

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

**Obtenção de espuma de alumínio através do processo de Metalurgia do Pó e
propriedades mecânicas de estruturas sanduíche.**

Patrik Oliveira Bonaldi

Tese para obtenção do título de Doutor
em Engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M

**Obtenção de espuma de alumínio através do processo de Metalurgia do Pó e
propriedades mecânicas de estruturas sanduíche.**

Patrik Oliveira Bonaldi
Engenheiro de Materiais, Mestre em Engenharia

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica/Centro de Tecnologia do Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado para para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lirio Schaeffer (PPGE3M/UFRGS)

Banca Examinadora:

Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito – EE/UFRGS

Dr. Carlos Raimundo Frick Ferreira – EE/UFRGS

Profa. Dra. Eleani Maria da Costa - PUCRS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Ao professor Lirio Schaeffer pela orientação, oportunidade e disponibilidade da estrutura do Laboratório de Transformação Mecânica-LdTM.

Ao acadêmico Conrado Pedro Carro, pelo auxílio nos experimentos e aos colegas do Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS que contribuíram de alguma forma para a conclusão deste trabalho.

As empresas Alcoa Alumínio pela doação do pó de alumínio e Brats Filtros e Pós Especiais pela doação do pó de hidreto de titânio.

Ao Lamef pelo auxílio na realização dos ensaios mecânicos.

Ao órgão financiador Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq pela bolsa de estudo.

A minha companheira de 5 anos, Sabine Rockenbach.

Ao meus pais, por toda a oportunidade e apoio durante toda a vida.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE QUADROS	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
RESUMO.....	XV
ABSTRACT	XVI
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Espuma Metálica.....	4
2.1.1. Espumas de Alumínio	6
2.1.2. Fatores que influenciam a qualidade da espuma metálica.....	8
2.2. Agentes espumantes	11
2.3. Obtenção de Espuma	11
2.3.1. Obtenção de espumas por fundição	11
2.3.2. Por Metalurgia do Pó	13
2.4. Estruturas/Chapas Sanduíche	15
2.5. Conformação de Chapas Sanduíche.....	20
2.7. Propriedades Mecânicas	21
2.6.1. Ensaio em Chapas Sanduíche	22
2.6.2. Ensaio em Tubos	24
2.6.3. Tubos preenchidos com espuma.....	28
2.6.4. Equações de relação de espuma metálica e metal denso.....	28
2.7. Aplicações de espuma de alumínio	29

2.7.1. Automotivo	29
2.7.2. Absorção de energia em caso de impacto.....	31
2.7.3. Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário	34
2.7.4. Outras aplicações.....	35
3. Procedimentos Experimentais.....	36
3.1. Considerações Gerais	36
3.2. Metodologia experimental	37
3.2. Preparação Amostra	39
3.2.1. Mistura dos Pós	39
3.2.2. Compactação de amostra.....	40
3.3. Processo de espumagem	41
3.4. Caracterização de Amostras de Espuma de Alumínio	42
3.4.1. Análise Densidade	42
3.4.2. Ensaio Mecânicos	43
4. Resultados e Discussão	44
4.1. Análise de homogeneidade da mistura	44
4.2. Compactação das amostras	44
4.3. Obtenção de espumas de alumínio.....	47
4.4. Obtenção de tubos de aço preenchidos com espuma de alumínio	52
4.5. Ensaio de compressão	54
4.6. Ensaio de dobramento	57
5. Conclusões.....	60
6. Sugestão para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de aplicação de espumas metálicas, (a) sistema de absorção de impacto (metcomb® nanostructures), (b) tubos preenchidos com espuma metálica (IFAM).	1
Figura 2 - Dispersão de uma fase em outra onde cada fase pode estar nos três estados da matéria ²	4
Figura 3 - Processo de obtenção de espuma com auxílio de mercúrio ²¹	7
Figura 4 - Espumas de alumínio obtidas em processo industrial (melhor qualidade de cima para baixo) ¹	9
Figura 5 - Ilustração esquemática do processo de obtenção de espuma de alumínio pelo método de injeção de gás (processo CYMAT e HYDRO) ¹	12
Figura 6 - Etapas do processo de obtenção de espuma de alumínio pelo método de liberação de gás de partícula por fundição (processo Alporas).	13
Figura 7 - Processo de obtenção de espuma metálica por metalurgia do pó (processo Fraunhofer e Alulight).	14
Figura 8 - Chapas sanduíches (ALUlight®).	15
Figura 9 - Exemplo de estruturas preenchidas com espuma metálica (metcomb® Nanostructures). ...	16
Figura 10 - Otimização de chapas densas e espumas metálicas ⁶	16
Figura 11 - Tecnologias de produção de estruturas sanduíche ⁶	17
Figura 12 - Curva de temperatura X tempo de formação de estrutura sanduíche ⁶	19
Figura 13 - Diagrama de fases da liga alumínio e silício ⁴⁶	20
Figura 14 - Esquema de conformação de chapas sanduíche de espuma de alumínio ⁶	21
Figura 15 - Possível resultado de conformação de chapas sanduíche de espuma de alumínio ⁶	21
Figura 16 - Ensaio de flexão em estrutura sanduíche, (a) a quatro pontos e (b) a três pontos.	23
Figura 17 - Absorção de energia de espuma metálica cilíndrica e tubo metálico ¹	24
Figura 18 - Secção do tubo com e sem preenchimento de espuma metálica após sofrer compressão ¹	25
Figura 19 - (a) curva de carga-deslocamento e (b) curva tensão-deformação ¹	25
Figura 20 - Curva de carga-deslocamento de uma espuma, um tubo, um tubo preenchido e a soma da curva 1 com a curva 2 ¹	26
Figura 21 - Campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo ⁴⁸ ...	30

Figura 22 - Veículo desenvolvido pela empresa alemã Karmann com espuma metálica.	31
Figura 23 - Aplicação de chapas sanduíche na redução de peso estrutural (ALUSION).	31
Figura 24 - Componentes absorvedores de energia (CYMAT).	33
Figura 25 - Sistema de absorção de impacto frontal em automóveis (CYMAT).	33
Figura 26 - Absorvedores de energia de impacto para o sistema veicular COMBINO ³	34
Figura 27 - Trocador de calor de espuma metálica.	35
Figura 28 - Chapa sanduíche aplicada em panela doméstica ⁶	35
Figura 29 - Processo de obtenção de espuma de alumínio otimizado.	36
Figura 30 - Fluxograma da metodologia proposta para o estudo a obtenção de espumas de alumínio. ...	38
Figura 31 - (a) micrografia do pó de alumínio, (b) micrografia do pó de TiH ₂	40
Figura 32 - Desenho matriz de compactação do pó de alumínio (dimensões em mm).	41
Figura 33 - Matriz cilíndrica utilizada na compactação das amostras de pó de Al-TiH ₂	41
Figura 34 - Sistema de espumagem utilizados nos experimentos.	42
Figura 35 - Micrografia das misturas das partículas de Al e TiH ₂ (50x), (a) misturador tipo duplo V, (b) moinho de bolas de alta rotação.	44
Figura 36 - Curva de compressibilidade do pó de Al-TiH ₂	45
Figura 37 - Amostras compactadas (verde) com 21mm diâmetro e 22mm de altura.	45
Figura 38 - Adesão de alumínio na matriz de compactação.	47
Figura 39 - Amostras de tubos preenchidos para ensaio de compressão.	53
Figura 40 - Amostra de tubo preenchido para o ensaio de flexão.	53
Figura 41 - Amostra de tubo preenchido mostrando a interação tubo aço e espuma de alumínio.	54
Figura 42 - Gráfico do ensaio de compressão de espuma de Al, tubo preenchido com espuma e tubo vazio.	55
Figura 43 - Curva de compressão da espuma de Al mostrando a deformação de densificação.	56
Figura 44 - Exemplo de amostra de tubo preenchido com espuma após ensaio de compressão.	57
Figura 45 - Gráfico do ensaio de dobramento em 3 pontos do tubo preenchido com espuma e tubo vazio.	58

Figura 46 - Exemplo de amostra de tubo preenchido após ensaio de dobramento.59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades mecânicas de metais celulares comerciais ¹	22
Tabela 2: Composição química do pó de alumínio fornecido pela Alcoa.	40
Tabela 3: Características dos pós utilizados.	40
Tabela 4: Características das amostras compactadas a 450 MPa.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Espumas obtidas com mistura de 0,8% de TiH_2	48
Quadro 2 - Espumas obtidas com mistura de 1,0% de TiH_2	50
Quadro 3 - Espumas obtidas com mistura de 1,2% de TiH_2	51

LISTA DE SÍMBOLOS

α – fase hc do TiH ₂	
β – fase ccc do Ti H ₂	
γ – fase cfc do Ti H ₂	
ε – fase ftc do Ti H ₂	
T_S – temperatura <i>solidus</i>	[°C]
T_L – temperatura <i>liquidus</i>	[°C]
ρ – densidade do material	[g/cm ³]
ρ_s – densidade do material sólido	[g/cm ³]
E - módulo de elasticidade	[GPa]
G - módulo de cisalhamento	[GPa]
E_{fy} - módulo de flexão	[GPa]
ν - coeficiente de Poisson.	[mm/mm]
σ_c - resistência a compressão	[MPa]
σ_y - tensão de escoamento	[MPa]
σ_t - resistência a tração	[MPa]
ε_D - deformação de densificação	[mm/mm]
K_{IC} - tenacidade a fratura	[MPa.m ^{1/2}]
b – largura	[mm]
t – espessura da chapa	[mm]
c – espessura da espuma metálica	[mm]
ℓ - distância entre os apoios no ensaio de flexão	[mm]
H – distância da extremidade até o suporte exterior no ensaio de flexão	[mm]
A – área da seção transversal da espuma no ensaio de flexão	[mm ²]
a – largura dos penetradores no ensaio de flexão	[mm]

F - carga total aplicada à viga no ensaio de flexão	[N]
s - distância entre os penetradores no ensaio de flexão	[mm]
E_f - módulo de elasticidade da chapa	[GPa]
E_c - módulo de elasticidade do núcleo (espuma)	[GPa]
δ - deformação elástica no ensaio de flexão	[mm/mm]
$(EI)_{eq}$ - resistência a flexão equivalente	[MPa]
F_m - platô de força na curva força-deformação	[N]
r - raio do corpo de prova cilíndrico	[mm]
L_0 - comprimento inicial do corpo de prova	[mm]
σ_{pl} - tensão platô na curva tensão-deformação	[MPa]
σ_{ys} - tensão de escoamento do sólido	[MPa]
ε_D^{Tubo} - deformação do tubo no ensaio de compressão	[mm/mm]
W_v^{Tubo} - energia absorvida por unidade de volume do tubo	[J/m ³]
ε_D^{Espuma} - deformação da espuma no ensaio de compressão	[mm/mm]
W_v^{Espuma} - energia absorvida por unidade de volume da espuma	[J/m ³]
$W_v^{Tubopreenchido}$ - energia absorvida por unidade de volume do tubo preenchido com espuma	[J/m ³]
m_s - massa da espuma seca	[g]
m_{ci} - massa do conjunto imerso	[g]
$m_{aux.}$ - massa auxiliar	[g]
d_l - densidade do líquido	[g/cm ³]

LISTA DE ABREVIATURAS

AISI – American Iron and Steel Institute

AFS – Aluminum Foam Sandwich

ccc – estrutura cúbica de corpo centrado

cfc – estrutura cúbica de face centrada

EDS - Energy Dispersive Spectroscopy

ftc – estrutura tetragonal distorcida

hc – estrutura hexagonal compacta

IFAM - Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Advanced Materials

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

RESUMO

Espumas de alumínio são materiais de estrutura porosa que combinam as propriedades de materiais celulares com as dos materiais metálicos. A espuma metálica, com porosidade acima de 70%, pode ser obtida principalmente pela via “metal líquido” e via “metalurgia do pó”. Este trabalho visa uma contribuição para o desenvolvimento da produção de espumas de alumínio via Metalurgia do Pó (MP), inédita no Brasil. Busca-se estudar e definir os parâmetros para produzir a espuma de alumínio e estruturas sanduíche através do processo de MP e por fim conhecer o seu comportamento mecânico. É proposta, também, uma otimização do processo, pois, atualmente, a etapa de compactação do pó ocorre através do processo de extrusão, ou compactação a quente ou laminação, ou ainda a combinação desses. Para definir os parâmetros do processo foi estudada a condição de mistura, além da proporção do pó de alumínio e o agente expensor (TiH_2). Foram estudadas as condições do processo de espumagem variando temperatura e tempo. A partir desses resultados foram obtidas as estruturas sanduíche, sendo que o foco foi tubos metálicos de aço preenchidos por espuma de alumínio. Posteriormente, foi estudado o comportamento mecânico da espuma e dos tubos preenchidos com espuma através dos ensaios de compressão e flexão. Os resultados das propriedades das espuma foram comparados com as propriedades previstas através de equações propostas por Ashby et. al.. Os resultados indicam a real possibilidade de realizar apenas a compactação axial a frio do pó metálico, atingindo densidade superior a 95% do material denso com 450 MPa de pressão de compactação. O processo de mistura dos pós mais adequado foi o realizado em misturador convencional do tipo “duplo V” por 2 horas, obtendo uma boa homogeneidade. A condição mais adequada de obtenção de espuma foi com a proporção de mistura de 1,0% de TiH_2 , com espumagem em 710°C por 10 minutos. Os ensaios mecânicos mostraram que os tubos preenchidos com espuma de alumínio apresentam um aumento considerável nas propriedades.

Palavras-chave: Espuma de alumínio. Metalurgia do Pó. Estrutura sanduíche.

ABSTRACT

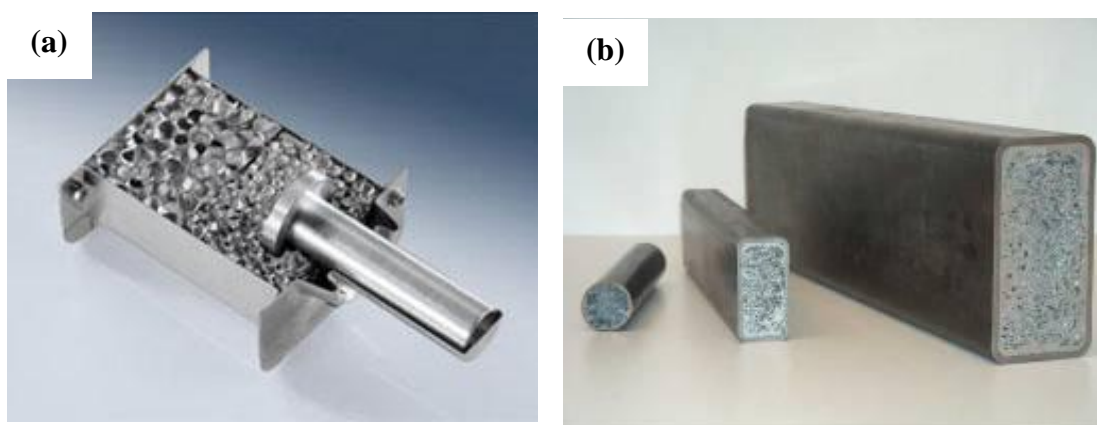
Aluminum foams are materials of porous structure that combine the properties of cell material with those of metallic materials. The metal foam, with porosity above 70%, can be achieved mainly by the "liquid metal route" and by "powder metallurgy". This study aims to contribute to the development of aluminum foam production by powder metallurgy process (PM), unprecedented in Brazil. The objective is to study and define the parameters for producing aluminum foam and sandwich structures by the process of PM, and understand its mechanical behavior. It is proposed also a process optimization, since nowadays the powder compaction phase takes place by the process of extrusion, hot compression or rolling, or even a combination of these. To establish the process parameters, the condition of mixing was studied, as well as the amount of aluminum and blowing agent (TiH_2) powder. Were also studied the foaming process conditions by varying the temperature and time. From these results were obtained the sandwich structures, being the focus on steel metal tubes filled with aluminum foam. Subsequently, it was studied the mechanical behavior of the foam and the tubes filled with foam through bending and compression tests. The results of the properties of the foam were compared with the properties predicted by equations proposed by Ashby et. al .. The results showed real possibility to perform only cold axial compression of the metal powder, reaching a density greater than 95% with 450 MPa of compaction pressure. The most adequate mixing of the powders process was carried out in a conventional mixer such as "double V" for 2 hours to give a good homogeneity. The best condition for obtaining foam was with the mixing amount of 1.0% TiH_2 , with foaming at 710°C for 10 minutes. The mechanical tests showed that the tubes filled with aluminum foam present a considerable increase in the properties.

Keywords: Aluminum Foam. Powder Metallurgy. Sandwich structure.

1. Introdução

Espumas de alumínio são estruturas metálicas porosas que combinam propriedades típicas dos materiais celulares com as dos metais¹. A rigidez elevada em relação a massa e boa capacidade de dissipação de energia, em caso de impacto, levaram a uma grande variedade de aplicações², especialmente na indústria automotiva³, sendo que dois exemplos são mostrados na figura 1. A figura 1a mostra absorvedores de energia e a figura 1b mostra exemplos de estruturas tubulares preenchidas com espuma metálica. As propriedades das espumas metálicas dependem muito das características morfológicas, como a distribuição de tamanho dos poros, a curvatura da parede celular e os defeitos⁴. As estruturas celulares estão presentes nos materiais naturais, por exemplo no osso e na madeira. Os metais celulares apresentam combinações interessantes de propriedades físicas e mecânicas, como, por exemplo, alta rigidez combinada a peso específico muito baixo. São geralmente usadas em situações onde o peso deve ser minimizado. As estruturas celulares, ou materiais porosos, oferecem ainda uma maior resistência a danos ou fraturas súbitas, uma vez que as estruturas de poros abertos e fechados têm a capacidade de absorver esforços de tração ou compressão. As espumas podem ser extensamente usadas como proteções, por apresentarem uma excelente capacidade de dissipação da energia de impacto, entre outras.

Figura 1 - Exemplos de aplicação de espumas metálicas, (a) sistema de absorção de impacto (metcomb® nanostructures), (b) tubos preenchidos com espuma metálica (IFAM).



As espumas metálicas podem ser formadas de diversas formas^{5, 6, 7}, por fundição, metalurgia do pó, deposição de vapor metálico e deposição eletroquímica. Um método

promissor é a rota da metalurgia do pó, que consiste basicamente na compactação de pós metálicos (uma mistura de pó de alumínio e um agente espumante são compactados) e posterior formação de espuma a uma determinada temperatura (aquecimento acima do ponto de fusão da liga)⁸. Acima do limiar da decomposição do agente espumante de hidrogênio são liberadas bolhas que se forma na liga. O hidreto de titânio (TiH_2) se mostra um agente adequado para formação de espumas de alumínio, embora outros hidretos também possam ser utilizados⁹. Liberação de hidrogênio do TiH_2 começa em torno de 400°C , que é inferior ao ponto de fusão de ligas de alumínio comerciais⁸. Esta diferença entre a decomposição e a temperatura de fusão provoca a formação irregular. Para minimizar esse desencontro de temperatura de fusão, outras ligas com Mg ou Si podem ser utilizadas. Se o pó TiH_2 é pré-tratado, este pode formar uma camada de óxido na superfície, retardando a liberação de gás. No entanto, como os mecanismos que levam a um retardamento da evolução de gás ainda não são conhecidos, estes parâmetros são encontrados em sua maioria de forma empírica⁹.

É bem conhecido que as propriedades mecânicas de espumas metálicas mostram uma grande diferença em comparação com modelos teóricos de espumas de poros uniformes e regulares, devido à presença de imperfeições na estrutura celular. A origem das imperfeições reside no processo de formação de espuma, que é mal compreendido em se comparando ao processo de formação de espuma em polímeros. Espumas de polímero têm propriedades que seguem os modelos teóricos de espumas perfeitas. Muitos tipos de espumas disponíveis no comércio, como as espumas de alumínio, são fabricadas pela decomposição de TiH_2 no metal fundido (rota-líquida) ou semi-sólido por metalurgia do pó (rota-MP)⁶.

No presente trabalho, os objetivos foram a obtenção de espumas de alumínio através da rota de metalurgia do pó em diversas condições de espumagem e obtenção de estruturas sanduíches, focando em tubos de aço AISI 1020, a exemplo da figura 1b, assim como o comportamento mecânico desses materiais. O processo de MP proposto nesse trabalho possui um diferencial na etapa de consolidação do pó metálico, propondo a etapa de consolidação do pó em única etapa. Pois atualmente a compactação ocorre pelo processo de extrusão¹⁰, compactação a quente e laminação¹¹, ou ainda a combinação desses, onde o objetivo é obter densidade suficiente para ocorrer a espumagem. Há também estudos mais recentes que utilizam a extrusão inversa em diversas direções para atingir altas densidade¹². Em seguida foi feito um levantamento das propriedades mecânicas das espumas de alumínio e estruturas

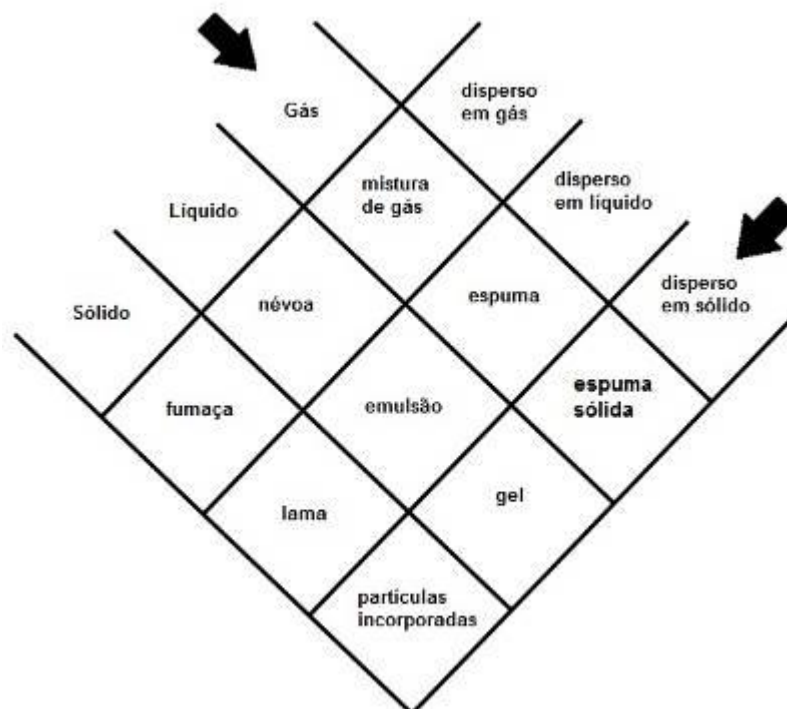
sanduíche a fim de compreender melhor a conformação desse material e seu comportamento. Muitos parâmetros do processo devem ser bem compreendidos para uma melhor reprodutividade das espumas, sendo bem particulares para cada situação e equipamento utilizado.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Espuma Metálica

O termo "espuma" pode ser explicado e definido como mostrado na figura 2, que enumera as denominações de todas as dispersões possíveis de uma fase em outra, e isso mostra que as espumas são dispersões uniformes de uma fase gasosa em qualquer líquido ou um sólido¹³. As inclusões de gás individuais são separadas entre si por porções de líquido ou sólido, respectivamente. O termo "espuma" em seu sentido original está reservado a uma dispersão de bolhas de gás em um líquido. A morfologia das espumas, todavia, pode ser preservada durante a solidificação, obtendo-se o que é chamado de "espuma sólida". O termo "espuma metálica", geralmente, significa uma espuma sólida, que é mais comumente chamada de "sólidos celulares"⁸.

Figura 2 - Dispersão de uma fase em outra onde cada fase pode estar nos três estados da matéria².



Segundo Banhart², algumas imprecisões existem no que diz respeito ao uso do termo "espuma metálica", que com frequência é usado de forma geral para descrever materiais que

não são de fatos espumas. Para se identificar corretamente as espumas metálicas, deve-se distinguir:

- Metais Celulares: termo mais geral que faz referência ao corpo metálico no qual qualquer tipo de vazio gasoso é disperso. O metal divide-se em células fechadas que contêm gás e precisa ter densidade igual ou inferior a 30% da densidade do material maciço.

- Metais Porosos: tipo especial de metal celular restrito a alguns tipos de vazios, os poros, que são usualmente esféricos e isolados uns dos outros. O material tem, normalmente, o nível de porosidade menor que 70%.

- Espumas Metálicas: classe especial de metais celulares que se originam de uma matriz metálica líquida e assim têm uma morfologia mais restrita. As células são fechadas, separadas umas das outras por fina membrana. São, ainda, esféricas ou poliédricas. A expressão Espuma Metálica é válida para a fase líquida do produto, embora seja, usualmente, também utilizada para descrever o produto em sua fase sólida. Se usado desta forma, define-se o metal em sua fase líquida como Espuma Metálica Líquida. Metais Celulares originados de Espumas Metálicas Líquidas constituem-se de células fechadas, assim, alguns pesquisadores preferem denominar as estruturas metálicas de células abertas como esponjas metálicas.

- Esponjas Metálicas: morfologia de um metal celular, normalmente com vazios interconectados. Nomenclatura normalmente menos utilizada.

Atualmente, existem dois métodos principais para a produção de espumas metálicas. O primeiro é o método direto de espuma onde o gás é injetado continuamente a partir de uma fonte externa, em um metal fundido especialmente preparado, contendo partículas não metálicas uniformemente dispersas para que as bolhas de gás sejam adicionadas para criar espumas¹⁴, ou quando um gás liberando agente químico é adicionado. O método indireto na formação de espuma, se dá através de um compactado sólido, que consiste de matriz metálica contendo partículas do agente espumante uniformemente disperso⁸. Para as ligas de alumínio com os hidretos de elementos de transição como titânio ou pó de hidreto de zircônio são utilizados como fonte de gás⁹. Acima da temperatura de fusão este compactado expande e forma uma espuma. No presente trabalho, o método indireto de espuma é utilizado. As

propriedades das espumas metálicas e outras estruturas celulares dependem muito das propriedades do metal, da densidade relativa e topologia dos poros (poros abertos ou fechados)¹.

Uma das características estruturais mais significativas de materiais celulares parece ser a distribuição dos poros. Há uma clara relação entre densidade relativa (densidade do material celular/ densidade do material maciço), módulo de rigidez e o comportamento em compressão¹⁵. Portanto, a fração do volume dos poros parece ser uma medida significativa, mas que não fornece informações relevantes sobre o arranjo, tamanho ou forma dos poros. Por exemplo, dois tipos de materiais celulares podem ter a mesma densidade, mas um deles pode apresentar um ou dois poros grandes, que representa a maior parte do volume da fração gasosa, enquanto o outro, pode consistir de uma rede quase uniforme de pequenos poros².

2.1.1. Espumas de Alumínio

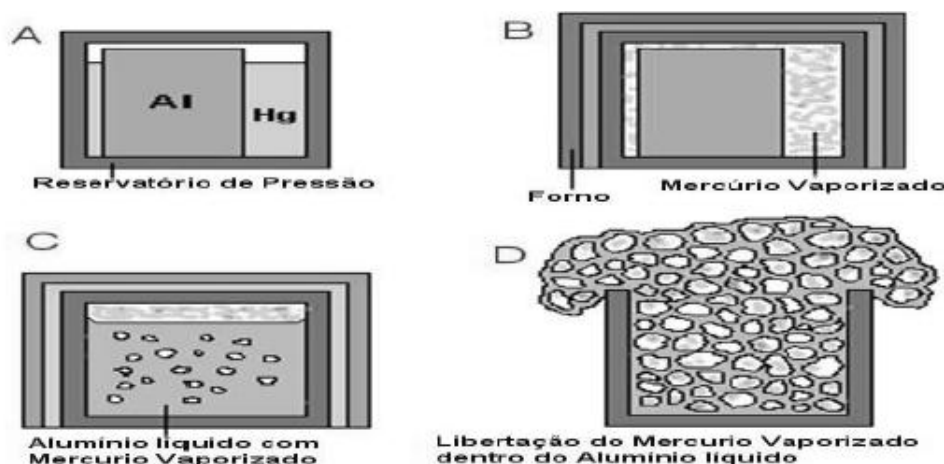
Ao longo dos últimos 15 anos, espumas metálicas tornaram-se um desafio para as pesquisas científicas e industriais. Muitos metais podem ser espumados, mas a espuma de alumínio apresenta grande potencial para aplicações industriais, especialmente na indústria automotiva^{3, 16}. As aplicações serão abordadas no item 2.7.

Em 1943, Benjamin Sosnick¹⁷ tentou produzir espuma de alumínio com o auxílio de Hg em uma câmara fechada, sob alta pressão. Este método é apresentado na figura 3. Neste processo, a liga gera uma multifase ao ser aquecida, a composição da liga era escolhida de forma que um dos seus componentes entrasse sempre em eferescência enquanto, que o outro apenas fundia. As ideias fundamentais para o processo de formação indireta de espuma foram desenvolvidas na década de 1950 por Benjamin Allen¹⁸.

Em 1972, a Ethyl Corporation produziu material celular de alta qualidade e enviou-o para Ford Motor Company para avaliação, certamente, não foi bem sucedido por não ser o momento para materiais leves em uma era de aparente abastecimento ilimitado de recursos¹⁹. Segundo Banhart², um segundo surgimento das atividades científicas na área deu-se na década de 80, restabelecendo algumas técnicas antigas de produção e descobrindo algumas novas. As primeiras indústrias como ALCAN e Shinko Wire (Alporas) estabeleceram pesquisas internas.

Em 1990, o método foi redescoberto no Instituto de Pesquisa Fraunhofer em Bremen, Alemanha²⁰, e levou a um considerável nível de sofisticação para a fabricação de espumas e componentes de espuma.

Figura 3 - Processo de obtenção de espuma com auxílio de mercúrio²¹.



Utilizando a rota de metalurgia do pó para produzir espumas de alumínio ou zinco⁸ o processo começa com a mistura de um pó metálico (metal puro ou liga adequada), com um agente espumante (TiH_2 , ZrH_2 , CaCO_3 , etc)²¹, após o qual os pós misturados são compactadas por exemplo, por prensagem a quente, laminação ou extrusão⁸. Em princípio, a compactação pode ser feita por uma técnica que garante que o agente espumante seja incorporado na matriz de metal, sem qualquer notável porosidade aberta²². Aquecimento do precursor (pó compactado) acima da temperatura de fusão do metal ou liga é o chamado processo de formação de espuma ou espumagem. Durante este processo, o gás evolui a partir do agente espumante formando bolhas na liga fundida. O gás liberado força o material semisólido compactado a formar bolhas. O resultado é um produto com uma estrutura altamente porosa chamada espuma metálica¹, um material que oferece aos fabricantes um potencial significativo para obtenção de estruturas leves, para a absorção de energia e de gerenciamento térmico⁵. Portanto, pode-se concluir que o perfil de temperatura durante a formação de espuma é constituído por uma fase de aquecimento, uma fase de exploração isotérmica e uma fase de resfriamento. Os poros crescem continuamente durante a formação de espuma, devido ao gás fornecido pelo agente espumante e à dilatação térmica. A expansão é controlada por uma decomposição contínua do agente espumante. Portanto, já começa a formação de espuma

durante o aquecimento do compactado e o fornecimento de gás depende da cinética de decomposição do agente espumante. Como são mencionadas na literatura²³, complexas relações existem entre a cinética de decomposição do agente espumante e a cinética de fusão da liga, que tem uma influência benéfica sobre a qualidade da espuma de metal. É apresentado no item seguinte, os fatores que influenciam a qualidade da espuma de alumínio.

2.1.2. Fatores que influenciam a qualidade da espuma metálica

Espumas metálicas produzidas por compactação de misturas de pós de ligas de alumínio e TiH_2 e aquecimento acima do ponto de fusão da liga e formação de espuma^{8, 24} são comercializadas com os nomes *Alulight* ou *Foaminal*. Os volumes de produção ainda estão baixos devido aos custos ainda relativamente elevados e às propriedades de ligas de alumínio de espuma que nem sempre são suficientes para uma determinada aplicação. Por esta razão, muitas pesquisas são direcionadas para a melhoria das propriedades de espumas e sua fabricação mais confiável, reprodutível e, como consequência, menos cara.

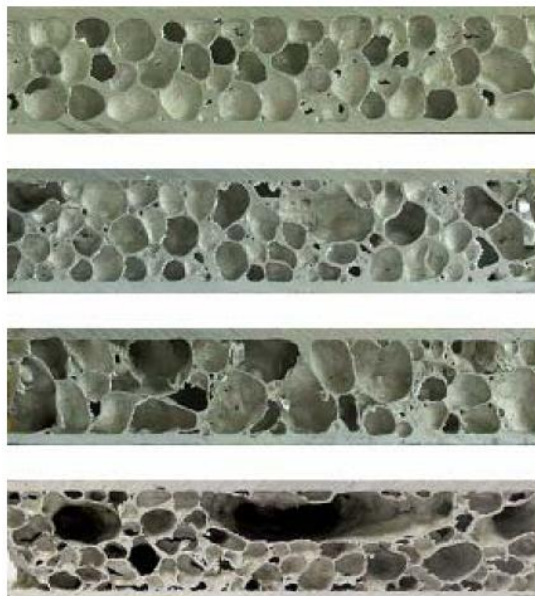
As propriedades da espuma metálica são melhoradas quando todas as células de uma espuma apresentam um tamanho homogêneo e uma forma esférica. Não há dúvida de que tanto a densidade de uma espuma metálica quanto as propriedades da liga da matriz influenciam, por exemplo, no módulo de elasticidade e resistência da espuma^{1, 25, 26}. Uma clara influência da distribuição de tamanho de célula e parâmetros morfológicos sobre as propriedades da espuma, no entanto, ainda não foi estabelecida. A razão para isto é que ainda não foi possível controlar os parâmetros durante a formação de espuma. Alguns autores consideram uma insensibilidade da resistência em relação à distribuição de tamanho de célula^{27,28}, outros afirmam que uma distribuição bimodal de tamanhos de células é particularmente favorável²⁹. A importância tem sido também atribuída à forma de paredes celulares. Especialmente as paredes celulares onduladas parecem ser prejudiciais para as propriedades da espuma³⁰. Espumas com falta de paredes celulares ou paredes das células que contêm buracos ou trincas também foram estudadas e apresentaram propriedades mecânicas inferiores às espumas perfeitas³¹. A variabilidade das propriedades mecânicas de um grupo de corpos de prova com idênticas dimensões e densidades foi analisada estatisticamente, sendo muito grande mesmo para as espumas mais regulares³². É provável que espumas mais

regulares, mesmo que não apresentem melhores propriedades mecânicas, conduzam a uma menor variabilidade dessas propriedades.

Como o processo de formação de espuma compreende diversas etapas²⁴ e cada passo pode ser influenciado por vários parâmetros, as propriedades da peça final de espuma podem variar muito se as condições de produção são alteradas. A velocidade de espumagem deve ser controlada, pois uma rápida expansão pode gerar defeitos nas paredes dos poros³³.

Outro problema é que não existe uma medida simples para a qualidade de uma espuma. Normalmente se avalia a uniformidade de células de uma forma qualitativa, olhando para as seções através de amostras de espuma. Sempre que uma espuma possui muitas células de tamanho semelhante, é muitas vezes considerado "boa", se houver muitos defeitos evidentes é chamada de "inferior". A figura 4 mostra como quatro amostras de diferentes lotes de painéis sanduíche de espuma de alumínio (AFS- aluminium foam sandwich) fabricadas pela empresa Applied Lightweight Materials (Saarbrücken, Alemanha), possuem claramente uma diferença na qualidade da espuma.

Figura 4 - Espumas de alumínio obtidas em processo industrial (melhor qualidade de cima para baixo)¹.



O estado atual do conhecimento sugere que as seguintes regras devem ser obedecidas para obter boas espumas de ligas de alumínio através da técnica de metalurgia do pó:

- O comportamento de fusão da liga e as características de decomposição do agente espumante têm que ser coordenadas. Idealmente, a evolução do gás é suprimida abaixo da temperatura de *solidus* da liga para evitar a formação de fissuras antes de fundir. Após a fusão parcial da liga, o gás liberado pelo agente espumante, em seguida, leva à formação de poros esféricos, desde que a fração líquida seja suficientemente elevada. Como TiH_2 tem uma temperatura de decomposição muito baixa, a partir de cerca de $400^\circ C$, e como as ligas de alumínio comercial têm temperaturas *solidus* acima de $525^\circ C$ há uma lacuna evidente. É claro que TiH_2 tratada não se enquadra dentro do intervalo de fusão de uma liga de alumínio comercial. As primeiras experiências de formação de espuma³⁴ foram realizadas com alumínio puro ou AlCu4. A primeira melhoria foi a substituição por ligas como, AlSi7 e AlSi12. Mais tarde a liga AlSi6Cu4 foi proposta e com êxito²⁵.

- O perfil de aquecimento durante a formação de espuma também é importante. Em fornos pré-aquecidos a temperatura geralmente se aproxima exponencialmente da temperatura final. Em fornos de aquecimento regulados, perfis quase arbitrários podem ser realizados. Verificou-se que o perfil de temperatura em torno do ponto de fusão do compactado influencia significativamente a evolução da espuma³⁵.

- Outro fator que influencia a uniformidade de espuma é a limpeza no processamento do pó. O uso de pó impuro ou a presença de água adsorvida, sujeira ou gases, entram na peça durante a compactação e parecem ter um efeito adverso sobre a formação de espuma, no sentido de que estas impurezas podem atuar como núcleos de grandes espaços vazios nos primeiros estágios da evolução de gás. Os vazios podem, então, crescer para grandes poros³⁶.

Em conclusão, a melhor receita para uma boa espuma, ou seja, uma espuma com um fator de expansão alto, uma distribuição uniforme de tamanho de célula parece ser:

- utilizar uma liga de alumínio com baixo ponto de fusão;
- utilização do TiH_2 como agente espumante que foi adaptado para a liga de pré – tratamento;
- pós e processo em condições limpas e reprodutíveis;
- tomar cuidado para evitar o sobreaquecimento durante a compactação do pó (neste trabalho não foi utilizado aquecimento na compactação);

- selecionar cuidadosamente o perfil de temperatura durante a formação de espuma: taxas de aquecimento elevadas e distribuição uniforme de temperatura são preferíveis.

2.2. Agentes espumantes

O termo "hidreto" pode ser descrito como uma combinação binária de hidrogênio e um metal. Pela natureza da ligação de hidrogênio, hidretos são classificados em três categorias principais: covalente ou voláteis, iônica e metálica.

Os hidretos são compostos que contém o elemento hidrogênio em um estado reduzido. Eles estão sob a forma de qualquer liga binária simples ou hidretos mais complexos. Na forma de H^- o hidrogênio está ligado ionicamente ou covalentemente a um metal.

O sistema de equilíbrio titânio-hidrogênio é do tipo eutetóide simples, com soluções sólidas intersticiais sendo uma solução alfa de hidrogênio em titânio e uma fase gama aproximando-se da composição estequiométrica TiH_2 ³⁷. A pureza do hidrogênio e do titânio usados devem ser extremamente altas para se alcançar a composição estequiométrica TiH_2 . O pó de hidreto de titânio possui propriedades metálicas como alta condutividade elétrica e é menos denso e mais frágil do que o metal de origem. Tem cor cinza-metálico, com densidade de $3,8 \text{ g/cm}^3$, é estável em temperatura ambiente e inerte na água e em grande parte dos reagentes químicos. Outros hidretos também podem ser utilizados, como por exemplo o ZrH_2 ³⁸.

2.3. Obtenção de Espuma

As espumas metálicas podem ser obtidas por diversas maneiras¹¹, basicamente são divididos em dois grandes grupos, por fundição e por metalurgia do pó^{39,40}, além dos métodos de deposição de vapor metálico e deposição eletroquímica.

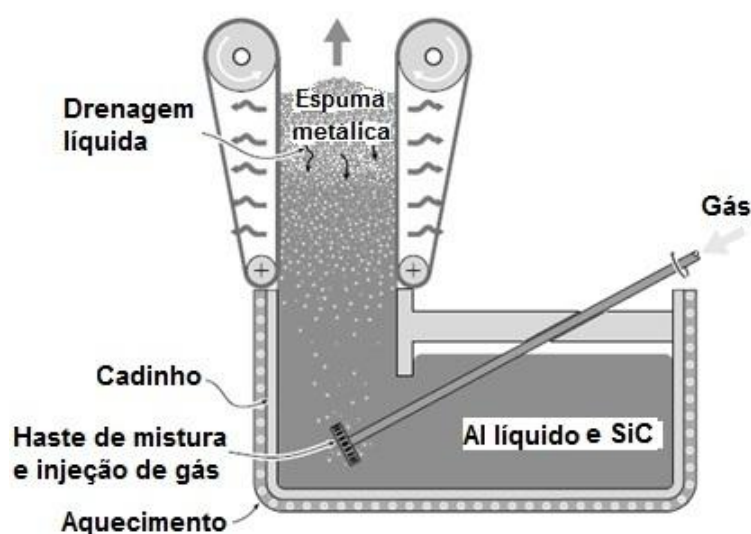
2.3.1. Obtenção de espumas por fundição

Os dois principais métodos de obtenção de espumas metálicas por fundição são mostrados a seguir.

2.3.1.1. Obtida pelo método de injeção e gás

Uma variedade de ligas de alumínio pode ser usada para a produção de espumas metálicas por injeção de gases. Existem diversas variantes do método, uma das quais é mostrada na figura 5. O metal fundido é efervescido com injeção de gases (ar, nitrogênio, etc) introduzidos por mecanismos especiais rotativos ou bocais vibratórios. O SiC tem função de controlar a viscosidade do líquido. Estas ferramentas geram finas bolhas de gás na mistura e as distribuem uniformemente. A densidade da espuma produzida nesse processo varia de $0,069 \text{ g/cm}^3$ a $0,54 \text{ g/cm}^3$, na média, e o tamanho dos poros varia de 25mm a 3mm, com espessura de $50\mu\text{m}$ a $85\mu\text{m}$ de parede. O tamanho da célula tem relação inversamente proporcional à espessura da parede e a densidade pode ser influenciada ajustando o fluxo da inserção de gases, a velocidade do mecanismo que impele os gases e a frequência da vibração dos bocais, entre outros. Como vantagens tem-se a capacidade de processo contínuo em larga escala e as baixas densidades que podem ser alcançadas. Uma possível desvantagem é o corte na espuma ao longo do processo, que causa a abertura dos poros.

Figura 5 - Ilustração esquemática do processo de obtenção de espuma de alumínio pelo método de injeção de gás (processo CYMAT e HYDRO)¹.

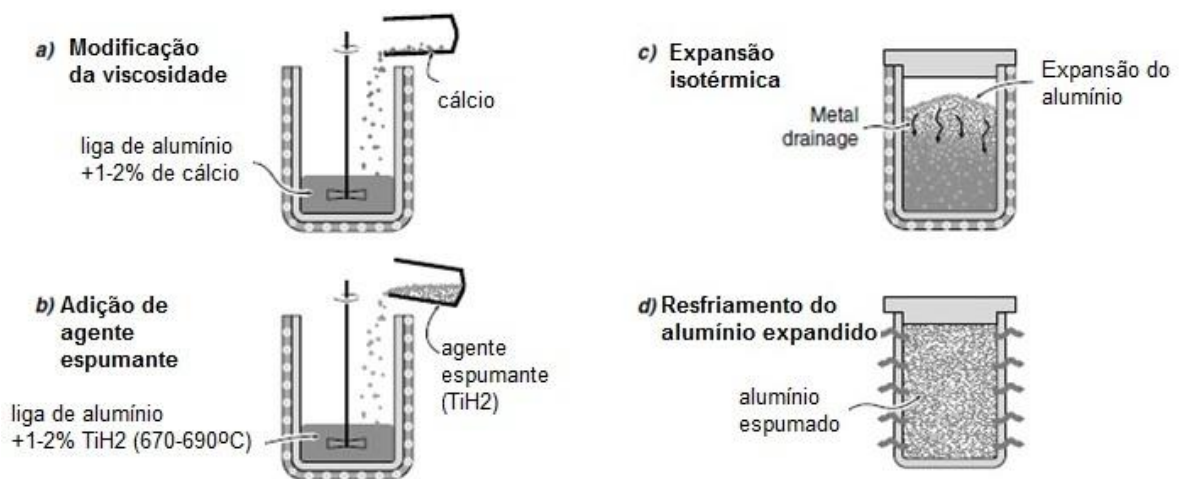


2.3.1.2. Liberação de gás na decomposição de partícula por fundição

Uma segunda forma de criar espumas metálicas diretamente a partir de metal fundido é adicionar agentes efervescentes a este ao invés de injetar gás. O calor faz com que o agente efervescente se decomponha, libere gases e impulsione o processo de formação de vazios. O método é mostrado na figura 6.

A empresa Shinko Wire Company (Japão) já produz espumas desta forma desde 1986 com produção superior a 1.000kg por dia. O metal fundido começa a se expandir lentamente e gradualmente enche a forma de espuma metálica, sendo todo este processo sob pressão constante. Depois de resfriada a forma, o metal líquido transforma-se em espuma sólida e pode ser retirada deste molde para seguir para os próximos procedimentos. O processo todo leva em torno de 15 minutos para um tamanho típico (2050 x 650 x 450mm). De fato, as espumas produzidas desta forma, de nome comercial Alporas, parecem ser as mais homogêneas espumas de alumínio disponíveis atualmente. A densidade típica, após o corte das laterais do molde, fica entre $0,18 \text{ g/cm}^3$ e $0,24 \text{ g/cm}^3$ com diâmetro de poros entre 2 e 10mm.

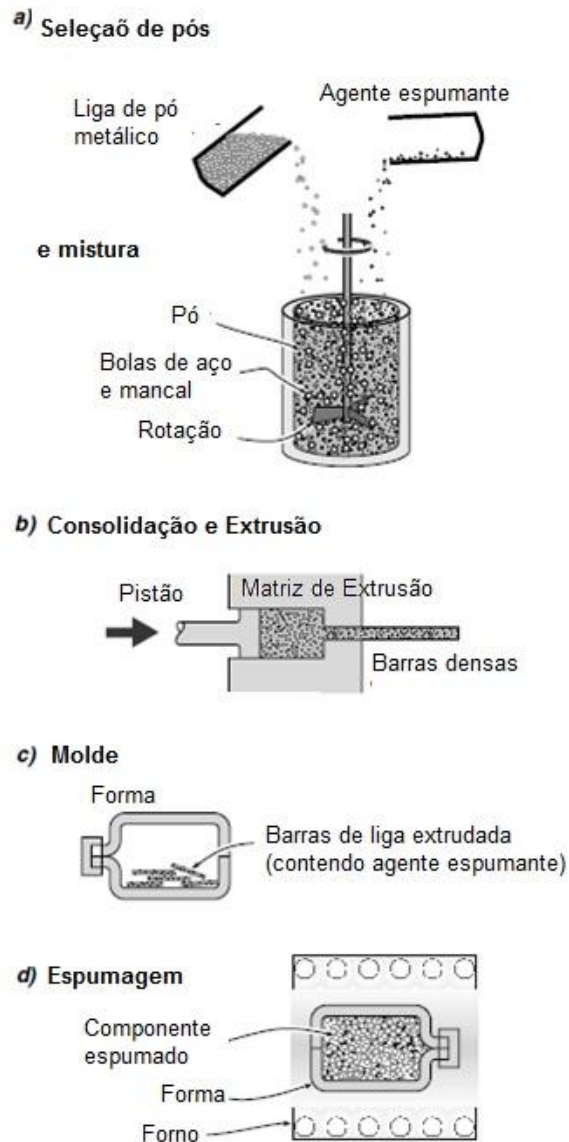
Figura 6 - Etapas do processo de obtenção de espuma de alumínio pelo método de liberação de gás de partícula por fundição (processo Alporas).



2.3.2. Por Metalurgia do Pó

Banhart et al.⁴¹ e posteriormente Koza, et al.⁴², descreveram a técnica de obtenção via metalurgia do pó, utilizando na etapa de compactação o processo de extrusão, como mostra a figura 7.

Figura 7 - Processo de obtenção de espuma metálica por metalurgia do pó (processo Fraunhofer e Alulight).



O processo inicia-se pela combinação de partículas de pó de um agente espumante (hidreto de titânio, normalmente) com um pó de liga de alumínio. Depois que os pós são misturados, a mistura é extrudada em uma barra ou placa de densidade próxima da teórica. Este material precursor (ou compactado) é cortado em pequenos pedaços, colocados dentro de um molde selado e aquecido até um pouco acima da temperatura *solidus* da liga. O hidreto de titânio, em seguida, se decompõe, criando espaços vazios com uma alta pressão interna, conforme figura 7. Vários grupos desenvolveram essa abordagem como o *Fraunhofer*

Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM) em Bremen, na Alemanha, LKR Randshofen, na Áustria e Neuman-Alu em Marktl, na Áustria. Isto garante uma homogeneização da distribuição dos pós. Pode-se incluir esta estrutura compactada entre chapas, tubos e perfis por técnicas convencionais de laminação e/ou extrusão antes de levar ao forno⁴¹. Quando há o aquecimento até a temperatura de fusão do pó compactado ocorre o fenômeno de expansão da espuma.

Kim et al.⁴³, também obtiveram espuma metálica utilizando pós de alumínio e hidreto de titânio. A vantagem de utilizar a técnica de obtenção de espuma via metalurgia do pó é a possibilidade de ter peças extremamente leves e próximas da forma final de uso, pois amostras compactadas próximo da forma final podem ser levadas ao forno, é importante garantir uma distribuição homogênea do agente espumante. A compactação dos pós é dependente da aplicação desejada para a espuma sendo a melhor rota a extrusão, mas a compactação uniaxial também é bastante utilizada em testes laboratoriais. Compactar o pó com técnicas de laminação ou pressão isostática são mais complicadas e, por isso utilizadas somente para casos especiais.

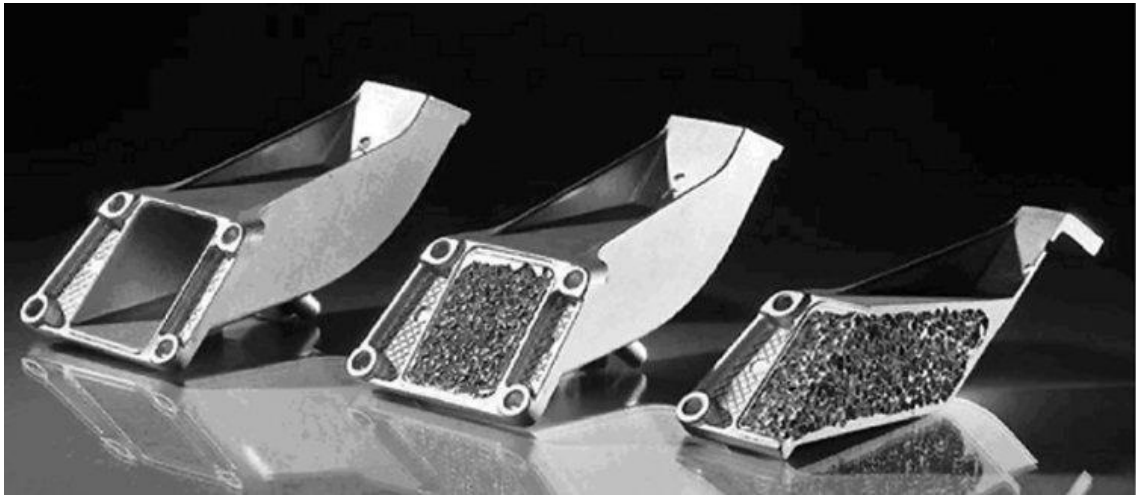
2.4. Estruturas/Chapas Sanduíche

A partir das espumas metálicas é possível formar as estruturas do tipo sanduíche. No caso da utilização de espumas de alumínio, o termo em inglês *AFS – Aluminium Foam Sandwich* é empregado. Estruturas sanduíches consistem em estruturas com o “miolo” de espuma e superfície densa, que podem ser tanto chapas planas (figura 8), como estruturas mais complexas (figura 9).

Figura 8 - Chapas sanduíches (ALUlight®).

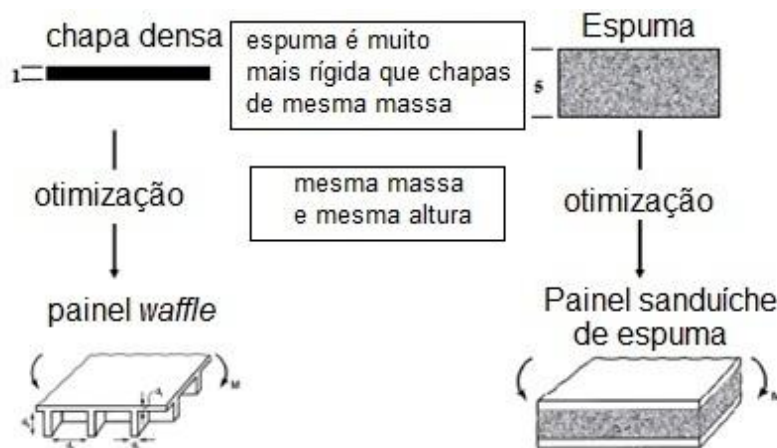


Figura 9 - Exemplo de estruturas preenchidas com espuma metálica (metcomb® Nanostructures).



Um bom projeto de estruturas sanduíches com base nas chapas densas podem aperfeiçoar as propriedades de compressão, tração, torção ou flexão^{1,15} das espumas metálicas. Uma simples espuma também pode ser melhorada combinando com chapas, como mostra a figura 10. As estruturas regulares à esquerda são mais resistentes do que as espumas irregulares à direita¹.

Figura 10 - Otimização de chapas densas e espumas metálicas⁶.

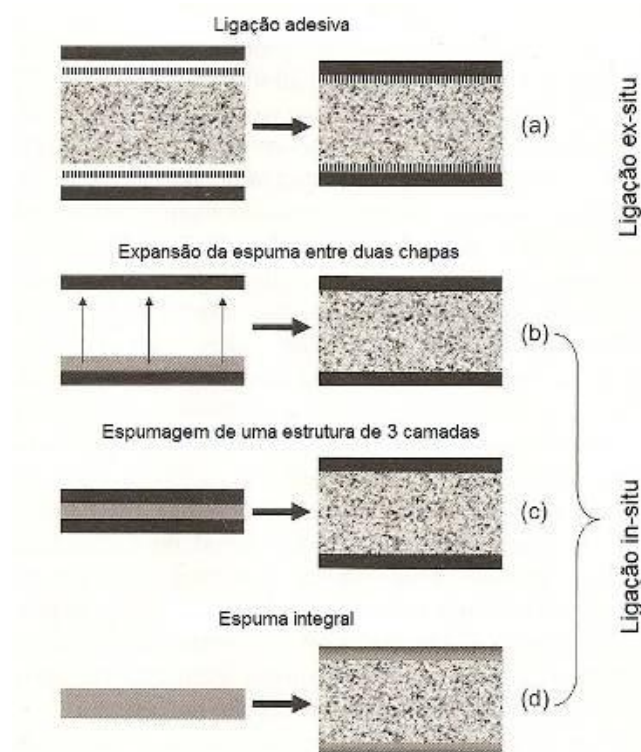


Na prática, a seleção de materiais não é exclusivamente orientada pelo parâmetro de resistência. Outros aspectos também são importantes como:

- 1) a capacidade de produzir formas 3D;
- 2) os custos, estruturas sanduíche tem custo moderado;
- 3) limite elástico;
- 4) tolerância ao dano, sofrer dano sem uma imediata falha;
- 5) pode ser não inflamável, quando produzidos sem adesivos.

Considerando todos estes aspectos, aplicações reais para estruturas sanduíche de espuma de alumínio podem ser encontradas. A primeira indústria automobilística que utilizou a tecnologia foi a montadora alemã Karmann (apresentado no item 2.8.1), que apresentou um carro-conceito baseado em painéis sanduíche em 1996⁴⁴. Atualmente, mais aplicações estão surgindo.

Figura 11 - Tecnologias de produção de estruturas sanduíche⁶.



Várias tecnologias são propostas para a produção de painéis sanduíches combinando espumas de alumínio e chapas metálicas, como mostra a figura 11.

O método mais óbvio é a partir de um corpo de espuma metálica e fixados em chapas, por exemplo, por colagem, brasagem ou ligação por difusão. Esse método é chamado de união *ex-situ* (figura 11a). Um painel de espuma é colado entre as duas chapas. As propriedades do painel sanduíche resultantes são, então, dadas pela interação de espuma, chapas e a adesão. O adesivo pode adicionar propriedades valiosas, como por exemplo uma alta capacidade de amortecimento. Geralmente os problemas associados com a cola podem reduzir a resistência, elevar os custos, dificultar a reciclagem e adicionar massa. Outra maneira de combinar fabricação de espuma metálica com as chapas é formando uma união *in-situ* (figura 11b, c e d). Como as espumas são formadas quando o metal está líquido/pastoso, este método envolve etapas de processamento em alta temperatura.

Outro método de fabricação foi desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer em 1992 (figura 11c). Uma estrutura de três camadas de uma liga de alumínio, no meio uma liga de alumínio contendo TiH_2 como um agente espumante, e duas chapas de ambos os lados (geralmente liga Al, mas aço e titânio, também podem ser utilizados), após o qual a camada central do painel é expandido por aquecimento até à temperatura de formação de espuma.

A preparação de um painel de três camadas pode ser feita pela simples expansão de um compactado entre duas chapas mantidas a certa distância, figura 11b. Esse procedimento, porém, leva a dificuldades pela formação de camadas de óxido em ambas chapas e a espuma, dificultando uma adequada ligação metálica entre as camadas. Além disso, o controle de temperatura é mais difícil, neste caso o calor tem de ser introduzido na espuma, através das chapas e o perigo da fusão destes é elevado no caso de chapas de alumínio. Por isso, esta tecnologia ainda está em fase experimental⁴⁴.

Mais uma estratégia para a fabricação do AFS é manipular o processo de formação de espuma em uma maneira que uma superfície densa é criada durante a formação de espuma sem usar as chapas, figura 11d.

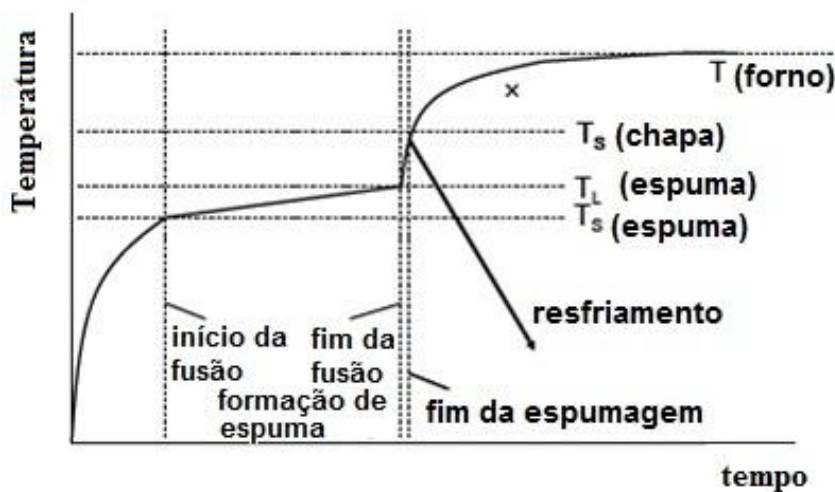
A chapa e o núcleo de espuma tem que ser constituídos de ligas com pontos de fusão diferentes, já que a formação de espuma ocorre no estado semisólido ou líquido. Nessas temperaturas a chapa não deve fundir. Inicialmente as práticas de formação de espuma os compactados foram aquecidos a temperaturas bem acima do ponto de fusão do material expansível (por exemplo, $750^{\circ}C$) para assegurar um rápido aumento de temperatura no

material após ter sido colocado dentro do forno. A curva de temperatura correspondente é mostrada na figura 12. As chapas e o núcleo expansível estão em contato estreito e a condutividade térmica dentro das duas ligas é alta, a temperatura é aproximadamente a mesma em todo o material. Após a temperatura de fusão total subir rapidamente, as chapas começam a fundir, a menos que a amostra seja retirada do forno para o resfriamento⁴⁵. A temperatura de solidificação ou temperatura *solidus* das chapas T_s , portanto, tem de estar acima da temperatura *liquidus* T_L da espuma. Isso restringe o número de combinações de ligas utilizáveis. Inicialmente as escolhas de materiais geralmente eram de alumínio puro ou liga 3003 (AlMn1) para chapas e ligas Al-Si próximo do eutético (figura 13) para a espuma.

Desta forma, uma ampla gama de combinações de ligas pode ser processada. Três grupos de chapas estão sendo usados⁴⁴:

- ligas 3000 não tratadas termicamente, principalmente, 3103 (AlMn1);
- ligas 5000 não tratadas termicamente: 5083 (AlMg4.5Mn), 5754 (AlMg3) ou 5005 (AlMg1);
- ligas 6000, tratadas termicamente: 6016, 6060 ou 6082 (sistema de Si Al-Mg-).

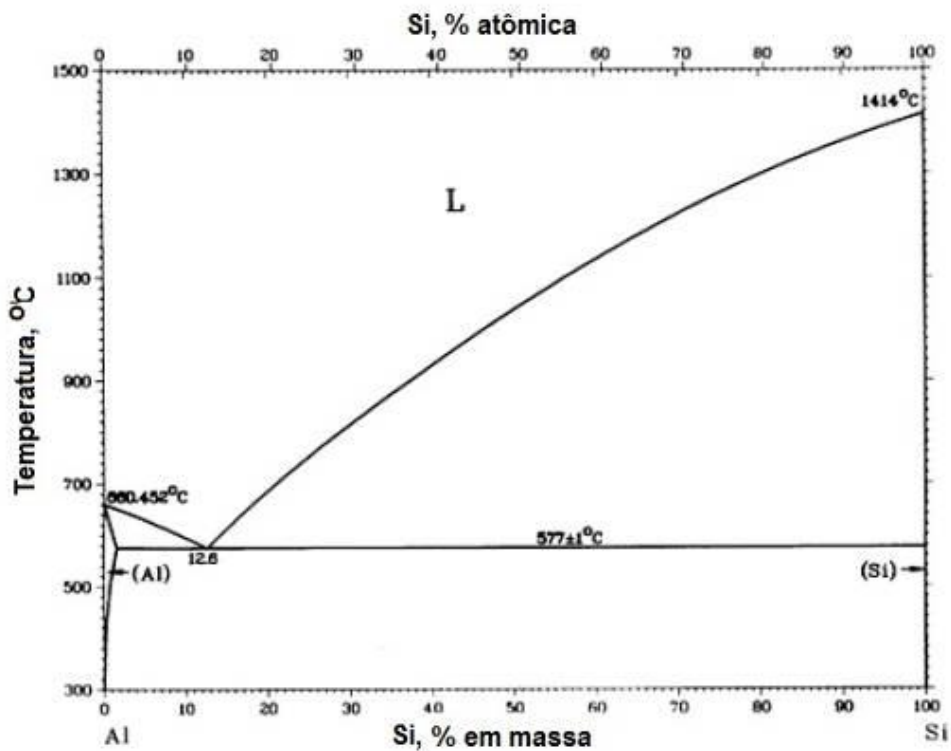
Figura 12 - Curva de temperatura X tempo de formação de estrutura sanduíche⁶.



Para o núcleo da espuma, dois grupos de ligas com base no sistema Al-Si, foram desenvolvidos e testados. Atualmente a liga AlSi6Cux ($x \approx 3 \dots 7$) é a preferida devido a sua temperatura de solidificação ser muito baixa e ao bom comportamento na formação de espuma. Em todos os casos, o núcleo contém agente espumante TiH_2 . Espuma de painéis maiores é um verdadeiro desafio, uma vez que um perfil de temperatura uniforme tem que ser mantido em uma área de até $3m^2$. Os desvios podem levar ao colapso de espuma ou danos.

Há ainda um novo processo sendo estudado, onde esferas de espuma de alumínio são unidas por polímeros e introduzidas em um componente⁴⁶.

Figura 13 - Diagrama de fases da liga alumínio e silício⁴⁶.

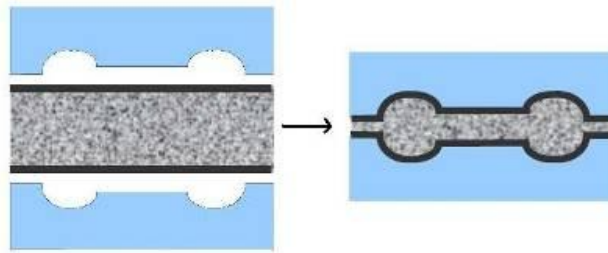


2.5. Conformação de Chapas Sanduíche

Embora a tecnologia de Estruturas de Sanduíche de Alumínio permita a produção de painéis sanduíche em forma 3D, estes têm uma seção transversal praticamente constante e arestas abertas. A estampagem proporciona uma opção de fabricar peças fechadas com formas mais complexas, mantendo um núcleo poroso. Para isso, painéis sanduíche são cortados em

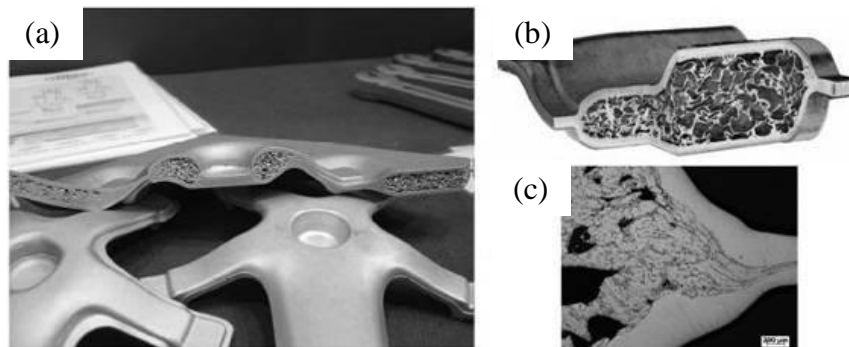
um tamanho adequado e são conformados em uma matriz. A figura 14 mostra esquematicamente o processo de obtenção de uma peça. Um possível resultado é mostrado na figura 15.

Figura 14 - Esquema de conformação de chapas sanduíche de espuma de alumínio⁶.



Ainda que se possa esperar que a conformação danifique grande parte da estrutura da espuma, a imagem da figura 15b mostra que este não é o caso. A figura 15c demonstra o benefício do método, uma densificação muito boa na margem da peça que lacra o núcleo de espuma e facilita a fixação do componente em sistemas de engenharia. Estudos mais recentes já mostram a simulação numérica na estampagem de chapas sanduíche⁴⁷.

Figura 15 - Possível resultado de conformação de chapas sanduíche de espuma de alumínio⁶.



2.7. Propriedades Mecânicas

Neste capítulo serão descritos os métodos de avaliação de propriedades mecânicas como ensaio de flexão em chapas sanduíche e absorção de energia de espumas metálicas e tubos preenchidos com espuma, segundo ASHBY et. al.¹.

A literatura ¹ apresenta propriedades mecânicas de metais celulares de diversos fabricantes, que são mostradas pela tabela 1.

Tabela 1: Propriedades mecânicas de metais celulares comerciais¹.

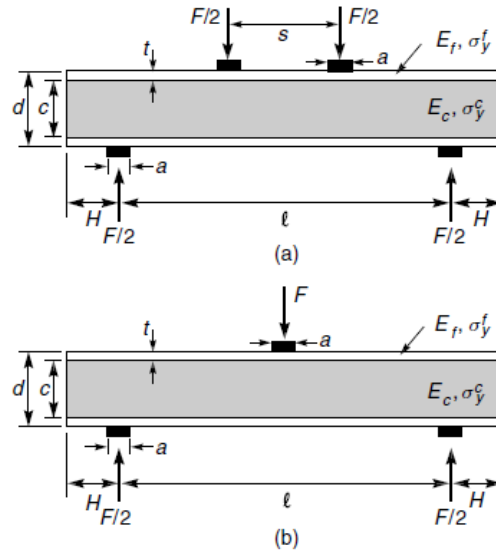
Propriedade (unidade), símbolo	Nome comercial				
	Cymat	Alulight	Alporas	ERG Duocel®	Inco
Material	Al-SiC	Al	Al	Al	Ni
Densidade relativa, ρ/ρ_s	0,02-0,2	0,1-0,35	0,08-0,1	0,05-0,1	0,03-0,04
Estrutura celular	fechada	fechada	fechada	aberta	aberta
Módulo de elasticidade (GPa), E	0,02-2,0	1,7-12	0,4-1,0	0,06-0,3	0,4-1,0
Módulo de cisalhamento (GPa), G	0,001-1,0	0,6-5,2	0,3-0,35	0,02-0,1	0,17-0,37
Módulo de flexão (GPa), E_{fy}	0,03-3,3	1,7-12,0	0,9-1,2	0,06-0,3	0,4-1,0
Coefficiente de Poisson. ν	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34	0,31-0,34
Resistência a compressão (MPa), σ_c	0,04-7,0	1,9-14,0	1,3-1,7	0,9-3,0	0,6-1,1
Tensão de escoamento (MPa), σ_y	0,04-7,0	2,0-20	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Resistência a tração (MPa), σ_t	0,05-8,5	2,2-30	1,6-1,9	1,9-3,5	1,0-2,4
Deformação de densificação, ε_D	0,6-0,9	0,4-0,8	0,7-0,82	0,8-0,9	0,9-0,94
Tenacidade a fratura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), K_{IC}	0,03-0,5	0,3-1,6	0,1-0,9	0,1-0,28	0,6-1,0

2.6.1. Ensaio em Chapas Sanduíche

Considere uma viga sanduíche de largura b uniforme, com duas chapas idênticas de espessura t perfeitamente ligadas a um núcleo de espuma metálica de espessura c . Esta estrutura pode ser ensaiada a quatro pontos, como esboçado na figura 16(a), ou um de três pontos como mostrado na figura 16(b). Para ambos os casos de carregamento, a distância entre os apoios é ℓ e a distância da extremidade até o suporte exterior é H . Pode-se prever que as vigas são carregadas por penetradores de superfície chapa de dimensão a . A carga total aplicada à viga é F . No caso de flexão por quatro pontos, os dois penetradores são espaçadas a uma distância s . Tanto o núcleo como a chapa são tratados como isotrópicos, com um módulo

de elasticidade E_f para chapa e E_c para o núcleo (espuma). A deformação elástica δ dos penetradores na face superior em relação aos apoios da face inferior é a soma da deformação de flexão e de cisalhamento.

Figura 16 - Ensaio de flexão em estrutura sanduíche, (a) a quatro pontos e (b) a três pontos.



Para três pontos a deformação elástica pode ser calculada por:

$$\delta = \frac{F\ell^3}{48(EI)_{eq}} + \frac{F\ell}{4(AG)_{eq}} \quad (1)$$

A é a área da seção transversal da espuma.

Para quatro pontos a deformação elástica pode ser calculada por:

$$\delta = \frac{F(\ell - s)^2(\ell + 2s)}{48(EI)_{eq}} + \frac{F(\ell - s)}{4(AG)_{eq}} \quad (2)$$

Onde a resistência a flexão equivalente $(EI)_{eq}$ é:

$$(EI)_{eq} = \frac{E_f b t d^2}{2} + \frac{E_f b t^3}{6} + \frac{E_c b c^3}{12} \quad (3)$$

2.6.2. Ensaio em Tubos

Tubos de metal com paredes finas são absorvedores de energia eficiente quando esmagadas axialmente. Por "eficiente" significa que a energia absorvida por unidade de volume ou por unidade de peso é elevado. Quando a espuma é comprimida, as paredes da célula deformam e continuam se deformando com uma tensão quase constante até que as faces da célula colidam. O tubo se comporta de uma maneira diferente: a deformação ocorre em uma série de anéis regulares como dobras até que, quando o tubo inteiro se deformou, as faces da dobra entram em contato, como nas figuras 17 e 18.

As curvas força-deslocamento para ambos têm a forma aproximada mostrada na figura 19(a): uma linha linear-elástica de carga, um patamar constante ou platô de força, F_m , seguido por uma seção com aumento acentuado com o encontro das paredes celulares ou dobras do tubo. Ao dividir F_m pela seção transversal do cilindro (πr^2) e pelo deslocamento do comprimento original (L_0) a curva força-deslocamento pode ser convertido para uma "eficaz" curva tensão-deformação, como mostra a Figura 19(b). A inclinação do carregamento fornece o módulo de elasticidade (E), o platô está agora na tensão σ_{pl} , e a curva termina na tensão de densificação ε_D . A área sombreada é a energia útil absorvida por unidade de volume da estrutura. A figura 20 mostra as curvas carga-deformação para a compressão de uma espuma, de um tubo e um tubo cheio de espuma.

Figura 17 - Absorção de energia de espuma metálica cilíndrica e tubo metálico¹.

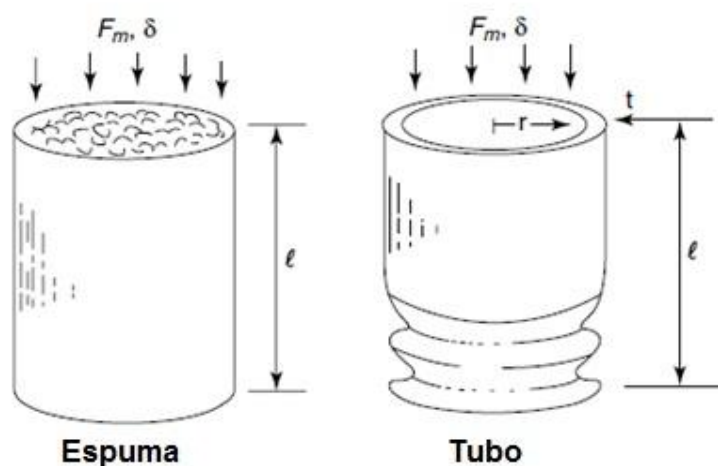


Figura 18 - Secção do tubo com e sem preenchimento de espuma metálica após sofrer compressão¹.

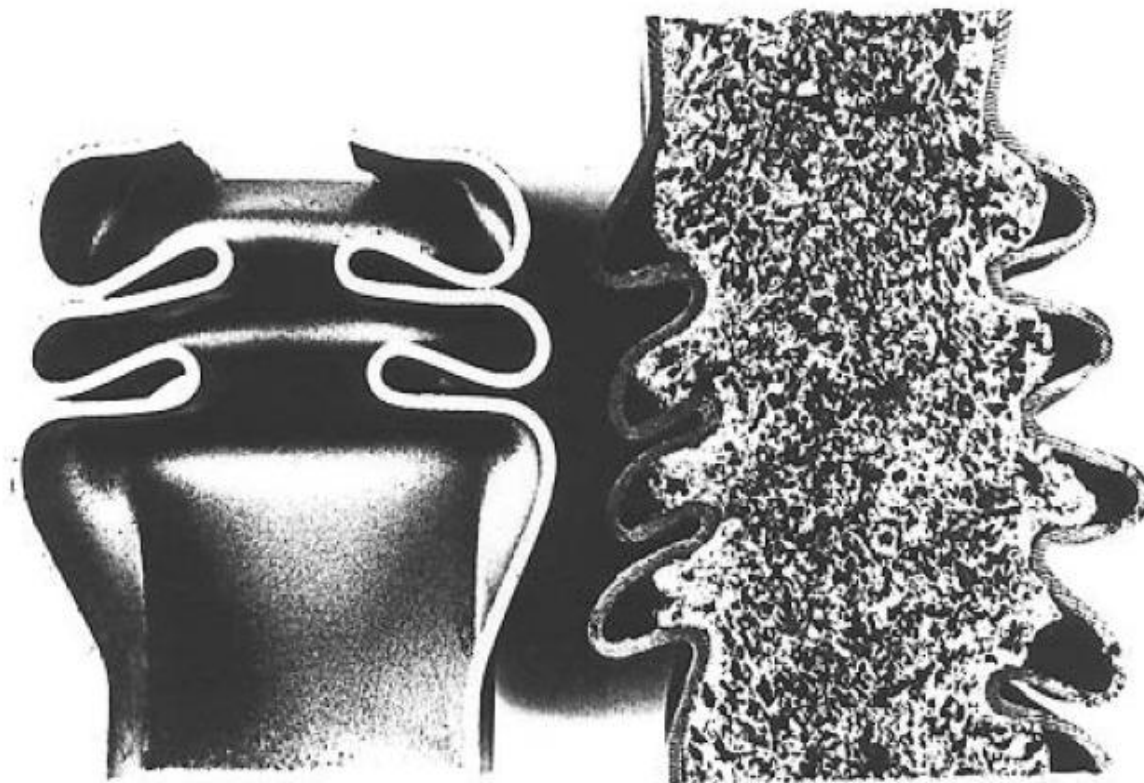


Figura 19 - (a) curva de carga-deslocamento e (b) curva tensão-deformação¹.

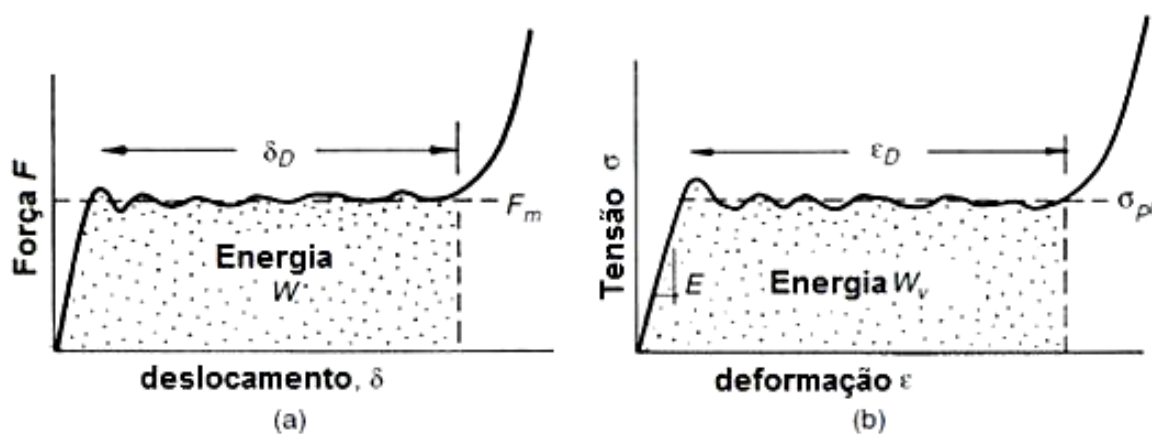
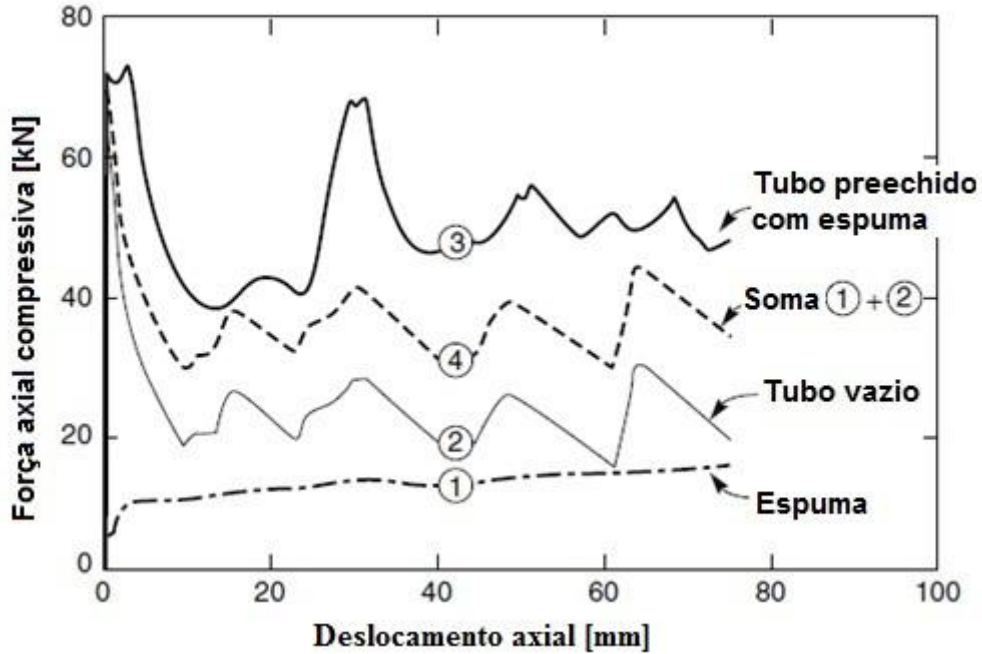


Figura 20 - Curva de carga-deslocamento de uma espuma, um tubo, um tubo preenchido e a soma da curva 1 com a curva 2¹.



Os tubos apresentam ondas regulares, como oscilações de carga, cada onda correspondendo à formação de uma nova dobra. Um tubo circular de comprimento ℓ , raio exterior r e a espessura da parede t ($t \ll r$) e tensão de escoamento do sólido σ_{ys} , na compressão axial.

$$F_m = 4\pi r^{1/3} t^{5/3} \sigma_{ys} \quad (4)$$

A carga permanece praticamente constante até as dobras do tubo se encontrarem, com uma deformação ϵ_D^{Tubo} , dando um deslocamento axial,

$$\delta = \ell \epsilon_D^{tubo} \quad (5)$$

A energia absorvida por unidade de volume do tubo é,

$$W_v^{Tubo} = \frac{F_m \delta}{\pi r^2 \ell} = 4 \left(\frac{t}{r} \right)^{5/3} \sigma_{ys} \epsilon_D^{Tubo}$$

A quantidade $2t/r$ é a densidade relativa efetiva do tubo, ρ/ρ_s , dando,

$$W_v^{Tubo} = 2^{1/3} \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{5/3} \sigma_{ys} \varepsilon_D^{Tubo} \quad (6)$$

A espuma absorve uma energia por unidade de volume de,

$$W_v^{Espuma} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{3/2} \sigma_{ys} \varepsilon_D^{Espuma} \quad (7)$$

A densificação tanto do tubo como da espuma envolvem o dobramento do tubo ou o toque das paredes da célula; para a primeira aproximação das deformações ε_D^{Tubo} e ε_D^{Espuma} são iguais na mesma densidade relativa. Assim, o tubo é mais eficiente do que a espuma pelo fator de aproximação

$$\frac{W_v^{Tubo}}{W_v^{Espuma}} \approx 4.2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/6} \quad (8)$$

Para todos os valores reais de ρ/ρ_s , a absorção do tubo é mais eficiente que a espuma, com uma energia/ volume de base, por um fator de cerca de 3. Os resultados equivalentes de energia absorvida por unidade de peso são

$$W_w^{Tubo} = \frac{F_m \delta}{2\pi r t \rho_s} = 2 \left(\frac{t}{r} \right)^{2/3} \frac{\sigma_{ys}}{\rho_s} \varepsilon_D^{Tubo}$$

Ou, substituindo $2t/r$ por ρ/ρ_s ,

$$W_w^{Tubo} = 2^{1/3} \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{2/3} \frac{\sigma_{ys}}{\rho_s} \varepsilon_D^{Tubo} \quad (9)$$

Para espuma é:

$$W_w^{Espuma} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{1/2} \frac{\sigma_{ys}}{\rho_s} \varepsilon_D^{tEspuma} \quad (10)$$

2.6.3. Tubos preenchidos com espuma

Um ganho de eficiência é possível mediante o preenchimento de tubos de metal com espuma. O efeito é demonstrado na figura 20 em que a soma de cada uma das cargas transportadas por um tubo e uma espuma, com um deslocamento dado, é comparado com o resultado medido quando a espuma é inserida no tubo. Este aprimoramento sinérgico é descrito pela a energia adicional absorvida, $W_v^{Int.}$, que surge da interação entre o tubo e a espuma.

$$W_v^{Tubopreenhido} = W_v^{Tubo} + W^{Espuma} + W_v^{Int.} \quad (11)$$

Isso ocorre porque a espuma fornece suporte interno para a parede do tubo, encurtando o comprimento de onda das dobras. Um ganho similar na eficiência de absorção de energia encontra-se em dobramento de tubos preenchidos⁴⁸. Desde que a densidade da espuma seja adequadamente escolhida, o aumento da carga de colapso, F_m , é tal que a energia $F_m\delta$ aumenta em até 30%¹.

2.6.4. Equações de relação de espuma metálica e metal denso.

Ashby¹ traz em seu “Guia de Projetos” para Espumas Metálicas equações que relacionam propriedades mecânicas de metais sólidos e metais celulares (porosos) de acordo com sua densidade.

São apresentadas três dessas equações, de materiais celulares de célula fechada (espumas), que mais se aplicam neste trabalhos.

$$\text{Módulo de Young (GPa), } E: \quad E = (0,1-1,0)E_s \times \left[0,5 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^2 + 0,3 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right] \quad (12)$$

$$\text{Tensão de Escoamento (MPa), } \sigma_c: \quad \sigma_c = (0,1-1,0)\sigma_{c,s} \times \left[0,5 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{2/3} + 0,3 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right) \right] \quad (13)$$

Deformação de Densificação, ε_D :
$$\varepsilon_D = (0,9 - 1,0)E_s \times \left[1 - 1,4 \frac{\rho}{\rho_s} + 0,4 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^3 \right] \quad (14)$$

ρ : densidade da espuma metálica;

ρ_s : densidade do metal sólido;

2.7. Aplicações de espuma de alumínio

2.7.1. Automotivo

A indústria automotiva tem se mostrado como um dos setores mais promissores para a utilização e viabilização de seu custo através da produção em massa para um grande mercado em expansão.

A crescente demanda por segurança no setor automotivo impulsionou a busca por veículos mais resistentes e ao mesmo tempo mais leves. Este conflito, entre elas o baixo consumo de combustível, necessita de medidas adicionais para redução de peso. Especialmente na Europa e Japão, carros com dimensões reduzidas são desejados. Esta redução, todavia, não deve tomar o lugar do compartimento do passageiro. Para tanto, é preferível introduzir novas tecnologias para reduzir a estrutura sem comprometer o conforto. Também há demanda por reduzir as emissões acústicas dos carro com novos absorvedores de ruídos e aumentar a segurança em carros tão compactos.

De acordo com Banhart⁶, as espumas metálicas oferecem a possibilidade de solução para alguns destes problemas. A figura 21 demonstra três campos de aplicação das espumas metálicas (principalmente de espuma de alumínio para a indústria automotiva). Os círculos representam os três campos que devem ser diferenciados e as caixas de texto ilustram suas propriedades, que são responsáveis pelas vantagens. Uma aplicação ideal seria quando um mesmo componente com peso reduzido e capaz de absorver energia em caso de impacto, também fosse isolante de som e/ou calor, na intersecção entre os círculos. Tais propriedades multifuncionais são, é claro, difíceis de se encontrar em um único material.

No presente trabalho, os estudos estão focados nas áreas de estruturas leves e absorvedores de energia.

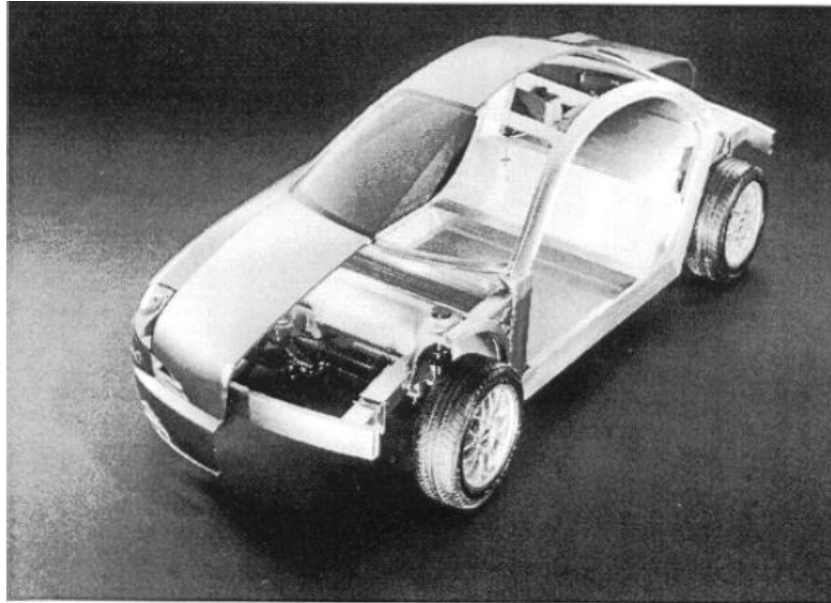
Figura 21 - Campos de aplicação da espuma metálica com função estrutural no setor automotivo⁴⁸.



Assim, tem-se como potenciais aplicações das espumas metálicas na indústria automotiva, em painéis sanduíches, reforços estruturais, elementos absorvedores de impacto, amortecimento de vibrações, elementos filtrantes, entre outros, vindo de encontro das tendências do mercado: redução de peso dos veículos para melhorar o desempenho e menor consumo de combustível, além do aprimoramento em segurança.

A figura 22, apresenta um automóvel fabricado pela Karmann GmbH, da Alemanha, empregando o conceito de chapas sanduíche de alumínio na carcaça e que segundo a empresa levaria a uma redução de 60kg de massa, resultando numa economia combustível de 1,1 Km por litro.

Figura 22 - Veículo desenvolvido pela empresa alemã Karmann com espuma metálica.



A empresa ALUSION construiu um braço móvel, mostrado na figura 23, para suporte e reparo em altura. O objetivo era aumentar o alcance vertical da plataforma de 20m para 25m, mantendo o peso total do veículo abaixo de 3,5 toneladas, para que assim o veículo continuasse a pertencer a categoria a qual se enquadra atualmente.

Figura 23 - Aplicação de chapas sanduíche na redução de peso estrutural (ALUSION).



2.7.2. Absorção de energia em caso de impacto

Segundo Banhart⁶, nos estudos de aplicações para absorção de energia em caso de impacto, um item a ser explorado é a deformação plástica. Muitos materiais celulares são

excelentes absorvedores de energia, apresentando grandes deformações a níveis praticamente constantes de tensão. Tal comportamento é ilustrado pela figura 19, que representa a curva tensão-deformação esquemática para uma espuma metálica, na qual a região do platô representa a grande capacidade de absorção de energia sob tensão constante.

Pode-se verificar que, sob pressão, o corpo de espuma metálica apresenta um comportamento esperado de um material celular, com uma fase elástica inicial, seguida por uma zona de transição, um platô e densificação. Na fase plástica, a curva apresenta uma inclinação extremamente baixa, caracterizando um platô, no qual um pequeno aumento de força desencadeia uma grande deformação, que ocorre em consequência da deformação progressiva da estrutura celular. Segundo Jorge e Arruda⁴⁹, este platô caracteriza, conforme citado anteriormente, uma grande capacidade de absorção de energia mecânica pelo material celular sob tensão constante. Após esta etapa, a inclinação da curva começa a subir, indicando o colapso da estrutura e, portanto, a compactação e adensamento do material.

Espumas metálicas podem ter uma performance muito melhor que outras espumas convencionais, como por exemplo, as poliméricas, pois são muito mais resistentes. O que faz a espuma de alumínio ser mais atrativa é seu baixo “ricochete” em situações de impactos dinâmicos, com índice menor que 3%, enquanto espumas de poliuretano celular apresentam índices de até 15%¹. Assim, um importante campo de aplicação para os metais celulares em geral e especificamente para as espumas metálicas é o de absorção de energia em impactos.

Segundo Ashby¹, diferentes situações de impacto podem ser citadas na segurança regular em veículos, como quando há colisão e a energia é dissipada em designadas áreas protegendo o local do passageiro. Em baixas velocidades (3-10 km/h), o impacto pode ser absorvido reversivelmente por materiais elásticos ou dispositivos hidráulicos de impacto. Em velocidades acima de 20 km/h, uma deformação programada é prevista em elementos designados para colisão: *crash boxes*, que podem ser simples tubos circulares de alumínio (figura 24). Estes elementos podem ser facilmente repostos após a colisão tornando os reparos acessíveis. Somente em altas velocidades o chassi é deformado irreversivelmente com severo dano ao veículo.

Figura 24 - Componentes absorvedores de energia (CYMAT).



Estes *crash boxes* são colocados entre o para-choque e a frente da estrutura do veículo para absorver a energia de impactos médios (figura 25).

Absorvedores de impacto são utilizados também em veículos sobre trilhos. Um exemplo são os veículos COMBINO, conceito de trem modular. Os trens devem ter uma proteção inferior frontal que previna o impacto de pedestres e os danos que podem ser causados. Neste caso os absorvedores da energia de impacto são feitos de polímeros estruturais reforçados internamente por espuma metálicas (figura 26).

Figura 25 - Sistema de absorção de impacto frontal em automóveis (CYMAT).

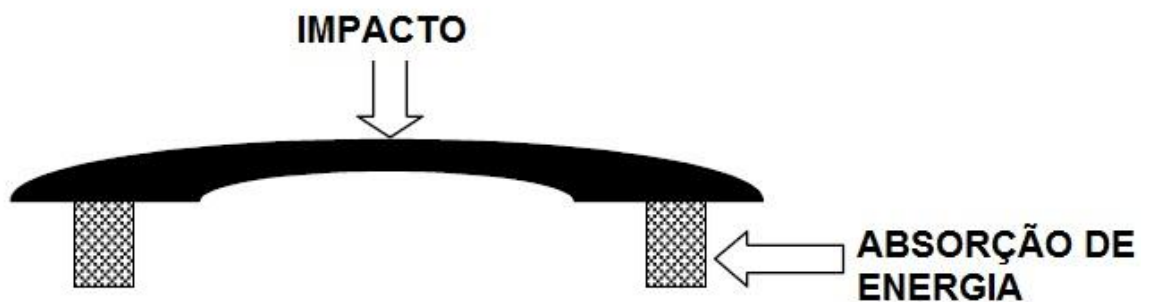
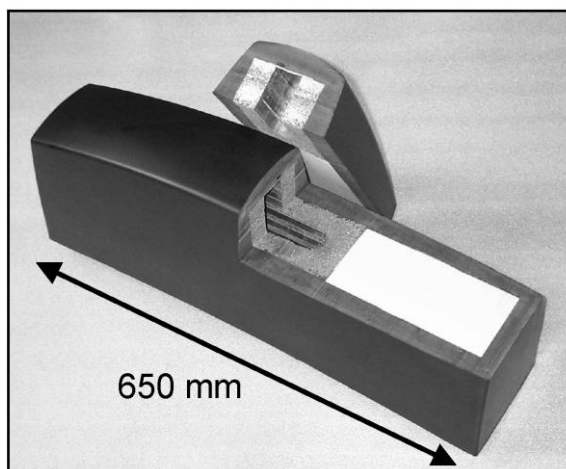


Figura 26 - Absorvedores de energia de impacto para o sistema veicular COMBINO³.



2.7.3. Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário

Segundo Banhart⁶, as espumas metálicas também são utilizadas na indústria aeronáutica, substituindo painéis sanduíche, como os painéis de alto custo *honey comb*, com melhor performance e menor custo. Uma importante vantagem é poder já ser produzida com a curvatura desejada ou até mesmo em formas tridimensionais em contraste com as planas estruturas *honey comb*. Por este motivo, algumas indústrias de helicópteros estão tentando substituir partes ou componentes frequentemente feitos nestas estruturas tipo *honey comb* por componentes com estrutura em espuma metálica.

As espumas metálicas estão sendo avaliadas como absorvedoras de impacto em unidades de terra e como reforço estrutural para satélites, substituindo materiais que encontram problemas com as adversidade das condições ambientais no espaço.

Na indústria naval, as mesmas vantagens de leveza e custo dos painéis de espuma metálica também têm tornado promissor o uso deste material, mesmo que não tão frequentemente. Como as espumas metálicas requerem menor volume de metal para cumprir as mesmas dimensões de chapas convencionais, ele também parece ser potencialmente benéfico ao meio ambiente.

Na indústria ferroviária, as espumas metálicas seguem os mesmos princípios que na automobilística: absorção da energia de impacto, isolamento e rigidez aliado a leveza.

2.7.4. Outras aplicações

Com boas propriedades térmicas e acústicas⁵⁰ surgem outras aplicações potenciais para os metais celulares. Incluem trocadores de calor, figura 27, e até utensílios de cozinha, como mostra a figura 28, onde é possível obter maior homogeneização do calor na panela, pois utilizando uma estrutura sanduíche o calor tem uma condução maior no sentido longitudinal e menor no sentido transversal, devido a espuma metálica. Estão sendo estudadas também para aplicação em absorção balística⁵¹.

Figura 27 - Trocador de calor de espuma metálica.

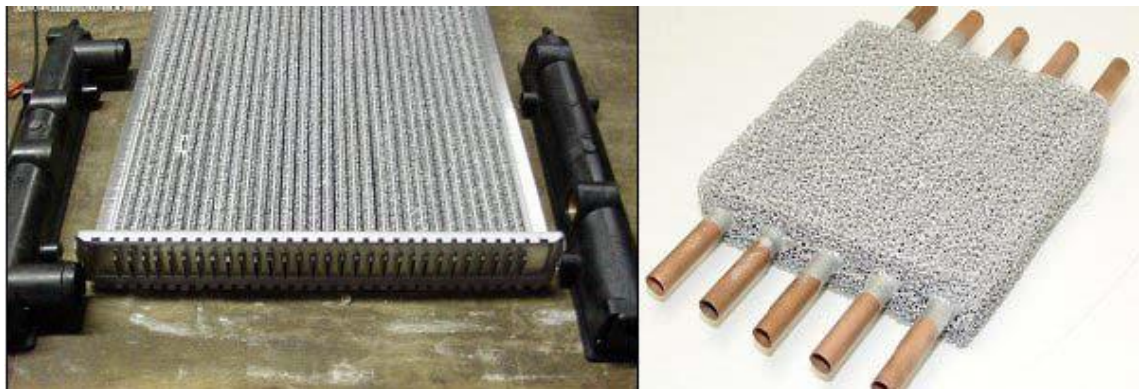


Figura 28 - Chapa sanduíche aplicada em panela doméstica⁶.



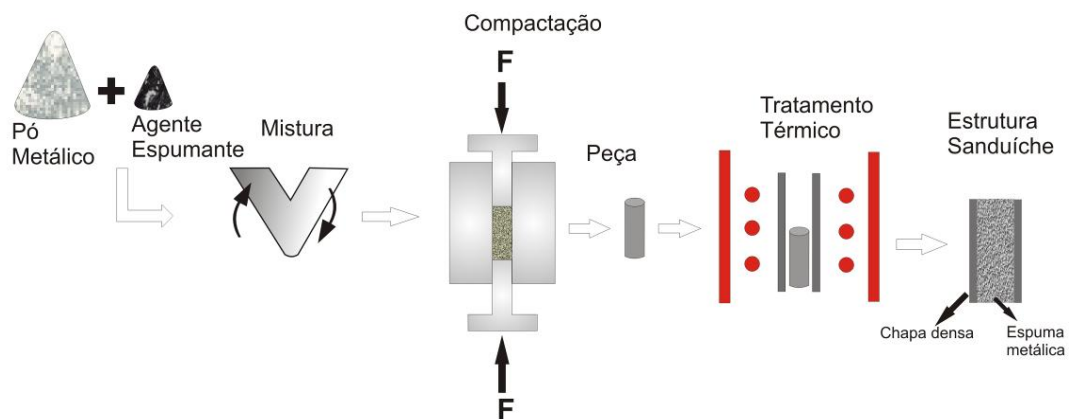
3. Procedimentos Experimentais

3.1. Considerações Gerais

Nesse trabalho foram utilizados dois tipos de pós, um de alumínio fornecido pela empresa Alcoa do tipo 1221 e o pó de hidreto de titânio fornecido pela empresa BRATS. Foram analisadas a distribuição do tamanho de partículas desses pós, através da difração a LASER com o granulômetro da marca CILAS modelo 1064 em meio líquido. Através da microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada a análise de morfologia dos pós e análise química por EDS.

O processo utilizado na obtenção das espumas de alumínio é conhecido por metalurgia do pó, conforme figura 29. O que é proposto neste trabalho é uma otimização dos processos já existentes. Os processos existentes ocorrem em duas etapas de compactação, onde primeiramente há uma précompactação e posteriormente uma extrusão ou laminação, ocorrendo, também, com um desses processos a quente com objetivo de atingir densidade próxima do material sólido.

Figura 29 - Processo de obtenção de espuma de alumínio otimizado.



No processo proposto ocorre primeiramente a mistura dos pós de alumínio e hidreto de titânio, que posteriormente foram compactados uniaxialmente e levados ao processo

térmico de espumagem, conforme os capítulos descritos a seguir. Por fim as amostras foram analisadas quanto a eficiência de espumagem como densidade e morfologia. A partir desse parâmetro obteve-se as estruturas sanduíche e foram avaliadas as propriedades mecânicas (compressão e dobramento).

Essa nova proposta de processamento visa a redução do tempo, equipamento e consequentemente redução de custos do processo. Porém, os custos do processo não foram estimados, mas acredita-se que reduzindo uma etapa do processo, sem afetar a qualidade do produto, ocorrerá também a redução do custo do processo.

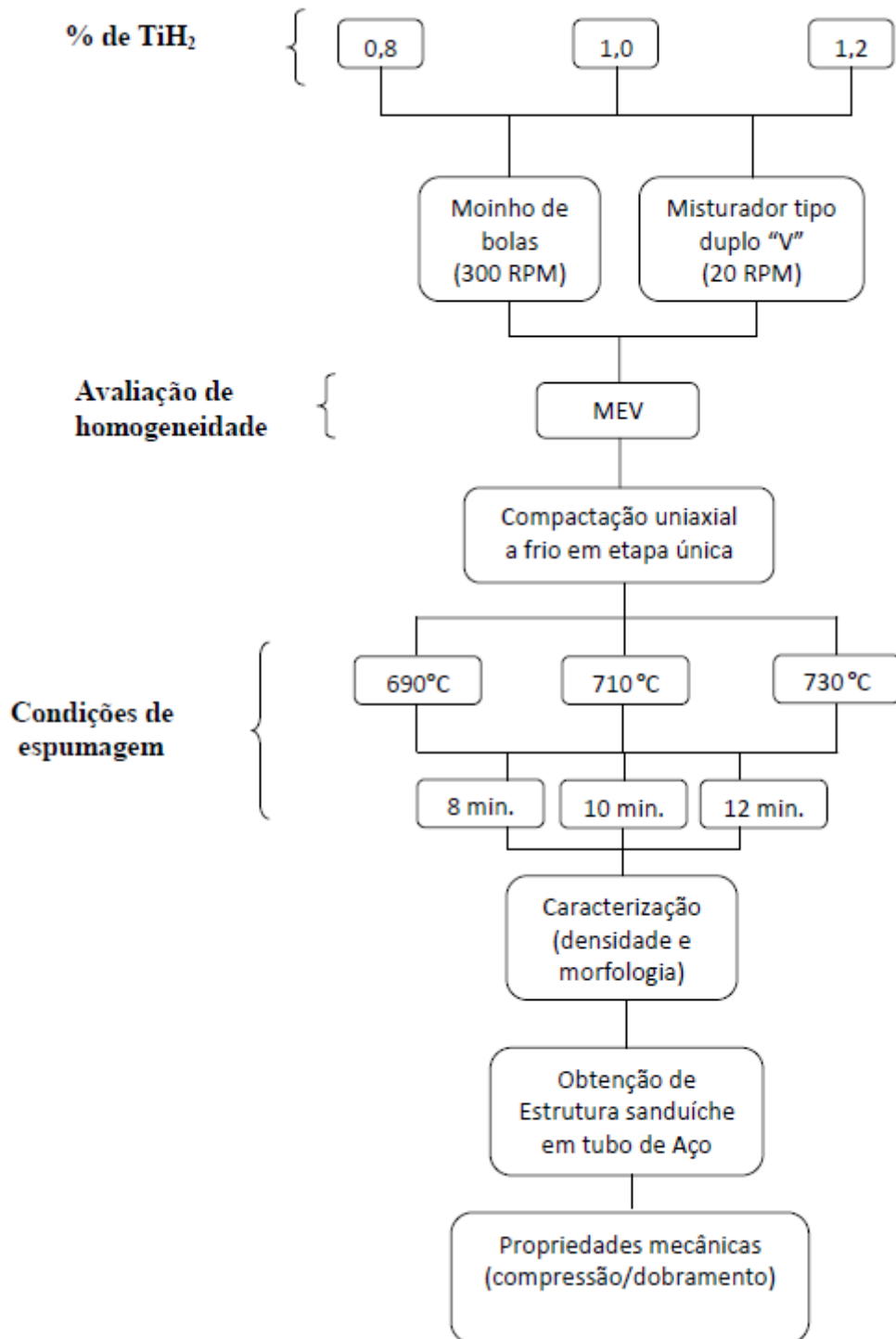
3.2. Metodologia experimental

Para que seja possível dar prosseguimento ao estudo dos parâmetros de obtenção da espuma de alumínio, primeiramente, foi verificada a possibilidade da eliminação de uma das etapas do processo propostas neste trabalho, que será mais discutido no item 4 (resultados). Verificou-se, então, que é possível alcançar densidades acima de 95% da densidade do material sólido, com matrizes adequadas, maior pressão de compactação e lubrificação superficial.

Após a certificação de que é possível eliminar uma das etapas do processo, foi proposta uma metodologia de estudo mostrada pela figura 30.

Inicialmente, foi estipulado, com base em literatura ^{1,5}, 3 proporções de mistura de alumínio e agente espumante (no caso, TiH_2). As quantidades foram de 0,8, 1,0 e 1,2% de TiH_2 em massa. Essas três condições foram misturadas por 2 métodos, com o fim de homogeneizar a mistura, fator muito importante para qualidade da espuma. Os métodos de mistura utilizados foram através do misturador convencional do tipo “duplo V” e moinho de bolas de alta rotação.

Figura 30 - Fluxograma da metodologia proposta para o estudo a obtenção de espumas de alumínio.



Após definido o método de mistura, as amostras nas três condições de misturas foram compactadas com os parâmetros já definidos pela curva de compressibilidade (450 MPa), apresentada no item 4.2 . A espumagem foi realizada em 3 condições de tempo e 3 de temperatura, resultando em nove condições diferentes de espumagem. No total de 27

condições de obtenção de espumas, sendo pelo menos 10 amostras para cada condição. Após a espumagem as amostras foram avaliadas conforme a densidade e morfologia dos poros. Como foi visto, a quantidade de poros precisa ser maior que 70% em volume para que o material seja considerado espuma. A morfologia também influencia nas propriedades finais.

Após a definição dos parâmetros de espumagem, a condição mais adequada foi utilizada para obtenção de tubos metálicos (aço AISI 1020) preenchidos de espuma, formando uma estrutura sanduíche, ou seja, as espumas serão obtidas diretamente nos tubos.

Os tubos preenchidos de espuma de alumínio foram avaliados pelas propriedades mecânicas através do ensaio de compressão e dobramento, onde se avaliou a resistência máxima alcançada, a energia absorvida na deformação e a tensão de densificação nas espumas (onde praticamente todos os poros foram fechados), assim como o ganho de resistência com o preenchimento dos tubos com espuma de alumínio. A partir desses resultados, estes foram comparados com valores estipulados por equações propostas pela literatura.

3.2. Preparação Amostra

3.2.1. Mistura dos Pós

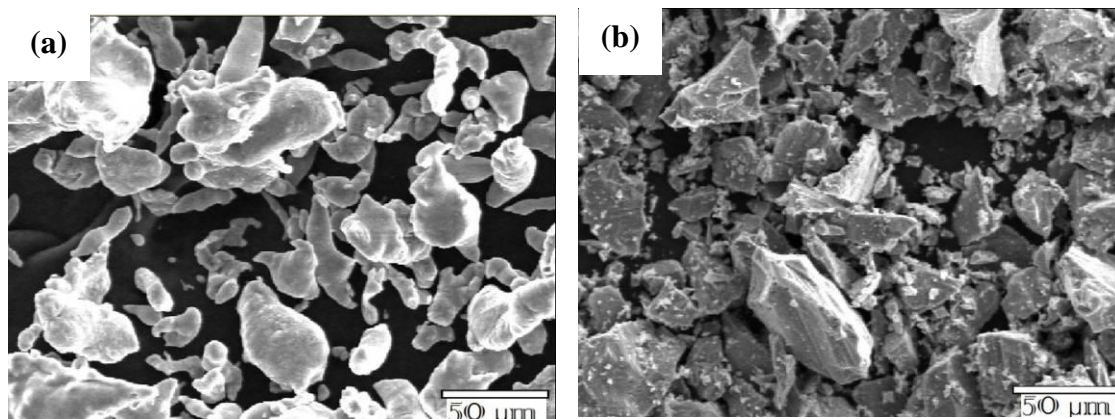
Para a mistura dos pós, foram utilizados dois tipos de misturadores com tempo de 2 horas, um de alta rotação (300 RPM) com bolas, na proporção em massa de 4:1 de bolas para pó e completando até 50% do volume da câmara com hexano. As bolas utilizadas foram de alumina com 20mm de diâmetro. O outro misturador convencional do tipo duplo “V” com rotação de 20 RPM. A mistura foi realizada na proporção de 0,8%, 1,0% e 1,2% em massa de hidreto de titânio.

Os pós utilizados nesse trabalho foram o pó de alumínio 1221 fornecido pela Alcoa, com composição química mostrada pela tabela 2, e o pó de TiH_2 fornecido pela Brats Filtros e Pós Especiais. As figuras 31(a) e (b) mostram a micrografia dos pós de alumínio e TiH_2 respectivamente, onde pode-se observar a forma dos pós.

Tabela 2: Composição química do pó de alumínio fornecido pela Alcoa.

Elemento	Al	Fe	Si	Outros
Mín. (%)	99,9	-	-	-
Máx. (%)	-	0,25	0,15	0,15

Figura 31 - (a) micrografia do pó de alumínio, (b) micrografia do pó de TiH₂.



As características gerais dos pós utilizados são mostrados pela tabela 3.

Tabela 3: Características dos pós utilizados.

Pó	Grau de Pureza	Diâmetro médio(µm)	Tamanho µm (D50)	Tamanho µm (D90)	Forma
Al	99,9%	40,03	38,71	64,55	arredondada
TiH ₂	99,97%	32,14	33,69	52,28	irregular

3.2.2. Compactação de amostra

Foi realizada a curva de compressibilidade do pó de alumínio para verificar qual pressão deve ser aplicada para atingir a densidade desejada. As amostras foram compactadas com pressão de 100 a 550 MPa, variando de 50 em 50 MPa através de uma matriz cilíndrica de 21mm de diâmetro, altura de 120mm e parede de 34mm (figura 32), simulando o duplo efeito a fim de minimizar a diferença de densidade ao longo da seção da amostra após compactação. A quantidade de pó utilizada foi de 20g. A lubrificação da matriz foi realizada manualmente com o pó de estearato de zinco, essa lubrificação é apenas superficial realizada

com pincel, pois este lubrificante não pode misturar com o pó metálico. A matriz construída é mostrada na figura 33.

Figura 32 - Desenho matriz de compactação do pó de alumínio (dimensões em mm).

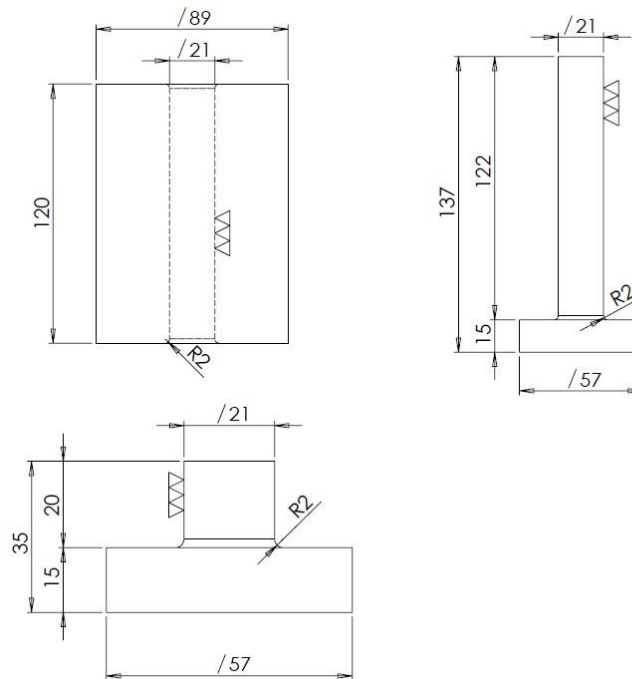


Figura 33 - Matriz cilíndrica utilizada na compactação das amostras de pó de Al-TiH₂.

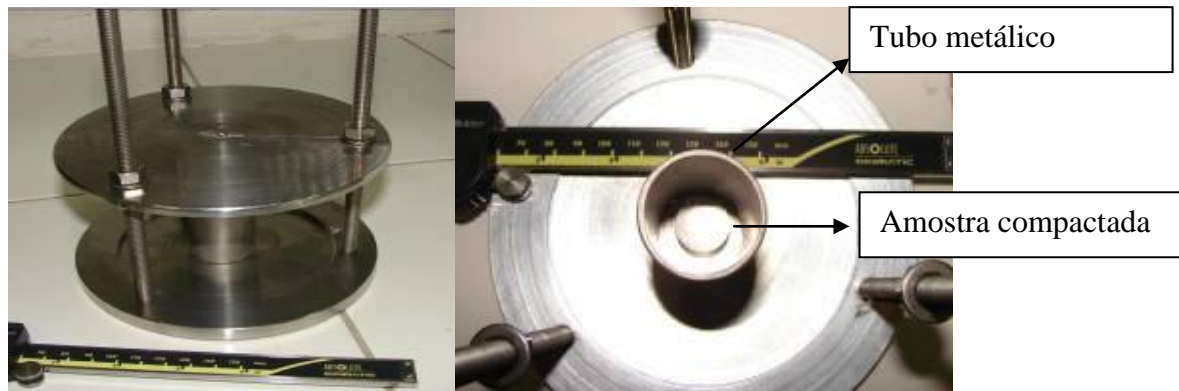


3.3. Processo de espumagem

Foi desenvolvido um sistema para realizar a espumagem dentro do forno do tipo mufla, como mostra a figura 34, onde é possível colocar as amostras compactadas no interior

de um perfil (tubo) metálico, sendo esse perfil de várias geometrias e comprimentos de até 200mm, pois é possível inserir mais de uma amostra compactada. Todo o sistema foi construído em aço inoxidável, já que este será aquecido a temperaturas próximas de 700°C por várias vezes.

Figura 34 - Sistema de espumagem utilizados nos experimentos.



Para a obtenção das amostras de espuma de alumínio foi utilizado uma amostra compactada de 22mm de altura de diâmetro de 21mm em um tubo de aço inoxidável AISI 316. Para a obtenção de tubos preenchidos com espuma para o ensaio de compressão foi utilizado uma amostra com as mesmas dimensões descrita acima e um tubo de aço AISI 1020 com 80mm de altura, 26mm de diâmetro externo e 1,5mm de espessura. Para a obtenção das amostras de tubos preenchidos para o ensaio de flexão foram utilizadas 2 amostras também com 21mm de diâmetro e 22mm de altura, pois o tubo precisa ter comprimento maior. Neste caso o tubo utilizado foi de 140mm de comprimento.

3.4. Caracterização de Amostras de Espuma de Alumínio

3.4.1. Análise Densidade

As avaliações de densidade foram realizadas em duas etapas do processo, uma após compactação a fim de avaliar a densificação e após espumagem pelo método Arquimedes, porém como a amostra possui uma densidade menor que a água (líquido utilizado no experimento) e também conter poros abertos, foi necessário cobrir a amostra com um filme plástico e utilizar uma massa

auxiliar. As medidas foram realizadas numa balança de precisão (0,01g). A densidade foi calculada por:

$$\rho = \frac{m_s}{m_s + m_{ci} - m_{aux}} \times d_l \quad \text{eq. 15}$$

Onde, ρ é a densidade da espuma, m_s é a massa da espuma seca, m_{ci} é a massa do conjunto imerso, m_{aux} é a massa auxiliar e d_l a densidade do líquido utilizado.

3.4.2. Ensaios Mecânicos

Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaio da marca Kratos (capacidade de 100 kN) com uma célula de carga e uma régua potenciométrica acoplada ao sistema de aquisição de dados Spider, sendo o programa utilizado foi o CATMAN.

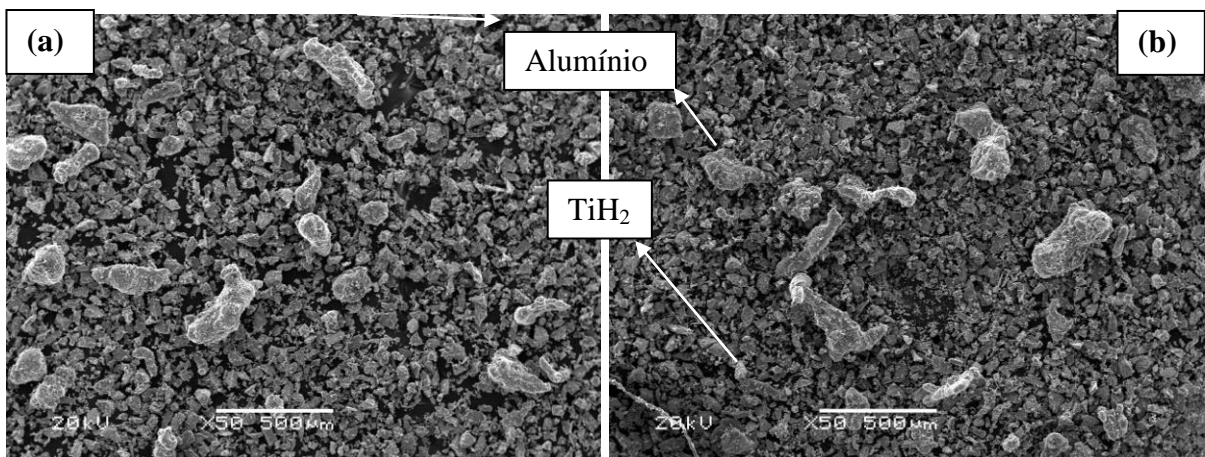
Os ensaios de dobramento foram realizados em uma máquina de ensaio MTS em três pontos.

4. Resultados e Discussão

4.1. Análise de homogeneidade da mistura

Através das análises de imagem através do MEV verificou-se que as misturas dos pós de Al e TiH_2 realizadas tanto pelo misturador convencional “duplo V” como pelo moinho de bolas de alta rotação mostraram-se eficientes quanto a homogeneidade, como mostram as figuras 35 (a) e (b).

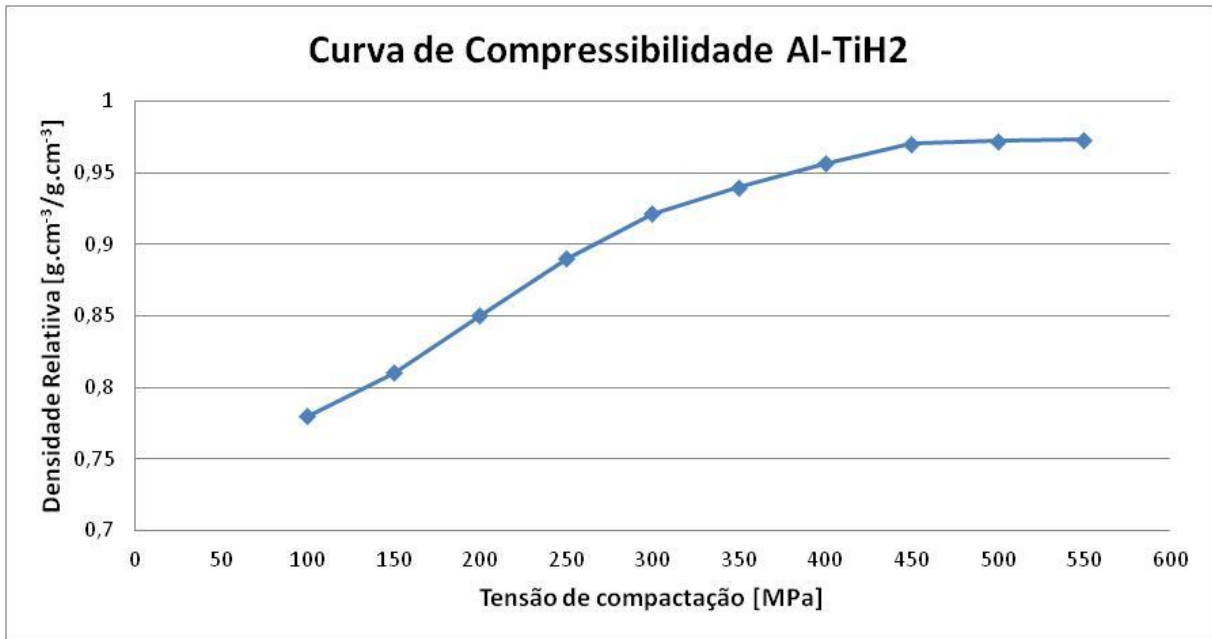
Figura 35 - Micrografia das misturas das partículas de Al e TiH_2 (50x), (a) misturador tipo duplo V, (b) moinho de bolas de alta rotação.



4.2. Compactação das amostras

Nesta etapa do trabalho foi verificado a possibilidade de realizar a compactação do pó em uma única etapa e em temperatura ambiente. O objetivo nessa etapa é que o compactado (ou precursor) alcance densidade próxima da densidade do material sólido, acima de 95%. A curva de compressibilidade do pó de Al- TiH_2 foi realizada conforme descrito acima. Essa curva é apresentada pela figura 36.

Figura 36 - Curva de compressibilidade do pó de Al-TiH₂.



Verifica-se que acima de 400 MPa de pressão de compactação, a densidade relativa atingida é de 0,95. Entretanto para garantir que todas as amostra alcancem densidade acima desse valor foi utilizada a pressão de 450MPa. Outra observação é que acima de 450 MPa a densidade se mostra constante, não havendo necessidade de atingir esses níveis de carga.

Figura 37 - Amostras compactadas (verde) com 21mm diâmetro e 22mm de altura.



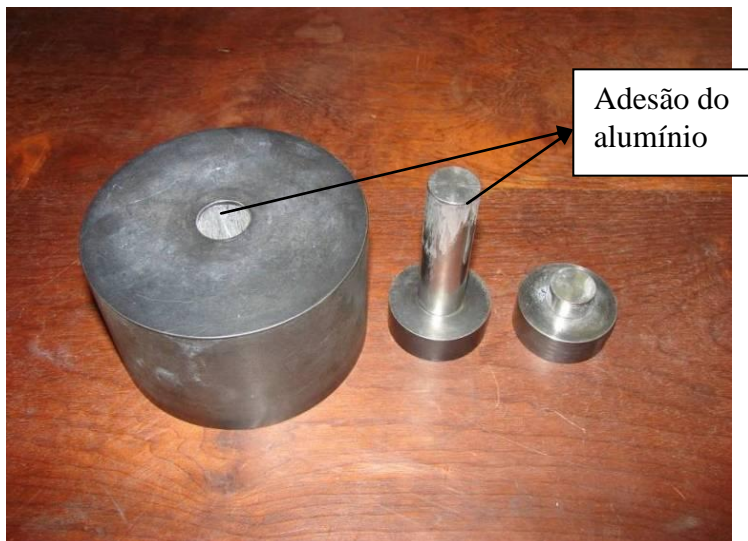
Algumas amostras compactadas são mostradas na figura 37. A tabela 4 apresenta as características das amostras compactadas. A densidade do compactado próxima da densidade do material sólido é condição imprescindível para que o gás gerado na etapa de espumagem não saia pela porosidade formada entre os pós e que resulte em bolhas no material. A eficiência da compactação será realmente avaliada na etapa de espumagem, mas a condição exigida foi atingida.

Tabela 4: Características das amostras compactadas a 450 MPa.

Amostra	Massa, g	Altura, mm	Densidade, g/cm ³	Densidade Relativa, g.cm ⁻¹ /g.cm ⁻¹
1	20,022	21,97	2,62	0,968
2	19,965	21,98	2,63	0,972
3	20,083	21,98	2,64	0,977
4	19,957	21,99	2,62	0,962
5	19,968	21,99	2,62	0,960
6	20,070	22,04	2,63	0,975
7	19,968	22,00	2,62	0,963
8	19,976	22,10	2,61	0,966
9	20,141	22,35	2,60	0,962
10	20,025	22,10	2,62	0,970
Média			2,62	0,967
Desvio Padrão			0,011	0,006

Uma dificuldade encontrada nessa etapa foi a adesão que ocorre do alumínio na matriz de compactação, o que provoca uma certa dificuldade na extração das amostras. A figura 38 mostra a adesão que ocorre na matriz.

Figura 38 - Adesão de alumínio na matriz de compactação.



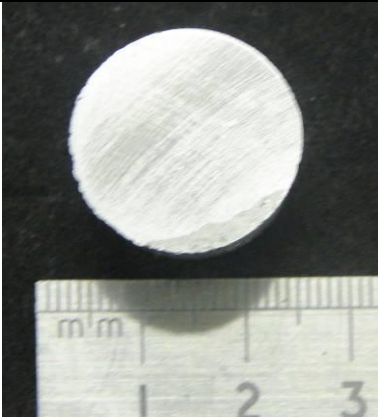

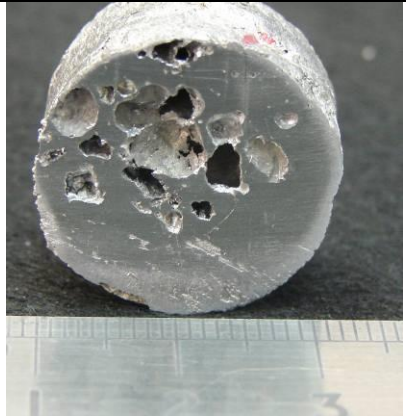

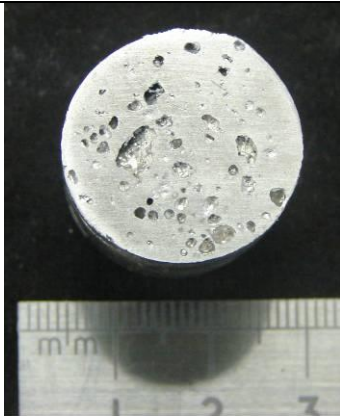
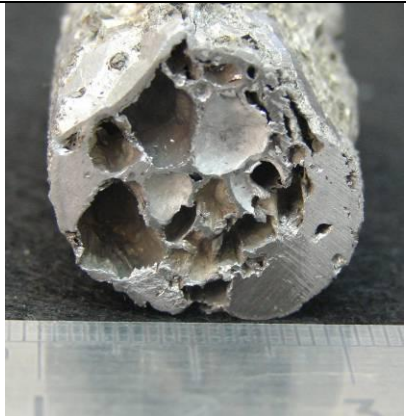



4.3. Obtenção de espumas de alumínio

Os resultados obtidos são apresentados no quadros I, II e III conforme as condições de espumagem propostas. O resultado foi avaliado em função da densidade final, que indica a quantidade de vazios que há na espuma, e na morfologia desses vazios, pois como foi mostrado apenas a densidade não é a única propriedade que deve ser avaliada em uma espuma ideal. Vale salientar que conforme literatura² um material só pode ser considerado espuma quando o nível de porosidade é superior a 70%.

Nos quadros I, II e III são apresentadas fotografias dos cortes transversais no meio das amostras após o processo de espumagem. Em alguns casos, em que ocorreu início de fusão a amostra, é mostrada a fotografia da amostra inteira. A imagem apresentada representa de maneira geral o resultado médio das amostras submetidas a espumagem, os resultados de densidade são apresentados como a média de todas as amostras da mesma condição.

No quadro 1 são apresentados os resultados para as condições em que a proporção de mistura foi de 0,8% de TiH_2 .

Quadro 1 - Espumas obtidas com mistura de 0,8% de TiH₂.

	8 minutos	10 minutos	12 minutos
690°C			
Densidade	2,62 g/cm ³ ± 0,03	2,38 g/cm ³ ± 0,02	1,55 g/cm ³ ± 0,37
710°C			
Densidade	2,03 g/cm ³ ± 0,12	1,79 g/cm ³ ± 0,1	Sem medição
730°C			
Densidade	Sem medição	Sem medição	Sem medição

No quadro 1 pode-se observar que na condição com temperatura de 690°C por 8 minutos não há sinal visível de expansão da amostra, apresentando uma densidade média de 2,62 g/cm³ ± 0,03, com 97% da densidade do material denso. Pode-se constatar que nessas condições não há temperatura e tempo necessário para a dissociação do hidreto, nem para a matriz de alumínio entrar num estado pastoso. Com o aumento de tempo para 10 e 12 minutos

há um princípio de formação de espuma, mas num nível insuficiente para que o material seja considerado espuma metálica. Mostrando que a temperatura é insuficiente para a formação de espuma.




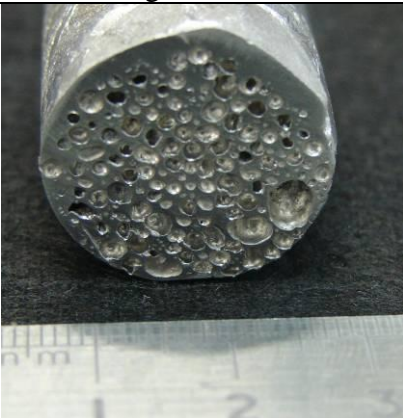
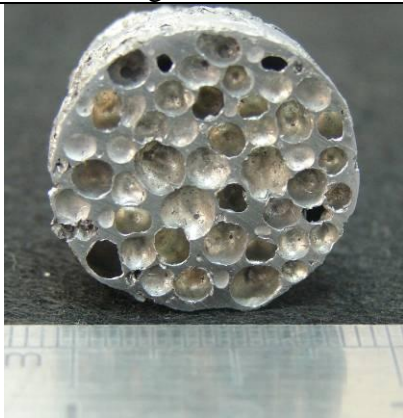




Nas condições com temperatura de 730°C, com 8, 10 e 12 minutos as amostras apresentaram sinal de fusão da amostra, quantidade de fase líquida excessiva, demonstrando que essa temperatura é alta para a formação de espuma. Nessas condições não foi medida a densidade, pois a morfologia não se mostra adequada para se considerar uma boa espuma metálica.

Com a proporção de 0,8% de TiH₂ as melhores condições de expansão foram com a temperatura de 710°C. Entretanto, com o tempo de 12 minutos, ocorreu sinal de fusão do alumínio, devido ao maior tempo de exposição nessa temperatura. Com o tempo de 8 e 10 minutos, as amostras apresentaram uma pequena expansão, apresentando um nível de porosidade de aproximadamente 25 e 34%. Acredita-se que com essa quantidade de hidreto não seja suficiente para a formação de poros que alcance um nível de porosidade acima de 70%.

No quadro 2 são apresentados os resultados para as condições em que a proporção de mistura foi de 1,0% de TiH₂. De acordo com esse quadro pode-se observar que nas condições com temperatura de 690°C com tempos de 8, 10 e 12 minutos, há pouco sinal de expansão da amostra. Demonstrando que essa temperatura é insuficiente para a formação de espuma metálica. Nota-se que há sinal de expansão mais evidente na superfície das amostras nas condições com 10 e 12 minutos, sugerindo que a superfície atingiu temperaturas superiores.

Nas condições com temperatura de 710°C, as amostras apresentaram os melhores resultados de expansão. Os níveis de porosidade nessas condições foi de 75% para 8 minutos, 80% para 10 minutos e 83% para 12 minutos. Para a condição de 10 minutos, a espuma metálica apresentou maior estabilidade nos resultados e poros melhor distribuídos. Na condição com 12 minutos, a espuma apresentou alguns poros maiores, provavelmente devido ao coalescimento pelo tempo maior dentro do forno.

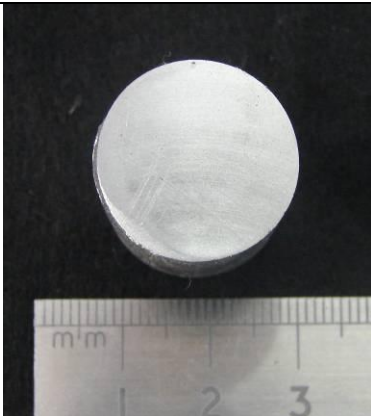

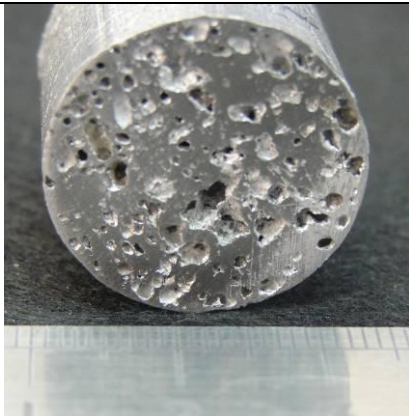






Quadro 2 - Espumas obtidas com mistura de 1,0% de TiH₂.

	8 minutos	10 minutos	12 minutos
690°C			
Densidade	2,63 g/cm ³ ± 0,02	2,60 g/cm ³ ± 0,03	2,55 g/cm ³ ± 0,02
710°C			
Densidade	0,68 g/cm ³ ± 0,07	0,55 g/cm ³ ± 0,05	0,48 g/cm ³ ± 0,09
730°C			
Densidade	Sem medição	Sem medição	Sem medição

Ainda, de acordo com o quadro 2, as amostras na condição com temperatura de 730°C apresentaram sinais claros de alta presença de fase líquida, ocasionando o colapso da espuma. Condição que foi descartada.

No quadro 3 são apresentados os resultados para as condições em que a proporção de mistura foi de 1,2% de TiH₂.

Quadro 3 - Espumas obtidas com mistura de 1,2% de TiH_2 .

	8 minutos	10 minutos	12 minutos
690°C			
Densidade	2,58 g/cm ³ ± 0,02	2,03g/cm ³ ± 0,02	1,78 g/cm ³ ± 0,04
710°C			
Densidade	0,97 g/cm ³ ± 0,04	0,46 g/cm ³ ± 0,08	0,38 g/cm ³ ± 0,07
730°C			
Densidade	Sem medição	Sem medição	Sem medição

Através do quadro 3 observa-se que na condição com temperatura de 690°C por 8 minutos apresenta resultado semelhante as amostras com proporções de hidreto. Neste caso a amostra não apresenta sinais de expansão, a densidade fica próxima da densidade a verde.

Nas condições de 690°C e tempo de 10 e 12 minutos apresentam sinais de expansão, entretanto a expansão não é suficiente para que a densidade fique abaixo da densidade da espuma metálica, apresentando nível de porosidade de aproximadamente 25 e 34%.

Nesta proporção de mistura as melhores condições de espumagem foram na temperatura de 710°C. Observa-se que o tempo tem grande influência nessa temperatura, pois com 8 minutos há vários e pequenos poros, apresentando um nível de porosidade de 64%, ainda insuficiente para o material ser considerado espuma metálica.

Nas condições com 10 e 12 minutos as amostras apresentaram boa expansão, com nível de porosidade de 83 e 86% respectivamente. Mas, observa-se que há poucos poros, apesar da baixa densidade. Isso provavelmente ocorreu devido ao teor de hidreto, provocando mais pontos de expansão e com o tempo esse poros foram coalescendo, tornando-se poros grandes e poucos. Essa situação comprova que não apenas a densidade da espuma deve ser levada em consideração, mas também a morfologia dos poros.

Na condição com temperatura de 730°C as amostras apresentam sinais evidentes de fusão do alumínio. Apesar de ter ocorrido uma expansão da amostra, com a temperatura elevada provocou a maior presença de fase líquida.

De acordo com os resultados apresentados a melhor condição de espumagem encontrada foi com teor de mistura de 1,0% de hidreto, 710°C por 10 minutos. Na qual o nível de porosidade satisfaz a condição para que seja considerada espuma metálica e apresentou uma homogeneidade de poros com menor variação nos resultados de densidade.

4.4. Obtenção de tubos de aço preenchidos com espuma de alumínio

Após a definição da condição mais ideal para obtenção de espuma de alumínio foi realizado a obtenção de estruturas sanduíche, no caso, tubos de aço AISI 1020 preenchidos com espuma de alumínio. O objetivo nessa parte do trabalho é obter amostras de tubos preenchidos para a realização dos ensaio de compressão e flexão.

Os tubos preenchido com espuma foram obtidos com temperatura de 710°C por 10 minutos, como definido anteriormente. Na figura 39 são apresentados os tubos preenchidos para o ensaio de compressão. As amostras da figura 39 possuem 65mm de altura.

Figura 39 - Amostras de tubos preenchidos para ensaio de compressão.



Figura 40 - Amostra de tubo preenchido para o ensaio de flexão



As amostras para o ensaio de flexão foram obtidas na mesma condição, porém foram utilizadas 2 amostras compactas, pela necessidade do tubo ter dimensão maior, assim como mostra a figura 40, onde o tubo possui comprimento de 120mm.

Observa-se através da figura 41 que aparentemente não há interação química entre a espuma de alumínio e o tubo de aço. Apresentando apenas uma interação mecânica.

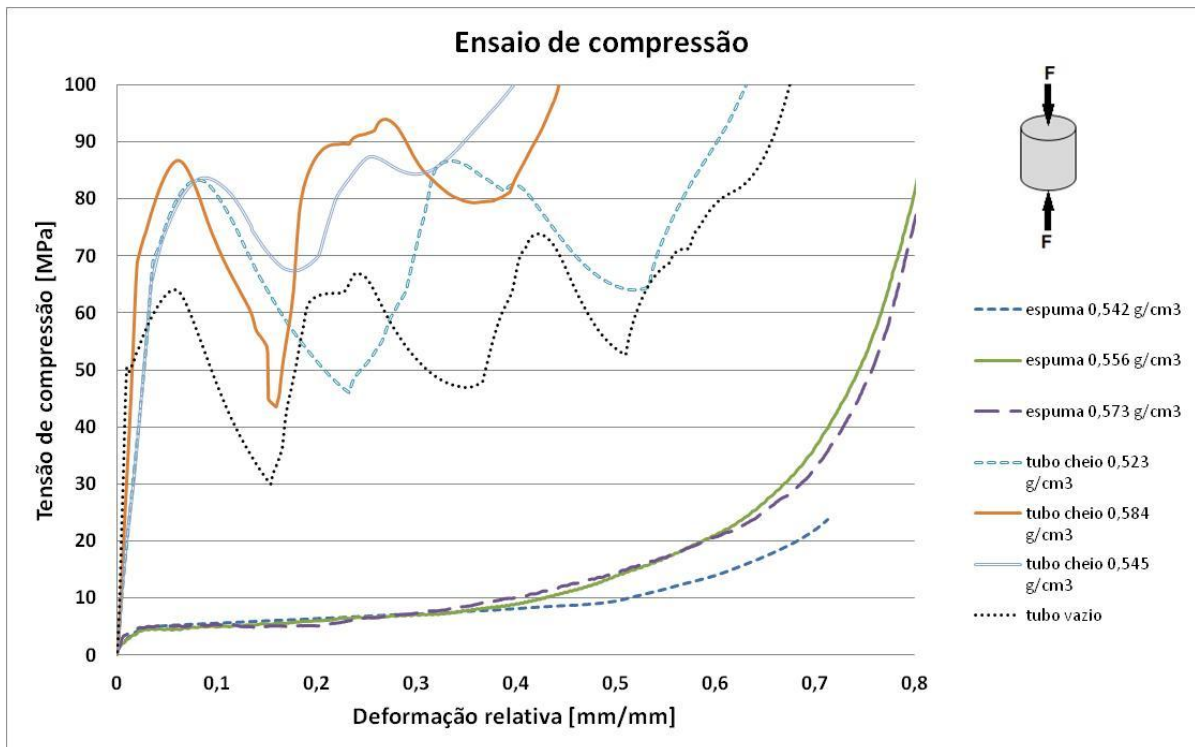
Figura 41 - Amostra de tubo preenchido mostrando a interação tubo aço e espuma de alumínio.



4.5. Ensaio de compressão

Na figura 42 são apresentadas as curvas do ensaio de compressão realizado em 3 amostras de espuma de alumínio com densidade de 0,542, 0,556 e 0,573 g/cm³. São apresentados também curvas de compressão de tubos preenchidos com espuma de alumínio com 0,523, 0,584 e 0,545 g/cm³ juntamente com o tubo vazio. Os ensaios foram realizados numa velocidade de 10 mm/s.

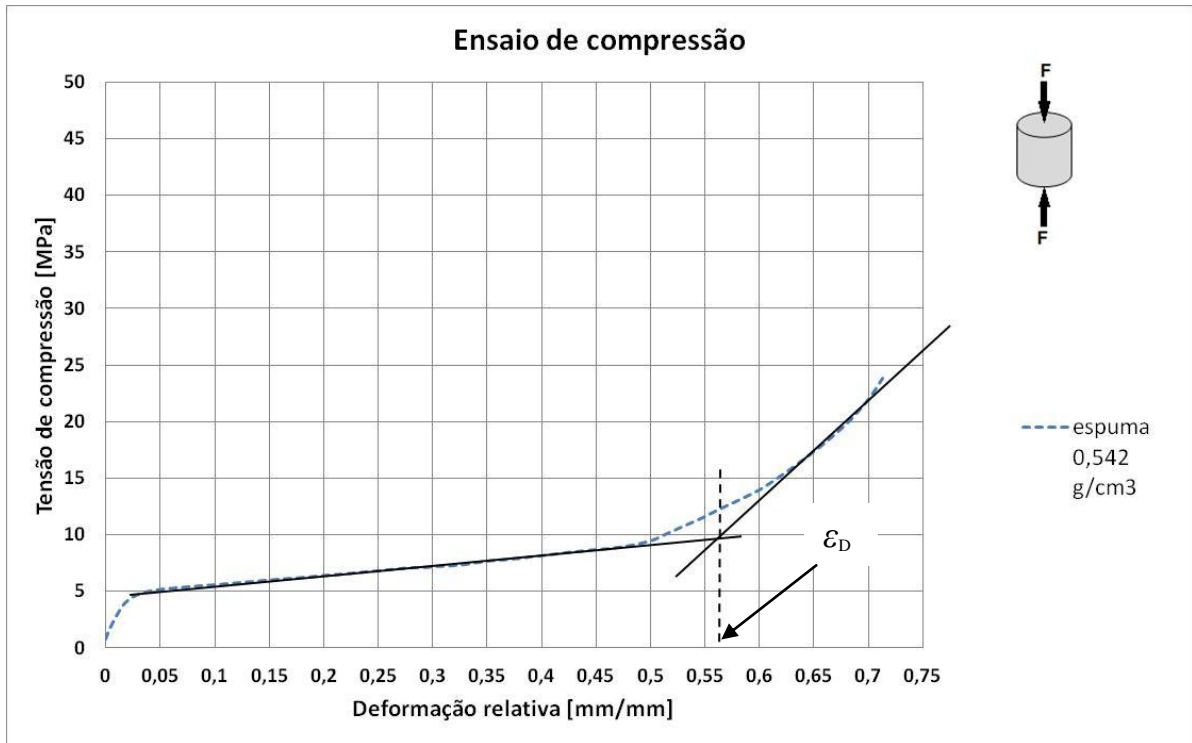
Figura 42 - Gráfico do ensaio de compressão de espuma de Al, tubo preenchido com espuma e tubo vazio.



Observa-se que o ensaio de compressão das amostras de espuma apresentam semelhança nos resultados, por possuírem densidade e morfologia dos poros semelhantes. Através dessas curvas observa-se que a tensão de escoamento das espumas é aproximadamente 5 MPa e apresentam uma grande deformação nessa faixa de tensão, chamado de platô de deformação. Esse platô de deformação é uma característica das espumas metálicas, onde há uma grande absorção da carga, ou seja, há pouco transferência de energia. Essa característica confirma a grande possibilidade de aplicação desse material em absorvedores de energia em caso de impacto.

Ainda, pode-se traçar linhas de tendência, como mostra a figura 43, e definir a deformação de densificação, ou seja, ponto em que praticamente todos os poros da espuma foram deformados, assim se comportam semelhante ao material sólido. Observa-se que para a amostra de espuma com densidade de 0,542 g/cm³ a deformação de densificação é de aproximadamente 56%. A partir dessa deformação, acredita-se que a amostra esteja praticamente sólida.

Figura 43 - Curva de compressão da espuma de Al mostrando a deformação de densificação.



De acordo com Ashby pode-se prever a tensão de escoamento em compressão utilizando a equação 13 com base na densidade da espuma metálica. Assumindo que a tensão de escoamento do alumínio é de 35 MPa e a densidade da espuma metálica é de 0,54 g/cm³ a tensão de escoamento em compressão seria de aproximadamente de 7,2 MPa. Percebe-se uma discordância com o resultado real, que foi de aproximadamente 5 MPa. O mesmo ocorre tomando como base a espuma de alumínio comercializada pela Alporas® com densidade de 0,23 g/cm³ e tensão de escoamento em compressão de 1,6 MPa, onde através da equação 13 seria de 3,8 MPa. Essa diferença pode ser explicada pelo motivo que Ashby assume que todos os poros são do mesmo tamanho e devidamente distribuídos, o que na prática não ocorre exatamente como pode ser visto nesse trabalho e entre outros da literatura.

Observando as curvas do ensaio de compressão dos tubos na figura 42, fica claro uma oscilação da tensão durante a deformação, essa é uma característica nos ensaio de compressão de tubos, onde há dobramento na parede do tubo, como mostra a figura 44, onde cada oscilação de tensão apresentada no gráfico corresponde a uma dobra do tubo.

Ainda de acordo com a figura 42, observa-se que há um aumento da tensão de escoamento do tubo com o preenchimento de espuma de alumínio. Com o tubo vazio essa tensão é de aproximadamente 50 MPa e com o preenchimento de espuma a tensão chega a 70 MPa, isso significa um aumento de aproximadamente 40% na resistência ao escoamento.

Vale salientar ainda que de acordo com Ashby¹ espumas de alumínio apresentam uma certa variabilidade nos resultados, sendo que para tensão de compressão são aceitáveis variações entre 5 a 15%.

Figura 44 - Exemplo de amostra de tubo preenchido com espuma após ensaio de compressão.



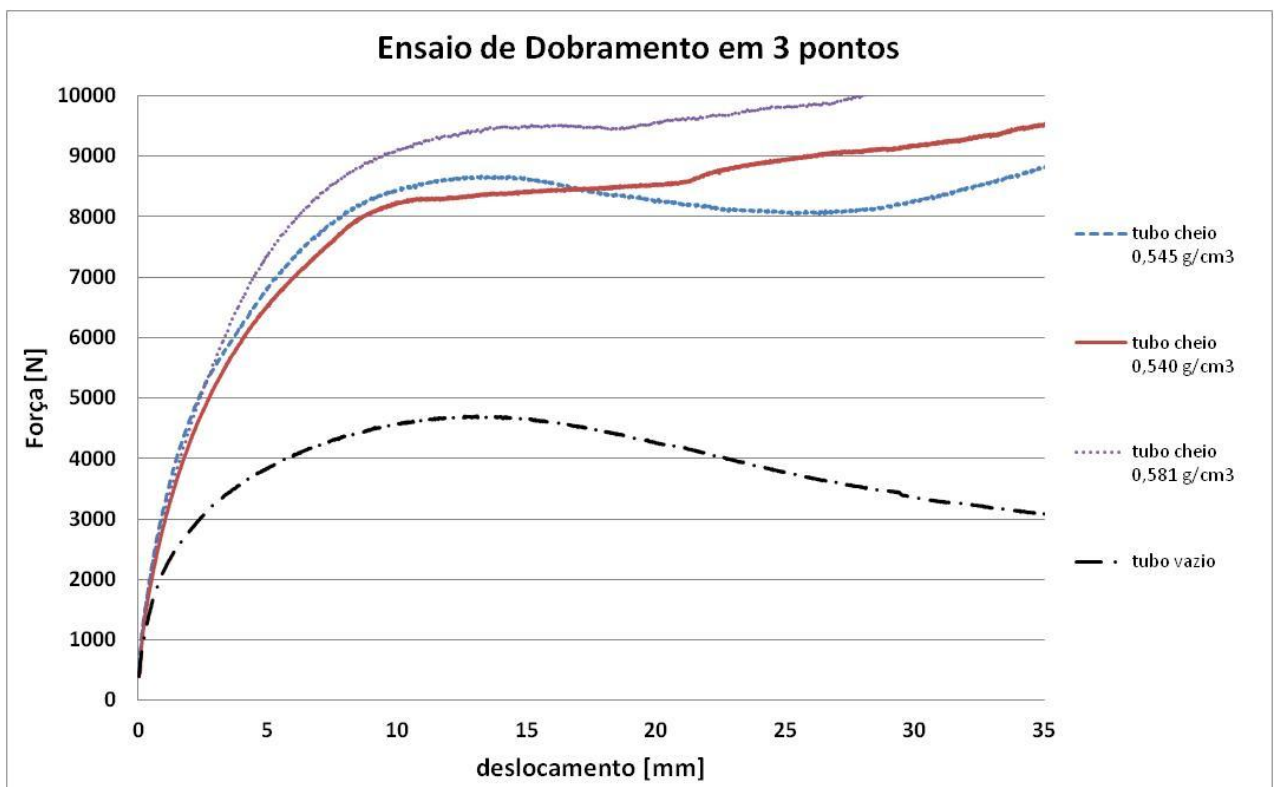
4.6. Ensaio de dobramento

Na figura 45 são apresentadas as curvas do ensaio de dobramento a 3 pontos em 3 tubos preenchidos com espuma de alumínio com densidade de 0,545, 0,540 e 0,581 g/cm³ e tubo vazio. O objetivo desse ensaio é verificar a influência nas propriedades de flexão de um tubo metálico preenchido com espuma de alumínio, focando a utilização desse material em estruturas em geral, onde se leva em consideração a redução de massa sem preterir a resistência.

Observa-se que com o preenchimento do tubo com espuma de alumínio há um aumento considerável na carga máxima suportada pela amostra, praticamente o dobro, sendo que o aumento de massa com o preenchimento do tubo é cerca de 30%. Com uma pequena variação na densidade da espuma há uma variação na resistência máxima da amostra, entretanto o módulo elástico não há variação significativa.

De acordo com as curvas obtidas observa-se que a curva do tubo vazio atinge um máximo de carga e depois decai, já nos tubo preenchidos há uma variação nessa carga, muito provavelmente devido as deformações locais de cada célula da espuma. Mostrando que tubos preenchidos podem suportar uma faixa de carga numa deformação maior.

Figura 45 - Gráfico do ensaio de dobramento em 3 pontos do tubo preenchido com espuma e tubo vazio.



Vale salientar que nos ensaio de dobramento de tubos, preenchidos ou não, há uma certa diferença em relação a materiais densos, pois a deformação na seção transversal não é contínua. Na verdade ocorre um dobramento da amostra como mostra a figura 46, iniciando uma deformação na superfície de contato com os roletes.

Figura 46 - Exemplo de amostra de tubo preenchido após ensaio de dobramento.



5. Conclusões

A proposta de otimizar uma das etapas do processo de obtenção da espuma de alumínio apresentou bons resultados. Com a nova proposta de consolidação do pó foi possível alcançar densidades relativas acima de 95% da densidade do material denso com a pressão de compactação de 450 MPa, suficiente para que ocorra a formação dos poros durante a espumagem.

A mistura dos pós realizada tanto no moinho de bolas de alta rotação como no misturador convencional se mostraram adequados para uma boa homogeneidade da mistura. Sendo que a mistura em misturador convencional é mais simples, portanto esse método foi o selecionado para o processo.

Por meio do estudo da condição mais adequada para obter espuma de alumínio entre as 27 condições de espumagem que foram estudadas nesse trabalho, variando quantidade de hidreto, tempo e temperatura, a condição mais adequada foi utilizando 1,0% TiH_2 , com temperatura de espumagem de 710°C por 10 minutos. Nessa condição a espuma apresentou uma quantidade de poros acima de 70%, com poros mais homogêneos e melhor distribuídos e ainda com menor variação na densidade final. Por esses motivos essa foi a condição de espumagem definida nesse trabalho.

Pelo ensaio mecânico de compressão observou-se que a amostra de espuma de alumínio obtida possui comportamento típico do que é mostrado pela literatura, com tensão de escoamento próximo de 5 MPa e com um platô de deformação. Mostrando que a espuma possui bom comportamento na absorção de energia. Comparando essa propriedade com equações propostas pela literatura observa-se uma certa discrepância, pois as equações consideram que os poros da espuma sejam todos do mesmo tamanho e homogeneamente distribuídos, o que não corresponde com as amostras de espuma obtidas, pois não possuem poros exatamente do mesmo tamanho.

No ensaio de compressão de tubos preenchidos, observou-se que com o preenchimento do tubo com espuma de alumínio houve um aumento considerável da tensão de escoamento, cerca de 40%.

No ensaio de flexão de tubos preenchidos, observou-se que com o preenchimento dos tubos com espumas de alumínio provocou um aumento na carga máxima suportada pela amostra de praticamente 2 vezes. Além de apresentar um certo platô de deformação próximo a carga máxima aplicada.

6. Sugestão para trabalhos futuros

Utilização de novos agentes espumante e ligas de alumínio com menor temperaturas de fusão, afim de minizar a diferença entre a temperatura de fusão da liga de alumínio e a dissociação do agente espumante.

Utilização de tubos de alumínio para ocorrer melhor adesão entre espuma e tubo metálico.

Utilização de outros tipos de fornos ou fontes de aquecimento, com intuito de melhorar o controle do processo de espumagem.

REFERÊNCIAS

- ¹ ASHBY M.F., EVANS A.G., FLECK N.A., GIBSON L.J., HUTCHINSON J.W. AND WADLEY H.N.G.. **Metal foams — a design guide**. Butterworth-Heinemann, Londres, 2000.
- ² BANHART J.. Functional applications. **Handbook of Cellular Metals: production, processing, application**, Editores: H.-P. Degischer, B. Kriszt, 313-320, Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- ³ BANHART J.. Aluminium foams for lighter vehicles. **International Journal of Vehicle Design**, v. 37, p. 114–125, 2005.
- ⁴ DAXNER T., BÖHM H.J., SEITZBERGER M., AND RAMMERSTORFER F.G.. Modelling of cellular metals. In H.-P. Degischer and B. Kriszt, editors, **Handbook of Cellular Metals**, p. 245–280. Wiley-VCH, Weinheim, Alemanha, 2002.
- ⁵ BANHART J.. Manufacturing routes for metal foams. **Journal of Metals**. v. 52, p. 22-27, 2000.
- ⁶ BANHART J.. Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metallic foams. **Progress in Materials Science**, v. 46, p. 559–632, 2001.
- ⁷ Wadley, H. N. G., Cellular Metals Manufacturing. **Advanced Engineering Materials**. v. 4, n. 10, p. 723-733, 2002.
- ⁸ BAUMGÄRTNER F., DUARTE I., AND BANHART J.. Industrialisation of P/M foaming process. **Advanced Engineering Materials**, v. 2, p. 168–174, 2000.
- ⁹ ZEPPELIN F. VON, HIRSCHER M., STANZICK H., AND BANHART J.. Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals. **Composite Science and Technology**, v. 63, p. 2293–2300, 2003.

-
- ¹⁰ SHIOMIA M., IMAGAMAB S., OSAKADAB K., MATSUMOTO R.. Fabrication of aluminium foams from powder by hot extrusion and foaming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 9, p. 1203-1208. 2010.
- ¹¹ IRRETIER A., BANHART J., Lead and lead alloy foams. **Acta Materialia**, v. 53, p. 4903–4917, 2005.
- ¹² MORI K., NISHIKAWA H. Cold repeated forming of compact for aluminium foam. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 12, p. 1580-1586. 2010.
- ¹³ BANHART J.. Foam Metal: the recipe. **Europhys News**, january/february: p. 17-20, 1999.
- ¹⁴ GERGELY V., CLYNE T.W.. The FORMGRIP process: foaming of reinforced metals by gas release in precursors. **Advanced Engineering Materials**. v. 2, p. 168-74, 2000.
- ¹⁵ GIBSON L.J. AND ASHBY, M.F. **Cellular Solids: Structure and properties-2ed.**, Cambridge University Press. 1997.
- ¹⁶ LEFEBVRE L. P., BANHART J., DUNAND D. C. Porous Metals and Metallic Foams: Current Status and Recent Developments. **Advanced Engineering Materials**. v. 10. No. 9. p. 775-787. 2008.
- ¹⁷ SOSNICK B. **Process for Making Foamlike Mass of Metal** - United States Patent No. 2,434,775, 20 de Janeiro de 1948.
- ¹⁸ ALLEN B.C., MOTE M.W., SABROFF A.M.. US Patent 3, 087, 807, 1963.
- ¹⁹ CARDOSO E., **Estudo do emprego da espuma metálica no design automotivo**. Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-graduação em Design e Tecnologia. Porto Alegre, RS, 2009.
- ²⁰ BAUMEISTER J.. **Verfahren zur Herstellung poröser Metallkörper**. German Patent 4, 018, 360, 1990.

-
- ²¹ GERGELY V., CURRAN D.C., CLYNE T.W., The FOAMCARP process: foaming of aluminium MMCs by the chalk-aluminium reaction in precursors. **Composites Science and Technology**. v. 63, p. 2301–2310, 2003.
- ²² KENNEDY A.R., Effect of compaction density on foamability of Al-TiH₂ powder compact. **Powder metallurgy**. v. 45, n. 1, p. 75–79, 2002.
- ²³ BABCSÁN N., GARCÍA F., BANHART J.. Metal foams—High temperature colloids Part II: In situ analysis of metal foams. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**. v. 309, p. 254–263, 2007.
- ²⁴ DUARTE I., BANHART J.. A study of aluminium foam formation-kinetics and microstructure. **Acta Materialia**, v. 48, p. 2349–2362, 2000.
- ²⁵ BANHART J., BAUMEISTER J.. Deformation characteristics of metal foams. **Journal of Materials Science**, v. 33, p. 1431–40, 1998.
- ²⁶ LehmuS D., BANHART J.. Properties of heat treated aluminium foams. **Materials Science and Engineering A**, v. 349: p. 98–110. 2003.
- ²⁷ KENESEI P., KADAR C., RAJKOVITS Z, LENDVAI J.. The influence of cell-size distribution on the plastic deformation in metal foams. **Scripta Materialia**, v. 50, no. 2, p. 295–300, 2004.
- ²⁸ NIEH T.G., HIGASHI K., WADSWORTH J.. Effect of cell morphology on the compressive properties of open-cell aluminium foams. **Materials Science and Engineering A**. v. 283, n. 1–2, p. 105–10, 2000.
- ²⁹ HAN F., CHENG H., WANG J., WANG Q.. Effect of pore combination on the mechanical properties of an open cell aluminium foam. **Scripta Materialia**, v. 50, n. 1, p. 13–7, 2004.
- ³⁰ GRENESTEDT J.. Influence of wavy imperfections in cell walls on elastic stiffness of cellular solids. **J Mech Phys Solids**, v. 46, n. 1, p. 29–50, 1998.

-
- ³¹ DAXNER T., BÖHM H.J., SEITZBERGER M., RAMMERSTORFER F.G.. Modelling of cellular metals. In: H-P. Degischer, B. Kristz, editors. **Handbook of cellular metals**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH; p. 245–80, 2002.
- ³² RAMAMURTY U., PAUL A.. Variability in mechanical properties of a metal foam. **Acta Materialia**, v. 52, n. 4, p. 869–76, 2004.
- ³³ MUKHERJEE M., GARCIA F., BANHART J.. Defect generation during solidification of aluminium foams. **Scripta Materialia**, v. 63, n. 2. p. 235–238, 2010.
- ³⁴ KUNZE H.D., BAUMEISTER J., BANHART J., WEBER M. P/M technology for the production of metal foams. **Powder metallurgy international**, v. 25, p. 182–5, 1993.
- ³⁵ GARCIA F., BABCSAN N., BANHART J.. X-ray radioscopy of liquid metal foams: influence of heating profile, atmosphere and pressure. **Colloids Surf A: Physicochem Aspects**, v. 263, p. 290–4, 2005.
- ³⁶ STANZICK H., WICHMANN M., WEISE J., BANHART J., HELFEN L., BAUMBACH T.. Process control in aluminium foam production using real-time X-ray radioscopy. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, p. 814–23, 2002.
- ³⁷ SCHWANKE C. M.. **Obtenção de titânio particulado pelo processo hidratação-dehidratação**. Tese para obtenção de título de doutorado em engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- ³⁸ LI D., LI J., LI T., SUN T., ZHANG X., YAO G. Preparation and characterization of aluminum foams with ZrH₂ as foaming agent. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, v. 21,n. 2, p. 346-352. 2011.
- ³⁹ BANHART J., Manufacturing Routes for Metallic Foams. **JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society**. v. 52, n. 12, p. 22-27, 2000.
- ⁴⁰ BANHART J., Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams. **Progress in Materials Science**, v. 46, p. 559–632, 2001.

-
- ⁴¹ BANHART J., BAURNEISTER J., WEBER M.. Damping properties of aluminium foams. **Materials Science and Engineering A**, v. 205, p. 221-228, 1996.
- ⁴² KOZA E., LEONOWICZ M., WOJCIECHOWSKI S., SIMANCIK F.. Compressive strength of aluminium foams. **Materials Letters**, v. 58, p. 132– 135, 2003.
- ⁴³ KIM A., HASAN M.A., NAHM S.H., CHO S.S., Evaluation of compressive mechanical properties of Al-foams using electrical conductivity. **Composite Structures**, v. 71, p. 191– 198, 2005.
- ⁴⁴ BANAHRT J., SEELIGER H. W., Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications. **Advanced Engineering Materials**. v. 10, n. 9, p. 793 - 802 2008.
- ⁴⁵ BANHART J., et. al, Process Control in aluminum foam production using real-time X-ray radioscopy. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, n. 10, p. 814-823, 2002.
- ⁴⁶ STÖBENER K., LEHMHUS D., AVALLE M., PERONI L., BUSSE M.. Aluminum foam-polymer hybrid structures (APM aluminum foam) in compression testing. **International Journal of Solids and Structures**, v. 45, n. 21,p. 5627–5641, 2008.
- ⁴⁷ NASSAR H., ALBAKRI M., PAN H., KHRAISHEH M.. On the gas pressure forming of aluminium foam sandwich panels: Experiments and numerical simulations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 243-246, 2012.
- ⁴⁸ SANTOSA S., BANHART J., WIERZBICKI T.. Bending Crush Resistance of Partially Foam-Filled Sections. **Advanced Engineering Materials**. v. 2 n. 4, p. 223 – 227, 2000.
- ⁴⁹ JORGE, A.F., ARRUDA, A., C., F., **Espumas e esponjas de alumínio em aplicações automotivas**. Programa de pós graduação em engenharia mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- ⁵⁰ YU H., YAO G., WANG X., LIU Y., LI H.. Sound insulation property of Al–Si closed-cell aluminum foam sandwich panels. **Applied Acoustics**. v. 68, n. 11-12, p. 1502–1510, 2007.

⁵¹ HoU W., ZHU F., LU G., FANG D.. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminium foam core. **International Journal of Impact Engineering**. v. 37, n. 10, p. 1045-1055, 2010.