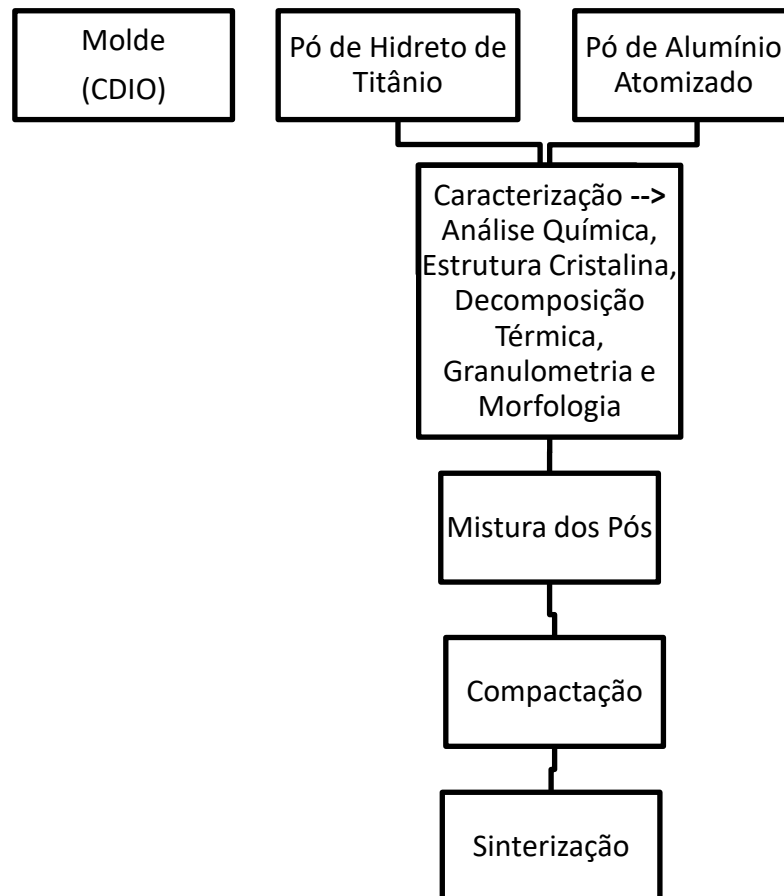
Neste contexto de Conceber – Desenhar – Implementar - Operar, busca-se uma formação holística, com revisões permanentes da grade curricular baseada na reestruturação e interligação das atividades acadêmicas os preceitos ou ideais relevantes do CDIO representando o estado da arte, ou seja, um novo modelo de aprendizagem no ensino de engenharia. A diversificação de aplicações reais com as experiências de desenhar/implementar, incluindo aprendizagens ativas e experimentais, tanto em sala de aula como em espaços de trabalho, laboratórios, etc. Vem produzindo melhorias contínuas do ensino e projetos de engenharia através de monitorização permanente e processos de avaliação internos e externos (CDIO Initiative, 2017; PEREIRA, BARRETO; PAZETI, 2017).

## 4 MATERIAIS E METODOS

### 4.1 Descrição do Trabalho

Para este trabalho, seguiu-se a rota da metalurgia do pó para obtenção da espuma de alumínio via prensagem uniaxial. O método se dá por meio da compactação de um pó metálico contendo partículas do agente espumante uniformemente disperso. Acima da temperatura de fusão da liga este compactado expande e forma a espuma. A figura 24 apresenta todo o processamento das espumas de alumínio.

Figura 24 - Fluxograma de produção das espumas de alumínio.



Fonte: Próprio autor.

## 4.2 Materiais

Utilizou-se dois tipos de pós, um de alumínio em pó atomizado fornecido pela empresa brasileira ALCOA de Poços de Caldas - MG e o outro de hidreto de titânio adquirido da empresa alemã Alfa Aesar. Os dois materiais foram devidamente caracterizados para comprovar a pureza e identificar a temperatura ideal para a liberação do gás no material precursor alumínio. O processo utilizado para a espumagem do alumínio foi via metalurgia do pó.

Para o conjunto do molde, de aço-carbono SAE 1045, utilizou-se o agente desmoldante estearato de zinco.

De acordo com a Ficha de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ ou Material Safety Data Sheet - MSDS) do pó atomizado de alumínio fornecido pela fabricante Alcoa, o material possui uma coloração prateada à cinza e pureza maior que 99,5%, enquanto o hidreto de titânio apresenta pureza maior que 99,0%.

Na lubrificação do molde dos corpos de prova foi inicialmente utilizado a graxa para fins industriais Molykote A-2 da empresa Dow Corning, o qual devido à interação com os particulados da mistura, não se mostrou eficaz, levando ao problema de adesão do alumínio (solda fria) entre as superfícies do corpo e do eixo, dificultando a retirada dos corpos de prova.

Desta forma este lubrificante foi substituído pelo estearato de zinco em pó, o qual é conhecido por suas propriedades de liberação do molde, além de característico efeito hidrofóbico.

## 4.3 Caracterizações físico-química dos pós metálicos

Para caracterização do alumínio puro e do hidreto de titânio utilizou-se as seguintes técnicas:

- a) Difração de raio-X (DRX) para confirmação da estrutura cristalina;

- b) Espectroscopia de fluorescência de raios X (EDX) para análise química, verificando a pureza do material;
- c) Microscópio eletrônico de varredura (MEV) para analisar a morfologia;
- d) Granulômetro a laser (CILAS);
- e) Análise termogravimétrica (DTG) especificamente para o hidreto de titânio a fim de verificar as temperaturas de liberação de gás.

A difração de Raios X foi realizada em um equipamento modelo 7000 XRD da Shimadzu, com tubo de emissão de Cu. Para as amostras estudadas, utilizou-se um ângulo de varredura de 10 a 80° com velocidade de 0,5°/minuto, sendo a corrente e tensão utilizada de 30 mA e 40 KV, respectivamente.

Para o ensaio de fluorescência de Raios X utilizou-se o equipamento modelo 720-Rayny da Shimadzu com um método semi quantitativo num ambiente a vácuo, colimador de 10 mm, tensão do tubo de 50 kV, corrente no tubo de 100  $\mu$ A e tempo de irradiação por 300 s.

A microscopia eletrônica de varredura utilizado foi o modelo VEGA da Tescan com Detector SE (elétrons secundários) para imagens de morfologia. Por serem amostras condutivas, não foi necessária a metalização, utilizou-se uma tensão de carregamento de 20 KV e diâmetro de feixe de elétrons de 12.

A análise granulométrica foi feita no equipamento CILAS modelo 1190 da Acil Weber, o qual possui uma ampla faixa de medida de 0,04  $\mu$ m a 2500  $\mu$ m. O método utilizado foi o *Fraunhofer* no modo líquido com 40 minutos de dispersão sob ultrassom sem agentes dispersantes e valor de obscuração 11.

Para análise térmica foi utilizado um equipamento DTG 60 da Shimadzu em atmosfera de Nitrogênio em um fluxo de 30 mL/minuto a uma rampa de temperatura a 10°C/minuto de 30°C até 780°C em panela de platina sendo o material referência a alumina.

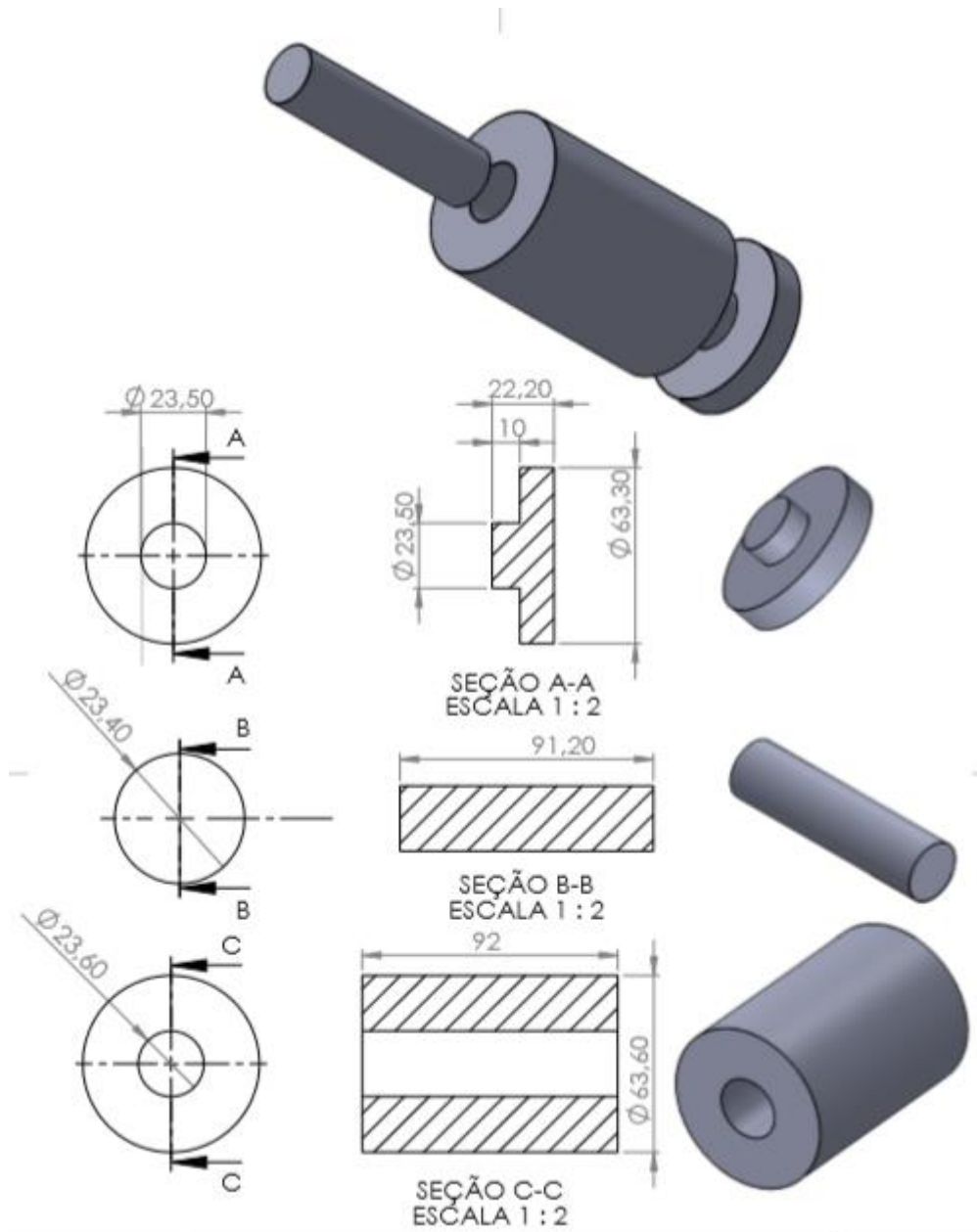
#### **4.4 Confeção do molde de compactação**

A tecnologia utilizada nessa etapa baseou-se nos preceitos da iniciativa CDIO. Este novo molde de compressão foi aprimorado a partir de problemas e necessidades reais que envolveram o projeto inicialmente, assim se buscou conceber uma solução para o problema, seguida do desenho, desenvolvimento e operação, fechando o ciclo em torno de um produto real, com utilidade bem definida para o escopo desta pesquisa.

Para produção dos corpos verdes compactados desenvolveu-se o molde de compressão, para o qual foram utilizadas duas barras de aço SAE 1045 trefilado, com dimensões de 63,60 mm de diâmetro por 92,00 mm de altura para o corpo, 63,60 mm de diâmetro por 22,20 mm de altura para base e 23,40 mm de diâmetro por 91,20 mm para o eixo. Após a usinagem o molde foi tratado termicamente para endurecimento da superfície interna evitando o desgaste e deterioração das paredes do molde.

O projeto de confecção do molde usado para compactação dos pós metálicos, é apresentado na Figuras 25, sendo que as barras de aço foram usinadas nas dimensões, em mm, identificadas.

Figura 25 - Projeto do Molde para compactação de corpos verde.



Fonte: Próprio Autor.

#### 4.4.1 Tratamento Térmico do Molde

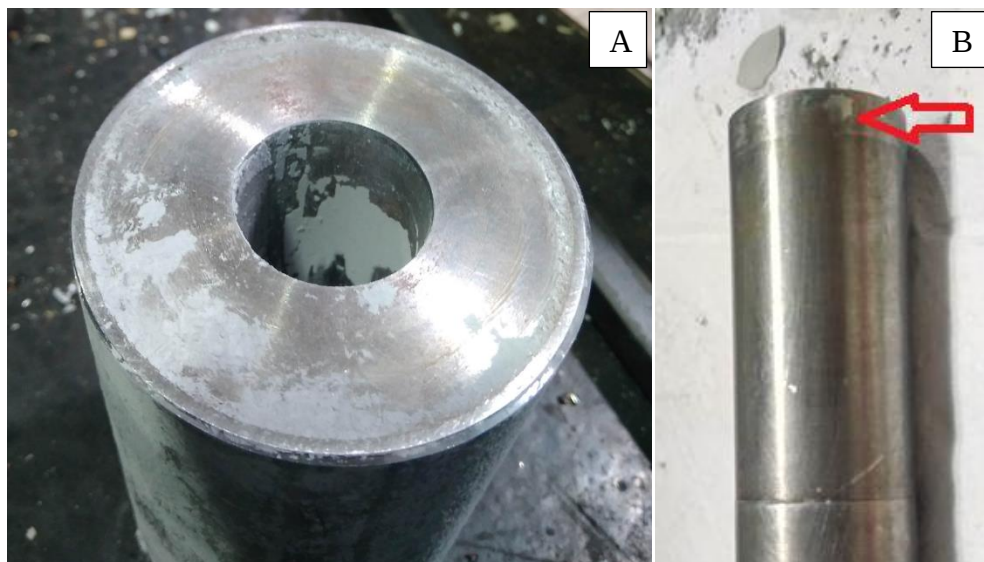
Durante o processo de compactação ocorria constantemente a adesão da mistura de alumínio na superfície do corpo do molde e empenamento/trincas do eixo, como pode ser observado na Figura 26.

Para alcançar a dureza superficial do molde apropriada para o trabalho de

compressão dos corpos verdes na prensa e evitar a adesão do pó de alumínio, foram realizados tratamentos térmicos (têmpera e revenimento) no molde de aço SAE 1045 trefilado.

Primeiramente foi realizado o tratamento térmico de têmpera à 840°C por 45 minutos em uma taxa de aquecimento de 50°C por minuto até a temperatura de austenitização pretendida. Em seguida as peças foram resfriadas em óleo e revenidas a 300°C por 20 minutos.

Figura 26 - Adesão do pó de alumínio no molde, corpo (A) e eixo (B).



Fonte: Próprio Autor.

A cada prensagem se fez necessário a limpeza por lixa de toda a superfície em contato com a mistura de pó a ser compactada, afim de minimizar o efeito indesejado da adesão de alumínio ao eixo e evitar o retorno de peças para o torno de usinagem e eventual aumento da folga entre componentes do conjunto de moldagem.

#### 4.5 Mistura dos pós (Homogeneização)

Trabalhou-se com dois pós metálicos, alumínio e hidreto de titânio, sendo quatro concentrações do agente espumante (hidreto de titânio) diferentes: 0,00%, 0,80%, 1,00%, 1,20% e 1,50%. Para cada amostra adotou-se uma massa de 30 gramas, esta medida foi determinada conforme diâmetro do molde e altura entre as placas da

prensa.

Produziu-se então cinco lotes com três amostras cada lote, totalizando 15 amostras. A tabela 1 representa a separação dos lotes.

Tabela 1 - Lotes produzidos de Alumínio com Hidreto de Titânio.

| <b>Lote</b> | <b>C TiH<sub>2</sub> (%)</b> |
|-------------|------------------------------|
| A           | 0,00                         |
| B           | 0,80                         |
| C           | 1,00                         |
| D           | 1,20                         |
| E           | 1,50                         |

Fonte: Próprio autor.

As misturas foram realizadas pela técnica de quarteamento manual, a qual se aplica exclusivamente a lotes manuseáveis, devendo ser repetido tantas vezes quanto necessário para se obter o peso requerido da amostra.

O processo de quarteamento consistiu em três etapas detalhadas a seguir.

- Delimitação das frações - divisão geométrica do domínio ocupado pelo lote, gerando frações modelo. Esta divisão foi feita por instrumentos de partilha.
- Separação - materialização da partição geométrica, gerando as frações reais.
- Seleção - escolha das frações reais que serão guardadas como subamostras e, por último, a obtenção da amostra real a partir da reunião das subamostras.

#### **4.6 Compactação dos corpos de prova verdes**

Após a realização do processo de homogeneização, as 12 amostras foram levadas a prensa hidráulica de acionamento manual, modelo SL-12/20 da marca SOLAB, possuindo a capacidade de 0 a 20 toneladas de força e curso de 150 mm entre placas, apresentada na Figura 27.

Figura 27 - Prensa Hidráulica SL-12/20 com capacidade máxima de 20 toneladas.



Fonte: Próprio Autor.

A rampa da pressão padronizada é o acionamento direto da prensa até atingir 17 toneladas, o que caracteriza a pressão de 350 MPa nos parâmetros estudados, e mantendo constante esta força de compressão por 5 minutos.

Esta rampa foi adotada após inúmeros testes observando formação de trinca ao final da compactação dos corpos de prova e oxidação dos mesmos e após a sinterização.

#### 4.7 Sinterização

Os corpos de prova verdes, após compactação seguiram para sinterização no forno elétrico resistivo de marca OGA, modelo B300, mostrado na Figura 28. Todas as amostras compactadas tiveram como parâmetros de aquecimento uma taxa de 16°C por minuto até atingir o patamar de temperatura de 710°C, permanecendo nesta temperatura por 8 minutos. Durante o aquecimento manteve-se atmosfera inerte de Argônio para impedir a oxidação do material. As amostras foram resfriadas ao forno, para que evitasse a alteração do formato dos poros ao retirá-las logo após a sinterização, já que estavam em temperatura de amolecimento.

Para valores maiores de tempo (8 minutos) na temperatura do platô e de temperaturas

superiores que 710°C, observou-se o colapso dos poros formados nos corpos de prova, deformação nestes e presença de microporos por toda a estrutura. Isto prejudica a qualidade final da espuma e início da predominância da fase líquida. Contudo, é um resultado que pode ser utilizado conforme a aplicação.

Figura 28 - Forno utilizado na sinterização.



Fonte: Próprio Autor.

#### **4.8 Caracterizações dos corpos verdes compactados e sinterizados**

Para avaliação do processo de compactação, foram conduzidas medições da massa do corpo verde (gramas), o diâmetro médio (mm) e a altura média (mm). Com essas mensurações foi possível o cálculo da seção da área compactada (mm<sup>2</sup>) e seu respectivo volume sólido (mm<sup>3</sup>) chegando à respectiva densidade do corpo verde compactado.

A área de seção também permite calcular a pressão exercida, utilizando-se a força de carregamento da prensa hidráulica e a aceleração da gravidade na cidade de Belo Horizonte.

As mesmas medidas foram adotadas para os corpos de prova sinterizados a fim de se calcular a diferença no volume final produzido, consequentemente a densidade e relacioná-lo com os poros formados.

As medidas de massa foram feitas em uma balança eletrônica com precisão de 0,01g e paquímetro Universal da marca Loyal com resolução de 0,02 mm.

#### 4.9 Corte dos corpos de prova sinterizados

No intuito de análise morfológica dos poros produzidos e das variáveis do processo após sinterização, os corpos de prova foram cortados na cortadora metalográfica de marca AROTEC, modelo Arocor 80 (Figura 29), a qual foi equipada com o disco de corte, marca FORTEL, do tipo Fortel V – não ferrosos (até 15HRC).

Figura 29 - Cortadora metalográfica.



Fonte: Próprio Autor.

##### 4.9.1 Ensaio de Microdureza Vickers

Com o objetivo de verificar a influencia na propriedade mecanica dureza dos corpos de prova realizou-se o ensaio de Microdureza Vickers (HV) em um microdurômetro HMV Shimadzu modelo 2T, com penetrador Vickers, com carga de 0,2 kgf (200 gf) e

tempo de aplicação de 15 segundos. As amostras foram preparadas previamente mediante o lixamento para desbaste, utilizando lixas com granulometria de 120, 240, 320, 400 e 600 mesh e posteriormente polimento com pasta de diamante, em panos de 9  $\mu\text{m}$  e 3  $\mu\text{m}$ . Os procedimentos de ensaio foram de acordo com a norma ABNT NBR NM-ISO 6507-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008).

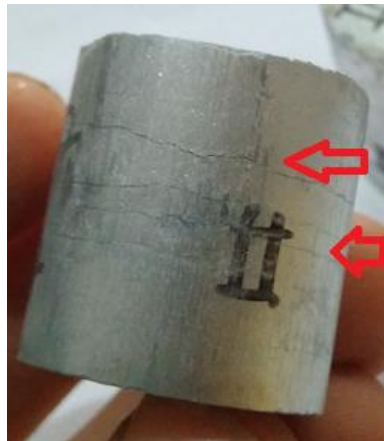
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Ensaios preliminares

Diversos defeitos foram encontrados na compactação da mistura de pós e na produção dos corpos verdes, a Figura 30 destaca as trincas que se prolongam pela circunferência dos corpos. Este tipo de defeito é tipicamente encontrado em pressões de compactação abaixo do necessário, produzindo corpos verdes os quais não espumam devido à liberação prematura do gás hidrogênio pelas trincas geradas e oxidação do alumínio, estas também podem ser geradas por falta de acabamento superficial do molde usado para a compactação.

Os parâmetros de produção foram corrigidos para que produzisse CPs adequados a sinterização e posterior ensaios.

Figura 30 - Trincas geradas no corpo verde.



Fonte: Próprio Autor.

### 5.2 Caracterização dos pós metálicos

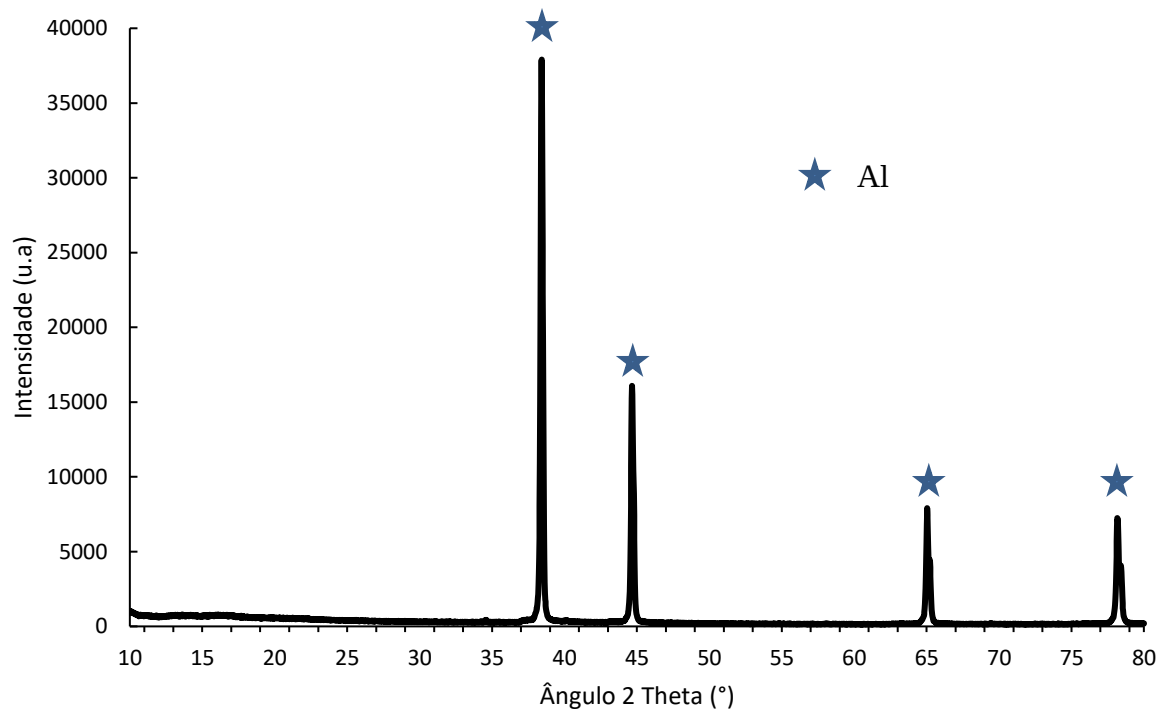
Antes de iniciar a prensagem dos corpos de prova foi necessário a caracterização dos pós metálicos, para garantir a ausência de contaminantes ou óxidos e garantir produção de poros.

### 5.2.1 Difração de Raios X

A difração de Raios X dos pós metálicos é apresentada nas Figura 31 e 32, sendo pó de alumínio e hidreto de titânio, respectivamente.

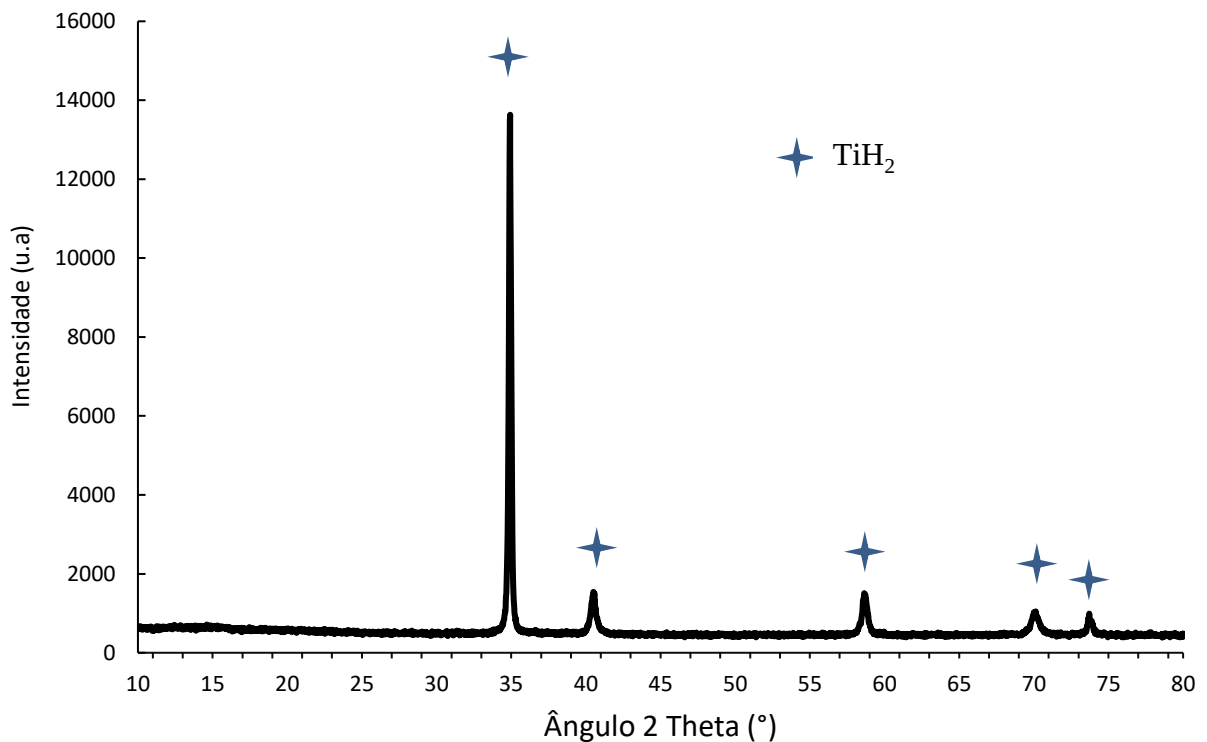
Esta técnica é de extrema importância, pois analisa quantitativamente a presença de óxidos ou contaminantes e isto é fundamental para a produção de corpos de provas com porosidade representativa.

Figura 31 - Difratoograma do pó de alumínio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 - Difratoograma do pó de hidreto de titânio.



Fonte: Próprio autor.

Com o auxílio do software *Xpowder* e das fichas JCPDS (Join Cards Pattern Diffraction Stand) 04-0787 e 25-0982 confirmou-se a estrutura cristalina do material estudado como Alumínio e Hidreto de Titânio, respectivamente.

Pode-se verificar nas Figuras 31 e 32 que todos os ângulos difratados referem-se aos materiais em estudo, ou seja, através desta técnica, conclui-se que não há presença de outros compostos químicos ou contaminantes, ambos apresentando elevado índice de cristalinidade.

### 5.2.2 Fluorescência de Raios X

Os resultados apresentados pela fluorescência de raios X, sendo esta uma análise semi-quantitativa, estão representados na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do alumínio e hidreto de titânio em estudo.

| Alumínio         |      | Hidreto de Titânio |      |
|------------------|------|--------------------|------|
| Al               | >99% | Ti                 | >99% |
| Outros elementos | <1%  | Outros elementos   | <1%  |

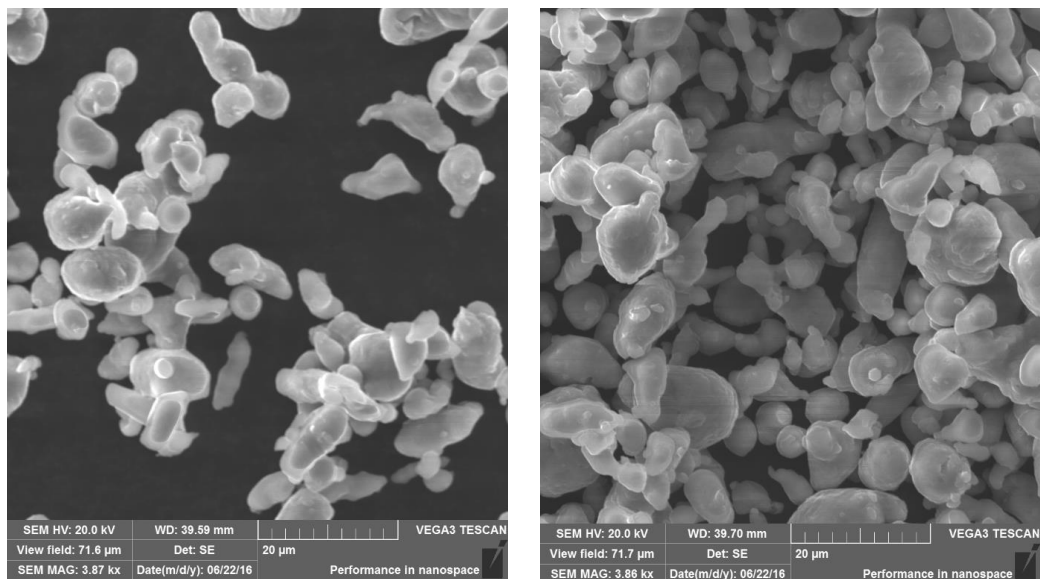
Fonte: Próprio autor.

Conclui-se que o material em estudo apresentou alta pureza, conforme informado pelos *Data Sheet* dos fabricantes. Esta análise complementou o resultado apresentados pelos difratogramas.

### 5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

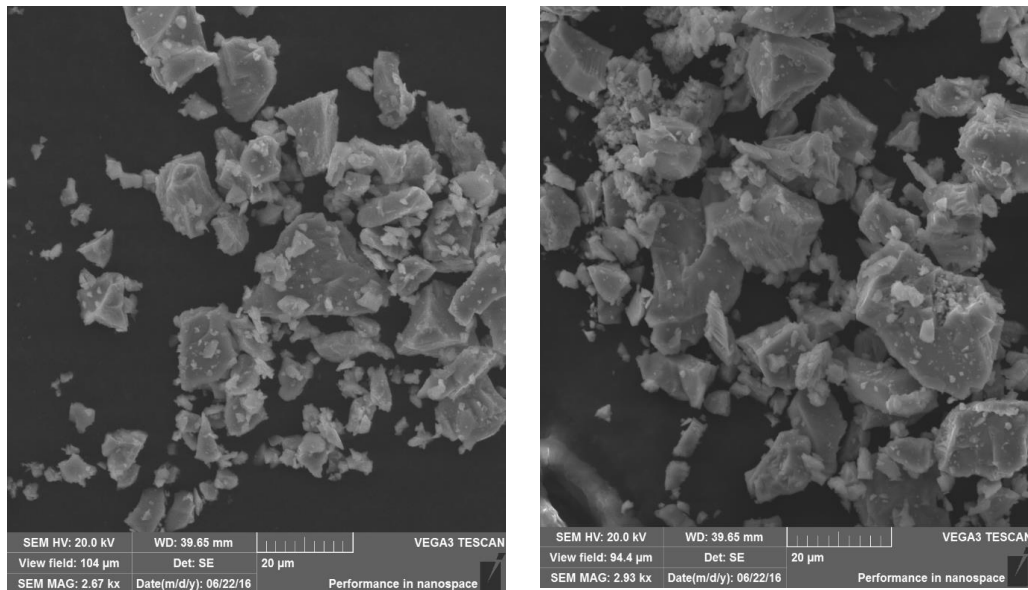
De acordo com a Figura 33 observa-se que as partículas de alumínio apresentam uma forma esférica e todos os grãos estão com a maior dimensão sendo menor que 20µm. A figura 34 mostra a forma retangular e irregular das partículas do hidreto de titânio com granulometria média de 25µm.

Figura 33 - Morfologia das partículas de alumínio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 - Morfologia das partículas de hidreto de titânio.



Fonte: Próprio autor.

#### 5.2.4 Distribuição Granulométrica

A tabela 3 mostra a distribuição granulométrica do pó de alumínio e do pó de hidreto de titânio. Esta técnica confirma as medições verificadas na microscopia eletrônica de varredura.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica do alumínio e do hidreto de titânio.

| Alumínio       |         | Hidreto de Titânio |         |
|----------------|---------|--------------------|---------|
| D10            | 5,36µm  | D10                | 8,24µm  |
| D50            | 10,46µm | D50                | 12,32µm |
| D90            | 22,30µm | D90                | 25,87µm |
| Diâmetro médio | 12,31µm | Diâmetro médio     | 14,54µm |

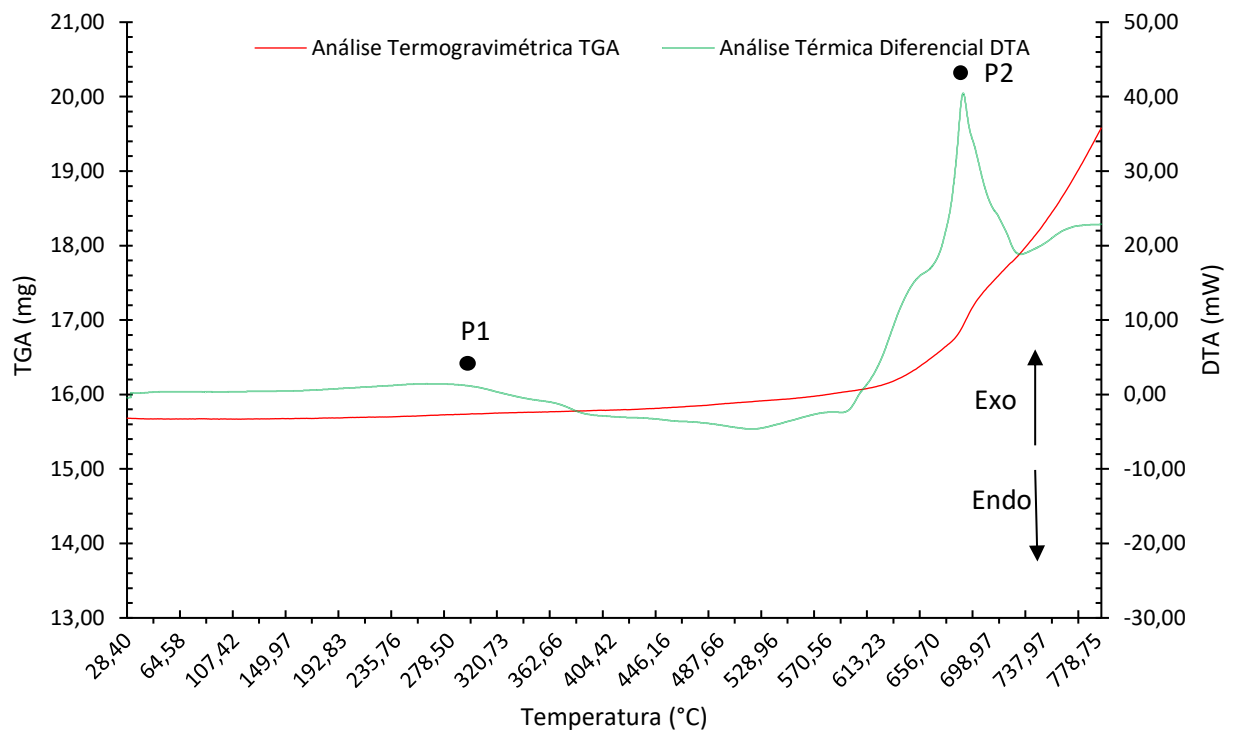
Fonte: Próprio autor.

De acordo com as imagens das Figuras 33 e 34 e a Tabela 3, os pós apresentam diâmetro médio entre 12 e 14µm. Por serem partículas pequenas, a energia de ligação entre elas após a prensagem será alta, o que torna o compactado a verde com densidade próxima a do alumínio sólido. Isto é vantajoso visto que depois de compactado a probabilidade de surgimento de trincas será menor.

### 5.2.5 Análise Termogravimétrica do Hidreto de Titânio

Análise termogravimétrica determina em quais temperaturas, aproximadamente, ocorre a liberação do gás hidrogênio do composto hidreto de titânio. A partir destes dados é possível projetar a rampa de temperatura da sinterização dos corpos de prova prensados. Na figura 35 são apresentados estes dados.

Figura 35 - Análise termogravimétrica do hidreto de titânio.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 35, observa-se um início de uma depressão endotérmica em torno da temperatura de 300°C (P1), a qual é relativa ao início da decomposição térmica de liberação de gás de hidrogênio, ou seja, a partir desta temperatura já inicia a nucleação de poros no corpo de prova que está sendo sinterizado. Em aproximadamente 690°C (P2) observa-se uma reação exotérmica, de acordo com Yan e Tsai (1995), esta depressão refere-se à nitretação do titânio, o que promove um

endurecimento do material sinterizado. Esta nitretação é devida ao ambiente utilizado durante a análise, nitrogênio.

A análise termogravimétrica, TGA, é uma técnica que identifica a variação da massa em função da temperatura e/ou tempo, portanto não foi possível observar a perda de massa referente a liberação do hidrogênio. Este fato se justifica devida a massa atômica do hidrogênio ser extremamente baixa, juntamente com a ocorrência da nitretação do titânio, o que torna desconsiderável a perda de massa relativa a liberação de hidrogênio. Portanto observa-se o aumento de massa do composto analisado a partir de 300°C.

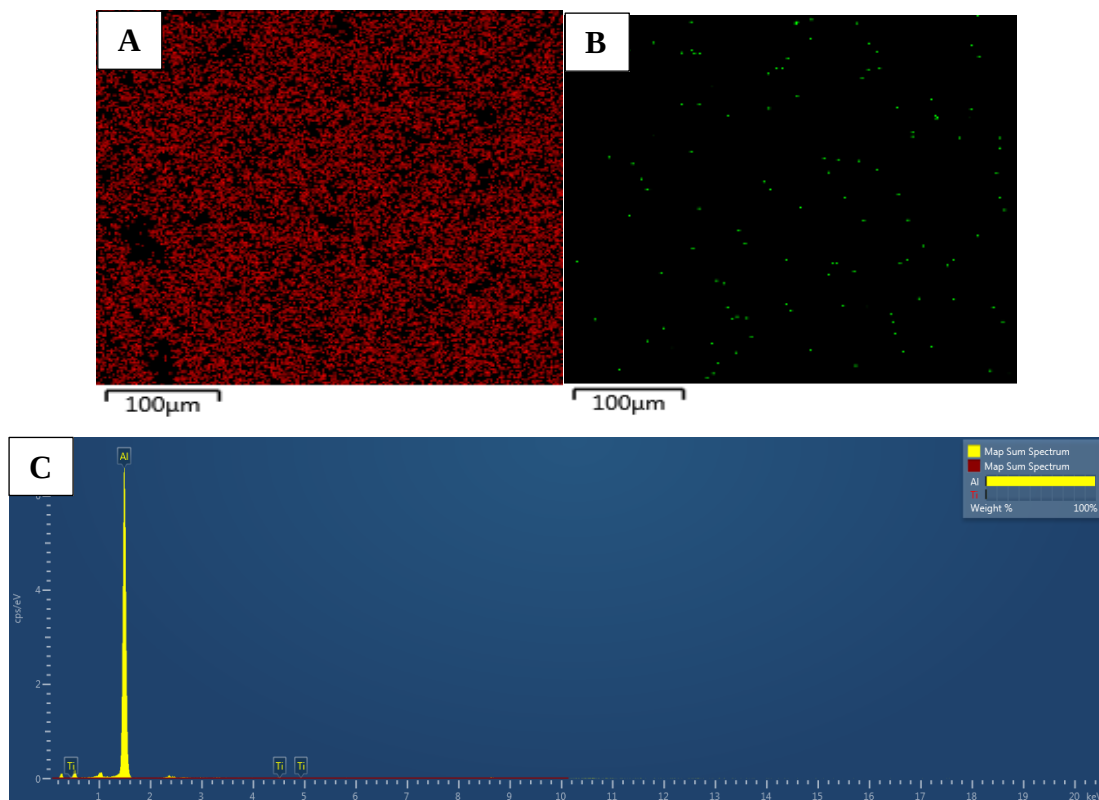
A análise térmica diferencial, DTA, é uma técnica que identifica a variação de entalpia – endotérmica ou exotérmica - em função da temperatura e/ou tempo. A reação endotérmica iniciada em P1 indica ser da liberação do gás hidrogênio, enquanto a reação exotérmica em P2 é devida a nitretação do titânio.

#### 5.2.6 Homogeneização do agente expensor

A fim de se comprovar a homogeneização do agente expensor, hidreto de titânio, após o quarteamento manual fez-se um mapeamento químico na mistura através do detector EDS, espectroscopia de Raios X por dispersão em energia, acoplado ao MEV.

A figura 36 demonstra esta mistura homogênea dos elementos químicos, onde a imagem A representa em vermelho a forte presença de alumínio e a imagem B representa em verde a presença, em baixa concentração, de titânio. A imagem C apresenta o espectro dos elementos presentes na mistura dos pós, confirmando a presença de somente alumínio e titânio.

Figura 36 - Análise EDS da mistura dos pós. A) Concentração de alumínio, vermelho. B) Concentração de titânio, verde. C) Espectro de elementos.



Fonte: Próprio autor.

Conforme a figura 36 aprova-se o método de quarteamento realizado, pois verifica-se a distribuição homogênea do titânio na matriz de alumínio, através na boa distribuição dos pontos verdes na imagem B.

### 5.3 Análise dos corpos de prova verde

Na produção de amostras anteriores aos lotes determinados no estudo, verificou-se excesso de umidade no pó de alumínio, o qual provocou maiores quantidades de trincas na superfície de corpos verdes previamente compactados. Como tentativa de solução, secou-se a mistura de pós por duas horas sob a temperatura de 110°C, antes da compactação, afim de se retirar a umidade, observando um limite para não ocorrer início da liberação do gás hidrogênio (~300°C). Após constatar sucesso na pré secagem, adotou-se este padrão de secagem em todos os lotes estudados.

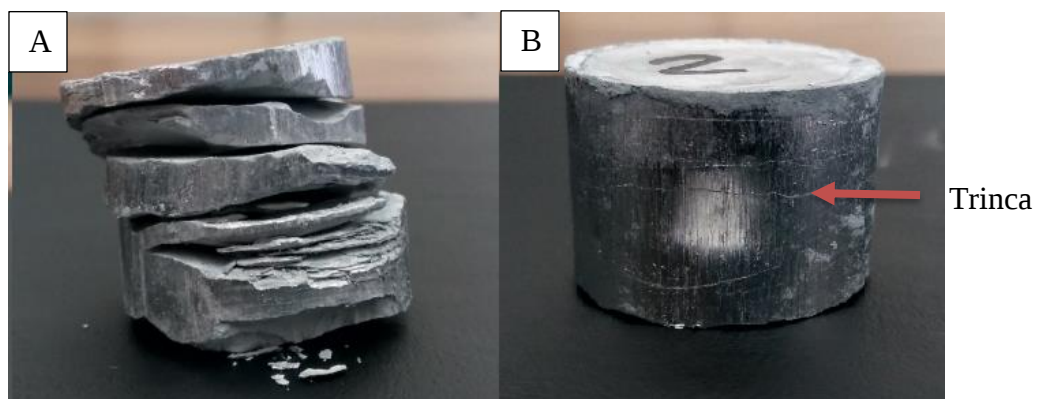
Algumas amostras apresentaram excesso de trincas ou escamaram-se após a

prensagem, constatou-se que o problema era o molde, podendo ser empenamento do eixo ao retirar o corpo de prova verde e/ou acúmulo de pós, provenientes da prensagem anterior, na parede interior do molde, fazendo com que o corpo de prova agarrasse e ao ser retirado era descamado. Devido a isto adotou-se a limpeza no molde após cada prensagem.

A figura 37 apresenta os defeitos provocados pelo excesso de umidade, empenamento do eixo do molde e/ou acúmulo de pós na parede interior do molde. Sendo A o corpo de prova descamado e B o corpo de prova trincado pelo excesso de umidade.

Aconteceram muitos destes defeitos até que determinasse os parâmetros cruciais: preparação correta do molde, homogeneização dos pós, pressão da prensagem ideal, massa do corpo de prova conforme a altura do molde, tempo de prensagem, rampa de temperatura de sinterização e atmosfera de sinterização.

Figura 37 - Corpos de prova verde defeituosos.



Fonte: Próprio Autor.

Segundo Ashby (2000), para que a compactação seja efetiva e as partículas unam-se é necessária que a densidade final seja maior que 95% da densidade do metal sólido. Ou seja, a densidade do alumínio sólido é  $2,70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , então a densidade do compactado deve ser no mínimo igual a  $2,56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Um dos problemas detectados após a prensagem foi que em pressões abaixo de 16 toneladas no molde de trabalho os corpos de prova apresentavam muitas trincas e

sua densidade ficava abaixo de 95% da densidade do alumínio.

Desta forma, os corpos verdes que alcançaram ou que se aproximaram deste patamar de densidade relativa foram selecionados e após a sinterização, 3 destes, foram selecionados para corte e análise. A Tabela 4 apresenta todos os dados coletados dos 4 lotes produzidos.

Na figura 38 são apresentados alguns dos corpos de prova verde após prensagem seguindo os parâmetros determinados na tabela 4.

Figura 38 - Corpos de prova verde prensados.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 4 - Características das amostras prensadas dos Lotes A, B, C, D e E.

| Lote  | Concentração<br>(% $TiH_2$ ) | CP | Massa CP<br>(g) | Densidade<br>(g/cm³) | Densidade<br>Relativa | Pressão<br>(MPa) |
|-------|------------------------------|----|-----------------|----------------------|-----------------------|------------------|
| A     | 0,00                         | A1 | 30,05           | 2,69                 | 0,99                  | 350,25           |
|       |                              | A2 | 30,12           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
|       |                              | A3 | 30,17           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
| Média |                              |    | 30,11           | 2,69                 | 0,99                  | 350,08           |
| B     | 0,80                         | B1 | 30,05           | 2,68                 | 0,99                  | 350,20           |
|       |                              | B2 | 30,25           | 2,69                 | 0,99                  | 349,50           |
|       |                              | B3 | 30,12           | 2,69                 | 0,99                  | 350,30           |
| Média |                              |    | 30,14           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
| C     | 1,00                         | C1 | 30,18           | 2,68                 | 0,99                  | 350,20           |
|       |                              | C2 | 30,03           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
|       |                              | C3 | 30,09           | 2,69                 | 0,99                  | 350,10           |
| Média |                              |    | 30,10           | 2,69                 | 0,99                  | 350,10           |
| D     | 1,20                         | D1 | 30,05           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
|       |                              | D2 | 30,32           | 2,69                 | 0,99                  | 349,80           |
|       |                              | D3 | 30,22           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |
| Média |                              |    | 30,20           | 2,69                 | 0,99                  | 349,93           |
| E     | 1,50                         | E1 | 30,12           | 2,68                 | 0,99                  | 350,20           |
|       |                              | E2 | 30,01           | 2,69                 | 0,99                  | 349,50           |
|       |                              | E3 | 30,25           | 2,69                 | 0,99                  | 350,30           |
| Média |                              |    | 30,13           | 2,69                 | 0,99                  | 350,00           |

Fonte: Próprio Autor.

De acordo com a tabela 4 observa-se que a pressão determinada para trabalho foi em média 350,00 MPa, a massa média do corpo de prova foi 30,13 g alcançando uma densidade relativa média de 0,996 g/cm<sup>3</sup>.

Este valor de densidade final, 0,99 g/cm<sup>3</sup>, está acima do limite mínimo exigido para se garantir a compactação efetiva das partículas.

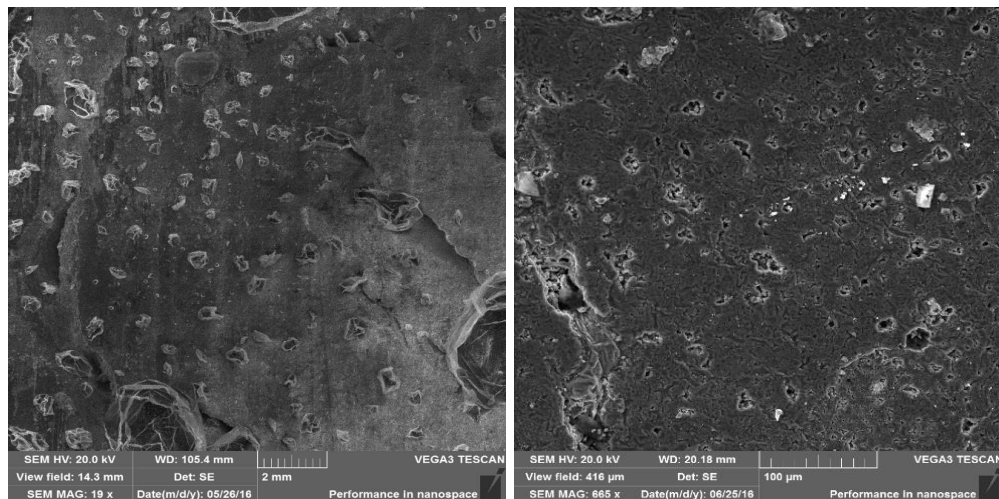
#### 5.4 Início da formação dos poros

O aumento progressivo da temperatura no material precursor origina a formação e crescimento de bolhas no interior da matriz metálica devido à decomposição térmica das partículas de  $TiH_2$ . A fim de verificar o processo de formação da porosidade no

corpo de prova verde, interrompeu-se a sinterização em 400°C e após o resfriamento da peça fez o corte transversal para identificar a nucleação dos poros.

A figura 39 apresenta esta nucleação na seção de corte do corpo de prova sinterizado, onde verifica-se o início da formação dos poros, representados pelos microporos distribuídos homogeneamente. Esta figura confirma a análise termogravimétrica realizada no hidreto de titânio, a qual demonstra que ocorre o início de liberação de hidrogênio em aproximadamente 300°C, ou seja, esperava-se que em 400°C já existissem os microporos.

Figura 39 - Nucleação de poros em corpo de prova sinterizado até 400°C.



Fonte: Próprio Autor.

O hidrogênio existente no interior das bolhas pode ser perdido por difusão e solubilização através das paredes das bolhas formadas para o interior da matriz metálica. Estas perdas são dependentes da taxa de aquecimento, quanto menor a taxa de aquecimento, maiores são as perdas, ou seja, o hidrogênio terá mais tempo para se difundir.

## 5.5 Análise dos corpos de prova sinterizados

Os volumes e densidade dos corpos de prova verde são apresentados na tabela 4, após sinterização, foram medidos e reapresentados na tabela 5. A medição do volume se deu por meio do Princípio de Arquimedes, onde utilizou-se uma proveta graduada

e água Milli-Q, tomando cuidado para não entrar água no corpo de prova sinterizado e alterar a determinação do volume.

Tabela 5 - Aumento percentual do volume das amostras sinterizadas dos Lotes A, B, C, D e E.

| Lote  | Concentração<br>(% $TiH_2$ ) | CP | Aumento<br>Volume (%) | Densidade<br>Final (g/cm³) | Densidade<br>Relativa |
|-------|------------------------------|----|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| A     | 0,00                         | A1 | 0,26                  | 2,69                       | 0,99                  |
|       |                              | A2 | 0,49                  | 2,69                       | 0,99                  |
|       |                              | A3 | 0,43                  | 2,69                       | 0,99                  |
| Média |                              |    | 0,39±0,12             | 2,69±0,00                  | 0,99±0,00             |
| B     | 0,80                         | B1 | 43,28                 | 1,88                       | 0,69                  |
|       |                              | B2 | 43,24                 | 1,88                       | 0,69                  |
|       |                              | B3 | 25,34                 | 2,15                       | 0,79                  |
| Média |                              |    | 37±10                 | 1,97±0,15                  | 0,72±0,06             |
| C     | 1,00                         | C1 | 34,34                 | 2,01                       | 0,74                  |
|       |                              | C2 | 67,93                 | 1,61                       | 0,60                  |
|       |                              | C3 | 67,77                 | 1,61                       | 0,60                  |
| Média |                              |    | 56±19                 | 1,72±0,23                  | 0,65±0,09             |
| D     | 1,20                         | D1 | 79,05                 | 1,51                       | 0,56                  |
|       |                              | D2 | 45,94                 | 1,85                       | 0,69                  |
|       |                              | D3 | 95,30                 | 1,38                       | 0,51                  |
| Média |                              |    | 73±25                 | 1,56±0,24                  | 0,59±0,09             |
| E     | 1,50                         | E1 | 114,86                | 1,26                       | 0,46                  |
|       |                              | E2 | 128,57                | 1,18                       | 0,44                  |
|       |                              | E3 | 135,26                | 1,15                       | 0,43                  |
| Média |                              |    | 126±10                | 1,19±0,06                  | 0,44±0,02             |

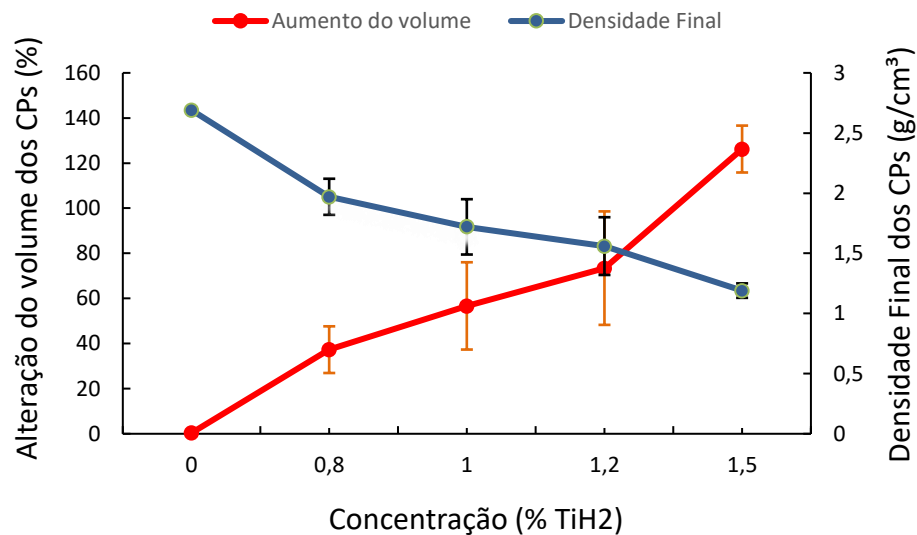
Fonte: Próprio Autor.

Conforme a tabela 5 verifica-se um aumento percentual do volume e redução da densidade conforme o aumento da concentração de hidreto de titânio. Com 0,80% de hidreto de titânio aumentou-se em média 37,29% do volume, com 1,00% aumentou-se 56,68% do volume, com 1,20% aumentou-se 73,43% do volume e com 1,50% aumentou-se 126,23% do volume.

A densidade reduziu 44,23%, em média, para a concentração de 1,50% de hidreto de titânio, chegando a densidade relativa igual a 0,44.

A figura 40 ilustra os dados apresentados na tabela 5, mostrando uma linearidade nos resultados conforme a concentração do agente expensor, ou seja, com o aumento da concentração do agente expensor observa-se que o volume aumenta e a densidade reduz, chegando a 126,23% de aumento no volume e 1,19 g.cm<sup>3</sup> na densidade final.

Figura 40 - Aumento percentual do volume e densidade final dos CPs sinterizados.



Fonte: Próprio Autor.

Após todas as medições de volume e densidade final dos corpos de prova sinterizados, estes foram destinados ao corte transversal a fim de revelar a porosidade formada. Na figura 41 são apresentados alguns exemplos destes corpos de prova para a observação da estrutura formada. A expansão do volume pode ser observada nestes corpos de prova apresentados, alguns ficando com a estrutura exterior maciça e outros com a estrutura totalmente porosa.

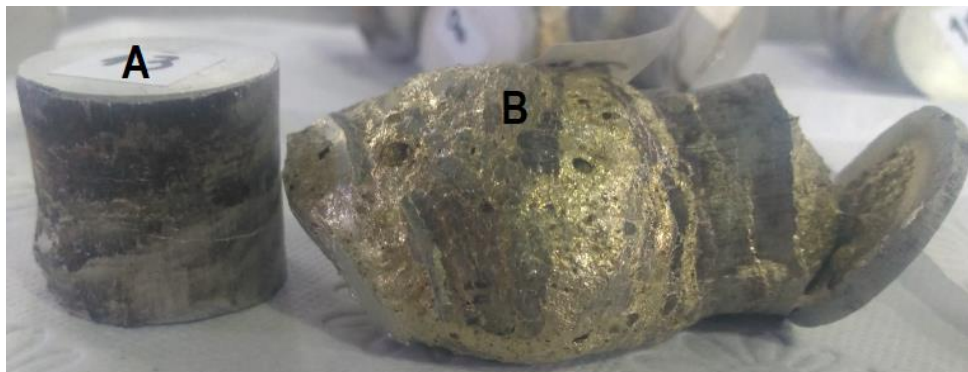
Figura 41 - Corpos de prova após sinterização.



Fonte: Próprio Autor.

Na figura 42 é apresentada a comparação entre um corpo de prova sem adição de agente expensor, A, e com adição de 1,50% de agente expensor, B. Observa-se que é expressivo o aumento percentual do volume na amostra B.

Figura 42 - Corpos de prova sinterizado sem adição de agente expensor, A, e com 1,50% de  $\text{TiH}_2$ .



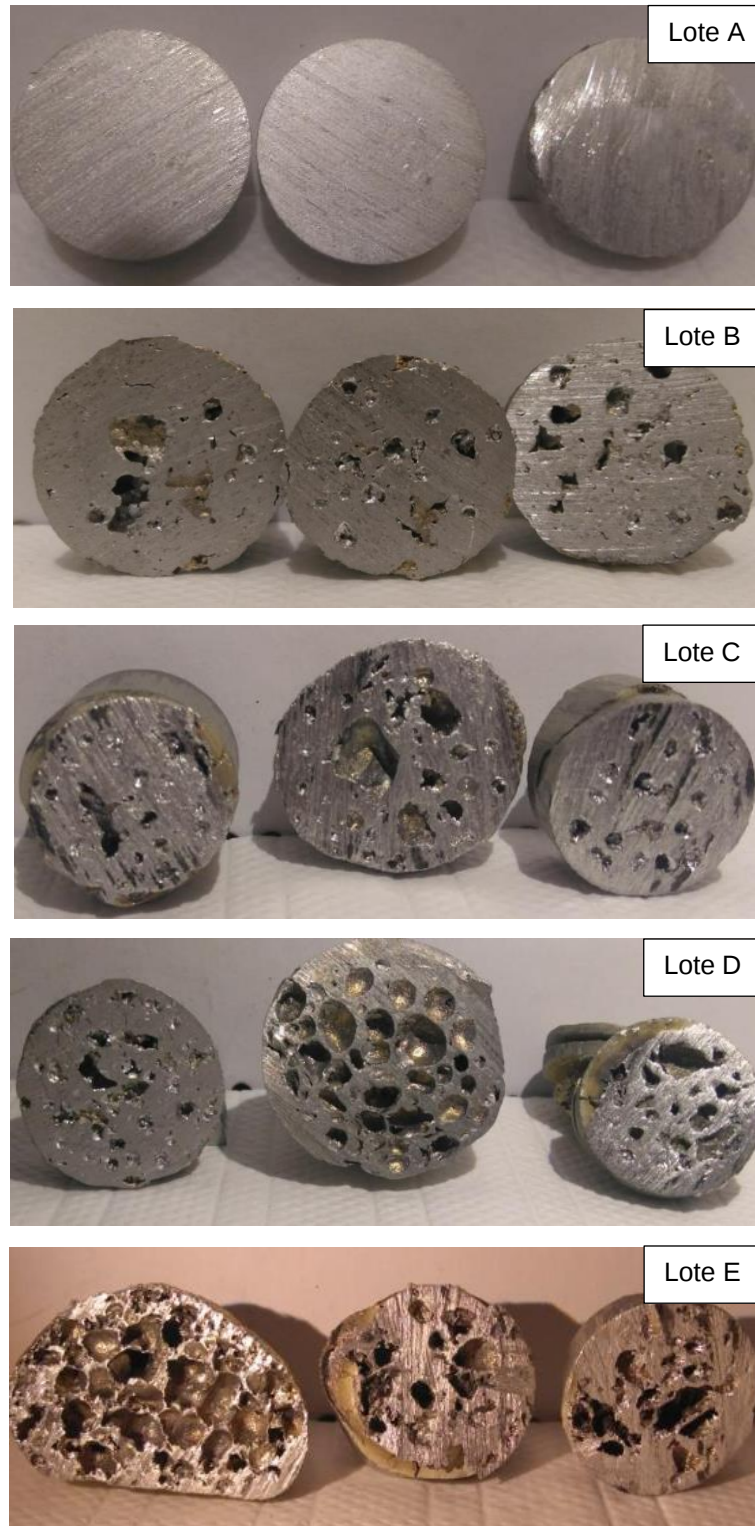
Fonte: Próprio Autor.

Na figura 43 são apresentados os corpos de prova selecionados dos lotes A, B, C, D e E após sinterização e corte na seção transversal. Verifica-se formação de poros em somente corpos de prova com adição de agente expensor, os quais são B, C, D e E.

Comparando o lote A com os demais lotes confirma-se a presença e efeito do agente expensor na matriz metálica de alumínio. Observa-se também uma linearidade na

formação e estrutura dos poros formados, ou seja, com o aumento da concentração do hidreto de titânio aumenta o número e diâmetros de poros formados.

Figura 43 - Seção de corte dos corpos de prova sinterizados: lotes A, B, C, D e E.



Fonte: Próprio Autor.

No lote B e C observam-se poros com diâmetro menores, deixando mais denso a distância entre os poros. A diferença entre estes lotes é pequena, portanto de acordo com a aplicação é válido a análise do uso da menor concentração, visando custos.

Comparando o lote D com os lotes B e C é nítido a diferença na formação da estrutura e número de poros. Os poros apresentam diâmetros maiores com alguns já coalescendo formando poros maiores.

Um fato interessante no lote D é a formação de maiores números de poros com diâmetros maiores, porém com células fechadas, o que caracteriza no corpo poroso maior resistência mecânica comparada ao lote E.

O lote E já apresenta alta formação de poros com vários já iniciando o coalescimento, ou seja, algumas células se tornam abertas. Isto caracteriza que as paredes entre os poros são finas, fato que provoca grandes alterações na resistência mecânica, principalmente resistência a compressão.

Cada concentração é ideal conforme a aplicação desejada com suas respectivas características estruturais e mecânicas.

A atmosfera durante a sinterização é de extrema importância para reduzir a oxidação que ocorre na matriz metálica de alumínio. Este evento faz com que o metal não funda na temperatura desejada facilitando a saída do hidrogênio e/ou impedindo a sua expansão, transformando parte da estrutura química da matriz.

Com o objetivo de controlar a forma final da espuma sinterizou-se os corpos de prova a verde (prensado) dentro de um cilindro de aço carbono, com o qual foi possível manter a geometria ao iniciar-se a fusão com liberação do  $H_2$  na temperatura de trabalho. O ambiente inerte com argônio aparentemente evitou a oxidação da espuma e do cilindro, vide figura 44 e 45.

Figura 44 - Corpo de prova dentro do cilindro de aço antes sinterização.



Fonte: Próprio Autor.

Este preparo impediu uma maior oxidação na espuma metálica e definiu o formato do corpo de prova. Esta definição no formato do corpo é determinante para que atenda as normas exigidas para testes mecânicos.

O corpo de prova foi preparado com a concentração de 1,20% de hidreto de titânio, compactado e sinterizado nas condições padronizadas para os testes anteriores.

A figura 45 apresenta o corpo de prova sinterizado e cortado na seção longitudinal. Observa-se que ele ficou no formato cilíndrico do aço com produção e expansão de poros em sua totalidade, ou seja, o nível de oxidação reduziu, como esperado.

Figura 45 - Corpo de prova sinterizado e cortado na seção longitudinal.



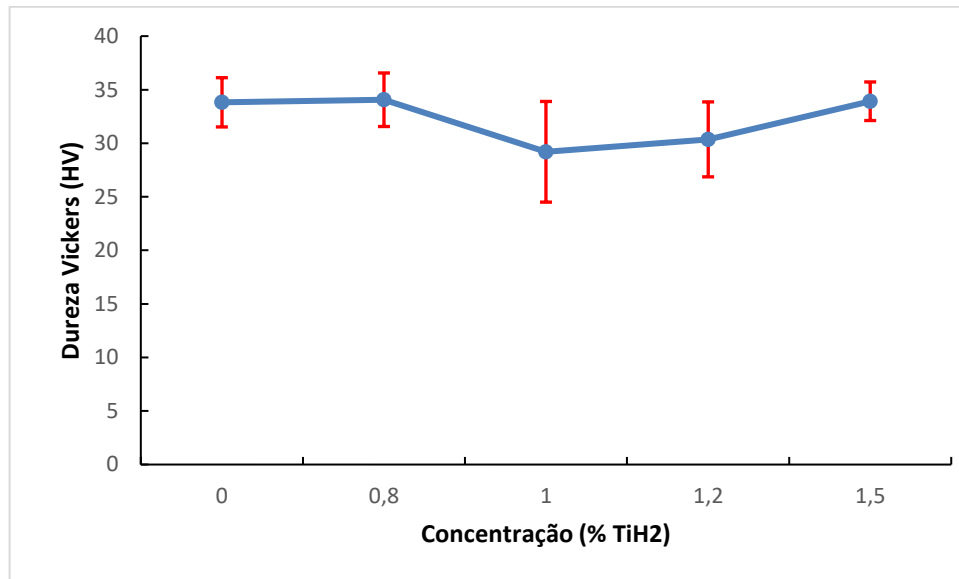
Fonte: Próprio Autor.

Acredita-se que a redução da oxidação se deu pela proteção do tubo cilíndrico de aço. Portanto, direcionando o formato do corpo de prova a ser produzido é possível atingir as medidas padrões exigidas pelas normas dos ensaios mecânicos, como exemplo de compressão. Possivelmente, uma conformação mecânica poderia dar acabamento final viabilizando o uso em estruturas automobilísticas ou outras que demanda alta redução de peso e controle dimensional.

#### 5.5.1 Microdureza Vickers

Os corpos de prova dos lotes A, B, C, D e E foram caracterizados mecanicamente com uso do ensaio de microdureza Vickers, sendo os valores da dureza Vickers amostral apresentados na figura 46.

Figura 46 – Variação da Dureza Vickers em função da concentração  $\text{TiH}_2$



Fonte: Próprio Autor.

De acordo com o gráfico apresentado na figura 46 não obteve alteração na dureza dos corpos de prova. O corpo de prova com 0% de hidreto de titânio apresentou dureza média  $(33,8 \pm 2,3)$  HV 0,2 e o corpo de prova com 1,5% apresentou  $(33,9 \pm 1,8)$  HV 0,2, ou seja, não se observou aparentemente alteração devido a difusão de titânio na estrutura.

A dureza do titânio e suas ligas (soluções sólidas de Al-Ti) são mais altas do que a do alumínio, então esperava-se um certo aumento da dureza conforme o aumento da concentração do hidreto de titânio, entretanto o teor do titânio parece ser relativamente baixo para influenciar a dureza, o que em parte justifica talvez a semelhança entre os valores obtidos.

Estes resultados correspondem aos parâmetros utilizados durante a produção dos corpos de prova, como pressão de compactação, rampa e temperatura de aquecimento. Portanto, ao alterá-los poderão influenciar nos resultados de dureza, devido a cinética de difusão do titânio na matriz de alumínio.

## 6 CONCLUSÃO

A caracterização físico-química dos pós de alumínio e de hidreto de titânio -  $\text{TiH}_2$  mostrou-se adequada ao uso na produção de espumas de alumínio e como agente espumante.

A utilização da tecnologia CDIO tornou possível o desenvolvimento do molde de compressão, permitindo que produzisse CPs adequados ao estudo.

As condições de trabalho na compactação dos corpos verdes do molde fabricado, de aço-carbono SAE 1045 trefilado se mostram eficientes, sobretudo após o tratamento térmico.

Com a sinterização dos corpos verdes utilizando a taxa de aquecimento de  $16^\circ\text{C}$  por minuto até a temperatura de  $710^\circ\text{C}$  permanecendo nesta temperatura por 8 minutos, conseguiu-se espumar ou produzir poros nos corpos de prova. Este método permitiu que espumasse todos os corpos de prova dos lotes B, C, D e E mantendo uma linearidade, ou seja, a medida que aumenta a concentração o número de poros aumentou, alterando o formato dos poros. No lote E foi possível observar início de colapso de poros.

Verificou-se um aumento percentual do volume e redução da densidade conforme o aumento da concentração de hidreto de titânio. Com 0,80% de hidreto de titânio aumentou-se em média 37,29% do volume, com 1,00% aumentou-se 56,68% do volume, com 1,20% aumentou-se 73,43% do volume e com 1,50% aumentou-se 126,23% do volume. A densidade reduziu 44,23%, em média, para a concentração de 1,50% de hidreto de titânio.

O aumento do teor de hidreto de titânio utilizado no trabalho aparentemente não foi suficiente para alteração do valor da dureza Vickers (resistência mecânica), sendo que o corpo de prova com 0% apresentou dureza média 33,8 HV 0,2 e o corpo de prova com 1,5% de hidreto de titânio apresentou 33,9 HV 0,2.

As aplicações das espumas de ligas de alumínio estão no setor de transportes, incluindo paredes contra incêndio, amortecedores de absorção de energia, barras de impacto lateral de portas, entre outros. No setor ferroviário as colunas de colisão das locomotivas podem ser construídas com a espuma metálica, assim como a estrutura espacial, já que conseguiu-se redução em até 66% da densidade do material.

Conclui-se que conforme a aplicação desejada com a espuma de alumínio deve-se produzir o material com a concentração adequada verificando a morfologia, distribuição e tamanho dos poros formados.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho surgiram enormes barreiras que influenciaram no resultado, produção e caracterização da espuma de alumínio, portanto surgiram algumas possibilidades de novos testes, os quais seguem listados abaixo:

- Com o teste realizado dentro do cilindro de aço fica a sugestão para o avanço dos resultados atenderem as normas para realização de testes mecânicos;
- Estudo com outros agentes expansores;
- Estudo visando diretamente uma aplicação específico, utilizando os dados apresentados no trabalho;
- Estudo com maiores pressões de compactação;
- Estudo com granulometrias diferentes, verificando a reação de oxidação durante a sinterização.
- Estudos sobre os fatores que influenciam o tamanho dos poros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. B.; AMBROZIO, F.; COELHO, R. E. Caracterização de Ligas de Alumínio Produzidas por Metalurgia do Pó. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 4, p.325-333, 2004. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10613>>. Acesso em: 1 jul. 2017.

ALULIGHT INTERNATIONAL. Alulight Product Information. 2017. Acesso em: 16 fevereiro de 2017]. Disponível em: [www.ecka-granules.com/de/produkte/alulightr/](http://www.ecka-granules.com/de/produkte/alulightr/).

ARENHARDT, S. L. et al. Estudo do comportamento do alumínio (Al) com adição de 1% de cobre (Cu) obtido pela metalurgia do pó convencional. **Ciência & Engenharia**, v.24, n.1, p.99-104, 2015.

ASHBY, M.F. EVANS, A.G. FLECK, N.A. GIBSON, L.J. HUTCHINSON, J.W. WADLEY, H.N.G. **Metal Foams: a design guide**. Editora: Butterworth-Heinemann, 2000, 264p.

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. American Society for Metals - ASM International, v.4, 2002, 2173p.

ASTM **E34-11e1**, standard test methods for chemical analysis of aluminum and aluminum-base alloys, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2011.

BANHART, J. Aluminium foams for lighter vehicles. **Vehicle Design**, v.37, p.114–125, 2005.

BANHART, J. BAUMEISTER, J. Deformation characteristics of metal foams. Editora: Chapman & Hall, 1997. **Journal of Materials Science**, p.1431-1440.

BANHART, J.; SEELIGER, H. W. Aluminium foam sandwich panels: manufacture, metallurgy and applications. **Advanced Engineering Materials**, n. 9, v.10, p.793-802, 2000.

BANHART, J.; FLECK, N.A.; MORTENSEN, A. Cellular metals: manufacture, properties, applications. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CELLULAR METALS AND METAL FOAMING TECHNOLOGY, 23–25. June, 2003.

BAUMEISTER, J. B.; WEBER, J. M. Aluminium foams for transport industry. **Materials&Design**, v.18, p.217-220, 1997.

BENOUALI, A. H.; FROYEN, L.; DELERUE J. F.; WEVERS M. Mechanical analysis and microstructural characterization of metal foams. **Materials Science Technology**, v.18. n.5. p.489-494, 2002.

BONALDI, Patrick Oliveira. **Obtenção de espuma de alumínio através do processo de Metalurgia do Pó e propriedades mecânicas de estruturas sanduíche**. 2012, 84 f. Tese (Doutorado) –Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e engenharia de materiais: uma Introdução**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008, 705p.

CONCEIVE, DESIGN, IMPLEMENT AND OPERATE - CDIO Initiative. S.d. Disponível em: <<http://www.cdio.org/>>. Acesso em: 8 set de 2017.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: Técnicas e Produtos**. 3 ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1992, 352p.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2008, 672p.

COSTA, A.P.S., Tecnologias de ligação de espumas metálicas, 2009. 78 p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**. Massachusetts: Wesley Publishing company inc, 1956, 514p.

CURRAN, D. C. **Aluminum foam production using calcium carbonate as a foaming agent**, 2003. 188f. Thesis (Phd) - Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, UK.

DELBIN, D. **Estudo da viabilidade de produção de esponjas da liga A2011 a partir do estado semi-sólido**. 2006. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, SP.

DEGISCHER, H. P. Material definition, processing and recycling. In: DEGISCHE, H. P.; KRISZT, B. (Ed.). **Handbook of cellular metals: production, processing, applications**. Weinheim: WILEY-VHC, p.5–7, 2002.

DUARTE, I. BANHART, J. A study of aluminium foam formation - kinetics and microstructure. **Elsevier Science: Fraunhofer-Institute for Advanced Materials**, Bremen, Germany 14p, 1999.

DUARTE, I. M. A., FERREIRA, A. J. M. SANTOS, M. J. G. BANHART, J. Aplicações estruturais das espumas metálicas. In: CONGRESSO NACIONAL EM MECÂNICA EXPERIMENTAL, 6., 2005, Ponta Delgada. **Anais...Portugal**, 2005.

DUARTE, Isabel Maria Alexandrino. **Espumas metálicas – processo de fabrico, caracterização e simulação numérica**. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2005.

EXNER, E. Principles of single phase sintering. **Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics**, v.1, p.1-4; 1979.

FERREIRA, L. M. P.; BAYRAKTAR, E.; ROBERT, M. H. Magnetic and electrical properties of new design aluminum matrix composites. **Journal of Advances in Materials and Processing Technologies**. v.1, p.1, 2015.

FRAUNHOFER INSTITUTE OF TECHNOLOGY. Foaminal properties overview and design guide. 1999. Disponível em: <http://www.ifam.fraunhofer.de>. Acesso em: 16 fev de 2017.

GATAMORTA, F. **Obtenção de espumas sintéticas da liga AA2011 a partir do metal no estado semi-sólido e sua caracterização metalúrgica**. 2009. 168 p. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, SP.

GIBSON, L. J., ASHBY, M. F. *Cellular solids – structure and properties*, 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 508p, 1997.

GREGOLIN, E.N., **Estudo de um composto de matriz de alumínio reforçado com fibras de Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obtido pela reação entre o alumínio e fibras silicosas**. 2000. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, SP.

GONÇALVES, E. A. **Desenvolvimento de fosfato de cálcio trifásico para adsorção de CO<sub>2</sub> em leito fluidizado por meio da técnica *Pressure Swing Adsorption (PSA)***. 2016, 119f. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Belo Horizonte, 2016.

GOODHEW, P.J., HUMPHREYS, J., BEANLAND, R. **Electron microscopy and analysis**. 3 ed. Londres: Editora Taylor & Francis, 2001, 251p.

GUTIÉRREZ-VÁZQUEZ, J. A.; OÑORO, J. Espumas de alumínio. Fabricación, propiedades y aplicaciones. **Revista de Metalurgia**, v. 44, n. (5), 2008.

HANGAI, Y.; et al. Drop weight impact behavior of Al-Si-Cu alloy foam-filled thin-walled steel pipe fabricated by friction stir back extrusion. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v.26, n.2, p.894-900, 2017.

HASSANI, A.; HABIBOLAHZADEH, A.; BAFTI, H. Production of graded aluminum foams via powder space holder technique. **Materials & Design**, v.40, p.510-515, 2012.

IFAM. Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research, product information. Disponível em: [http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design\\_guidelines\\_english\\_V14.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design_guidelines_english_V14.pdf). Acesso em: 22 fev de 2008

JAKUBOWICZ, J. et al. Micro-CT analysis and mechanical properties of Ti spherical and polyhedral void composites made with saccharose as a space holder material. **Materials Characterization**, v.100, p.13-20, 2015.

KLAVZAR, A.; CHIROLI, M.; JUNG, A.; RECK, B. Protective performance of hybrid metal foams as MMOD shields, ISSN 1877-7058. **Acta Metallurgica Journal**: Elsevier Science Ltd. 8p, 2015. Applied Mechanics, Campus A 4.2, Saarbrücken, Germany.

LEFEBVRE, L-P.; BANHART, J.; DUNAND, D. Porous metals and metallic foams: current status and recent developments. **Advanced Engineering Materials**. Canadá, v.10, n.9, p.775-787, 2008.licationsduCNRC, Canadá, 2008.

MATIJASEVIC-LUX, B.; BANHART, J.; FIECHTER S.; GÖRKE O.; WANDERKA N. Modification of titanium hydride for improved aluminium foam manufacture. **Acta Metallurgica Journal: Elsevier Science Ltd**. 14p, 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia**: microestrutura e propriedades. São Paulo: Hemus, 1997. 353p.

PEREIRA, M. A. C.; BARRETO, M. A. M.; PAZETI, M. **Application of project-based learning in the first year of an industrial engineering program**: lessons learned and challenges. Universidade de São Paulo, Lorena, SP, 2017, Production, 27(spe), e20162238. DOI <<http://dx.doi.org/10.1590/0103-6513.223816>>

RAMAMURTY, U. PAUL, A. Variability in mechanical properties of a metal foam. ISSN1359-6454. **Acta Metallurgica Journal**: Elsevier Science Ltd. Department of Metallurgy, Indian Institute of Science, Bangalore, India, p.869-876, 2003.

RAMOS, F. D.; GALDINO, A. G. S. **Desenvolvimento de espumas metálicas de alumínio através da metalurgia do pó utilizando polietileno de baixa densidade para absorção de impacto**. 2013. Projeto de Iniciação Científica - Instituto Federal do Espírito Santo.

SCHMITZ, C. **Handbook of aluminium recycling**: fundamentals, mechanical preparation, metallurgical processing e plant design. Essen: Vulkan-Vergal GmbH, 2006.

SUN, Y. et al. Investigation of strain-rate effect on the compressive behaviour of closed-cell aluminium foam by 3D image-based modelling. **Materials & Design**, v.89, p.215-224, 2016.

TENÓRIO, J.A.S.; DELGADO, F.; BARROS, A.M. Efeito das variáveis metalúrgicas no processo de reciclagem de latas de alumínio. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA DO ALUMÍNIO, 5., p. 53- 68, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 1995.

THEOBALD, M.D., Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading, **Composites Structures**, v.92, n.10, p.2465-2475, 2010.

VERRAN, G.O.; KURZAWA, U.; PESCADOR, W.A. Reciclagem de latas de alumínio visando melhor rendimento e qualidade metalúrgica no alumínio obtido. **Revista Materiais**, v.10, n.1, p. 72-79, March. 2005.

WALTHER, G. et al. A New class of high temperature and corrosion resistant nickel based open-cell foams. **advanced engineering materials**, v.10, n.9, p.803-811, 2008.

WASEDA, Y.; MATSUBARA, E.; SHINODA, K. **X-ray diffraction crystallography. Introduction, examples and solved problems**. New York: Springer, 2011. 309p.