

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CRISTINA APARECIDA ESTEVES

DESENVOLVIMENTO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO A PARTIR DA
RECICLAGEM

BELO HORIZONTE

2016

CRISTINA APARECIDA ESTEVES

**DESENVOLVIMENTO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO A PARTIR DA
RECICLAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Joel Lima

BELO HORIZONTE

2016

CRISTINA APARECIDA ESTEVES

**DESENVOLVIMENTO DE ESPUMAS DE ALUMÍNIO A PARTIR DA
RECICLAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sidney Nicodemos da Silva

Prof. Dr. Joel Lima

Prof. Dr. Marcello Rosa Dumont

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por tudo que tenho e que posso, pelas barreiras em que consegui passar e a força que tenho para vencer.

Em segundo a minha grande família pelo grande apoio, carinho e confiança depositado nesses anos de estudo.

Ao meu grande marido, amigo e companheiro Eduardo que tanto ajudou e ajuda o tempo todo dando toda atenção necessária.

Aos meus “best friends”, sem eles seria impossível terminar esta caminhada.

Aos meus professores orientadores Sidney e Joel por todo o conhecimento, experiência profissional e ensino transferido durante o desenvolvimento da pesquisa.

Ao setor de manutenção do Demat, Geraldinho, Srsº. Antonio, Srº. Jose, Carlos e Rogério pela colaboração e parceria.

Enfim a todos que de alguma forma contribuíram para o meu progresso.

RESUMO

Devido às propriedades de isolamento térmico e acústico, capacidade de absorver esforços de compressão, absorver vibrações, entre outros, as espumas de alumínio possuem um amplo campo de aplicações principalmente na indústria aeronáutica e automobilística. Este trabalho visa uma contribuição com estudos de alguns parâmetros para o desenvolvimento do processo via rota da metalurgia do pó utilizando compactação a frio. A obtenção dos pós surge do contexto da reciclagem, é feito uma prévia da rentabilidade do processo da reciclagem visando agregação de valores, inclusão social e responsabilidade ambiental. A condição de espumagem aplicada foi de uma taxa de 20°C/minuto até a temperatura de 720°C com aplicação de compactação axial a frio de 200 e 350MPa. O agente espumante utilizado foi o hidreto de titânio. Utilizou-se técnicas de difração de raios-X (DRX) para confirmação da estrutura cristalina, espectroscopia de fluorescência de raios-X (EDX) para análise química, microscópio eletrônico de varredura (MEV), granulômetro a laser (CILAS) e análise termogravimétrica (DTG) especificamente para o hidreto de titânio a fim de verificar as temperaturas de liberação de gás.

Palavras-chave: Reciclagem, latas de alumínio, espumas de alumínio, metalurgia do pó.

ABSTRACT

Due to the properties of heat insulation, sound, wide range of applications of aluminum foams, ability to absorb compressive stress, absorb vibrations, among others, aluminum foams have a wide field of applications mainly in the aerospace and automotive industries. This work aims at a contribution to studies of some parameters for the development process by Route powder metallurgy using cold compression. Obtaining the post comes from the recycling context, it made a preview of the profitability of the recycling process to aggregate values, social inclusion and environmental responsibility. The foaming condition was applied a rate of 20 ° C / minute to a temperature of 725°C with application of axial compression to cold 200 and 350MPa. The foaming agent used is titanium hydride. Was used techniques -ray diffraction (XRD) to confirm the crystalline structure spectroscopy, X-ray fluorescence (EDX) for chemical analysis, scanning electron microscope (SEM) laser granulometer (CILAS) and thermogravimetric analysis (DTG) specifically for titanium hydride to check the gas release temperature .

Keywords: Recycling, cans aluminum, aluminum foams, powder metallurgy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Forno rotativo horizontal em corte.....	18
Figura 2 – Forno TRF.....	19
Figura 3 – Forno UTRF.....	19
Figura 4 – Forno a plasma IPT.....	20
Figura 5 – Dispersão de uma fase em outra, onde cada fase pode estar nos três estados da matéria.	23
Figura 6 – Exemplos de aplicações de espuma metálica de estrutura fechada (A) e de estrutura aberta (B).	24
Figura 7 – Processo de fabricação.	24
Figura 8 – Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de fabrico.	25
Figura 9 – Processo de espumagem.....	26
Figura 10 – Solidificação eutética de sólido-gás.....	27
Figura 11 – Método de fundição de precisão.	28
Figura 12 – Processo de fabrico de espumas sintéticas.	28
Figura 13 – Processo de Pulverotecnologia.....	29
Figura 14 – Processo de aprisionamento de gás para espuma porosa de titânio.	30
Figura 15 – Obtenção de espuma de níquel através de eletrodeposição.	32
Figura 16 – Processo de fabrico de espuma via metalurgia do pó.	35
Figura 17 – Campos de aplicação de espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.....	36
Figura 18 – Chapa sanduíche aplicada em utensílios domésticos.	38
Figura 19 – Fluxograma de atividades.	39
Figura 20 – Latas de alumínio destinadas à fundição.....	40
Figura 21 – Forno de cadinho a gás.....	41
Figura 22 – Retirada da escória sobrenadante do alumínio líquido.	42
Figura 23 – Grânulos de alumínio advindos do processo de atomização.....	42
Figura 24 – XRD- Difratômetro de raio X.	44
Figura 25 – Fluorescência de raio X.....	45
Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura.....	46

Figura 27 – Granulometro a laser CILAS 1090.	47
Figura 28 – DTG 60H- Shimadzu.	48
Figura 29 – Matriz cilíndrica utilizada na compactação dos pós Al – TiH₂	49
Figura 30 – Forno elétrico.	50
Figura 31 – Difratoograma do pó de alumínio.	51
Figura 32 – Difratoograma do pó de Hidreto de Titânio.	52
Figura 33 – Morfologia das partículas de alumínio com ampliação de 3,87 Kx.	53
Figura 34 – Morfologia das partículas de hidreto de titânio com ampliação de 2.67 Kx.	54
Figura 35 – Análise termogravimétrica do hidreto de titânio.	55
Figura 36 – Difratoograma referente à mistura dos pós com 1% de hidreto de titânio.	56
Figura 37 – Imagem da mistura compactada a 200MPa.	57
Figura 38 – Mapeamento do compactado. Detector EDS. A) Concentração de alumínio. B) Concentração de titânio.	57
Figura 39 – Mapeamento feito com detector EDS acoplado ao MEV.	58
Figura 40 – Pontos de nucleação do hidrogênio no material sinterizado a 500°C.	59
Figura 41 – Pontos de nucleação do hidrogênio no material sinterizado a 450 °C.	59
Figura 42 – Representação de interconexão de poros.	60
Figura 43 – Corpo sinterizado pós compactação de 200 MPa.	61
Figura 44 – Compactado a verde 350 MPa e material após a sinterização de 720°C.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do alumínio e hidreto de titânio em estudo.	52
Tabela 2 - Distribuição granulométrica do alumínio e do hidreto de titânio.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo Geral.....	14
2.2 Objetivos Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Reciclagem do Alumínio	16
3.2 Fundição do Alumínio Reciclado	17
3.2.1 Forno Rotativo Horizontal	17
3.2.2 Forno TRF (Tilting Rotary Furnace).....	18
3.2.3 Forno URTF (Universal Rotary Titable Furnace).....	19
3.2.4 Forno Reverbero (Reverb Furnace).....	20
3.2.5 Forno Plasma IPT.....	20
3.2.6 Forno Elétrico à Indução (Induction Furnace)	21
3.3 Metalurgia do Pó.....	21
3.4 Espuma Metálica.....	22
3.5 Processos de Fabricação	24
3.5.1 Produção de Espumas Metálicas a Partir do Metal Fundido.....	25
3.5.1.1 Expansão Direta do Metal Fundido	25
3.5.1.2 Solidificação Eutética de Sólido-Gás	26
3.5.1.3 Fundição de Precisão	27
3.5.1.4 Espumas Sintéticas Usando Enchimentos Metálicos	28
3.5.2 Produção de Espumas Metálicas a Partir de Pós.....	28
3.5.2.1 Pulverotecnologia	29
3.5.2.2 Sinterização	29
3.5.2.3 Aprisionamento de Gás	30

3.5.3	Produção de Espuma Metálica a Partir de Partículas Ionizadas.....	30
3.6	Espumas de Alumínio	32
3.6.1	Fatores que Influenciam a Qualidade da Espuma	32
3.6.2	Processo de Fabrico da Espuma de Alumínio Utilizando a Rota da Metalurgia do Pó.....	33
3.7	Aplicações da Espuma de Alumínio	35
3.7.1	Indústria Automotiva.....	35
3.7.2	Absorção de Energia em Caso de Impacto.....	36
3.7.3	Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário.....	37
3.7.4	Outras Aplicações	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	39
4.1	Descrição do Trabalho	39
4.2	Materiais	40
4.3	Preparação das Amostras	40
4.3.1	Reciclagem.....	40
4.3.2	Fundição e Atomização	41
4.3.3	Moagem e Peneiramento	42
4.3.4	Caracterização dos Pós.....	43
4.3.4.1	Difração de Raios-X – DRX.....	43
4.3.4.2	Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X – EDX.....	44
4.3.4.3	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	45
4.3.4.4	Distribuição granulométrica a laser – CILAS	46
4.3.4.5	Analizador Termogravimétrico Diferencial - DTG	47
4.3.5	Preparação dos corpos de prova	48
4.3.5.1	Mistura dos pós.....	48
4.3.5.2	Compactação de amostra	48

4.3.5.3 Sinterização do Compactado Verde	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
5.1 Rentabilidade e Pureza dos Grânulos Obtidos da Reciclagem de Latas de Alumínio	51
5.2 Caracterização dos Materiais no Estado Inicial	51
5.2.1 Difração de Raios-X.....	51
5.2.2 Fluorescência de Raios-X.....	52
5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura	53
5.2.4 Distribuição Granulométrica	54
5.2.5 Análise Termogravimétrica.....	55
5.3 Análise e Caracterização do Compactado a Verde (Mistura dos Pós) e Após Sinterização.....	56
5.3.1 Homogeneidade da Mistura e do Compactado	56
5.3.2 Nucleação	58
5.3.3 Compactação e Sinterização das Amostras	60
6 CONCLUSÃO.....	63
BIBLIOGRAFIA	64

1 INTRODUÇÃO

Desde 2011 o Brasil tem alcançado o recorde de reciclagem de latinha, só em 2014 o Brasil reciclou 289,5 mil toneladas de sucata de latas de alumínio. As latas de alumínio apresentam um alto consumo e ciclo de vida mais curto, sendo assim merecem destaque na reciclagem em relação aos outros produtos de alumínio (ALCOA, 2014).

A larga disponibilidade das latas de alumínio durante todo o ano estimula a reciclagem, além do seu alto valor. Por meio da conscientização populacional, a cadeia de reciclagem é de grande influência ambiental, social e econômica para a sociedade (ABRALATAS, 2011). Economizam-se cinco quilos de bauxita a cada quilo de alumínio reciclado e para o processo da reciclagem economizam-se 95% da energia elétrica utilizada na produção de alumínio primário (ABRELPE, 2009). De acordo com os dados do *International Aluminium Institute*, 95% dos gases emitidos durante a produção primária do alumínio são evitados na reciclagem.

Após a reciclagem das latas, o material é levado à fundição, onde são formados os lingotes, sendo que a temperatura de fusão do alumínio varia de 670 a 700°C. Estes lingotes são transferidos para uma indústria de laminação, onde o alumínio tomará a forma final para comércio. Durante a fusão do alumínio é gerado uma escória, a qual é composta por óxidos de alumínio e óxidos de outros metais (ABAL, 2012).

Para produção de alumínio metálico em pó aplica-se atomização do material ainda líquido seguido de moagem do produto resultando na formação de pó, grânulos ou aglomerados de grânulos menores. As espumas metálicas podem ser formadas por fundição, metalurgia do pó, deposição de vapor metálico e deposição eletroquímica. A metalurgia do pó é o método estudado mais atual, consiste basicamente na compactação de pós metálicos (uma mistura de pó de alumínio e um agente espumante são compactados) e posterior sinterização, onde ocorre a formação de espuma a uma dada temperatura (aquecimento acima do ponto de fusão da liga) (ASHBY, 2000).

As espumas de alumínio apresentam estruturas metálicas porosas com propriedades típicas de materiais celulares. De acordo com sua distribuição de tamanho de poros e características morfológicas, as propriedades físicas e mecânicas serão diferentes, abrangendo uma grande variedade de aplicações, principalmente na indústria automotiva. São normalmente empregadas em situações nas quais o peso deve ser

minimizado e em situações que demandam a capacidade de absorção de esforços de tração ou de compressão, pois apresentam uma excelente capacidade de dissipação da energia de impacto (BELL, 1999).

Embora existam estudos com outros agentes espumantes, o hidreto de titânio (TiH_2) se mostra um agente adequado para formação de espumas de alumínio, ele libera hidrogênio do TiH_2 em torno de $400^\circ C$, temperatura inferior ao ponto de fusão de ligas de alumínio comerciais (GIBSON, 2000).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi o estudo da obtenção de espumas de alumínio através da rota de metalurgia do pó, sendo os pós de alumínio originados da reciclagem, fundição, atomização e moagem dos grânulos produzidos. Assim como, a caracterização da matéria-prima e do agente espumante antes e após o processo de espumagem.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) estudo da viabilidade da reciclagem e da fundição de latas de alumínio;
- b) atomização e moagem do material precursor (latas de bebidas) em pós metálicos;
- c) processamento das espumas de alumínio através da metalurgia do pó (MP), utilizando pós metálicos oriundos de matérias-primas recicladas e do agente expensor;
- d) identificação do estado da arte em materiais para aplicações aeroespaciais e automobilísticas;
- e) avaliação do processamento das espumas de alumínio através da metalurgia do pó (MP), utilizando pós metálicos oriundos de matérias-primas recicladas e agente expensor TiH_2 ;
- f) caracterização por meio de análises físico-químicas: DRX, EDX, MEV, CILAS e EDS.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Reciclagem do Alumínio

Uma das maiores vantagens em reciclar o alumínio é a economia de energia em relação ao processamento do alumínio primário. O processamento do alumínio primário consome em energia elétrica um terço dos custos do processo, gastando aproximadamente 15kWh/kg (SCHMITZ, 2006). A próxima vantagem, destacada por Tenório e Espinosa (2003), está relacionada à redução do consumo do minério e a não geração da lama vermelha durante o processamento primário.

O ciclo da lata de alumínio, no Brasil, desde o consumo até sua volta ao mercado é de aproximadamente 30 dias (ABRALATAS, 2011). Segundo a EAFA (2010) 75% das folhas de alumínio produzidas na Europa são utilizadas na indústria de embalagens. No ano de 2008, na Europa, foram recuperados apenas 45% do alumínio produzido em folhas. Segundo Green (2007) a folha de alumínio é totalmente reciclável, porém o índice de folhas que tem sido efetivamente reciclada é limitado. Devido à fina seção transversal e área de superfície elevada, a folha tende a ser rapidamente transformada em óxido e escória, gerando um baixo índice de rendimento do processo. Outro problema apontado pelo mesmo autor é a reciclagem de materiais compósitos contendo alumínio.

Segundo Padilha (2007) “materiais compósitos são aqueles projetados de modo a conjugar características desejáveis de dois ou mais materiais”. São exemplos de materiais compósitos que utilizam folhas de alumínio as embalagens longa vida, que combinam folhas de alumínio com plástico e papel em camadas. A reciclagem desses materiais tem sido um problema. No entanto, em 2005, uma parceria entre a Alcoa Alumino, a Tetra Pak, Klabin, TSL e Ambiental anunciou uma solução para a reciclagem de embalagens longa vida: um jato de plasma de alta temperatura para aquecer a mistura de plástico e alumínio sob atmosfera inerte. O plástico é convertido em parafina, e o alumínio é recuperado na forma de lingotes que podem ser utilizados na fabricação de novas folhas.

3.2 Fundição do Alumínio Reciclado

Existem diversos tipos de fornos utilizados na fusão de ligas de alumínio reciclados. O tipo de forno a ser utilizado em uma indústria de reciclagem de alumínio depende de vários fatores, entre eles está a dimensão do material compactado, a quantidade de material reciclado, a taxa de produção exigida, a forma de energia utilizada e o investimento exigido (SCHMITZ, 2006).

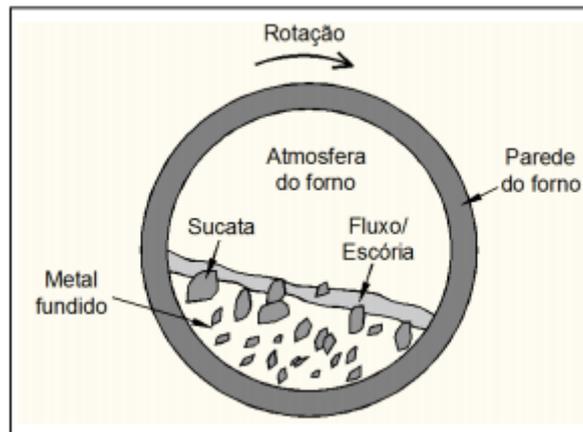
Há duas classificações para os fornos:

- a) segundo o tipo de energia utilizada na fusão da sucata: a energia elétrica e a energia gerada por combustíveis fósseis;
- b) segundo a estrutura dos fornos de fusão, podendo ser fornos revérberos, fornos rotativos e fornos cadinho.

3.2.1 Forno Rotativo Horizontal

O forno rotativo horizontal (Figura 1) é constituído por um cilindro em aço que gira em torno de seu eixo de simetria, revestido de material refratário na parte inferior. As duas extremidades são abertas, por uma delas é realizada a alimentação da sucata e saída dos gases, na outra há um queimador. O alumínio fundido é vazado através de uma abertura na lateral da carcaça do forno. Os queimadores utilizam combustíveis como óleo queimado; óleo combustível pesado BPF, óleo de xisto, gás liquefeito do petróleo ou gás natural tendo como comburente o ar (TENÓRIO; ESPINOSA, 2003).

Figura 1 – Forno rotativo horizontal em corte.



Fonte: Adaptado de ZHOU *et al.*, 2006.

3.2.2 Forno TRF (Tilting Rotary Furnace)

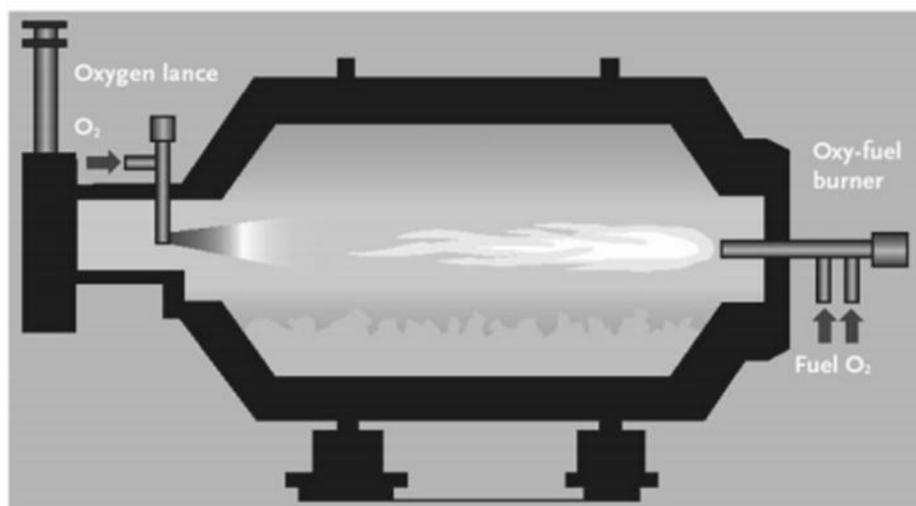
O forno Rotativo Basculante TRF (Figura 2) possui somente uma abertura onde se localiza o queimador e faz o carregamento da sucata, o vazamento do líquido e a retirada da escória. Apresenta grande dimensão quando comparado ao forno rotativo horizontal, as operações citadas ocorrem com maior facilidade, reduzindo, assim, o tempo de produção.

Figura 2 – Forno TRF.

Fonte: ALTEK-MDY, 2009.

3.2.3 Forno URTF (*Universal Rotary Titable Furnace*)

Segundo Bender e Cruz (2005), o principal diferencial desse forno em relação aos citados acima é a utilização de mais uma entrada de oxigênio com maior controle da direção da chama e conseqüentemente melhor eficiência na queima. O forno URTF pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 – Forno UTRF.

Fonte: Biedenkopf *et al.*, 2011.

3.2.4 Forno Reverbero (*Reverb Furnace*)

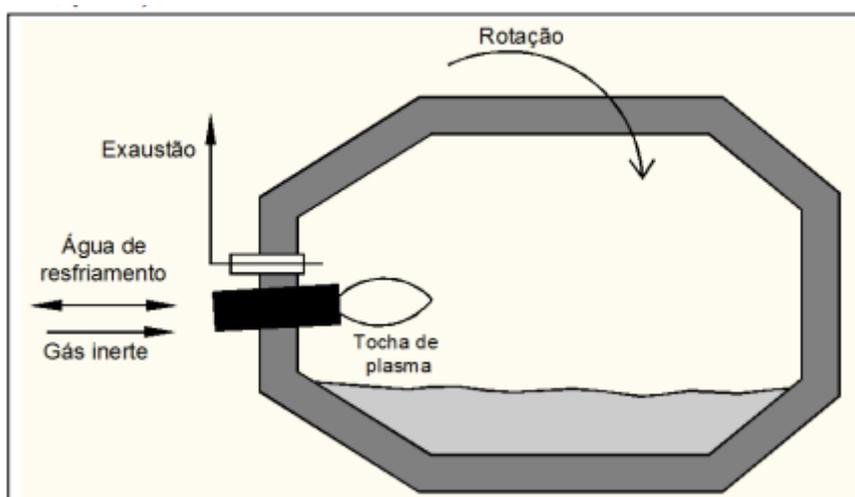
De acordo com Schlesinger (2007), o forno reverbero maximiza a eficiência térmica pela sua grande capacidade de fusão por volume, com isso, diminui o consumo de combustível. O sistema possui uma bomba que faz a circulação do alumínio fundido, e uma câmara de circulação localizada na saída da bomba que tem a finalidade gerar um vórtex (PYROTEK, 2008).

O vórtex gerado evita que o material de pequena espessura flutue sobre o líquido fundido reduzindo o contato com a atmosfera oxidante do forno, assim ele vai para dentro do meio líquido e diminui sua oxidação (ABAL, 2007).

3.2.5 Forno Plasma IPT

Este forno, que está demonstrado na Figura 4, não utiliza atmosfera de oxigênio o que evita a oxidação do metal, sendo assim não há necessidade da utilização de fluxos salinos para proteção do banho fundido, evitando a formação da borra preta (SZENTE *et al.*, 1997). Ele permite o aquecimento direto da carga por transferência de calor predominantemente convectiva, decorrente da circulação dos gases no arco de plasma (BENDER; CRUZ, 2005).

Figura 4 – Forno a plasma IPT.



Fonte: ABAL, 2007.

3.2.6 Forno Elétrico à Indução (*Induction Furnace*)

Pertencente à família dos fornos tipo cadinho podem ser forno elétrico à indução a canal e forno elétrico à indução a cadinho. O forno elétrico à indução possui a capacidade de uma melhor homogeneização das ligas produzidas, sendo elas de melhor qualidade (LUZGIN *et al.*, 2004). Verran *et al.* (2005) verificou que com este forno o alumínio secundário obtido apresenta melhor qualidade.

Sua forma de aquecimento e fusão da carga é através do Efeito Joule, sendo assim não gera gases, o que por consequência garante a qualidade da liga, redução da oxidação, diminuição dos impactos ambientais e melhora das condições de trabalho para os operadores do forno (SCHMITZ, 2006).

3.3 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó resume-se em transformar pó de metais em peças pela aplicação de pressão e calor. Por processo de cominuição de grânulos metálicos, atomização do material fundido seguido de moagem, são obtidos pós metálicos. Estes pós metálicos são homogeneizados e compactados em matrizes, após adquirir a peça na forma desejada, esta é submetida a um aquecimento a fim de produzir a ligação entre as partículas, ou seja, o coalescimento dos grãos (ASHBY, 2011).

O tamanho, a forma e a distribuição dos grãos são parâmetros importantes na confecção de peças sinterizadas. Os métodos de obtenção que podem ser mecânicos, químicos, físicos e físico-químicos, dependem do que pretende obter de características finais. Sendo um dos métodos físicos mais utilizados, o processo de atomização é o vazamento do metal líquido por uma abertura do forno formando um filete líquido que é atingido por jatos de ar, de gás ou de água produzindo grânulos de tamanhos variados de metal sólido (ASHBY, 2011).

Dentre os métodos mecânicos mais usados para obtenção de pós, a moagem é feita num equipamento chamado moinho de bolas, que consiste num tambor rotativo contendo esferas metálicas ou cerâmicas de material resistente ao desgaste. Quando o tambor gira, as esferas chocam-se e atritam-se umas contra as outras, desintegrando gradativamente o material que se encontra no interior do tambor (ASHBY, 2011).

Para a compactação determina-se uma quantidade de pó e colocada na cavidade de um molde em uma prensa de compressão, que pode ser mecânica ou hidráulica. A compactação ocorre por deslocamentos simultâneos dos punções superior e inferior, à temperatura ambiente ou em aquecimento (GIBSON, 2007).

Durante a compactação, a pressão provoca deformação plástica das partículas favorecendo o entrelaçamento dos grãos, ou seja, através da energia de superfície das partículas nanométricas é gerado uma ligação entre as partículas. Sendo assim a densidade do material é elevada e forma-se o compactado verde (GIBSON, 2007).

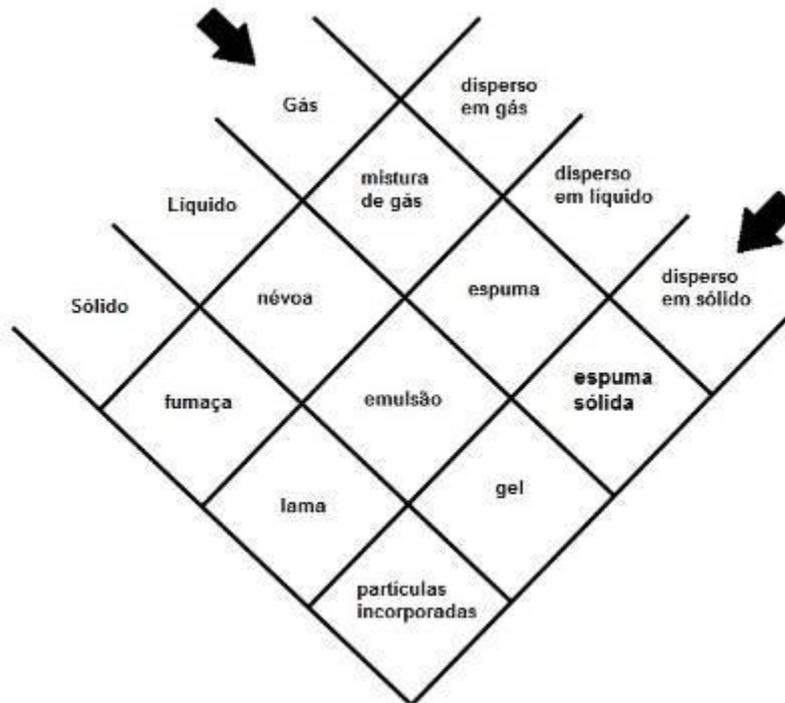
Na etapa final de consolidação da metalurgia do pó, chamada de sinterização, o compactado verde é submetido a temperaturas, rampa de aquecimento ou choque térmico e taxa de resfriamento (GIBSON, 2007).

3.4 Espuma Metálica

Segundo Daxner (2011), espumas metálicas são metais celulares originados de uma matriz metálica líquida com células fechadas e separadas umas das outras por um fino filme metálico. As estruturas de células abertas são denominadas de esponjas metálicas.

A Figura 5 enumera as denominações de todas as dispersões possíveis de uma fase em outra, sendo assim, conclui-se que espumas são dispersões uniformes de uma fase gasosa em uma matriz líquida ou sólida. O termo "espuma" refere-se a uma dispersão de bolhas de gás em um líquido. Se a estrutura das espumas for preservada durante a solidificação, obtém-se o que é chamado de "espuma sólida".

Figura 5 – Dispersão de uma fase em outra, onde cada fase pode estar nos três estados da matéria.



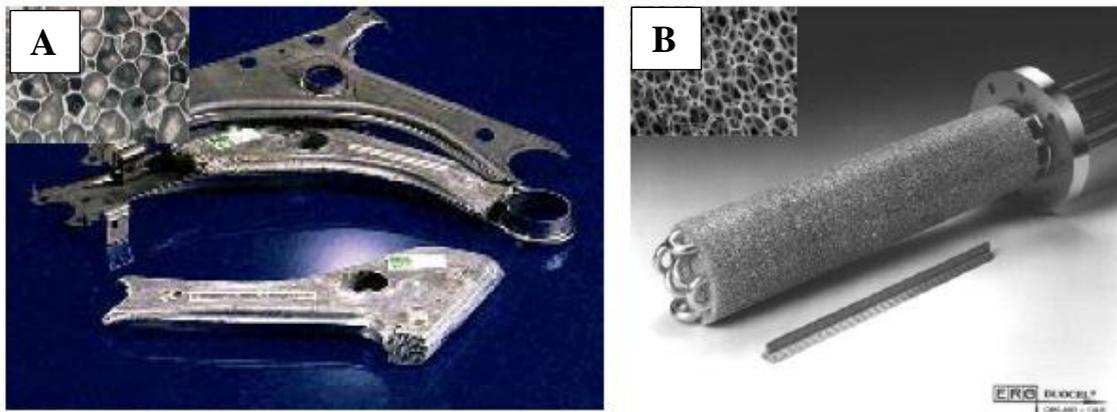
Fonte: Bell, 2011.

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

Estruturas fechadas (Figura 6a) estão ligadas a resistência ao impacto, isolamento acústico, baixo peso e amortecimento de vibrações. Isto faz com que sejam aplicadas na indústria de transportes, proporcionando uma redução no consumo de combustível e segurança passiva dos passageiros (BELL, 2011).

Estruturas aberta (Figura 6b) estão ligadas a porosidade aberta e elevada área específica, isto garante baixo peso e faz com que sejam aplicadas na indústria química, como filtros, reservatórios de fluidos e permutadores de calor (BELL, 2011).

Figura 6 – Exemplos de aplicações de espuma metálica de estrutura fechada (A) e de estrutura aberta (B).

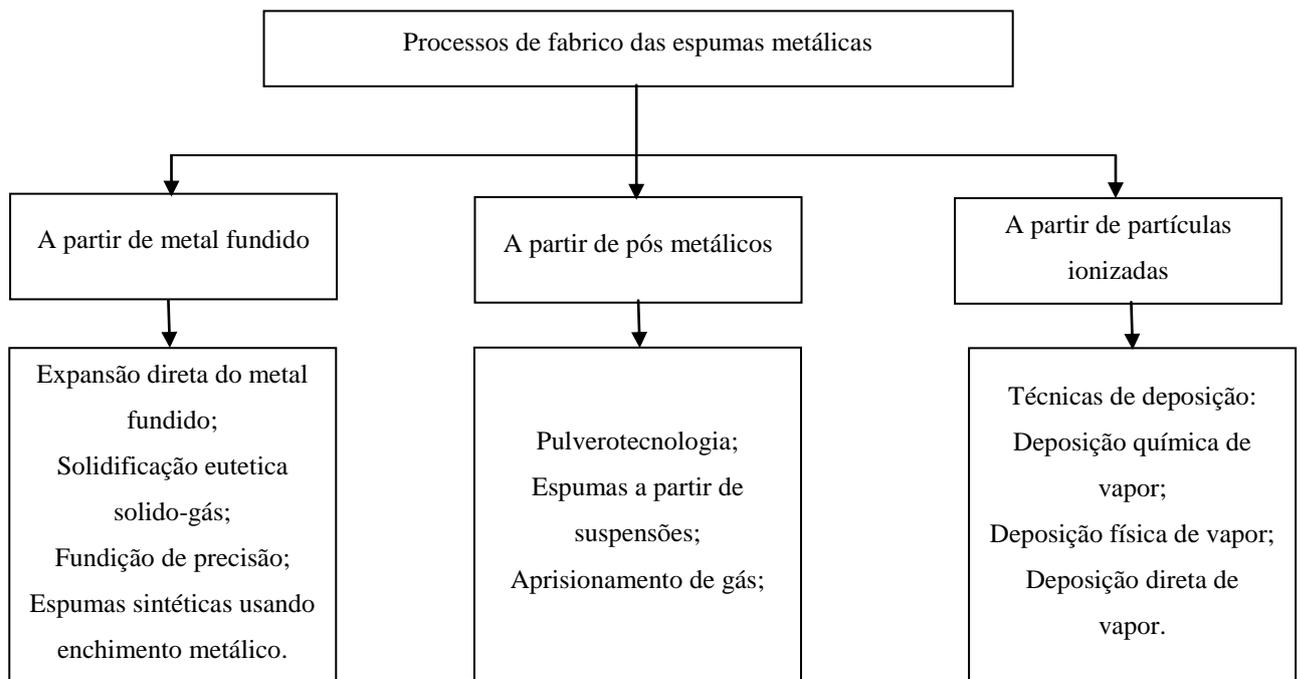


A: Componente de automóvel.
 B: Permutador de calor.
 Fonte: Bell, 2011.

3.5 Processos de Fabricação

O processo de fabricação ocorre conforme o fluxograma da Figura 7:

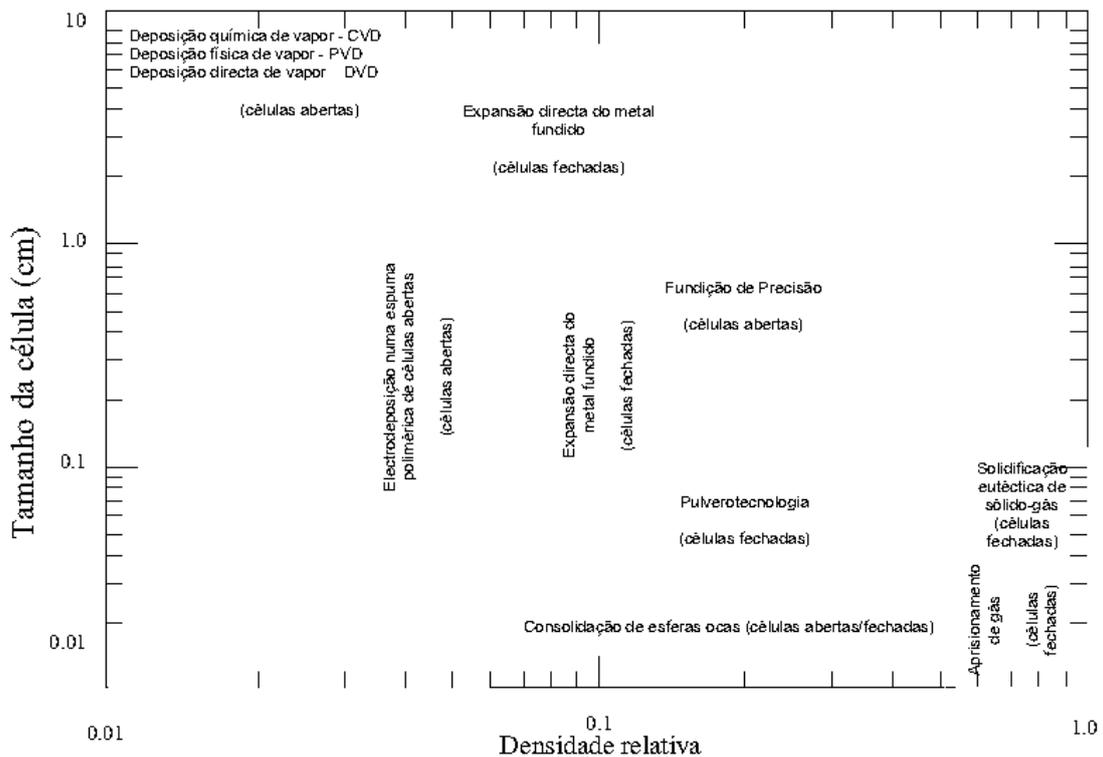
Figura 7 – Processo de fabricação.



Fonte:Próprio autor.

Dependendo do processo usado, podem-se obter diferentes estruturas e várias densidades, conforme a Figura 8:

Figura 8 – Variação da densidade e do tamanho de células para espumas obtidas através de diferentes processos de fabrico.



Fonte: Ashby, 2011

3.5.1 Produção de Espumas Metálicas a Partir do Metal Fundido

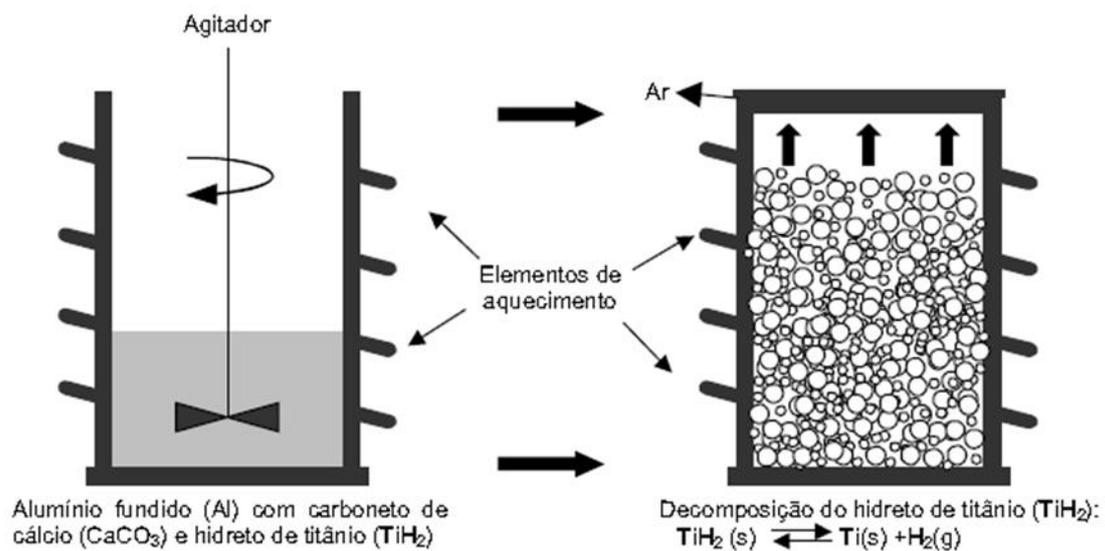
Neste processo pode ser injetado gás diretamente no interior do metal fundido ou adicionar o agente expensor, o qual irá se decompor termicamente liberando o gás.

3.5.1.1 Expansão Direta do Metal Fundido

Neste processo, demonstrado na Figura 9, obtêm-se espumas metálicas por injeção de gás no interior do metal fundido ou adicionando um agente expensor, o qual sofrerá decomposição térmica liberando gás. Este gás pode atingir rapidamente a superfície o líquido, para evitar isto, são adicionados pós cerâmicos finos, sendo assim,

a viscosidade do material poderá ser controlada, controlando também a velocidade da saída do gás.

Figura 9 – Processo de espumagem.

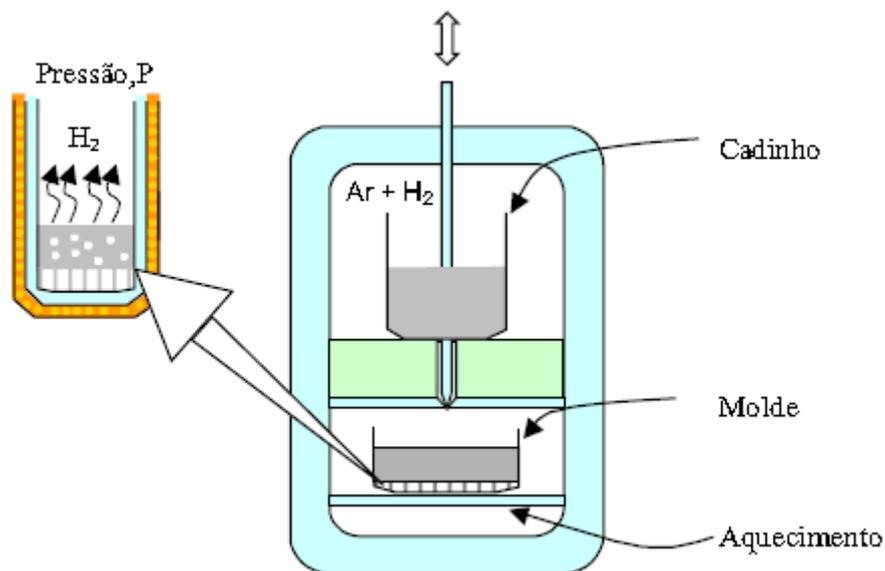


Fonte: Gibson, 2011.

3.5.1.2 Solidificação Eutética de Sólido-Gás

O processo de solidificação eutética de sólido-gás, demonstrado na Figura 10, consiste na fusão do metal numa atmosfera de hidrogênio, sendo arrefecida através do ponto eutético. Após a difusão do hidrogênio gasoso no metal líquido ocorre a solidificação e nucleação dos poros. Este processo permite a obtenção de materiais porosos com uma estrutura celular uniforme através da manipulação da temperatura e da pressão, podendo produzir uma porosidade graduada ou um sólido alternativo com camadas porosas alternadas.

Figura 10 – Solidificação eutética de sólido-gás.

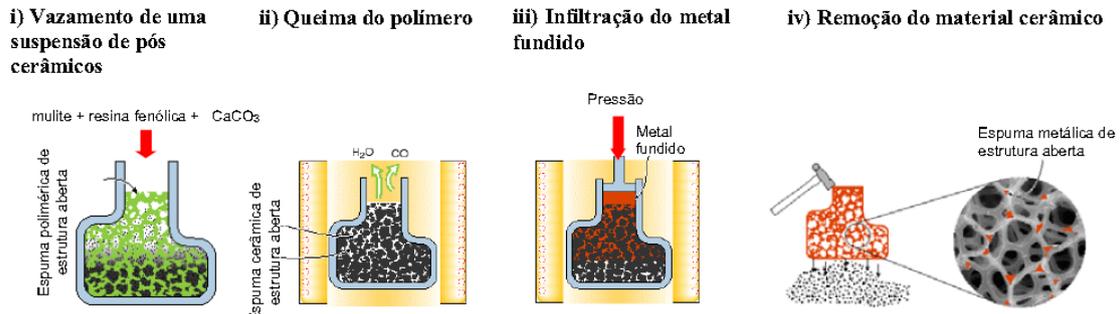


Fonte: Bell, 2009.

3.5.1.3 Fundição de Precisão

Neste processo, demonstrado na Figura 11, utiliza-se uma espuma polimérica, a estrutura final metálica deve apresentar a mesma geometria e porosidade. A espuma polimérica é preenchida por uma suspensão de um material resistente ao calor, em seguida a mistura é seca e a espuma polimérica é removida por simples aquecimento, resultando em uma espuma cerâmica. O metal líquido é vazado para o interior da espuma cerâmica e, após, o material cerâmico é retirado, obtendo a espuma metálica final.

Figura 11 – Método de fundição de precisão.

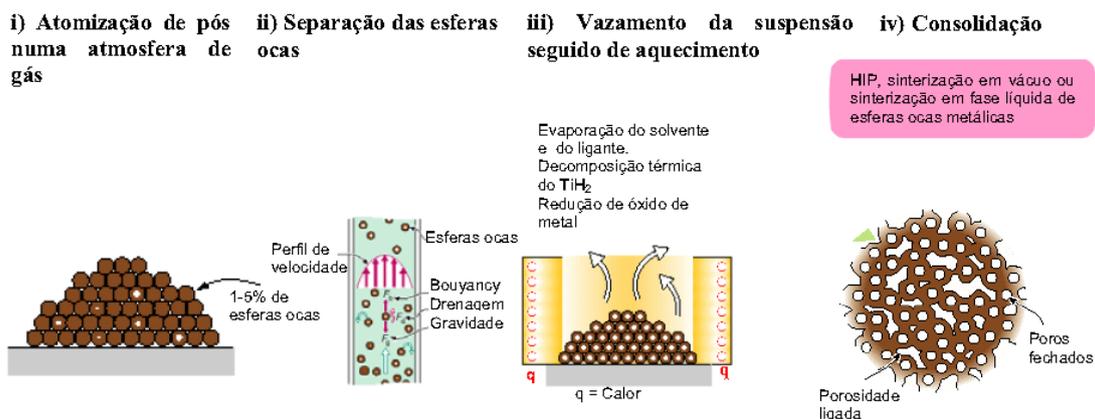


Fonte: Bell, 2009.

3.5.1.4 Espumas Sintéticas Usando Enchimentos Metálicos

Material de porosidade leve pode ser produzido através do vazamento de metal fundido para o interior de grânulos ocos de baixa densidade, segundo o processo apresentado na Figura 12. A condutividade térmica dos grânulos ocos é baixa, não perturbando o escoamento do metal fundido. Porém, devido à elevada tensão superficial do fundente, o molhamento dos grânulos se torna difícil, podendo não preencher totalmente os interstícios entre os grânulos, sendo assim, é feito um vácuo para facilitar a infiltração do fundido.

Figura 12 – Processo de fabrico de espumas sintéticas.



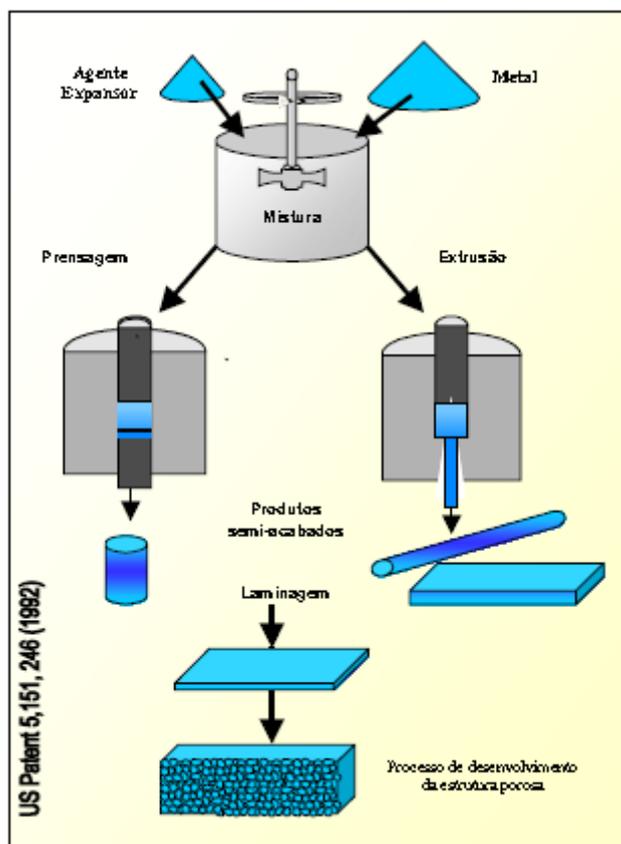
Fonte: Bell, 2009.

3.5.2 Produção de Espumas Metálicas a Partir de Pós

3.5.2.1 Pulverotecnologia

O processo, demonstrado na Figura 13, consiste na compactação a quente de uma mistura de pós metálicos e de agente expensor, obtendo no final o compactado a verde. A compactação pode ser por prensagem uniaxial, prensagem isostática e extrusão, os produtos semiacabados podem ainda ser laminados. Segue-se para a etapa de expansão, onde o compactado a verde é submetido a um aquecimento acima da temperatura de fusão do metal. As espumas resultantes deste processo apresentam estrutura porosa fechada com uma superfície densa, consequentemente, as propriedades mecânicas são melhoradas.

Figura 13 – Processo de Pulverotecnologia.



Fonte: Bell, 2009.

3.5.2.2 Sinterização

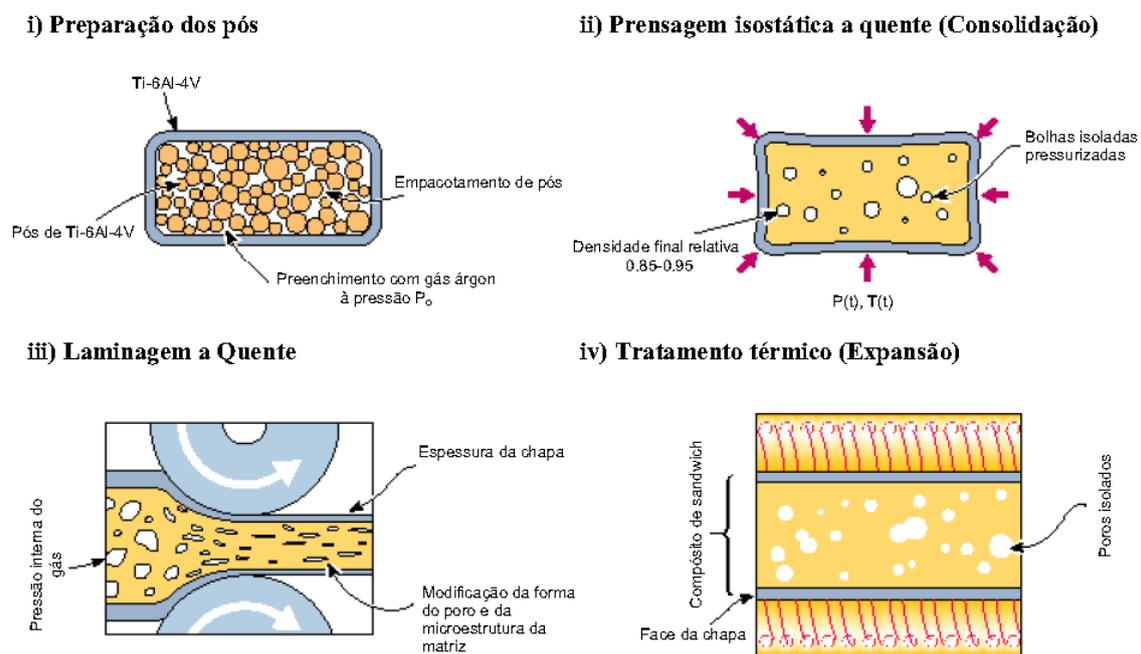
Método mais utilizado para produção de materiais porosos de células abertas. O material em pó não sofre compressão, o molde é preenchido por pó de metal e sinterizado, a fim de preservar a maior porcentagem de porosidade. A densidade relativa varia entre 40 a 60% da densidade teórica.

O pó metálico apresenta granulometria até 400 mesh e na preparação da mistura coloca-se um aditivo orgânico. A mistura sofre ataque químico, é seca durante 2 horas a 100°C para aumentar a resistência mecânica, que ainda assim, é relativamente baixa.

3.5.2.3 Aprisionamento de Gás

Neste processo, demonstrado na Figura 14, não se utiliza agente expensor, o gás é aprisionado na matriz metálica durante a compactação de pós metálicos. O aquecimento do material origina a expansão do metal devido à pressão interna criada pelo gás aprisionado.

Figura 14 – Processo de aprisionamento de gás para espuma porosa de titânio.

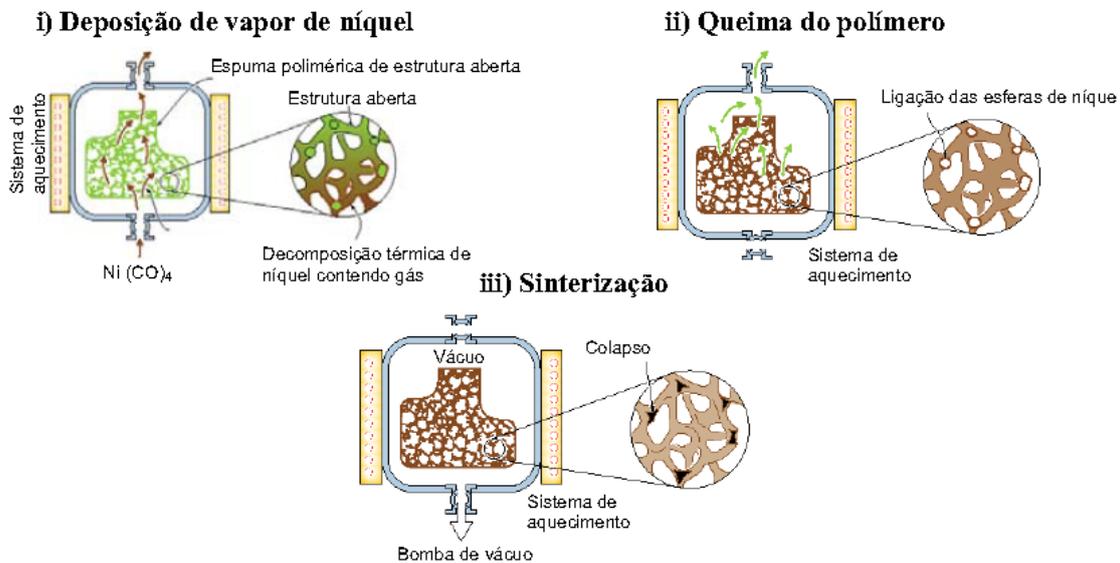


Fonte: Ashby, 2011.

3.5.3 Produção de Espuma Metálica a Partir de Partículas Ionizadas

Este processo pode ser feito por CVD, PVD ou DVD. Como exemplo, pode ser citada a metalização de uma espuma de poliuretano de estrutura aberta, na qual a espuma é revestida por uma camada elétrica condutiva por técnicas de PVD. Por fim, remove-se o substrato de poliuretano por decomposição térmica. A Figura 15 ilustra um processo de obtenção de espuma por eletrodeposição.

Figura 15 – Obtenção de espuma de níquel através de eletrodeposição.



Fonte: Gibson, 2009.

3.6 Espumas de Alumínio

Apesar da possibilidade de processo de espumagem de diversos metais, a espuma de alumínio apresenta grande aplicação industrial, principalmente automotiva. A partir da rota da metalurgia do pó, o processo para a obtenção da espuma começa com a mistura do pó de alumínio com um agente espumante, em seguida a mistura é compactada confirmando a inexistência de qualquer poro aberto. Após o material ser compactado, este é aquecido acima da temperatura do ponto de fusão e assim obtém-se a espuma. Durante o aquecimento, o gás é formado a partir do agente expensor formando bolhas na liga fundida resultando em uma estrutura porosa com menor densidade que o compactado verde (SEELIGER, 2000).

3.6.1 Fatores que Influenciam a Qualidade da Espuma

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

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

Para se obter espumas de alumínio de boa qualidade através da metalurgia do pó segue-se alguns parâmetros:

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

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

Banhart *et al.* (2008) descreveram a técnica de obtenção via metalurgia do pó, utilizando na etapa de compactação o processo de extrusão. O processo inicia-se com a mistura de pós de alumínio metálico com um agente espumante, podendo este ser hidreto de titânio, hidreto de zircônia, carbonato de cálcio, entre outros. Após a mistura deve ser compactada por prensagem a quente, laminação ou extrusão. Esta compactação deve ser suficiente para que não tenha nenhuma porosidade aberta ou trinca formada no molde.

O molde compactado deve ser aquecido acima da temperatura de fusão da liga metálica, ou seja, o processo de espumagem. Durante o aquecimento o gás evolui a partir do agente expensor formando bolhas, o resultado é uma estrutura altamente porosa. O agente expensor se decompõe criando espaços vazios com uma alta pressão

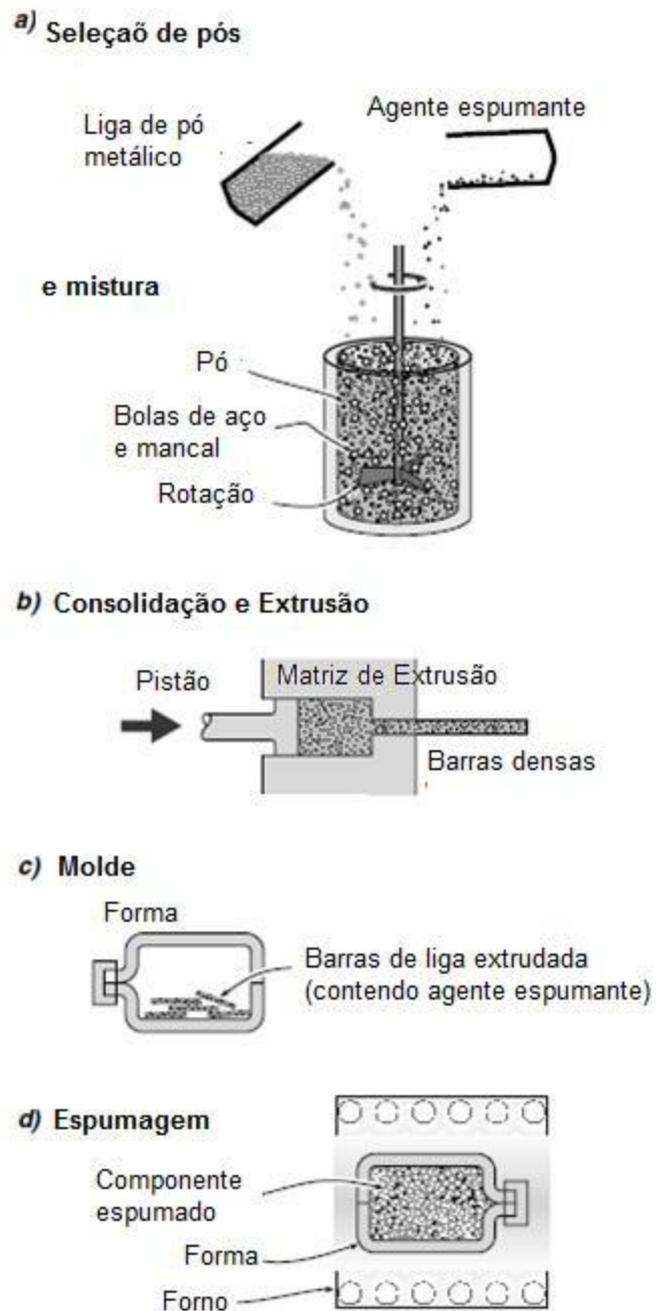
interna. Os poros crescem continuamente durante o aquecimento e pode ser controlado pela deposição do agente expensor e pela taxa de aquecimento.

De acordo com Ashby (2011), para que a compactação seja efetiva e as partículas unam-se é necessária que a densidade final seja maior que 95% da densidade do metal sólido. Ou seja, a densidade do alumínio sólido é 2700 Kg/m^3 , então a densidade do compactado deve ser no mínimo igual a 2560 Kg/m^3 .

Kim *et al.* (2008), obtiveram espuma metálica a partir da mistura dos pós de alumínio e hidreto de titânio. A vantagem em utilizar a técnica de obtenção de espuma via metalurgia do pó é a possibilidade de obter peças de baixa densidade e próximas da forma final de uso. Para isso é necessário garantir uma distribuição homogênea do agente espumante.

A Figura 16 ilustra o processo descrito de obtenção de espuma via metalurgia do pó.

Figura 16 – Processo de fabrico de espuma via metalurgia do pó.



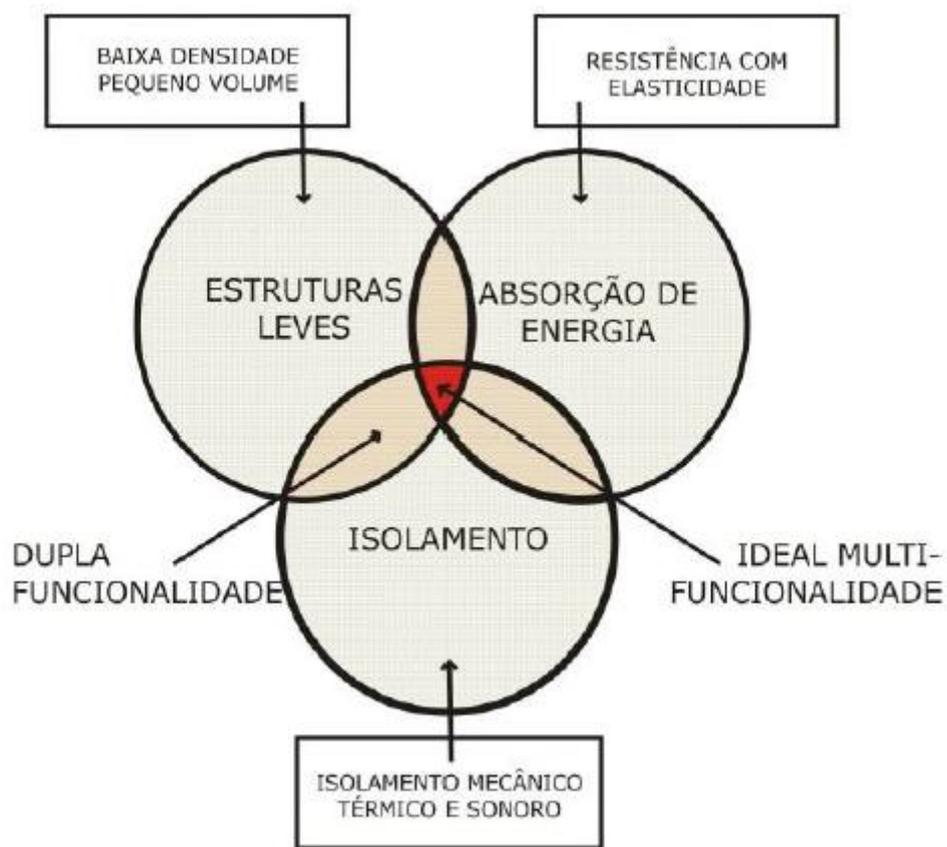
Fonte: Bell, 2009.

3.7 Aplicações da Espuma de Alumínio

3.7.1 Indústria Automotiva

A indústria automotiva é um dos setores mais promissores na utilização de espuma de alumínio. Está em estudo a produção em massa de forma mais econômica para o grande mercado. A indústria busca por tecnologias de veículos mais resistentes e mais leves ao mesmo tempo, além da necessidade de reduzir as emissões acústicas decorrentes do carro. De acordo com Banhart (2008), a solução destes problemas pode ser encontrada nas espumas de alumínio, conforme apresenta a Figura 17.

Figura 17 – Campos de aplicação de espuma metálica com função estrutural no setor automotivo.



Fonte: Banhart (2008),

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

3.7.2 Absorção de Energia em Caso de Impacto

Segundo Banhart (2008), junto com a absorção de energia está a exploração da deformação plástica. Pode-se observar que, sob pressão, a espuma possui uma fase inicial elástica, seguida por uma zona de transição, um platô e uma densificação.

Segundo Ashby (2011), espumas de alumínio apresentam baixo “*ricochete*” em situações de impacto dinâmico, com índice menor que 3%, isto comprova sua aplicação em casos de absorção de energia em impactos.

3.7.3 Setor de Transporte: Espacial, Aéreo, Naval e Ferroviário

Segundo Banhart (2008), as espumas de alumínio são aplicadas na indústria aeronáutica, substituindo painéis sanduíche com melhor performance e menores gastos econômicos. As espumas também estão avaliadas para reforço estrutural de satélites.

Na indústria naval é aplicada devido a leveza associada ao custo, como as espumas requerem menor quantidade de material metálico para um mesmo volume final que um material denso, ela é totalmente benéfica ao meio ambiente.

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

3.7.4 Outras Aplicações

As espumas também possuem propriedades térmicas e acústicas, podendo ser usada como trocadores de calor e até utensílios de cozinha (Figura 18) devido à boa distribuição de calor.

Figura 18 – Chapa sanduíche aplicada em utensílios domésticos.



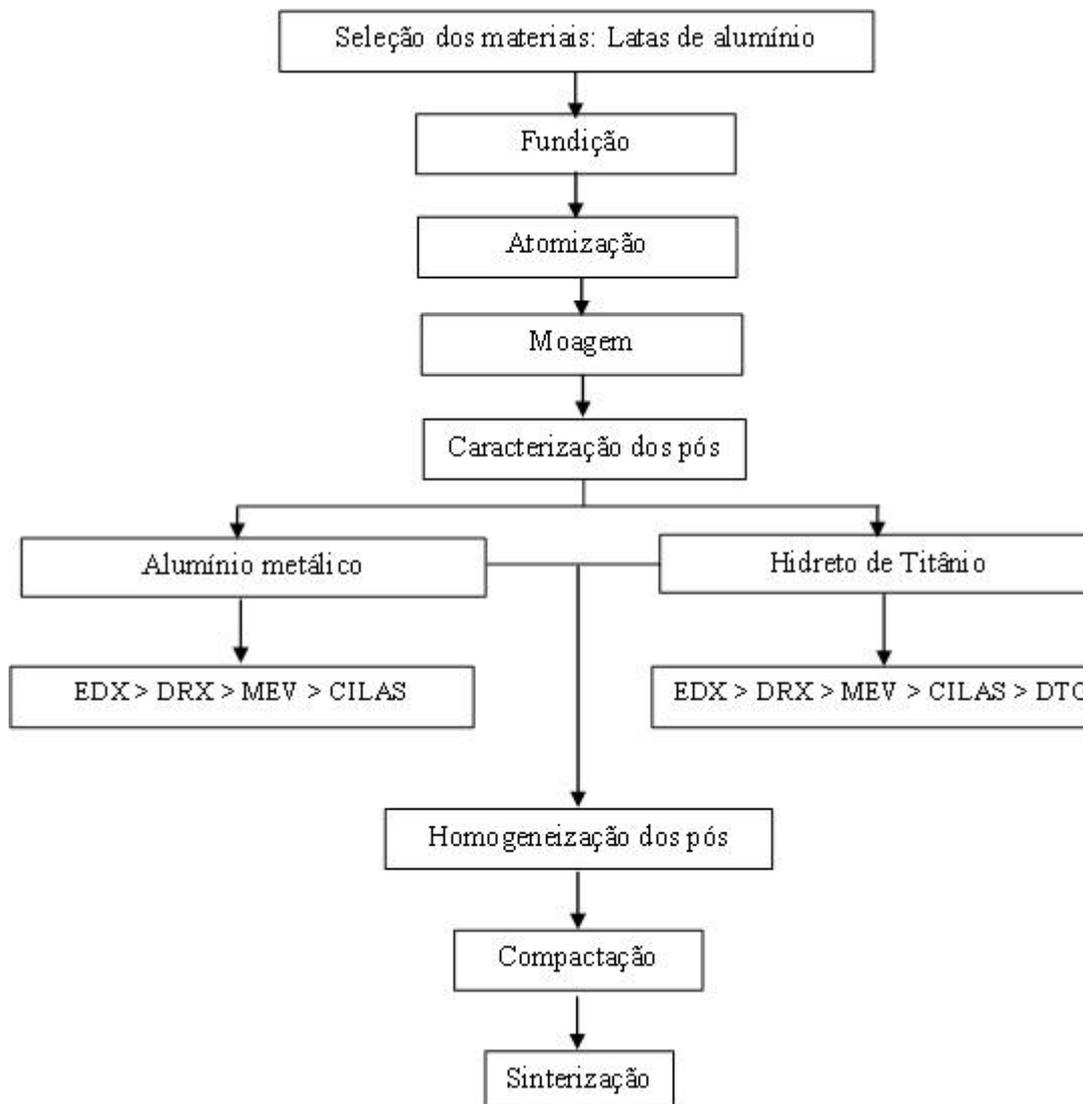
Fonte: Bell, 2009.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do Trabalho

O presente trabalho consistiu no estudo de se reciclar latas de alumínio para a transformação em pós de alumínio metálico e a caracterização dos materiais utilizados para a confecção da espuma de alumínio seguido de determinação dos parâmetros para o devido processamento. Um fluxograma com representação da metodologia é apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Fluxograma de atividades.



Fonte: Próprio autor.

4.2 Materiais

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de pós, um de alumínio produzido no Departamento de Materiais do CEFET MG e o outro um pó de hidreto de titânio adquirido de uma empresa chinesa, Chengdu Huarui Industrial. Os dois materiais foram devidamente caracterizados para comprovar a pureza e identificar a temperatura ideal para a liberação do gás no material precursor alumínio. O processo utilizado para a espumagem do alumínio foi via metalurgia do pó. Com base em literatura seguiu-se uma proporção de mistura de 1% de agente espumante, hidreto de titânio. O material foi compactado em prensa mecânica e sinterizado a 720°C.

4.3 Preparação das Amostras

4.3.1 Reciclagem

Foram definidos como material para ser reciclado as latas de alumínio (Figura 20), devido ao seu alto teor de contaminantes como tintas, com o propósito de se avaliar a rentabilidade final da fundição em relação a produção de escória.

Figura 20 – Latas de alumínio destinadas à fundição.



Fonte: Próprio autor.

4.3.2 Fundição e Atomização

Foi utilizado um forno de cadinho (Figura 21) a gás do CEFET-MG – laboratório de fundição, utilizado para fusão de metais não ferrosos com microprocessador para controle de temperatura e basculamento manual. O forno é preaquecido e preenchido com as latas de alumínio e programado o aquecimento até 800°C. Em torno de 720°C o material já está na sua forma líquida e com 60 minutos já se pode retirar a escória que fica sobrenadando o alumínio líquido (Figura 22). O alumínio líquido é vertido por filete em um tambor preenchido com água para resfriamento e com jato de ar direcionado para a possível quebra do filete de alumínio produzindo grânulos ocós de alumínio de diversos diâmetros (Figura 23).

Figura 21 – Forno de cadinho a gás.



Fonte: Próprio autor.

Figura 22 – Retirada da escória sobrenadante do alumínio líquido.



Fonte: Próprio autor.

Figura 23 – Grânulos de alumínio advindos do processo de atomização.



Fonte: Próprio autor.

4.3.3 Moagem e Peneiramento

Foi utilizado um moinho de bolas do laboratório de cerâmicos do CEFET-MG para moer os grânulos produzidos no processo de atomização. Sendo que o tempo necessário para a moagem foi de 50 horas. Em seguida, o material moído foi peneirado a fim de se obter pó de alumínio com granulometria maior que 325 mesh.

Segundo Ashby (2011) quanto menor o tamanho de grão, maior será a área superficial resultante, isto acarreta uma maior energia de ligação e proporciona uma efetiva ligação entre as partículas quando compactado.

4.3.4 Caracterização dos Pós

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

- a) difração de raio-X (DRX) para confirmação da estrutura cristalina;
- b) espectroscopia de fluorescência de raio X (EDX) para análise química, verificando a pureza do alumínio;
- c) microscópio eletrônico de varredura (MEV) para analisar a morfologia do alumínio puro;
- d) granulômetro a laser (CILAS);
- e) análise termogravimétrica (DTG) especificamente para o hidreto de titânio a fim de verificar as temperaturas de liberação de gás.

4.3.4.1 Difração de Raios-X – DRX

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

O equipamento utilizado foi o XRD modelo 7000 da Shimadzu (Figura 24), disponível no laboratório de caracterização do CEFET MG. Para a amostra estudada, alumínio, utilizou-se um ângulo de varredura de 10 a 80° com velocidade de 0.5°/minuto.

Figura 24 – XRD- Difratorômetro de raio X.



Fonte: Próprio autor.

4.3.4.2 Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X – EDX

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

O equipamento utilizado foi o EDX modelo 720-Rayny da Shimadzu (Figura 25) disponível no laboratório de caracterização do CEFET-MG. Para a análise utilizou-se um método semi quantitativo num ambiente a vácuo.

Figura 25 – Fluorescência de raio X.



Fonte: www.shimadzu.com.br (2016)

4.3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Segundo Mannheimer (2013) o microscópio eletrônico de varredura (MEV) é uma ferramenta capaz de gerar imagens topográficas de alta ampliação e resolução. Seu princípio de funcionamento é a transcodificação da energia emitida por um feixe de elétrons de pequeno diâmetro que interage com a superfície da amostra.

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

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

Cada um dos sinais gerados pela interação do feixe com a amostra requer um detector adequado. As imagens geradas por elétrons secundários fornecem informações de morfologia, enquanto que as imagens geradas por elétrons retroespalhados mostram

diferença de densidade pelo número atômico, permitindo análise de contraste químico, por exemplo. O limite de resolução do equipamento é determinado pelo diâmetro da região da amostra que, excitado pelo feixe primário, emite o sinal considerado.

O equipamento utilizado foi o microscópio eletrônico de varredura VEGA da Tescan com Detector SE (elétrons secundários) para imagens de morfologia (Figura 26). Por serem amostras condutivas, não foi necessária a metalização, utilizou-se uma tensão de carregamento de 20KV e diâmetro de feixe de elétrons de 12.

Figura 26 – Microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Próprio autor.

4.3.4.4 Distribuição granulométrica a laser – CILAS

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

equipamento utiliza o método *Fraunhofer* que considera todas as partículas esféricas, e fornece dados de distribuição granulométrica do material.

A análise granulométrica foi feita no equipamento CILAS modelo 1190 da Acil Weber (Figura 27), o qual possui uma ampla faixa de medida de 0,04µm a 2500µm. Este equipamento está disponível no laboratório de cerâmicas avançadas do CEFET-MG. O método utilizado foi o *Fraunhofer* no modo líquido com 40 minutos de dispersão sob ultrassom sem agentes dispersantes e valor de obscuração 11.

Figura 27 – Granulometro a laser CILAS 1090.



Fonte: www.acilweber.com.br (2016)

4.3.4.5 Analisador Termogravimétrico Diferencial - DTG

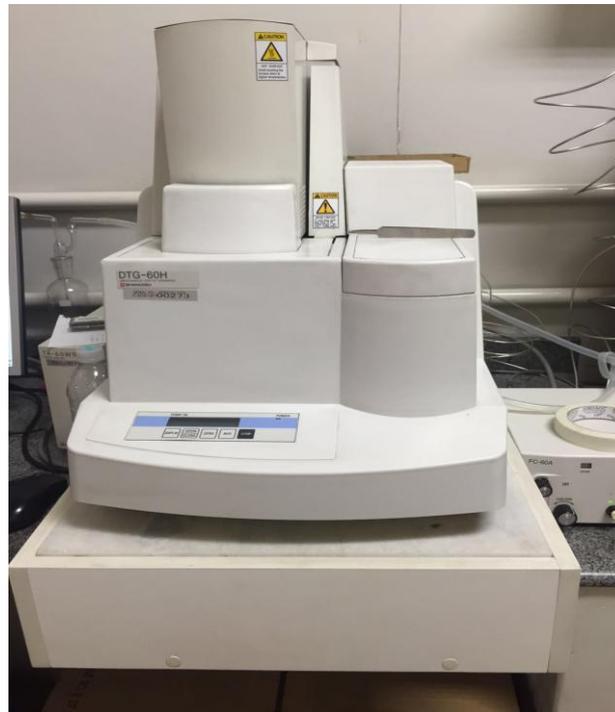
Na análise termogravimétrica derivada (DTG), a derivada da variação de massa em relação ao tempo (dm/dt) é registrada em função da temperatura ou tempo.

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

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

Para esta análise foi utilizada um equipamento DTG 60 da Shimadzu (Figura 28) em atmosfera de Nitrogênio em um fluxo de 30 mL/minuto a uma rampa de temperatura a 10°C/minuto de 30°C até 780°C em panela de platina.

Figura 28 – DTG 60H- Shimadzu.



Fonte: Próprio autor.

4.3.5 Preparação dos corpos de prova

4.3.5.1 Mistura dos pós

Os pós foram preparados com 1% em massa de hidreto de titânio totalizando para cada corpo de prova 20 gramas de material. Esta mistura de pós foi homogeneizada em um vidro circular com 1/3 do volume com amostra e 2/3 de sílicas esféricas e rotacionado manualmente por 1 hora, o sucesso da homogeneização foi verificada no mapeamento do detector EDS acoplado ao MEV VEGA da Tescan.

4.3.5.2 Compactação de amostra

O pó misturado foi compactado em uma prensa mecânica através de uma matriz cilíndrica (Figura 29) de 15 mm de diâmetro e altura de 100 mm. A lubrificação foi feita através de duas maneiras, com molicote A2 composto por dissulfeto de molibdênio, ele é anticorrosivo e não reage com metais formando uma fina película de proteção entre dois metais. O segundo lubrificante foi pó de estearato de zinco, bom lubrificante. A lubrificação deve ser fina para não contaminar a mistura compactada. Testou-se valores diferenciados de pressão, 200 MPa e 350 MPa em uma prensa mecânica.

Figura 29 – Matriz cilíndrica utilizada na compactação dos pós $Al - TiH_2$.



Fonte: Próprio autor.

4.3.5.3 Sinterização do Compactado Verde

O compactado verde foi sinterizado em um forno elétrico tipo mufla, marca Analógica, modelo AN1222, exibido na Figura 30. O compactado foi aquecido a uma taxa de 20°C/minuto até 720°C, sendo resfriado em temperatura ambiente.

Figura 30 – Forno elétrico.



Fonte: Próprio autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Rentabilidade e Pureza dos Grânulos Obtidos da Reciclagem de Latas de Alumínio

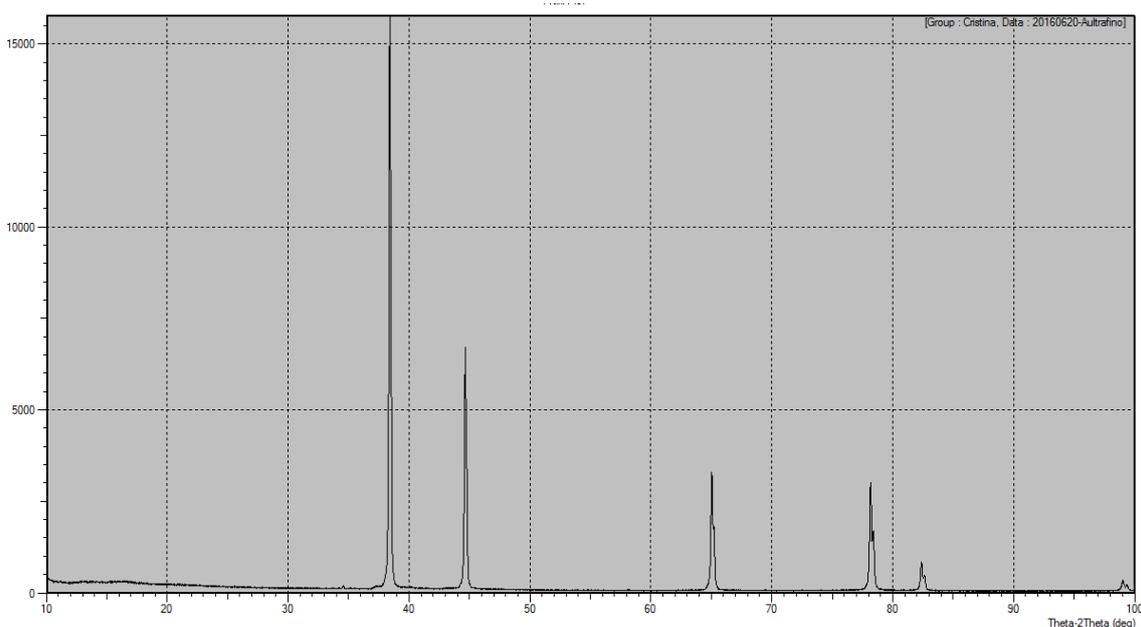
Foi calculado após o lingotamento das latas fundidas, o percentual relativo à rentabilidade do processo, ou seja, a quantidade de escória produzida. Em média perde-se 26% de material para geração de escória, a qual está intimamente ligada a compostos presentes na liga e na tinta não fundentes abaixo da temperatura atingida pelo forno a cadinho e a oxidação da superfície do fundido com a atmosfera. Vale a pena ressaltar que o restante, 74% de metal, após a solidificação apresenta pureza elevada de alumínio.

5.2 Caracterização dos Materiais no Estado Inicial

5.2.1 Difração de Raios-X

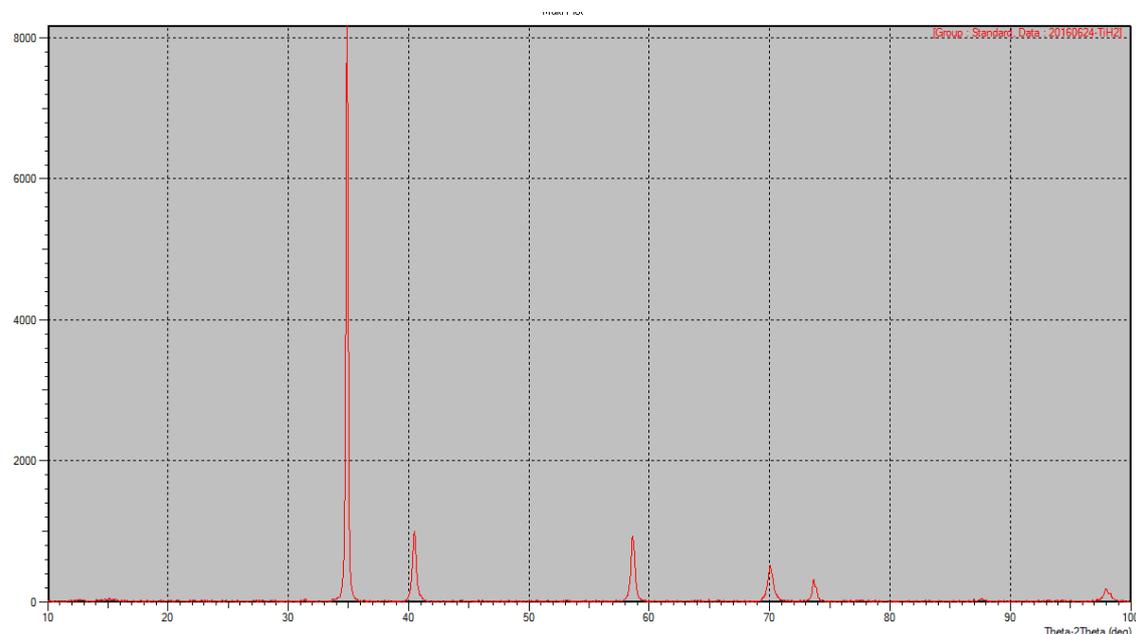
As figuras abaixo mostram os picos difratados do alumínio na Figura 31 e do hidreto de titânio na Figura 32.

Figura 31 – Difratoograma do pó de alumínio.



Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Difratoograma do pó de Hidreto de Titânio.



Fonte: Próprio autor.

Com o auxílio do software *Xpovder* confirmou-se a estrutura cristalina do material estudado como alumínio puro sem presença de contaminantes com concentrações maiores que 5% na Figura 31 e na Figura 32 os picos correspondem ao hidreto de titânio sem presença de contaminantes.

5.2.2 Fluorescência de Raios-X

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

Tabela 1 - Composição química do alumínio e hidreto de titânio em estudo.

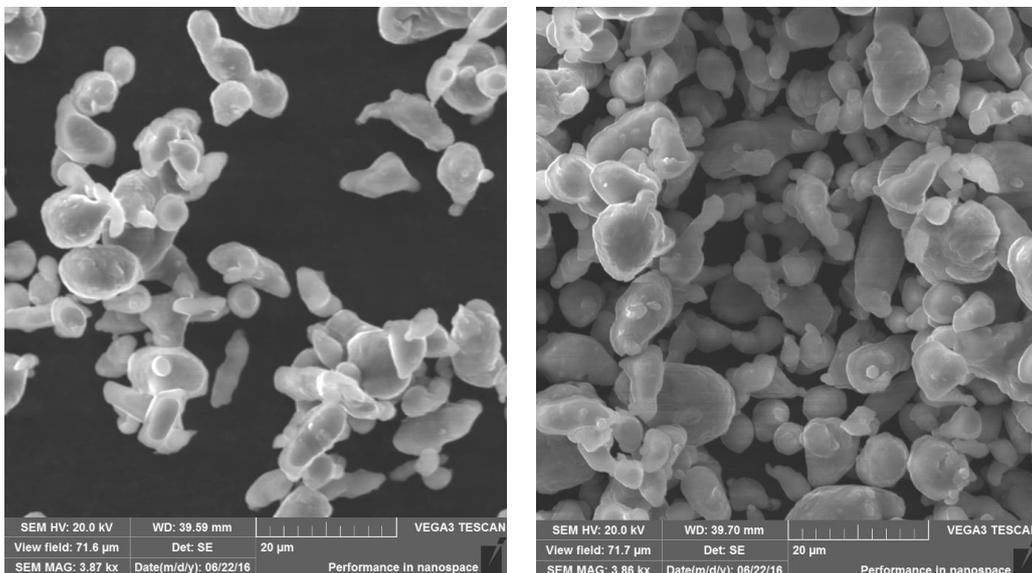
Alumínio		Hidreto de Titânio	
Al	>98%	Ti	>99%
Outros elementos	<2%	Outros elementos	<1%

Fonte: Próprio autor.

Conclui-se que o material obtido da atomização da fundição apresentou alta pureza. Vale a pena ressaltar que este pó de alumínio de elevada pureza vem desde os grânulos de alta pureza produzidos no processo de atomização.

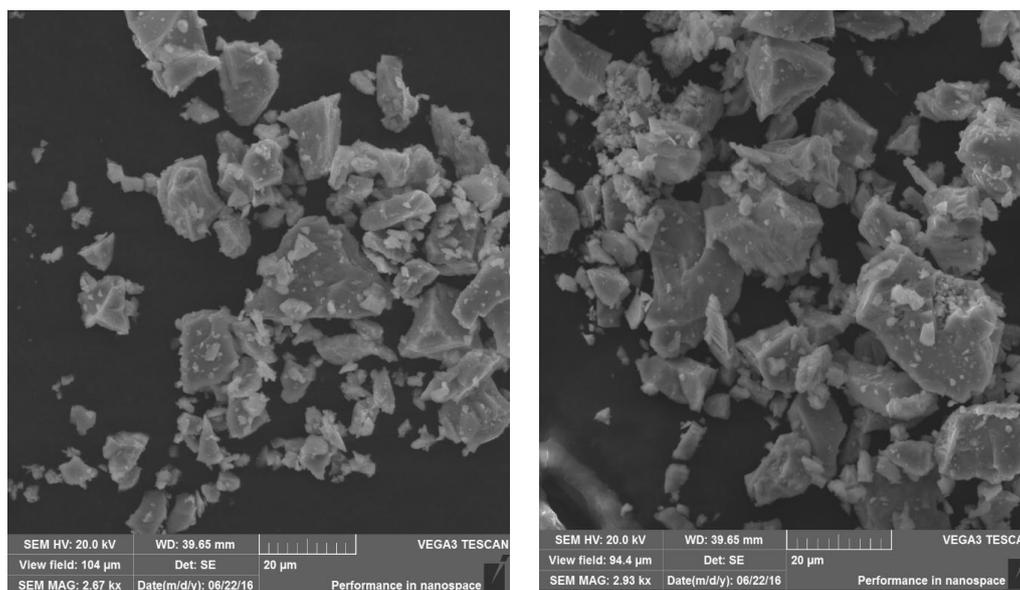
5.2.3 Microscopia eletrônica de varredura

Figura 33 – Morfologia das partículas de alumínio com ampliação de 3,87 Kx.



Fonte: Próprio autor.

Figura 34 – Morfologia das partículas de hidreto de titânio com ampliação de 2.67 Kx.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 33 observa-se que as partículas de alumínio apresentam uma forma esférica e todos os grãos estão com granulometria menor que $20\mu\text{m}$. A figura 34 mostra a forma retangular das partículas do hidreto de titânio com granulometria em torno de $25\mu\text{m}$.

5.2.4 Distribuição Granulométrica

A tabela abaixo mostra a distribuição granulométrica do pó de alumínio e do pó de hidreto de titânio.

Tabela 2 - Distribuição granulométrica do alumínio e do hidreto de titânio.

Alumínio		Hidreto de Titânio	
D10	5.36 μm	D10	8.24 μm
D50	10.46 μm	D50	12.32 μm
D90	22.30 μm	D90	25.87 μm
Diâmetro médio	12.31 μm	Diâmetro médio	14.54 μm

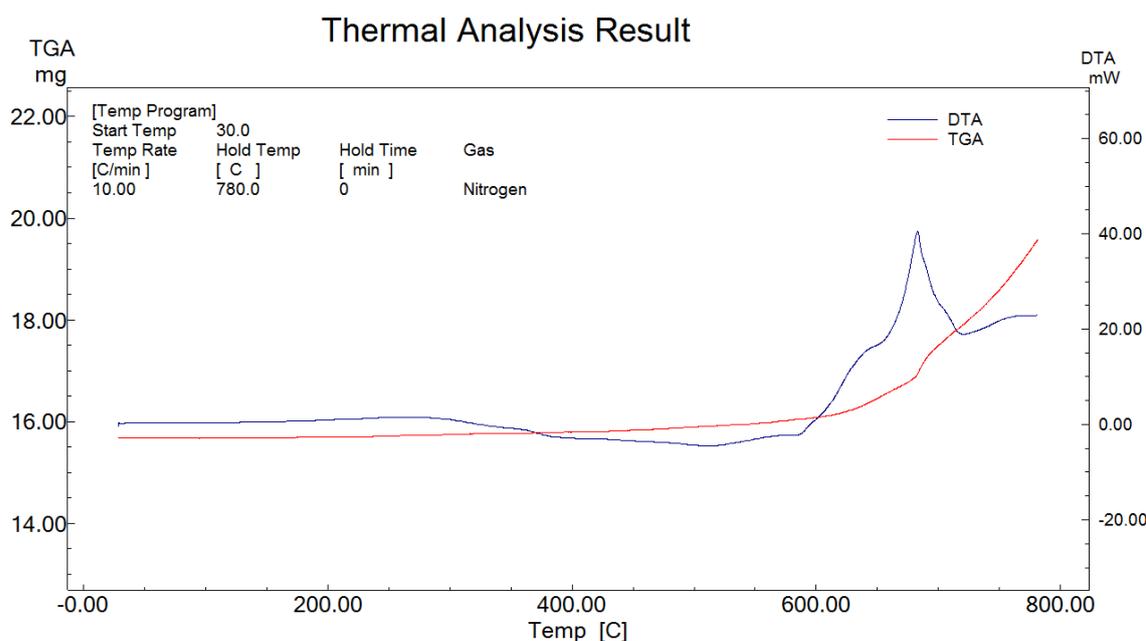
Fonte: Próprio autor.

De acordo com as imagens das Figuras 33 e 34 e a Tabela 2, os pós apresentam diâmetro médio de 12 a 14 μ m. Por serem partículas pequenas, a energia de ligação entre elas após a prensagem será alta, o que torna o compactado a verde com densidade próxima a do alumínio sólido. Isto é vantajoso visto que depois de compactado a probabilidade de surgimento de trincas será menor.

5.2.5 Análise Termogravimétrica

A figura abaixo mostra a partir de qual temperatura o gás hidrogênio começa a ser liberado.

Figura 35 – Análise termogravimétrica do hidreto de titânio.



Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Figura 35, observa-se um início do pico endotérmico em torno da temperatura de 300°C, a qual é relativa ao início da decomposição térmica de libertação de gás de hidrogênio. Em 700°C observa-se um pico exotérmico, de acordo com Yan e Tsai (1995), este pico refere-se à nitretação do titânio, o que promove um endurecimento do material sinterizado. Este endurecimento pode trazer bons resultados em relação à resistência final do produto, pois associa a ductilidade do alumínio com a

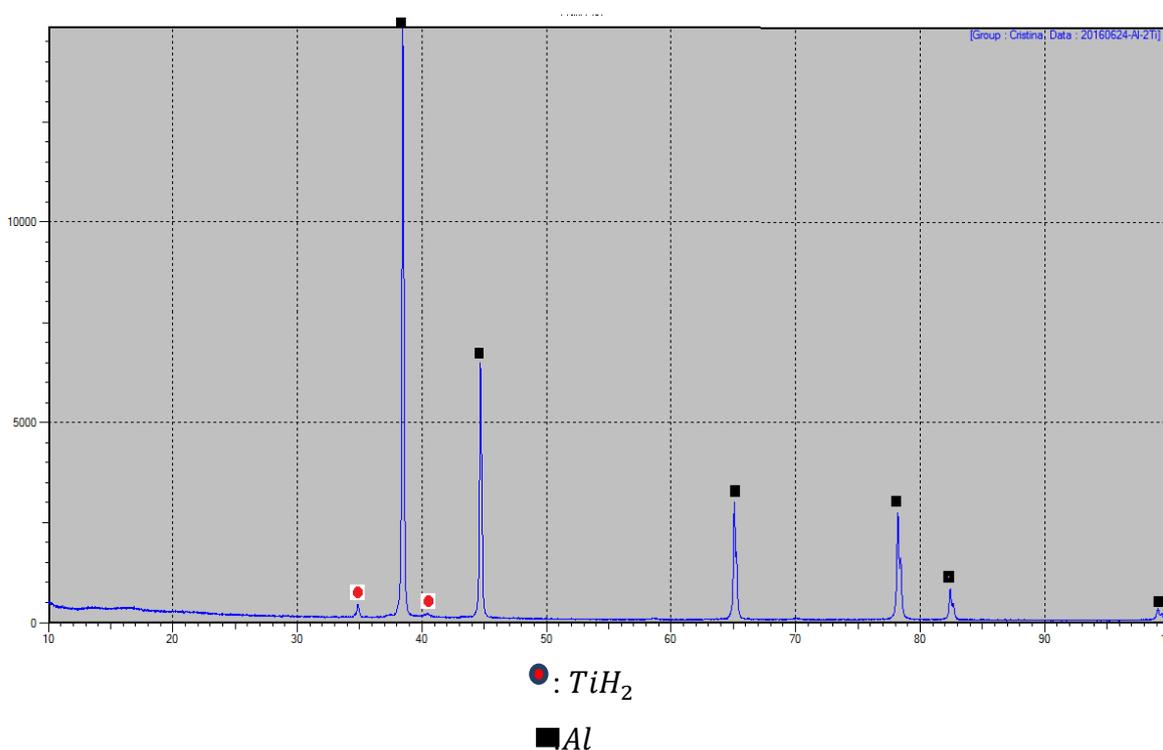
dureza do titânio nitretado. Por ser uma concentração pequena do nitreto de titânio, vale a pena, para um trabalho futuro, avaliar esta influência.

5.3 Análise e Caracterização do Compactado a Verde (Mistura dos Pós) e Após Sinterização

5.3.1 Homogeneidade da Mistura e do Compactado

O difratograma abaixo se refere à mistura de 1% de hidreto de titânio em alumínio.

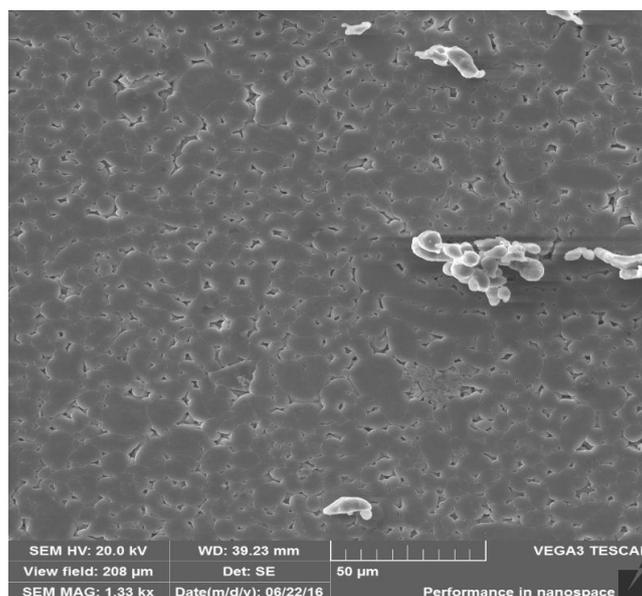
Figura 36 – Difratograma referente à mistura dos pós com 1% de hidreto de titânio.



Fonte: Próprio autor.

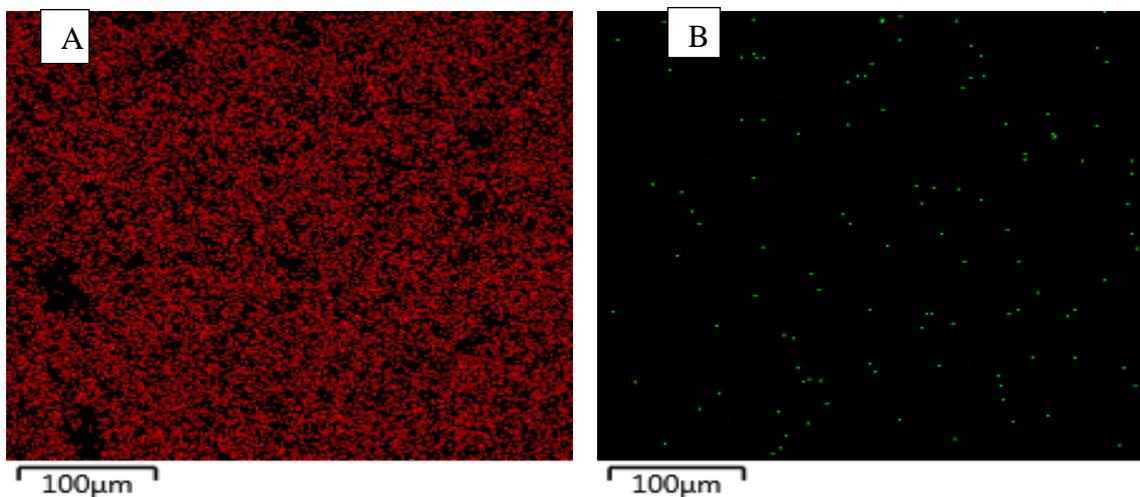
A Figura 37 refere-se a uma imagem do material compactado mostrando a dispersão do titânio na matriz de alumínio.

Figura 37 – Imagem da mistura compactada a 200MPa.



Fonte: Próprio autor.

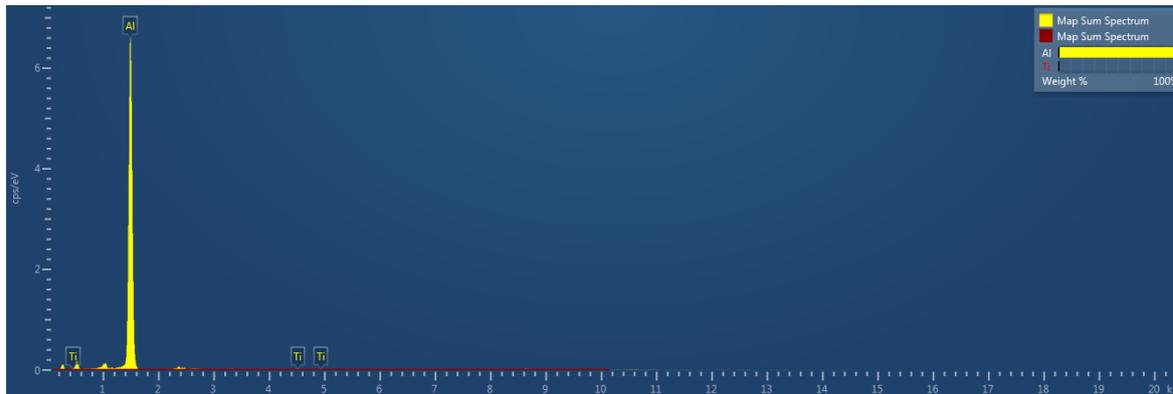
Figura 38 – Mapeamento do compactado. Detector EDS. A) Concentração de alumínio. B) Concentração de titânio.



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 37 e 38 referem-se ao estudo de homogeneidade dos pós no composto. Conclui-se primeiramente que 200 MPa seria uma pressão suficiente para a sinterização, pois observa-se o coalescimento efetivo das partículas e em segundo momento o processo manual de homogeneização foi ideal pois verifica-se a boa distribuição do titânio na matriz de alumínio.

Figura 39 – Mapeamento feito com detector EDS acoplado ao MEV.



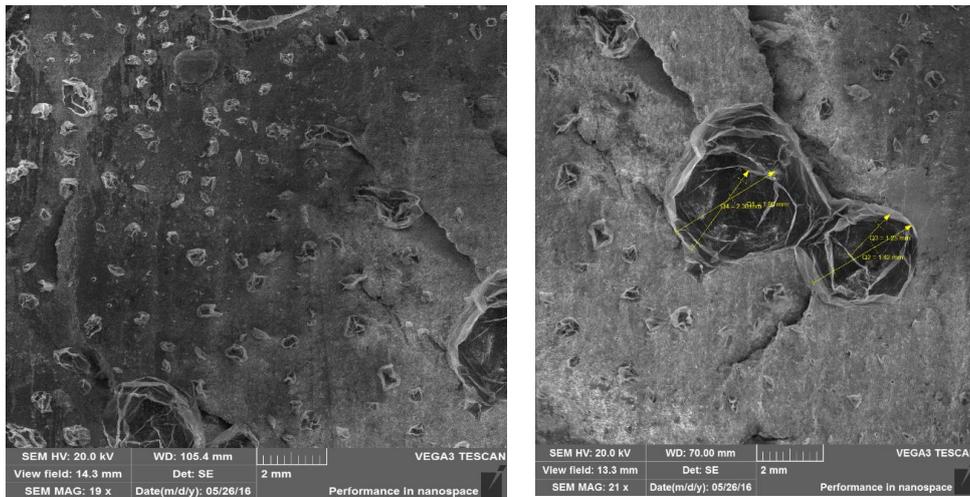
Fonte: Próprio autor.

A Figura 38 mostra o espectro do mapeamento observado na Figura 37.

5.3.2 Nucleação

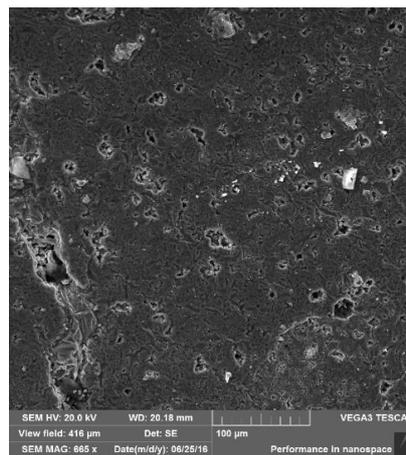
As imagens abaixo são de compactado a verde sinterizado a 450°C e 500°C para estudo dos pontos de nucleação do hidrogênio. O aumento progressivo da temperatura do material precursor origina a formação e crescimento de bolhas no interior da matriz metálica devido à decomposição térmica das partículas de TiH_2 . O hidrogênio existente no interior das bolhas pode ser perdido por difusão e solubilização através das paredes das bolhas formadas para o interior da matriz metálica. Estas perdas são dependentes da taxa de aquecimento, quanto menor a taxa de aquecimento, maiores são as perdas, ou seja, o hidrogênio terá mais tempo para se difundir.

Figura 40 – Pontos de nucleação do hidrogênio no material sinterizado a 500°C.



Fonte: Próprio autor.

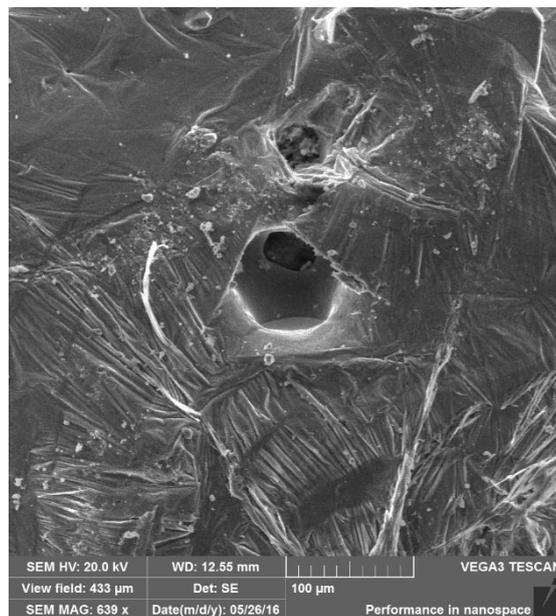
Figura 41 – Pontos de nucleação do hidrogênio no material sinterizado a 450 °C.



Fonte: Próprio autor.

A imagem 41 representa a interconexão entre poros. Isto pode estar relacionado a concentração de hidreto de titânio na matriz metálica.

Figura 42 – Representação de interconexão de poros.



Fonte: Próprio autor.

Com as Figuras 40, 41 e 42 é possível observar a formação dos núcleos de hidrogênio. De acordo com a Figura 42, conclui-se que a concentração de 1% utilizada de hidreto de titânio possa ser elevada dependendo do destino final da espuma, devido à interconexão dos poros.

5.3.3 Compactação e Sinterização das Amostras

As lubrificações utilizadas não apresentaram diferenças, somente o fato de o uso do molicote ser um pouco mais moroso. A Figura 43 apresenta o corpo com compactação no valor de 200 MPa com formação de trincas, pois a ligação entre as partículas não foi totalmente efetiva, sendo assim, a sinterização não permite a espumagem, visto que as trincas originadas durante a compactação leva a entrada de oxigênio e conseqüentemente a oxidação do alumínio.

Figura 43 – Corpo sinterizado pós compactação de 200 MPa.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 44 mostra o compactado a verde com pressão de 350 MPa, é possível observar a não formação de trincas. Isto leva a uma espumagem completa do material

Figura 44 – Compactado a verde 350 MPa e material após a sinterização de 720°C.



Fonte: Próprio autor.

Comparando os parâmetros de pressão de compactação utilizados para os compactados das Figuras 43 e 44, conclui-se que 200 MPa é insuficiente para compactação e 350 MPa seria uma pressão aceitável, visto que não se formaram trincas e a espumagem foi concluída. É importante lembrar que para atingir uma compactação efetiva a densidade do compactado deve estar em torno de 0,95 da densidade do alumínio sólido. A amostra compactada a 350 MPa apresentou uma densidade de $2580\text{Kg}/\text{m}^3$ e a espuma aumentou o volume de 50% do volume inicial.

A taxa de aquecimento utilizada de $20^\circ\text{C}/\text{minuto}$ foi baixa visto que os poros formados foram pequenos e a densidade final obtida foi 50% maior, dando tempo em excesso para a difusão do hidrogênio, o que leva a perda deste.

6 CONCLUSÃO

É de extrema importancia desenvolver a reciclagem agregando valores e aplicações tecnológicas no produto final. Apesar de serem necessários mais testes com parâmetros variados de temperatura, taxa de aquecimento, concentração do agente expensor, pressão de compactação, técnicas de homogeneização, entre outros, provou-se a possibilidade da reciclagem se transformar em grande aplicação e inovação tecnológica.

É de suma importancia destacar que o processo de fundição das latas não é complexo e com grande economia de energia (95%) quando comparado ao processo do alumínio primário, podendo ser aplicado em diversas associações de catadores de embalagens de alumínio. Isto agregaria valor, até cinco vezes superior ao oferecido pelo quilo inicial da lata de alumínio, promovendo, assim, inclusão social e redução dos impactos ambientais.

Em relação a rentabilidade do processo para a produção de pós metálicos de alumínio, necessitam-se de mais testes com controle mais rigoroso das condições, visto que em algumas das moagens ocorreu a oxidação do material.

Sobre os parâmetros seguidos pela pesquisa, conclui-se que a taxa de aquecimento foi baixa o que gerou poros pequenos. A justificativa está no fato de ocorrer a perda de hidrogênio devido a existência de tempo suficiente para a dissociação dos seus átomos e a sua posterior difusão, a qual corresponde a mobilidade dos átomos de hidrogênio na rede cristalina. Em relação a concentração, verificou-se a presença de poros interconectados, células abertas, estando ligada a elevada concentração de agente expensor, pois os poros, ao surgirem, atingem uns aos outros.

Propõe-se para trabalhos futuros a produção de diversos corpos de prova com parâmetros variados, com o objetivo de descobrir o melhor parâmetro para cada aplicação e a realização de um estudo sobre novos agentes expansores otimizando o método da metalurgia do pó para a produção de espumas de alumínio. Propõe-se também calcular as propriedades mecânicas como resistência à compressão e à flexão.

BIBLIOGRAFIA

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: geração e tratamento de escória**: vol. 11 – São Paulo, 2007. 80p

METALURGIA DO PÓ, disponível em: <<http://cursos.unisantabr/mecanica/polari/sinterizacao.html>>. Acesso em: 02 maio 2016.

ABAL. **Latinhas Campeãs**. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/sustentabilidade/reciclagem/latinhas-campeas/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

ABRALATAS – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS FABRICANTES DE LATAS DE ALTA RECICLABILIDADE. Vantagens para o meio ambiente. Disponível em: . Acesso em: 07 de março de 2011.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil** – 2009. São Paulo, SP, 2010.

ALCOA – **Boletim Técnico Laminados / Folhas**. Disponível em: <http://www.alcoa.com/brazil/catalog/pdf/BoletimFOLHAS2010.pdf>. Acesso em: 10 de dezembro de 2010.

ASHBY M. F., GIBSON L.J. **Celular Solids – Structure and Properties**. Pergmon Press, 1997.

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**. Butterwoeth-Heinemann, Londres, 2000.

ASM HANDBOOK. **Heat treating**. Ohio: ASM International, 2002. v.4. 2173p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio para Futuras Gerações: o alumínio nos transportes**, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio: geração e tratamento de escória**: vol. 11 – São Paulo, 2007. 80p.

BANHART, J., et. al. **Porous metals and metallic foams: Current status and recente developments**. Advanced Engineering Materials, n. 9, v. 10, p. 775-792, 2008.

BANHART, J. **Manufacturing routes for metal foams**. Journal of Metals v.52, p. 22-27, 2000.

BANHART, J. **Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metallic foams**. Progress in Materials Science,v.46, p. 559–632, 2001.

BANHART, J.; ASHBY, M. F.; FLECK, N. A. **2ND International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology** – MEATFoam20031 MIT Verlag. Alemanha, 2001.

BANHART, J., SEELIGER, H. W.. **Aluminium Foam Sandwich Panels: Manufacture, Metallurgy and Applications**. Advanced Engineering Materials, n. 9, v.10, p. 793-802, 2000.

BIEDENKOPF, P.; KULKIES, A.; HACKH, V. **Advanced gás Technologies for recycling and remelting of aluminium**. Disponível em: . Acesso em: 10 de março de 2011.

CULLITY, B. D. **Elements of X-ray diffraction**. Massachusetts, EUA. Addison-wesley publishing company inc, 1956. 514p

CALLISTER JUNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

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

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – **Guia da produção mais limpa: faça você mesmo**. 2002.

DIETER; GEORGE. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 660 p.

EXNER, E. **Principles of Single Phase Sintering, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics**, 1, 1-4 (1979).

GOODHEW, P.J., HUMPHREYS, J., BEANLAND, R. **Electron microscopy and analysis**. 3rd Ed. London, UK: Taylor & Francis, 2001. 251 p.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **World Aluminium**. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>>. Acesso em: 06 maio 2016.

KURZAWA, U. **Estudo da Reciclagem de Latas de Alumínio por Fusão em Forno Elétrico à Indução**. 2006. Mestrado em Engenharia de Materiais. Universidade do Estado de Santa Catarina.

LATASA. **Latasa em números**. Disponível em: <<http://www.latasa.ind.br/pt/institucional/latasa-em-numeros>>. Acesso em: 06 maio 2016.

MANNHEIMER, W.A. **Microscopia dos materiais. Uma introdução.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços editoriais, 2002. 221 p.

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

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

TENÓRIO, J.A.S.; DELGADO, F. e BARROS, A.M. 1995. Efeito das variáveis metalúrgicas no processo de reciclagem de latas de alumínio. In: **V Seminário de Tecnologia da Indústria do Alumínio.** São Paulo, ABAL, 1995. Anais... São Paulo, ABAL, p. 53-68.

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

WASEDA, Y., MATSUBARA, E., SHINODA, K. **X-ray diffraction crystallography. Introduction, examples and solved problems.** New York, EUA. Springer, 2011.309 p.