

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Renato Rafael  
da Silva..... E APROVADA  
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 30 / 07 / 2008

Maria Helena Robert

ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Produção de Esponjas Metálicas por  
Tixoconformação em Pré-formas Removíveis e  
sua Caracterização Mecânico-metalúrgica**

Autor: Renato Rafael da Silva  
Orientador: Maria Helena Robert

75/2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**Produção de Esponjas Metálicas por  
Tixotomografia em Pré-formas Removíveis e  
sua Caracterização Mecânico-metalúrgica**

Autor: Renato Rafael da Silva  
Orientador: Maria Helena Robert

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Materiais e Métodos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à Comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008  
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA – BAE – UNICAMP

SI38p Silva, Renato Rafael da  
Produção de Esponjas Metálicas por  
Tixoconformação em Pré-formas Removíveis e sua  
Caracterização Mecânico-metalúrgica/Renato Rafael da  
Silva – Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Maria Helena Robert  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Espuma 2. Ligas de alumínio. 3. Materiais  
compostos. 4. Conformação de alumínio. 5.  
Forjamento. I. Robert, Maria Helena. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Mecânica. III. Título

Título em Inglês: Production of Metal Sponges by Thixoforming into Removable  
Space Holders Preform and their Mechanical and Metallurgical  
Characterization

Palavras-chave em Inglês: Cellular Metals; Metallic Sponges; Thixoforming; Semi-  
solid; AA2011 Alloy.

Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Antonio Celso Fonseca de Arruda e Gilmar Ferreira Batalha

Data da defesa: 30 de julho de 2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

# **Produção de Esponjas Metálicas por Tixoconformação em Pré-formas Removíveis e sua Caracterização Mecânico-metalúrgica**

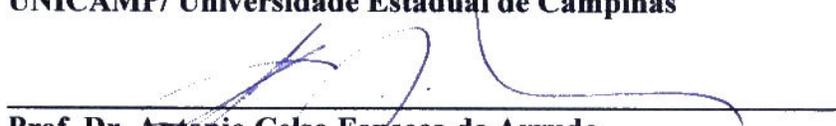
Autor: Renato Rafael da Silva  
Orientador: Maria Helena Robert

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



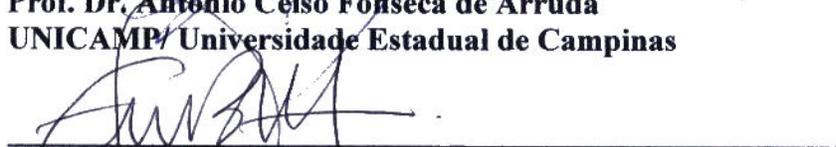
---

**Profa. Dra. Maria Helena Robert, Presidente**  
UNICAMP/ Universidade Estadual de Campinas



---

**Prof. Dr. Antonio Celso Fonseca de Arruda**  
UNICAMP/ Universidade Estadual de Campinas



---

**Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha**  
USP/Universidade de São Paulo

Campinas, 30 de julho de 2008.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho com todo carinho e ternura à minha mãe, Aparecida, que através de sua simplicidade soube me ensinar valores morais e éticos inestimáveis, e mais do que tudo isso, ensinou-me a sonhar e lutar por esses sonhos que às vezes pareciam estar tão distantes.

Às minhas irmãs, Elaine e Eliana, pelo incentivo a todo o momento.

À Tatiane, minha namorada, pelo apoio, amor e carinho.

A Deus que ilumina e capacita a todos nós.

## **Agradecimentos**

Algumas pessoas foram imprescindíveis para realização deste trabalho as quais eu gostaria de deixar os meus agradecimentos, são elas:

À professora Maria Helena Robert, por ter acreditado em mim quando era apenas um desconhecido, pela orientação, dedicação e amizade durante estes dois anos de estudos.

Aos amigos Armandinho, Carmo, Chico Edson, Davi, Germano, Hipólito, Lulu, Maykon, Montoya, Rafinha, Vanderlei e Vera, por toda e qualquer forma de ajuda prestada ou simplesmente pela amizade.

Ao Paulo e a Célia pela amizade e estadia durante a realização do trabalho.

Ao Dr. Sergio Luis Marques dos Santos do Departamento de Radiologia da UNICAMP, pela realização das tomografias computadorizadas.

Aos técnicos de laboratório Zé Luis e Claudinete e Fabio, pela ajuda na realização e caracterização das amostras.

Aos professores e funcionários da FEM.

Às empresas Isoflama, que realizou o tratamento térmico gratuitamente de todo ferramental utilizado neste trabalho e Instron Worldwide Headquarters, pela realização dos ensaios de impacto.

A Cordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo apoio financeiro.

“Depois de algum tempo, você aprende a diferença, a sutil diferença entre dar a mão e acorrentar uma alma. E você aprende que amar não significa apoiar-se, e que companhia nem sempre significa segurança. E começa a aprender que beijos não são contratos e presentes não são promessas. E começa a aceitar suas derrotas com a cabeça erguida e os olhos adiante com a graça de um adulto, e não com a tristeza de uma criança. E aprende a construir todas as suas estradas hoje, porque o terreno do amanhã é incerto demais para os planos, e o futuro tem o costume de cair em meio ao vão. Depois de um tempo, você aprende que até o sol queima se você ficar exposto por muito tempo. Portanto, plante seu jardim e decore sua alma, em vez de esperar que alguém lhe traga flores. E você aprende que realmente pode suportar... Que realmente é forte e que realmente tem valor...”

(William Shakespeare)

## **Resumo**

Silva, Renato Rafael da, Produção de Esponjas Metálicas por Tixoconformação em Pré-formas Removíveis e sua Caracterização Mecânico-metalúrgica, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 124p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho teve como objetivo estudar o processo de produção de esponjas metálicas por tixoconformação em pré-formas removíveis e caracterização mecânico-metalúrgica do produto, visando a compreensão da influência de parâmetros de processo nas suas características estruturais e propriedades. A liga empregada, AA2011, foi infiltrada sobre pré-formas de partículas de NaCl de granulometrias distintas, sinterizadas ou soltas. As esponjas metálicas produzidas foram caracterizadas quanto à sua arquitetura, propriedades físicas (densidade real e relativa, condutividade e difusividade térmicas) e mecânicas (tensão de compressão, módulo de Young, tensão no platô, deformação e energia de impacto absorvida); foi analisada a influência do tipo de pré-forma utilizada para produção das esponjas, nestas características e propriedades. Os resultados mostraram boa reprodutibilidade do processo, principalmente quando da utilização de pré-formas de partículas médias e grosseiras não sinterizadas. A densidade da esponja e a espessura da parede celular apresentam tendência a aumentar com o aumento das dimensões das células produzidas em pré-formas de partículas mais grosseiras. Todas as amostras produzidas apresentaram condutividade térmica da ordem de 10x inferior e difusividade térmica da ordem de 4x superior às do metal maciço. O comportamento das esponjas em compressão estática ou dinâmica se mostrou típico de materiais celulares, com reduzidos valores de módulo de Young e de tensão de compressão, grande platô de deformação plástica sem acréscimo de tensão, e elevados valores de deformação total e energia absorvida no impacto.

*Palavras Chave:* Metais Celulares; Esponjas Metálicas; Tixoconformação; Semi-solido; Liga AA2011.

## **Abstract**

Silva, Renato Rafael da, Production of Metal Sponges by Thixoforming into Removable Space Holders Preform and their Mechanical and Metallurgical Characterization, Campinas: Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2008. 124p. Thesis (MSc).

The aim of this work was the analysis of the thixoforming process to produce metallic sponges and the mechanical and metallurgical characterization of the product, searching for better understanding the influence of processing parameters in the material structural characteristics and properties. The aluminium alloy AA2011 was infiltrated in the semi-solid state into preforms of NaCl particles with different sizes and in sintered and non sintered conditions. Cellular products were characterized concerning internal architecture, physical properties (actual and relative densities, thermal conductivity and diffusivity) and mechanical properties (Young's modulus, compressive strength, plateau stress and absorbed impact energy); it was analyzed the influence of processing parameters on the properties and characteristics of the produced sponges. Results showed good reproducibility of the process, mainly when medium and coarse non sintered space holder particles were employed. Density of the product as well as cell wall thickness increases as space holder particles sizes increase. All the sponges produced showed low thermal conductivity (~10x inferior compared to the bulk material) and high thermal diffusivity (~3x superior compared to the bulk alloy). Results of static and dynamic compression tests showed typical cellular material behaviour in all cases, presenting low values for Young's modulus and compressive strength, a well defined plateau of plastic deformation, high plastic deformation and high capacity of energy absorption in impact events.

*Key Words:* Cellular Metals; Metallic Sponges; Thixoforming; Semi-solid; AA2011 Alloy.

## **Índice:**

<b>Resumo</b> .....	<b>vii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>xix</b>
<b>Lista de Equações</b> .....	<b>xxi</b>
<b>Letras Latinas</b> .....	<b>xxii</b>
<b>Letras Gregas</b> .....	<b>xxii</b>
<b>Abreviações/siglas</b> .....	<b>xxiii</b>

## **Capítulo 1- Introdução e Objetivos**

<b>1.1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Objetivos</b> .....	<b>4</b>

## **Capítulo 2- Fundamentos teóricos**

<b>2.1. Classificação dos metais celulares</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2. Aplicações dos metais celulares</b> .....	<b>8</b>
2.2.1. Aplicações funcionais .....	10
2.2.2. Aplicações estruturais .....	13
<b>2.3. Processos de fabricação de metais celulares</b> .....	<b>16</b>
2.3.1. Processos de fabricação de esponjas metálicas - baseados na sinterização .....	16
2.3.2. Processos de fabricação de esponjas metálicas - utilizando pré-formas porosas .....	19
2.3.3. Processos de fabricação de espumas metálicas – espumagem direta no banho .....	23
2.3.4. Processos de fabricação de espumas metálicas – metalurgia do pó .....	26

2.3.5. Processos de fabricação de metais celulares – processamento no estado semi-sólido...	28
<b>2.4. Caracterização dos metais celulares .....</b>	<b>30</b>
<b>2.5. Propriedades dos materiais .....</b>	<b>31</b>
2.5.1. Propriedades físicas.....	32
2.5.2. Propriedades mecânicas .....	35
<b>2.6. Técnicas de caracterização de metais celulares – não destrutivas .....</b>	<b>39</b>
2.6.1. Análise de densidade.....	39
2.6.2. Tomografia computadorizada de raios-X.....	40
2.6.3. Análise térmica - condutividade.....	40
<b>2.7. Técnicas de caracterização de metais celulares – destrutivas .....</b>	<b>42</b>
2.7.1. Análise de imagens ópticas .....	42
2.7.2. Testes mecânicos.....	42

## **Capítulo 3- Metodologia Experimental**

<b>3.1. Liga utilizada .....</b>	<b>43</b>
3.1.1. Composição da liga.....	44
3.1.2. Diagrama de fases .....	44
3.1.3. Intervalo de solidificação .....	45
3.1.4. Caracterização microestrutural.....	46
<b>3.2. Agente bloqueador .....</b>	<b>48</b>
3.2.1. Classificação granulométrica .....	48
3.2.2. Produção de pré-formas porosas .....	48
3.2.3. Morfologia das partículas.....	50
<b>3.3. Produção de esponjas metálicas por tixoconformação .....</b>	<b>52</b>
3.3.1. Equipamentos utilizados .....	52
3.3.2. Ferramental empregado no tixoforjamento .....	54
3.3.3. Procedimento padrão para o tixoforjamento .....	57
3.3.4. Parâmetros variados no processo de tixoforjamento.....	59
<b>3.4. Remoção do agente bloqueador .....</b>	<b>60</b>
<b>3.5. Remoção das camadas maciças .....</b>	<b>61</b>
<b>3.6. Métodos de caracterização das propriedades das esponjas metálicas produzidas .....</b>	<b>61</b>
3.6.1. Caracterização estrutural .....	62

3.6.2. Caracterização metalúrgica – análise microestrutural .....	63
3.6.3. Caracterização física - densidade .....	63
3.6.4. Estimativa de comportamento térmico.....	64
3.6.5. Caracterização mecânica - testes de compressão (semi-estático).....	64
3.6.6. Caracterização mecânica - testes de impacto (dinâmico).....	65

## **Capítulo 4- Resultados e discussões**

<b>4.1. Aspectos gerais do processo.....</b>	<b>67</b>
4.1.1. Taxas de aquecimento .....	68
4.1.2. Forças da tixoconformação .....	69
<b>4.2. Aspectos gerais das esponjas obtidas.....</b>	<b>71</b>
4.2.1. Aspecto das esponjas - antes da remoção das camadas metálicas maciças.....	71
4.2.2. Aspecto das esponjas - após remoção das camadas maciças .....	72
<b>4.3. Caracterização estrutural.....</b>	<b>74</b>
4.3.1. Análise qualitativa da arquitetura celular por tomografia de raios-X .....	74
4.3.2. Análise qualitativa da arquitetura celular por MEV.....	80
4.3.3. Caracterização quantitativa da arquitetura celular .....	82
<b>4.4. Caracterização metalúrgica - microestrutura da parede celular.....</b>	<b>87</b>
<b>4.5. Caracterização física .....</b>	<b>90</b>
4.5.1. Densidades real e relativa.....	90
4.5.2. Cálculo estimado do comportamento térmico.....	93
<b>4.6. Caracterização das propriedades mecânicas .....</b>	<b>95</b>
4.6.1. Testes de compressão semi-estáticos – curvas Força x Deslocamento .....	95
4.6.2. Testes de compressão semi-estáticos – curvas Tensão x Deformação.....	101
4.6.3. Testes dinâmicos de compressão - impacto .....	110

## **Capítulo 5- Conclusões**

<b>Conclusões gerais.....</b>	<b>115</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>118</b>

## Lista de Figuras

Figura 2.1: Estruturas de diferentes tipos de metais celulares (BANHART, 2007).....	7
Figura 2.2: Gráfico representativo das aplicações dos metais celulares de acordo com o grau de porosidade (adaptado de BANHART, 2002).....	9
Figura 2.3: Exemplos de trocadores de calor de células abertas – ERG Corp. (ERG, 2007).....	11
Figura 2.4: Foto de ginásio com aplicação de espumas metálicas para absorção acústica; espumas da marca comercial “Alporas” (SHINKO-WIRE, 2007).....	12
Figura 2.5; (a) Espuma tipo “sanduíche” AFS; (b) protótipo com aplicação de espumas tipo sanduíche na carroceria de automóvel (KAMMER, 1999).....	14
Figura 2.6: Partes estruturais com espumas de alumínio entre chapas densas para aplicação em aeronaves (NPL, 2000). ....	15
Figura 2.7: Viaduto com aplicação de espumas de alumínio Alporas em partes estruturais para absorção de ruídos (SHINKO-WIRE, 2007). ....	16
Figura 2.8: Fotos por MEV de uma esponja de titânio produzida por processo de sinterização em uma atmosfera redutora (OH <i>et al.</i> , 2003). ....	17
Figura 2.9: (a) Produção de esferas ocas de alumínio por instabilidade capilar do gás entre colunas de metal líquido. O ar e o metal líquido são injetados concêntricamente de uma matriz formando esferas ocas metálicas que são produzidas e separadas após um controle cuidadoso do fluxo líquido. Elas se solidificam durante a queda ao ar e são coletadas em um recipiente com líquido de resfriamento. (b) Produção de esferas ocas de alumínio usando injeção de pasta. Em uma etapa posterior as bolhas são sinterizadas para remover as fases voláteis (adaptado de CURRAN, 2003).....	18

Figura 2.10: (a, b) Estruturas de esferas ocas unidas por pressão isostática a quente (ANDERSEN e STEPHANI, 2002); (c) típico produto final obtido após sinterização das esferas ocas (CURRAN, 2003).	19
Figura 2.11: Esquema representativo do processo “Duocel” para fabricação de esponjas metálicas e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo- ERG Corp. (ERG, 2008).	20
Figura 2.12: Esquema representativo do processo de fabricação de esponjas metálicas, utilizando uma pré-forma de NaCl sinterizada como modelo de estrutura - e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo (CURRAN, 2003).	22
Figura 2.13: Esquema representativo do processo “Incofoam” para fabricação de esponjas Níquel por CVD e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo (INCO, 2008).	23
Figura 2.14: Esquema representativo do processo de fabricação por adição de gás na fundição e foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo (JIN, KENNY e SANG, 1990).	24
Figura 2.15: Esquema representativo do processo de fabricação por adição $TiH_2$ na fundição e foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo (MIYOSHI <i>et al.</i> , 2000).	25
Figura 2.16: Foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo Alporas (BANHART, 2001).	26
Figura 2.17: Esquema representativo do processo de fabricação de esponjas metálicas por metalurgia do pó (SIMANCIK E KOVACIK, 1997).	27
Figura 2.18: Esquema representativo do processo de fabricação de espumas metálicas por rota convencional (rota 1) e por tixoprocessamento (rota2); (WEISE, STANZICK E BANHART, 2003).	29
Figura 2.19: Dependência da densidade na característica estrutural dos poros e estrutura celular (KRISZT, MARTIN e MOSLER, 2002).	32
Figura 2.20: Típica curva de tensão-deformação para metais celulares em teste de compressão (adaptado de KAMMER, 1999).	38
Figura 2.21: Esquema representativo do método TPS para análise térmica (SOLÓRZANO <i>et al.</i> , 2008).	40

Figura 2.22: Esquema representativo do processo “ <i>guarded-hot-plate</i> ” para análise térmica (ZHAO <i>et al.</i> , 2004).....	41
Figura 3.1: Diagrama de fases Al-Cu. Destaque em vermelho da composição da liga AA 2011 – 5,29% em peso Cu (MURRAY, 1985).....	44
Figura 3.2: Curva de variação da fração líquida em função da temperatura para a liga AA2011, obtida a partir dos testes de calorimetria exploratória diferencial. ....	46
Figura 3.3: Microestrutura da liga AA2011 utilizada no processo de fabricação de esponjas metálica. ....	47
Figura 3.4: Aspecto geral de uma típica pré-forma de partículas de NaCl sinterizadas. Condições de sinterização: pré-carga 5kN, T sinterização 785°C, t sinterização 210min.....	49
Figura 3.5: Fotos (MEV) das partículas de NaCl não sinterizadas de diferentes granulometrias, (a) fina; (b) média; (c) grosseira. ....	50
Figura 3.6: Fotos (MEV) das partículas de NaCl sinterizadas. (a) MEV das partículas aglomeradas; (b) e (c) detalhe do “empescoçamento” das partículas de sal. ....	51
Figura 3.7: Equipamentos utilizados no processo de fabricação das esponjas metálicas. (1) célula de carga; (2) forno resistivo; (3) prensa hidráulica; (4) microcomputador; (5) indicador de temperatura; (6) controlador de aquecimento do forno; (7) indicador de pesagem; (8) placa de aquisição de dados. ....	52
Figura 3.8: Desenho do ferramental utilizado no processo de tixofundição – vista explodida....	54
Figura 3.9: Desenho do punção para o tixoforjamento .....	55
Figura 3.10: Desenho da pinça para o tixoforjamento .....	55
Figura 3.11: Desenho da matriz para o tixoforjamento.....	56
Figura 3.12: Desenho da base de apoio para o tixoforjamento .....	56
Figura 3.13: Desenho do prolongador para o tixoforjamento .....	57
Figura 3.14: Desenho do assento para o tixoforjamento .....	57
Figura 3.15: Esquema ilustrativo do processo de tixoconformação para produção de esponjas metálicas. ....	58
Figura 3.16: Fluxograma referente à etapa de fabricação e preparação das amostras para testes.60	
Figura 3.17: Fluxograma referente à etapa de caracterização das amostras.....	62

Figura 3.18: Foto de tomógrafo helicoidal utilizado e disposição das amostras; (a) foto geral; (b) detalhe do posicionamento das amostras no tomógrafo.....	63
Figura 3.19: Máquina universal de ensaios MTS preparada para o ensaio de compressão das esponjas produzidas; (a) vista geral; (b) detalhe da amostra durante o ensaio. ....	65
Figura 3.20: Máquina de teste de impacto dinâmico, tipo drop test; (a) vista geral; (b) detalhe da amostra antes do ensaio. ....	66
Figura 4.1: Curvas Txt durante o ensaio de tixoconformação para as 4 condições de ensaio (pré-forma sinterizada de granulometria fina, e pré-formas soltas de granulometrias fina, média e grosseira). ....	69
Figura 4.2: Gráfico da força máxima e pressão máxima para o processo de fabricação das esponjas metálicas, por infiltração em pré-formas em distintas condições. ....	70
Figura 4.3: Esponjas tipo “sanduíche” produzidos por tixoconformação da liga AA2011 em pré-formas removíveis. (a) pré-forma de granulometria fina; (b) pré-forma de granulometria média; (c) pré-forma de granulometria grosseira.....	72
Figura 4.4: Fotos de esponjas metálicas produzidas por tixoconformação da liga AA2011 em pré-formas removíveis de diferentes condições: F= pré-formas de grãos finos, M= pré-formas de grãos médios, G= pré-formas de grãos grosseiros, FS= pré-formas sinterizadas de grãos finos.	73
Figura 4.5: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas sinterizadas de NaCl de granulometria fina. ....	76
Figura 4.6: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria fina. ....	77
Figura 4.7: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria média. ....	78
Figura 4.8: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria grosseira. ....	79

Figura 4.9: Imagens obtidas por MEV de seções longitudinais das esponjas metálicas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas de NaCl em diferentes condições: (a) partículas finas sinterizadas; (b) partículas finas não sinterizadas; (c) partículas médias não sinterizadas; (d) partículas grosseiras não sinterizadas.....	81
Figura 4.10: Imagens da seção longitudinal central de esponjas metálicas típicas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas em diferentes condições: (a) sem tratamento; (b) binarizadas.....	83
Figura 4.11: Valores médios da espessura de paredes de células e de diâmetros de Feret, em esponjas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas em diferentes condições: partículas finas sinterizadas, partículas soltas de dimensões fina, média e grosseira.....	85
Figura 4.12: (a) espessura da parede celular x frequência por área (b) diâmetro de Feret x frequência por área.....	86
Figura 4.13: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixocoformação da liga AA2011 sobre pré-formas sinterizadas de sal de granulometria fina; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.....	87
Figura 4.14: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixocoformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria fina; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.....	88
Figura 4.15: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixocoformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria média; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.....	88
Figura 4.16: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixocoformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria grosseira; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.....	89
Figura 4.17: Densidades real e relativa de esponjas metálicas da liga AA2011 fabricadas por tixocoformação sobre pré-formas de partículas de sal de diferentes granulometrias, sinterizadas ou soltas.....	92
Figura 4.18: Condutividade térmica e densidade relativa de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de agentes bloqueadores em diferentes condições.....	95

Figura 4.19: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.....	97
Figura 4.20: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	97
Figura 4.21: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas médias de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	98
Figura 4.22: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas grosseiras de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	98
Figura 4.23: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.....	103
Figura 4.24: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	103
Figura 4.25: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas médias de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	104
Figura 4.26: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas grosseiras de NaCl. Valores de densidade real na legenda. ....	104
Figura 4.27: Relação densidade x valores teóricos e valores experimentais de propriedades em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições: (a) módulo de Young; (b) tensão no platô; (c) deformação total.....	109
Figura 4.28: Curvas carga-tempo em testes de impacto tipo <i>drop test</i> , de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de distintas granulometrias.....	111

Figura 4.29: Relação densidade x valores experimentais de propriedades em compressão dinâmica de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas não sinterizadas de distintas granulometrias: (a) carga máx.; (b)Energia absorvida até máx. carga e energia absorvida total; (c) deformação até máx. carga e deformação total.....	113
Figura 4.30: Curvas de variação da carga-tempo obtidas dos ensaios dinâmicos de compressão de esponjas da liga AA2011, para 2 amostras de densidades semelhantes, fabricadas por pré-formas de partículas grosseiras de NaCl. ....	114

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Composição química da liga AA2011 (% em peso) utilizada no trabalho.....	44
Tabela 3.2: Condições utilizadas para fabricação de pré-formas porosas de NaCl.....	49
Tabela 4.1: Valores de máximas força e pressão dos ensaios de tixoconformação para a produção de esponjas da liga AA2011 a partir de pré-formas de NaCl em distintas condições. ....	71
Tabela 4.2: Valores médios da espessura da parede celular e do diâmetro de Feret para as amostras de esponjas da liga AA2011 fabricadas por tixoforjamento sobre pré-formas de partículas de NaCl em diferentes condições .....	84
Tabela 4.3: Diâmetro médio de rosetas da fase $\alpha$ presentes na microestrutura de paredes celulares de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições. ....	89
Tabela 4.4: Tabela de dados com os valores de densidades real, relativa e teor de porosidade para todas as amostras obtidas. ....	91
Tabela 4.5: Valores estimados de condutividade térmica ( $\lambda$ ), condutividade térmica normalizada ( $\lambda/\lambda_s$ ) e difusividade térmica ( $a$ ) de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições.....	94
Tabela 4.6: Resultados de força requerida para início de formação de platô de deformação plástica e deslocamento total antes da deformação plástica final obtidos das curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estático de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de distintas pré-formas.....	100
Tabela 4.7: Valores das propriedades mecânicas de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições, obtidas de curvas tensão x deformação em testes de compressão semi-estáticos. ....	106

Tabela 4.8: Valores das propriedades mecânicas calculadas a partir das equações de Ashby (2000) de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições.

..... 107

Tabela 4.9: Valores de propriedades mecânicas em ensaios de compressão dinâmicos de esponjas metálicas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de partículas soltas de distintas granulometrias..... 112

## Lista de Equações

Equação 2.1 .....	33
Equação 2.2 .....	33
Equação 2.3 .....	34
Equação 2.4 .....	34
Equação 2.5 .....	35
Equação 2.6 .....	35
Equação 2.7 .....	36
Equação 2.8 .....	37
Equação 2.9 .....	37
Equação 2.10 .....	38

## Nomenclatura

### Letras Latinas

a	difusividade térmica	[m <sup>2</sup> /s]
C <sub>p</sub>	calor específico	[J/Kg.K]
E	módulo de elasticidade	[Pa]
E <sub>a</sub>	energia absorvida de impacto	[J]
E <sub>s</sub>	módulo de elasticidade do metal maciço	[Pa]
m	massa	[g]
n	fator de correção para módulo de elasticidade	
n <sub>1</sub>	fator de correção para tensão de início de platô	
n <sub>2</sub>	fator de correção para tensão no platô	
q	fator de correção para condutividade térmica	
T	temperatura	[°C]
T <sub>F</sub>	temperatura de fusão	[°C]
T <sub>L</sub>	temperatura <i>liquidus</i>	[°C]
T <sub>S</sub>	temperatura <i>solidus</i>	[°C]
V	volume	[cm <sup>3</sup> ]

.....

### Letras Gregas

α	solução sólida	
α <sub>1</sub>	fator de correção para final da densificação	
α <sub>2</sub>	fator de correção para módulo de Young	
ε	deformação	
ε <sub>D</sub>	deformação no final do platô	
η	eficiência de absorção de energia	
λ	condutividade térmica do metal celular	[W/m.K]
λ <sub>n</sub>	condutividade térmica normalizada	
λ <sub>s</sub>	condutividade do metal maciço	[W/m.K]
ρ	densidade do metal celular	[g/cm <sup>3</sup> ]

$\rho_{\text{real}}$	densidade real	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_{\text{rel.}}$	densidade relativa	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	densidade do metal sólido	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma$	tensão	[Pa]
$\sigma_c$	tensão para início do platô	[Pa]
$\sigma_{c,s}$	resistência à compressão do metal maciço	[Pa]
$\sigma_e$	limite de elasticidade	[Pa]
$\sigma_{\text{pl}}$	tensão no platô	[Pa]

.....

### Abreviações/siglas

A/D	analógico/digital
AFS	“sanduíches” de espumas de Al
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CVD	deposição química de vapor
DEF	Departamento de Engenharia de Fabricação
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
ERG	Corporação Aeroespacial e de materiais
EUA	Estados Unidos da América
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
$f_l$	fração líquida
FPC	fusão parcial controlada
HC	Hospital das Clínicas
IFAM	<i>Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research in Bremen</i>
MER	<i>Materials and Electrochemical Research Corporation</i>
MEV	microscopia eletrônica de varredura
MMC	compósito de matriz metálica
MO	microscopia óptica
TPS	método de fonte plana transiente
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

# Capítulo 1

## Introdução e objetivos

### 1.1. Introdução

Os metais celulares constituem uma nova classe de materiais que apresentam como características principais interessantes e únicas combinações de propriedades físicas e mecânicas, tais como: alta rigidez associada a reduzido peso específico, elevada resistência à compressão associada à capacidade de absorção de energia em impactos, etc. Além disso, os metais celulares são também eficientes tanto para absorção acústica quanto para absorção de vibrações mecânicas (SIMANCIK, 2002).

Os metais celulares de células abertas (esponjas) apresentam elevada área superficial (as paredes de células) com condutibilidades térmica e elétrica elevadas, o que os habilitam a aplicações como suportes de catalisadores, trocadores de calor, filtros para altas temperaturas, eletrodos consumíveis e absorvedores eletromagnéticos (WADLEY, 2002; CURRAN, 2003).

Quanto aos metais celulares de células fechadas (espumas), dadas a elevada resistência à compressão, baixa densidade, e à capacidade de alta deformação plástica para baixas e constantes tensões que apresentam (ASHBY *et al.*, 2000), encontram aplicação na indústria automotiva como absorvedores de impacto (por exemplo, pára-choques) e também como isoladores acústicos e térmicos proporcionando um maior conforto aos passageiros (BERG, MAYSENHÖLDER e HAESCHE, 2003).

A utilização de materiais celulares tais como espumas, esponjas ou complexos produtos porosos sinterizados está em constante crescimento; diversas empresas na Europa, Ásia e América do Norte já produzem comercialmente produtos porosos metálicos, principalmente espumas de Al e suas ligas, e avaliam outros sistemas metálicos, como Ni e ligas, Ti e ligas, para distintas aplicações. O tema é também recorrente num número crescente de universidades e institutos de pesquisas ativos em desenvolver novos processos para a fabricação desta classe de materiais, aprimorar processos de manufatura existentes, desenvolver técnicas para sua caracterização e levar a cabo estudos que permitam uma maior compreensão de seu comportamento mecânico, térmico, acústico, entre outros (BANHART, ASHBY e FLECK, 2002).

O primeiro registro de fabricação de espumas metálicas data do final dos anos 40, quando Benjamin Sosnick patenteou um método baseado na possibilidade de fusão e ebulição simultânea de fases distintas presentes em uma liga, possibilitando a coexistência de líquido e vapor a elevadas temperaturas. O processo requer o uso de elevada pressão para evitar o escape dos gases metálicos do líquido; ao ser aliviada a pressão e o sistema submetido a resfriamento, há oclusão do vapor na liga sólida, originando o material celular de células fechadas (SOSNICK, 1948).

Com o passar dos anos, inúmeros processos e técnicas para a fabricação de metais celulares foram desenvolvidos. Em geral os processos de fabricação de metais celulares são classificados de acordo com o estado físico em que o metal é processado (sólido, líquido, gasoso ou ionizado) e podem resultar em espumas ou esponjas.

O grupo de processos mais comumente empregado utiliza o metal no estado líquido, em processos de espumagem, a qual pode ser direta, pela injeção de gases que promovem a formação de bolhas no líquido, ou indireta, pela adição de agentes espumantes, os quais, ao se dissociarem no líquido, promovem a formação de bolhas gasosas. Há ainda a possibilidade de promover supersaturação do metal líquido (por ação de alta pressão) com elementos que, ao ser aliviada a pressão, nucleiam bolhas de gás; ou ainda o emprego de sistemas que apresentam reações eutéticas onde uma das fases é gasosa. Em todos estes processos, o resultado é um material de células fechadas ou espumas.

Ainda empregando o material no estado líquido, uma série de processos pode fornecer materiais porosos com células abertas ou esponjas ao fazer uso de agentes bloqueadores pós-removíveis, isto é, o metal líquido é levado a solidificar em espaços confinados entre partículas ou reticulados de materiais não reativos com o metal líquido; após solidificação, a retirada do agente bloqueador fornece os poros do material. Técnicas de replicação também podem ser utilizadas para a fabricação de esponjas; neste caso o metal líquido é injetado em moldes cerâmicos produzidos a partir de modelos poliméricos, de maneira semelhante à utilizada na fundição por cera perdida. Neste caso, a esponja metálica obtida é uma réplica da esponja polimérica utilizada como modelo.

Técnicas de metalurgia do pó podem ser utilizadas para a fabricação de espumas e esponjas, ao fazer uso de misturas de pó metálico com pó de agentes espumantes ou agentes bloqueadores, as quais são compactadas e aquecidas para, no primeiro caso, fusão do metal e geração de gases pela dissociação do agente espumante e, no segundo caso, promoção da sinterização do pó metálico.

Finalmente, processos mais sofisticados podem ser empregados para a fabricação de metais celulares, como os baseados na deposição eletrolítica e deposição de vapores metálicos sobre modelos poliméricos ou cerâmicos. Uma revisão geral dos processos de fabricação de metais celulares pode ser encontrada na literatura em artigos de Banhart (2001).

O processo empregado para a fabricação de um determinado produto metálico poroso define suas características estruturais. As características estruturais fundamentais de um material celular são o tipo, dimensão, morfologia, distribuição dos vazios, bem como o grau de interconexão entre eles. Estes parâmetros, associados ainda à espessura de paredes de células, definem a “arquitetura dos poros” do material celular. As propriedades de um material celular são definidas, por sua vez, pela arquitetura de poros, densidade do material e ainda pela microestrutura das paredes metálicas.

A correlação entre a estrutura celular e suas propriedades ainda não é perfeitamente compreendida, dada à diversidade de arquiteturas possíveis e a heterogeneidade intrínseca dessas estruturas. Tentativas de correlação e modelagem de propriedades estão sendo propostas, fazendo

uso de teorias originalmente desenvolvidas para espumas poliméricas; são geralmente baseadas na densidade relativa entre o material poroso e o material maciço e assumem uma estrutura celular uniforme e ideal. Entretanto, ao contrário das espumas poliméricas, as espumas metálicas podem conter áreas porosas altamente desordenadas, com uma ampla dispersão de forma e tamanho de vazios. Podem ainda conter imperfeições como trincas e fraturas nas paredes metálicas, inevitáveis devido às altas temperaturas envolvidas nos processos de fabricação (SIMANCIK, 2002).

Os processos de fabricação de metais celulares são de alta complexidade, muitas vezes exigindo técnicas avançadas de elevado custo e de difícil controle, o que em geral leva a reduzido grau de reprodutibilidade e, portanto de consistência da qualidade do produto (CURRAN, 2003).

## **1.2. Objetivos**

Buscando contribuir para o desenvolvimento desta importante classe de materiais, os metais celulares, ainda pouco explorada no país, este trabalho propõe:

- Investigar um novo e recente processo para a fabricação de materiais celulares, de baixo custo, alta operacionalidade e flexibilidade quanto a tipos de ligas e geometrias de produtos;
- Caracterizar o produto obtido em termos estruturais, físicos e mecânicos e buscar a compreensão da relação entre as características e propriedades com os parâmetros de processo.

O processo faz uso da tecnologia da tixoconformação, ou seja, do processamento de ligas no estado semi-sólido, para obtenção de material poroso, mais especificamente uma esponja metálica. No processo, a liga de alumínio AA2011 é infiltrada no estado pastoso tixotrópico, em pré-formas de agente bloqueador não reagente com metal (partículas de NaCl), que é removido após o término do processo de fabricação. O comportamento reológico de pastas metálicas tixotrópicas, o qual significa ocorrência de escoamento com elevada fluidez para baixas tensões aplicadas, possibilita a sua infiltração em espaços reduzidos, permitindo a obtenção de esponjas metálicas, conforme já comprovado por Delbin (2006).

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analisar a influência da condição da pré-forma de NaCl na qualidade do produto obtido, ao utilizar pré-formas de partículas NaCl com distintas granulometrias e nas condições sinterizada e não sinterizada;
- Analisar a repetibilidade do processo para uma dada combinação de parâmetros operacionais;
- Caracterizar qualitativamente e quantitativamente a arquitetura das esponjas obtidas, buscando compreensão da influência dos parâmetros de processo nas características analisadas (presença de defeitos de preenchimento, distribuição de vazios internos, espessura de paredes celulares e ainda a microestrutura de paredes metálicas);
- Caracterizar fisicamente as esponjas obtidas buscando compreensão da influência dos parâmetros de processo nas características analisadas (densidade);
- Estimar teoricamente as propriedades térmicas das esponjas obtidas, buscando compreensão da influência dos parâmetros de processo nas propriedades analisadas (condutividade e difusividade térmicas);
- Caracterizar as propriedades mecânicas em compressão, através de ensaios semi-estáticos e dinâmicos das esponjas produzidas, buscando compreensão da influência dos parâmetros de processo nas propriedades analisadas (módulo de Young, tensão de platô, deformação, energia absorvida no impacto).

## **Capítulo 2**

### **Fundamentos Teóricos**

Uma grande variedade de metais celulares é produzida por laboratórios de pesquisas e departamentos de desenvolvimento industrial. Existem produtos industriais já comercializados com os nomes de Duocel, Incofoam, Alporas, e alguns outros estão prestes de introdução no mercado. Há diferentes tipos de produtos e protótipos que são o resultado de várias combinações de processamento, arquitetura e matriz metálica. Os metais celulares mais amplamente estudados e desenvolvidos são baseados no alumínio e suas ligas, outros metais como Fe, Cu, Pb e Zn, também podem ser utilizados, desde que a técnica de processamento utilizada seja adequada. A estrutura de um metal celular é constituída tipicamente entre 70 a 95% de poros e a principal razão da sua utilização é a sua elevada resistência e rigidez, baixo peso e menor densidade com relação ao metal maciço.

#### **2.1. Classificação dos metais celulares**

Na literatura e no uso prático ocorre certa confusão relacionada aos termos “metais celulares”, “espumas metálicas” e “esponjas metálicas”. “Espumas metálicas”, por exemplo, é um termo freqüentemente usado para qualquer classe de material metálico de baixa densidade, na realidade seria corretamente aplicado para dispersão de bolhas de gás em líquidos (BANHART, 2000). Para melhor entendimento desta nova classe de materiais torna-se necessária a sua classificação em:

**Metais celulares:** é o nome geral dado a um corpo metálico em que quaisquer classes de vazios gasosos estão dispersos. A fase metálica divide o espaço em células fechadas/abertas que contém a fase gasosa;

**Metais porosos:** uma classe especial de metais celulares restritas a certos tipos de vazios. Os poros são usualmente circulares e isolados uns dos outros;

**Espumas metálicas:** uma classe especial de metais celulares que geralmente tem origem na espumagem no metal líquido e, portanto, apresentam uma morfologia restrita. As células são fechadas, circulares ou poliédricas e são separadas umas das outras por uma fina parede metálica;

**Esponja metálica:** morfologia de um metal celular usualmente com vazios interconectados.

Estas definições não são mutuamente exclusivas. A espuma, por exemplo, é uma estrutura porosa e celular, mas uma esponja não tem que, necessariamente, conter células. Além disso, esses materiais não são perfeitos, uma espuma, por exemplo, pode apresentar paredes rompidas, o que dificulta a sua distinção correta. A Figura 2.1 apresenta exemplos de estruturas porosas de metais celulares.

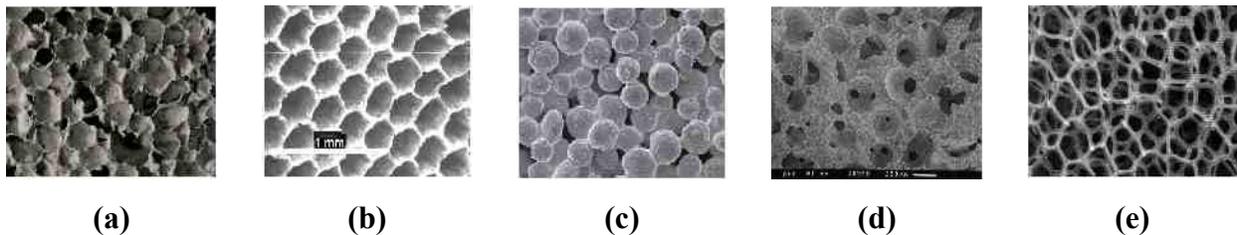


Figura 2.1: Estruturas de diferentes tipos de metais celulares (BANHART, 2007).

Na Figura 2.1 a primeira estrutura (a), apresenta uma espuma de alumínio do Instituto de Pesquisa IFAM, a segunda foto (b), apresenta um material ferroso com células que se estendem em uma dimensão do instituto de pesquisas MER, a terceira (c) apresenta pós de bronze sinterizados que realmente formam uma esponja metálica (em vez disso, porém, tais estruturas são frequentemente chamadas de metais sinterizados ou mesmo de metais porosos), a quarta foto (d) apresenta uma esponja de alumínio, que também poderia ser chamada de celular em uma

circunstância em que as células estivessem fechadas, e a última estrutura (e) apresenta uma esponja de níquel da empresa Inco.

Degischer (2002) define os metais celulares como materiais heterogêneos, formados por uma matriz metálica e por poros contendo gás, podendo ser classificados com os seguintes critérios:

- A condição do metal durante a produção da porosidade (líquido, sólido);
- O processo de fabricação envolvido (fundição, espumagem, deposição, sinterização);
- O método de formação dos poros: incorporação de substratos ociosos, substratos removíveis ou gás.

## 2.2. Aplicações dos metais celulares

Os metais celulares têm encontrado uma gama de aplicações cada vez maior. Se um metal poroso ou uma espuma metálica for produzido de forma adequada, pode-se encontrar uma solução para um dado problema, logicamente dependendo de alguns fatores que podem ser resumidos da seguinte forma (BANHART, 2002):

**Morfologia:** tipo de porosidade (aberta ou fechada), quantidade e tamanho dos poros necessitados e área total da superfície interna do material celular requerida;

**Metalurgia:** metal, liga e estado microestrutural requerido;

**Processamento:** possibilidades para realizações de operações secundárias nos metais celulares, tais como: operação de conformação, corte, união através de processos de soldagem e revestimento;

**Economia:** questões de custo, adequação para um grande volume de produção.

Há muitas possíveis aplicações em engenharia para as espumas metálicas; elas podem ser usadas em construções mecânicas que necessitem de peso reduzido, isolamentos sonoro e térmico

e aplicações para absorção de energia de impacto. Comparadas aos materiais sintéticos (plásticos), que também são leves, as espumas, principalmente de alumínio, apresentam as seguintes vantagens: boa resistência ao calor, alta deformação, incombustibilidade e a possibilidade de ser facilmente reciclada (KAMMER, 1999).

A Figura 2.2 apresenta o nível de porosidade necessária para determinadas aplicações dos metais celulares.

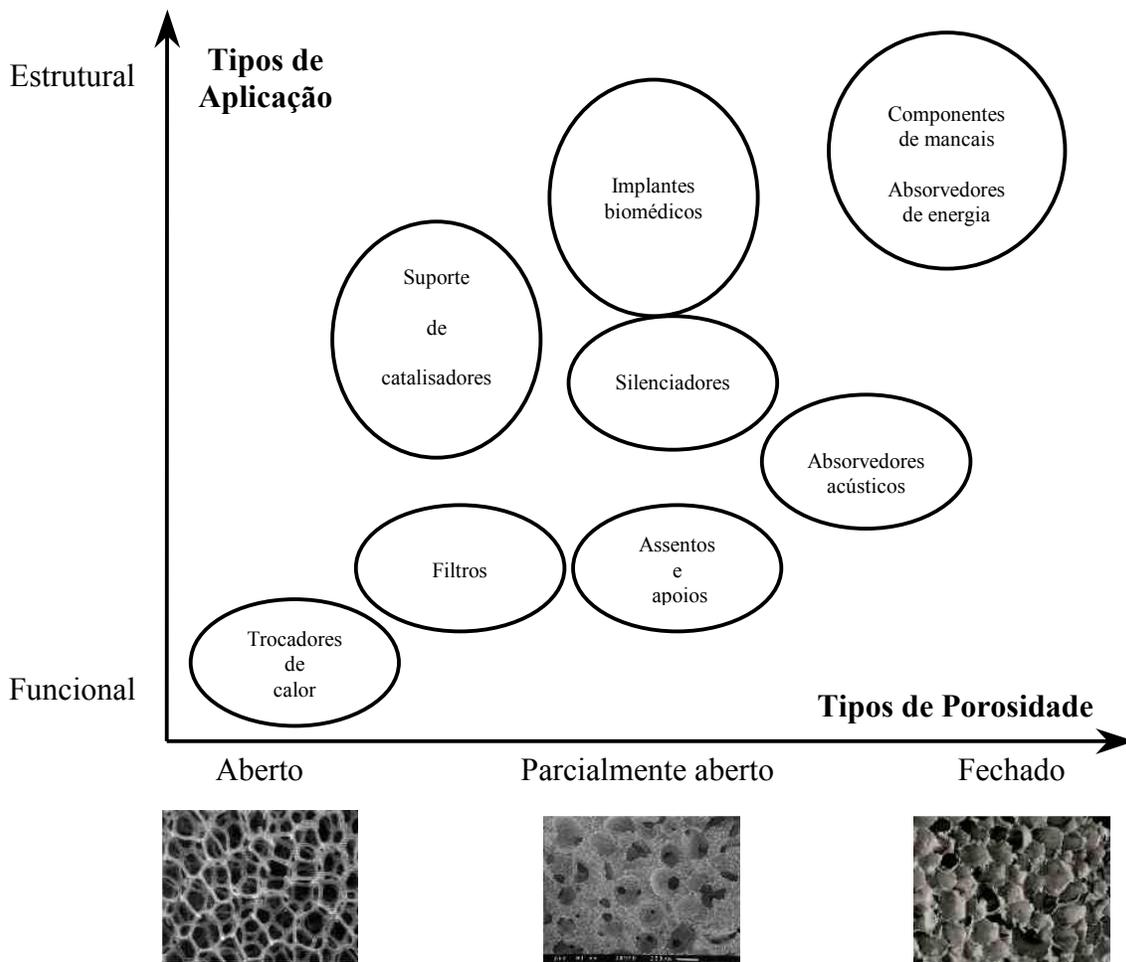


Figura 2.2: Gráfico representativo das aplicações dos metais celulares de acordo com o grau de porosidade (adaptado de BANHART, 2002).

Os metais porosos podem ter aplicações funcionais com poros abertos, como por exemplo, em trocadores de calor e filtros, ou aplicações estruturais com poros fechados, como, absorvedores de energia e componentes de mancais; além disso, há também aplicações

intermediárias que necessitam de uma porosidade parcialmente aberta, por exemplo, silenciadores.

Os metais celulares ainda têm um preço relativamente caro, mas o seu uso está sendo motivado por suas interessantes propriedades específicas e suas inúmeras aplicações; logicamente é esperado que, com o aumento do seu uso ocorra à redução do seu preço devido ao aumento do volume de produção. A seguir são discutidas algumas das possíveis aplicações dos metais celulares.

### 2.2.1. Aplicações funcionais

**Filtragem e separação:** existem dois tipos de filtros, filtros de retenção e separação de partículas sólidas ou fibras dispersas em um líquido (suspensão) e filtros de retenção de partículas sólidas ou líquidas dispersas em um gás. Exemplos de aplicação para o primeiro tipo são filtros de limpeza para reciclagem de polímeros, filtros de remoção de levedo de cerveja ou óleo contaminado. O segundo tipo inclui filtragem da fumaça de diesel ou remoção da água em linhas de ar. As principais propriedades dos filtros são: capacidade de filtragem, boa retenção de partículas, capacidade de limpeza, boas propriedades mecânicas, resistência à corrosão e reduzido custo. Alguns dos metais celulares possuem esta combinação de propriedades que não é apresentada por nenhum outro material (BANHART, 2002).

**Trocadores de calor e máquinas de refrigeração:** a alta condutividade dos metais celulares, principalmente alumínio e cobre, permite que esses materiais possam ser utilizados como trocadores de calor, neste caso é necessária uma estrutura de células abertas (esponja). O calor pode ser adicionado ou removido por gases ou líquidos que fluem através da esponja. (FRISCHMANN, 1995). A Figura 2.3 apresenta dois tipos de trocadores de calor produzidos com metais celulares.

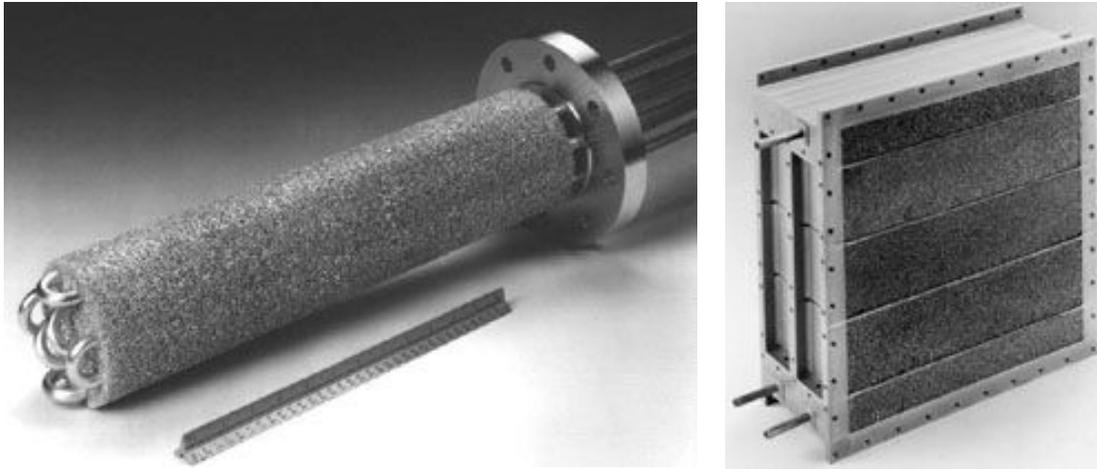


Figura 2.3: Exemplos de trocadores de calor de células abertas – ERG Corp. (ERG, 2007).

**Suporte para catalisadores:** a efetividade da catálise depende criticamente de uma grande área superficial interfacial entre o catalisador e os gases ou líquidos a serem reagidos. Portanto, o catalisador deve ser processado a fim de se obter uma estrutura altamente porosa, se isso não for possível, outro sistema poroso deve ser aplicado, por exemplo, um material cerâmico poroso. Metais celulares poderiam substituir tais cerâmicas (eventualmente se elas não pudessem competir com eles no tamanho da área superficial) já que exibem outras propriedades úteis tais como alta ductibilidade e condutividade térmica (SWARS, 1987).

**Armazenagem e transferência de líquidos:** uma das mais antigas aplicações dos metais porosos é como autolubrificadores de mancal; o óleo é armazenado nos interstícios das partículas e flui vagarosamente para fora, substituindo o óleo usado. A aplicação não é limitada a óleo: água também pode ser mantida e vagarosamente liberada por um controle automático da umidade. Muitas estruturas metálicas de poros abertos podem ser usadas para armazenagem de fluídos para manutenção de uma temperatura uniforme e constante, por exemplo, em condições criogênicas (ASHBY *et al.*, 2000).

**Controle de fluxo de fluído:** materiais porosos podem ser usados para controle de fluxo de líquidos e gases. Sabe-se que materiais porosos limitadores de fluxo são mais seguros e precisos que válvulas convencionais. Devido a grande variedade do grau de porosidade aberta que os metais celulares estão disponíveis, a sua correta seleção permite soluções para várias aplicações.

Espumas metálicas já estão sendo utilizadas como orientadoras de fluxo em túnel de vento, ou distribuição de fluxo em válvulas (SEAC, 1998).

**Controle acústico:** um dispositivo de controle de ondas sonoras pode ser obtido através de partes rígidas de um material de poros abertos na forma lenticular ou prismática. As ondas sonoras são guiadas e redirecionadas para este dispositivo acústico. Além disso, espumas metálicas de células abertas foram estudadas para sua adequação como adaptadoras de impedância de ultra-som (LIDA, MIZUNO e KONDO, 1998). A Figura 2.4 apresenta um ginásio no Japão com aplicação de metais celulares para isolamento acústico.



Figura 2.4: Foto de ginásio com aplicação de espumas metálicas para absorção acústica; espumas da marca comercial “Alporas” (SHINKO-WIRE, 2007).

**Eletrodos de bateria:** esponjas de chumbo podem servir como suporte para materiais ativos em baterias ácidas, em substituição de convencionais grades de chumbo, dessa forma, permitindo a construção de eletrodos mais leves. Uma pasta contendo finos pós de óxido de chumbo poderia preencher vazios de uma esponja de chumbo que entraria em contato com o eletrólito (ácido sulfúrico). A espuma de chumbo atuaria como uma rede de alta condutibilidade com uma baixa resistência interna da bateria (BANHART, 2002).

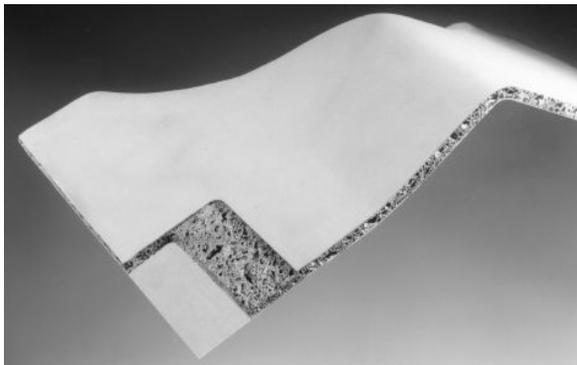
**Purificadores de água:** materiais metálicos celulares podem ser usados para reduzir a concentração de íons indesejados dissolvidos na água. Nesta aplicação a água contaminada flui através do metal celular altamente poroso com estrutura aberta. Os íons reagem com a matriz metálica da estrutura celular em uma reação de óxido-redução (DEGISCHER, 2002).

### 2.2.2. Aplicações estruturais

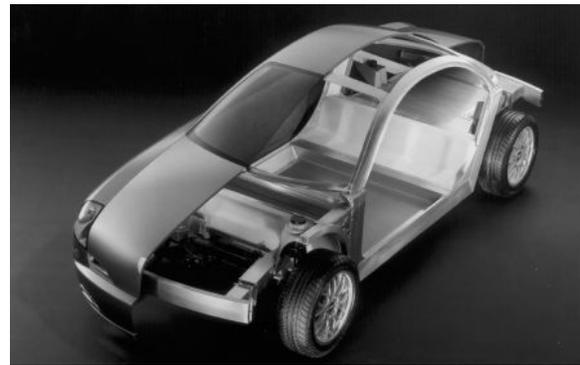
**Aplicações automotivas:** conduzido por uma série de preocupações ambientais e pressões sociais apoiadas pela legislação, existe um movimento para redução de peso de veículos; além disso, outra exigência é a melhoria da segurança de automóveis. Também são importantes os aspectos do uso de materiais recicláveis. Tendo em conta a suas boas propriedades de absorção de energia e de som, as espumas de alumínio se tornaram bastantes atrativas para aplicações automotivas. As três principais aplicações de espumas metálicas em carros são (KAMMER, 1999):

- Absorção de energia: a primeira aplicação é ilustrada no caso de absorvedores de energia de impacto nas partes lateral e frontal do veículo. Na verdade muitos dos carros produzidos atualmente incluem elementos deformáveis para absorção de energia na estrutura do veículo; estes elementos precisam absorver a energia proveniente de impacto na célula de proteção dos passageiros. Estas células podem ser preenchidas com espumas metálicas para melhorar suas propriedades de absorção de energia. As aplicações de espumas são importantes principalmente para novos carros compactos, onde o uso de outros absorvedores é dificultado devido ao espaço interno limitado.
- Baixo peso: a boa relação entre o peso e a rigidez permite o uso de espumas para uma vasta área de aplicações que necessita de peso reduzido, por exemplo, em partes estruturais e chapas do corpo de automóveis. Com os carros mais leves ocorre também uma redução do consumo de combustíveis.
- Absorção sonora e isolamento térmico: as espumas metálicas têm boas propriedades de absorção sonora e isolamento térmico. A propriedade de absorção sonora faz das espumas um material muito útil para isolar o compartimento do motor de carros. O objetivo neste caso é evitar a transferência de ruído para dentro do compartimento de passageiros e para o

meio ambiente. Um conceito interessante foi desenvolvido pela empresa alemã Karmann, com espumas de alumínio do tipo “sanduíche” conhecida também como AFS (*Al Foam Sanduíche*). AFS é uma espuma, entre duas chapas de material maciço que é produzida por um material precursor posteriormente laminado na forma desejada; após essa etapa o material precursor é espumado dentro de um forno, obtendo-se então uma espuma com espessura que varia de 8 a 10mm (a espessura das chapas de alumínio é cerca de 1mm). AFS é 50% mais leve e até 10 vezes mais rígido se comparado com chapas de aço. Se comparado com chapas de alumínio denso, o isolamento térmico é 95% maior. As combinações ideais de todas as propriedades das espumas fazem da AFS um excelente material para todas as partes do carro (KAMMER, 1999). A Figura 2.5 apresenta uma espuma do tipo sanduíche e sua aplicação em carro protótipo construído pela Karmann.



(a)



(b)

Figura 2.5; (a) Espuma tipo “sanduíche” AFS; (b) protótipo com aplicação de espumas tipo sanduíche na carroceria de automóvel (KAMMER, 1999).

**Aplicações em navios:** em navios a necessidade de materiais leves também é importante, mas, em comparação com os automóveis uma alta flexibilidade de processamento de materiais é necessária, já que os navios não são produzidos em série e também não utilizam partes padronizadas. Portanto, espumas de alumínio podem ter boas vantagens, o pré-requisito para sua utilização será o desenvolvimento de elementos de fixação adequados e a investigação de corrosão de espumas de alumínio em água salgada (KAMMER, 1999).

**Aplicações aeroespaciais:** espumas de alumínio podem se tornar importantes para a indústria aeroespacial devido ao seu peso reduzido. Por exemplo, chapas de espumas de alumínio ou painéis do tipo sanduíche poderiam substituir as estruturas do tipo colméia de alto custo. Isto conduz a várias vantagens, por exemplo, redução de custos e peso. Outras vantagens importantes são as isotropias das propriedades desses painéis e ausência de qualquer tipo de ligação adesiva, esta última poderia ajudar a manter a integridade da estrutura em caso de incêndio (BANHART, 2001). A Figura 2.6 apresenta um exemplo de aplicação de espumas de alumínio utilizado pela empresa Boeing.

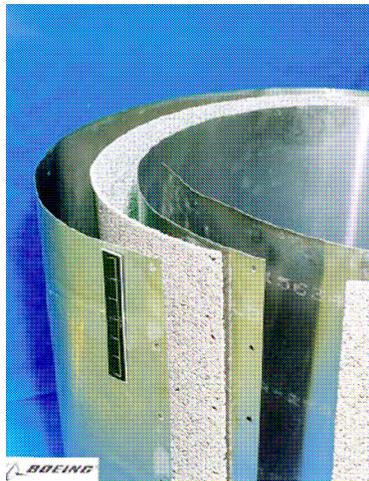


Figura 2.6: Partes estruturais com espumas de alumínio entre chapas densas para aplicação em aeronaves (NPL, 2000).

**Aplicações em construção civil:** aplicações em construção civil são boas possibilidades para a utilização de espumas de alumínio, devido a suas propriedades de incombustibilidade e isolamento térmico. Painéis podem ser preenchidos com espumas e usados como elementos de fachadas, no exterior de construções ou em coberturas de paredes internas. Em ambos os casos as espumas de alumínio podem servir como elementos de economia de energia devido a sua boa propriedade de isolamento térmico. Outra propriedade vantajosa para construção é o excelente isolamento acústico das espumas. Painéis de alumínio podem ser usados como materiais para absorção sonora em túneis ferroviários, rodoviários, pontes e viadutos. A estrutura para absorção sonora é colocada junto com uma superfície refletora de ruído em um determinado viaduto para absorver o ruído de veículos, aliviando assim, a poluição sonora (BANHART, 2001; KAMMER,

1999). A Figura 2.7 apresenta uma aplicação de espumas de alumínio da empresa japonesa Shinko-Wire (fabricante da espuma Alporas), como parte estrutural de um viaduto para redução no nível de ruídos.



Figura 2.7: Viaduto com aplicação de espumas de alumínio Alporas em partes estruturais para absorção de ruídos (SHINKO-WIRE, 2007).

## **2.3. Processos de fabricação de metais celulares**

Vários processos foram desenvolvidos para produzir metais celulares com distintos tipos de poros. Estas técnicas, que são aplicáveis a quase todos os metais e ligas, se diferem na natureza das espumas ou esponjas produzidas, assim como na facilidade de processamento, nível de controle do processo, possibilidade de adaptação de metais e ligas e potencial para adaptação dos processos para uma produção rápida e rentável. Neste capítulo serão apresentados os principais processos desenvolvidos até a presente data para fabricação de metais celulares tanto para estruturas de células abertas como fechadas.

### **2.3.1. Processos de fabricação de esponjas metálicas - baseados na sinterização**

- **Sinterização de pó metálico**

Sem dúvida este método é o mais simples de produzir esponjas metálicas, o método consiste basicamente na sinterização de pós metálicos, que geralmente é produzido por atomização a gás, em uma temperatura próxima do seu ponto de fusão, dessa forma, ocorre a união das partículas para dar origem a um material com porosidade interconectada.

A sinterização normalmente é realizada em um forno com atmosfera controlada ou a vácuo para evitar a oxidação da superfície, tendo um tempo de duração de 1 a 2 horas. A porosidade do produto final, apresentado na Figura 2.8, depende da eficiência da compactação dos pós, assim como a sua densidade relativa ( $\rho_{\text{espuma}} / \rho_{\text{maciço}}$ ), que normalmente é alta. Baixa densidade pode ser obtida misturando partículas de pós metálicos com um material volátil, que se decompõe ou evapora na temperatura de sinterização criando vazios adicionais na estrutura (CURRAN, 2003).

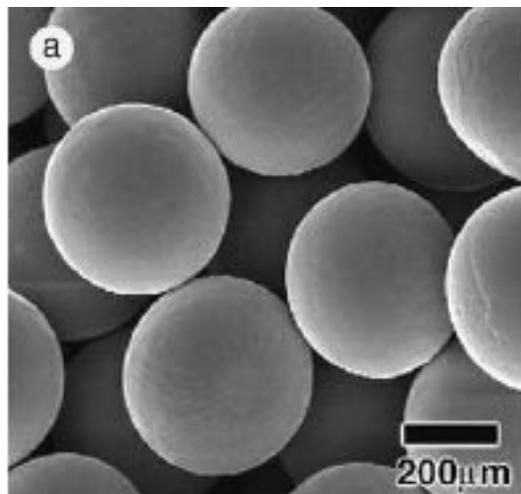


Figura 2.8: Fotos por MEV de uma esponja de titânio produzida por processo de sinterização em uma atmosfera redutora (OH *et al.*, 2003).

- **Sinterização de esferas ocas**

Maiores densidades podem ser obtidas com a utilização de pós metálicos oco. Atomização a gás de metais inevitavelmente produz uma pequena quantidade de partículas ocas (tipicamente de 1 a 5%), com diâmetro abaixo de 1mm, que podem ser separadas das partículas mais densas por um processo de sedimentação (ANDERSEN e STEPHANI, 2002). Maiores esferas ocas

podem ser obtidas pelos processos apresentados na Figura 2.9. Esferas ocas de aproximadamente 4mm podem ser produzidas com uma pasta contendo partículas metálicas dispersas com elementos ligantes e agentes estabilizadores em uma fase volátil e contínua, esta pasta é aquecida em seguida para fundir as partículas metálicas e evaporar outras fases, como apresentado na Figura 2.9 (b) (TOROBIN, 1987). As esferas também podem ser produzidas diretamente na fundição do alumínio, como apresentado na Figura 2.9 (a) (CURRAN, 2003).

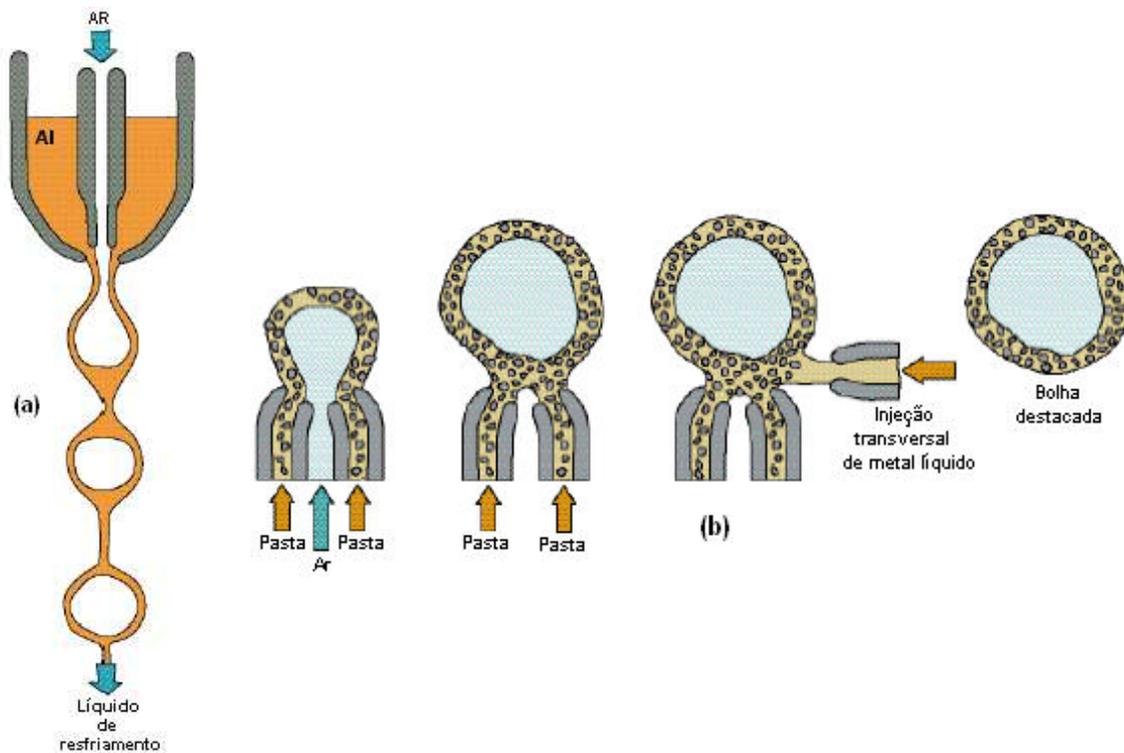


Figura 2.9: (a) Produção de esferas ocas de alumínio por instabilidade capilar do gás entre colunas de metal líquido. O ar e o metal líquido são injetados concentricamente de uma matriz formando esferas ocas metálicas que são produzidas e separadas após um controle cuidadoso do fluxo líquido. Elas se solidificam durante a queda ao ar e são coletadas em um recipiente com líquido de resfriamento. (b) Produção de esferas ocas de alumínio usando injeção de pasta. Em uma etapa posterior as bolhas são sinterizadas para remover as fases voláteis (adaptado de CURRAN, 2003).

As esferas ocas são unidas por processos de sinterização por um tempo de duração de aproximadamente 24 horas, elas também podem ser unidas depois de cobertas com uma pasta

ligante ou ainda ser unidas por pressão isostática a quente. Este último processo de união de esferas ocas proporciona uma melhor rigidez, devido ao aumento da área de contato das esferas que é proporcionado pela pré-deformação. As esferas ocas podem ser facilmente separadas pelo seu tamanho; o material celular obtido pode ter uma estrutura altamente uniforme com densidade relativa variando de 0,1 a 0,2. Existem outros métodos de produção para obtenção de esferas ocas, além desses descritos anteriormente, como por exemplo: pasta metálica pulverizada coaxialmente, cementação e sinterização e esferas de isopor cobertas galvanicamente (BANHART, 2001; ANDERSEN e STEPHANI, 2002; CURRAN, 2003). A Figura 2.10 (a, b e c) apresenta exemplos de estruturas típicas de esferas ocas sinterizadas e produto final obtido após união das esferas.

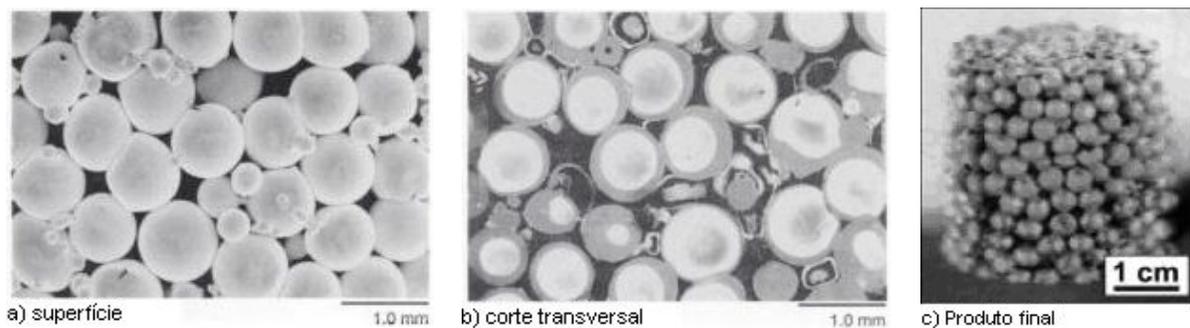


Figura 2.10: (a, b) Estruturas de esferas ocas unidas por pressão isostática a quente (ANDERSEN e STEPHANI, 2002); (c) típico produto final obtido após sinterização das esferas ocas (CURRAN, 2003).

### 2.3.2. Processos de fabricação de esponjas metálicas - utilizando pré-formas porosas

- **Replicação de uma estrutura polimérica**

No estudo de metais celulares a replicação refere-se ao processo usado para replicar a arquitetura de poros abertos de um material. Marchi e Mortensen (2002) definem os processos de replicação em três etapas principais, sendo elas:

1. Preparação da pré-forma removível (peletização, sinterização, revestimento ou recobrimento com resina);

2. Infiltração da pré-forma com metal líquido (fundição sob pressão ou pressurização a gás);
3. Remoção da pré-forma após solidificação do metal líquido (jato de água ou quebra).

Espumas poliméricas com alta porosidade e estrutura celular aberta e uniforme são relativamente fáceis de serem produzidas; isso conduziu à sua utilização como modelo na produção de esponjas metálicas (YAMADA *et al.*, 1999). Neste processo, uma espuma polimérica, geralmente de poliuretano, é infiltrada com pasta cerâmica e em seguida é queimada para dar origem a uma pré-forma cerâmica. Após esta etapa o molde é preenchido com metal líquido, geralmente adicionado pela combinação de pressão externa e vácuo, e então a pré-forma cerâmica é eliminada, o esquema representativo do processo é apresentado na Figura 2.11.

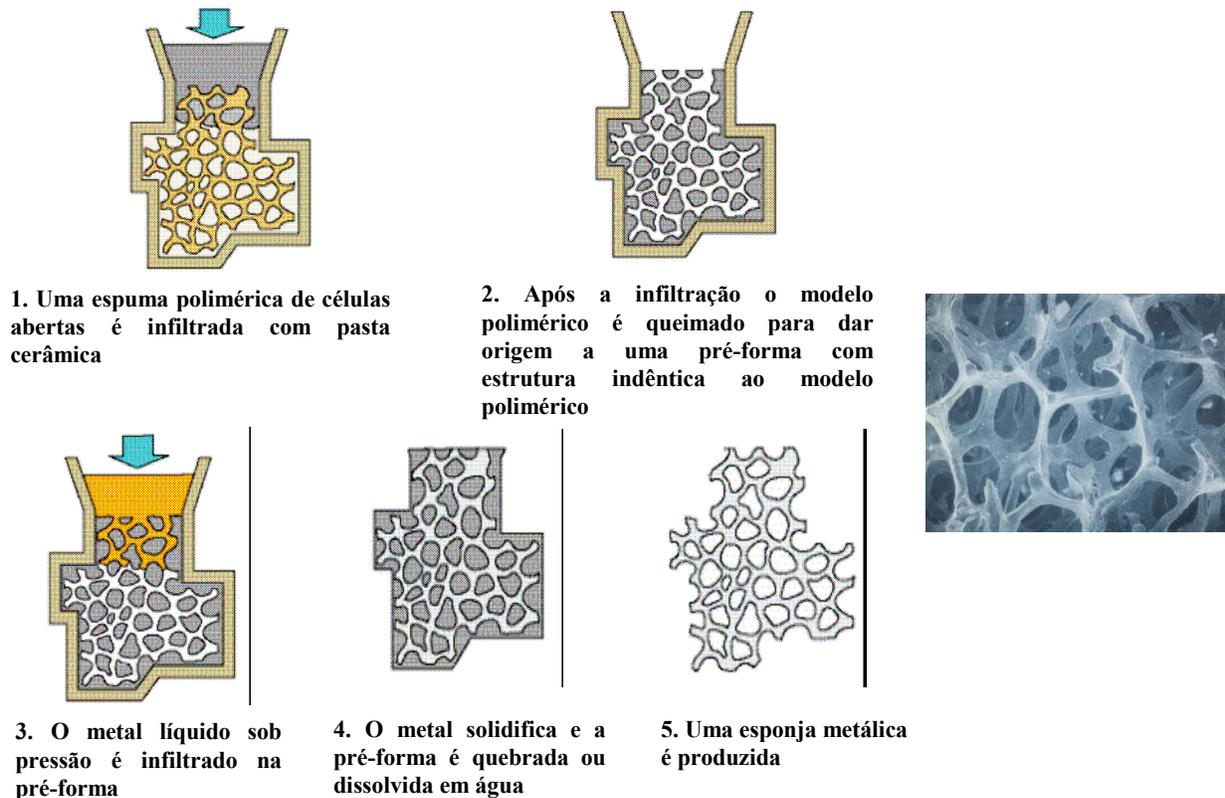


Figura 2.11: Esquema representativo do processo “Duocel” para fabricação de esponjas metálicas e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo- ERG Corp. (ERG, 2008).

Uma vasta gama de metais e ligas podem ser usadas neste processo; a densidade relativa dessas esponjas pode ser de até  $0,05\text{g/cm}^3$  e o tamanho dos poros varia de 1-5mm. As espumas produzidas por este método são usadas como trocadores de calor, defletores de líquidos e gases, eletrodos porosos de alta pureza e filtros químicos (ASHBY *et al.*, 2000).

- **Uso de agentes bloqueadores**

Esponjas metálicas também podem ser produzidas por infiltração de metal líquido em grãos de materiais orgânicos, inorgânicos ou esferas ocas de baixa densidade, ou ainda por adição desses materiais no metal líquido. Estes materiais são conhecidos como agentes bloqueadores e podem ou não permanecer no produto metálico após solidificação, se o agente bloqueador permanece na estrutura celular o produto final recebe o nome *syntactic foam*. Porém, na maioria das vezes a intenção do uso de agentes bloqueadores é de se obter um produto com poros abertos e interconectados, sendo assim, torna-se necessária a remoção do agente bloqueador (esferas de argila, areia, vidro, polímeros ou sais solúveis) por lavagem em solvente adequado, volatilização ou outra técnica apropriada.

Um exemplo de processo de fabricação de esponjas metálicas utilizando agentes bloqueadores pode ser visto na Figura 2.12.

Neste processo foi utilizado como agente bloqueador partículas de NaCl que foram unidas por um processo de sinterização para formar uma pré-forma porosa. Após a sinterização o metal líquido foi infiltrado sob pressão na pré-forma porosa; e ao término da solidificação do metal o agente bloqueador é eliminado, obtendo-se assim uma esponja metálica com tamanhos das células variando de 3 a 4mm. Com aplicações de vácuo e alta pressão em etapas distintas do processo possibilitou obter células menores de até 0,4mm, com densidade relativa de 0,2 a  $0,3\text{g/cm}^3$  (SAN MARCHI, DESPOIS e EMORTENSEN, 2000). Neste processo uma vasta gama de metais e ligas podem ser usados, logicamente com agentes bloqueadores adequados a temperatura de processamento da liga (fundição) (SAN MARCHI e MORTENSEN, 2001).

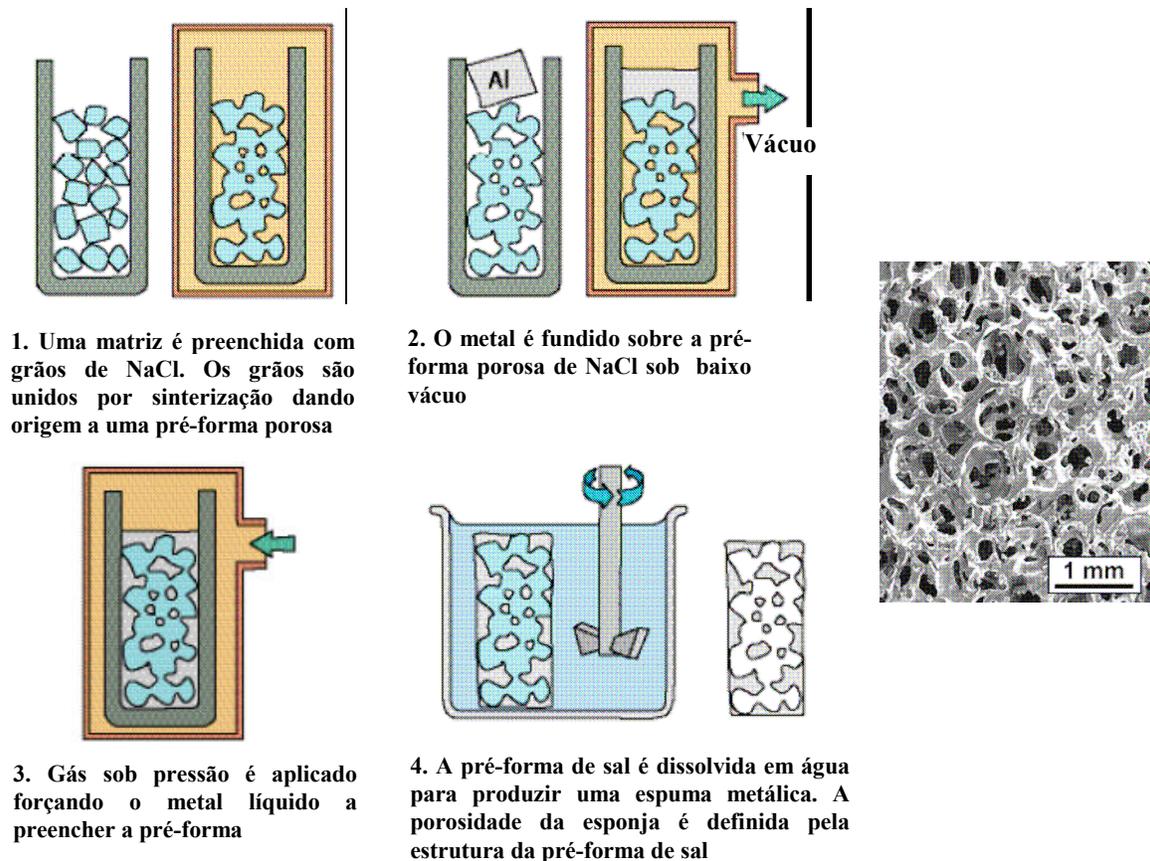


Figura 2.12: Esquema representativo do processo de fabricação de esponjas metálicas, utilizando uma pré-forma de NaCl sinterizada como modelo de estrutura - e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo (CURRAN, 2003).

- **Decomposição química sobre pré-formas removíveis**

Uma espuma polimérica de células abertas também pode ser usada como um modelo de deposição, de acordo com o processo discriminado da Figura 2.13. A espuma polimérica é revestida com uma substância que absorve a radiação infravermelha, geralmente grafite ou pigmentos adequados. A radiação localmente aquece o revestimento superficial que é exposto a uma atmosfera de  $\text{Ni}(\text{CO})_4$  (carbonilo de níquel). Esse gás se decompõe em monóxido de carbono e Ni, este último recobre toda a superfície do polímero. Posteriormente a esponja polimérica é queimada para dar origem a uma esponja metálica com paredes ocas. O processo não tem nenhuma restrição direta sobre os tamanhos das células, sendo assim, as esponjas podem ser produzidas com paredes ocas extremamente finas. A variedade de metais, contudo, é limitada devida a necessidade de adequação da reação de deposição. As espumas produzidas por esse

método recebem o nome comercial de “Incofoam” e são usadas como filtros e eletrodos porosos de bateria (BABJAK, ETTTEL e PASERIN, 1990).

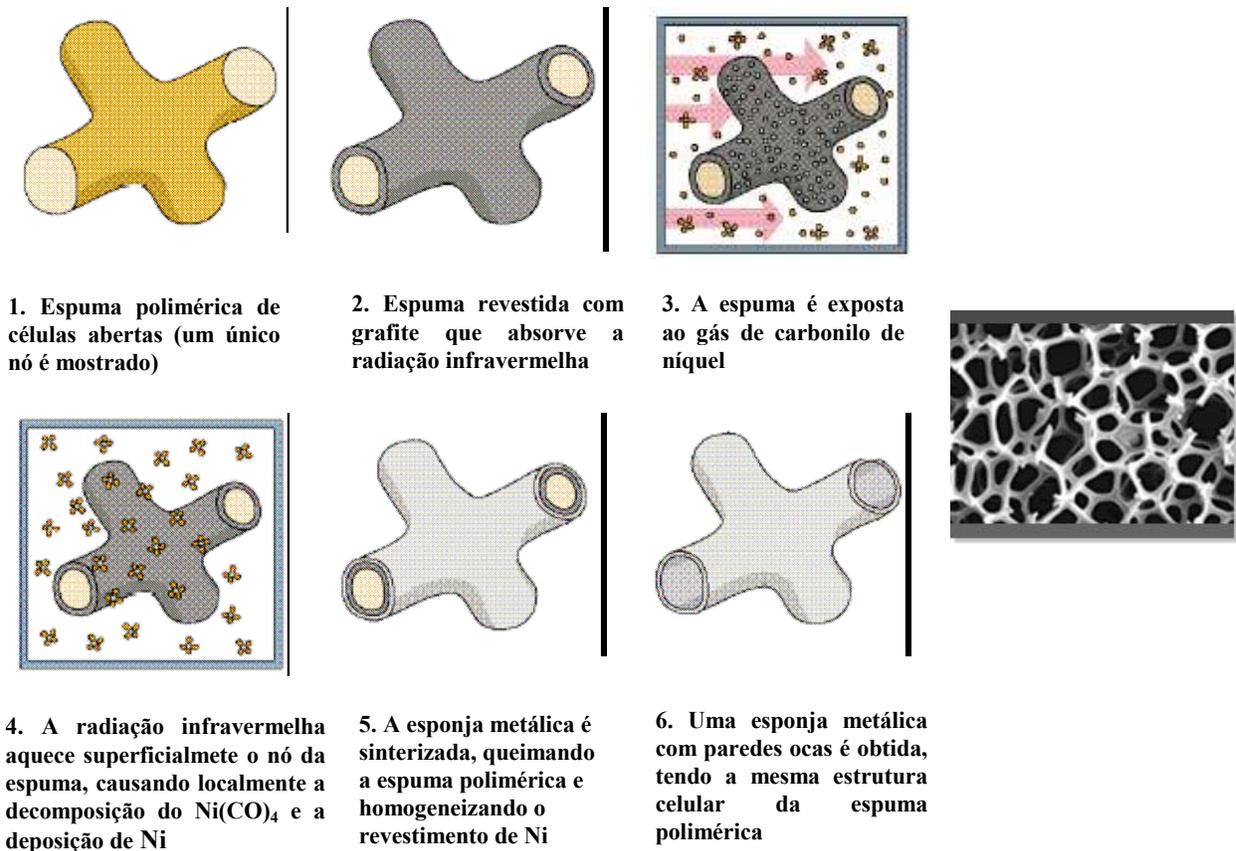


Figura 2.13: Esquema representativo do processo “Incofoam” para fabricação de esponjas Níquel por CVD e foto da estrutura celular da esponja metálica resultante do processo (INCO, 2008).

### 2.3.3. Processos de fabricação de espumas metálicas – espumagem direta no banho

- Injeção de gás

Este método de espumagem de alumínio e suas ligas está sendo explorado pelas empresas *Hydro Aluminium* na Noruega e por *Cymat Aluminium* no Canadá (JIN *et al.*, 1990). De acordo com este processo, sistematicamente descrito na Figura 2.14, partículas de carboneto de silício, óxido de alumínio ou óxido de magnésio, são usadas para realçar a viscosidade do banho. Conseqüentemente, a primeira etapa consiste na preparação do banho contendo uma dessas substâncias, criando um compósito de matriz metálica (MMC). Esta etapa requer sofisticadas

técnicas de mistura para segurar uma distribuição uniforme das partículas. Uma grande variedade de ligas de alumínio podem ser usadas neste processo.

A espumagem ocorre na segunda etapa por injeção de gases (ar, nitrogênio ou argônio) no banho, através do uso de impulsores rotativos especialmente projetados ou bocais vibratórios. Estes geram bolhas de gás muito finas que são distribuídas uniformemente no metal líquido. As bolhas sobem para superfície do metal líquido e são puxadas do recipiente por uma correia transportadora, sendo suavemente laminada, embora ainda esteja parcialmente líquida. A espuma sólida resultante apresenta a princípio, dimensões iguais ao do recipiente que contém o metal líquido, tipicamente com 10cm de espessura. A fração de volume das partículas de reforço varia tipicamente de 10% a 20% com o tamanho médio das partículas variando de 5 a 20 $\mu\text{m}$ . A densidade da espuma de alumínio produzida desta maneira é da ordem de 0,069 a 0,54g/cm<sup>3</sup> (BANHART, 2000).

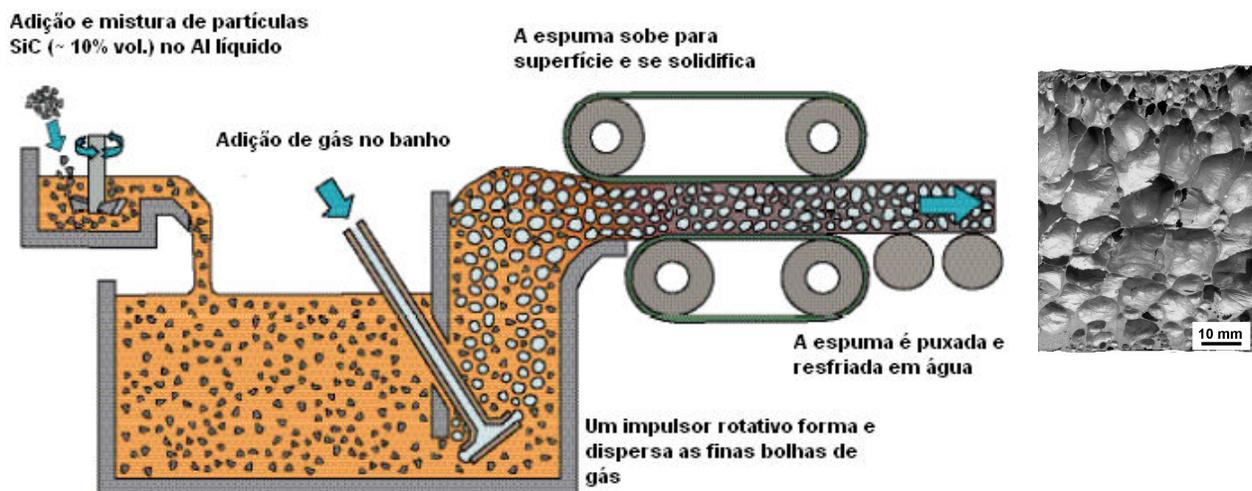


Figura 2.14: Esquema representativo do processo de fabricação por adição de gás na fundição e foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo (JIN, KENNY e SANG, 1990).

A vantagem do processo de espumagem direta inclui; a capacidade de produção contínua de um grande volume de espumas, que pode ser conseguido com baixa densidade. Espumas MMC são, conseqüentemente, e, provavelmente mais baratas que outros materiais metálicos celulares.

Uma das possíveis desvantagens do processo de espumagem direta é a eventual necessidade de corte da espuma, desse modo, abrindo as células superficiais.

- **Adição de agentes espumantes**

Um segundo modo para espumar diretamente na fundição, é adicionar um agente espumante ao invés de injetar gás. Como pode ser visto na Figura 2.15, o calor causa a decomposição dos agentes espumantes que libera o gás a qual propõe então o processo de espumar (MIYOSHI *et al.*, 2000).

A empresa Shinko Wire Company na cidade de Amagasaki no Japão produz espumas desse modo desde 1986 com um volume de produção acima de 1000Kg por dia. Em uma primeira etapa cerca de 1,5% em peso de cálcio é adicionado no banho do alumínio em 680°C. O cálcio é misturado no metal líquido por alguns minutos (tipicamente 6 minutos), durante este tempo a sua viscosidade aumenta continuamente por um fator de até cinco vezes, devido à formação de óxido de cálcio CaO, óxido de alumínio-cálcio ( $\text{CaAl}_2\text{O}_2$ ), ou talvez por intermetálicos uniformes  $\text{Al}_4\text{Ca}$ . Depois que a viscosidade alcança o valor desejado é adicionado hidreto de titânio ( $\text{TiH}_2$ ) (tipicamente 1,6% em peso) como agente espumante que se decompõe liberando gás de hidrogênio no líquido, em uma temperatura de 680°C que é mantida por um tempo de 4 a 15 minutos. O líquido se expande lentamente formando a espuma (BABJAK, 1987).

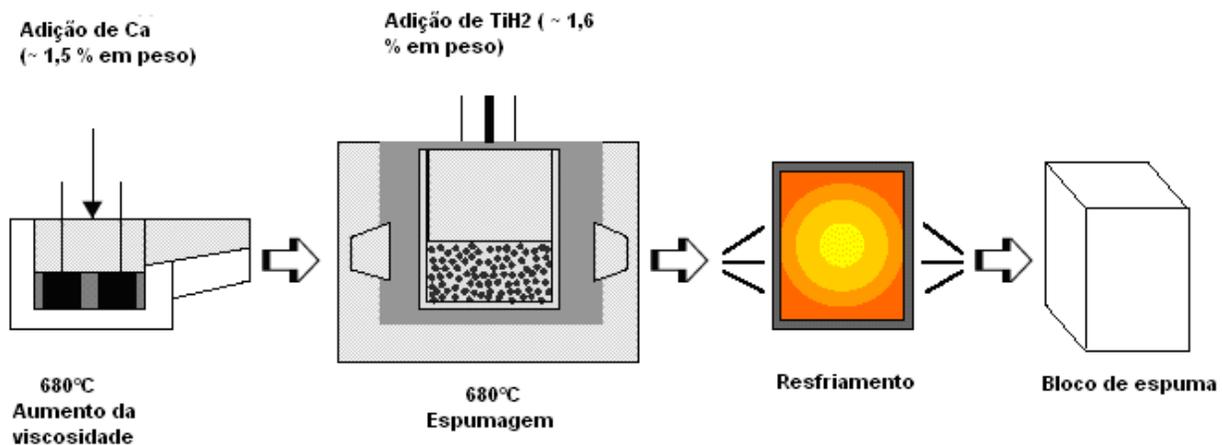


Figura 2.15: Esquema representativo do processo de fabricação por adição  $\text{TiH}_2$  na fundição e foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo (MIYOSHI *et al.*, 2000).

O processo de espumar ocorre em pressão constante. Após a refrigeração do recipiente abaixo do ponto de fusão da liga, a espuma de alumínio solidifica e pode ser retirada do molde por um processo adicional. A espuma produzida deste modo, como pode ser visto na Figura 2.16, recebe o nome comercial de Alporas, e se mostra como a espuma de alumínio mais homogênea que atualmente está disponível (BANHART, 2001). A densidade típica após o corte dos blocos de espuma varia de 0,18 e 0,24g/cm<sup>3</sup>, com tamanho médio dos poros de 4mm (KÖNER e SINGER, 2002).

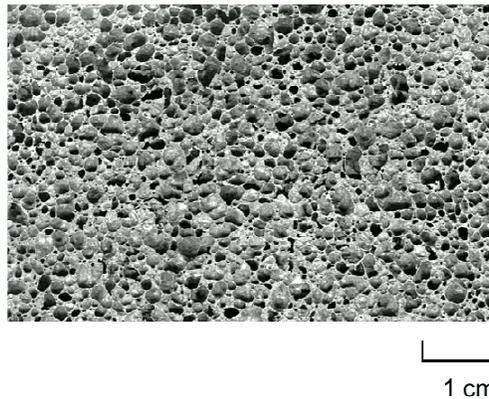


Figura 2.16: Foto da estrutura celular da espuma metálica resultante do processo Alporas (BANHART, 2001).

#### **2.3.4. Processos de fabricação de espumas metálicas – metalurgia do pó**

A utilização de agentes espumantes proporciona maior controle sobre a estrutura celular final do que a injeção direta de gás. Mesmo assim, o processo de espumar continua sendo relativamente difícil de controlar, já que necessita de completa dispersão do agente espumante no banho. Devido a esse fato, vários processos foram desenvolvidos dispersando o agente espumante antes de ocorrer à fundição. Tipicamente, pós metálicos são misturados com agentes espumantes na temperatura ambiente e são compactados para formar um material precursor, este precursor é posteriormente espumado dentro de um molde, acima da temperatura de fusão do metal, originando uma espuma metálica.

O processo por metalurgia do pó oferece varias vantagens sobre os processos de adição de gás direta no banho, as principais vantagens são: pode ser usados pós mais finos de agentes espumantes, proporcionado uma dispersão mais uniforme no material precursor; o material

precursor pode ser armazenado indefinidamente, podendo ser cortado e posteriormente espumado em moldes de formas complexas, sem a necessidade de um agitador, produzindo componentes *near-net-shape* (CURRAN, 2003).

O material precursor deve ser consolidado por alguma técnica de compactação, para que o gás proveniente dos agentes espumantes não escape durante o processo de espumar. Algumas dessas rotas para consolidação são apresentadas na Figura 2.17 (BAUMGÄRTNER, DUARTE e BANHART, 2000).

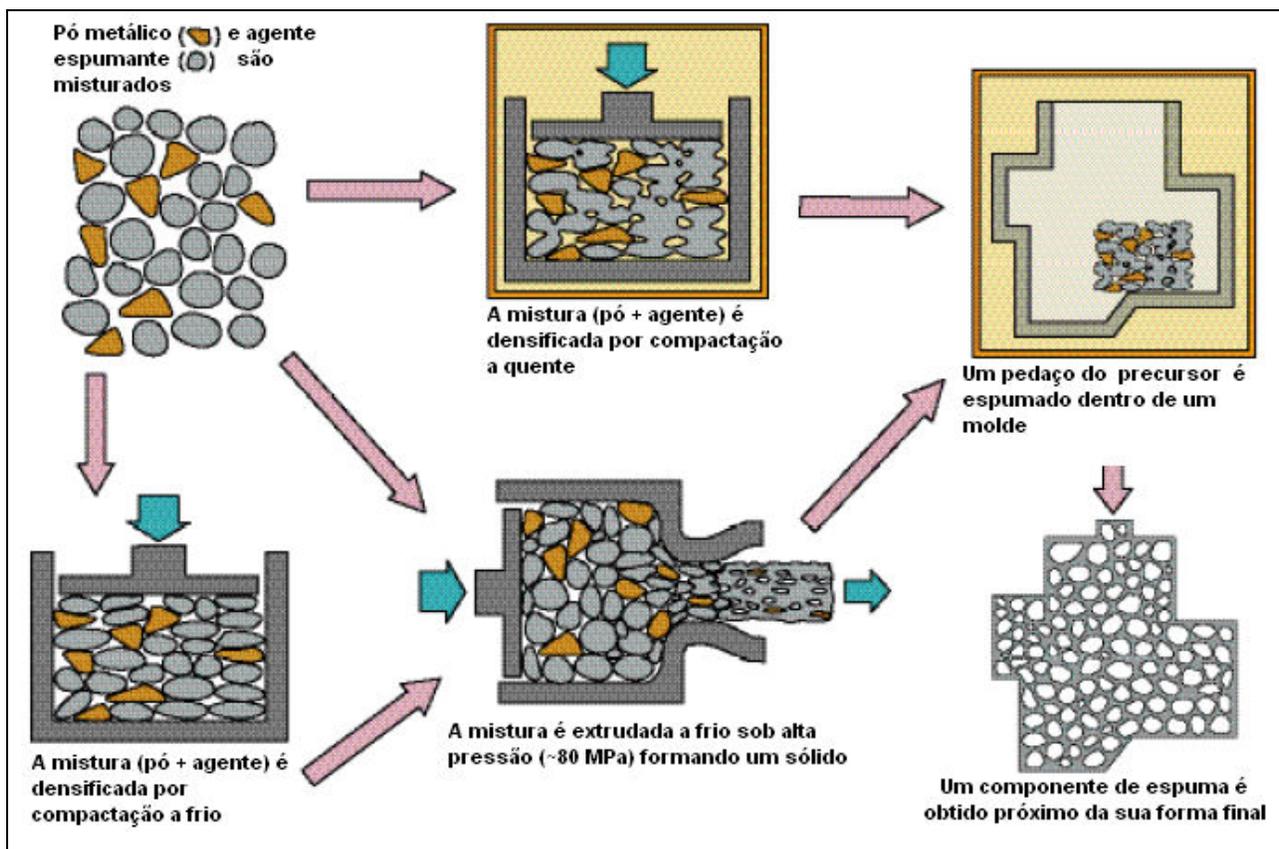


Figura 2.17: Esquema representativo do processo de fabricação de esponjas metálicas por metalurgia do pó (SIMANCIK E KOVACIK, 1997).

A extrusão na temperatura de 440°C e pressão de ~80MPa, gera um atrito entre as partículas, suficiente para quebrar o filme de óxido superficial e para formar o material precursor. Preliminarmente a compactação isostática a frio pode facilitar a extrusão. Como uma alternativa para o processo de extrusão, as misturas de pós podem ser consolidadas por compactação

isostática a quente na temperatura de 400-450°C, algumas vezes com uma etapa preliminar de compactação a frio, para facilitar o manuseio. As partículas de pós são ligadas principalmente por difusão. Este processo permite o uso de agentes espumantes que se decompõem em temperaturas superiores a 400°C, devido às altas pressões que impedem a sua decomposição de imediato (BAUMEISTER e SCHRADER, 1992; DUARTE e BANHART, 2000). Estes processos podem ser utilizados para produzir espumas de alumínio, bronze, cobre, aço, chumbo e magnésio, e são comercialmente explorados para produzir espumas com os nomes comerciais de Foaminal, Alulight e Fraunhofer, com densidade relativa variando de 0,11 a 0,37 e tamanho de poros na ordem de milímetros.

### **2.3.5. Processos de fabricação de metais celulares – processamento no estado semi-sólido**

Tixoprocessamento se caracteriza pelo processamento no estado semi-sólido de ligas metálicas. O regime de escoamento não turbulento da pasta permite a obtenção de componentes com baixa porosidade e com uma microestrutura mais refinada. Os componentes produzidos por esta tecnologia podem apresentar melhores propriedades mecânicas se comparados com componentes produzidos a partir do metal líquido. Recentemente esta tecnologia começou a ser utilizada em processos de fabricação de metais celulares; a seguir serão apresentados dois processos em estudo com esta tecnologia.

- **Metalurgia do pó**

Espumas metálicas podem ser produzidas no estado semi-sólido através de um material precursor (pós metálicos + agentes espumantes). As etapas de preparação do precursor consistem em misturar pós metálicos com agente espumante (exemplo pós de Al, Si ou Cu com  $TiH_2$ ) e densificar esta mistura por compactação isostática a frio (~150MPa). O bilette gerado dessa compactação, densificado em torno 80%, é aquecido até a temperatura do estado semi-sólido da respectiva liga (fração líquida de 40 a 60%) e permanece nesta temperatura por um determinado tempo para que ocorra a globularização da liga (WEISE, STANZICK e BANHART, 2003). Após este tempo o material no estado semi-sólido é transferido para um equipamento de injeção em câmara fria que injeta o metal (~180MPa) na cavidade do molde. Após esta etapa o material precursor semi-acabado pode ser espumado como descrito anteriormente; as rotas para o processo

convencional e por tixoprocessamento são apresentadas na Figura 2.18. A vantagem desse processo está no fato da obtenção de um material precursor com qualquer geometria, não necessitando de etapas posteriores, além disso, se comparado com o método derivado da metalurgia do pó, o processamento no estado semi-sólido conduz a obtenção de material precursor mais isotrópico e conseqüentemente uma espuma com porosidade muito mais uniforme (BABCSÁN, BANHART e LEITLMEIER, 2003).

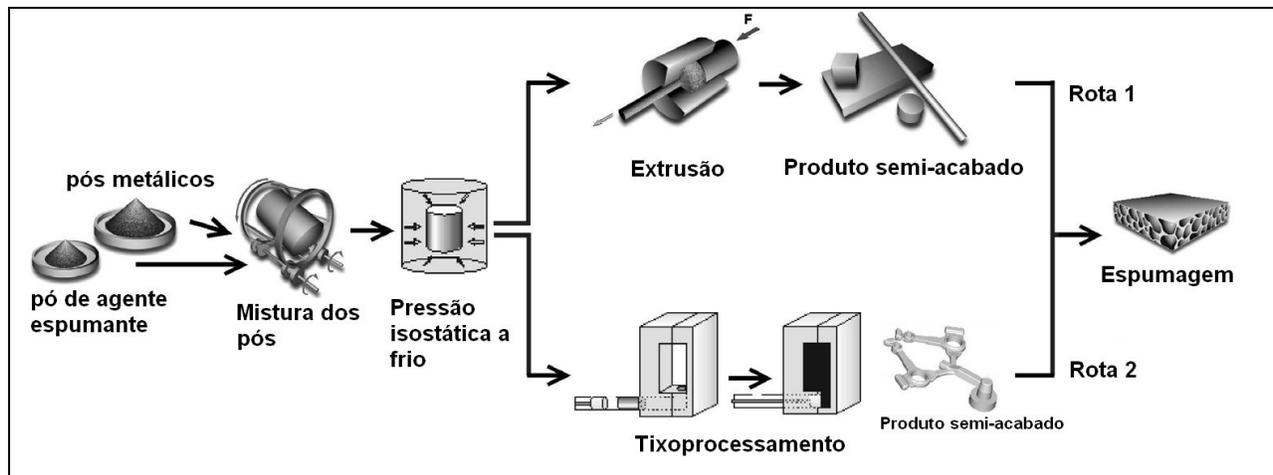


Figura 2.18: Esquema representativo do processo de fabricação de espumas metálicas por rota convencional (rota 1) e por tixoprocessamento (rota2); (WEISE, STANZICK E BANHART, 2003).

- **Tixoconformação**

Metais celulares do tipo “sanduíche” também podem ser fabricados por infiltração da liga no estado semi-sólido em partículas de um agente bloqueador, que pode ser removido ao término do processo por lavagem. Primeiramente uma matriz metálica com a geometria desejada é posicionada no interior de um forno, em seguida é posicionado um disco de metal, normalmente Al, na base da matriz, sobre o primeiro disco é colocado o agente bloqueador e logo acima do agente bloqueador é adicionado outro disco metálico, formando, assim, um “sanduíche” de agentes bloqueadores entre disco de Al. O forno circular é posicionado em cima de uma prensa hidráulica, responsável pela conformação da liga nos estado pastoso. Após a liga alcançar a temperatura desejada de processo é acionada a prensa para infiltração da liga no estado semi-sólido nos agentes bloqueadores. Este processo pode ser realizado com frações líquidas distintas

que variam de 50 a 90%. A remoção do agente bloqueador pode ser realizada por banho em água agitada (ROBERT e DELBIN, 2008).

## **2.4. Caracterização dos metais celulares**

A estrutura celular dos metais porosos é o fator chave que determina as suas propriedades; este fato torna imprescindível a sua caracterização estrutural. O objetivo principal da caracterização é definir parâmetros estruturais e entender sua influência nas propriedades dos metais celulares (KRISZT, 2002). Os metais celulares são caracterizados estruturalmente pelo seu tipo de célula, fechada (espuma) ou aberta (esponja), densidade relativa, tamanho da célula/poro, formato da célula/poro e anisotropia (ASHBY *et al.*, 2000).

### **• Formato, tamanho e fração de volume de poros**

Mesmo uma estrutura celular com poros dos mesmos tamanhos e arranjos regularmente pode não ser suficiente para descrever o metal celular, além disso, os poros ainda podem ter orientações preferenciais. Dois conjuntos de parâmetros quantitativos podem ser usados para definir as características estruturais: um para descrever as propriedades de cada poro (tamanho, forma e orientação), e outro para caracterizar as propriedades topológicas do metal celular, como o arranjo das células e o número de células vizinhas. Assim, por exemplo, o tamanho do poro poderia ser descrito por (KRISZT, 2002);

- Um diâmetro equivalente do poro, que é definido como o diâmetro de uma esfera que tem o mesmo volume ou área;
- Ou como máxima, mínima ou média do comprimento dos poros.

Os poros podem ter orientações preferenciais e variações de tamanhos e formas (elípticas, circulares) devido ao processo de fabricação. Poros elípticos combinados com certas orientações podem levar a ocorrência de bandas de deformação, que são prejudiciais para o comportamento mecânico do metal celular (KRISZT, 2002).

Uma alta fração de volumes de poros conduz a redução da densidade do metal celular. A fração de volume de poros é um parâmetro importante, mas não fornece informações sobre o arranjo, tamanho e formato dos poros. Para análise de fração de volumes de poros deve-se levar em conta que dois metais celulares podem ter a mesma densidade, porém, uma amostra pode ter um ou dois grandes poros que representa a maior fração de volume da fase gasosa, e a outra pode consistir de poros menores uniformemente distribuídos (KRISZT, 2002).

## **2.5. Propriedades dos materiais**

As propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas dos metais celulares são medidas na maioria das vezes pelos métodos utilizados para o metal maciço. Algumas propriedades, como estrutura cristalina, coeficiente de expansão térmica e temperatura de fusão são iguais tanto para o metal maciço quanto para metal poroso (PIPPAN, 2002).

Algumas propriedades dos metais celulares, como a capacidade térmica, são tipicamente funções lineares da densidade. Porém, muitas outras propriedades, como por exemplo, módulo de elasticidade ou módulo de rigidez, tensão mecânica, condutividade térmica e elétrica e propriedades acústicas, não dependem somente da densidade, mas também da arquitetura celular do metal poroso (PIPPAN, 2002). Os principais parâmetros que influenciam nas propriedades dos metais celulares são (em ordem de importância):

- Propriedades da parede celular;
- Densidade relativa;
- Tipo de estrutura celular (células abertas ou fechadas);
- Distribuição da massa;
- Tamanho e distribuição das células;
- Formato e anisotropia das células;
- Conectividade das arestas e vértices das células;
- Defeitos como células rompidas.

### 2.5.1. Propriedades físicas

- **Densidade real e relativa**

Uma das características estruturais mais importantes é a distribuição da densidade pelo metal celular. Uma clara relação entre a densidade relativa, módulo de elasticidade e tensão no platô foi derivada do modelo teórico proposto por Ashby (2000). Pelo modelo proposto a influência da distribuição não homogênea da densidade nas propriedades mecânicas ainda não é perfeitamente compreendida, pois o mesmo é baseado em uma estrutura celular regular. A distribuição da densidade em metais celulares é influenciada por muitas características estruturais, como se pode ver na Figura 2.19 (KRISZT, MARTIN e MOSLER, 2002).

<b>Densidade</b>	
<b>Poros (células)</b>	<b>Estrutura celular</b>
<u>Parâmetros Globais:</u> fração de volume e fração de área	<u>Parâmetros Globais:</u> fração de volume, número de arestas e vértices, tipo de estrutura celular (fechada ou aberta), paredes ocas ou sólidas
<u>Parâmetros Objetivos:</u>	<u>Parâmetros Objetivos:</u>
Tamanho do poro: diâmetro equivalente, diâmetro de Feret e formato.	Espessura / comprimento / da parede celular, relação espessura com curvatura da parede celular, dobra, espessura e formato dos vértices e arestas, circularidade e número de vértices.
Orientação: referência do sistema dado pelo carregamento ou produção.	
<u>Parâmetros Topológicos:</u> arranjos dos poros, número de células vizinhas, distância das células vizinhas.	Número e tipo de defeito no material da célula: Microporos, dureza da superfície e distribuição metal na estrutura celular.

Figura 2.19: Dependência da densidade na característica estrutural dos poros e estrutura celular (KRISZT, MARTIN e MOSLER, 2002).

Um dos principais fatores para seleção de material celular, principalmente para aplicações mecânicas, é o valor da sua densidade. Existem vários métodos para determinação da densidade, como por exemplo, a simples pesagem de uma amostra de volume conhecido, usando a Equação

2.1 para a determinação do valor, Já a densidade relativa é derivada da relação entre a densidade do metal maciço e do metal poroso, de acordo com a Equação 2.2 (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

$$\rho_{real} = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$\rho_{rel.} = \frac{\rho}{\rho_s} \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

$\rho_{real}$  = densidade real do metal maciço ou metal poroso ( $\text{g/cm}^3$ )

$m$  = massa da amostra (g)

$v$  = volume da amostra ( $\text{cm}^3$ )

$\rho_{rel.}$  = densidade relativa

$\rho$  = densidade do metal celular ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_s$  = densidade do metal maciço ( $\text{g/cm}^3$ )

#### • Propriedades térmicas

As principais propriedades térmicas de importância prática para os metais celulares são: ponto de fusão, calor específico, coeficiente de expansão térmica, condutividade térmica e difusividade térmica. Algumas destas propriedades, como o ponto de fusão, calor específico e coeficiente de expansão térmica, são idênticas ou praticamente iguais a do metal maciço (SIMANCIK e KOVACIK, 2002). Dessa forma, as principais propriedades térmicas que se diferem das propriedades do metal maciço são a condutividade térmica, condutividade térmica normalizada e difusividade térmica.

A condutividade térmica é significativamente menor para os metais celulares do que para o metal maciço. A condutividade térmica de estruturas porosas recebe quatro contribuições; a condutividade térmica das paredes da célula, a condutividade do gás dos poros e os efeitos de

convecção e radiação. Mas, para a determinação desta propriedade por equacionamento somente deve ser considerada a condutividade térmica da parede celular, já que as outras contribuições são mínimas em baixas temperaturas, além disso, a contribuição do gás para esta propriedade é muita reduzida se comparada com a condutividade da parede metálica (SIMANCIK e KOVACIK, 2002). A contribuição do metal para a condutividade térmica da estrutura celular depende da densidade relativa e pode ser expressa para esponjas metálicas pela Equação 2.3 (ASHBY *et al.*, 2000); a condutividade térmica normalizada, relação da condutividade do metal celular pela condutividade metal maciço pode ser expressa pela Equação 2.4 (SIMANCIK e KOVACIK, 2002).

$$\lambda \approx \lambda_s \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^q \quad \text{Equação 2.3}$$

$$\lambda_n \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde:

$\lambda$  = condutividade térmica do metal celular (W/m.K)

$\lambda_s$  = condutividade térmica do metal maciço (W/m.K)

$\lambda_n$  = condutividade térmica normalizada

$\rho$  = densidade do metal celular (g/cm<sup>3</sup>)

$\rho_s$  = densidade do metal maciço (g/cm<sup>3</sup>)

$q$  = fator de correção (varia de 1,65 - 1,8 para os metais celulares)

A difusividade térmica  $a$  governa o fluxo de calor através de um material antes de alcançar um fluxo térmico estacionário. Ela pode ser definida como a relação entre a condutividade térmica e o calor específico volumétrico, como pode ser visto na Equação 2.5 (ASHBY *et al.*, 2000). Estas duas propriedades térmicas, condutividade e difusividade, permitem que os metais celulares de células abertas possam ser usados como trocadores de calor. Para tanto, são preferíveis para a fabricação de esponjas/espumas metais com alta condutividade térmica, como, por exemplo, alumínio e cobre, e um fluxo turbulento de fluídos para aumentar a transferência de calor local (SIMANCIK e KOVACIK, 2002).

$$\alpha = \frac{\lambda}{C_p \rho} \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

$\alpha$  = difusividade térmica do metal celular ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\lambda$  = condutividade térmica do metal celular ( $\text{W}/\text{m.K}$ )

$C_p$  = calor específico do metal celular ( $\text{J}/\text{Kg.K}$ )

$\rho$  = densidade real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 2.5.2. Propriedades mecânicas

Uma das propriedades mais importantes dos metais celulares é a sua capacidade de absorver grandes quantidades de energia em deformação plástica de compressão para uma tensão baixa quase constante aplicada. De um modo geral a determinação das propriedades mecânicas dos metais celulares é realizada por ensaio de compressão semi-estático. Ensaio de tração geralmente são muito pouco utilizados devido à dificuldade de se obter dados conclusivos de comportamento mecânico.

- **Módulo de Young**

O processo de deformação no qual a tensão e a deformação são proporcionais é chamado de deformação elástica; um gráfico de tensão (ordenada) em função de uma deformação (abscissa), resulta em uma relação linear. A inclinação (coeficiente angular) desse segmento linear corresponde ao módulo de elasticidade  $E$ . Esse módulo pode ser considerado como sendo uma rigidez, ou uma resistência do material a deformação elástica. Quanto maior for este módulo, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica que resultará da aplicação de uma dada tensão. Este módulo pode ser definido pela Equação 2.6 (CALLISTER, 2002).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde:

$E_r$  = módulo de elasticidade/Young (GPa/MPa)

$\sigma$  = tensão (MPa)

$\varepsilon$  = deformação

O módulo de Young para uma estrutura celular não é uma constante do material e, conseqüentemente, irá depender da arquitetura celular do metal poroso. Para metais celulares de células abertas o mecanismo principal de deformação é a flexão dos vértices e arestas das células. Em metais celulares de células fechadas ocorre maior resistência a compressão devido ao empilhamento das paredes metálicas, durante a tensão. Este comportamento permite a obtenção de melhores resultados de compressão, com a mesma densidade, para metais celulares de células fechadas do que para metais porosos de células abertas (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

Como dito anteriormente a densidade do metal celular é fator importante para a sua aplicação mecânica. Ashby *et al.* (2000) propõem um modelo matemático que relaciona a densidade relativa do metal celular com o módulo de Young do metal maciço, a fim de estimar o módulo de elasticidade para os metais celulares; para esponjas metálicas o módulo de elasticidade é expresso pela Equação 2.7 (ASHBY *et al.*, 2000).

$$E \approx \alpha_2 E_s \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^n \quad \text{Equação 2.7}$$

Onde:

$E$  = módulo de elasticidade/Young do metal celular (GPa/MPa)

$E_s$  = módulo de elasticidade/Young do metal maciço (GPa/MPa)

$\alpha_2$  = fator de correção (varia de 0,1 - 4 para os metais celulares)

$n$  = fator de correção ~2

#### • Comportamento em compressão

Em compressão os metais celulares exibem um comportamento único de tensão-deformação. Estes materiais apresentam uma grande área de deformação plástica com uma tensão aplicada quase constante, este comportamento os torna muito interessante para aplicações que necessitam de grande área de deformação para absorção de energia (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

Uma curva característica de tensão-deformação é apresentada na Figura 2.20. O primeiro estágio da curva ocorre um aumento linear da tensão devido à deformação elástica, nesta região é definido o módulo de elasticidade do metal celular. A tensão de compressão é definida do pico final deste estágio ou pela a intersecção de duas curvas (regime elástico e plástico). A tensão de compressão também pode ser estimada através do modelo proposto por Ashby *et al.* (2000) de acordo com a Equação 2.8. Em metais celulares de células fechadas podem ocorrer neste estágio deformações plásticas irreversíveis mesmo para baixas tensões aplicadas (KAMMER, 1999).

$$\sigma_c = n_1 \sigma_{c,s} \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 2.8}$$

Onde:

$\sigma_c$  = tensão de compressão do metal celular (MPa)

$\sigma_{c,s}$  = resistência à compressão do metal maciço (MPa)

$n_1$  = fator de correção (varia de 0,1 – 1,0)

$\rho$  = densidade do metal celular ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_s$  = densidade do metal maciço ( $\text{g/cm}^3$ )

O segundo estágio da curva é causado por uma deformação plástica homogênea e caracteriza a capacidade do metal celular em absorver energia, ou seja, uma maior região da curva neste estágio aumenta a capacidade de absorção. Este comportamento é exatamente igual ao das espumas poliméricas, porém, para metais celulares a tensão aplicada para este comportamento é cerca de 30 vezes maior (KAMMER, 1999). A tensão no platô pode ser estimada através de uma relação com a densidade relativa de acordo com a Equação 2.9 proposta por Ashby *et al.* (2000).

$$\sigma_{pl} \approx n_2 \sigma_e \left( \frac{\rho}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação 2.9}$$

Onde:

$\sigma_{pl}$  = Tensão no platô - *plateau stress* (MPa)

$\sigma_e$  = Limite de elasticidade (MPa)

$n_2$  = fator de correção (varia de 0,25 a 0,35)

$\rho$  = densidade do metal celular ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_s$  = densidade do metal maciço ( $\text{g/cm}^3$ )

No terceiro estágio o aumento rapidamente da tensão é causado pelo colapso das células. Este colapso é causado pelo rompimento das células, em seguida ocorre a densificação do metal celular devido ao empilhamento das células rompidas (KAMMER, 1999). A densificação pode ser estimada pela Equação 2.10 do modelo proposto por Ashby *et al.* (2000).

$$\epsilon_D \approx \left( 1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_s} \right) \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde:

$\epsilon_D$  = deformação no final do platô “*densification strain*” (pode ser apresentado em % multiplicando  $\epsilon_D$  por 100)

$\alpha_1$  = fator de correção (varia de 1,4 a 2,0 para metais celulares)

$\rho$  = densidade do metal celular ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_s$  = densidade do metal maciço ( $\text{g/cm}^3$ )

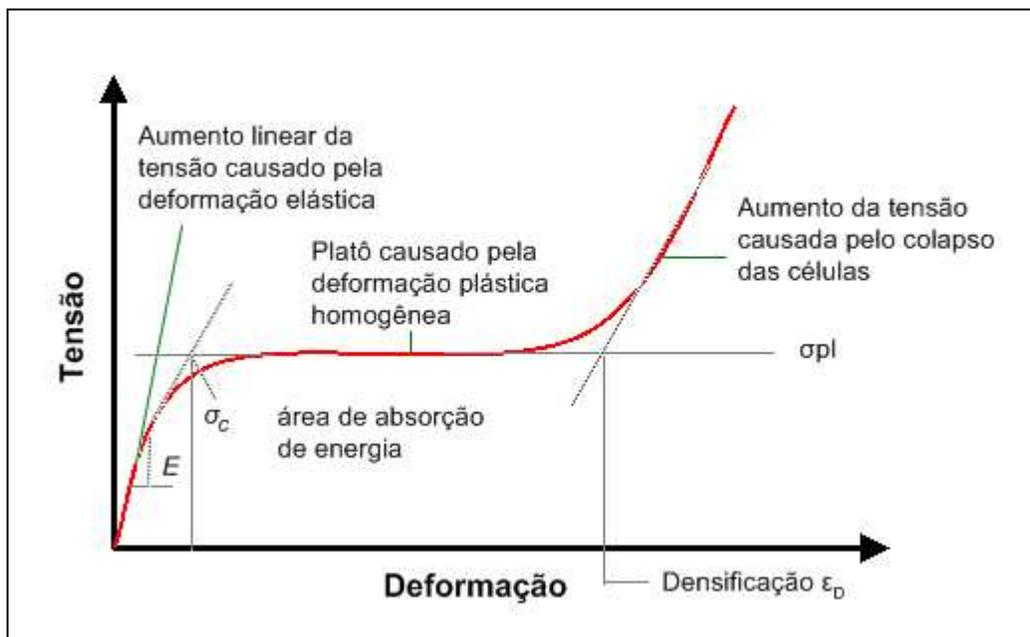


Figura 2.20: Típica curva de tensão-deformação para metais celulares em teste de compressão

(adaptado de KAMMER, 1999).

Muitos fatores podem influenciar o comportamento dos metais celulares em compressão, principalmente a densidade da espuma, arquitetura celular e a liga matriz.

- **Comportamento em impacto**

Bons absorvedores de energia devem suportar grandes deformações para um nível de tensão baixo e constante. A vantagem dos metais celular para estas aplicações, com relação às espumas poliméricas, é sua relativa baixa densidade, nível de tensão no platô ajustável e boa resistência em altas temperaturas. A energia absorvida por unidade de volume é igual a área abaixo da curva tensão-deformação e a eficiência de absorção de energia,  $\eta$ , é a relação entre a energia absorvida do material real e a energia absorvida de um absorvedor ideal, um material plástico (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

Nas altas taxas de deformação que podem ocorrer em situações de choque, as propriedades mecânicas das espumas podem ser distintas do comportamento em taxas de deformações mais convencionais. Neste caso, dois fatores devem ser considerados: a massa de inércia das arestas e paredes celulares, bem como a pressão e o fluxo do gás dentro das células, no caso de células fechadas. Ambos os efeitos podem aumentar a tensão aplicada no sistema, e por isso, o patamar de tensão, provocando um aumento da taxa de deformação. Em estruturas de células abertas nenhum aumento significativo da tensão é observado para altas taxas de deformação em situação de choque, o que sugere a ausência de contribuição desse fator na tensão resultante (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

## **2.6. Técnicas de caracterização de metais celulares – não destrutivas**

### **2.6.1. Análise de densidade**

A densidade dos metais celulares pode ser determinada pela pesagem de uma amostra com volume conhecido ou determinado pelo princípio de Arquimedes. (SONG *et al.*, 2007; DAOUD, 2007). Para a determinação do volume pelo princípio de Arquimedes para metais celulares de células abertas torna-se necessário o recobrimento da superfície para evitar a infiltração do líquido (BANHART, 2001). A densidade também pode ser determinada por análises de

picnometria a gás hélio (BOONYONGMANEERAT e DUNAND, 2008; MURRAY e DUNAND, 2006).

### 2.6.2. Tomografia computadorizada de raios-X

A tomografia computadorizada de raios-X é muito importante para determinação, através de mapeamentos internos de possíveis falhas internas de preenchimento (BANHART 2001). As imagens de uma amostra são tiradas em várias direções, pela rotação e translação da fonte e do detector em volta da amostra. Tomógrafo médico também pode ser usado para mapeamentos internos, porém os mesmos são mais limitados em tolerância de resolução. Esta baixa resolução, entretanto, é suficiente para o controle de qualidade do componente celular ou simplesmente para detectar regiões sólidas e vazias de espumas ou esponjas metálicas (MALCOMA *et al.*, 2007; MAIRE e SALVO, 2003; BANHART, 2001).

### 2.6.3. Análise térmica - condutividade

A análise térmica de um metal celular pode ser determinada pelo método de fonte plana transiente “*Transient Plane Source*”, conhecido como método TPS e apresentado na Figura 2.21.

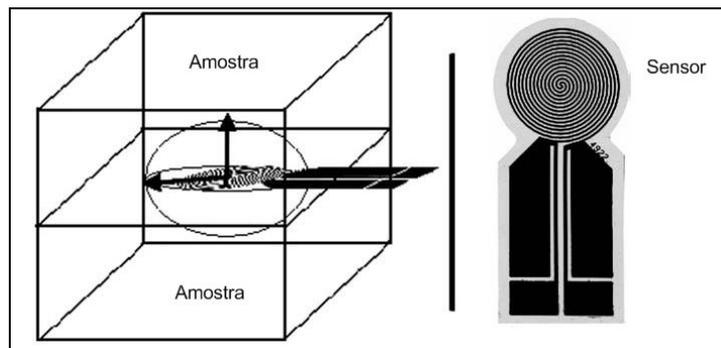


Figura 2.21: Esquema representativo do método TPS para análise térmica (SOLÓRZANO *et al.*, 2008).

Este método está sendo aplicado com sucesso para estudar as propriedades térmicas de metais celulares, incluindo materiais com baixas condutividades térmicas. No método TPS uma fonte plana de calor é utilizada. Ela se comporta como uma fonte plana transitória e trabalha simultaneamente com o sensor de temperatura que é constituído por um condutor elétrico padrão

de folha de Níquel (~10mm de espessura), sob forma de um aspiral duplo inserido entre duas camadas de isolamento feitos de poliamida. Um elemento de TPS fica localizado entre duas amostras iguais com ambas as faces do sensor em contato. Nos experimentos uma fonte de energia elétrica constante é fornecida para o sensor durante o tempo de ensaio. O valor de condutividade é obtido da relação do aumento da temperatura com a variação do sensor de resistência (SOLÓRZANO *et al.*, 2008).

Outro método para medição de condutividade térmica de metais celulares é denominado de chapas quentes controladas “*guarded-hot-plate*”, baseados na norma ASTM C1044-90 e C177; este método é apresentado na Figura 2.22.

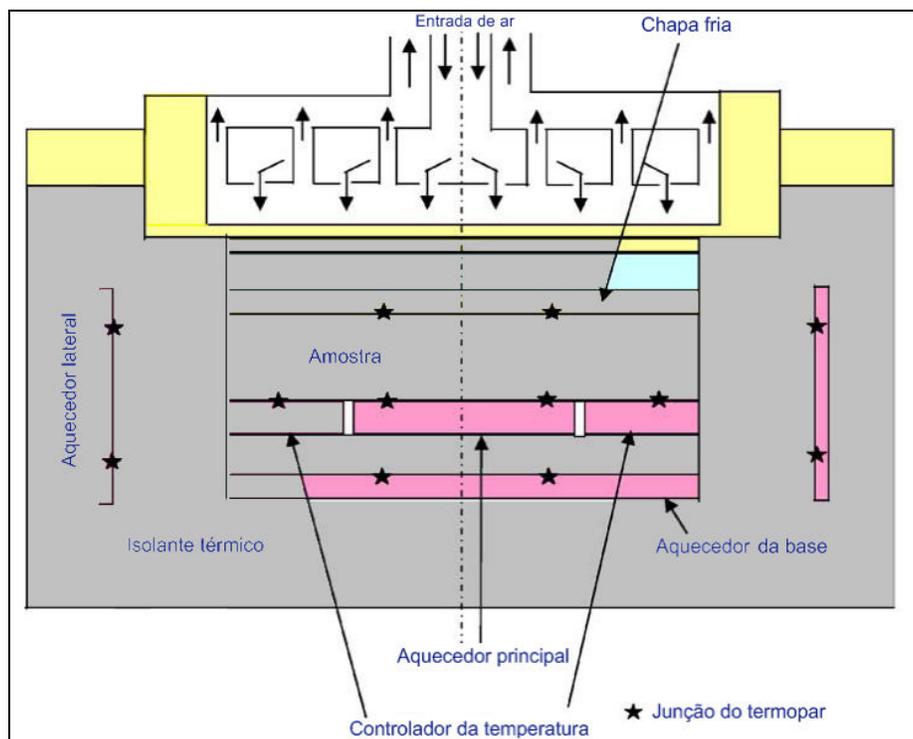


Figura 2.22: Esquema representativo do processo “*guarded-hot-plate*” para análise térmica (ZHAO *et al.*, 2004).

O equipamento para análise térmica é montado dentro de uma cabine de vácuo, para não ter influência da temperatura externa nos resultados obtidos. A amostra porosa é colocada entre um aquecedor elétrico (na base) e a placa fria (na superfície), que são mantidos em temperatura uniforme. O equipamento é isolado lateralmente por mantas térmicas, para evitar a perda de calor.

Para a medição das diferenças de temperatura são colocados termopares pela área da amostra (ZHAO *et al.*, 2008; ZHAO *et al.*, 2004).

## **2.7. Técnicas de caracterização de metais celulares – destrutivas**

### **2.7.1. Análise de imagens ópticas**

A morfologia celular e a microestrutura de metais celulares podem ser analisadas por observações ópticas em vários aumentos. A microscopia óptica, por exemplo, pode ser usada para análise da microestrutura da parede celular (dendritas, glóbulos, precipitados e inclusões), ou mesmo, para análise de poros. Para isso as amostras devem ser infiltradas por resina de cura a frio, para evitar o colapso das células, para depois passarem pela preparação metalográfica (BANHART, 2001).

### **2.7.2. Testes mecânicos**

Os testes mecânicos são indispensáveis para caracterização de materiais celulares, principalmente para aplicações estruturais. Os métodos de caracterização são, em princípio, os mesmos utilizados para outros materiais não celulares. Entretanto, algumas vezes modificações no procedimento de teste devem ser necessárias, devido, por exemplo, a fragilidade das paredes dos poros (BANHART, 2001). Os testes mecânicos podem ser classificados por um dos seguintes atributos:

- Tipo de tensão aplicada: uniaxial, biaxial, multiaxial, hidrostática. Testes uniaxiais são os mais usados para caracterização de metais celulares.
- Modo de carregamento: compressão, tensão, flexão, torção. Testes de compressão são os mais usados para caracterização de metais porosos, devido a maior facilidade de obter os espécimes e maior confiabilidade dos resultados obtidos.

## Capítulo 3

### Metodologia Experimental

Neste capítulo é apresentada a metodologia experimental adotada, assim como os materiais e equipamentos utilizados na produção e caracterização das esponjas metálicas.

#### 3.1. Liga utilizada

A liga utilizada para a fabricação de esponjas foi a liga de alumínio AA2011, pertencente à série 2XXX (ligas trabalhadas); sua composição química básica de acordo com o Metals Handbook (MURRAY, 1985) é Al – 5,5% em peso de Cu. Para seleção desta liga foram levados em conta os seguintes critérios:

1. Apresenta um intervalo de temperaturas entre as linhas *solidus* e *liquidus* em torno de 120°C; este intervalo, razoavelmente amplo, facilita o controle dos parâmetros operacionais durante o processamento da liga no estado semi-sólido;
2. Apresenta fases de fácil identificação, o que permite uma melhor caracterização metalúrgica do produto;
3. Apresenta boa resposta ao tratamento térmico de solubilização e envelhecimento, possibilitando assim, a melhoria de suas propriedades mecânicas;
4. Ampla utilização comercial, principalmente na indústria automobilística, por apresentar boas propriedades mecânicas após tratamento térmico.

A liga utilizada foi adquirida no mercado na forma de barras extrudadas com diâmetro de 44,5mm.

### 3.1.1. Composição da liga

A composição química da liga utilizada foi determinada por espectrometria de emissão atômica (AES); esta análise foi realizada pela empresa Alcoa do Brasil. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Composição química da liga AA2011 (% em peso) utilizada no trabalho.

Elemento	Cu	Bi	Fe	Si	Mn	Zn	Cr	B	Al
%	5,29	0,47	0,39	0,27	0,02	0,08	0,01	~0,001	Balanço (~93%)

### 3.1.2. Diagrama de fases

A Figura 3.1 apresenta o diagrama de fases do sistema Al-Cu com destaque para a liga utilizada.

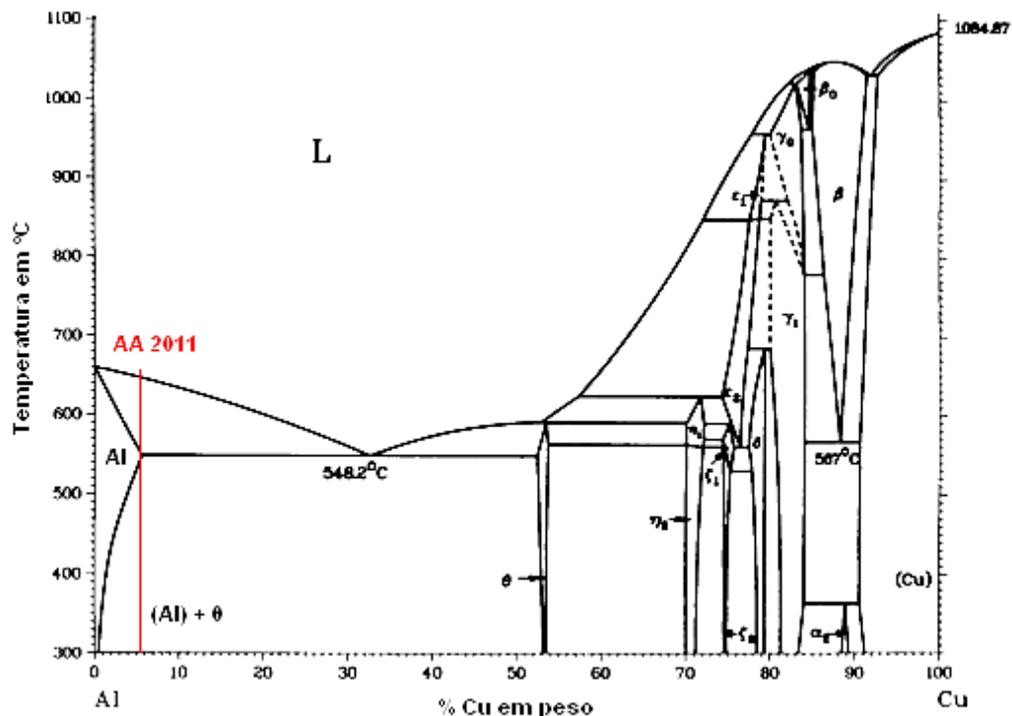


Figura 3.1: Diagrama de fases Al-Cu. Destaque em vermelho da composição da liga AA 2011 – 5,29% em peso Cu (MURRAY, 1985).

### 3.1.3. Intervalo de solidificação

A determinação do intervalo de temperaturas entre as linhas *liquidus* e *solidus* é fundamental para definição dos parâmetros de processamento no estado semi-sólido, ou seja, para a obtenção da pasta com estrutura globular utilizada na fabricação das esponjas metálicas. Para determinação deste intervalo, foram registradas as curvas de resfriamento e aquecimento durante a solidificação da liga AA2011 através do ensaio de calorimetria exploratória diferencial (DSC).

Este ensaio foi realizado em um equipamento da marca NETZSCH modelo STA 409C, com uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto e resfriamento até a temperatura ambiente, com taxa de resfriamento análoga.

Este ensaio resulta num gráfico da variação da energia com a temperatura, apresentando os picos de liberação de energia nas temperaturas onde ocorrem as transformações de fases. A partir destas curvas é possível a determinação da temperatura de início e final de uma transformação específica, e também de sua evolução, isto é da % de transformação ocorrida para uma determinada temperatura, entre a temperatura inicial (início de pico) e final (final do pico). Assim, é possível a determinação da variação da fração líquida em função da temperatura em uma transformação sólido-líquido. Para a liga em estudo foi obtida, a partir das curvas de DSC e uso de *software* dedicado, a curva de variação  $f_l \times T$ , apresentada na Figura 3.2. A partir desta curva pôde-se determinar os valores da  $T_{liquidus}$  (100% líquido) como igual a 658°C e  $T_{solidus}$  (100% sólido) como igual a 538°C e, portanto, o intervalo de solidificação da liga ( $T_l - T_s$ ), como sendo 120°C.

O intervalo de solidificação apresentado mostrou-se bastante amplo, propício para o tratamento térmico de fusão parcial controlada (FPC). Um amplo intervalo de solidificação permite uma maior flexibilidade e controle de parâmetros de tixoconformação.

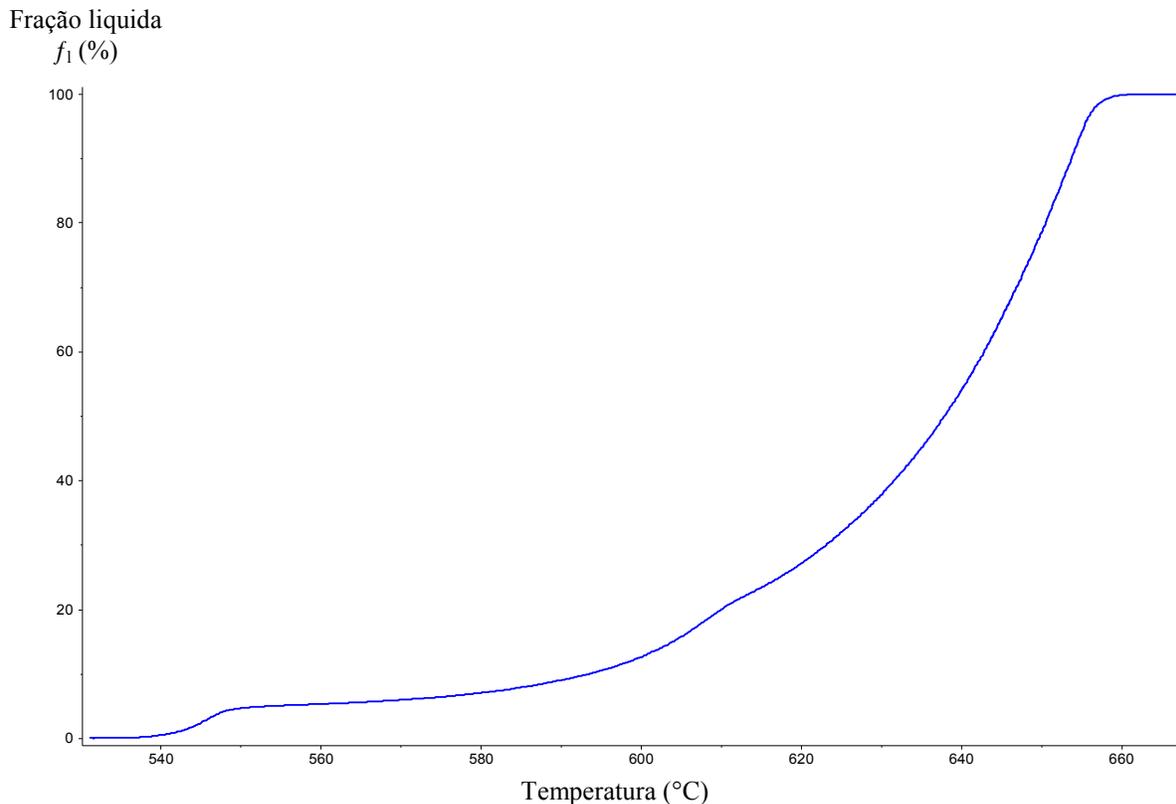


Figura 3.2: Curva de variação da fração líquida em função da temperatura para a liga AA2011, obtida a partir dos testes de calorimetria exploratória diferencial.

### 3.1.4. Caracterização microestrutural

A microestrutura da liga AA2011 foi analisada por microscopia óptica (MO) no seu estado como recebido, ou seja, extrudado. As características da microestrutura original são importantes para definição dos parâmetros do processo de tixofundição; por exemplo, uma microestrutura refinada necessita de tempos mais curtos a uma temperatura superior à  $T_{solidus}$  para a ocorrência da globularização, quando comparada com microestruturas mais grosseiras. Deve-se levar em conta que tempos longos podem levar ao crescimento excessivo dos glóbulos da pasta tixotrópica. O preparo das amostras foi realizado com o corte da barra extrudada no sentido transversal. Após o corte as amostras foram embutidas em baquelite e lixadas com lixas de carboneto de silício (granulometrias 180, 220, 320, 400, 600, 800, 1200), utilizando água como lubrificante. Na troca de lixas, as amostras foram lavadas com água e sabão e rotacionadas 90°. Ao término do lixamento as amostras foram lavadas em água e sabão e submetidas à limpeza em

solução aquosa e uso de vibração por 1 minuto. O polimento foi realizado em pano apropriado com pasta de diamante de 6,0 $\mu\text{m}$  e 1,0 $\mu\text{m}$  até a eliminação dos riscos.

Para a revelação da microestrutura foi empregada a solução de ataque químico KELLER (1% de ácido fluorídrico (HF), 1,5% de ácido clorídrico (HCl), 2,5% de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e 95% de água destilada (H<sub>2</sub>O)), durante ~20 segundos. As imagens por MO foram feitas utilizando um microscópio óptico LEICA, modelo DM ILM e digitalizadas através do software residente LEICA QWIN. A Figura 3.3 apresenta a microestrutura da liga AA2011 utilizada no processo de fabricação de esponjas. Esta microestrutura se apresenta não dendrítica com pequenos grãos quase equiaxiais, isto acontece devido à ocorrência de recristalização durante o processo de extrusão. No interior da fase primária  $\alpha$  pode se observar a presença de precipitados da fase  $\theta$  (CuAl<sub>2</sub>), formados por precipitação no estado sólido, durante o resfriamento após extrusão. Os grãos desta microestrutura apresentam tamanhos reduzidos, com diâmetro médio de 13,2 $\pm$ 1,9 $\mu\text{m}$ , tendo algumas variações crescentes na direção central da amostras; isto acontece devido ao regime térmico no processo de conformação, onde o interior tende a resfriar mais lentamente, ocorrendo um maior crescimento dos grãos recristalizados.

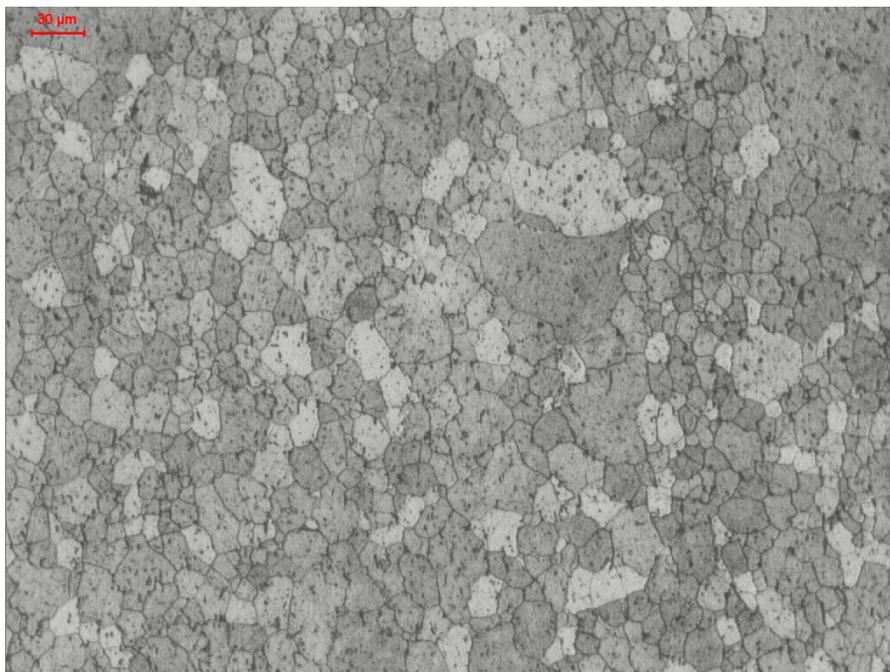


Figura 3.3: Microestrutura da liga AA2011 utilizada no processo de fabricação de esponjas metálica.

## **3.2. Agente bloqueador**

Para o processo de fabricação de esponjas metálicas foi utilizado como agente bloqueador NaCl (cloreto de sódio iodado) comum, adquirido no mercado. As partículas de sal foram utilizadas para a fabricação de pré-formas porosas para infiltração do metal no estado semi-sólido. Após solidificação total do metal a pré-forma foi removida originando os poros do produto (esponja).

### **3.2.1. Classificação granulométrica**

As partículas do agente bloqueador utilizado foram classificadas e separadas em 3 grupos de valores. Para esta classificação, utilizou-se um jogo de peneiras rotativas do fabricante IGV, com malhas de seleção de partículas dos seguintes tamanhos: 3,15mm, 1,6mm, 1,0mm, 0,63mm, 0,4mm, 0,315mm, 0,2mm, 0,16mm, 0,1mm, 0,071mm e 0,063mm. O ensaio foi realizado por um tempo de 120 segundos. Após o ensaio, o sal foi separado em porções com três faixas granulométricas:

1. Fina ( $\phi_1$ ) – partículas com diâmetro entre 1,0mm e 1,6mm;
2. Média ( $\phi_2$ ) – partículas com diâmetro entre 1,6mm e 3,15mm;
3. Grosseira ( $\phi_3$ ) – partículas com diâmetro maior que 3,15mm.

Estas partículas de NaCl foram utilizadas para a fabricação de pré-formas para infiltração da liga AA2011 no estado tixotrópico.

### **3.2.2. Produção de pré-formas porosas**

Pré-formas porosas do agente bloqueador NaCl foram produzidas em diferentes condições: a partir de partículas de sal soltas ou submetidas a aquecimento para sinterização. No primeiro caso, grãos de NaCl foram posicionados livremente, sem qualquer grau de compactação, no interior do molde apropriado para a infiltração do metal semi-sólido. Pré-formas de grãos finos, médios e grosseiros foram infiltradas conforme procedimento descrito no item 3.3.3.

No segundo caso, grãos de NaCl foram dispostos no interior de um molde de aço SAE 1045, de diâmetro de 45mm, submetidos à compactação em prensa com capacidade máxima de 300kN e em seguida submetidos a aquecimento em forno tipo mufla, em diferentes condições de temperatura e tempo. Em todos os casos foram utilizadas somente partículas de sal de granulometria fina. A Tabela 3.2 apresenta as diferentes condições utilizadas para a fabricação de pré-formas porosas do agente bloqueador.

Tabela 3.2: Condições utilizadas para fabricação de pré-formas porosas de NaCl

Condição	Granulometria	Peso do sal (g)	Pré-carga (kN)	T sinterização (°C)	t sinterização (min)
1	Grosseira	38	-	-	-
2	Média	38	-	-	-
3	Fina	38	-	-	-
4	Fina	45	-	750	60
5	Fina	45	3	750	60
6	Fina	45	3	770	120
7	Fina	45	5	785	210

Para fabricação de pré-formas sinterizadas, utilizou-se uma massa maior de partículas de sal devido à compactação e alguma evaporação que ocorre durante o processo de sinterização. Os detalhes do ferramental, da prensa e módulo de aquisição de força usados são apresentados nos itens 3.3.1 e 3.3.2. As amostras submetidas à sinterização nas condições 4, 5 e 6 não apresentaram resistência suficiente ao manuseio. Somente o conjunto de parâmetros dado pela condição 7 resultou em pré-formas coesas, com suficiente resistência ao manuseio. A Figura 3.4 apresenta o aspecto geral da pré-forma obtida por sinterização nestas condições.

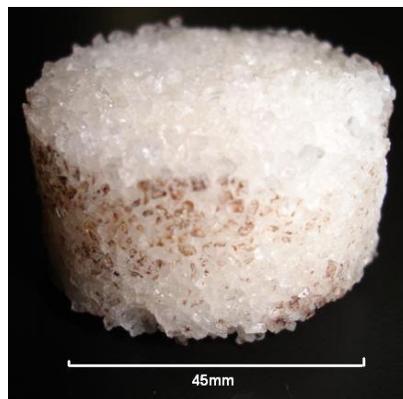
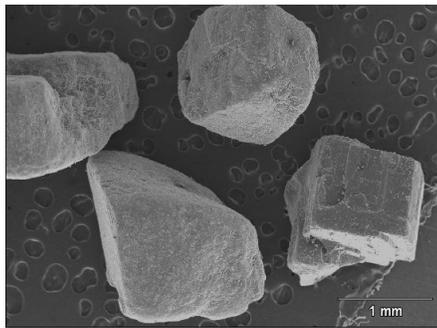


Figura 3.4: Aspecto geral de uma típica pré-forma de partículas de NaCl sinterizadas. Condições de sinterização: pré-carga 5kN, T sinterização 785°C, t sinterização 210min.

### 3.2.3. Morfologia das partículas

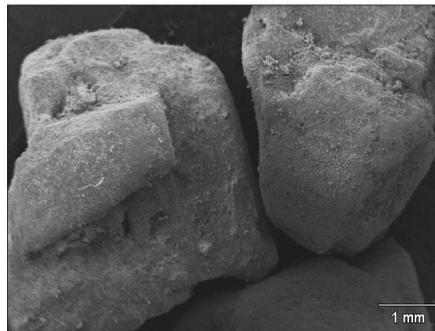
A caracterização da morfologia das partículas de NaCl foi realizada na condição sinterizada (granulometria fina), para verificação da efetivação do processo de sinterização através do “empescoamento” das partículas, e na condição não sinterizada (granulometrias fina, média e grosseira), para verificação de formas e dimensões. A caracterização da morfologia das partículas foi realizada através de imagens por MEV; para obtenção dessas imagens foi utilizado microscópio da marca JEOL, modelo JXA 840-A, com baixos valores de aumento. A Figura 3.5 apresenta morfologia das partículas de sal solto de granulometria fina, média e grosseira. Pode-se notar em (a) que as partículas de granulometria fina apresentam formas retangular e triangular, com arestas inclinadas e não regulares; em (b) as partículas de granulometria média apresentam arestas mais planas com geometria predominantemente retangular; em (c) as partículas grosseiras apresentam uma geometria predominantemente retangular com arestas planas não regulares.



(a) fina



(b) média



(c) grosseira

Figura 3.5: Fotos (MEV) das partículas de NaCl não sinterizadas de diferentes granulometrias, (a) fina; (b) média; (c) grosseira.

A morfologia das partículas do agente bloqueador sinterizado é apresentada na Figura 3.6. Pode-se notar na Figura 3.6 (a) que as partículas apresentam formas retangular e triangular com arestas inclinadas não regulares e são agrupadas formando um aglomerado. Nas Figuras (a e b) pode ser visto claramente a ligação entre as partículas de NaCl devido ao processo de sinterização.

Goodall *et al.* (2006) explica que o mecanismo principal de sinterização das partículas de NaCl é a evaporação de material da superfície das partículas e sua posterior condensação na área de contato entre as partículas, ocorrendo dessa forma a união das mesmas.

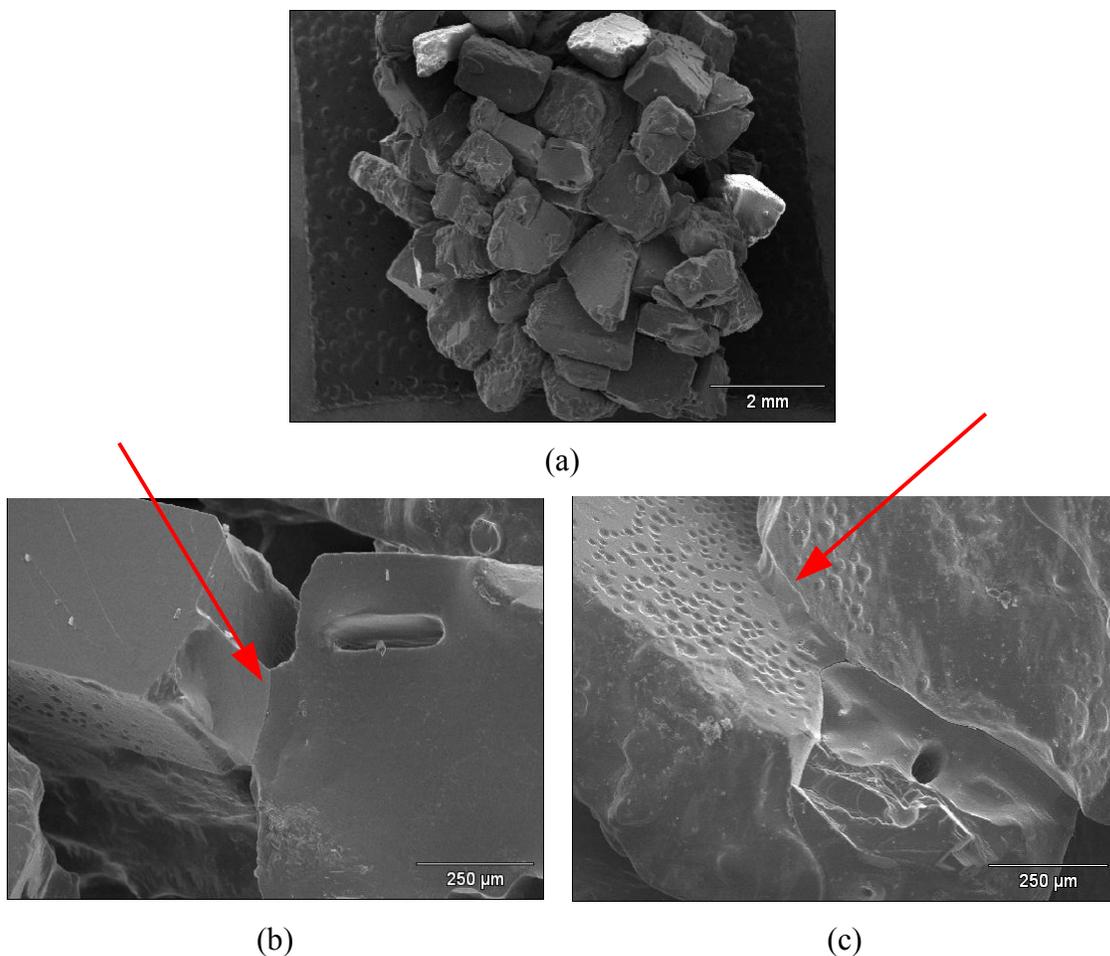


Figura 3.6: Fotos (MEV) das partículas de NaCl sinterizadas. (a) MEV das partículas aglomeradas; (b) e (c) detalhe do “empescoamento” das partículas de sal.

### 3.3. Produção de esponjas metálicas por tixoconformação

#### 3.3.1. Equipamentos utilizados

Os ensaios de tixoconformação foram realizados com os seguintes equipamentos: prensa equipada com sistema de aquisição de dados, para monitoramento de força e temperatura; forno resistivo posicionado na mesa da prensa e ferramental para tixoforjamento (matriz). O sistema utilizado é apresentado na Figura 3.7.

O mesmo equipamento foi utilizado para a fabricação de pré-formas de NaCl compactadas e sinterizadas.



Figura 3.7: Equipamentos utilizados no processo de fabricação das esponjas metálicas. (1) célula de carga; (2) forno resistivo; (3) prensa hidráulica; (4) microcomputador; (5) indicador de temperatura; (6) controlador de aquecimento do forno; (7) indicador de pesagem; (8) placa de aquisição de dados.

A seguir são descritos, de maneira mais detalhada, os diferentes componentes do sistema de tixoforjamento.

- Prensa hidráulica, com capacidade de carga máxima de 300kN, dotada de uma mesa com regulagem de altura, um manômetro com precisão de  $5 \times 10^{-3}$  Pa e avanço do punção de 2,5mm/s;
- Forno resistivo circular, em chapa de aço inox com espessura de 1,5mm, com 2,5kW de potência máxima, diâmetro externo de 480mm e altura de 215mm. Para controle da temperatura do forno foi utilizado termopar tipo K ligado a controlador microprocessado da marca OMRON. O forno é móvel, podendo ser colocado e retirado da mesa da prensa. O mesmo foi utilizado para aquecimento da amostra de metal a ser tixoforjado, até a temperatura necessária para obtenção da pasta semi-sólida e para aquecimento da matriz de tixoforjamento. Todo ferramental e amostra foram aquecidos simultaneamente, para evitar perda de calor no metal e, portanto, perda de sua fluidez por resfriamento, caso tivesse que ser transportado para o posicionamento no molde.
- Módulo de aquisição de dados (monitoramento da força de conformação) constituído de célula de carga, módulo indicador transmissor de pesagem, cartão conversor analógico/digital (A/D) e computador com software apropriado para leitura e processamento de dados. A célula de carga utilizada, modelo W da ALFA Instrumentos, foi ligada ao indicador de transmissão de pesagem modelo 3103, também da ALFA Instrumentos, destinado à leitura direta da força e ao fornecimento da saída analógica. A placa de aquisição de dados utilizada é do tipo AQB11/12, para instalação em computadores com *slot* do tipo ISA de 16 bits. Para o processamento dos dados foi utilizado o software FORJA, da T&S Equipamentos Eletrônicos. O controle da temperatura da liga durante o processo foi realizado através de termopar tipo K ligado a indicador de temperatura da AUTONICS, modelo T4WM. A aquisição dos dados de temperatura foi realizada através de termopar tipo K ligado à placa de aquisição de dados AQB11/12. O processamento da temperatura foi, analogamente aos dados de força, feito através do software FORJA, da T&S Equipamentos Eletrônicos.

### 3.3.2. Ferramental empregado no tixoforjamento

O ferramental (matrizes e acessórios) utilizado para a produção de esponjas, consta das partes: punção, pinça, matriz ou molde propriamente dito, base, prolongador e assento. Todos os desenhos foram criados através do software PRO/ENGINEER WILDFIRE 3.0; a Figura 3.8 apresenta uma vista explodida da montagem do ferramental para tixoconformação.

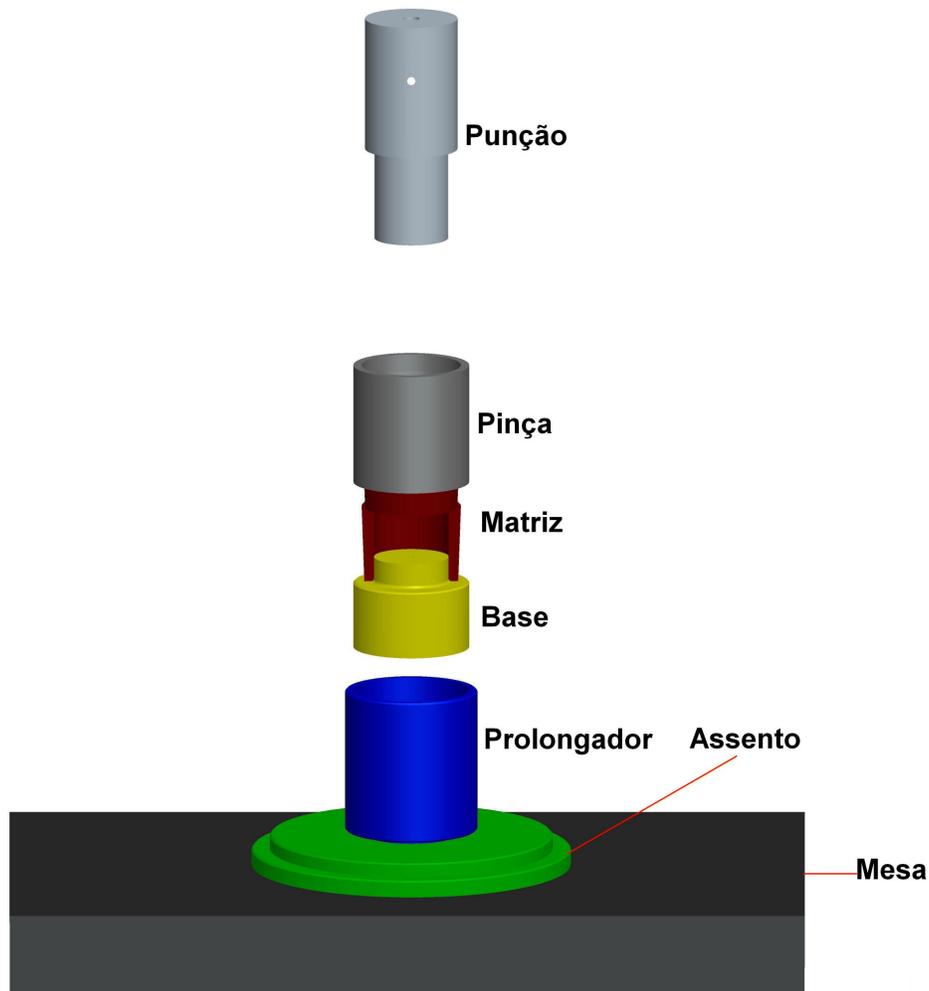


Figura 3.8: Desenho do ferramental utilizado no processo de tixofundição – vista explodida.

A seguir são apresentados desenhos, com mais detalhes, de todas as peças do ferramental usadas no processo de fabricação. Punção, pinça, matriz e base também foram utilizados para a confecção de pré-formas sinterizadas de partículas de sal. Todo ferramental foi usinado a partir

do aço H13 (aço para trabalho a quente), submetido aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento duplo a vácuo.

A Figura 3.9 apresenta desenho do punção utilizado para o tixoforjamento, enquanto a pinça, matriz, base de apoio, prolongador e assento são apresentados nas Figuras 3.10 a 3.14.

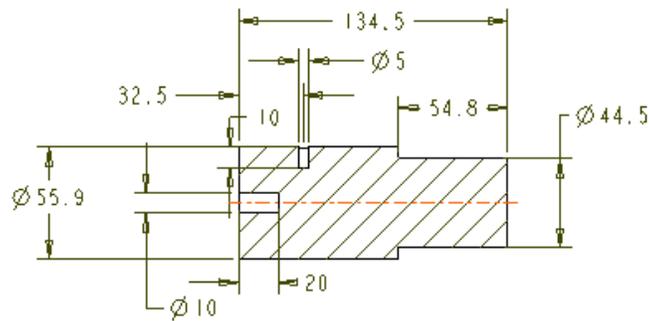


Figura 3.9: Desenho do punção para o tixoforjamento

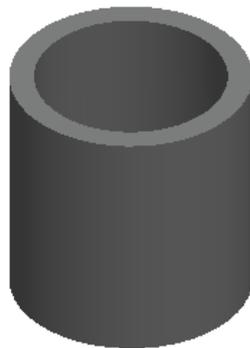
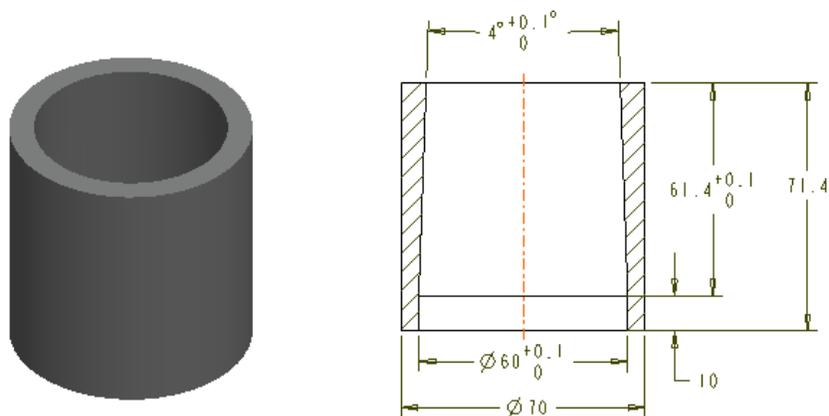


Figura 3.10: Desenho da pinça para o tixoforjamento

A pinça foi projetada com 4° de conicidade, a fim de facilitar a saída da matriz. A matriz de geometria cilíndrica foi projetada e construída em duas partes (bi-partida), para facilitar a saída da esponja metálica produzida.

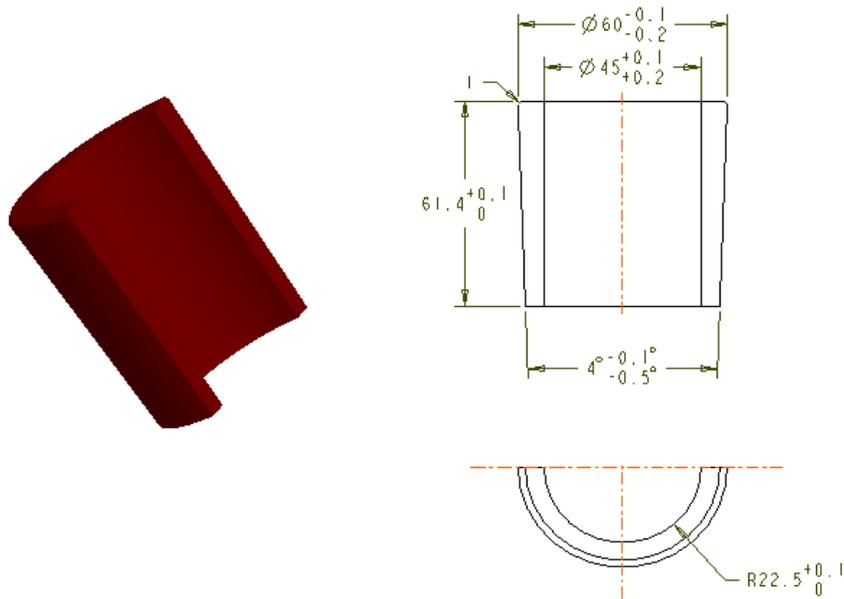


Figura 3.11: Desenho da matriz para o tixoforjamento

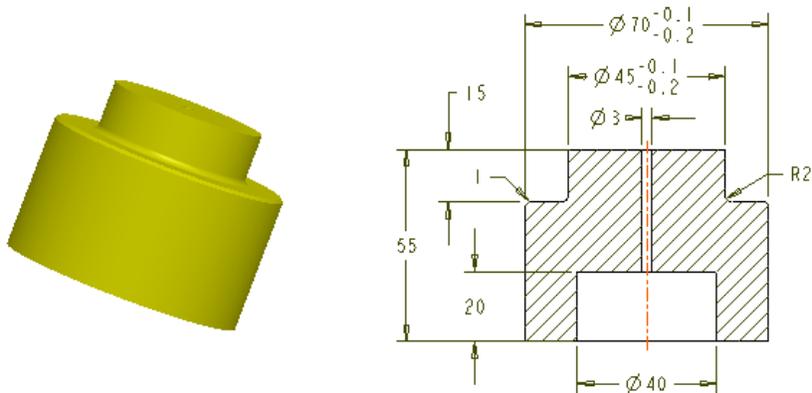


Figura 3.12: Desenho da base de apoio para o tixoforjamento

O prolongador foi projetado para otimizar o tempo de ensaio, pois aumenta a altura do conjunto ferramental - amostra em relação à base do forno, possibilitando a sua localização na região mais quente da câmara interna do forno.

O assento foi projetado para fixação do conjunto (prolongador, base, matriz e pinça), na base da prensa, com o objetivo de evitar seu deslocamento quando submetido à aplicação de força.

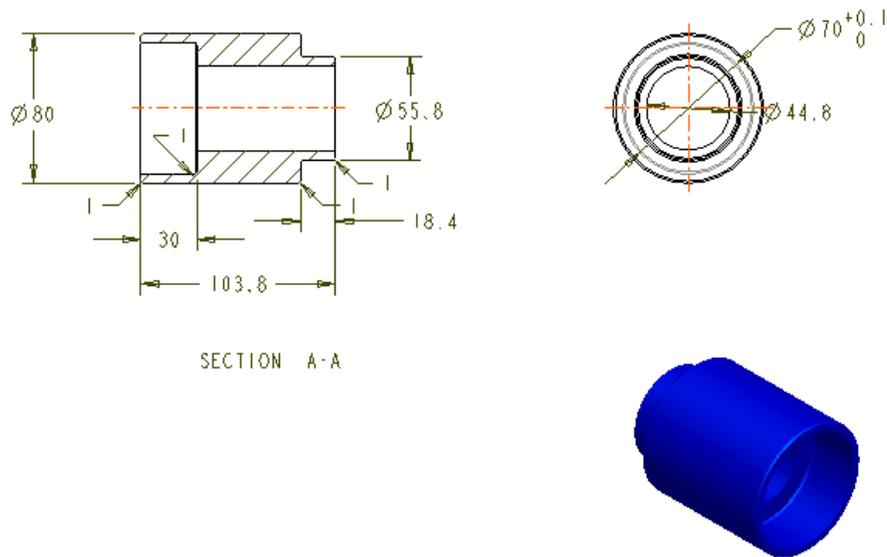


Figura 3.13: Desenho do prolongador para o tixoforjamento

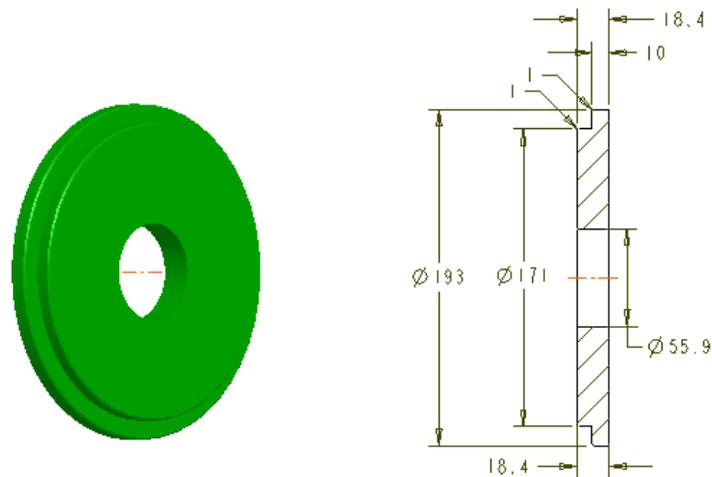


Figura 3.14: Desenho do assento para o tixoforjamento

### 3.3.3. Procedimento padrão para o tixoforjamento

Inicialmente a barra extrudada da liga AA2011 adquirida no mercado foi usinada e cortada, para a obtenção de discos de dimensões 43,5mm de diâmetro por 10mm ou 6mm de espessura.

Num procedimento padrão de infiltração das pré-formas para a produção de cilindros porosos (esponjas da liga de Al), o disco de 6mm de espessura foi posicionado na base da matriz, sobre ele foi colocado a pré-forma do agente bloqueador em seguida sobre a pré-forma foi posicionado o disco com 10mm de espessura.

Todo o ferramental foi posicionado no interior do forno e fixado pelo assento na mesa da prensa. Dois termopares de controle (tipo K) foram inseridos, um próximo à resistência do forno, para controle da sua temperatura, e o outro no disco metálico superior, para controle da temperatura de tixoforjamento. O termopar de controle da temperatura do disco metálico foi conectado ao sistema de aquisição de dados, para construção de curvas Txt e monitoramento do processo. Na Figura 3.15 é apresentado o esquema de montagem do ensaio de tixoforjamento. Nessa figura pode ser visto com detalhes o posicionamento dos termopares, dos discos sólidos da liga de Al, do agente bloqueador (NaCl) e do ferramental.

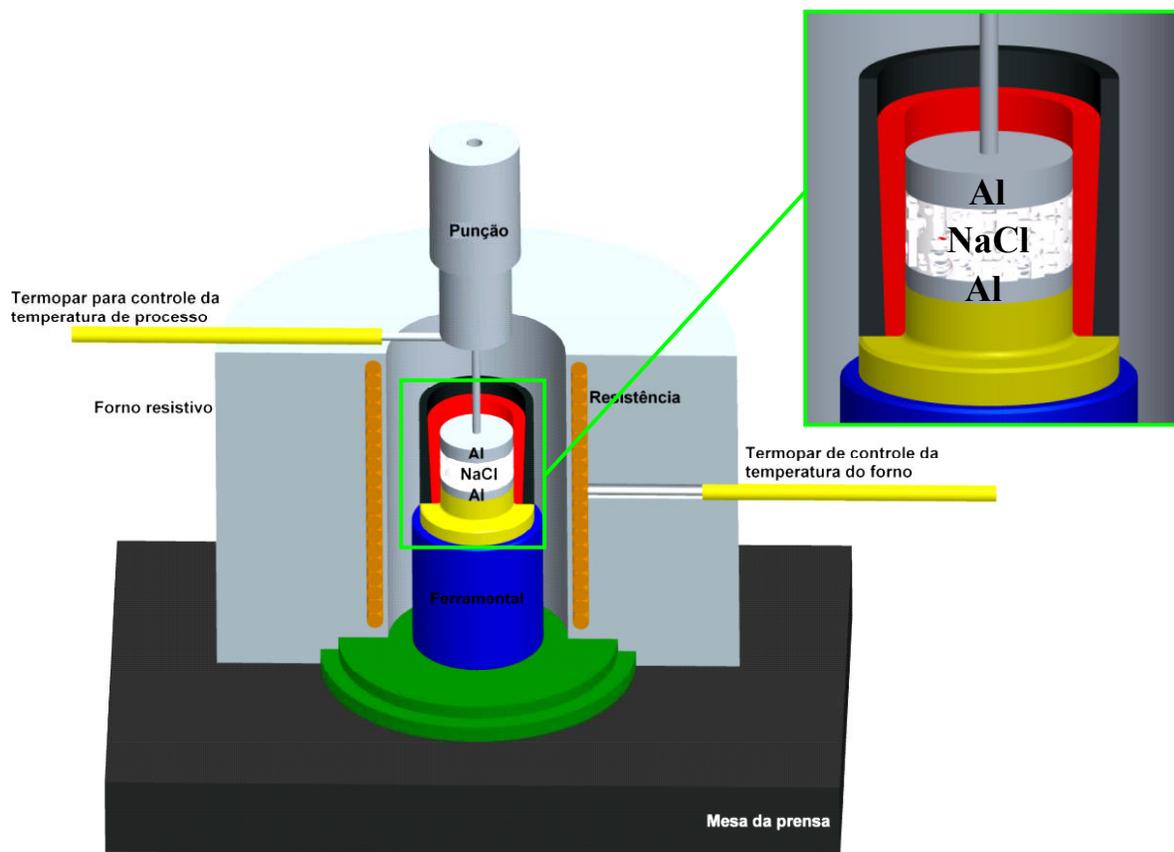


Figura 3.15: Esquema ilustrativo do processo de tixoforjamento para produção de esponjas metálicas.

Após a montagem do ensaio, o ferramental, os discos sólidos da liga de Al e a pré-forma de agente bloqueador foram aquecidos à temperatura de 640°C, entre as temperaturas *solidus/liquidus*, para a promoção da modificação da sua estrutura inicial (extrudada) para globular. O método de globularização da estrutura utilizado foi a fusão parcial controlada (FPC), que consiste basicamente na manutenção da liga a temperaturas no interior da zona pastosa por um tempo adequado. Após o disco superior atingir a temperatura de 640°C, este foi mantido por um tempo de 4 minutos para garantir a completa globularização da fase primária da pasta e a homogeneização da temperatura; ao término dos 4 minutos foi retirado o termopar superior e acionada a prensa com o avanço do punção a uma velocidade de 2,5mm/s. A força aplicada foi monitorada com o uso da célula de carga e sistema de aquisição de dados, em uma frequência de aquisição de 4Hz e em um total de 300 pontos.

O final de curso do punção foi determinado por uma marcação na régua da prensa, com intuito de se obter materiais celulares do tipo “sanduiche” com ~25mm de espessura, isto é, com a parte porosa “encapsulada” entre 2 camadas da liga maciça. Posteriormente a camada porosa foi extraída para caracterização das suas propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas.

Ao término do processo de tixoforjamento o ferramental foi desmontado para remoção do material celular. O produto obtido apresentou dimensões de ~44,5mm de diâmetro, espessura total de ~25mm e espessura da camada porosa de ~18mm.

#### **3.3.4. Parâmetros variados no processo de tixoforjamento**

Os parâmetros variados no processo de tixoforjamento foram: a granulometria do agente bloqueador (fina, média e grosseira) sem sinterização e na condição de pré-sinterizado para granulometria fina. A temperatura de processo foi mantida constante e igual a 640°C, portanto, a fração líquida existente na pasta tixofundida foi a mesma em todos os ensaios. O tempo de permanência da amostra nesta temperatura foi estabelecido em 4 minutos, que permitiu a obtenção de fase primária na pasta tixotrópica, de dimensões semelhantes para todos os ensaios. Segundo Delbin (2006) estes parâmetros selecionados de temperatura e tempo são os que proporcionaram melhor infiltração da liga no agente bloqueador, dessa forma conduzindo à obtenção de melhores produtos finais.

Os ensaios foram repetidos 7 amostras em cada condição, no caso de uso de agentes bloqueadores não sinterizados, e 4 no caso do o uso de pré-formas sinterizadas na melhor condição de sinterização pré-estabelecida.

A Figura 3.16 apresenta fluxograma das etapas de fabricação das esponjas metálicas. Para um melhor entendimento foram adotadas as letras F, M, G e FS para as amostras obtidas a partir de pré-formas de partículas soltas de granulometria fina, média, grosseira e a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas, respectivamente.

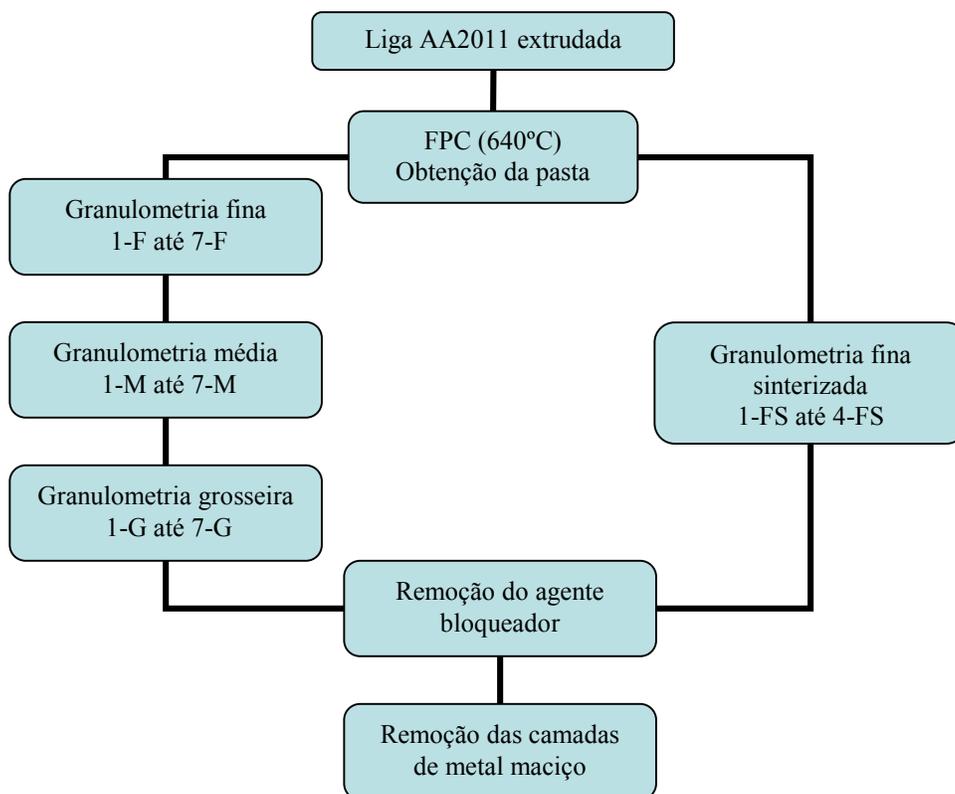


Figura 3.16: Fluxograma referente à etapa de fabricação e preparação das amostras para testes.

### 3.4. Remoção do agente bloqueador

Como explicado anteriormente, as esponjas metálicas devem possuir células abertas e interconectadas. Neste processo de fabricação o agente bloqueador foi o responsável pela arquitetura dos poros, tornando-se necessário a sua remoção do interior do produto final. Para a remoção do sal, o material celular foi colocado em banho com água à temperatura de 100°C

durante 2 horas, com a mesma sendo trocada a cada 20 minutos. Após este tempo o material foi submetido a um banho em água à temperatura ambiente, sendo agitada em ultra-som por 4 horas, com troca da água a cada 10 minutos. Em seguida o material foi aquecido a 150°C para evaporação da água para evitar sua oxidação.

### **3.5. Remoção das camadas maciças**

O produto final obtido do processo consiste em esponja tipo “sanduíche”, ou seja, uma camada porosa entre duas camadas metálicas maciças. Para caracterização das propriedades físicas, mecânicas e metalúrgicas desse material, tornou-se necessária à remoção das camadas maciças, que foi realizada através de dois cortes transversais, o primeiro na interface superior e o outro na interface inferior da amostra. Para realização dos cortes foi utilizada máquina de corte da marca BUEHLER, modelo ISOMET 2000, equipada com disco de corte abrasivo para materiais não ferrosos da marca BUEHLER, modelo 11-4217-010. A velocidade do disco de corte utilizada foi de 2000rpm com força de corte de 150g. Estes parâmetros adotados visaram evitar qualquer tipo de dano na estrutura celular da esponja; ao término do processo de corte foi obtida uma esponja metálica com dimensões de ~44,5mm de diâmetro e ~13,5mm de espessura.

### **3.6. Métodos de caracterização das propriedades das esponjas metálicas produzidas**

As esponjas metálicas produzidas foram submetidas a diversos métodos de caracterização de propriedades; os principais objetivos desta caracterização foram:

- Quantificar e qualificar a arquitetura celular;
- Determinar a densidade real e relativa;
- Observar o comportamento mecânico desse material submetido a ensaio dinâmico e semi-estático, e a influência da densidade e da arquitetura celular nesse comportamento;
- Estimar teoricamente o comportamento térmico em função da densidade relativa.

A Figura 3.17 apresenta fluxograma das etapas de caracterização das esponjas.

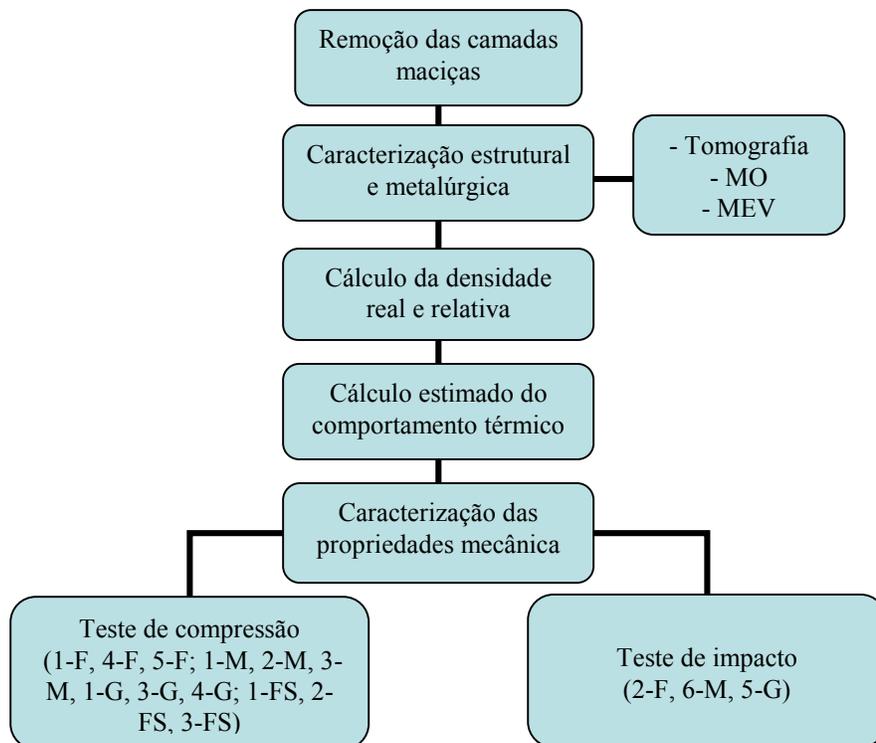


Figura 3.17: Fluxograma referente à etapa de caracterização das amostras.

### 3.6.1. Caracterização estrutural

A caracterização estrutural foi realizada visando avaliar e analisar um conjunto de características das esponjas metálicas, tais como: dimensões, distribuição e homogeneidade das células, interconexão dos vazios, comprimento e espessura da parede celular. Todas estas características definem a arquitetura celular e o comportamento físico e mecânico da esponja.

A caracterização da arquitetura celular foi realizada qualitativamente e quantitativamente. Para análise qualitativa foi utilizado um tomógrafo helicoidal, da fabricante ELSCINT, modelo HELICAT FLASH, apresentado na Figura 3.18. Com o uso do tomógrafo foi possível mapear todo o volume da amostra, para verificação da interconexão das células e distribuição da porosidade, através de 13 imagens de cortes seqüenciais distantes 1mm entre si. Este ensaio foi repetido 6 vezes para amostras fabricadas por pré-formas de partículas soltas e 3 vezes para amostras fabricadas por pré-formas sinterizadas. Os ensaios foram gentilmente feitos pelo Departamento de Ciências Médicas do HC-UNICAMP.

Para análise quantitativa as amostras foram cortadas transversalmente (equipamento e parâmetros de corte citados no item 3.5) e infiltradas com resina de cura a frio para preparo metalográfico e observação em microscópio óptico com pequenos valores de aumento. Com esta análise foi possível avaliar as dimensões das células e da parede celular com auxílio do *software* de edição de imagens ImageJ 1.40g.

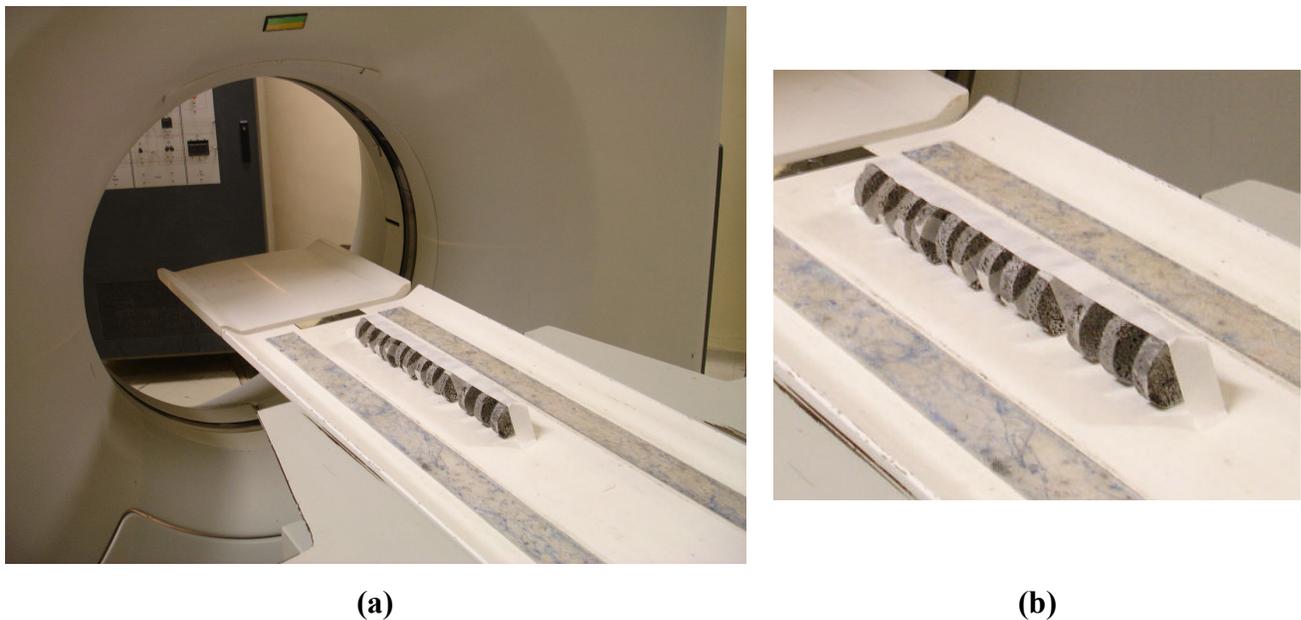


Figura 3.18: Foto de tomógrafo helicoidal utilizado e disposição das amostras; (a) foto geral; (b) detalhe do posicionamento das amostras no tomógrafo.

### 3.6.2. Caracterização metalúrgica – análise microestrutural

As paredes metálicas das células das esponjas obtidas tiveram sua microestrutura analisada por microscopia óptica. Para tanto, as amostras foram primeiramente seccionadas, conforme procedimento descrito no item 3.5, e infiltradas com resina de cura a frio. A preparação metalográfica, o ataque químico e a descrição dos equipamentos utilizados para análise de MO foram apresentados no item 3.1.4.

### 3.6.3. Caracterização física - densidade

Para o cálculo das densidades real e relativa todas as amostras tiveram suas dimensões características (diâmetro e altura) medidas com paquímetro digital de precisão de 0,01mm. Em

seguida as amostras foram pesadas em uma balança digital com precisão de 0,001g. Todas as medidas e pesagens foram repetidas três vezes.

Os valores médios dos volumes e pesos foram utilizados para o cálculo da densidade real  $\rho_r$ , segunda Equação 2.1, e da densidade relativa  $\rho/\rho_s$ , segundo a Equação 2.2. Para o cálculo da densidade relativa foi adotado o valor de 2,82g/cm<sup>3</sup> para a densidade da liga AA2011 (BRAY, 1992).

#### **3.6.4. Estimativa de comportamento térmico**

Como apresentado no Capítulo 2, as propriedades térmicas dos metais celulares tais como: ponto de fusão, calor específico e coeficiente de expansão térmica, apresentam valores semelhantes aos do material maciço que os originaram. Por outro lado, a condutividade térmica  $\lambda$ , a condutividade térmica normalizada  $\lambda/\lambda_s$  e difusividade térmica  $a$  são características de comportamento térmico que se diferenciam no material celular, com relação ao metal maciço. Ashby et al. (2000) propõem equações que relacionam estas propriedades em um material celular com o seu equivalente maciço. Estas equações apresentadas no Capítulo 2 (Equações 2.3, 2.4, 2.5) foram utilizadas para estimar as propriedades térmicas das esponjas produzidas.

#### **3.6.5. Caracterização mecânica - testes de compressão (semi-estático)**

As amostras obtidas foram submetidas a ensaios de compressão uniaxial semi-estático em máquina universal de ensaios MTS modelo 810 com capacidade de carga de 100kN. As condições de ensaio foram: taxa de avanço de 0,1mm/s e deformação de 50%. O ensaio foi repetido 3 vezes para todas as condições de fabricação (pré-forma de partículas finas, médias, grosseiras e finas sinterizadas).

A Figura 3.19 apresenta o conjunto equipamento/amostra preparado para o ensaio de compressão.



(a)

(b)

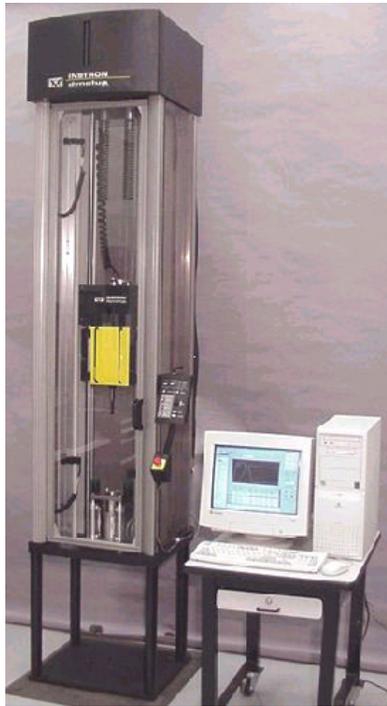
Figura 3.19: Máquina universal de ensaios MTS preparada para o ensaio de compressão das esponjas produzidas; (a) vista geral; (b) detalhe da amostra durante o ensaio.

Com estes ensaios foram obtidas curvas típicas de tensão-deformação; a região inicial dessa curva (regime elástico) permite a determinação do módulo de elasticidade ou módulo de Young. Ashby et al. (2000) estimou os valores do módulo de elasticidade de materiais celulares através de equações que relacionam sua densidade com o módulo de elasticidade da liga maciça, como indicada pela Equação 2.7. Além disso, com a curva tensão-deformação foi possível determinar a tensão de compressão  $\sigma_c$ , tensão no platô  $\sigma_{pl}$  e deformação no final do platô  $\epsilon_D$ , quando se acentua a densificação; os valores de módulo de Young, tensão no platô e deformação final podem ser estimados pelas Equações 2.7, 2.9, 2.10. Foram avaliados os valores destas propriedades obtidos na prática, com os valores calculados a partir das equações propostas por Ashby (2000).

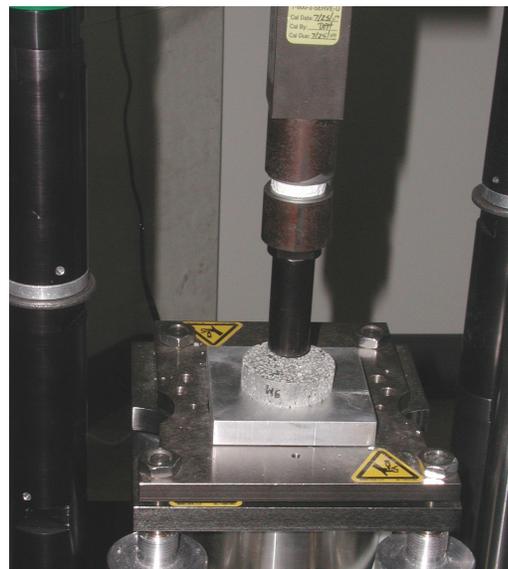
### 3.6.6. Caracterização mecânica - testes de impacto (dinâmico)

As amostras de esponjas produzidas também foram submetidas a testes de impacto dinâmico tipo *drop test*. Os ensaios de impacto foram realizados na empresa Instron World Headquarters nos EUA. Para estes ensaios, realizado 1 vez para amostras fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de distintas granulometrias (fina, média e grosseira), foi utilizada

uma máquina de teste de impacto Dynatup, modelo 9250HV, com controlador de impulso e *software* de aquisição dados, conforme apresentado na Figura 3.20. Este ensaio foi realizado com velocidade de 4,30m/s e massa de impacto de 13,6kg, estes parâmetros de teste resultaram em uma energia de impacto de ~125,6J. Foram obtidas curvas dinâmicas de carga-tempo; foram determinadas a carga máxima, energia absorvida até carga máxima, energia absorvida total, deformação para máxima carga e deformação total.



(a)



(b)

Figura 3.20: Máquina de teste de impacto dinâmico, tipo drop test; (a) vista geral; (b) detalhe da amostra antes do ensaio.

## **Capítulo 4**

### **Resultados e discussão**

O trabalho trata da investigação de processo de fabricação das esponjas metálicas por tixoconformação da liga AA2011 sobre um agente bloqueador, responsável pela arquitetura celular. O agente bloqueador utilizado foi NaCl em duas condições distintas, sinterizado com partículas finas e não sinterizado com partículas finas, médias e grosseiras. A globularização da pasta tixotrópica foi promovida por tratamento térmico de FPC, que ocorreu na temperatura de 640°C por um tempo de 4 minutos. Após o término do processo de fabricação foram obtidas amostras porosas tipo “sanduíche”. As esponjas obtidas após a remoção do agente bloqueador e camadas metálicas maciças foram submetidas a diversos métodos de caracterização metalúrgica e de propriedades; os resultados da influência dos parâmetros de processo nas características estruturais e nas propriedades são apresentados a seguir.

#### **4.1. Aspectos gerais do processo**

O processo de fabricação de esponjas metálicas investigado neste trabalho é realizado com a liga AA2011 no estado semi-sólido na temperatura de 640°C. Após a estabilização da liga a esta temperatura é aplicada uma pressão para que ocorra a infiltração da pasta nos interstícios das partículas de sal. A pasta metálica se comporta como fluido não-Newtoniano, o que significa que a relação entre a tensão aplicada e o deslocamento provocado não são lineares. Na prática esta propriedade da pasta implica na possibilidade de manuseio como sólido (alta viscosidade em repouso), e processamento a reduzidas tensões (alta fluidez quando submetida a tensões). A pasta

metálica também é tixotrópica, ou seja, não sofre variação imediata da viscosidade quando a tensão aplicada é subitamente modificada.

O sucesso da infiltração da pasta metálica no agente bloqueador depende da fração líquida existente na pasta, a qual é influenciada pela temperatura de trabalho, das dimensões dos glóbulos da fase sólida presentes, os quais dependem do tempo de permanência da amostra na temperatura superior a linha *solidus*, e dos espaços entre as partículas do agente bloqueador para infiltração.

O processo envolve primeiramente, portanto, o aquecimento do material a ser tixoconformado à temperatura pré-determinada no interior da zona *solidus-liquidus* e em seguida o seu tixoforjamento sobre a pré-forma do agente bloqueador. Em seguida são apresentados os aspectos gerais relacionados ao aquecimento do metal ao estado semi-sólido e as forças empregadas para sua tixoconformação.

#### **4.1.1. Taxas de aquecimento**

Em todos os ensaios efetuados foi monitorada a variação da temperatura com o tempo para obtenção de curvas Txt e taxas de aquecimento da liga metálica até a temperatura de trabalho (640°C). O monitoramento foi feito apenas na camada metálica superior (ver Figura 3.15), já que resultados de Delbin (2006) mostraram que, nas mesmas condições de ensaio, a temperatura no disco metálico inferior não atinge a *Tsolidus* e, portanto, nenhuma transformação microestrutural relevante ocorre neste material. Sendo assim, o disco metálico inferior no arranjo para a tixoconformação, não contribui para o preenchimento dos vazios da pré-forma.

Resultados típicos obtidos para as diferentes condições de ensaio são apresentados na Figura 4.1. Pode-se observar que as curvas de aquecimento são praticamente idênticas. Em todos os casos nota-se um aquecimento lento, devido ao sistema de aquecimento resistivo utilizado, com uma taxa da ordem de 4°C/min. O tempo total para atingir a temperatura de trabalho, a partir da temperatura ambiente, foi, em todos os casos, da ordem de 155min.

Um parâmetro importante a ser considerado é o tempo de permanência da liga metálica à temperaturas superiores à *solidus*, isto é, o tempo de coexistência sólido-líquido. Este tempo

influencia tanto a complementação dos mecanismos de globularização da fase sólida da pasta como as suas dimensões e, portanto, as propriedades de escoamento da pasta metálica. No presente trabalho, o tempo de permanência no estado semi-sólido, previamente à infiltração, foi da ordem de 63min em todos os casos. Este tempo pode ser considerado adequado para a completa globularização da estrutura, mas, por outro lado, pode ocasionar crescimento não desejado dos glóbulos da pasta tixotrópica (ROVIRA, 2000).

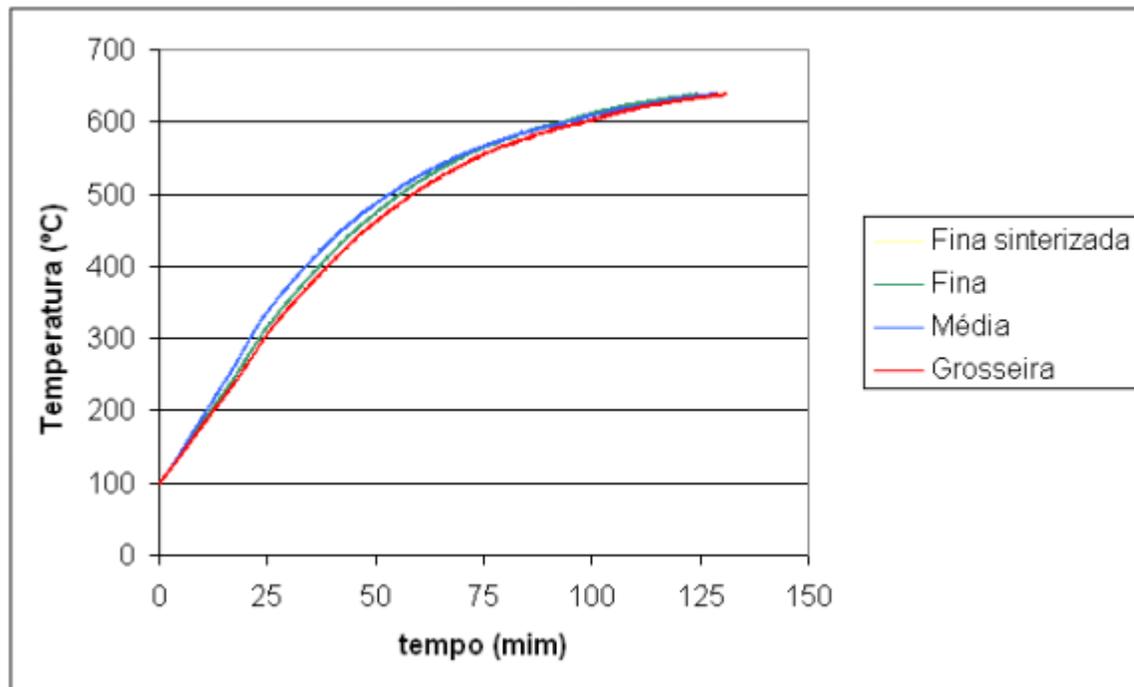


Figura 4.1: Curvas Txt durante o ensaio de tixoconformação para as 4 condições de ensaio (pré-forma sinterizada de granulometria fina, e pré-formas soltas de granulometrias fina, média e grosseira).

#### 4.1.2. Forças da tixoconformação

Em todos os ensaios de tixoconformação efetuados foi monitorada a variação da força aplicada com o tempo. Dos gráficos obtidos foram tomados os valores máximos de força requerida e efetuada a média para cada grupo de condição de ensaio empregada. Os resultados obtidos são apresentados graficamente na Figura 4.2 e numericamente na Tabela 4.1.

Na Figura 4.2 pode-se observar que as forças e pressões necessárias para efetivação do processo de infiltração não variam significativamente em função da condição da pré-forma de agente bloqueador utilizada. Assim, em todos os ensaios realizados não foi possível notar nenhuma relação clara entre as dimensões das partículas utilizadas, ou até mesmo o fato da pré-forma estar sinterizada, nas forças e pressões necessárias para a tixoconformação.

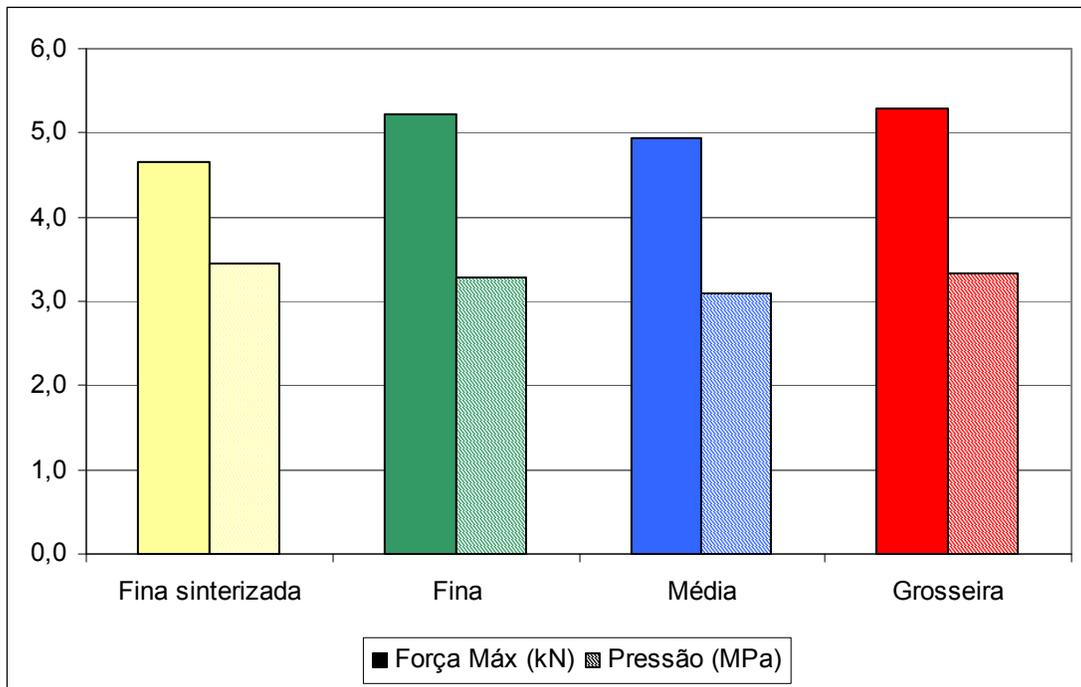


Figura 4.2: Gráfico da força máxima e pressão máxima para o processo de fabricação das esponjas metálicas, por infiltração em pré-formas em distintas condições.

Pode-se observar que os valores médios de força máxima e pressão máxima requeridos para infiltração de pré-formas nas diferentes condições testadas, são bastante reduzidos em todos os casos. Os reduzidos valores obtidos significam um importante resultado com vistas à aplicação comercial do processo, o qual, portanto, não requer equipamentos potentes e elevado consumo de energia.

Tabela 4.1: Valores de máximas força e pressão dos ensaios de tixoconformação para a produção de esponjas da liga AA2011 a partir de pré-formas de NaCl em distintas condições.

Condição da pré-forma	Força (kN)	Pressão em (MPa)
Fina sinterizada	$4,6 \pm 2,2$	$3,5 \pm 1,4$
Fina	$5,2 \pm 1,5$	$3,3 \pm 1,0$
Média	$4,9 \pm 0,8$	$3,1 \pm 0,5$
Grosseira	$5,3 \pm 0,6$	$3,3 \pm 0,4$

## 4.2. Aspectos gerais das esponjas obtidas

### 4.2.1. Aspecto das esponjas - antes da remoção das camadas metálicas maciças

A Figura 4.3 apresenta exemplos típicos de amostras celulares do tipo “sanduíche” produzidas por infiltração de pasta tixotrópica da liga AA2011 em pré-formas de grãos finos, médios e grosseiros não sinterizados, após etapa de remoção do agente bloqueador e antes do corte das camadas metálicas maciças. Quanto às amostras fabricadas com pré-formas sinterizadas de grãos finos, foi observado que não apresentaram diferenças significativas no aspecto geral, em relação às amostras fabricadas em pré-formas não sinterizadas.

Pode-se notar a presença de rebarbas na parte superior das amostras devido à folga entre o punção e a parede da matriz, atestando a alta fluidez da liga no estado semi-sólido. Em processos de tixoconformação pode ocorrer a separação do líquido da pasta metálica, na etapa de aplicação da força, provocando a sua infiltração nas regiões de folga no ferramental e a formação de rebarba no produto obtido (ROVIRA, 2000).

Todas as amostras produzidas apresentam uma interface visível entre o disco inferior da amostra e a parte porosa, evidenciando a ausência de infiltração nos agentes bloqueadores a partir do disco maciço inferior. Como comentado, a temperatura neste disco metálico é, em todas as etapas de processo, inferior à  $T_{solidus}$  da liga.

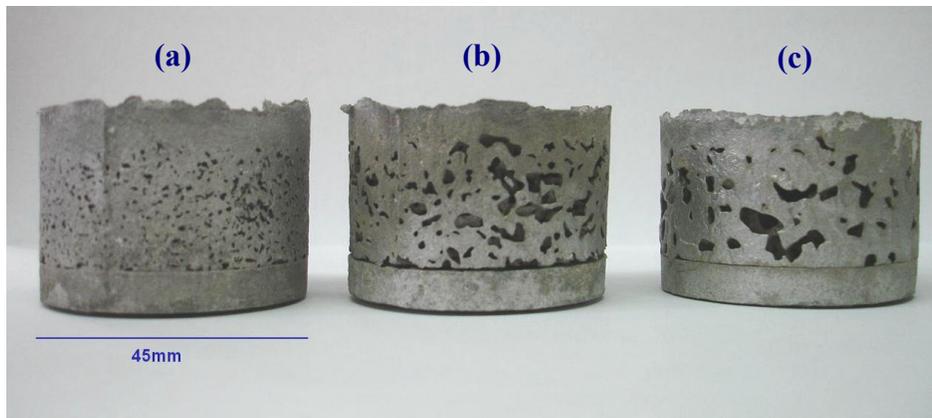


Figura 4.3: Esponjas tipo “sanduíche” produzidos por tixoconformação da liga AA2011 em pré-formas removíveis. (a) pré-forma de granulometria fina; (b) pré-forma de granulometria média; (c) pré-forma de granulometria grosseira.

De um modo geral, todas as amostras obtidas, nas diferentes condições de pré-formas utilizadas, apresentaram qualidade aceitável, sem defeitos significativos aparentes.

#### **4.2.2. Aspecto das esponjas - após remoção das camadas maciças**

A Figura 4.4 apresenta exemplos de esponjas metálicas obtidas após a remoção das camadas metálicas maciças, produzidas através de pré-formas de granulometria fina, média e grosseira, representadas pelas letras F, M e G, e por pré-formas sinterizadas de partículas finas, representadas pela letra FS. São apresentadas três amostras obtidas a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas e quatro amostras obtidas a partir de pré-formas soltas de partículas finas, médias e grosseiras, para análise da reprodutibilidade do processo.

Pode-se notar que as esponjas produzidas por pré-formas sinterizadas apresentam regiões, principalmente nas extremidades das amostras, onde não há interconexão entre as células, denotando dificuldade de infiltração da pasta metálica entre as partículas sinterizadas do agente bloqueador, devido ao aumento da área de contato entre partículas promovidas pela sinterização. Também nas extremidades de algumas amostras foi possível notar pequenos pontos fragmentados, o que pode ter ocorrido na etapa de corte, em amostras com alta fragilidade localizada. No entanto, na maior parte das superfícies observadas pode-se notar células bem

definidas e interconectadas, distribuídas homoganeamente em todas as direções e por toda área observada.

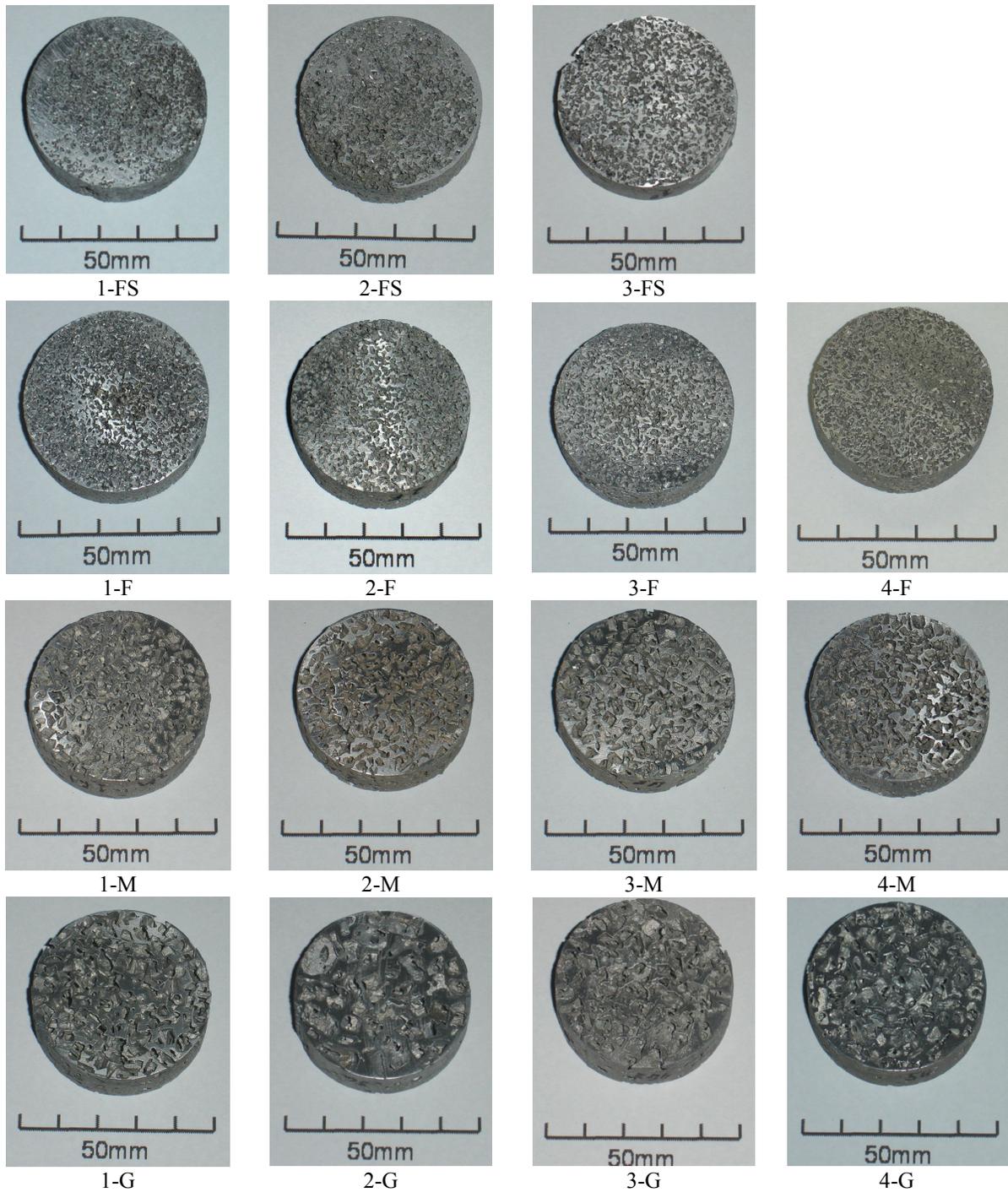


Figura 4.4: Fotos de esponjas metálicas produzidas por tixoconformação da liga AA2011 em pré-formas removíveis de diferentes condições: F= pré-formas de grãos finos, M= pré-formas de grãos médios, G= pré-formas de grãos grosseiros, FS= pré-formas sinterizadas de grãos finos.

De um modo geral as esponjas produzidas por pré-formas de sal não sinterizadas, apresentam um bom acabamento externo, com células bem definidas e interconectadas por toda a área superficial. Não há sinais de fragmentação ou qualquer outro defeito nas regiões superficial e lateral das amostras, indicando assim, a ocorrência da total infiltração da pasta metálica entre partículas do agente bloqueador.

A temperatura de tixoforjamento utilizada se mostrou adequada para a produção de esponjas metálicas, indicando assim a presença, na pasta tixotrópica, de uma fração líquida apropriada para infiltração. Esta fração líquida requer, como observado no item anterior, reduzidas forças para a infiltração, o que previne e evita que as partículas de sal soltas se densifiquem exageradamente, ou que as partículas de sal sinterizadas sofram ruptura durante o processo. Deste modo, uma adequada dispersão do agente bloqueador e, portanto, da porosidade do produto fabricado, pode ser esperada.

Segundo os aspectos gerais observados, pode-se considerar que todas as amostras produzidas por infiltração em pré-formas, em diferentes condições, apresentam qualidade aceitável e que o processo apresenta repetibilidade também aceitável.

### **4.3. Caracterização estrutural**

#### **4.3.1. Análise qualitativa da arquitetura celular por tomografia de raios-X**

Para o mapeamento interno das esponjas metálicas foram realizadas tomografias computadorizadas de raios-X de todas as amostras produzidas. Nas Figuras 4.5 a 4.8 são apresentadas as fotos das seções das esponjas metálicas produzidas nas diferentes condições de pré-formas. De modo geral pode-se observar, em todos os casos, a interconexão dos poros em todo volume das amostras, o que as caracteriza como esponjas metálicas, e também a completa remoção do agente bloqueador.

As imagens das amostras fabricadas em pré-formas de partículas finas sinterizadas são apresentadas na Figura 4.5. Pode-se observar, no caso da amostra 1-FS, uma falha de preenchimento da arquitetura celular relativamente grande, que se repete praticamente em todos

os planos analisados, indicando uma séria falha que se estende por todo o volume da amostra. No caso das amostras 2-FS e 3-FS alguns defeitos menores de preenchimento podem ser observados na periferia (amostra 3-FS) e periferia e centro (amostra 2-FS). A seguinte seqüência poderia ser considerada para caracterizar as diferenças decrescentes de qualidade observadas: 3-FS  $\rightarrow$  2-FS  $\rightarrow$  1-FS; sendo a amostra 3-FS a de melhor qualidade.

A Figura 4.6 apresenta imagens de planos paralelos obtidas para esponjas produzidas por tixoonformação sobre pré-formas de partículas finas de sal não sinterizadas. Pode-se observar pequenas falhas de preenchimento na arquitetura celular localizadas na área central dos planos de corte da amostra 1-F, e na parte superior dos planos de corte para amostra 4-F, planos 4 a 13 e 4 a 12 respectivamente. Nas amostras 3-F e 6-F pode-se observar, praticamente em todos os planos de corte, falhas muito pequenas de preenchimento dispersas em todo volume. As amostras 2-F e 5-F apresentam células distribuídas uniformemente por todo seu volume sem falhas de preenchimento. Neste caso, a seguinte seqüência de qualidade decrescente poderia ser considerada: 5-F  $\sim$  2-F  $\rightarrow$  6-F  $\rightarrow$  3-F  $\rightarrow$  4-F  $\rightarrow$  1-F. Quando comparadas as amostras produzidas por infiltração de pré-formas de partículas finas sinterizadas e não sinterizadas, pode-se observar, de modo geral, uma tendência à obtenção de melhor qualidade de preenchimento das pré-formas de partículas não sinterizadas.

A Figura 4.7 apresenta imagens dos sucessivos planos avaliados, das amostras fabricadas por infiltração em pré-formas de partículas médias não sinterizadas. Pode-se observar falhas de preenchimento nas amostras 1-M, 4-M e 5-M, na área central e na periferia dos planos de corte de 1 a 10, 3 a 13 e 1 a 9 respectivamente. As amostras 2-M, 3-M e 6-M apresentam células distribuídas uniformemente por todo seu volume, sem a ocorrência de significativas falhas de preenchimento. Neste caso, a seguinte seqüência de qualidade poderia ser considerada: 6-M  $\sim$  3-M  $\rightarrow$  2-M  $\rightarrow$  1-M  $\rightarrow$  5-M  $\rightarrow$  4-M.

A Figura 4.8 apresenta imagens de planos paralelos das amostras fabricadas por infiltração de pré-forma de partículas grosseiras não sinterizadas. Todas as amostras apresentam células distribuídas uniformemente por todo seu volume, como pode ser visto em todos os planos de corte.

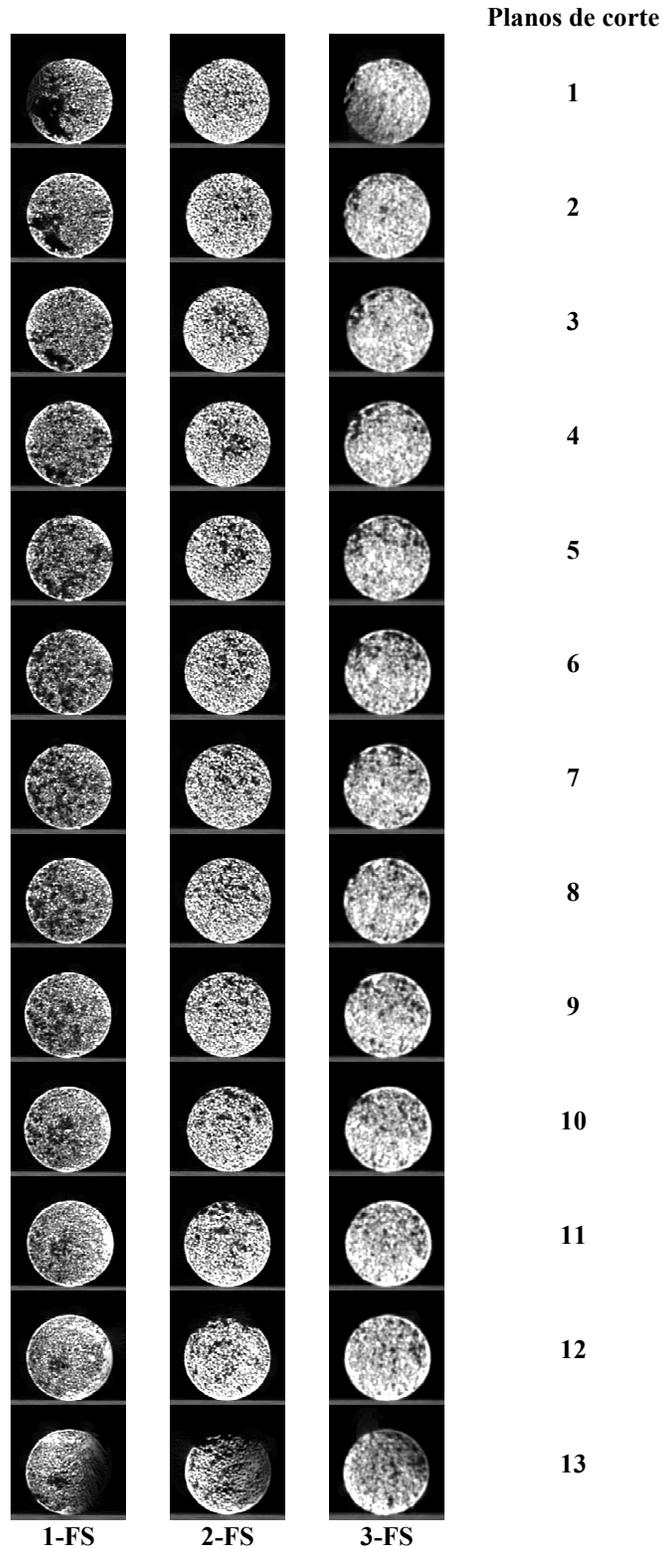


Figura 4.5: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas sinterizadas de NaCl de granulometria fina.

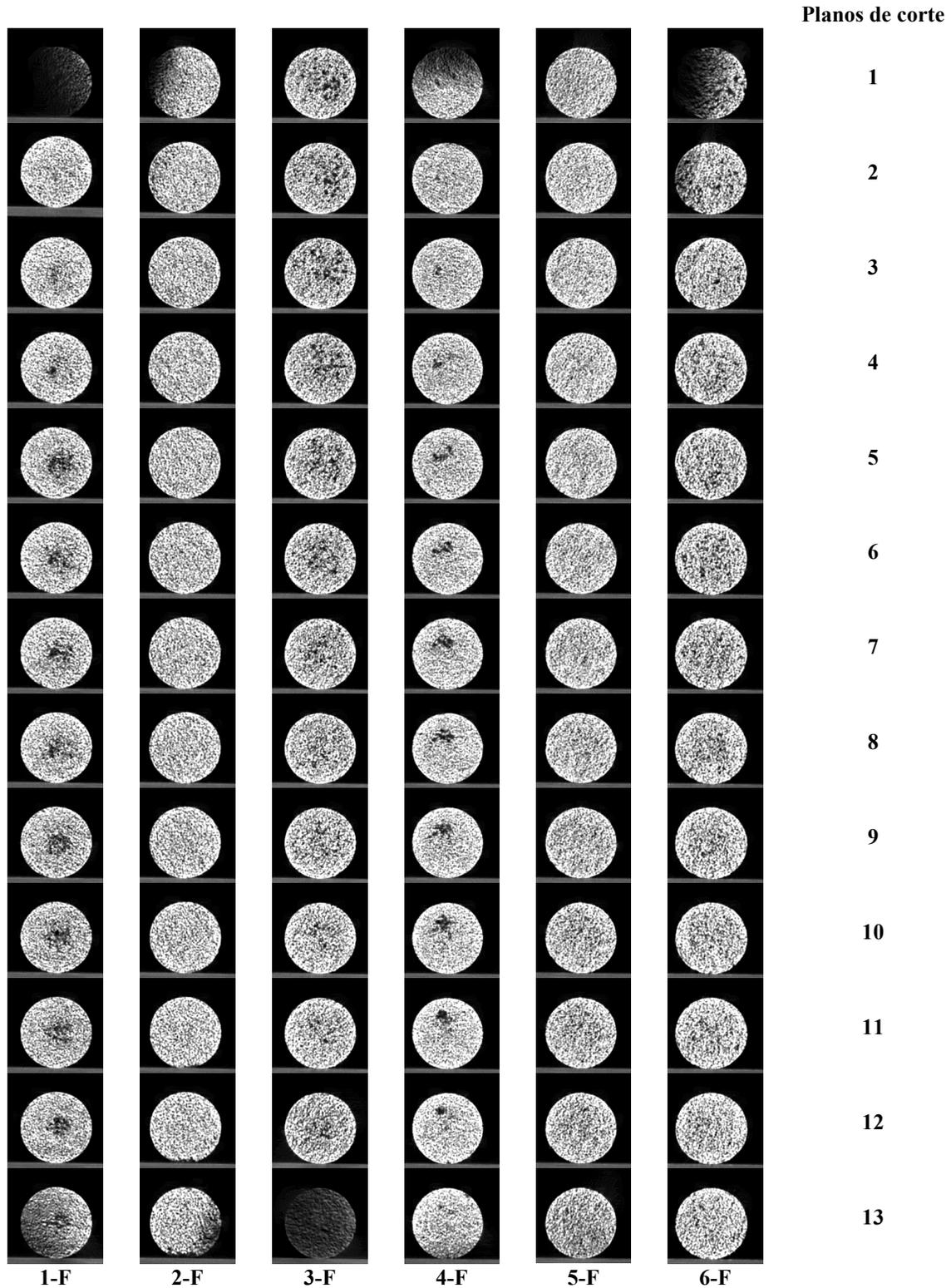


Figura 4.6: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria fina.

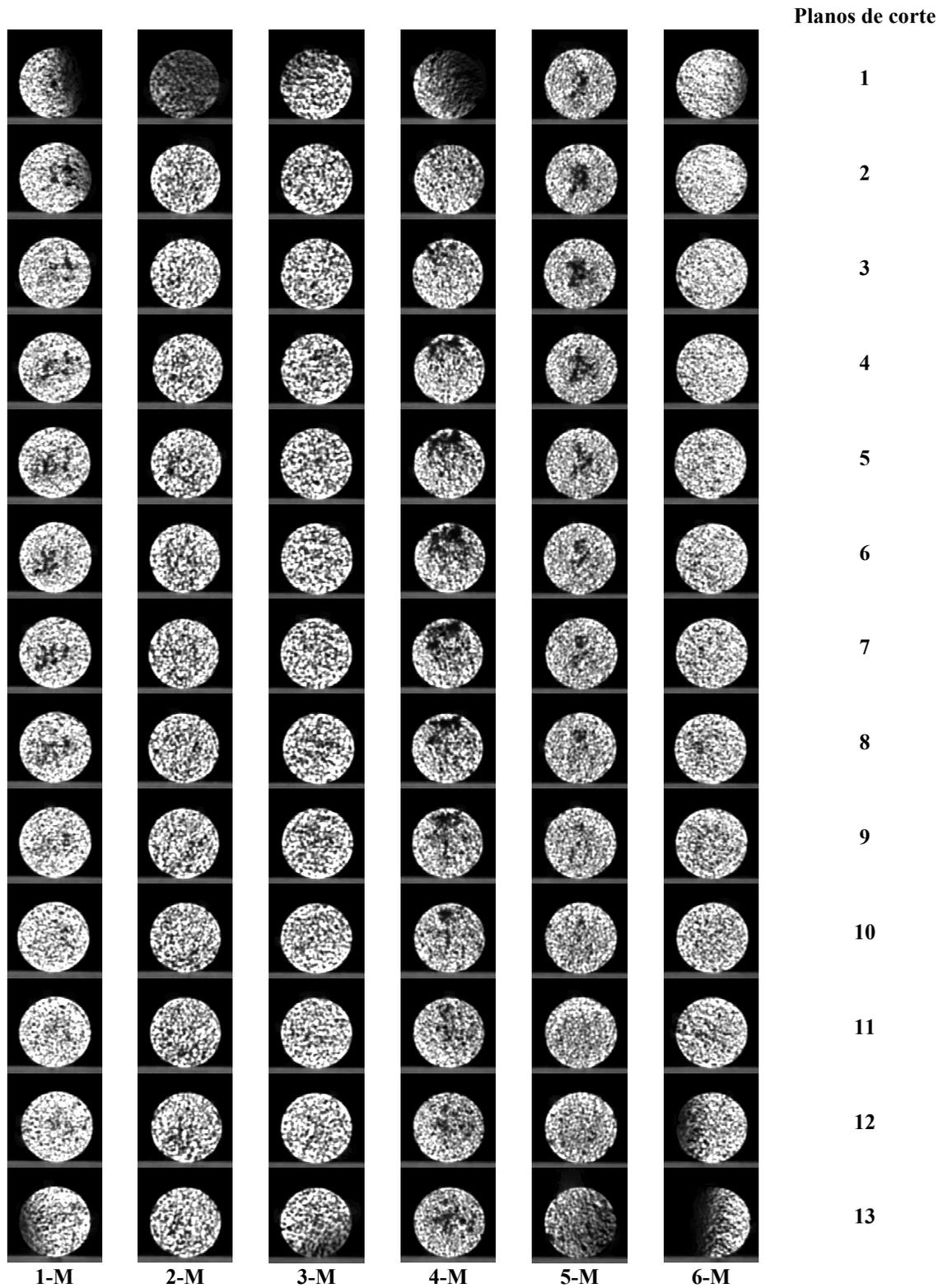


Figura 4.7: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria média.

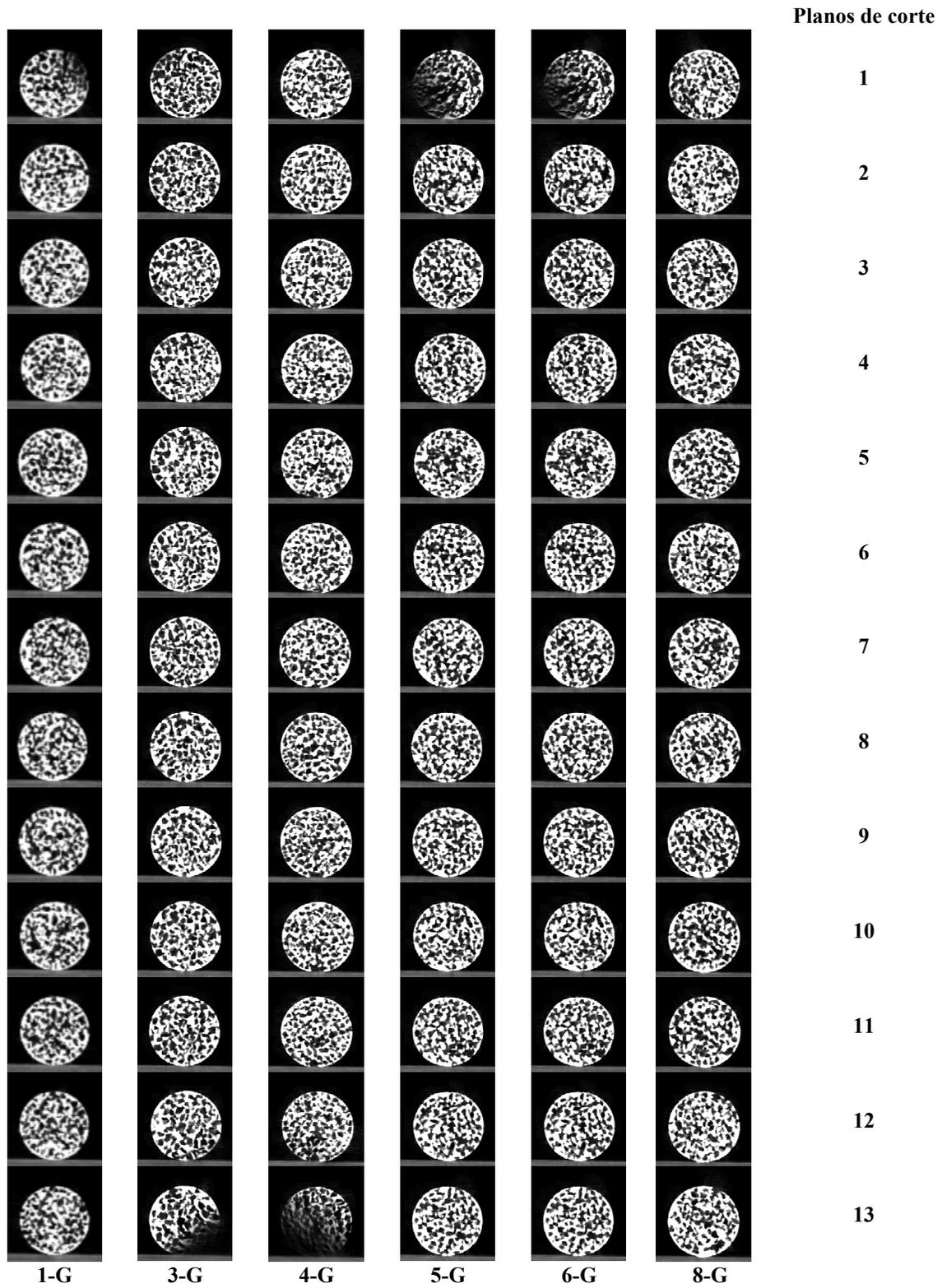


Figura 4.8: Imagens de seções paralelas, obtidas por tomografia de raios-X de esponjas metálicas fabricadas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas de partículas soltas de NaCl de granulometria grosseira.

Os resultados obtidos permitem observar que falhas de preenchimento da arquitetura celular podem ocorrer, possivelmente devido à possibilidade de compactação das partículas do agente bloqueador, no caso de pré-formas não sinterizadas, durante a etapa de tixoconformação, dificultando a infiltração da pasta tixotrópica através dos interstícios das partículas de sal. A ocorrência de uma maior área de contato entre as partículas sinterizadas também pode dificultar a infiltração da pasta, levando à formação de células excessivamente grandes, no caso de amostras fabricadas por pré-formas sinterizadas.

De uma maneira geral, os resultados mostram que a reprodutibilidade da qualidade do material celular produzido é maior no caso de maior facilidade de infiltração do metal semi-sólido, isto é, no caso de utilização de pré-formas mais porosas fabricadas com partículas de sal mais grosseiras. Neste caso, a incidência de falhas de infiltração é menos freqüente e é maior a homogeneidade da estrutura obtida.

#### **4.3.2. Análise qualitativa da arquitetura celular por MEV**

As amostras de esponjas produzidas foram também preparadas para a observação em microscópio eletrônico de varredura, para a análise da interconexão de paredes celulares. A Figura 4.9 apresenta resultados típicos representativos de amostras obtidas por infiltração da liga AA2011 em pré-formas dos diferentes tipos analisados.

Pode-se observar para todos os casos, a interconexão dos vazios, o que garantiu a total remoção das partículas do agente bloqueador. Também se pode notar claramente que as células formadas apresentam geometria compatível com a geometria das partículas de NaCl da pré-forma, ou seja, poligonal. Quanto às dimensões dos poros, pode-se observar o seu valor crescente com o aumento das dimensões das partículas de NaCl empregadas na pré-forma. Pode-se notar, no entanto, a presença de poros de menores e de maiores dimensões que os valores mínimos e máximos das partículas individuais de NaCl consideradas. As células de maiores dimensões das amostras podem ser formadas principalmente por compactação das partículas soltas de sal, ou por uma grande área de união das partículas de sal sinterizadas que dificultam a infiltração da pasta tixotrópica. Já as células de menores dimensões das amostras podem ser formadas por quebra das partículas de sal durante a tixoconformação.

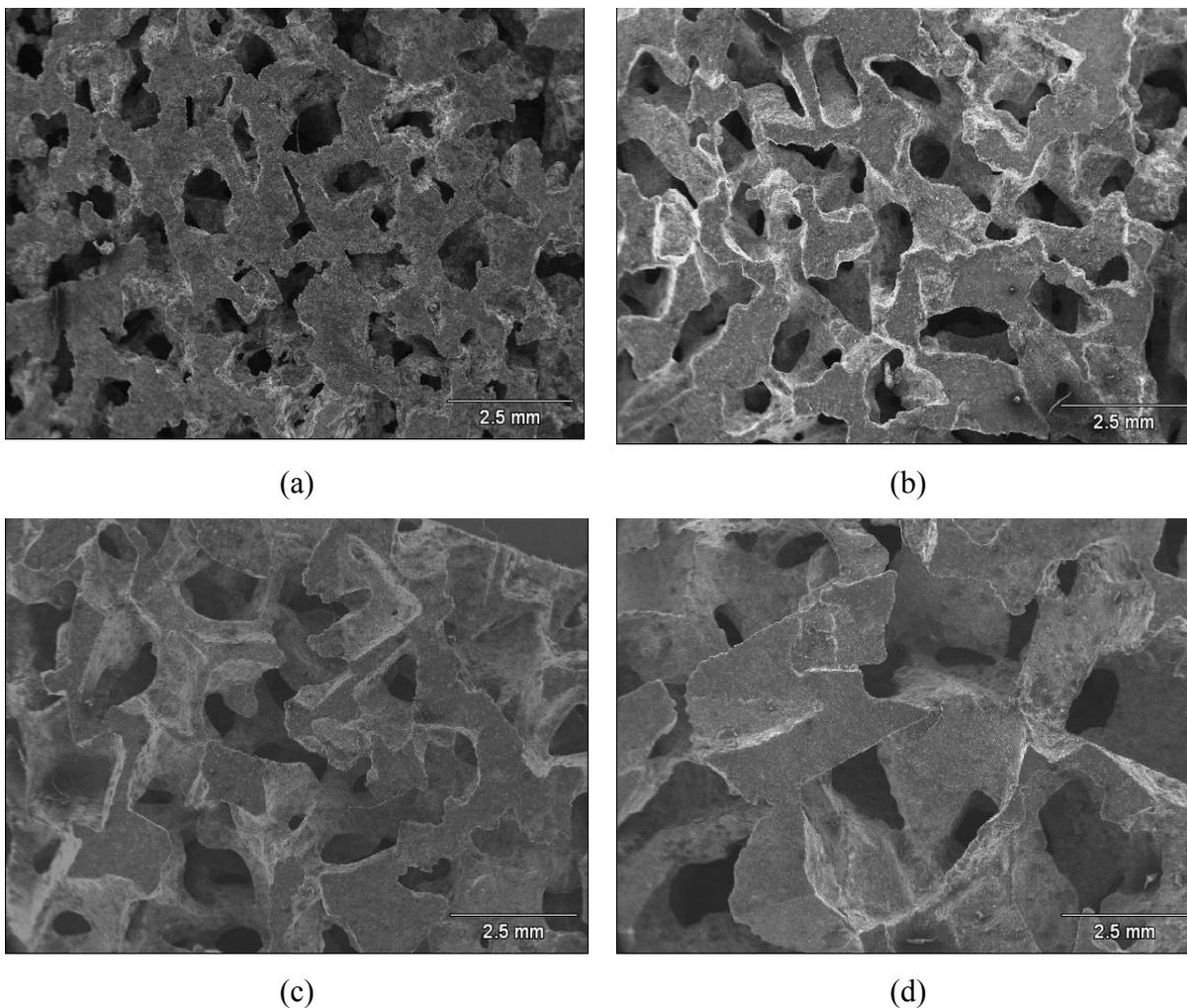


Figura 4.9: Imagens obtidas por MEV de seções longitudinais das esponjas metálicas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas de NaCl em diferentes condições: (a) partículas finas sinterizadas; (b) partículas finas não sinterizadas; (c) partículas médias não sinterizadas; (d) partículas grosseiras não sinterizadas.

Pode-se ainda observar que a espessura da parede celular não é uniforme em nenhum dos casos, isto é, o espaço vazio entre as partículas do agente bloqueador para a penetração da pasta semi-sólida não é uniforme, resultando em paredes metálicas com espessuras variáveis, com maiores valores para o caso do uso de pré-formas de partículas mais grosseiras.

### 4.3.3. Caracterização quantitativa da arquitetura celular

A arquitetura das esponjas produzidas foi caracterizada quantitativamente com relação à espessura das paredes celulares. Para tanto foram utilizadas imagens da seção longitudinal central das amostras, as quais foram tratadas e analisadas empregando-se *software* de análise de imagens.

A Figura 4.10 apresenta fotos, sem tratamento e binarizadas, de seções típicas de amostras obtidas em todas as condições de ensaio, utilizadas para análise.

Para as amostras fabricadas por pré-formas de partículas finas, soltas ou sinterizadas, pode-se observar que as características da parede celular, como a sua espessura e distribuição, não são claramente diferenciáveis entre si. Já as amostras fabricadas por pré-formas de partículas soltas médias ou grosseiras, apresentam aparentemente melhor distribuição e maior espessura da parede celular com relação às amostras fabricadas por pré-formas de partículas finas. Em todos os casos podem ser observadas algumas células de dimensões excessivas, formadas devido às falhas de preenchimento já observadas anteriormente nas seções das tomografias de raios-X, ou por rompimento da parede celular de espessura muito fina durante o processo de corte.

As imagens binarizadas através do *software* IMAGEJ 1.40 permitem uma visualização clara da influência da granulometria do sal utilizado para fabricação da pré-forma na espessura da parede celular, ou seja, partículas de NaCl de maiores dimensões resultam em paredes metálicas mais espessas. Utilizando-se as imagens binarizadas, os seguintes parâmetros foram medidos para a caracterização quantitativa da arquitetura celular das esponjas produzidas: espessura média de paredes e diâmetro de Feret. No primeiro caso foram traçadas linhas transversais paralelas em toda a seção, cortando paredes celulares, cujo comprimento de corte foi considerado o valor da espessura da parede. Foram tomados cerca de 25 valores para cada área avaliada, em um total de 2 áreas por amostra.

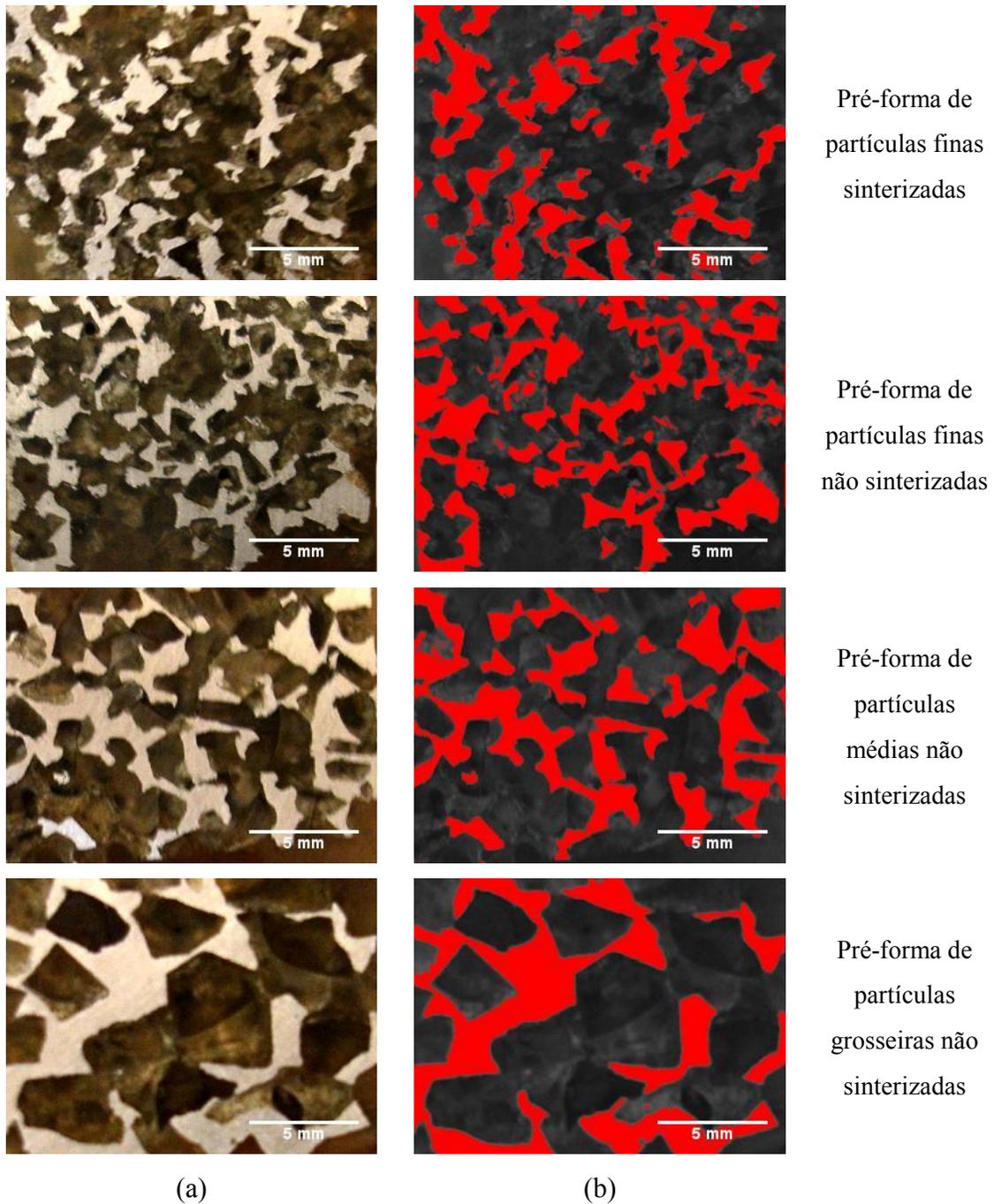


Figura 4.10: Imagens da seção longitudinal central de esponjas metálicas típicas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas em diferentes condições: (a) sem tratamento; (b) binarizadas.

No segundo caso, o diâmetro de Feret é definido como o diâmetro do círculo cuja área é igual à área da superfície medida. No caso das esponjas, se considerado que as paredes metálicas

são contínuas entre os vazios, e, portanto, uma das dimensões medidas (comprimento) aproximadamente constante, a variação do diâmetro de Feret pode ser relacionada com a outra variável das paredes – a sua espessura. Foram tomadas cerca de 30 medidas automaticamente, através do software de edição de imagens, em cada área observada, para um total de 2 áreas por amostra. A Tabela 4.2 apresenta os valores médios da espessura da parede celular e do diâmetro de Feret para esponjas obtidas em todas as condições de ensaio

Tabela 4.2: Valores médios da espessura da parede celular e do diâmetro de Feret para as amostras de esponjas da liga AA2011 fabricadas por tixoforjamento sobre pré-formas de partículas de NaCl em diferentes condições

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Espessura da parede celular (mm)</b>	<b>Média do Diâmetro de Feret (mm)</b>
Fina sinterizada	1,1±0,5	2,6±1,7
Fina	1,2±0,5	2,9±1,5
Média	1,4±0,5	3,3±1,6
Grosseira	2,1±0,9	5,4±1,5

Pode ser observado, assim como visto nas imagens apresentadas na Figura 4.10 e apresentado na Figura 4.11, uma tendência de aumento da espessura da parede celular e do diâmetro de Feret com o aumento das dimensões das partículas do agente bloqueador utilizado, isto ocorre possivelmente devido a maior facilidade de infiltração da pasta tixotrópica nas partículas de agentes bloqueadores de maiores dimensões. A análise dos valores obtidos permite ainda observar que a variação da estrutura é menos sensível ao emprego de pré-formas de partículas finas sinterizadas ou não sinterizadas do que a utilização de pré-formas de partículas de distintas granulometrias.

A distribuição dos valores de espessura de parede e de diâmetro de Feret medidos é apresentada graficamente na Figura 4.12.

Pode-se observar que as amostras produzidas com pré-formas de partículas finas sinterizadas apresentam medidas de espessura de parede celular mais freqüentes no intervalo de 0,1 a 2,0mm, enquanto o emprego de pré-formas de partículas finas não sinterizadas resulta em paredes de espessuras entre 0,1 e 1,5mm, portanto com menor dispersão; se utilizado o parâmetro

de Feret para análise, pode ser observado que, no caso de pré-formas de partículas finas sinterizadas, as esponjas resultantes apresentam espessuras de paredes semelhantes às obtidas com o uso de pré-formas de partículas finas não sinterizadas (diâmetro de Feret para ambas com maior frequência para os intervalos de 0,1 a 3,0mm).

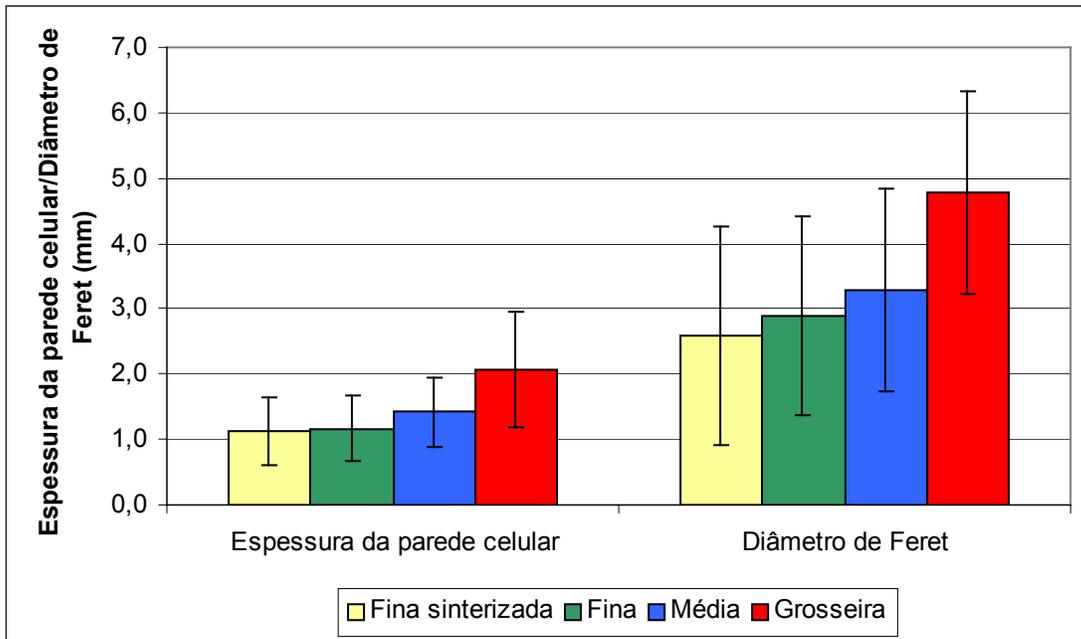
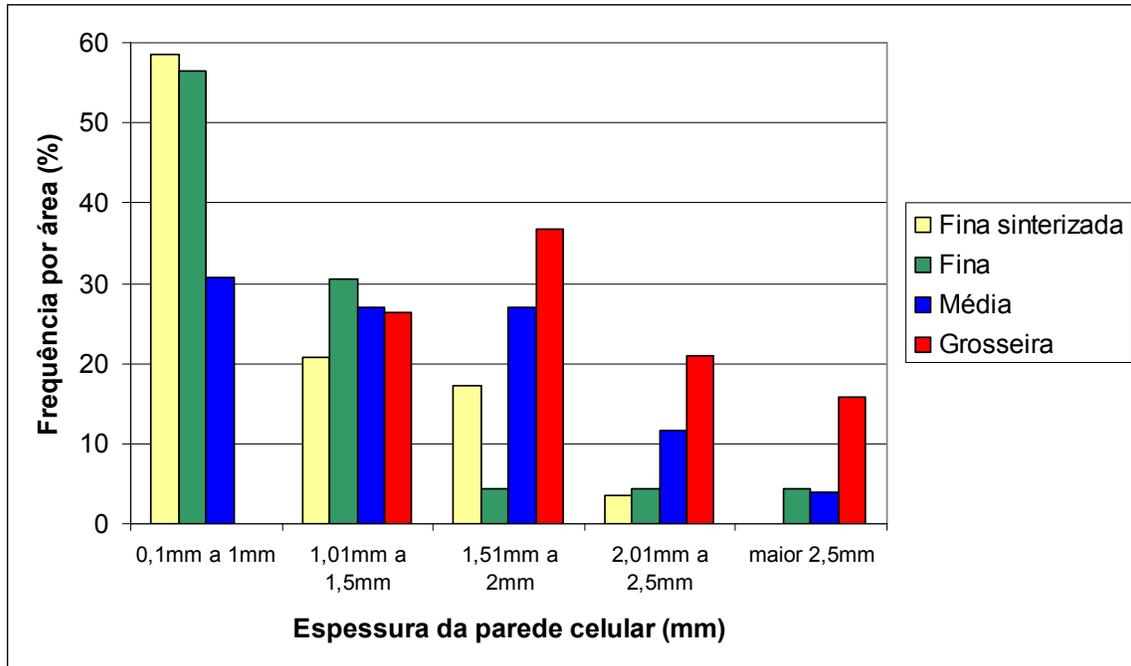


Figura 4.11: Valores médios da espessura de paredes de células e de diâmetros de Feret, em esponjas da liga AA2011 produzidas por infiltração de pré-formas em diferentes condições: partículas finas sinterizadas, partículas soltas de dimensões fina, média e grosseira.

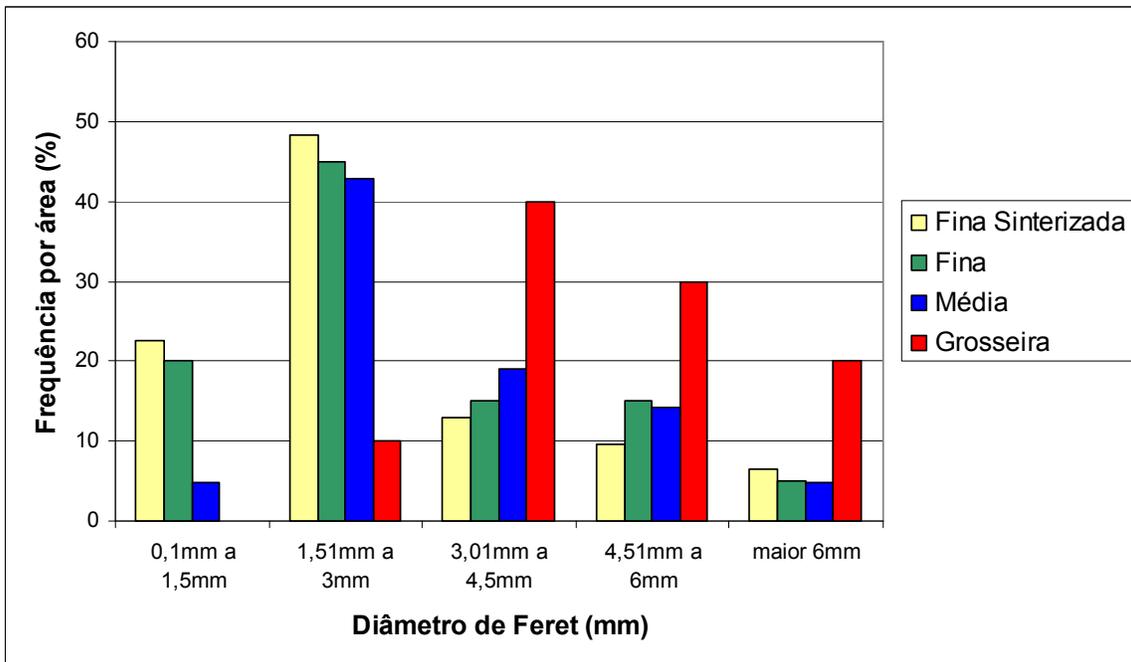
Pode-se observar que as amostras fabricadas por pré-formas de partículas médias apresentam valores de espessura da parede celular com maior frequência no intervalo de 0,1 a 2,0mm, para os outros intervalos de maiores medidas de espessura ocorre um decréscimo da frequência por área, menos acentuado do que as amostras produzidas por pré-formas de partículas finas. Para o diâmetro de Feret as mesmas apresentam uma maior frequência para os intervalos de 1,51 a 6,0mm. A dispersão de valores é maior, de um modo geral, do que a observada em esponjas obtidas em pré-formas de partículas finas.

As amostras fabricadas a partir de pré-formas de partículas grosseiras apresentam medidas de espessura da parede celular com maior frequência no intervalo de 1,01 a 2,5mm. Para o

diâmetro de Feret as mesmas apresentam uma maior frequência para o intervalo de 3,01 a 6mm. A distribuição de dimensões neste caso é mais dispersa que nos casos anteriores.



(a)



(b)

Figura 4.12: (a) espessura da parede celular x frequência por área (b) diâmetro de Feret x frequência por área.

Os resultados obtidos permitem observar que, de uma maneira geral, o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador leva, na verdade, ao aumento dos valores médios, tanto da espessura de parede quanto do diâmetro de Feret, e também da dispersão desses valores.

#### 4.4. Caracterização metalúrgica - microestrutura da parede celular

As propriedades de um material celular dependem, além da sua arquitetura, o que inclui distribuição e dimensões de vazios, e espessura e continuidade de paredes celulares, também das propriedades específicas das próprias paredes, responsáveis pela coesão do material. Foi, portanto, analisada a microestrutura da liga AA2011 constituinte das paredes das esponjas produzidas. Microestruturas típicas obtidas para as esponjas produzidas a partir de pré-formas em diferentes condições são apresentadas nas Figuras 4.13 a 4.16.

Pode-se observar estruturas semelhantes em todos os casos, constituídas de fase  $\alpha$  com morfologia de dendritas equiaxiais ou rosetas e fase  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) em contornos. Esta microestrutura não constitui uma típica estrutura de pasta tixotrópica, que apresentaria a fase primária  $\alpha$  com morfologia globular. Além disto, pode-se observar que as dimensões das rosetas são cerca de 10x superiores às dimensões médias dos grãos presentes na liga na condição original extrudada, antes de submetida ao tratamento de fusão parcial controlada.

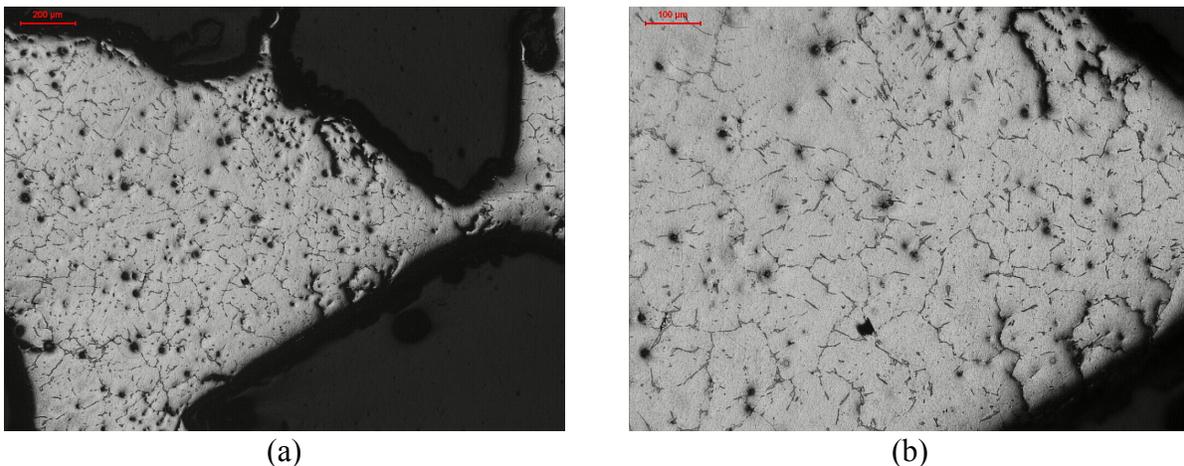
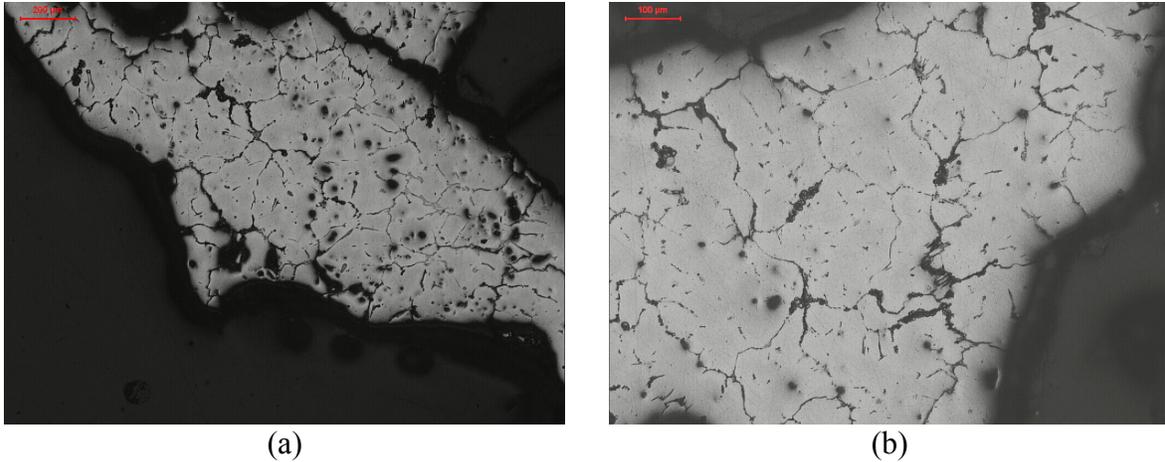
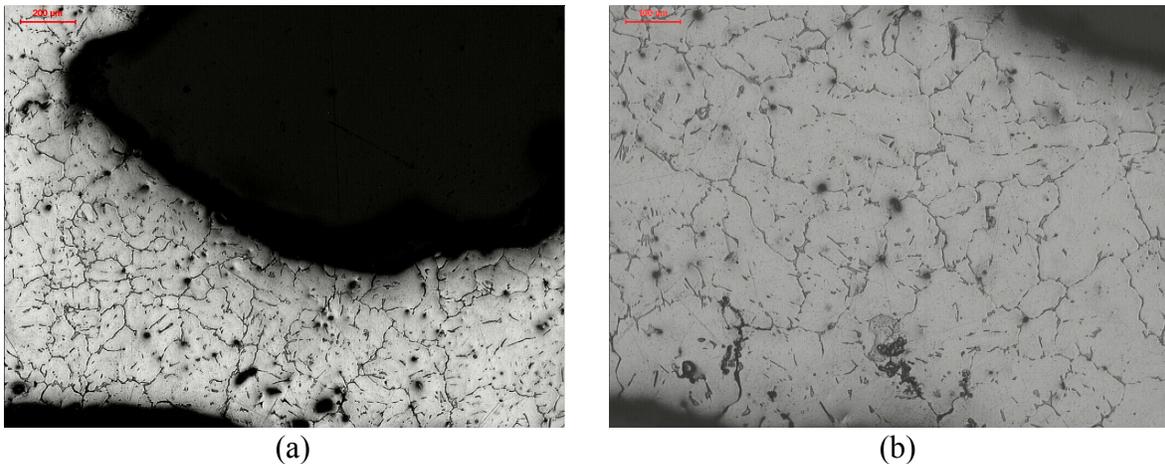


Figura 4.13: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixoconformação da liga AA2011 sobre pré-formas sinterizadas de sal de granulometria fina; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.



(a) (b)  
Figura 4.14: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixoconformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria fina; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.



(a) (b)  
Figura 4.15: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixoconformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria média; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.

O diâmetro médio das rosetas de fase  $\alpha$  observadas na microestrutura de paredes celulares das esponjas metálicas produzidas em todas as condições de processo foi medido; os resultados são apresentados na Tabela 4.3. Para efeito de comparação, é também apresentado o valor médio do diâmetro de grão na estrutura original extrudada.

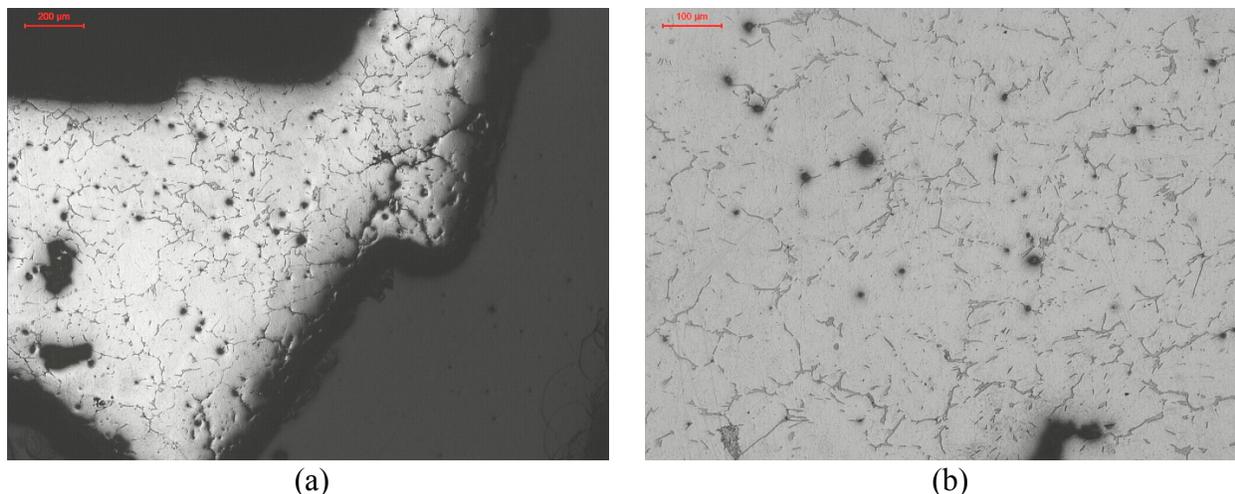


Figura 4.16: Microestrutura da parede celular das esponjas metálicas fabricadas por tixoconformação da liga AA2011 sobre pré-formas soltas de sal de granulometria grosseira; (a) aumento de 50x; (b) aumento de 100x.

Tabela 4.3: Diâmetro médio de rosetas da fase  $\alpha$  presentes na microestrutura de paredes celulares de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições.

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Diâmetro médio das rosetas (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Fina sinterizada	155 $\pm$ 13
Fina	163 $\pm$ 20
Média	144 $\pm$ 20
Grosseira	172 $\pm$ 25

<b>Liga AA2011</b>	<b>Diâmetro médio dos grãos (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
Condição extrudada	13 $\pm$ 1,9

Os valores de diâmetros de rosetas são elevados e semelhantes para as diferentes esponjas. No tratamento de FPC imposto à liga para a produção de pasta tixotrópica, glóbulos de pequenas dimensões e com geometria esférica são esperados, uma vez que são formados por mecanismos de recristalização e separação por ação da penetração de líquido nos contornos recristalizados, quando mantidos à temperatura superior a *solidus*. De fato, a liga original já apresenta à temperatura ambiente, grãos recristalizados, como observados na Figura 3.3. Assim, à elevada temperatura de tixoconformação, a fase secundária  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) é fundida, bem como parte da própria fase  $\alpha$ , constituindo a fase líquida da pasta; a fase sólida da pasta é, portanto, constituída dos próprios grãos recristalizados que se tornam mais globulares em meio líquido levados pela necessidade de redução de energias superficiais. Como os grãos recristalizados são poligonais, o

processo de globularização é rápido e direto, não havendo estágios intermediários de morfologias como é o caso do processo de globularização de estruturas dendríticas. Portanto, a pasta tixotrópica antes da infiltração deve ser constituída de fase sólida  $\alpha$  com morfologia com alto grau de esfericidade (fator de forma próximo à unidade), típica de pastas obtidas por recristalização seguida de fusão parcial.

No entanto, a presença de rosetas e não glóbulos nas paredes celulares das esponjas indicam que na operação de tixoconformação houve separação das fases líquida e sólida, sendo infiltrado preferencialmente o líquido, para as regiões vazias entre as partículas de NaCl. Com o resfriamento da esponja, o líquido nessas regiões sofre solidificação lenta e não direcional, resultando nas dendritas equiaxiais grosseiras observadas.

Não se observam defeitos significativos nas estruturas das paredes celulares, além da presença de alguma porosidade inter-rosetas típicas de vazios de contração de solidificação e alguma porosidade de geometria típica de casos de retenção de gases, distribuída na matriz.

## **4.5. Caracterização física**

### **4.5.1. Densidades real e relativa**

As densidades real e relativa de um material celular estão diretamente ligadas ao seu comportamento físico e mecânico. A Tabela 4.4 apresenta os valores calculados de densidades real, relativa e da porosidade para todas as amostras produzidas em todas as condições de fabricação. Pode-se observar em todos os casos, uma significativa redução da densidade do material com relação ao material maciço: o valor da densidade obtida é da ordem de 30% do valor da densidade da liga maciça, o que significa a presença de cerca de 70% de vazios, em todos os casos.

Os valores médios encontrados variam de 0,71 a 0,94g/cm<sup>3</sup> para a densidade real, 0,25 a 0,33 para a densidade relativa ( $\rho/\rho_s$ ) e de 66 a 75% para teor de vazios. Para esta mesma liga maciça a densidade real é de 2,82g/cm<sup>3</sup> (BRAY, 1992). As esponjas obtidas se enquadram,

portanto, na classificação de metais celulares comumente empregada para produtos porosos contendo teor de vazios de, no mínimo, 70%.

Tabela 4.4: Tabela de dados com os valores de densidades real, relativa e teor de porosidade para todas as amostras obtidas.

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Amostra</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade relativa</b>	<b>Porosidade (%)</b>
<b>Fina sinterizada</b>	1-FS	0,58	0,21	80
	2-FS	0,78	0,28	72
	3-FS	0,89	0,32	68
	4-FS	0,60	0,21	79
	<b>Média</b>	<b>0,71±0,15</b>	<b>0,25±0,05</b>	<b>75±5</b>
<b>Fina</b>	1-F	0,85	0,30	70
	2-F	0,89	0,31	68
	3-F	0,81	0,29	71
	4-F	0,91	0,32	68
	5-F	0,89	0,32	68
	6-F	0,89	0,31	69
	7-F	0,92	0,32	67
	<b>Média</b>	<b>0,88±0,04</b>	<b>0,31±0,01</b>	<b>69±1</b>
<b>Média</b>	1-M	1,00	0,35	65
	2-M	0,89	0,32	69
	3-M	0,91	0,32	68
	4-M	0,76	0,27	73
	5-M	0,78	0,28	72
	6-M	0,94	0,33	67
	7-M	0,98	0,35	65
	<b>Média</b>	<b>0,89±0,09</b>	<b>0,32±0,03</b>	<b>68±3</b>
<b>Grosseira</b>	1-G	0,94	0,33	67
	3-G	0,97	0,35	65
	4-G	0,90	0,32	68
	5-G	0,93	0,33	67
	6-G	0,94	0,33	67
	7-G	0,95	0,34	66
	8-G	0,95	0,34	66
	<b>Média</b>	<b>0,94±0,02</b>	<b>0,33±0,01</b>	<b>66±0,8</b>

A Figura 4.17 apresenta graficamente os valores de densidades real e relativa de esponjas produzidas para todas as condições de ensaio. Pode-se observar que, de um modo geral, as dimensões das esponjas produzidas nas diferentes condições são pouco diferenciáveis entre si,

apresentando tendência ao aumento da densidade com o aumento das dimensões do agente bloqueador. As variações nos valores calculados podem ser atribuídas à heterogeneidade das estruturas e, em casos onde as variações são mais significativas, à presença de falhas de preenchimento da pré-forma. Assim, por exemplo, as amostras contendo sérias falhas internas detectadas pela tomografia de raios-X, como por exemplo, as amostras 1-FS, 4-M e 5-M, apresentam valores de densidade mais distintos da média dos valores entre as amostras do seu grupo.

Pode-se ainda observar que a utilização de pré-formas de partículas finas sinterizadas resulta em uma maior dispersão nos valores de densidade obtidos, indicando uma maior dificuldade de controle da infiltração do metal. Por outro lado, as amostras fabricadas a partir de pré-formas de partículas soltas apresentam menor dispersão de valores de densidades real, relativa e teor de porosidade, independente da granulometria do NaCl.

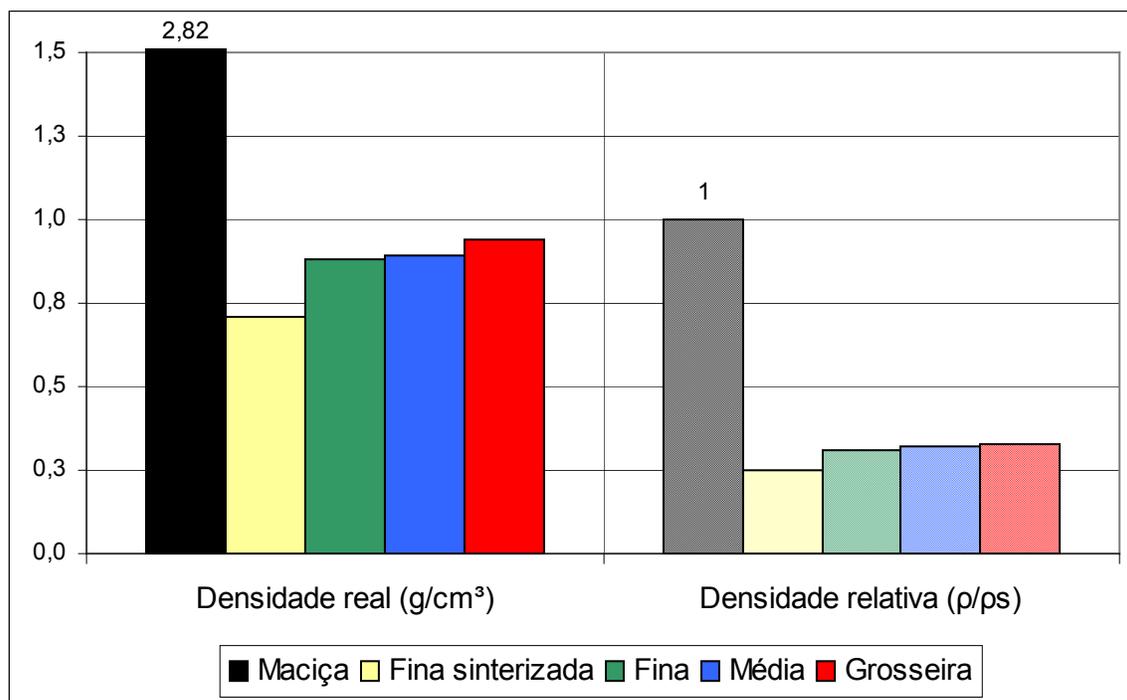


Figura 4.17: Densidades real e relativa de esponjas metálicas da liga AA2011 fabricadas por tixoconformação sobre pré-formas de partículas de sal de diferentes granulometrias, sinterizadas ou soltas.

#### 4.5.2. Cálculo estimado do comportamento térmico

As esponjas metálicas produzidas foram avaliadas quanto ao seu comportamento térmico, através de estimativa teórica proposta por Ashby (2000). Os cálculos das propriedades térmicas de condutividade, condutividade normalizada e difusividade foram realizados através do uso das Equações 2.3, 2.4 e 2.5 respectivamente, apresentadas no Capítulo 2, item 2.5.1.

Os resultados obtidos, apresentados na Tabela 4.5, fornecem uma estimativa do comportamento térmico esperado das esponjas metálicas, e podem orientar a utilização destes materiais em aplicações térmicas onde estas propriedades sejam pertinentes.

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) é a propriedade física que caracteriza a habilidade de um material em transferir calor – para a liga AA2011 utilizada para a fabricação das esponjas, a condutividade térmica é de 151W/m.K (BRAY, 1992). Através da equação proposta por Ashby (2000), foram obtidos valores que variam desde 13W/m.K, para esponjas fabricadas a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas, até 24,7W/m.K para amostras fabricadas a partir de pré-formas soltas de partículas grosseiras, como pode ser observado na Tabela 4.5. Estes valores são significativamente inferiores aos valores da condutividade da liga maciça. Pode ser observada a tendência de aumento da condutividade térmica das esponjas com aumento da densidade do material.

Para a condutividade térmica normalizada ( $\lambda/\lambda_s$ ), relação da condutividade da esponja metálica pela condutividade da liga maciça, foram obtidos valores que variam de 0,09 para amostras fabricadas a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas a 0,16 para as amostras fabricadas a partir de pré-formas grosseiras. Isto é, as esponjas metálicas apresentam condutividade da ordem de 9% a 16% da condutividade da liga maciça, o que define um amplo campo de aplicações como componentes isolantes térmicos.

A difusividade térmica ( $a$ ) é uma propriedade física que indica como o fluxo de calor se difunde através dos materiais, e é obtida através da divisão da sua condutividade térmica pelo seu calor específico volumétrico – para a liga AA2011 a difusividade térmica é de  $\sim 0,84^{-4} \text{m}^2/\text{s}$  (KULKARNI, 2005). Para as esponjas produzidas, e utilizando a Equação 2.5 foram obtidos

valores de difusividade térmica variando de  $\sim 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  para amostras fabricadas a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas até  $\sim 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  para as amostras fabricadas por pré-formas grosseiras, conforme indicado na Tabela 4.5. Estes valores são significativamente superiores aos valores da difusividade térmica da liga maciça. Quando analisada a influência das condições de processamento das esponjas, observa-se tendência do aumento da difusividade com o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador utilizado.

Tabela 4.5: Valores estimados de condutividade térmica ( $\lambda$ ), condutividade térmica normalizada ( $\lambda/\lambda_s$ ) e difusividade térmica ( $a$ ) de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições.

Tipo de pré-forma	Densidade relativa média ( $\rho/\rho_s$ )	$\lambda$ (W/m-K)		$\lambda/\lambda_s$		$a$ ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	
		Min. ( $q=1,8$ )	Máx. ( $q=1,6$ )	Min.	Max.	Min.	Max.
Fina Sinterizada	0,23	13,0	15,8	0,09	0,10	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,03</i>	<i>4,8</i>	<i>5,4</i>	<i>0,03</i>	<i>0,04</i>	<i><math>1,1 \cdot 10^{-4}</math></i>	<i><math>1,2 \cdot 10^{-4}</math></i>
Fina	0,31	18,5	22,0	0,12	0,15	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,01</i>	<i>1,4</i>	<i>1,5</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i><math>0,3 \cdot 10^{-4}</math></i>	<i><math>0,4 \cdot 10^{-4}</math></i>
Média	0,32	19,2	22,8	0,13	0,15	$4,2 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,03</i>	<i>3,5</i>	<i>3,9</i>	<i>0,02</i>	<i>0,03</i>	<i><math>0,8 \cdot 10^{-4}</math></i>	<i><math>0,8 \cdot 10^{-4}</math></i>
Grosseira	0,33	20,9	24,7	0,14	0,16	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$
<i>Desvio padrão</i>	<i>0,01</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>	<i>0,01</i>	<i>0,01</i>	<i><math>0,2 \cdot 10^{-4}</math></i>	<i><math>0,2 \cdot 10^{-4}</math></i>
<i>AA2011maciça</i>	<i>1</i>	<i>151</i>		<i>1</i>		<i><math>0,84 \cdot 10^{-4}</math></i>	

Os aumentos da condutividade e difusividade térmicas com o aumento da granulometria das partículas de NaCl nas pré-formas utilizadas podem estar relacionadas com o aumento da densidade e também da espessura de paredes das células (metal condutor). A Figura 4.18. apresenta graficamente os valores de condutividade térmica, para  $q$  médio igual a 1,72, comparativamente com a densidade relativa das esponjas produzidas para todas as condições de ensaio.

Pode-se observar a sensível redução da condutividade térmica de esponjas quando comparada com a do material maciço e a pouca diferenciação entre esta propriedade entre as esponjas produzidas em diferentes condições de pré-formas. Estes resultados mostram que as

esponjas metálicas são potencialmente utilizáveis para aplicações que requeiram baixa condutividade e alta difusividade térmica, como por exemplo, trocadores de calor.

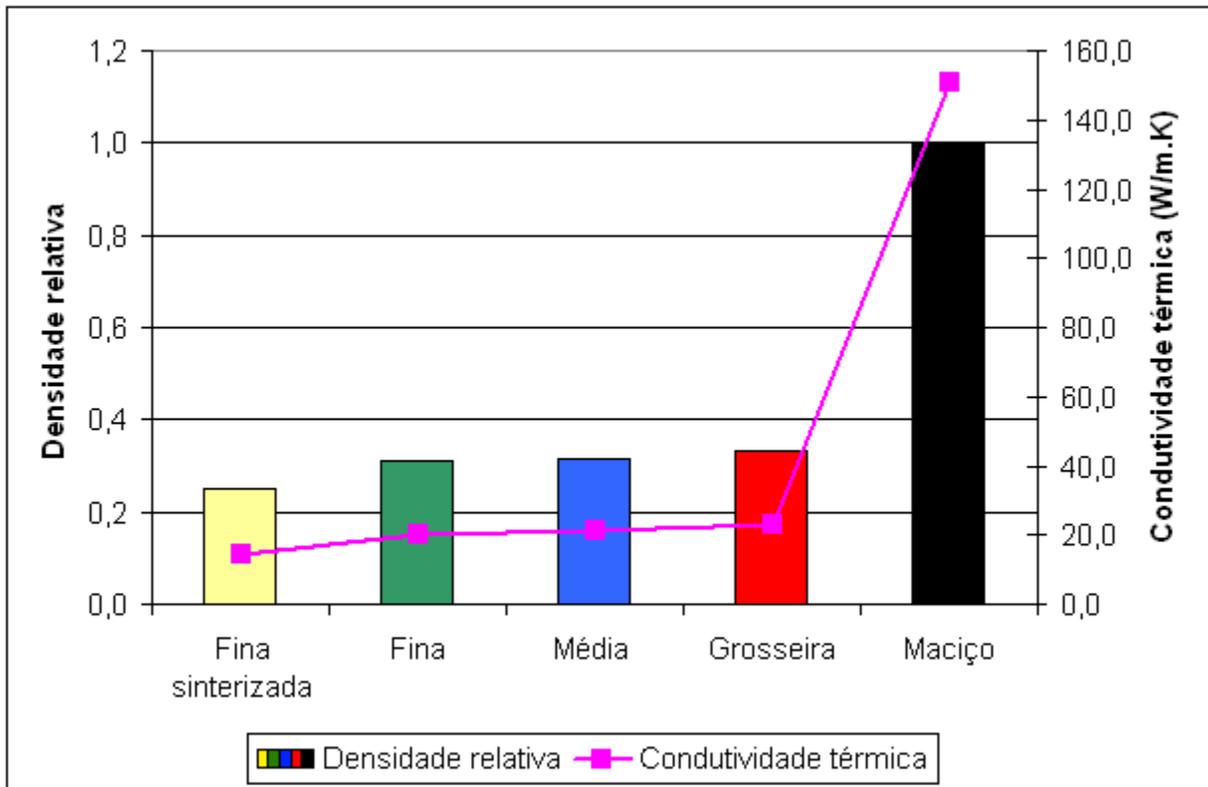


Figura 4.18: Condutividade térmica e densidade relativa de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de agentes bloqueadores em diferentes condições.

#### 4.6. Caracterização das propriedades mecânicas

As esponjas produzidas a partir de pré-formas em distintas condições foram avaliadas quanto ao comportamento em compressão através de testes semi-estáticos e dinâmicos. A avaliação deste comportamento é necessária para a definição da potencialidade de aplicação das esponjas como materiais estruturais e componentes absorvedores de energia em solicitações de compressão semi-estática e em impacto. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

##### 4.6.1. Testes de compressão semi-estáticos – curvas Força x Deslocamento

As Figuras 4.19 a 4.22 apresentam resultados de ensaios de compressão semi-estáticos para as esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de distintas pré-formas de NaCl. São apresentadas

as curvas de variação da força aplicada com o deslocamento, para 3 ensaios para cada condição de amostra.

Pode-se observar, em todos os casos, curvas contendo um significativo patamar de regime de deformação plástica, sem incremento da força aplicada, típico de metais celulares. As forças requeridas para o início do regime plástico são bastantes reduzidas, bem como a força máxima de compressão para a promoção de 50% de redução na altura da amostra. Este tipo de curva  $F_{xd}$ , típico de metais celulares, apresenta uma pequena região elástica seguida de uma significativa região de deformação plástica sem alteração expressiva da força aplicada, onde é promovido o adensamento do material pelo colapso das células, seguida de uma região de deformação plástica com o aumento da força aplicada, correspondente à deformação das paredes metálicas das células.

Segundo a Figura 4.19 pode-se observar que as réplicas fabricadas a partir de pré-formas sinterizadas de partículas finas apresentam curvas bem distintas uma das outras, apresentando valores de força máxima no regime elástico variando de cerca de 3kN, para a réplica 1-FS, a 15kN para a réplica 3-FS. Os valores de deslocamento total antes do aumento da deformação plástica final variam de cerca de 4mm, para a réplica 3-FS, a 5mm para as réplicas 1-FS e 2-FS. Os valores de força máxima no regime elástico, bem como do deslocamento total até início do adensamento foram obtidos das curvas apresentadas, segundo procedimento indicado na Figura 2.20.

Os valores de densidade de cada amostra são apresentados nos gráficos, para facilidade de análise. Pode-se observar que o aumento da densidade leva ao aumento da força requerida para deformação plástica e redução do deslocamento total no platô de regime plástico. Deve-se lembrar que esta condição de fabricação de esponjas foi a que apresentou maior variação da qualidade do produto, dada a maior dificuldade de infiltração da pasta na pré-forma, resultando em variações sensíveis na densidade e, portanto, no comportamento da curva.

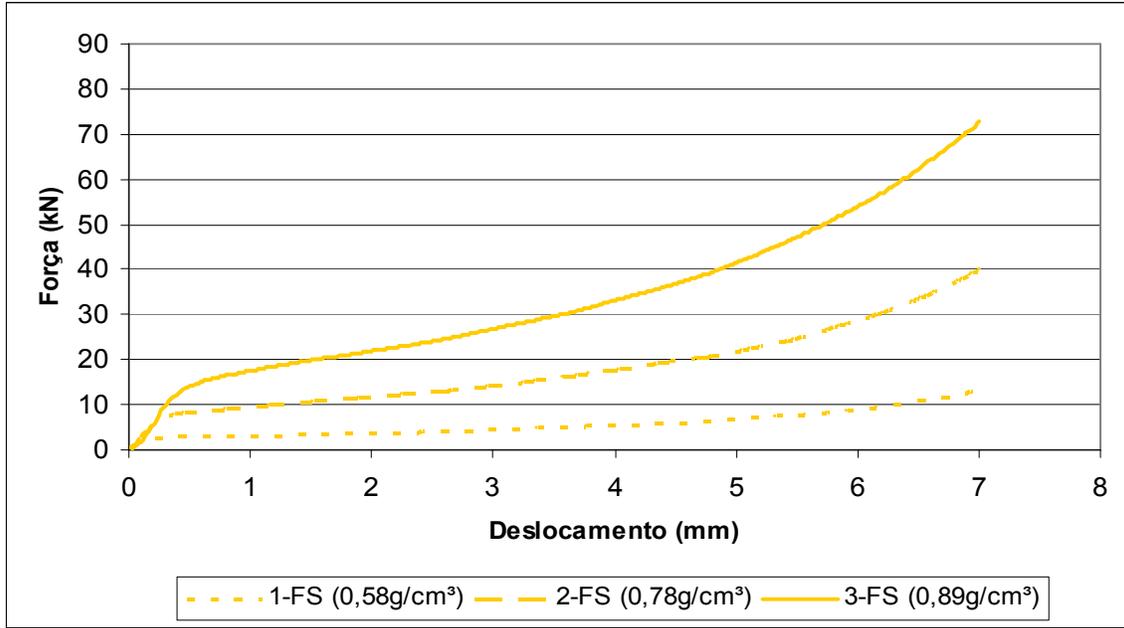


Figura 4.19: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

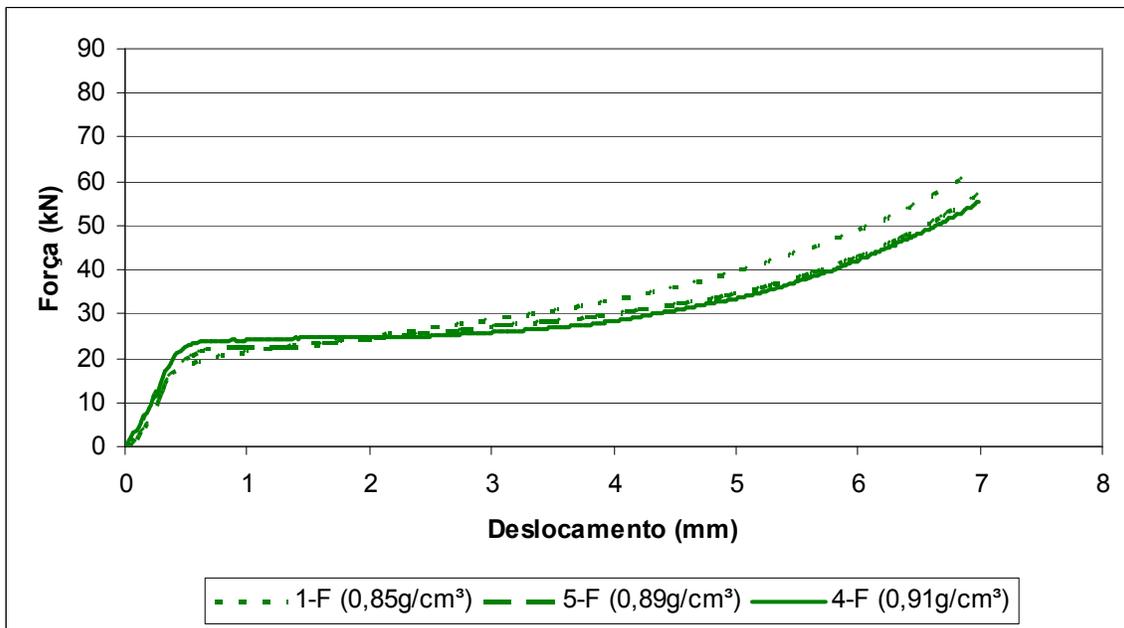


Figura 4.20: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

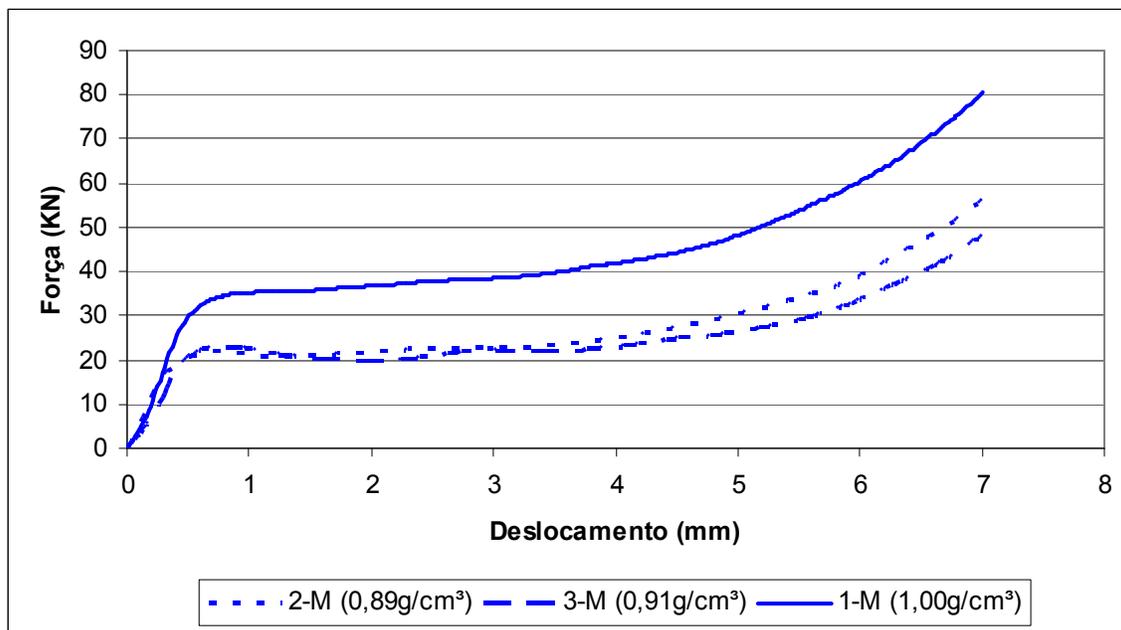


Figura 4.21: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas médias de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

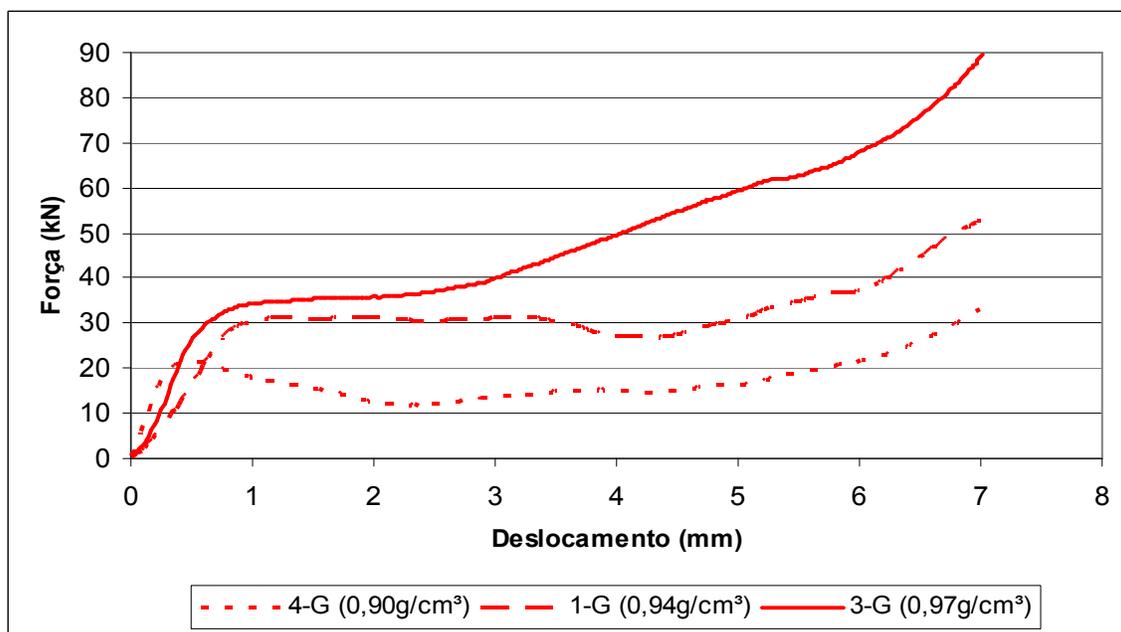


Figura 4.22: Curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas grosseiras de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

No caso de amostras fabricadas a partir de pré-formas de partículas finas soltas, pode-se observar curvas mais semelhantes entre si do que as produzidas através de pré-formas sinterizadas, dada a maior similaridade dos valores de densidade nestes casos. Além disso, as mesmas apresentam maiores valores de força para o início da deformação plástica, que variam de 18kN para a réplica 1-F, a 23kN para a réplica 4-F, isto é, tendência de aumento da força com o aumento da densidade. O deslocamento total antes do início da deformação plástica final varia de 4 a 5mm para todas as réplicas.

Para as réplicas fabricadas em pré-formas de partículas médias de sal pode-se observar duas curvas com comportamentos semelhantes, relativas às amostras 2-M e 3M, com valores de força para início da deformação do platô e deslocamento em torno 22kN e 5mm respectivamente. Uma terceira amostra apresenta os valores de força para início do platô de 34kN e deslocamento de 5mm. Este valor de força requerida para início da deformação plástica, é superior aos valores obtidos para as amostras 2-M e 3-M e novamente pode ser relacionado com os respectivos valores de densidade.

As curvas de força-deslocamento para as amostras produzidas em pré-formas de sal de partículas grosseiras se apresentam bem distintas uma das outras com instabilidade do valor de força no regime do platô, conforme Figura 4.22. A curva para a amostra 3-G é a que se apresenta com o maior valor de força para início de deformação plástica, sendo este da ordem de 33kN, e apresenta deslocamento total antes da deformação plástica final da ordem de 5mm, menor do que o deslocamento apresentado pelas outras réplicas da mesma condição. Também neste caso, pode-se observar a relação direta entre a densidade do material e seu comportamento mecânico em compressão: aumento da densidade promove aumento da força requerida para o início do platô de deformação plástica.

Os valores de força requerida para início do platô e de deslocamento total antes da deformação plástica final para todas as réplicas são apresentados na Tabela 4.6. Pode-se observar, de modo geral, um aumento dos valores médios de força requerida para início do platô com o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador, entretanto, os valores de

deslocamento total antes da deformação plástica final são menos distintos entre si e mostram uma tendência ao aumento com aumento dos tamanhos dos vazios.

Os resultados mostram, portanto, alta sensibilidade da força requerida para o início da deformação plástica com a densidade do material. A influência da densidade no deslocamento total até o início da deformação plástica final do material já não é tão evidente, mesmo porque a definição do início da densificação não é muito precisa em nenhum dos casos.

Tabela 4.6: Resultados de força requerida para início de formação de platô de deformação plástica e deslocamento total antes da deformação plástica final obtidos das curvas força-deslocamento em testes de compressão semi-estáticos de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de distintas pré-formas.

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Amostra</b>	<b>Densidade real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>F requerida p/ início do platô (kN)</b>	<b>Deslocamento total antes da deformação plástica final (mm)</b>
<b>Fina Sinterizada</b>	1-FS	0,58	2,9	4,9
	2-FS	0,78	7,8	4,9
	3-FS	0,89	15,5	3,9
	<b>Média</b>	<b>0,75±0,16</b>	<b>8,7±6,3</b>	<b>4,5±0,5</b>
<b>Fina</b>	1-F	0,85	18,2	4,1
	5-F	0,89	21,5	4,7
	4-F	0,91	23,2	4,7
	<b>Média</b>	<b>0,88±0,03</b>	<b>21,0±2,6</b>	<b>4,5±0,4</b>
<b>Média</b>	2-M	0,89	22,0	5,1
	3-M	0,91	23,1	5,5
	1-M	1,00	33,6	5,0
	<b>Média</b>	<b>0,93±0,05</b>	<b>26,2±6,4</b>	<b>5,2±0,3</b>
<b>Grosseira</b>	4-G	0,90	21,4	6,2
	1-G	0,94	30,6	5,7
	3-G	0,97	33,5	4,7
	<b>Média</b>	<b>0,94±0,04</b>	<b>28,5±6,3</b>	<b>5,5±0,8</b>

Uma interessante observação pode ainda ser feita: se comparados os valores de força para início da deformação plástica de pré-formas em diferentes condições, mas com a mesma densidade, como por exemplo, 3-FS, 5-F e 2-M (todas com densidade igual a 0,89g/cm<sup>3</sup>) pode-se

observar uma tendência de aumento do valor da força requerida para o início do platô. Neste caso, o que diferencia as amostras é a espessura da parede celular, que aumenta com o aumento da granulometria do sal empregado e com a ausência de sinterização na pré-forma de partículas finas. Assim, o aumento da espessura das paredes metálicas acarreta maior resistência à deformação, mesmo antes do colapso das células.

#### **4.6.2. Testes de compressão semi-estáticos – curvas Tensão x Deformação**

A partir das curvas força-deslocamento obtidas nos ensaios de compressão apresentadas no item anterior, foram construídas curvas tensão-deformação para determinação das seguintes propriedades: módulo de elasticidade ou módulo de Young ( $E$ ), tensão de início de platô ou tensão de compressão ( $\sigma_c$ ), tensão do platô ( $\sigma_{pl}$ ) e deformação total antes da deformação plástica final ( $\epsilon_D$ ). Estas propriedades caracterizam o comportamento mecânico de metais celulares em testes de compressão.

As curvas obtidas para 3 réplicas para cada condição de fabricação das esponjas são apresentadas nas Figuras 4.23 a 4.26.

Para as réplicas fabricadas por pré-formas sinterizadas de sal de granulometria fina pode-se observar novamente curvas bem distintas uma das outras. A réplica 1-FS, por exemplo, apresenta uma curva com pequena região elástica, definida com a inclinação inicial da curva onde a tensão e a deformação são lineares, e um pico de tensão de início do platô, conhecido para metal maciço como o limite de escoamento superior, muito pequeno com relação às outras réplicas. A região da curva onde ocorrem grandes deformações para uma tensão quase constante, conhecida para os metais celulares como tensão no platô e para metal maciço como limite de escoamento inferior, é bastante ampla, significando, a princípio, uma boa capacidade de absorção de energia. Pode-se observar através das curvas obtidas que a densidade tem grande influência no comportamento mecânico das amostras. Para efeito de aplicação como absorvedores de energia de impacto, as esponjas com menores densidades apresentam melhor comportamento, dado pelo baixo valor da tensão para início da deformação e o alto valor da deformação plástica antes da deformação plástica final.

Para as réplicas produzidas a partir de pré-forma soltas de sal de partículas finas pode-se observar curvas mais semelhantes entre si do que as curvas das réplicas produzidas por pré-formas sinterizadas, além disso, as mesmas apresentam maiores valores de tensão de início da deformação e maiores tensões no platô. A deformação total antes da deformação plástica final é semelhante para todas as três réplicas. A repetibilidade dos resultados nas três amostras é atribuída à semelhança dos valores de suas densidades (diferença máxima entre os valores, de  $0,06\text{g/cm}^3$ , quando comparadas amostras 1-F e 4-F).

Pode-se observar para as réplicas produzidas por pré-formas soltas de sal de partículas médias, duas curvas que apresentam comportamentos mecânicos similares (amostras 2-M e 3-M) e uma curva bem distinta para amostra 1-M. A curva da amostra 1-M apresenta uma maior região elástica do que as outras réplicas, conseqüentemente, a mesma apresenta um maior valor de tensão de início de formação do platô e maior tensão no platô. Esta amostra apresenta elevado valor de densidade.

Quanto aos resultados obtidos para as amostras produzidas a partir de pré-formas de partículas grosseiras, pode-se observar na Figura 4.26 curvas bem distintas umas das outras, como já observado anteriormente para as curvas força-deslocamento. A maior variação das curvas neste caso pode ser atribuída as grandes dimensões dos vazios presentes. Na compressão, a deformação é livre (sem apresentar, portanto, variação na tensão aplicada) até encontrar paredes metálicas que oferecem resistência, resultando em incremento na tensão requerida para a continuidade da deformação. Este comportamento leva à variações nas tensões aplicadas, comumente observadas como picos nas curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  em ensaios a maiores velocidades. Em ensaios semi-estáticos, estas variações acarretam irregularidades nas curvas como observado.

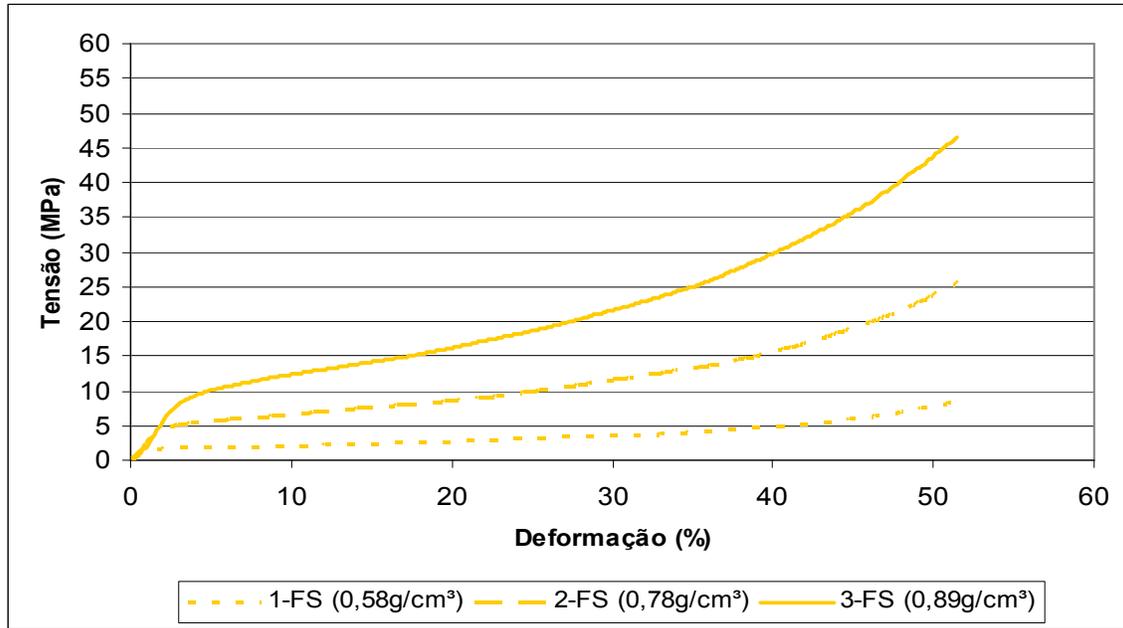


Figura 4.23: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

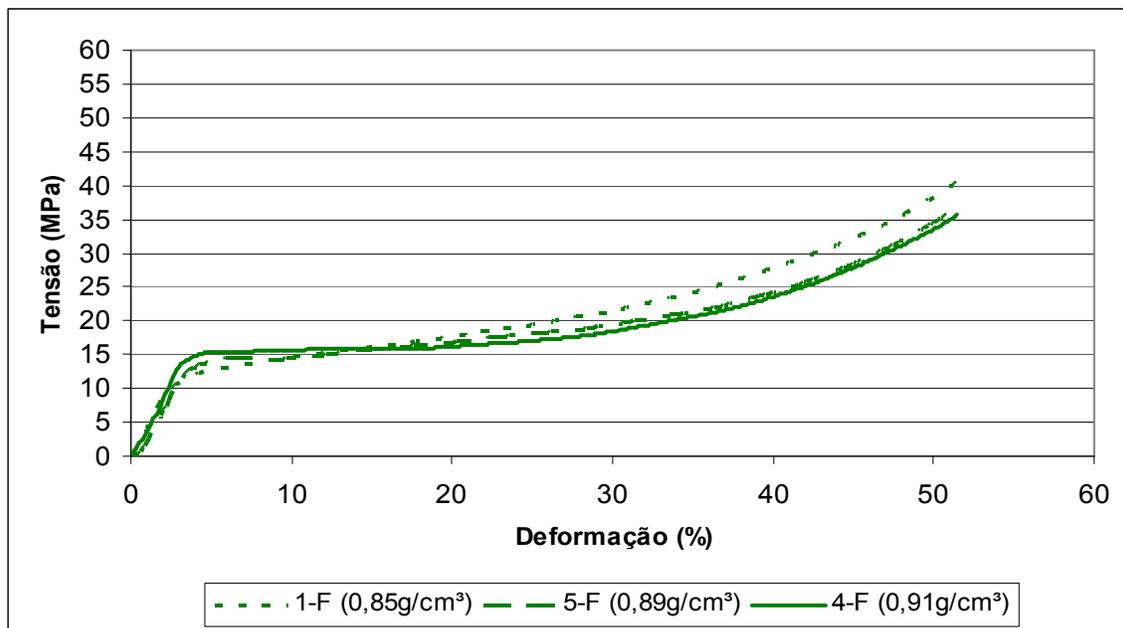


Figura 4.24: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas finas de NaCl. Valores de densidade real na legenda.

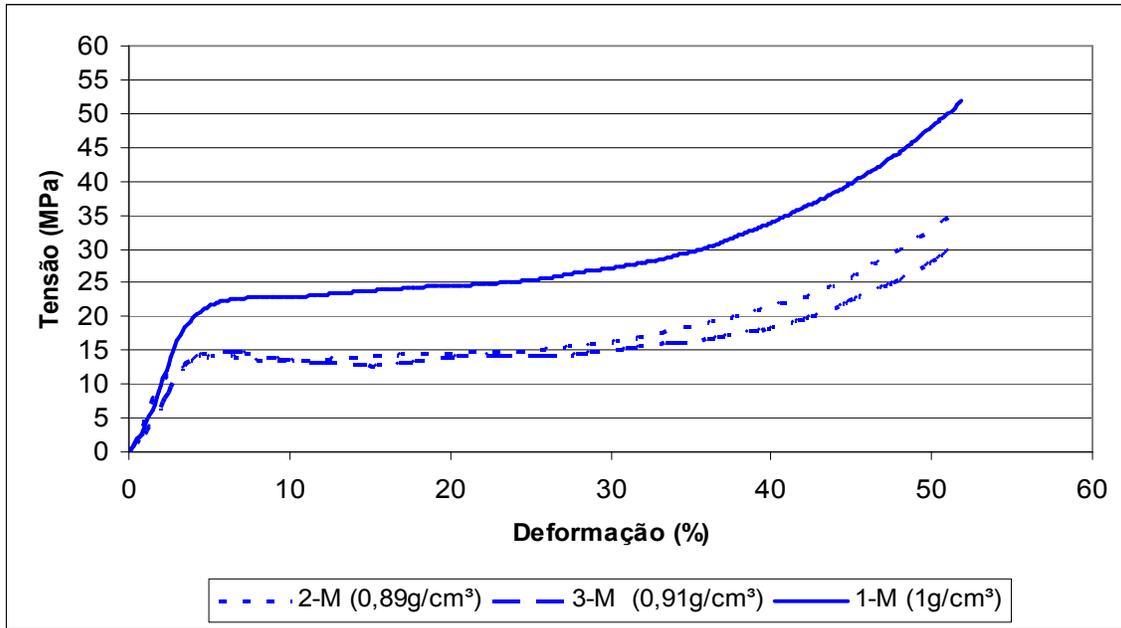


Figura 4.25: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas médias de NaCl.

Valores de densidade real na legenda.

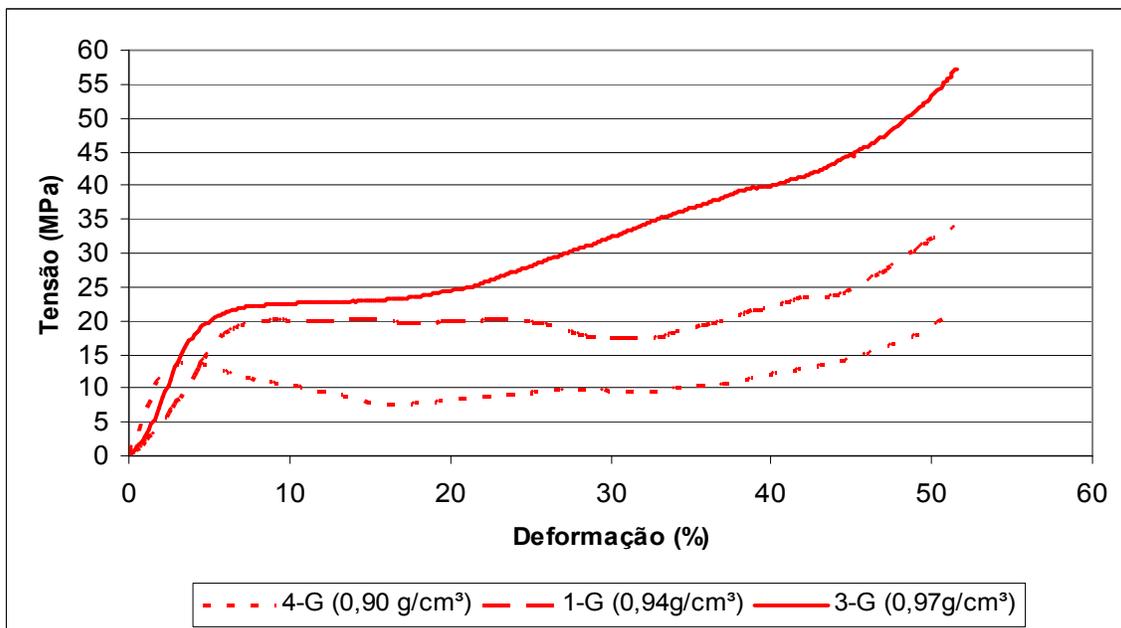


Figura 4.26: Curvas tensão-deformação em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de partículas grosseiras de NaCl.

Valores de densidade real na legenda.

A análise das curvas de tensão-deformação para todas as amostras ensaiadas permite os seguintes comentários gerais:

- ⇒ O comportamento das esponjas produzidas nas condições utilizadas no trabalho é claramente dependente da sua densidade: o aumento da densidade leva ao aumento da tensão de início de deformação plástica e da tensão do platô;
- ⇒ Amostras mais densas apresentam aumento da inclinação da curva na região do platô, isto é, aumento da tensão aplicada durante a deformação plástica, indicando densificação mais gradual e contínua;
- ⇒ Amostras com densidades similares, mas de distintas espessuras de paredes de células, tendem a apresentar resistência à deformação crescente com o aumento da espessura da parede;
- ⇒ Amostras com vazios de grandes dimensões tendem a apresentar maior instabilidade da curva tensão–deformação.

Os resultados numéricos dos parâmetros que caracterizam o comportamento mecânico das esponjas produzidas, calculados a partir das curvas de tensão-deformação, são apresentadas na Tabela 4.7.

Como se pode observar os maiores valores de módulo de elasticidade, ou módulo de Young (E) ou ainda módulo de rigidez, foram obtidos para as amostras produzidas por pré-formas soltas de sal de partículas médias e amostras produzidas a partir de sal de partículas grosseiras, materiais que apresentam maiores valores de densidade.

As amostras produzidas a partir de pré-formas de sal de partículas finas sinterizadas são as que apresentam os menores valores de módulo de elasticidade, e também os menores valores de densidade.

No caso da tensão de início de formação do platô ou tensão de compressão  $\sigma_c$ , os valores obtidos mostram claro aumento desta propriedade com o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador utilizado e conseqüente aumento da densidade da esponja.

Tabela 4.7: Valores das propriedades mecânicas de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições, obtidas de curvas tensão x deformação em testes de compressão semi-estáticos.

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Amostra</b>	<b>Densidade real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b><math>\sigma_c</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_{pl}</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_D</math> (%)</b>
<b>Fina Sinterizada</b>	1-FS	0,58	133,2	1,9	3,0	36
	2-FS	0,78	248,8	5,0	9,1	36
	3-FS	0,89	299,0	9,9	17,6	29
	<b>Média</b>	<b>0,75±0,16</b>	<b>227,0±85</b>	<b>5,6±4,1</b>	<b>9,9±7,3</b>	<b>34±4</b>
<b>Fina</b>	1-F	0,85	504,4	11,6	18,9	30
	5-F	0,89	447,3	13,8	17,3	35
	4-F	0,91	471,3	14,9	17,0	35
	<b>Média</b>	<b>0,88±0,03</b>	<b>474,3±28,6</b>	<b>13,4±1,6</b>	<b>17,7±1,0</b>	<b>33±3</b>
<b>Média</b>	2-M	0,89	568,1	14,1	15,0	38
	3-M	0,91	468,8	14,8	14,7	41
	1-M	1,00	625,9	21,6	24,8	37
	<b>Média</b>	<b>0,93±0,06</b>	<b>554,3±79,5</b>	<b>16,8±4,1</b>	<b>18,2±5,7</b>	<b>39±2</b>
<b>Grosseira</b>	4-G	0,90	631,5	13,7	9,8	46
	1-G	0,94	397,0	19,7	19,6	42
	3-G	0,97	560,8	21,5	26,7	35
	<b>Média</b>	<b>0,94±0,04</b>	<b>529,8±120,3</b>	<b>18,3±4,1</b>	<b>18,7±8,5</b>	<b>41±6</b>

Para a tensão no platô ( $\sigma_{pl}$ ), pode-se também observar a tendência do aumento de seus valores com o aumento da densidade da esponja. Quanto aos valores da deformação total antes da deformação plástica final, observa-se tendência ao aumento da deformação com o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador utilizado, isto é, com o aumento das dimensões dos vazios na esponja. Aparentemente, neste caso, a maior deformação, antes da densificação total, é causada pela maior distância entre as paredes celulares.

Para efeito comparativo foram calculados os valores das propriedades estudadas utilizando equações propostas por Ashby (2000) apresentadas no Capítulo 2 como Equação 2.7 para E,

Equação 2.9 para  $\sigma_{pl}$  e Equação 2.10 para  $\varepsilon_D$ . Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Valores das propriedades mecânicas calculadas a partir das equações de Ashby (2000) de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições.

<b>Tipo de pré-forma</b>	<b>Amostra</b>	<b>Densidade rel.</b>	<b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>E* (MPa)</b>	<b><math>\sigma_{pl}^{**}</math> (MPa)</b>	<b><math>\varepsilon_D^{***}</math> (%)</b>
<b>Fina sinterizada</b>	1-FS	0,21	0,58	296,1	24,4	69,1
	2-FS	0,28	0,78	535,5	32,7	58,5
	3-FS	0,32	0,89	697,2	37,4	52,7
	<b>Média</b>	<b>0,27±0,06</b>	<b>0,75±0,16</b>	<b>509,6±201,8</b>	<b>31,5±6,6</b>	<b>60,1±8,4</b>
<b>Fina</b>	1-F	0,30	0,85	636,0	35,7	54,8
	5-F	0,32	0,89	697,2	37,4	52,7
	4-F	0,32	0,91	728,9	38,2	51,6
	<b>Média</b>	<b>0,31±0,01</b>	<b>0,88±0,03</b>	<b>687,4±47,3</b>	<b>37,1±1,3</b>	<b>53,0±1,6</b>
<b>Média</b>	2-M	0,32	0,89	697,2	37,4	52,7
	3-M	0,32	0,91	728,9	38,2	51,6
	1-M	0,35	1,00	880,2	42,0	46,8
	<b>Média</b>	<b>0,32±0,0</b>	<b>0,90±0,01</b>	<b>768,8±97,8</b>	<b>39,2±2,5</b>	<b>50,4±3,1</b>
<b>Grosseira</b>	4-G	0,32	0,90	713,0	37,8	52,1
	1-G	0,33	0,94	777,8	39,5	50,0
	3-G	0,34	0,97	857,5	41,4	47,5
	<b>Média</b>	<b>0,33±0,01</b>	<b>0,94±0,04</b>	<b>782,8±72,4</b>	<b>39,6±1,8</b>	<b>49,9±2,3</b>

\*para  $\alpha_2=1$  e  $E_s=70GPa$  (BRAY, 1992)

\*\*para  $n_2=0,25$  e  $\sigma_e=296MPa$  (BRAY, 1992)

\*\*\*para  $\alpha_1=1,5$

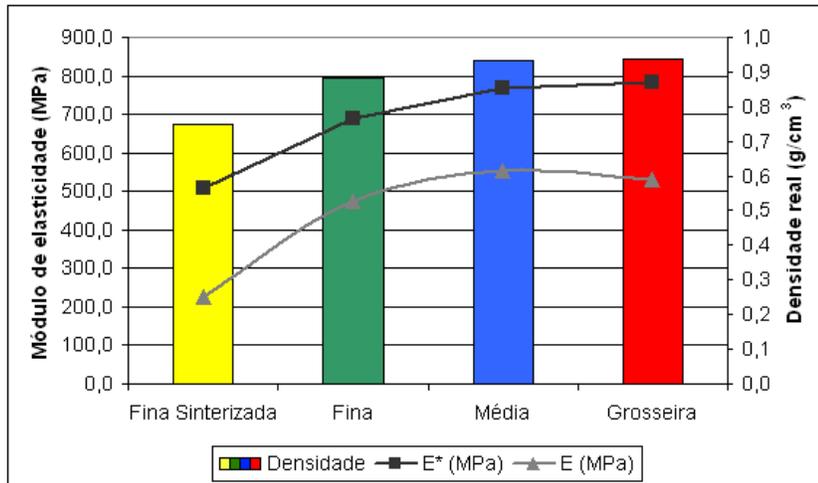
Pode-se observar que os valores das propriedades apresentam, em geral, uma clara e direta relação com a densidade das esponjas. No caso do módulo de Young e tensão no platô, seus valores aumentam com o aumento da densidade, enquanto a deformação antes da densificação total do material mostra clara tendência à redução com o aumento da densidade.

Quando comparados os valores de propriedades calculadas teoricamente e os obtidos experimentalmente, pode-se observar que, de um modo geral, os valores teóricos são superiores aos valores obtidos nos ensaios efetuados. Esta discrepância pode ser atribuída tanto aos valores dos fatores de correção  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $n_2$  empregados nos cálculos, quanto às dispersões de resultados

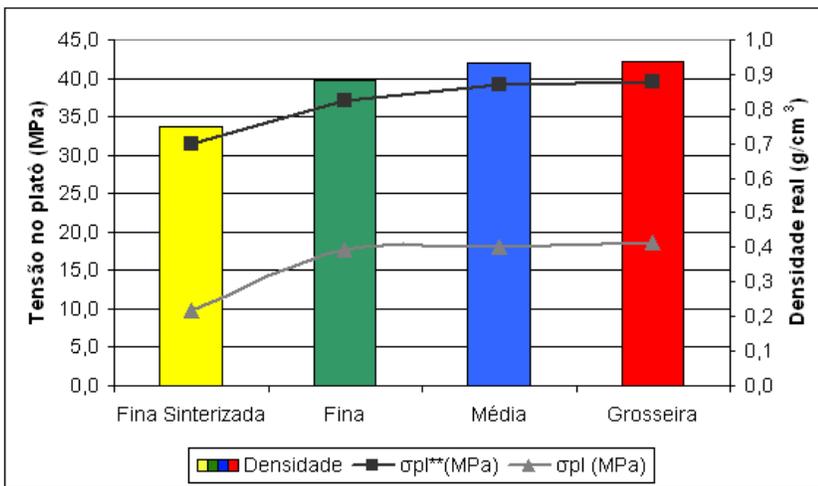
nos testes de compressão, apesar de terem sido testadas 3 réplicas de cada condição. A utilização de equações teóricas para uma estimativa mais precisa do comportamento mecânico do material requer a definição de fatores de correção específicos para as esponjas produzidas. Em adição, a melhor reprodutibilidade da qualidade interna das esponjas produzidas e da homogeneidade da sua arquitetura, levariam a resultados mais coincidentes e precisos.

A Figura 4.27 apresenta graficamente os valores teóricos e experimentais para o módulo de Young, tensão no platô e deformação total antes da deformação plástica final, das esponjas produzidas a partir de pré-formas de diferentes granulometrias. São também indicados nos gráficos os valores médios da densidade real das amostras.

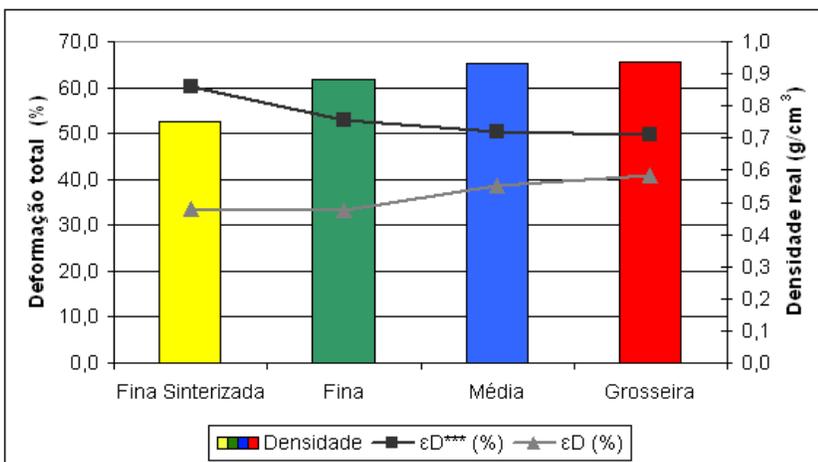
Pode-se observar, no caso do módulo de Young e da tensão do platô, similares tendências de aumento de seus valores com o aumento da densidade da esponja, tanto para os valores teóricos quanto para os experimentais. No caso da deformação até o adensamento total, a estimativa teórica mostra redução do seu valor com o aumento da densidade enquanto os valores experimentais mostram uma tendência ao aumento com o aumento da densidade das amostras. Como comentado anteriormente, este resultado inesperado pode ser, provavelmente, atribuído as grandes dimensões de vazios e maior distância entre paredes celulares, no caso de amostras com poros grosseiros. No caso da estimativa proposta por Ashby, é levada em conta somente a densidade e não a distribuição de massa no interior do material, o que acarretaria obtenção de semelhantes valores de propriedades para diferentes amostras que apresentaram o mesmo teor de vazios, mas distintas dimensões e distribuição de poros e paredes metálicas. As equações propostas consideram arquitetura celular regular ideal, com modelo geométrico de células poligonais de 14 faces; portanto, devem ser utilizadas apenas como uma estimativa de propriedade de esponjas comerciais, nem sempre homogêneas e com arquitetura celular regular e ideal.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.27: Relação densidade x valores teóricos e valores experimentais de propriedades em testes de compressão semi-estáticos, de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de NaCl em diferentes condições: (a) módulo de Young; (b) tensão no platô; (c) deformação total.

Como comentário geral após análise do comportamento mecânico em testes de compressão semi-estáticos, pode ser dito que para aplicação em engenharia, as esponjas fabricadas a partir de pré-formas de partículas finas e médias são mais apropriadas, pois apresentam um comportamento mecânico mais regular. As esponjas produzidas a partir de pré-formas de partículas grosseiras também poderiam ser usadas para aplicações em engenharia, porém, as mesmas apresentam um comportamento mecânico mais irregular, dadas as maiores dimensões de vazios internos. As esponjas produzidas a partir de pré-formas de partículas finas sinterizadas se mostraram mais suscetíveis a irregularidades internas e com paredes de células muitas vezes frágeis. A aplicação de um tipo ou outro de esponja dependerá obviamente das propriedades requeridas no produto.

#### **4.6.3 Testes dinâmicos de compressão - impacto**

Amostras de esponjas produzidas a partir de pré-formas de NaCl não sinterizadas de diferentes granulometrias foram também ensaiadas em testes dinâmicos de compressão tipo *drop test*, para análise de seu comportamento em impacto.

Típicas curvas de carga-tempo são apresentadas na Figura 4.28. Pode-se observar comportamentos típicos de metais celulares, em todos os casos, apresentando reduzida região elástica, baixo módulo de Young, elevada deformação plástica sem alteração significativa da carga, seguida de região de deformação com aumento da carga, no final do ensaio, devido ao adensamento do material após colapso das células.

Os resultados obtidos mostram de maneira geral valores elevados de deformação plástica a reduzidas cargas aplicadas, o que caracteriza elevada capacidade de absorção de energia em impacto, para as esponjas fabricadas em todas as condições testadas no trabalho.

Os resultados obtidos ainda mostram claramente a dependência do comportamento mecânico da esponja com a sua arquitetura interna e densidade. O aumento da densidade, da espessura da parede e dimensões de vazios promovidos pelo aumento da granulometria do agente bloqueador, resulta na redução do platô de deformação plástica e na deformação total, e no aumento da carga necessária para a deformação.

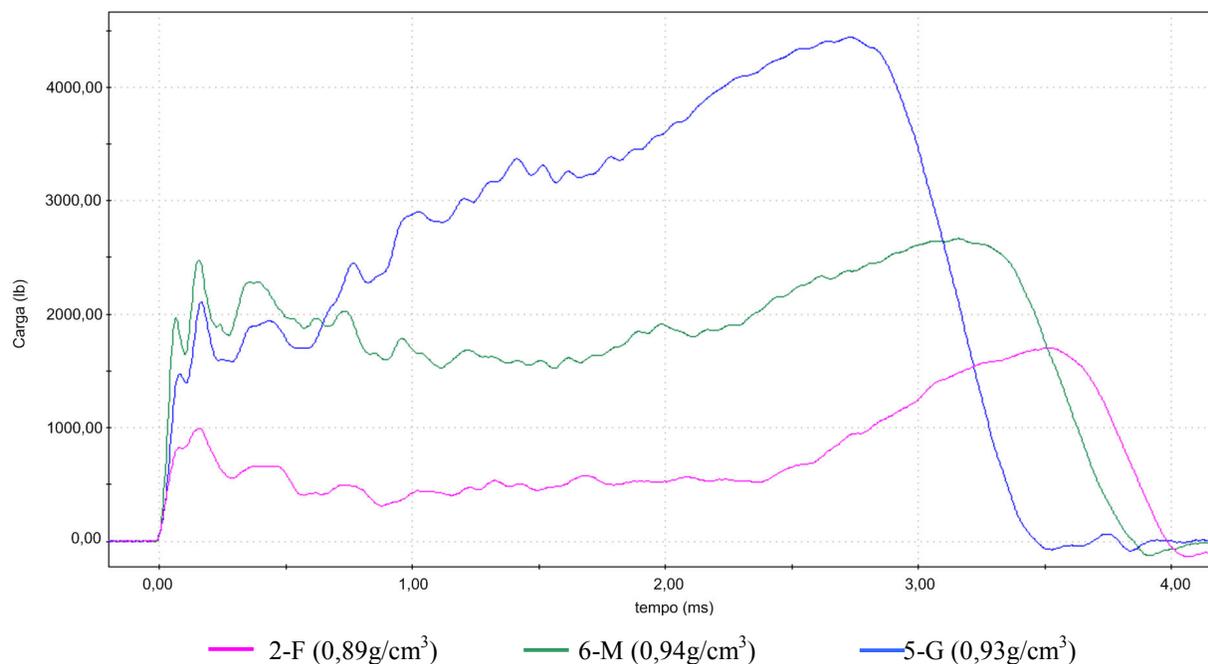


Figura 4.28: Curvas carga-tempo em testes de impacto tipo *drop test*, de esponjas da liga AA2011 fabricadas a partir de pré-formas não sinterizadas de distintas granulometrias.

A energia absorvida no impacto também parece aumentar para as amostras mais densas de porosidade grosseira, no entanto a maior carga requerida para a deformação plástica e a ocorrência de deformação de paredes metálicas (adensamento) antecipado, podem limitar a sua aplicação como absorvedores de impacto.

Pode-se observar que o material produzido a partir de pré-forma de partículas de granulometria fina e que apresenta, portanto, menores dimensões de células, menores espessuras de paredes celulares e menor densidade, apresenta o platô de deformação plástica mais característico e a menores cargas aplicadas. O material produzido a partir de pré-formas de partículas grosseiras apresenta deformação plástica significativa a níveis mais elevados de cargas e não há formação de platô característico; a densificação neste caso ocorre de maneira mais gradual e contínua. O material produzido a partir de pré-formas de partículas de granulometria média, embora com densidade semelhante à esponja mais grosseira, apresenta comportamento intermediário. Das curvas obtidas dos ensaios são extraídos valores de propriedades que caracterizam quantitativamente as esponjas produzidas quanto ao seu comportamento em impacto, os quais são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9: Valores de propriedades mecânicas em ensaios de compressão dinâmicos de esponjas metálicas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas de partículas soltas de distintas granulometrias.

Tipo de pré-forma	Amostra	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Carga máxima (Kg)	$E_a$ até máxima carga (J)	$E_a$ total (J)	$E_a$ /massa (J/g)	Def. até carga máx.(mm)	Def. total (mm)
Fina	2-F	0,89	773,9	45,0	52,2	2,7	13,5*	13,5*
Média	6-M	0,94	1209,0	90,7	101,3	5,2	10,7	12,2
Grosseira	5-G	0,93	2013,7	108,5	119,7	6,25	8,9	9,9

\* amostra rompida no teste (espessura da amostra ~13,5mm).  $E_a$  – energia absorvida

Os valores de energia absorvidos apresentados, em todos os casos, são bastante reduzidos e compatíveis com valores encontrados na literatura para ligas de Al celulares de poros abertos, como, por exemplo, esponjas de Al-Si com densidade de 0,6g/cm<sup>3</sup>, que apresentam valores de energia absorvida da ordem de 5 a 12J/g (IFAM, 2008).

Na Tabela 4.9 pode-se observar que os maiores valores de carga máxima, energia absorvida para máxima carga e energia absorvida total, são obtidos para amostras produzidas a partir de pré-formas de partículas grosseiras; esta condição também apresenta os menores valores de deformação para a energia de impacto imposta, demonstrando maior rigidez para as esponjas de maiores células. A amostra produzida a partir de pré-forma de partículas finas apresenta os menores valores de carga máxima, energia absorvida até máxima carga e energia absorvida total, devido, provavelmente, a sua menor densidade e arquitetura celular mais fina (menores poros e paredes celulares menos espessas). A amostra produzida a partir de pré-forma de partículas médias apresenta valores intermediários, com valor de energia absorvida mais similar à amostra produzida a partir de pré-forma de partículas grosseiras. Os resultados mostram, portanto, que não deve ser tomada isoladamente a influência da densidade, devendo ser levados em conta a distribuição interna de massa, dada pelos valores de espessura de paredes e dimensões de vazios. A Figura 4.29 apresenta graficamente os resultados de propriedade de impacto para as esponjas produzidas a partir de pré-formas em diferentes condições. São também indicados os valores das densidades médias dos diferentes grupos de amostras. Pode-se observar a tendência de aumento da densidade e, de modo oposto, a redução da deformação, com o aumento da densidade, como comentado anteriormente.

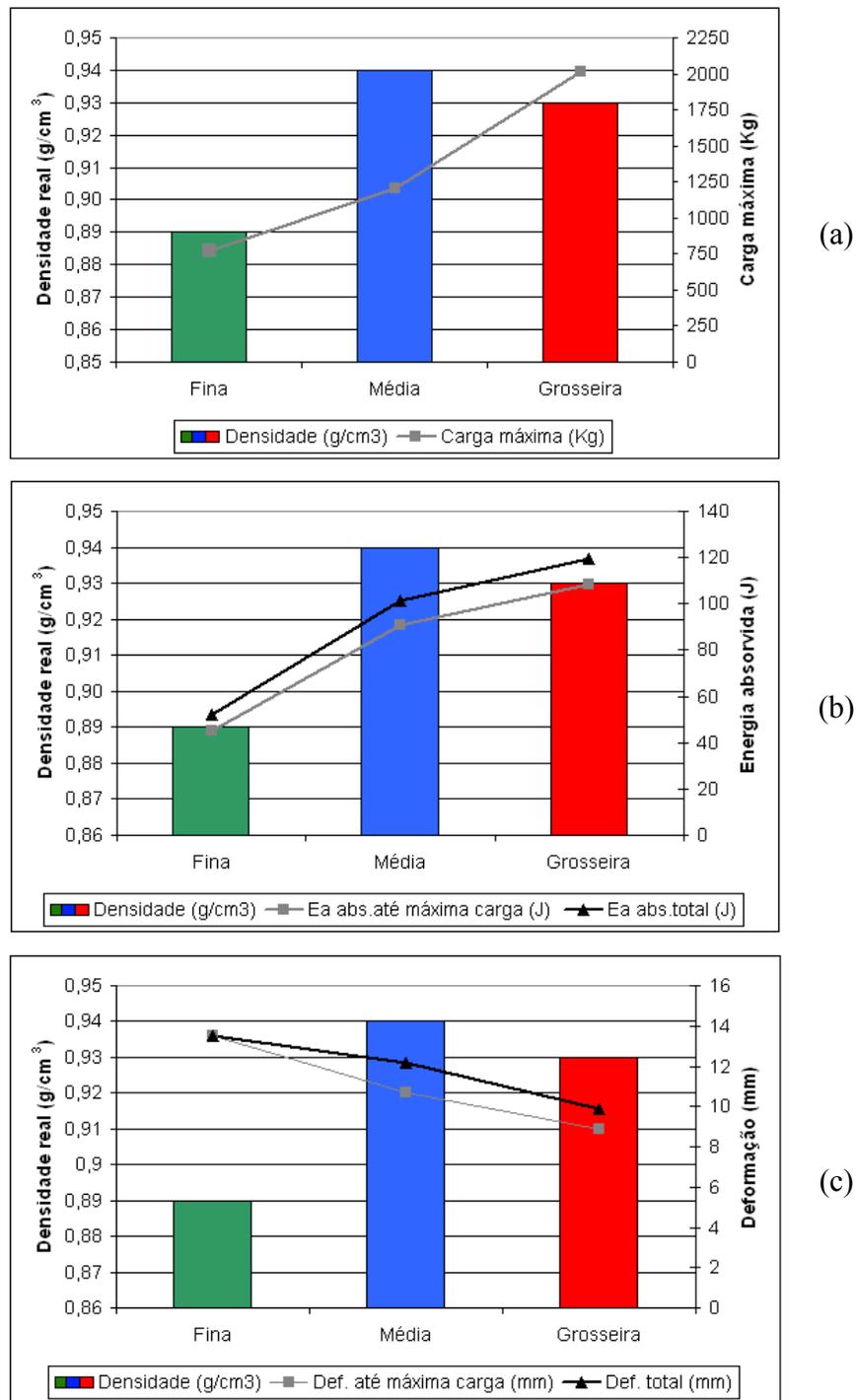


Figura 4.29: Relação densidade x valores experimentais de propriedades em compressão dinâmica de esponjas da liga AA2011 produzidas a partir de pré-formas não sinterizadas de distintas granulometrias: (a) carga máx.; (b) Energia absorvida até máx. carga e energia absorvida total; (c) deformação até máx. carga e deformação total.

Um interessante aspecto observado nos ensaios dinâmicos de compressão é o comportamento da carga aplicada na região de deformação plástica antes do adensamento total do material: como pode ser observado na Figura 4.30, relativo ao ensaio de impacto em amostras de esponjas com granulometria grosseira, há acentuada variação local da carga aplicada, produzindo picos de descarregamento sucessivos na curva carga x tempo. Estes picos podem estar associados ao colapso de células; a frequência e a altura dos picos são reduzidas para as amostras de média porosidade e ainda mais para amostras de fina porosidade, conforme se pôde observar na Figura 4.28. Em trabalhos futuros pretende-se avaliar a ocorrência destes picos e sua relação com a arquitetura celular da esponja. A Figura 4.30 ainda comprova a repetibilidade dos resultados obtidos para amostras de semelhantes características.

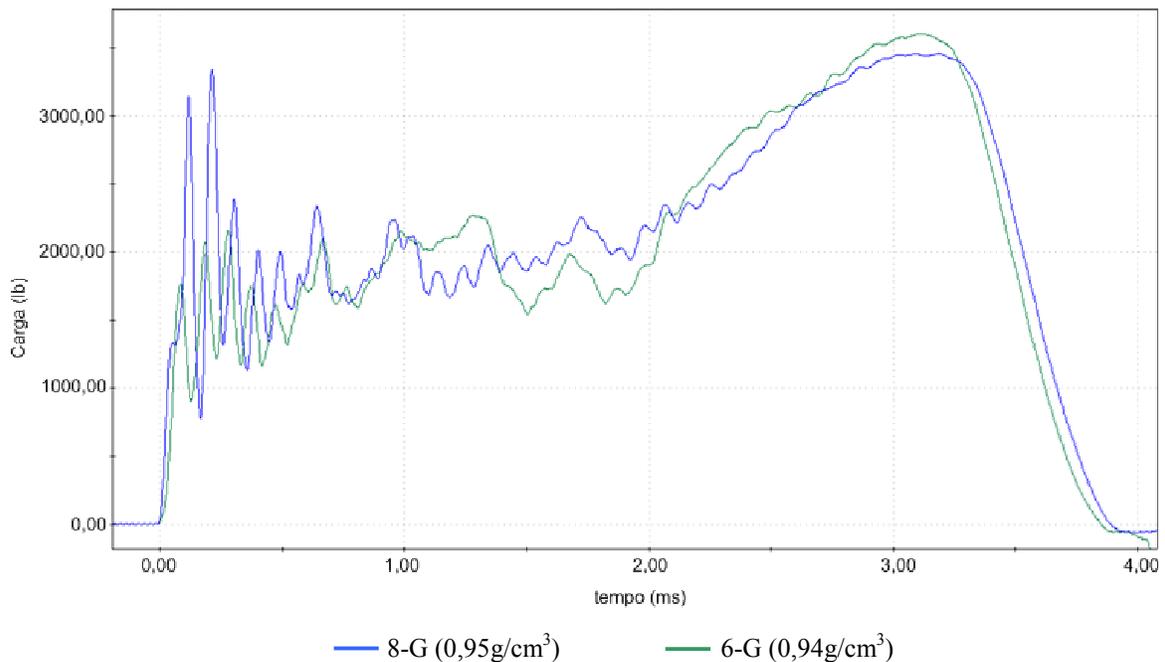


Figura 4.30: Curvas de variação da carga-tempo obtidas dos ensaios dinâmicos de compressão de esponjas da liga AA2011, para 2 amostras de densidades semelhantes, fabricadas por pré-formas de partículas grosseiras de NaCl.

## Capítulo 5

### Conclusões gerais

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir, levando em conta as condições empregadas, que:

- ✓ O processo de tixoconformação é eficiente para a produção de esponjas da liga AA2011, pois, possibilita o preenchimento de vazios entre partículas de pré-formas de NaCl de distintas granulometrias, sinterizadas ou não. No processo de infiltração parece haver separação das fases líquida e sólida da pasta, o que, por um lado, facilita a penetração do metal na pré-forma e por outro lado pode promover a formação de rebarbas;
- ✓ As forças e pressões necessárias para efetivação do processo de tixoconformação são bastante reduzidas, quando comparadas com as requeridas em processos de conformação convencionais no estado sólido, e não variam significativamente em função da condição da pré-forma de agente bloqueador utilizada;
- ✓ De um modo geral, todas as esponjas obtidas, nas diferentes condições de pré-formas utilizadas, apresentam qualidade aceitável. A consistência da qualidade obtida depende da condição de processamento: o uso de pré-formas de partículas de agente bloqueador de dimensões médias e grosseiras fornecem esponjas de qualidade mais consistente, isto é, nestes casos há melhor repetibilidade do processo. O uso de pré-formas de partículas finas resultam em maior heterogeneidade na qualidade de esponjas obtidas em diferentes ensaios; a

repetibilidade é mais comprometida no caso do emprego de pré-formas de partículas finas sinterizadas, devido a dificuldade do controle da infiltração do metal nestes casos;

- ✓ Através de imagens de tomografias de raios-X nota-se, de um modo geral, uma tendência à obtenção de melhor qualidade interna para amostras produzidas por pré-formas não sinterizadas de sal. As possíveis falhas de preenchimento ocorrem, possivelmente, devido à compactação do agente bloqueador, no caso de pré-formas não sinterizadas, ou devido à ocorrência de uma maior área de contato entre as partículas sinterizadas, no caso de pré-formas sinterizadas, ambas as ocorrências dificultam a infiltração da pasta semi-sólida nos vazios das partículas do agente bloqueador;
- ✓ As esponjas produzidas apresentam, em todos os casos, células com geometria e dimensões compatíveis com a geometria e dimensões das partículas de NaCl da pré-forma utilizada; a dispersão de dimensões dos vazios é, no entanto, maior do que a dispersão de dimensões de partículas do agente bloqueador, devido à ocorrência de compactação de partículas, levando ao aumento do poro e de fratura, levando à redução da dimensão do poro;
- ✓ O aumento das dimensões das partículas do agente bloqueador leva ao aumento da espessura da parede celular: as esponjas produzidas a partir de pré-formas sinterizadas apresentam as menores espessuras de paredes enquanto as produzidas a partir de pré-formas de partículas grosseiras não sinterizadas apresentam as maiores espessuras;
- ✓ A microestrutura das esponjas metálicas são constituídas em todos os casos de fase  $\alpha$  com morfologia de dendritas equiaxiais ou rosetas e fase  $\theta$  ( $\text{CuAl}_2$ ) em contornos. Esta microestrutura não constitui uma típica estrutura de pasta tixotrópica e indica que na operação de tixoconformação há separação das fases líquida e sólida, sendo preferencialmente infiltrado o líquido;
- ✓ A densidade das esponjas metálicas é da ordem de 30% do valor da densidade da liga maciça, o que significa a presença de cerca de 70% de vazios, em todos os casos. Observa-se tendência ao aumento da densidade com aumento das dimensões das partículas do agente bloqueador empregado, o que ocasiona aumento da espessura de paredes metálicas;

- ✓ Cálculos teóricos estimativos mostram que a condutividade térmica das esponjas é significativamente inferior (10x) ao da liga maciça, enquanto a difusividade térmica é significativamente superior (4x). Os valores para estas propriedades tendem a aumentar com o aumento das partículas de agente bloqueador empregado o que ocasiona o aumento da espessura de paredes metálicas e das dimensões de vazios;
- ✓ O comportamento em testes de compressão semi-estáticos, das esponjas produzidas nas condições utilizadas no trabalho é claramente dependente da sua densidade: o aumento da densidade leva ao aumento da tensão de início de deformação plástica e da tensão do platô. Amostras mais densas apresentam aumento da inclinação da curva na região do platô, isto é, aumento da tensão aplicada durante a deformação plástica, indicando densificação mais gradual e contínua. Amostras com densidades similares, mas de distintas espessuras de paredes de células, apresentam resistência à deformação crescente com o aumento da espessura da parede. De uma forma geral, todas as amostras produzidas em distintas pré-formas apresentam curvas bem características de metais celulares típicos;
- ✓ Em ensaios de compressão dinâmicos as esponjas metálicas apresentam comportamento típico de metais celulares: reduzida região elástica, baixo módulo de Young, elevada deformação plástica sem alteração significativa da carga seguida de região de deformação com aumento da carga, no final do ensaio, devido ao adensamento do material após colapso das células. A energia total absorvida no impacto, em todos os casos, apresenta valores típicos de materiais celulares empregados como absorvedores (da ordem de 3 a 6J/g). A energia total absorvida aumenta e a deformação no regime plástico diminui com o aumento da granulometria das partículas do agente bloqueador utilizado, isto é, com o aumento da espessura de paredes celulares e de dimensões de poros;
- ✓ Os resultados obtidos ainda permitem concluir que as propriedades de um material celular não devem ser relacionadas exclusivamente com a sua densidade, pois esta não reflete a distribuição de massa no interior do material; devem ser levados em conta os valores de espessura de paredes celulares e dimensões e distribuição de vazios.

## Referências Bibliográficas

- AKIYAMA, S.; UENO, H.; IMAGAWA, K.; KITAHARA, A.; NAGATA, S.; MORIMOTO, K.; NISHIKAWA, T.; ITOH, M. Foamed Metal and Method of Producing. US Patent 4.713.277, 1987.
- ANDERSEN, O.; STEPHANI, G. Solid-State and Deposition Methods. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.56-70.
- ASHBY, M.F.; EVANS, A.G.; FLECK, N.A.; GIBSON, L.J.; HUTCHINSON, J.W.; WADLEY, H.N.G. Metal Foams: A Design Guide. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 250p.
- BABCSÁN, N.; BANHART, J.; LEITLMEIER, D. Metal Foams – Manufacture and Physics of Foaming. In: International Conference "Advanced Metallic Materials". 2003, Smolenice, Slovakia, p.5-15.
- BABJAK, J.; ETTTEL, V.A.; PASERIN, V. Method of Forming Nickel Foam. US Patent, 4.957.543, 1990.
- BANHART, J. Functional Applications. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.313-320.
- BANHART, J. Manufacture Routes for Metallic Foam. Journal JOM, 52 (12), p.22-27, 2000.

BANHART, J. Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foam. *Journal Progress in Materials Science*, 46, p.559-632, 2001.

BANHART, J. What are Cellular Metals and Metal Foams? Disponível em: <<http://www.metalfoam.net/intro.html>>. Acesso em 5 de novembro de 2007.

BANHART, J.; ASHBY, M.F.; FLECK, N.A. Special Issue on Cellular Metals. *Journal of Advanced Engineering Materials*, v.4, n.10, p.711-711, 2002.

BAUMEISTER, J; SCHRADER, H. Methods for Manufacturing Foamable Metal Bodies. U.S. Patent, 5.151.246, 1992.

BAUMGÄRTNER, F.; DUARTE, I.; BANHART, J. Industrialization of Powder Compact Foaming Process. *Journal Advanced Engineering Materials*. 2(4), p.168-174, 2000.

BERG, A.; MAYSENHÖLDER, W.; HAESCHE, M. Noise Reduction by Open-Pore Aluminium Foams. In: *Proceeding of MetFoam*, p. 487-492, 2003.

BOONYONGMANEERAT, Y.; DUNAND D. C. Ni-Mo-Cr Foams Processed by Casting Replication of Sodium Aluminate Preforms. *Journal Advanced Engineering Materials*. n.4, v.10, p.379-383, 2008.

BRAY, J.W. Aluminum Mill and Engineered Wrought Products. In: *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, v.2, ASM Handbook, ASM International, 1992. p.118-222.

CALLISTER, W.D. Propriedades Mecânicas dos Metais. In: *Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução*. 5nd ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. cap.6, p.78-106.

CURRAN, D.C. Aluminium Foam Production using Calcium Carbonate as a Foaming Agent. 2003. 188f. Thesis Phd. - Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge, Cambridge, UK.

- DAOULD, A. Synthesis and Characterization of Novel ZnAl<sub>22</sub> Syntactic Foam Composites via Casting. *Journal Materials Science and Engineering*. a.488, p.281–295, 2008.
- DEGISCHER, H.P. Material Definitions, Processing, and Recycling. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. *Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.5-7.
- DELBIN, D. Estudo da Viabilidade de Produção de Esponjas da Liga A2011 a Partir do Estado Semi-Sólido. 2006. 110f. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- DUARTE, I.; BANHART, J. A Study of Aluminium Foam Formation - Kinetics and Microstructure. *Journal Acta. Materialia*, 48, p.2349-2362, 2000.
- ERG. Materials and Aerospace Corporation. Oakland, USA, product information “Duocel”. Disponível em: <[http://www.ergaerospace.com/project\\_gallery.htm](http://www.ergaerospace.com/project_gallery.htm)>. Acesso em 28 de novembro de 2007.
- ERG. Materials and Aerospace Corporation. Oakland, USA, product information “Duocel”. Disponível em: <<http://www.ergaerospace.com/foamproperties/aluminumproperties.htm>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2008.
- FRISCHMANN, W. European Patent Application. EP, 0666129, 1995.
- GOODALL, R.; DESPOIS, J.F.; MARMOTTANT, A.; SALVO, L.; MORTENSEN, A. The Effect of Preform Processing on Replicated Aluminium Foam Structure and Mechanical Properties. *Journal Acta Materialia*, v.54, p.2069–2073, 2006.
- IFAM. Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research. In Bremen, Alemanha, product information. Disponível em: <[http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design\\_guide\\_lines\\_english\\_V14.pdf](http://www.ifam.fraunhofer.de/2801/leichtbauwerkstoffe/metallschaume/design/design_guide_lines_english_V14.pdf)>. Acesso em 22 fevereiro de 2008

INCO. Special Product and Inco Limited. Ontario, Canada, product information “Incofoam”.  
Disponível em: < <http://www.incosp.com/products/incofoam/>>. Acesso em 5 de março 2008.

JIN, I.; KENNY, L.D.; SANG, H. Method of Producing Lightweight Foamed Metal. US Patent 4.973.358, 1990.

KAMMER, C. Aluminium foam. TALAT – Training in Aluminium Application Technologies. EAA, Germany, 1999, 24p.

KÖNER, C.; SINGER R.F. Foaming Processes for Al. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.8-14.

KRISZT, B. Characterization of Cellular Metals In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.127-129.

KRISZT, B.; MARTIN, U.; MOSLER, U. Characterization of Cellular and Foamed Metals In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.130-145.

KULKARNI, S. N.; RADHAKRISHNA, K. Computation of Solidification of Al–4.5%Cu Alloy Casting Cast in CO<sub>2</sub>-sand mould. Journal Engineering Manufacture. v.220. part-B, p.1117-1129, 2006.

LIDA, K.; MIZUNO, K.; KONDO, K. US Patent 4726444, 1998.

MAIRE, E.; SALVO, L. X-ray Tomography Applied to the Characterization of Metal Foam. Proceeding of MetFoam, p.281-287, 2003.

MALCOLMA, A.A.; LEONG H, Y.; SPOWAGE, A.C.; SHACKLOCK A.P. Image Segmentation and Analysis for Porosity Measurement. Journal of Materials Processing Technology. 192–193, p.391–396, 2007.

- MIYOSHI, T.; ITOH, M.; AKIYAMA, S.; KITAHARA, A. ALPORAS Aluminium Foam: Production Process, Properties, and Applications. *Advanced Engineering Materials*, 2(4), p.179-183, 2000.
- MOTZ, C.; PIPPAN, R.; KRISZT, B. Mechanical Properties and Determination Characterization of Cellular Metals In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. *Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.183-202.
- MURRAYA, N.G.D.; DUNAND, D.C. Effect of Initial Preform Porosity on Solid-State Foaming of Titanium. *Journal Materials Research Society*. v.21, n.5, p.1175-1188, 2006.
- MURRAY, J.L. Al-Cu (Aluminium-Copper) Phase Diagram. 1983. In: *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, v.2, ASM Handbook, ASM International, 1992. p.118-222.
- NPL, National Physical Laboratory. Workshop on Metal Foam, 22<sup>nd</sup> March, 2000. Disponível em: <[www.npl.com.uk/materials/metal\\_foam/pdf\\_files/foamworkshop2c.pdf](http://www.npl.com.uk/materials/metal_foam/pdf_files/foamworkshop2c.pdf)>. Acesso em 16 de outubro de 2007.
- OH, I.-H.; NOMURA, N.; MASAHASHI, N.; HANADA, S. Mechanical Properties of Porous Titanium Compacts Prepared by Powder Sintering. *Journal Scripta Materialia* 49, p.1197–1202, 2003.
- PIPPAN, R. Metal Properties In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. *Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications*. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.179-183.
- ROBERT, M.H.; DELBIN, D. Manufacturing of Cellular A2011 Alloy from Semi-Solid State. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. v. 24, p.115-122, 2007.
- ROVIRA, M.M. Forjamento da liga AA2011 no estado semi-sólido: Estudo do processo e do produto. 2000. 194f. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SAN MARCHI, C.; DESPOIS, J.F.; MORTENSEN, A. Fabrication and Compressive Response of Open-Cell Aluminium Foams with sub-Millimeter Pores. In: EUROMAT 1999, Munich. Symposium on Metal Matrix Composites and Metallic Foam. Munich: Wiley-VCH, 2000. v. 5, p.34-39.

SAN MARCHI, C.; MORTENSEN, A. Infiltration and the Replication Process for Producing Metal Sponges. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.43-56.

SAN MARCHI, C.; MORTENSEN, A. Deformation of Open-Cell Aluminium Foam. Journal Acta. Materialia, v.49, p.3959-3969, 2001.

SEAC international B. V. Krimpen, Netherlands, Product data sheet of “Recemat” and (<http://www.seac.nl>), 1998. In: BANHART, J.; Manufacture, Characterization and Application of Cellular Metals and Metal Foam. Journal Progress in Materials Science, 2001. p.559-632.

SHINKO-WIRE, Co. Japan, product information “Alporas”. Disponível em: <<http://www.shinko-wire.co.jp/product/alporas2.html>>. Acesso em 27 de novembro de 2007.

SIMANCIK, F.; KOVACIK, J. Electrical, Thermal, and Acoustic Properties of Cellular Metals In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.215-241.

SIMANCIK, F.; KOVACIK, J. Porosity in Complex 3D-Parts Prepared from Aluminium Foam. In: BANHART, J. Metal Foams. Bremen: MIT-Verlag, 1997, p.171-176

SIMANCIK, F. The Strange World of Cellular Metals. In: DEGISCHER, H.P.; KRISZT, B. Handbook of Cellular Metals – Production, Processing, Applications. Weinheim: Wiley-VCH, 2002. p.1-4.

SOLÓRZANO, E.; HIRSCHMANN, M.; RODRIGUEZ-PEREZ, M.A.; KÖRNER, C.; SAJA, J.A. Thermal Conductivity of AZ91 Magnesium Integral Foams Measured by the Transient Plane Source Method. Journal Materials Letters. p.1-3, 2008.

SONG, Y. H; SEON, H.G; SOO, P.H.; JEONG, M.J.; HUR, B.Y. Fabrication of Near Net Shape Metallic Foam via Plaster Mould. *Journal Mater. Sci. Technol.* v.24, n.3, p.335-329, 2008.

SOSNICK, B.; Process for Making Foamlike Mass of Metal. US Patent, 2.434.775, Jan.1948.

SWARS, H. German Patent Application 36 19 360, 1987.

TOROBIN, L.B. Method for Making Hollow Porous Microspheres. US Patent, 4.671.909, 1987.

WADLEY, N.G.H. Cellular Metals Manufacturing. *Journal Advanced Engineering Materials*, v.4, n.10, p.726-733, 2002

WEISE, J; STANZICK, H; BANHART, J. Semi-solid Processing of Complex-Shaped Foamable Material. In: Banhart, J.; Fleck, N.A.; Mortensen, A. *Cellular Metals and Metal Foaming Technology*. Berlin: MIT-Verlag, 2003. p.169-174.

YAMADA, Y.; SHIMOJIMA, K.; SAKAGUCHI, Y.; MABUCHI, M.; NAKAMURA, M.; ASAHINA, T. Processing of an open-Cellular AZ91 Magnesium Alloy with a Low Density of 0.05 g/cm<sup>3</sup>. *Journal of Materials Science Letters*, 18, p.1477-1480, 1999.

ZHAO, C.Y.; TASSOU, S.A.; LU, T.J. Analytical Considerations of Thermal Radiation in Cellular Metal Foams with Open Cells. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. v.51, p.929-940, 2008.

ZHAO, C.Y.; LU, T.J.; HODSON, H.P.; JACKSON, J.D. The Temperature Dependence of Effective Thermal Conductivity of open-Celled Steel Alloy Foams. *Journal Materials Science and Engineering*. v.367, p.123–131, 2004.