

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Francioni
Gomes Pinheiro E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 08/07/2011
Maria Helena Robert
ORIENTADOR

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

**Análise da fabricação e utilização de componente de motor
empregando tixoinfiltração.**

Autor: Francioni Gomes Pinheiro
Orientador: Maria Helena Robert

Francioni Gomes Pinheiro

Análise da fabricação e utilização de componente de motor empregando tixoinfiltração.

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Profissional da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Manufatura

Orientador: Maria Helena Robert

Campinas
2011

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

P655a Pinheiro, Francioni Gomes
Análise da fabricação e utilização de componente de motor empregando tixoinfiltração. / Francioni Gomes Pinheiro. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

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

1. Ligas de alumínio. 2. Metais - Fundição. 3. Celular. 4. Tixotropia. 5. Infiltração. I. Robert, Maria Helena. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Analysis of the manufacturing, by thixoinfiltration, and utilization of an engine component.

Palavras-chave em Inglês: Aluminum alloys, Metal casting, Cellular, Thixotrops, Infiltration

Área de concentração: Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Anselmo Eduardo Diniz, Jose Angelo Rodrigues Gregolin

Data da defesa: 08/07/2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

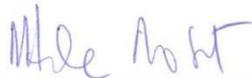
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

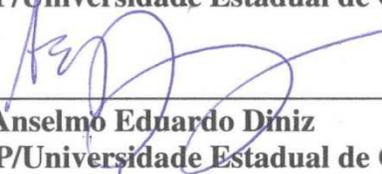
**Análise da fabricação e utilização de componente de motor
empregando tixoinfiltração.**

Autor: Francioni Gomes Pinheiro
Orientadora: Maria Helena Robert

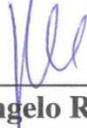
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



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



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
UNICAMP/Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Jose Angelo Rodrigues Gregolin
UFSCar/Universidade Federal de São Carlos

Campinas, 8 de julho de 2011.

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha amada **Lisiane**, pelo apoio, ajuda, incentivo e compreensão durante toda esta jornada, sempre de forma amigável, carinhosa e admirável.

Aos meus pais, **Vonir e Enilda**, pelo incentivo e estímulo em todos os momentos.

Aos meus sogros, **Osni e Marlene**, pelo carinho e ajuda.

Aos meus amigos pelos momentos alegres que vivemos juntos.

Agradecimentos

Agradeço de forma especial a todos que me ajudaram durante o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria Helena Robert, pelos ensinamentos, compreensão, atenção, ajuda e oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Trevisan e ao Dr. Ronaldo Gonçalves dos Santos, pelas análises realizadas no laboratório do CEPETRO da UNICAMP.

Aos colegas da UNICAMP: Tadeu, José Vitor, Gata, Alexandre e Robin.

À MWM International Motores Diesel, pela oportunidade dada em estudar nesta excelente universidade.

Aos colegas e amigos da turma de Manufatura.

Aos grandes amigos de viagem, estudos e risos: Renato, Daniel, Laércio e Carlos. Foi muito bom!

*“Devemos julgar um homem
mais por suas perguntas do
que por suas respostas.”
Voltaire (1694-1778)*

Resumo

PINHEIRO, Francioni. G.. *Análise da fabricação e utilização de componente de motor empregando tixoinfiltração*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 96 p. Dissertação (Mestrado).

Este trabalho tem por objetivo avaliar a viabilidade técnica da fabricação e utilização do componente de motor (espaçador do ventilador) empregando tecnologia de materiais celulares. Foi empregado processo de tixoinfiltração em pré-formas pós-removíveis de NaCl em estado livre, tendo como matéria prima a mesma liga A356.0 da peça atual (fabricada por fundição convencional). Foi projetada e construída uma nova matriz metálica para se adaptar ao novo tipo de processo. Foram analisados parâmetros de processo como a granulometria do agente bloqueador (NaCl), a proporção da liga e do agente bloqueador e a distribuição de massa do alumínio disposto na matriz. Análises da qualidade dos componentes porosos e dos benefícios na manufatura demonstraram que o processo de tixoinfiltração é tecnicamente viável, com a obtenção de produtos com peso da ordem de 50% do peso do produto convencional, e dimensões finais adequadas, eliminando processos de usinagem e reduzindo tempo de fabricação do componente. Testes de montagem e funcional demonstraram bom desempenho quando submetido às condições de compressão exercidas na montagem e em teste preliminar em motor em funcionamento. Conclui-se que o processo é viável, que produtos mais leves podem ser obtidos em menor tempo de fabricação, mas ajustes visando maior resistência à compressão são necessários e servem como sugestão para futuros estudos.

Palavras-chave: alumínio, tixoinfiltração, materiais celulares, liga A356.0.

Abstract

PINHEIRO, Francioni. G.. *Analysis of the manufacturing, by thixoinfiltration, and utilization of an engine component*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2011. 96 p. Dissertação (Mestrado).

This study aims to evaluate the feasibility of the manufacturing and utilization of an engine component (spacer fan) produced by cellular materials technology. The process used was thixoinfiltration of the alloy A356.0 into pre-forms of loose NaCl particles. This alloy is currently used for the production of the conventional cast parts. It was design and built a new metallic tooling to fit the new process. Process parameters were analyzed as the particle size of the space holder (NaCl), the ratio of metal/space holder weight content and the alloy mass distribution inside the metallic tooling. Analysis of the quality of porous parts produced and the benefits in the new process for their manufacture showed that the thixoinfiltration process is technically feasible, resulting products with 50% lowest weight if compared with current cast part and with near net shape, eliminating machining operations and reducing the manufacturing time. Assembly and functional tests showed good performance of the porous part when submitted to conditions of compression, due to assembly and preliminary engine running test. It is possible to conclude that the thixoinfiltration process is feasible, lighter products with reduced manufacturing time can be obtained, but further process adjustments to aim compression resistance are necessary and it is left here as a suggestion for future studies.

Keywords: aluminum, thixoinfiltration, cellular materials, alloy A356.0.

Sumário

Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvi
Nomenclatura.....	xvii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivos.....	3
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 Materiais celulares.....	5
2.1.1 Propriedades mecânicas	8
2.1.2 Comportamento em compressão	8
2.1.3 Comportamento em impacto	11
2.1.4 Comportamento em tração	12
2.1.5 Propriedades físicas.....	12
2.1.6 Comportamento térmico.....	14
2.2 Aplicações.....	15
2.3 Processo de tixoinfiltração para fabricação de materiais celulares.....	18
2.4 Liga metálica alumínio-silício.....	20

2.4.1	Considerações gerais	20
2.4.2	Diagrama de fases binário Al-Si.....	22
2.5	Conceitos sobre tixohabilidade de uma liga metálica	23
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS		25
3.1	Componente em estudo	25
3.2	Caracterização da liga empregada no trabalho.....	31
3.2.1	Composição química	31
3.2.2	Microestrutura como fundida	32
3.2.3	Análise da tixohabilidade da liga	32
3.3	Agente bloqueador.....	33
3.4	Fabricação do componente por tixoinfiltração	35
3.4.1	Definição da geometria do componente	35
3.4.2	Projeto e construção da matriz para tixoinfiltração	36
3.4.3	Equipamentos utilizados.....	40
3.4.4	Processo de produção de amostras por tixoinfiltração - operação padrão	41
3.5	Caracterização do produto poroso obtido.....	47
3.5.1	Qualidade interna e caracterização estrutural	47
3.5.2	Caracterização física - densidade	48
3.5.3	Avaliação teórica das propriedades mecânicas e térmica	48
3.5.4	Análise de desempenho do produto poroso em trabalho	49
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		51
4.1	Caracterização da liga A356.0.....	51
4.1.1	Análise da tixohabilidade da liga A356.0.....	51
4.1.2	Microestrutura da liga A356.0 na condição original	57
4.2	Produção de componentes por tixoinfiltração	58
4.2.1	Aspectos gerais do processo de tixoinfiltração.....	58
4.2.2	Produtos obtidos e aspectos gerais das amostras	62
4.2.3	Caracterização dos produtos obtidos – componentes porosos.....	72
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....		88

Sugestões para trabalhos futuros	90
Referências	91

Lista de Figuras

Figura 2.1: Estruturas de diferentes tipos de metais celulares (BANHART, 2007).....	6
Figura 2.2: Curva tensão x deformação para materiais celulares em teste de compressão (adaptado de KAMMER, 1999).	9
Figura 2.3: Fator de perda (η) para espumas de AlSi com diferentes densidades (BANHART, 1996).....	13
Figura 2.4: Tipos de aplicações dos materiais celulares conforme os tipos de poros (BANHART, 2002).....	15
Figura 2.5: Campos de aplicação de materiais celulares com função estrutural no setor automotivo (BANHART, 2001).....	17
Figura 2.6: Exemplo de estrutura do corpo de um automóvel com o uso de materiais celulares como reforço estrutural (DEGISCHER, 2002).	18
Figura 2.7: Diagrama em equilíbrio de fases da liga Al-Si com destaque para o percentual de 7% de silício que corresponde ao teor da liga AlSi7Mg. Fonte: L. Murray e A. J. Mcalister, 1984 (ASM HANDBOOK VOL. 3, 1992).....	23
Figura 3.1: Organograma das etapas do trabalho experimental.	26
Figura 3.2: (a) Foto do motor MS (MWM INTERNATIONAL MOTORES DIESEL, Folheto Técnico, 2008); (b) desenho de montagem do espaçador do ventilador de motor selecionado para estudo (2); ventilador (1); componentes de fixação (3 e 4).....	27
Figura 3.3: Espaçador do ventilador motor MS - 1: (a1) lado do ventilador, (b1) lado da polia e (c1) vista lateral (altura 25 mm).	29
Figura 3.4: Espaçador do ventilador motor MS - 2: (a2) lado do ventilador, (b2) lado da polia e (c2) vista lateral (altura 30 mm).	29
Figura 3.5: Espaçador do ventilador motor MS - 3: (a3) lado do ventilador, (b3) lado da polia e (c3) vista lateral (altura 41 mm).	30
Figura 3.6: Espaçador do ventilador motor 229 - 4: (a4) lado do ventilador, (b4) lado da polia e (c4) vista lateral (altura 28 mm).	30

Figura 3.7: Partículas de sal (NaCl) de diferentes granulometrias, utilizadas como agentes bloqueadores: (a) fina; (b) média; (c) grosseira.....	34
Figura 3.8: (a) Espaçador genérico do ventilador de motores MS; (b) espaçador do motor Série 229 selecionado para o trabalho.	35
Figura 3.9: Dimensões propostas para a amostra do espaçador do ventilador a ser fabricado por tixoinfiltração.	36
Figura 3.10: Esquema representativo da montagem do conjunto da matriz e componentes, utilizado nos testes de tixoinfiltração.	37
Figura 3.11: Desenho e foto da camisa externa (a).	38
Figura 3.12: Desenho e foto da tampa auxiliar (b).	38
Figura 3.13: Desenho e foto da tampa principal bipartida (c).	39
Figura 3.14: Desenho e foto da camisa interna (e).	39
Figura 3.15: Desenho e foto da base (f).	39
Figura 3.16: Desenho e foto do macho central (g).	40
Figura 3.17: Prensa hidráulica e sistema de aquisição de dados utilizados nos ensaios de tixoinfiltração.	41
Figura 3.18: Fluxograma de operações-padrão para o preparo e montagem do ferramental para a operação de tixoinfiltração para a fabricação do espaçador do ventilador (condição 2).....	42
Figura 3.19: Esquema representativo do conjunto de ferramental utilizado para a fabricação do espaçador do ventilador.	43
Figura 3.20: Esquema representativo mostrando posicionamento de termopar de controle da temperatura da liga no processo de tixoinfiltração.	44
Figura 3.21: Fluxograma da operação de tixoinfiltração padrão para a fabricação do componente poroso espaçador do ventilador.	45
Figura 3.22: Parâmetros variados nos testes de produção das amostras porosas do espaçador do ventilador.	46
Figura 3.23: Testes de desempenho: (a) ventilador com o espaçador utilizado no teste e (b) motor com o conjunto espaçador e ventilador montados.....	50
Figura 4.1: Curva de resfriamento simples (T x t) durante solidificação da liga A356.0 em molde de SiC (taxa de resfriamento de 30°C/min).	52
Figura 4.2: Resultados de ensaios de DSC da liga A356.0, em condições de aquecimento e resfriamento, com taxa de 5°C/min: a) energia/massa x t; b) T x t; 1) aquecimento; 2) resfriamento.	53
Figura 4.3: Detalhe do pico relativo a fusão da liga A356.0 obtida via DSC; aquecimento com taxa de 5°C/min. Incluso tabela de valores de áreas parciais sob pico x T.....	55
Figura 4.4: Pico endotérmico de fusão da liga A356.0 obtido via DSC (a) e da variação da fração líquida com a temperatura (b). Destaque para janela de tixoconformação sugerida.	56

Figura 4.5: Microestrutura da matéria-prima, liga A356.0 fundida em molde metálico.....	57
Figura 4.6: Curva de aquecimento média do conjunto matriz + liga A3.56.0 + agente bloqueador, durante ensaio para tixoinfiltração. Linha preta é a média de três leituras e os círculos azuis são o desvio padrão de cada ponto medido.....	59
Figura 4.7: Microestrutura da liga A356.0 em estado tixotrópico aquecida a 610°C.	61
Figura 4.8: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria fina. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.	63
Figura 4.9: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.	64
Figura 4.10: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria grosseira. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.	65
Figura 4.11: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média e com a utilização do macho central. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.	67
Figura 4.12: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%.	68
Figura 4.13: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre partículas de NaCl de granulometria média; relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%. Massa da liga distribuída em duas camadas: 40% na camada interna e 60% sobre as partículas do agente bloqueador.	70
Figura 4.14: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre partículas de NaCl de granulometria média; relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%. Massa da liga distribuída em duas camadas: 20% na camada interna e 80% sobre as partículas do agente bloqueador.	71
Figura 4.15: Imagens por tomografia de raios-X de componente poroso da liga A356.0 fabricados com distribuição de massa da liga em duas camadas, uma no interior e outra sobre partículas de agente bloqueador.	73
Figura 4.16: Densidade real e peso de componentes – espaçador de ventilador – da liga A356.0 fundidos (Peças 1, 2, 3 e 4) e porosos (Componentes 1 e 2). Colunas: densidade real; linha: peso. Peças 1, 2, 3 e 4 se referem aos produtos apresentados nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e Componentes 1 e 2 se referem aos componentes apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13.	75
Figura 4.17: Microestruturas típicas de paredes celulares de componentes porosos da liga A356.0, fabricados por tixoinfiltração. (a, b, c) região intermediária; (d) região inferior da peça.	78
Figura 4.18: Teste de montagem de componente poroso da liga A356.0 fabricado por tixoinfiltração. Polia do motor (a), ventilador e espaçador (b), parafusos M8 (c) e conjunto montado (d).	83

Figura 4.19: Foto de componente poroso da liga A356.0 fabricado por tixoinfiltração, após teste de desempenho com motor em funcionamento. 85

Figura 4.20: Imagens por tomografia de raios-X de componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração; componente submetido a teste de desempenho com motor em funcionamento. 87

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Características físicas da liga de Al A356.0 (ASM HANDBOOK VOL. 2, 1995)....	21
Tabela 2.2: Composição da liga de Al A356.0 (ASM HANDBOOK VOL. 2, 1995); teores em peso.....	21
Tabela 3.1: Dados geométricos de distintos tipos de espaçadores do ventilador utilizados nos motores MS e Série 229.	31
Tabela 3.2: Composição química da liga A356.0 empregada nos experimentos, obtida por espectrometria de absorção atômica (% em peso).....	31
Tabela 4.1: Valores médios de densidade relativa e teor de porosidade dos componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração em camada de partículas de NaCl.	74
Tabela 4.2: Valores médios da espessura das paredes celulares dos componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração em camada de partículas de NaCl.	76
Tabela 4.3: Valores do módulo de elasticidade (E), tensão de compressão (σ_c) e condutividade térmica (λ) dos materiais porosos de dois distintos componentes da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração, calculados segundo modelos de Ashby (2000).....	81
Tabela 4.4: Valores dos torques de aperto de parafusos de montagem do componente poroso da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração, antes e após teste em motor em funcionamento.....	84

Nomenclatura

Letras Latinas

E	módulo de elasticidade ou módulo de Young	[MPa]
m	massa	[g]
f_L	fração líquida	[%]
f_S	fração sólida	[%]
T	temperatura	[°C]
T_f	temperatura de fusão	[°C]
$T_{liquidus}$	temperatura <i>liquidus</i>	[°C]
$T_{solidus}$	temperatura <i>solidus</i>	[°C]
$T_{ambiente}$	temperatura ambiente	[°C]
v	volume	[cm ³]

Letras Gregas

ρ	densidade	[g/cm ³]
ρ_{real}	densidade real do material	[g/cm ³]
$\rho_{rel.}$	densidade relativa	[%]
λ	condutividade térmica	[cal/cm.s.°C]
λ_n	condutividade térmica normalizada	[%]
λ_s	condutividade térmica material maciço	[cal/cm.s.°C]
α	solução sólida	
β	solução sólida	
ε	deformação	[mm]
σ	tensão	[Pa]

Abreviações/Siglas

Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DEF	Departamento de Engenharia de Fabricação
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
FEM	Faculdade de Engenharia Mecânica
HCl	ácido clorídrico
HF	ácido fluorídrico
HNO ₃	ácido nítrico
MO	microscopia óptica
MS	<i>Medium Speed</i>
NaCl	cloreto de sódio iodado comum (sal)
RPM	rotações por minuto
Si	Silício
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 Introdução

A indústria automobilística representa, atualmente, um dos maiores conjuntos de atividades de negócio do mundo. Essa indústria faz investimentos, incentiva o desenvolvimento de novas tecnologias e direciona o lançamento de novos produtos e processos, servindo como referência a outros setores. Seus consumidores estão cada vez mais exigentes e desejam variadas opções de escolha, tanto na aparência quanto no desempenho de seus veículos. Itens de segurança e de conforto antes considerados como acessórios passaram a ser obrigatórios. Para o atendimento aos novos padrões de conforto, segurança e desempenho, os fabricantes tiveram de acrescentar equipamentos, o que tornou os automóveis mais pesados, gerando a necessidade de motores mais potentes, que consomem mais combustível e, conseqüentemente, emitem mais gases poluentes.

Em contrapartida a essa tendência, as normas que regulamentam as emissões de poluentes automotivos aumentaram suas exigências e a rigidez em seus controles. A sustentabilidade ambiental é exigida em toda a cadeia de manufatura. Rigorosas agências internacionais orientam a não utilização de materiais tóxicos e colocam os fabricantes de veículos e componentes como os responsáveis pelo destino final de seus produtos. Gerar o mínimo possível de impacto ambiental, seja na extração da matéria-prima, na manufatura ou na utilização do produto final, é hoje um dos maiores desafios dos fabricantes de veículos e de componentes automotivos.

Uma das ações para a redução do consumo de combustíveis fósseis (como a gasolina e o óleo diesel), que leva à diminuição da emissão de gases poluentes, é o desenvolvimento de componentes veiculares mais leves, que permitam a redução do peso dos veículos e a utilização

de motores menos potentes e mais econômicos. A partir disso, os novos produtos necessitam trazer em sua composição materiais mais leves e recicláveis, em que a inovação advenha da combinação inteligente de qualidades, como as propriedades físicas e mecânicas. Nessa direção, o alumínio e suas ligas podem ser considerados uma das melhores opções, devido ao baixo peso específico e à facilidade de reciclagem, com processos já desenvolvidos em larga escala. Segundo a Associação Brasileira de Alumínio, ABAL (2008), o setor automotivo e de transportes são os maiores consumidores de alumínio no mundo e o segundo maior consumidor desse metal, no Brasil.

Na busca por produtos inovadores, os materiais celulares estão se tornando uma alternativa no desenvolvimento de estruturas mais leves e resistentes. Segundo Oliveira *et al.* (2007), os metais celulares representam uma nova classe de materiais, ainda não perfeitamente caracterizada. Essa classe apresenta como características principais a combinação de propriedades físicas e mecânicas, como alta rigidez associada a reduzido peso específico e elevada resistência à compressão associada à capacidade de absorção de energia em impactos. Além disso, os metais celulares também são eficientes para a absorção acústica e de vibrações mecânicas (SIMANCIK, 2002).

As ligas de alumínio estão um passo à frente no desenvolvimento de materiais celulares, em comparação com outras ligas como cobre, estanho, chumbo e zinco, por exemplo, que também podem ser utilizadas na forma de materiais porosos. Segundo Banhart (2002), espumas e esponjas de ligas de alumínio têm encontrado aplicações na indústria automotiva devido à sua capacidade de absorção de energia em impactos, sendo utilizadas em partes estruturais e para-choques, por exemplo. Seu reduzido peso e a capacidade de isolamento acústico e térmico também podem ser citados como outros benefícios na utilização desse tipo de material.

Diferentes técnicas têm sido utilizadas, desde os anos 70, para a fabricação de materiais celulares e, mais recentemente, a tixoinfiltração, que consiste no processamento da liga no estado semi-sólido para obtenção de material poroso. No processo de tixoinfiltração, a liga metálica (em geral ligas de alumínio) é infiltrada no estado pastoso tixotrópico em uma pré-forma de partículas de agente bloqueador inerte. O metal penetra nos espaços entre as partículas, que são removidas após sua total solidificação, gerando os poros no produto final.

Pastas metálicas tixotrópicas possuem elevada fluidez ao serem submetidas a tensões, possibilitando a infiltração em espaços reduzidos, o que permite a obtenção de esponjas metálicas, conforme já comprovado por Delbin (2006) e outros (ROBERT *et al.*, 2010, SILVA e ROBERT, 2009). O processo de tixoinfiltração é realizado com temperaturas abaixo da temperatura de fusão total do metal, o que permite afirmar que a infiltração de pastas utiliza uma quantidade menor de energia, em comparação com o processamento da liga em estado líquido. Além disso, o manuseio de ligas metálicas em estado líquido onera significativamente os custos de processo, considerando o fator perigo, em relação ao manuseio da liga em estado pastoso.

O processo de tixoinfiltração, já viabilizado para a produção de esponjas de ligas de alumínio em amostras de geometria simples e de pequenas dimensões, pode ser uma interessante solução para a produção de componentes mais leves para a indústria automotiva.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a viabilidade técnica de fabricação e utilização do componente de motor chamado de espaçador do ventilador, a ser produzido por tixoinfiltração em pré-formas pós-removíveis de NaCl, utilizando a liga de alumínio A356.0 (ASM HANDBOOK VOL. 2, 1995). O componente atualmente empregado é fabricado com a mesma liga, por processo convencional de fundição por gravidade em matriz metálica.

A investigação é movida pelas potenciais vantagens que o processo de fabricação do componente específico teria sobre o processo de fabricação convencional:

- menores temperaturas de trabalho – menores insumos energéticos, melhor controle de processo;
- possibilidade de eliminação de operações de usinagem, com a obtenção de componente *near net shape*;
- redução de peso do componente.

O objetivo geral citado anteriormente compreende os seguintes objetivos específicos:

- análise da tixohabilidade da liga A356.0 – isto é, a possibilidade de emprego desta liga em processos de tixoconformação, no caso, tixoinfiltração. Objetiva-se verificação da possibilidade de manutenção da mesma liga atualmente empregada para a fabricação do componente;
- investigação de variáveis do processo de tixoinfiltração na qualidade do produto obtido. São analisadas as variáveis: granulometria das partículas do agente bloqueador, massa relativa bloqueador/liga metálica e distribuição de massa da liga metálica no arranjo de partículas do bloqueador;
- caracterização física e metalúrgica de componentes porosos produzidos, com relação à densidade, arquitetura interna e microestrutura de paredes celulares;
- avaliação do desempenho de componentes porosos produzidos por tixoinfiltração, através de testes funcionais, na montagem e em funcionamento.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Materiais celulares

Entende-se por metal celular o material composto por uma matriz metálica com vazios em seu interior, os quais podem ser chamados de poros ou células. Para Oliveira (2007), trata-se de uma nova classe de material ainda não perfeitamente caracterizada. Atualmente, uma grande variedade de metais celulares são produzidos industrialmente e comercializados com os nomes de DUOCEL®, INCOFOAM®, ALPORAS®, ALULIGHT® e FOAMINAL®, entre outros. Os estudos e a produção são amplamente desenvolvidos para o alumínio e suas ligas, sendo que outros metais como ferro, cobre, chumbo e zinco também podem ser submetidos aos mesmos processos de produção.

Para melhor entendimento dessa classe de materiais torna-se necessária uma breve classificação dos termos utilizados:

- **Metais celulares:** termo genérico utilizado para descrever um corpo metálico no qual um teor de no mínimo 70% de vazio é disperso. O metal divide-se em células que podem ser fechadas ou abertas. Segundo Degischer (2002), são materiais heterogêneos, formados por matrizes metálicas e vazios ocupando mais de 70% do volume e que podem ser classificados segundo distintos critérios como: a condição da matéria-prima inicial para a produção da porosidade (líquido ou sólido), o processo de fabricação envolvido (sejam estes como fundição, infiltração, espumagem, deposição ou sinterização) e o método de formação dos poros (incorporação de substratos ociosos, substratos removíveis ou gás).

- Espuma metálica: classe especial de metal celular, produzida a partir da espumagem do metal líquido e, portanto, que apresenta uma morfologia restrita. A estrutura resultante é constituída de células fechadas, circulares ou poliédricas, separadas umas das outras por uma fina parede metálica. Popularmente, os metais celulares também são chamados de espumas metálicas, no entanto, o termo “espuma”, em seu sentido original, é reservado para a dispersão de bolhas de gás em um líquido. A morfologia de tal espuma pode ser preservada, fazendo com que o líquido se solidifique, obtendo-se, assim, o que é chamado de “espuma sólida”. Os sólidos celulares podem ser produzidos por outros métodos que não a partir de espumas e se caracterizarem por diferentes morfologias de poros e suas possibilidades de interconexões. Espuma metálica é um termo frequentemente usado para qualquer classe de material metálico de baixa densidade, porém, segundo Banhart (2000), seria corretamente aplicado para a dispersão de bolhas de gás em líquidos.
- Esponja metálica: morfologia de um metal celular normalmente com vazios interconectados entre si, formando uma rede contínua de vazios. Esponjas e espumas não são materiais perfeitos. Uma espuma, por exemplo, pode apresentar paredes rompidas, o que dificulta a sua distinção correta como material de poros fechados (BANHART, 2000). A Figura 2.1 apresenta exemplos de estruturas porosas de metais celulares.

Os materiais celulares apresentam irregularidades em sua estrutura interna. Para definir suas características é necessário conhecer previamente sua arquitetura interna. Por arquitetura entende-se um conjunto de características morfológicas definidas como tipo, tamanho, geometria, arranjo espacial das células e anisotropia (ASHBY *et al.*, 2000).

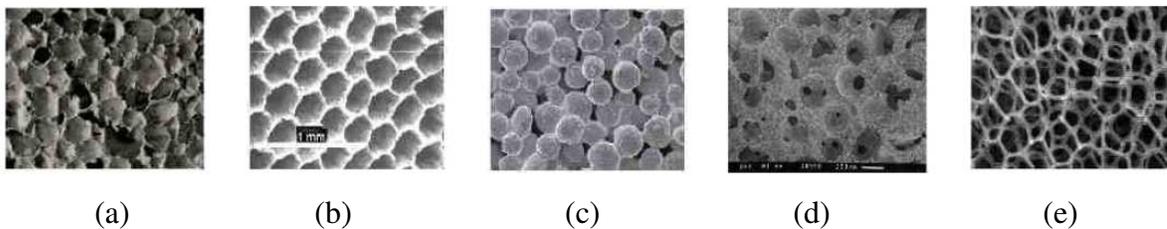


Figura 2.1: Estruturas de diferentes tipos de metais celulares (BANHART, 2007).

Em relação à Figura 2.1, Banhart (2007) descreve a foto (a) como espuma de alumínio, produzida pelo Instituto de Pesquisa IFAM, a foto (b), material ferroso com células que se estendem em uma dimensão, do Instituto de Pesquisas MER, a foto (c), pós de bronze sinterizados que realmente formam uma esponja metálica (também chamados de metais sinterizados), a foto (d), uma esponja de alumínio que também poderia ser chamada de celular, em uma circunstância em que as células estivessem fechadas, e a foto (e), uma esponja de níquel da empresa Inco.

Os métodos utilizados para medir as propriedades mecânicas, físicas e metalúrgicas dos metais celulares são, na maioria das vezes, os mesmos métodos utilizados para metais maciços. Algumas propriedades, como estrutura cristalina, coeficiente de expansão térmica e temperatura de fusão não diferem, pois todos estão relacionados à matéria-prima do componente e não à sua estrutura física. Porém, outras propriedades como módulo de elasticidade ou módulo de rigidez, tensão mecânica, condutividade térmica e elétrica e as propriedades acústicas não dependem somente da densidade, mas também da arquitetura celular do componente (PIPPAN, 2002). Os principais parâmetros que influenciam as propriedades dos metais celulares são, em ordem de importância, segundo Pippan (2002):

- 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.

2.1.1 Propriedades mecânicas

Materiais celulares possuem propriedades mecânicas que podem ser obtidas com outros materiais, algumas vezes até com maior eficiência. Porém, combinações únicas e aparentemente contraditórias, como baixa densidade aliada à alta rigidez e a capacidade de absorver choque com bom amortecimento de vibrações são observados somente nesse tipo de material. Metais celulares são, portanto, promissores em diversas aplicações, nas quais essas muitas funções podem ser combinadas (BANHART, 2002 e DEGISCHER, 2002). As estruturas celulares, sejam elas fechadas ou abertas, determinam o comportamento macroscópico desses materiais, diferenciando-os dos materiais sólidos, tanto mecânica como fisicamente.

2.1.2 Comportamento em compressão

Os materiais celulares possuem baixa resistência à compressão se comparados com materiais sólidos, porém uma das propriedades mais importantes desse tipo de material é a sua capacidade de absorver grandes quantidades de energia em deformação plástica de compressão para uma baixa tensão aplicada. Em compressão, os metais celulares apresentam comportamento bastante típico, no qual sua curva tensão por deformação ($\sigma \times \epsilon$) apresenta ampla faixa de deformação para pequenas variações de tensão. Esse comportamento torna o material celular interessante para aplicações em absorção de energia em que, para uma tensão relativamente baixa, uma elevada deformação pode ser obtida (DEGISCHER, 2002). A Figura 2.2 apresenta uma curva característica de tensão por deformação para materiais celulares.

Neste gráfico, é possível caracterizar três estágios distintos. No primeiro, ocorre o aumento linear da tensão na região de deformação elástica do material e a definição do módulo de elasticidade do material celular. O segundo estágio é caracterizado por uma grande deformação plástica a tensões praticamente constantes, sendo a área sob o platô de deformação plástica a

maior parte da energia absorvida na deformação. No terceiro e último estágio, ocorre o rápido aumento da tensão causado pelo adensamento do material pelo colapso das paredes celulares.

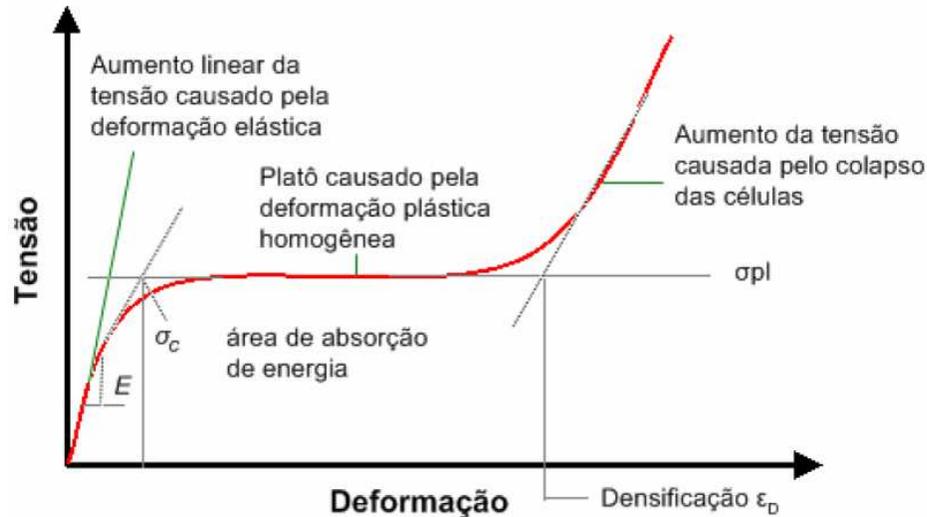


Figura 2.2: Curva tensão x deformação para materiais celulares em teste de compressão (adaptado de KAMMER, 1999).

Através da curva de tensão por deformação podem ser extraídos valores de propriedades mecânicas específicas do material analisado. No início do processo, observa-se uma região de deformação elástica que relaciona a tensão em função da deformação em uma relação linear. A inclinação (coeficiente angular) desse segmento linear corresponde ao módulo de elasticidade do material que está sendo ensaiado, o qual é definido pela Equação 2.1 (DIETER, 1981):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Equação 2.1})$$

onde:

E = módulo de elasticidade ou módulo de Young (MPa)

σ = tensão (MPa)

ε = deformação

Para estruturas celulares, o comportamento em deformação não será uma constante do material, mas irá depender da arquitetura celular do material poroso. Em estruturas formadas por células abertas, o mecanismo principal de deformação será a capacidade de flexão dos vértices e

arestas das células. Já em estruturas de células fechadas, a resistência à compressão será maior devido ao empilhamento das paredes metálicas durante a aplicação de uma determinada tensão. Esse comportamento permite a obtenção de melhores resultados em compressão, com a mesma densidade, se compararmos metais celulares de células fechadas com os metais celulares de células abertas (MOTZ, PIPPAN e KRISZT, 2002).

Segundo Ashby *et al.* (2000), a densidade do metal celular é fator importante para a sua aplicação mecânica. Assim, com o intuito de estimar o módulo de elasticidade para materiais celulares, foi proposto um modelo matemático relacionando a densidade relativa do metal celular com o módulo de Young do metal maciço, podendo ser observado na Equação 2.2.

$$E \approx \alpha_2 \cdot E_S \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^n \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde:

E = módulo de elasticidade ou módulo de Young do metal celular (MPa)

E_S = módulo de elasticidade ou módulo de Young do metal maciço (MPa)

α_2 = fator de correção (varia de 0,1 a 4 para metais celulares)

n = fator de correção ~2

ρ = densidade do metal celular (g/cm^3)

ρ_S = densidade do metal maciço (g/cm^3)

As equações de Ashby *et al.* (2000) apresentadas são aplicadas para materiais celulares compostos por células abertas, nesse caso esponjas metálicas tixoinfiltradas em agente bloqueador. Para a tensão de compressão, o modelo matemático da Equação 2.3 segue o princípio de correlação entre as propriedades mecânicas, densidade e a tensão de compressão do material maciço e do material celular.

$$\sigma_c = n_1 \cdot \sigma_{c,s} \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^{3/2} \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde:

σ_c = tensão de compressão do metal celular (MPa)

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

n_I = fator de correção (varia de 0,1 a 1)

ρ = densidade do metal celular (g/cm^3)

ρ_S = densidade do metal maciço (g/cm^3)

2.1.3 Comportamento em impacto

Os materiais celulares são empregados como absorvedores de impacto. Seu comportamento em impacto é importante devido à sua capacidade de absorver energia mecânica. Nas altas taxas de deformações que podem ocorrer em situações de choque, as propriedades mecânicas da espuma podem ser distintas do comportamento em taxas de deformação mais convencionais. Segundo Dennemann (2000), dois fatores devem ser levados em consideração, sendo o primeiro a massa de inércia das arestas e paredes celulares e, o segundo, a pressão do gás dentro das células, no caso de células fechadas. Ambos os efeitos podem aumentar a tensão aplicada no sistema e, por isso, elevar o patamar de tensão. Na prática, espumas de células fechadas são, em geral, estruturas não completamente fechadas, porque frequentemente contêm alguns defeitos nas paredes celulares, ocasionados pelo processo de produção ou gerados durante o processo de deformação, pelo rompimento das paredes celulares. Sendo assim, o fluxo de gás entre as células passa por esses defeitos, dependendo da taxa de deformação, no qual, a pressão de gás dentro da célula aumenta para uma alta velocidade de deformação e contribui para o aumento da tensão resultante no sistema (PAUL, 2000). 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. Estudos realizados pelo IFAM (*Fraunhofer Institute*) demonstram que materiais celulares em alumínio-silício, com densidade de $0,6 \text{ g/cm}^3$, podem absorver até 9 vezes mais energia que materiais maciços. Os valores de energia absorvida são da ordem de 5 a 12 J/g, sendo sua eficiência de 80 a 85%.

2.1.4 Comportamento em tração

Material celular, sob esforço de tração, possui comportamento elástico na tração similar ao modo de deformação sob compressão, ou seja, através da flexão das arestas das células, em espumas de células abertas, e pela extensão e compressão das paredes das células, em espumas de células fechadas. No estágio de deformação plástica, o mecanismo de deformação em tração diferencia-se significativamente do comportamento em compressão, no qual a deformação é concentrada em regiões fracas do material celular e não são formadas bandas de deformação, exceto durante o estágio final de fratura. O mecanismo final de fratura depende da ductilidade do material do qual a espuma foi produzida (DEGISCHER, 2002).

2.1.5 Propriedades físicas

Para Gibson (1997), estruturas celulares devem ter, no máximo, 30% do valor de densidade se comparadas com o mesmo material maciço, pois materiais com densidade relativa maiores são chamados simplesmente de materiais porosos, como os materiais compactados sinterizados a partir de pó metálico.

As densidades real e relativa são os principais fatores para seleção de material celular. Segundo Gibson (2007), a quantidade e distribuição dos poros é uma das características estruturais mais significativas de materiais celulares, pois há uma clara relação entre densidade, módulo de rigidez e o comportamento em compressão.

Degischer (2002) afirma que a base para qualquer especificação de um material celular é o valor de sua densidade real, que pode ser obtida pela pesagem de uma amostra de volume conhecido, como mostra a Equação 2.4. Para a determinação do valor da densidade relativa, Motz, Pippin e Kriszt (2002) propuseram uma relação entre a densidade do metal maciço e a densidade do metal poroso, conforme apresentado na Equação 2.5.

$$\rho_{real} = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 2.4})$$

$$\rho_{rel.} = \frac{\rho}{\rho_s} \quad (\text{Equação 2.5})$$

onde:

ρ_{real} = densidade real do metal maciço ou metal poroso (g/cm^3)

m = massa da amostra (g)

v = volume da amostra (cm^3)

$\rho_{rel.}$ = densidade relativa (%)

ρ = densidade do metal celular (g/cm^3)

ρ_s = densidade do metal maciço (g/cm^3)

Segundo Han (2003), as propriedades de absorção acústica dos materiais celulares dependem, principalmente, de propriedades como porosidade, morfologia dos poros, tamanho dos poros e resistência ao fluxo de ar. A presença de grande quantidade de vazios cercados por paredes não orientadas torna o material celular interessante para aplicações de proteção acústica.

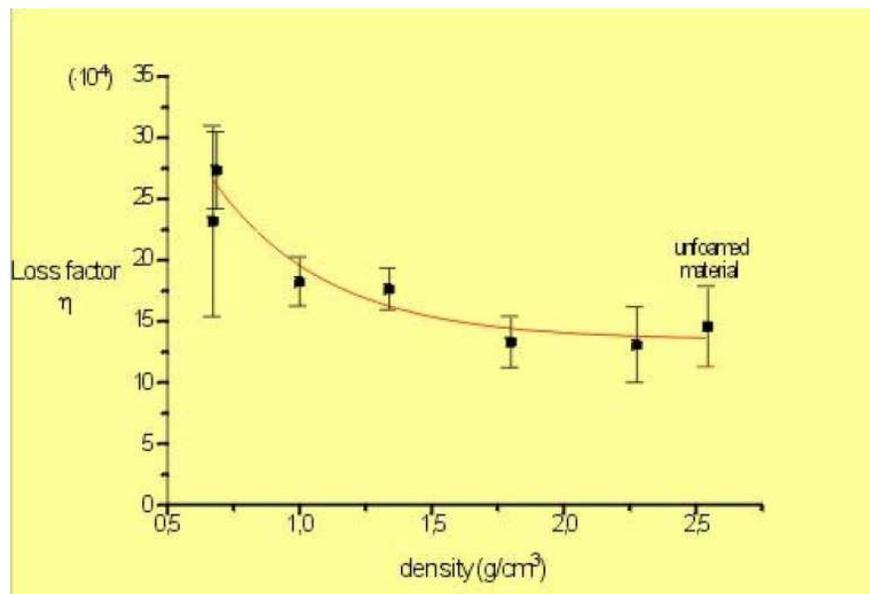


Figura 2.3: Fator de perda (η) para espumas de AlSi com diferentes densidades (BANHART, 1996).

A atenuação de vibrações nos materiais celulares foi analisada em trabalhos pelo IFAM (*Fraunhofer Institute*) e apresentada no gráfico da Figura 2.3, que relaciona o fator de perda (η), ou absorção sonora, com a densidade (g/cm^3). Segundo o estudo, uma espuma metálica de alumínio com densidade de $0,6 \text{ g/cm}^3$ pode ter uma absorção sonora 60% maior do que o alumínio maciço, aproximadamente. Essa absorção gera uma perda de energia mecânica em que cada ciclo de vibração é transformado em calor.

2.1.6 Comportamento térmico

Os materiais celulares possuem um grande potencial para utilização como isolante térmico devido à sua baixa condutividade térmica (ASHBY, 2000). Essa característica das estruturas porosas pode ser atribuída a um conjunto de fatores, como: a condutividade térmica das paredes das células, a condutividade do gás que fica entre os poros e os efeitos de convecção e radiação. A condutividade térmica é significativamente menor para os metais celulares do que para o metal maciço. Para a determinação dessa propriedade, por equacionamento, somente deve ser considerada a condutividade térmica da parede celular, uma vez que as outras contribuições são mínimas, em baixas temperaturas, e a contribuição do gás para essa propriedade é muito 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, portanto, da densidade relativa e pode ser expressa para esponjas metálicas pela Equação 2.6 (ASHBY *et al.*, 2000); e a condutividade térmica normalizada é a relação da condutividade do metal celular pela condutividade do metal maciço, expressa pela Equação 2.7 (SIMANCIK e KOVACIK, 2002).

$$\lambda \approx \lambda_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^q \quad (\text{Equação 2.6})$$

$$\lambda_n \approx \frac{\lambda}{\lambda_s} \quad (\text{Equação 2.7})$$

onde:

λ = condutividade térmica do metal celular (cal/cm.s.°C)

λ_s = condutividade térmica do metal maciço (cal/cm.s.°C)

λ_n = condutividade térmica normalizada (%)

ρ = densidade do metal celular (g/cm³)

ρ_s = densidade do metal maciço (g/cm³)

q = fator de correção (varia de 1,65 a 1,80 para os metais celulares)

2.2 Aplicações

Segundo Banhart (2001), o desenvolvimento de um adequado material celular para uma aplicação específica depende de muitas condições, como a morfologia dos poros (abertos ou fechados), a quantidade de poros, as dimensões dos poros, a liga utilizada ou o estado da microestrutura exigida, a viabilidade do processo de produção de perfis ou de placas constituídas somente do material celular ou compostos com material maciço, a viabilidade econômica devido ao custo de produção e a capacidade de produção em massa.

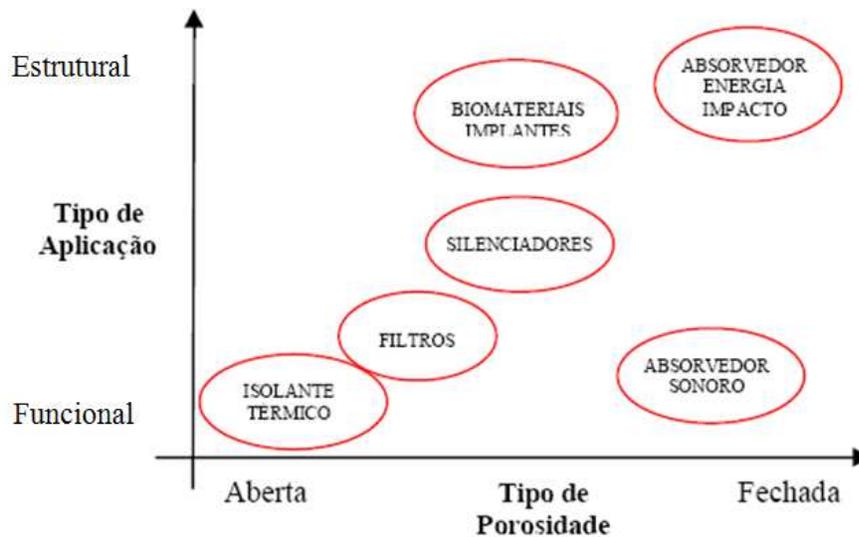


Figura 2.4: Tipos de aplicações dos materiais celulares conforme os tipos de poros (BANHART, 2002).

Na Figura 2.4, Banhart (2002) apresenta os grupos de materiais celulares de acordo com o tipo de porosidade e com o tipo de aplicação, sendo esta funcional ou estrutural. Nota-se que os materiais celulares constituídos de poros abertos são utilizados como trocadores de calor (aplicação funcional). Já em uma aplicação estrutural, como absorvedores de energia, os materiais celulares requerem poros fechados. Também são apresentados, na figura, os tipos de aplicações intermediárias, como em filtros, silenciadores, implantes biomédicos e outros.

A indústria automotiva tem se mostrado um dos campos mais promissores para a utilização dos materiais celulares e um dos melhores caminhos para a viabilização econômica, através da produção em escala industrial. A crescente demanda por segurança no setor automotivo fez os fabricantes buscarem materiais que possam proporcionar resistência mecânica e, ao mesmo tempo, serem leves o bastante para viabilizar sua utilização sem prejudicar o desempenho, com baixo consumo, por exemplo. Algumas aplicações, funcional e estrutural, serão brevemente apresentadas abaixo.

Aplicações funcionais como:

- filtros de retenção de partículas sólidas: utilizado para a separação de partículas líquidas dispersas em um gás e para a separação de partículas sólidas ou fibras dispersas em um líquido. Possíveis aplicações para o primeiro tipo incluem a filtração de fumaça de diesel ou a remoção de água em linhas de ar e, para o segundo, a remoção de levedo de cerveja ou óleo contaminado. Segundo Banhart (2001), os metais celulares possuem uma combinação dessas propriedades, que não são apresentadas pelos materiais utilizados tradicionalmente;
- controladores de fluxo de fluidos: segundo Essenmann (1998), materiais porosos podem ser usados para controle de fluxo de líquido e gases. Espumas metálicas já estão sendo utilizadas como orientadores de fluxo em túnel de vento (ERG, 1996) ou distribuição de fluxo em válvulas (SEAC, 1998);
- purificadores de água: segundo Degischer (2002), os materiais celulares metálicos podem ser usados para reduzir as concentrações de íons indesejáveis dissolvidos na água.

Aplicações estruturais como:

- absorvedores de energia: materiais celulares são excelentes absorvedores de energia, sendo esse comportamento evidenciado pela curva $\sigma \times \varepsilon$, já apresentada na Figura 2.2, a qual possui um extenso patamar de deformação plástica (GIBSON, 1997);
- atenuadores de ruído: aplicações como componentes para proteção acústica em que a frequência de ressonância de uma estrutura de material celular é geralmente deslocada para baixas frequências, em comparação com a utilização de um material convencional, reduzindo ruídos e amortecendo vibração de máquinas e veículos (BANHART, 1996).

A Figura 2.5 apresenta as possíveis áreas de utilização de materiais celulares na indústria automobilística. Propriedades como baixa densidade, resistência mecânica com elasticidade e isolamentos térmico e sonoro, são desejados em um mesmo componente multifuncional pelas áreas de desenvolvimento de produtos.

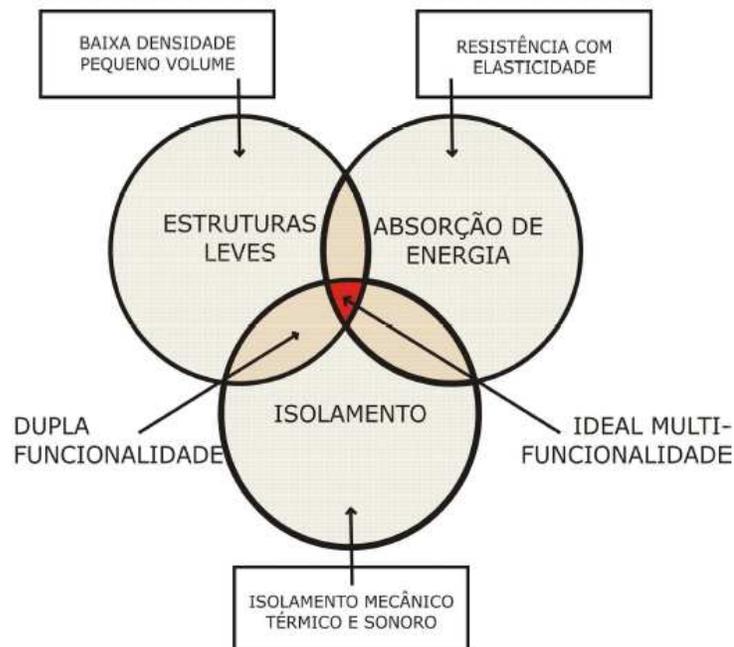


Figura 2.5: Campos de aplicação de materiais celulares com função estrutural no setor automotivo (BANHART, 2001).

Na Figura 2.6, são apresentados exemplos de aplicação de materiais celulares no pára-choque dianteiro, nos eixos laterais frontais, nas soleiras, nos eixos laterais traseiros, nos pilares da cobertura e nos pilares laterais de um automóvel, buscando proporcionar uma maior segurança para os passageiros em caso de colisões e a redução do peso do automóvel sem perda de espaço interno.

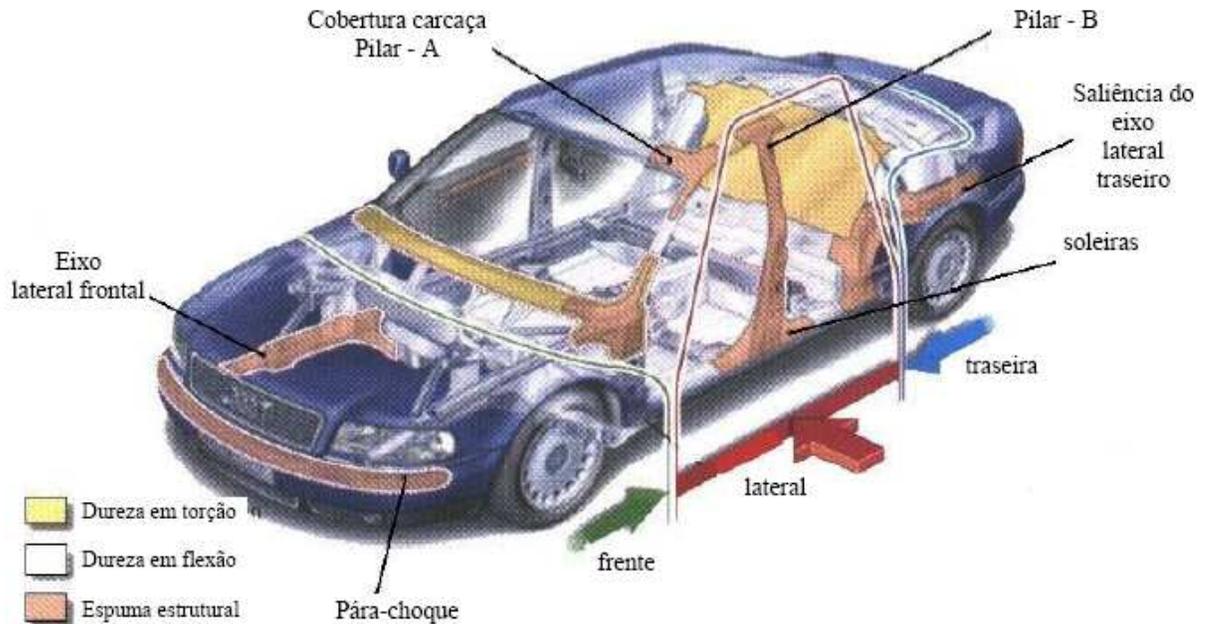


Figura 2.6: Exemplo de estrutura do corpo de um automóvel com o uso de materiais celulares como reforço estrutural (DEGISCHER, 2002).

2.3 Processo de tixoinfiltração para fabricação de materiais celulares

Um dos processos utilizados para a produção de materiais celulares é a tixoinfiltração em agentes bloqueadores. Essa tecnologia consiste na possibilidade de produção de componentes a partir de uma liga metálica no estado pastoso ou semi-sólido, na qual a pasta é comprimida em um molde metálico que contém uma quantidade pré-determinada de agente bloqueador, fazendo com que a liga infiltre-se entre as partículas do agente bloqueador, podendo este ser removido, resultando em um produto poroso e muito próximo da forma final.

O processo de tixoinfiltração é realizado com ligas metálicas em estado pastoso, chamadas de pasta tixotrópica, geralmente obtida por processo conhecido como Fusão Parcial Controlada, que consiste em aquecer o material a partir do estado sólido até temperaturas superiores a $T_{solidus}$ e mantê-lo nesta temperatura por um determinado tempo, para a promoção de modificações estruturais que resultem na estrutura globular requerida (ROBERT, 1993). Nessas condições, o sólido se transforma em uma pasta caracterizada por uma mistura de partículas sólidas globulares interconectadas entre si e envolvidas em um meio líquido. Essa estrutura, se mantida em repouso, apresenta alta viscosidade, mas a aplicação de tensões pode promover a ruptura das ligações entre os glóbulos, permitindo o escoamento da pasta com muito menos esforço do que seria necessário para escoar um material no estado sólido, mesmo que aquecido a altas temperaturas (FLEMINGS, 1976).

Agentes bloqueadores se constituem, por exemplo, de grãos de materiais orgânicos ou inorgânicos, que podem ser esferas de argila, areia, vidro, polímeros ou sais solúveis, inertes no metal líquido e de fácil remoção através de dissolução, queima, etc. A forma e o tamanho do agente bloqueador utilizados definem as características físicas dos poros do produto final.

O processo de tixoinfiltração permite apenas a produção de estruturas de poros abertos e interconectados, também conhecidos como esponjas metálicas. A utilização de ligas no estado semi-sólido para a fabricação de esponjas metálicas apresenta vantagens se comparada com os processos que empregam ligas no estado líquido, conforme comentado a seguir:

- redução no gasto de energia por necessitar de temperaturas apenas para a fundição parcial da liga;
- aumento da produtividade através do menor tempo de solidificação;
- maior vida útil dos moldes devido a temperaturas menores de trabalho;
- redução nas etapas do processo por ser um produto próximo à forma final (*near net shape*);

- menor possibilidade de interações e reações do metal com o agente bloqueador – maior flexibilidade na escolha do agente bloqueador.

2.4 Liga metálica alumínio-silício

2.4.1 Considerações gerais

O componente selecionado para estudo é fabricado na liga A356.0 (ASM - *American Society for Metals* - HANDBOOK VOLUME 2, 1995) ou ISO AlSi7Mg, sendo constituída basicamente de Al, 7% em peso de Si e ainda teores de Mg entre 0,2 e 0,45%. Como este trabalho é um estudo de viabilidade técnica de fabricação do componente selecionado por um processo alternativo à fundição convencional, para a produção de componentes porosos de baixo peso, a liga utilizada é a mesma liga A356.0. Desse modo, é possível a análise comparativa dos dois tipos de componentes, o fundido convencional e o proposto.

Além disso, outros fatores justificam a utilização desta liga, como:

- apresenta um razoável intervalo de temperaturas entre as linhas $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$, valor que permite um adequado controle dos parâmetros operacionais durante o processo no estado semi-sólido;
- disponibilidade, por ser uma das ligas mais utilizadas no mercado automotivo, principalmente em processo de fundição por gravidade. De maneira geral, é utilizada em aplicações nas quais a alta resistência mecânica é desejada (ASM HANDBOOK VOL. 3, 1992);
- apresenta boas propriedades mecânicas e físicas, como baixo peso, resistência à corrosão, resistência mecânica, alta fluidez no estado líquido, resistência à formação de trincas à quente na solidificação.

Algumas características físicas da liga de trabalho podem ser encontradas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Características físicas da liga de Al A356.0 (ASM HANDBOOK VOL. 2, 1995).

Peso específico	2,69
Densidade (g/cm ³)	2,685
Intervalo de solidificação aproximado (°C)	560 - 610
Condutividade elétrica (% IACS)	40
Condutividade térmica a 25°C (cal/cm.s.°C)	0,36
Coeficiente de expansão térmica por °C x 10 ⁻⁶	20-100°C = 21,4
	20-300°C = 23,4

A Tabela 2.2 apresenta a composição química da liga de Al A356.0, segundo especificado pela ASM – *American Society for Metals*.

Tabela 2.2: Composição da liga de Al A356.0 (ASM HANDBOOK VOL. 2, 1995); teores em peso.

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Mn	Zn	Outros
Balanço	6,50 a 7,50	0,20 a 0,45	0,60 máx.	0,25 máx.	0,25 ref.	0,35 ref.	0,35 ref.	0,15 ref.

Segundo Warmuzer (2004), o emprego da liga de Al é determinado por suas propriedades físicas (as quais dependem de sua composição química) e propriedades mecânicas (as quais dependem tanto da composição química quanto da microestrutura). A composição química é resultado da combinação de elementos de liga adicionados ao Al puro, sendo, nesse caso, o Si o principal elemento. A adição de Si ao Al resulta no aumento da resistência mecânica e na diminuição da fragilidade a quente, ou seja, há aumento da resistência à ruptura a quente e aumento da fluidez da liga, para teores crescentes até o ponto eutético com 12,6% de Si (OLIVER; GAVINET, 1987). Esse aumento de fluidez beneficia o escoamento do metal, permitindo que o fundido assumam geometrias complexas. Além disso, o Si melhora a usinabilidade das ligas de Al (FUOCO, 1994). Em geral, cada processo de fundição segue uma determinada faixa ideal de percentual de Si. Para processos com resfriamento lento, como fundição de precisão, molde de gesso e molde de areia, o percentual mais utilizado é de 5% a 7%

de Si em peso; para moldes permanentes, é de 7% a 9% e, para injeção em alta pressão, de 8% a 12%. As bases destas recomendações são as relações entre a taxa de resfriamento, a fluidez e o percentual de eutético, os quais influenciam o modo de solidificação e, portanto, a correta alimentação do fundido (MATTOS, 2009).

2.4.2 Diagrama de fases binário Al-Si

O diagrama de fases binário Al-Si é apresentado na Figura 2.7. Em destaque, a composição da liga contendo 7% Si. Pode-se observar que o sistema apresenta uma reação eutética a 577°C, na qual o líquido com composição 12,6% Si se transforma no constituinte eutético $\alpha + \text{Si}$.

A liga contendo 7% Si é, portanto, hipoeutética e apresenta $T_{\text{solidus}} = 577^\circ\text{C}$ e T_{liquidus} da ordem de 620°C. As seguintes transformações de fase podem ocorrer a partir do resfriamento do líquido:

- a temperaturas superiores a 620°C, tem-se somente a fase líquida com composição homogênea Al-7% Si. O elemento Si se apresenta totalmente em solução no líquido;
- no resfriamento, ao ser atingida a T_{liquidus} (620°C), é iniciada a formação dos primeiros cristais da fase sólida - solução sólida primária α (Al com cerca de 1,0% Si), com estrutura cúbica de face centrada (CFC). À medida que o resfriamento prossegue, há o crescimento dos cristais da solução sólida α (em geral crescimento dendrítico), enquanto o líquido remanescente se enriquece de Si, até que a 577°C, é atingido o limite de solubilidade do Si no Al líquido. Nesta situação, ocorre a reação eutética $\text{Liq.} \rightarrow \alpha + \beta$, com a formação, portanto, do constituinte eutético formado pelas fases α e Si.

Em condição “como fundida”, à temperatura ambiente, a liga A356.0 é constituída pelas seguintes fases: cerca de 40% de solução sólida α (primária) e de 60% de constituinte eutético. Esse eutético é composto de 88% de solução sólida α e 12% da fase β (Si puro). A fase eutética se apresenta nos contornos da fase α , isto é, nos espaços interdendríticos da fase primária.

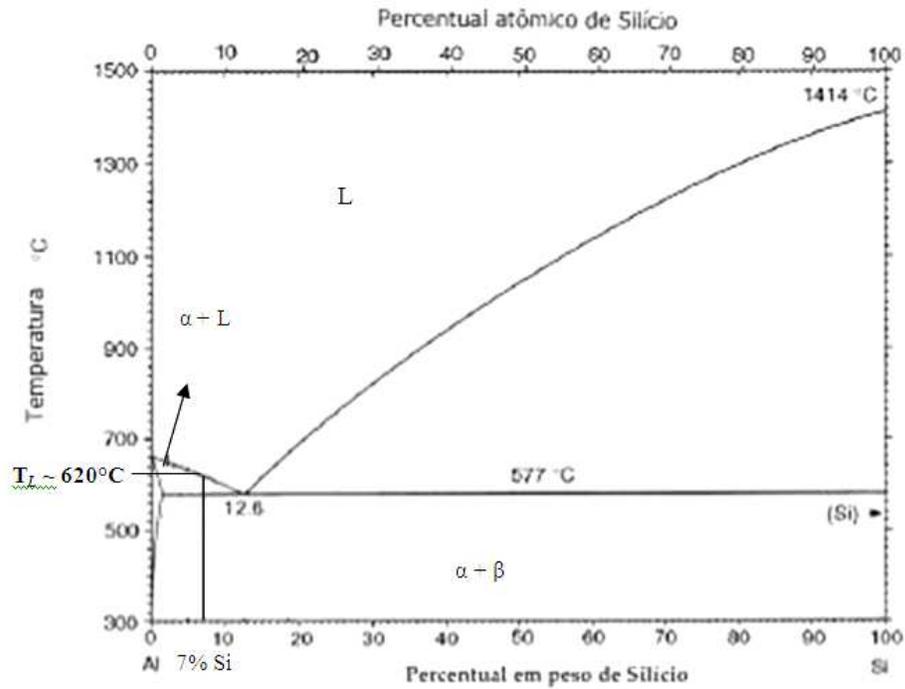


Figura 2.7: Diagrama em equilíbrio de fases da liga Al-Si com destaque para o percentual de 7% de silício que corresponde ao teor da liga AlSi7Mg. Fonte: L. Murray e A. J. Mcalister, 1984 (ASM HANDBOOK VOL. 3, 1992).

2.5 Conceitos sobre tixohabilidade de uma liga metálica

A habilidade de uma determinada liga metálica de sustentar o estado pastoso tixotrópico durante o processamento é chamada de tixohabilidade. A avaliação da tixohabilidade das ligas pode ser feita a partir de diferentes análises, como as transformações de fases que ocorrem no material no seu aquecimento ou resfriamento, via curvas de resfriamento simples, análise térmica diferencial ou, ainda, através de simulação utilizando *softwares* de cálculos termodinâmicos. A partir dos dados obtidos, é possível a determinação de temperaturas de transformações, como as temperaturas $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$, bem como a construção de curvas de variação da fração líquida em função da temperatura.

Segundo Atkinson (2000), alguns fatores para definir a tixohabilidade de uma liga metálica podem ser citados, como:

- o intervalo de solidificação entre a temperatura $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ deve ser suficiente para possibilitar o controle da relação entre a fração líquida e sólida na pasta durante todo o processamento. Assim, amplos intervalos de solidificação favorecem a tixohabilidade do material. No entanto, são indicativos de elevada suscetibilidade a formação de trincas de contração no resfriamento do material;
- a sensibilidade da fração líquida com a temperatura (dFl / dT) no interior da zona pastosa deve ser reduzida, pois altos valores resultam em significativo aumento da fração líquida com uma pequena variação de temperatura, o que dificulta o controle do processamento da pasta.

Para Cristofolini (2009), altas taxas de aquecimento ou resfriamento a que a liga é submetida até o estado semi-sólido diminuem a temperatura $T_{solidus}$ e aumentam a temperatura $T_{liquidus}$, aumentando o intervalo de solidificação e, portanto, aumentando a tixohabilidade.

A determinação prévia da tixohabilidade de uma liga é fundamental para a análise da potencialidade desse material ao processamento no estado semi-sólido.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho trata do estudo da viabilidade de produção de um determinado componente selecionado – espaçador de ventilador de motor de trator – por uma nova tecnologia, de modo a obter o componente na forma de esponja metálica, buscando, portanto, a redução de seu peso. Neste capítulo, são apresentados os materiais, os equipamentos e a metodologia experimental utilizados para a fabricação de amostras do componente especificado e para a sua caracterização quanto à qualidade interna e externa (presença de defeitos), física (densidade), metalúrgica (microestruturas de paredes celulares) e, ainda, quanto ao seu desempenho em serviço.

O processo de fabricação investigado envolve a infiltração da liga metálica no estado semi-sólido tixotrópico em pré-formas pós-removíveis de agentes bloqueadores. Após infiltração, a remoção da pré-forma gera os poros ou células do material, no caso, uma esponja metálica. Na Figura 3.1, é apresentado um organograma geral das etapas desenvolvidas no trabalho. A seguir, são apresentadas as etapas, detalhadamente.

3.1 Componente em estudo

Entre as famílias de motores produzidos pela MWM International Motores Diesel estão os chamados motores MS e Série 229, produtos desenvolvidos para serviços pesados, em aplicações como tratores, pulverizadores e geradores industriais. O componente em estudo neste trabalho, chamado de espaçador do ventilador, é montado nesses motores e sua principal função é adequar

a distância entre as pás do ventilador e as polias que ficam instaladas na parte frontal do propulsor.

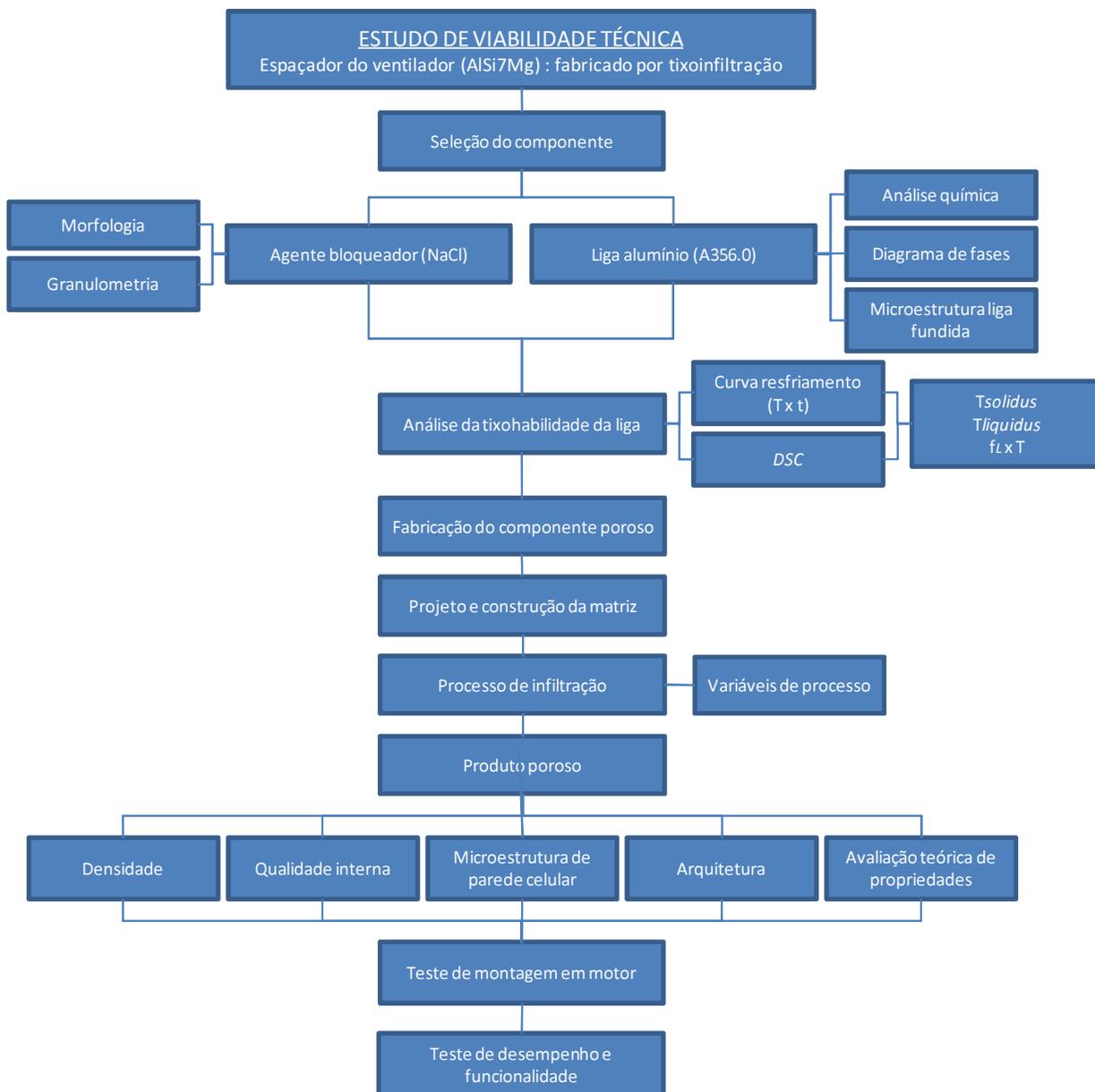


Figura 3.1: Organograma das etapas do trabalho experimental.

A Figura 3.2 (a) apresenta o motor MS mencionado, com indicação da localização do componente em estudo, enquanto a Figura 3.2 (b) apresenta, com mais detalhes, o esquema representativo da montagem deste componente.

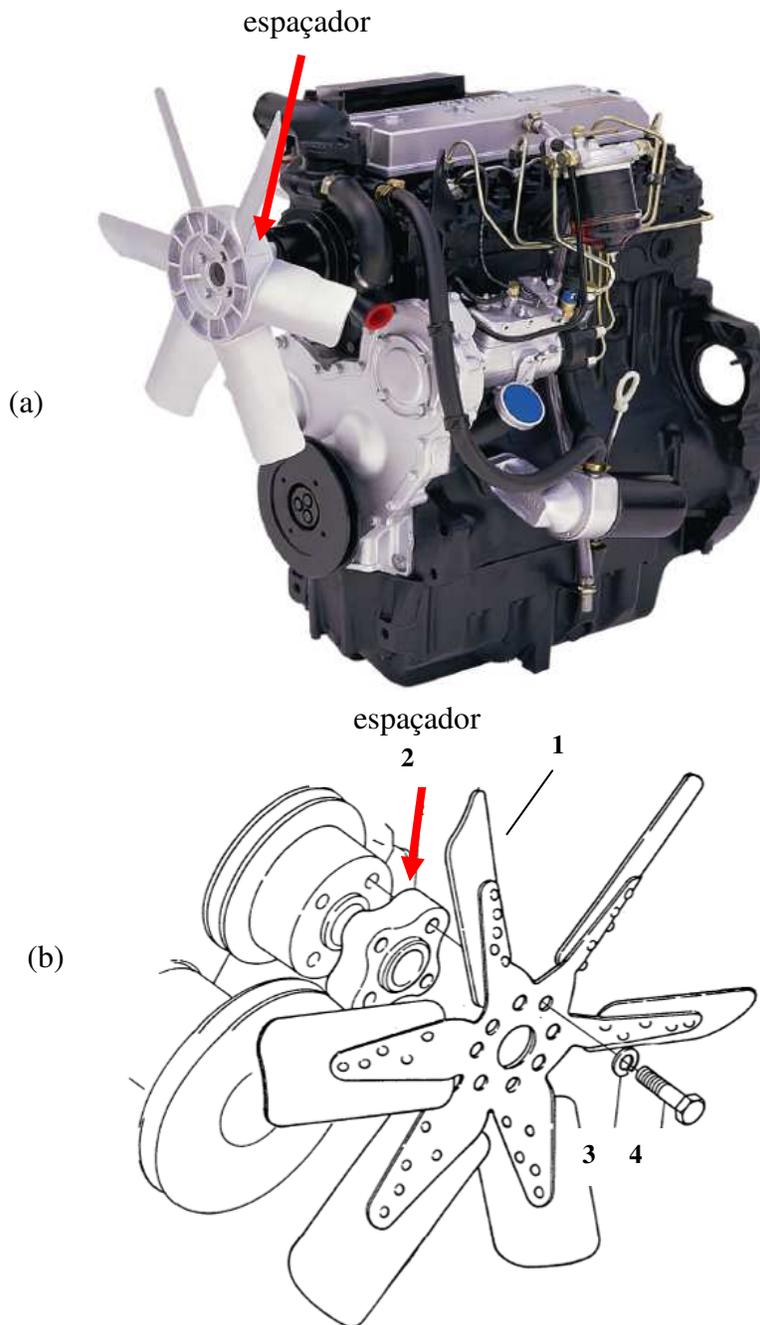


Figura 3.2: (a) Foto do motor MS (MWM INTERNATIONAL MOTORES DIESEL, Folheto Técnico, 2008); (b) desenho de montagem do espaçador do ventilador de motor selecionado para estudo (2); ventilador (1); componentes de fixação (3 e 4).

O componente é fabricado por processo convencional de fundição em molde metálico por gravidade. A escolha desse componente para estudo justifica-se pela possibilidade de utilizar um processo de produção único, nesse caso a tixoinfiltração, sem a necessidade de operações de

acabamento posteriores, com possibilidade de redução de peso do componente e redução de até 70% da matéria-prima - liga de alumínio - utilizada para a fabricação dos espaçadores utilizados atualmente. Objetiva-se desenvolver uma alternativa de processo para a fabricação de componentes mais leves e de menor custo.

Os principais requisitos funcionais do produto são:

- capacidade de suportar a força de compressão exercida pelos quatro parafusos de fixação do conjunto, ventilador e espaçador, que recebem torque de aperto de 18 N.m cada;
- capacidade de manter a planicidade das faces de contato da polia e do ventilador, de tal maneira que o balanceamento do conjunto não apresente vibrações em situações em que as rotações possam passar de 2.300 rpm.

Esses requisitos não são impeditivos para a utilização do componente como um material celular. Levando-se em conta a importante redução de peso que este tipo de material pode representar, as esponjas metálicas podem se constituir em uma nova e vantajosa alternativa para a produção do componente considerado.

O fabricante utiliza diferentes concepções, em termos de geometria de espaçador do ventilador conforme o tipo de motor em que será montado. A liga utilizada, no entanto, é sempre a mesma: a liga Al-Si A356.0.

As Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 apresentam fotos dos distintos tipos de espaçadores utilizados pela empresa MWM International Motores. A principal diferença entre eles está na altura do componente, o que irá definir a distância entre as pás do ventilador e as polias do motor.

A Tabela 3.1 apresenta dados geométricos comparativos entre as distintas versões dos componentes utilizados nos motores MS e Série 229.

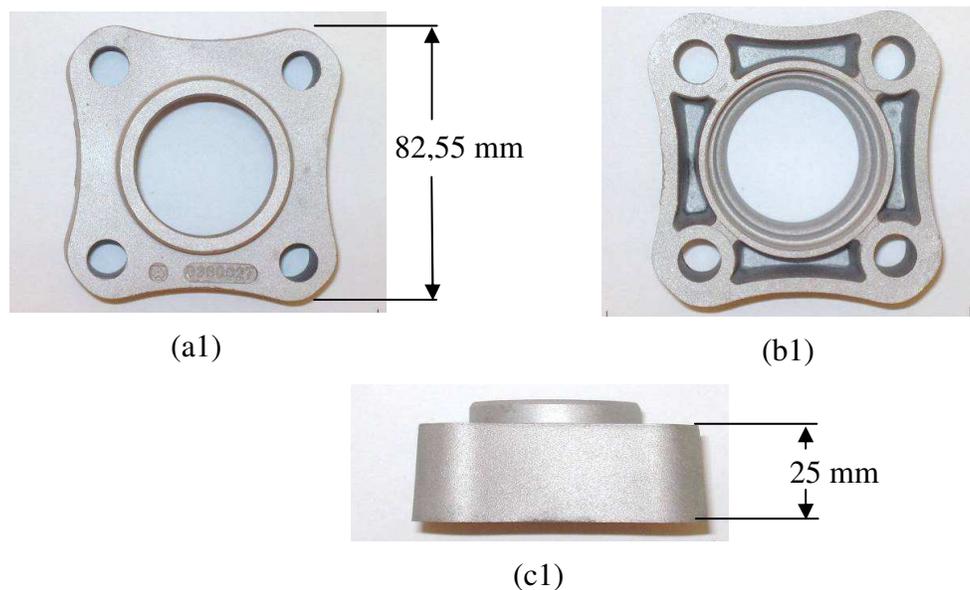


Figura 3.3: Espaçador do ventilador motor MS - 1: (a1) lado do ventilador, (b1) lado da polia e (c1) vista lateral (altura 25 mm).

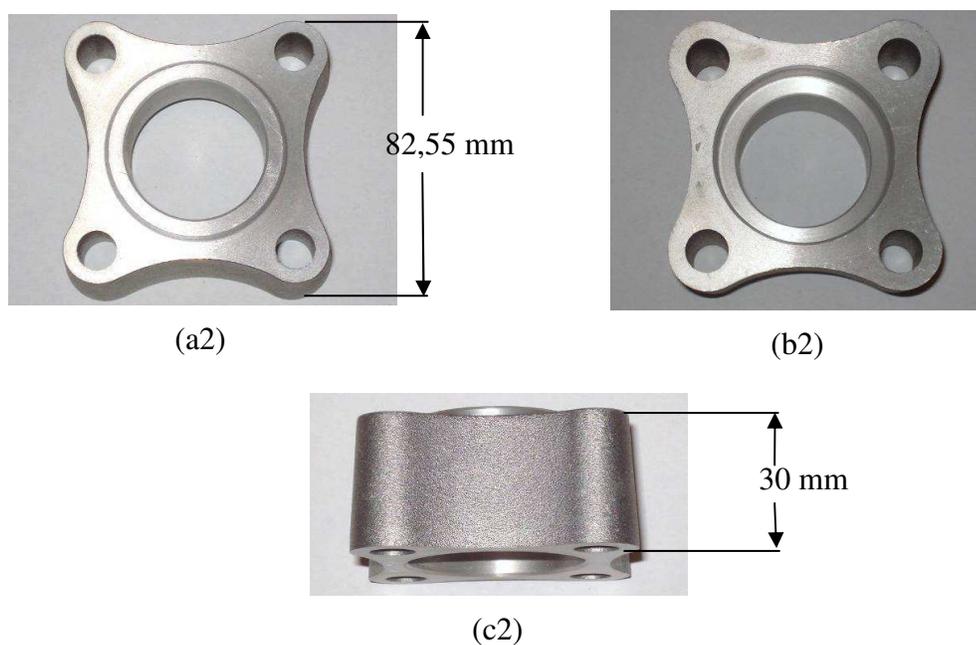


Figura 3.4: Espaçador do ventilador motor MS - 2: (a2) lado do ventilador, (b2) lado da polia e (c2) vista lateral (altura 30 mm).

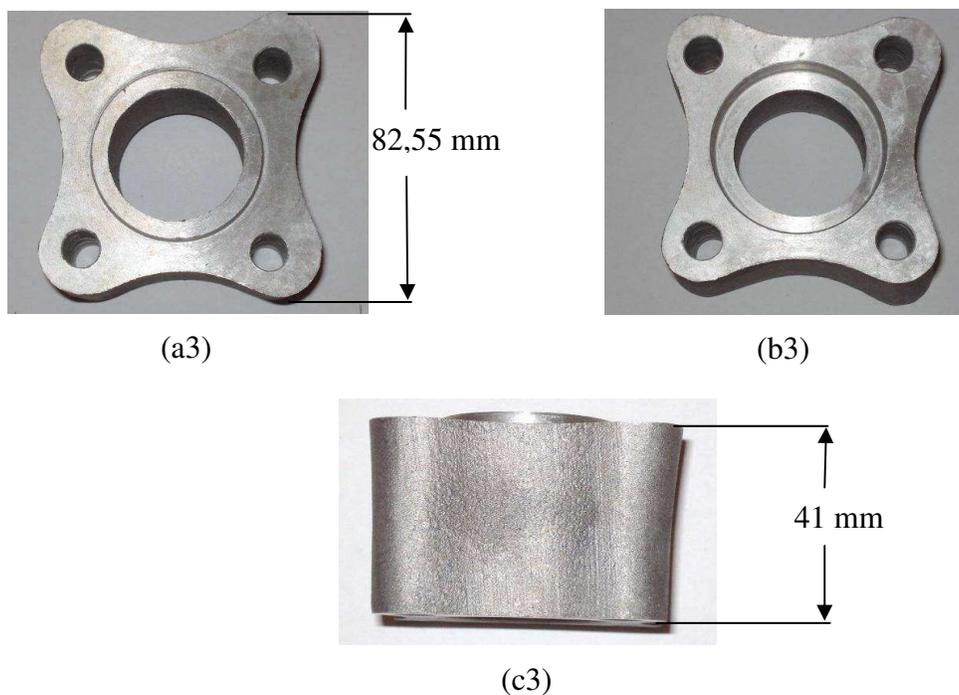


Figura 3.5: Espaçador do ventilador motor MS – 3: (a3) lado do ventilador, (b3) lado da polia e (c3) vista lateral (altura 41 mm).

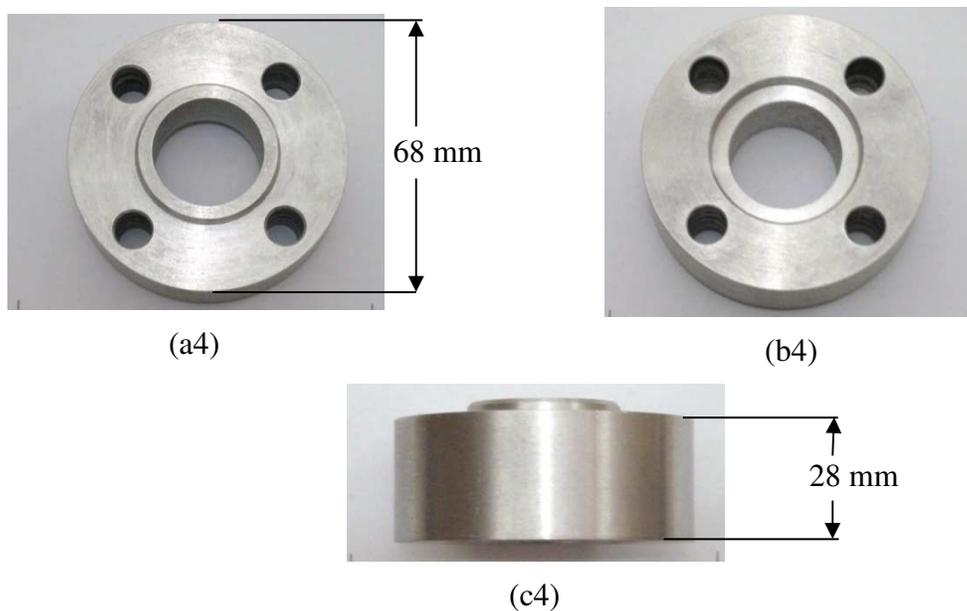


Figura 3.6: Espaçador do ventilador motor 229 – 4: (a4) lado do ventilador, (b4) lado da polia e (c4) vista lateral (altura 28 mm).

Tabela 3.1: Dados geométricos de distintos tipos de espaçadores do ventilador utilizados nos motores MS e Série 229.

	Peça 1 (motor MS)	Peça 2 (motor MS)	Peça 3 (motor MS)	Peça 4 (motor 229)
Altura (mm)	25	30	41	28
Peso (kg)	0,125	0,160	0,270	0,210
Volume (cm ³)	46,731	59,301	100,408	78,259
Densidade (g/cm ³)	2,675	2,698	2,689	2,683

3.2 Caracterização da liga empregada no trabalho

3.2.1 Composição química

A liga A356.0 empregada nos experimentos foi adquirida no mercado, em barras, com diâmetro de 78 mm e comprimento de 190 mm, fundidas em molde metálico. A análise da composição química da liga foi realizada no Laboratório Metalúrgico da MWM International Motores Diesel em Santo Amaro (SP), utilizando espectrômetro de absorção atômica e emissão óptica. Para tanto, foram retiradas amostras da parte central de três diferentes barras. A composição química média obtida para a liga empregada nos experimentos é apresentada na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição química da liga A356.0 empregada nos experimentos, obtida por espectrometria de absorção atômica (% em peso).

Al	Si	Mg	Fe	Cu	Ti	Mn	Zn	Outros
91,82	6,98	0,40	0,34	0,14	0,08	0,17	0,04	0,01

Comparando-se os valores obtidos com os valores apresentados na Tabela 2.2, pode-se confirmar a designação da liga como A356.0.

3.2.2 Microestrutura como fundida

A análise da microestrutura da liga de alumínio A356.0, utilizada como matéria-prima para obtenção de material celular, foi realizada em amostra retirada da parte central das barras fundidas adquiridas no mercado. Os corpos de prova foram embutidos em baquelite e preparados segundo as técnicas convencionais de metalografia, sendo o lixamento com seqüência de lixas de carboneto de silício nas granulometrias 220, 320, 400, 600, 800 e 1200, utilizando água como lubrificante. Na transição entre cada lixa, os corpos de prova foram lavados com água e sabão e rotacionados em 90°. Para o polimento, foram utilizadas pasta de diamante com granulometria de 6 µm, seguido de acabamento com pasta de 1 µm. Entre cada etapa de polimento, as amostras também foram submetidas à limpeza com água e sabão.

O reagente utilizado para ataque químico e visualização ao microscópio foi o reagente de *Keller*, constituído de solução 1% de ácido fluorídrico (HF), 1,5% de ácido clorídrico (HCl), 2,5% de ácido nítrico (HNO₃) e 95% de água destilada (H₂O); o tempo de contacto reagente/amostra foi de 10 segundos.

Observações foram feitas utilizando microscópio óptico LEICA, modelo DM ILM. As imagens foram digitalizadas através de equipamento de captura de imagens acoplado ao microscópio com *software* residente LEICA QWIN.

3.2.3 Análise da tixohabilidade da liga

O processo de fabricação do componente como esponja metálica requer a liga no estado pastoso tixotrópico. É fundamental que se estabeleça, previamente, a possibilidade de obtenção da pasta e do seu processamento neste estado, isto é, é preciso determinar a tixohabilidade da liga em questão. Assim os parâmetros que caracterizam a tixohabilidade de uma liga metálica são: o intervalo de solidificação ($T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$), a variação da fração líquida em função da temperatura ($f_L \times T$) e a sensibilidade da variação da fração líquida com a variação da temperatura

dentro do intervalo de solidificação (df_L/dT). Esses parâmetros devem ser determinados com a finalidade de estabelecer as condições de processamento da liga no estado semi-sólido.

No trabalho, foram utilizadas duas técnicas para determinar as $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ da liga A356.0, sendo estas a curva de resfriamento simples $T \times t$ e a curva de variação de energia $\times T$, através de ensaio de calorimetria diferencial exploratória (DSC - *Differential Scanning Calorimetry*). Os resultados de ensaios de calorimetria diferencial também foram utilizados para a determinação da variação da fração líquida com a temperatura no intervalo de solidificação.

Para a obtenção da curva de solidificação simples da liga ($T \times t$) foi utilizada uma amostra retirada da parte central da barra, com aproximadamente 400 g, a qual foi fundida e resfriada em cadinho de carbetto de Si. Um termopar tipo K, posicionado na região central do cadinho com a liga em estado líquido, acoplado a sistema de aquisição de dados com frequência de coleta de três aquisições por minuto, foi utilizado para o monitoramento da temperatura no resfriamento. A taxa de resfriamento foi de, aproximadamente, 30°C por minuto.

As curvas de variação de energia obtidas por calorimetria diferencial exploratória (DSC) utilizaram amostras da liga retirada da parte central da barra, com aproximadamente 15 g, as quais foram aquecidas até 750°C, com uma taxa de aquecimento 5°C por minuto; em seguida, foram resfriadas até temperatura ambiente, com a mesma taxa de variação de temperatura. Os ensaios foram realizados em um equipamento da marca NETZCH modelo STA 409 CELL.

3.3 Agente bloqueador

Para o processo de fabricação de esponjas metálicas sugerido neste trabalho, foi utilizado como agente bloqueador partículas de cloreto de sódio (NaCl). As partículas de sal foram utilizadas em estado livre (soltas) como pré-formas pós-removíveis para infiltração do metal no estado semi-sólido. Após solidificação total do metal, as pré-formas foram removidas, originando os poros da esponja metálica.

As partículas de sal foram, inicialmente, classificadas quanto às suas dimensões, utilizando-se jogo de peneiras rotativas convencionais para análise granulométrica de partículas sólidas. Cada ensaio foi realizado por um tempo de 120 segundos. Após o ensaio, o sal foi separado em grupos com três faixas granulométricas:

- fina: partículas com diâmetro entre 1,0 mm e 1,6 mm;
- média: partículas com diâmetro entre 1,6 mm e 3,15 mm;
- grosseira: partículas com diâmetro maior que 3,15 mm.

As partículas do agente bloqueador foram, também, caracterizadas quanto à sua morfologia, através de análise no microscópio eletrônico, com baixos valores de aumento.

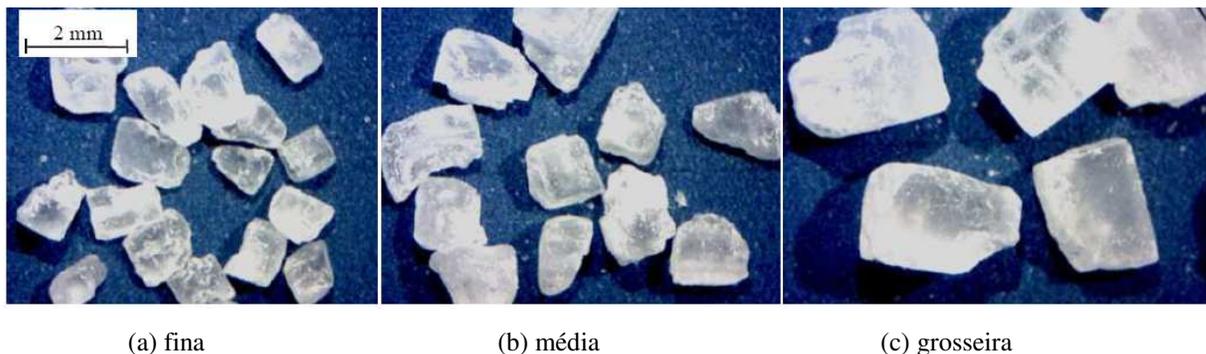


Figura 3.7: Partículas de sal (NaCl) de diferentes granulometrias, utilizadas como agentes bloqueadores: (a) fina; (b) média; (c) grosseira.

A Figura 3.7 apresenta partículas de sal de granulometrias fina, média e grosseira. Nas partículas finas (a), as formas predominantes são retangulares e triangulares, com arestas agudas e não regulares; em (b), as partículas de granulometria média apresentam arestas mais planas com geometria não regular; e, em (c), as partículas grosseiras apresentam uma geometria predominantemente retangular, com arestas planas.

3.4 Fabricação do componente por tixoinfiltração

3.4.1 Definição da geometria do componente

A empresa MWM International Motores Diesel utiliza dois tipos básicos de espaçadores de ventiladores, diferenciados segundo sua geometria: os componentes utilizados nos motores MS, que possuem perfil quadrado com cantos arredondados e raios de alívios nas laterais (ver Figuras 3.3, 3.4 e 3.5) e o componente utilizado no motor Série 229, de geometria circular (ver Figura 3.6).

A Figura 3.8 apresenta desenhos dos dois tipos básicos de espaçadores e na Figura 3.10 é apresentado o desenho modificado para os testes de fabricação propostos.

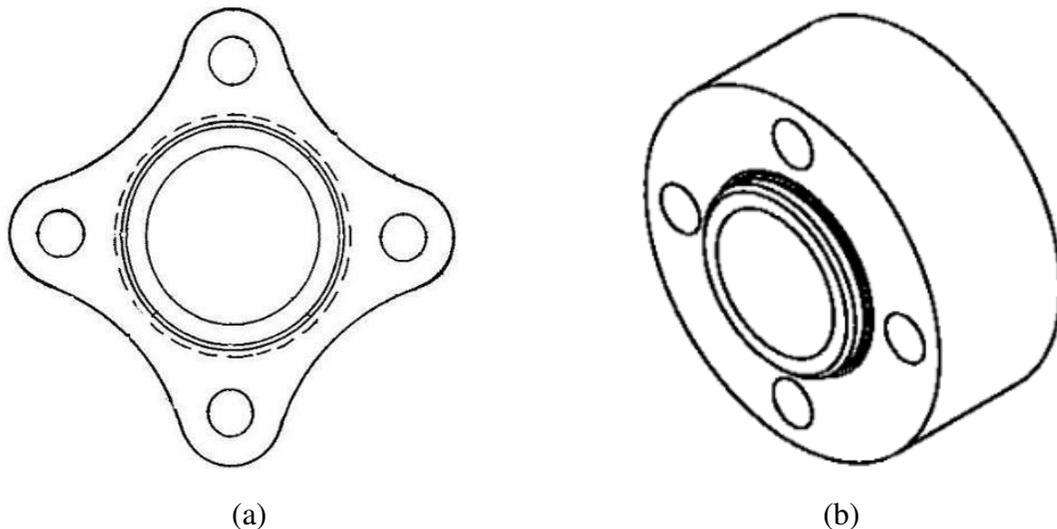


Figura 3.8: (a) Espaçador genérico do ventilador de motores MS; (b) espaçador do motor Série 229 selecionado para o trabalho.

A geometria proposta para desenvolver o componente espaçador do ventilador pelo processo de tixoinfiltração é a circular, com as mesmas características do item utilizado nos motores Série 229, porém com as dimensões do componente do motor MS. Essa definição se baseia na maior facilidade de fabricação da matriz para os testes de produção do componente, pelo novo processo em estudo, além da maior facilidade de infiltração da pasta tixotrópica. Buscou-se reduzir

variáveis de processo, uma vez que este é um estudo inicial de desenvolvimento de um novo procedimento de fabricação.

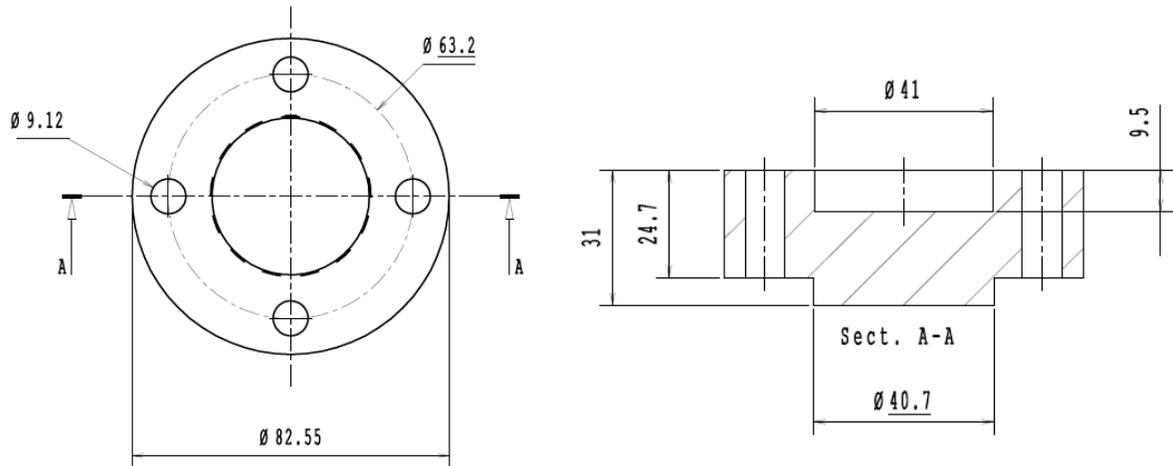


Figura 3.9: Dimensões propostas para a amostra do espaçador do ventilador a ser fabricado por tixoinfiltração.

3.4.2 Projeto e construção da matriz para tixoinfiltração

O material utilizado para construção de matrizes para os ensaios de tixoinfiltração foi o aço ferramenta, comercialmente conhecido como AISI H13. Esse tipo de aço é ideal para trabalho a quente e é amplamente utilizado para a fabricação de matrizes e moldes metálicos nas fundições de Al. Os principais elementos que compõem a liga desses aços são o Cr, Mo e V. Esse aço, tratado termicamente, adquire excelente nível de dureza a quente e resistência à corrosão, sem perder a tenacidade e a ductilidade.

Na Figura 3.10, é apresentado esquema representativo da montagem do conjunto da matriz e seus vários componentes, utilizado para a fabricação do componente espaçador do ventilador pelo processo de tixoinfiltração.

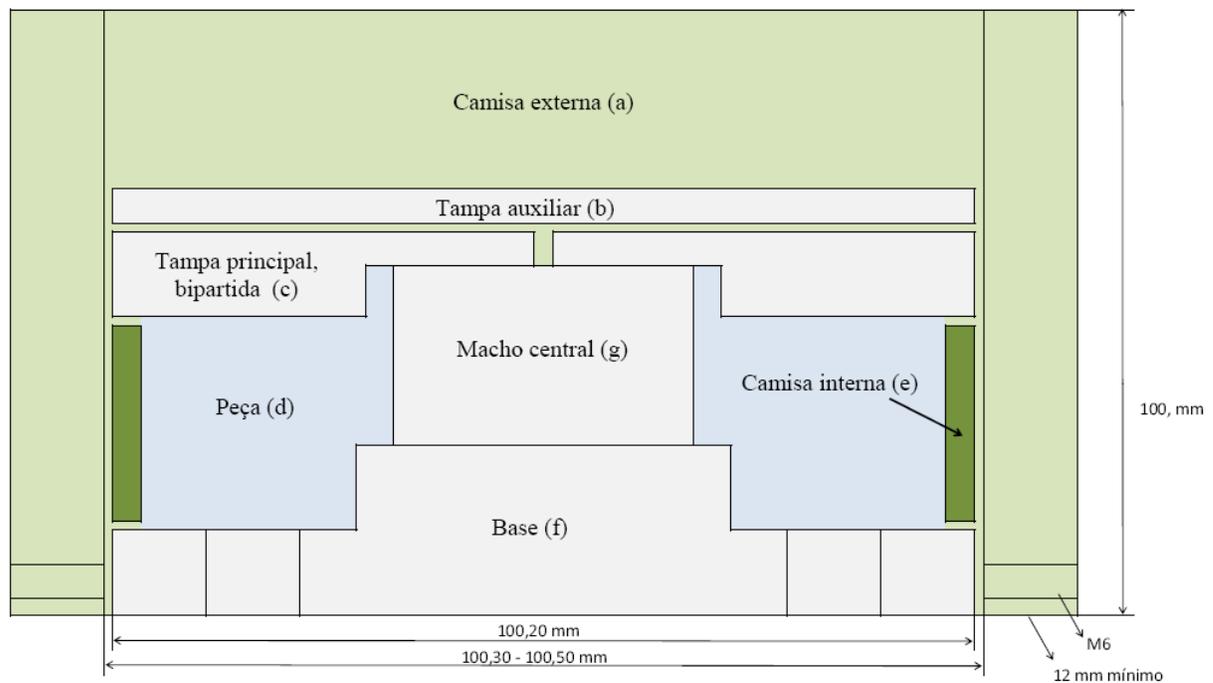


Figura 3.10: Esquema representativo da montagem do conjunto da matriz e componentes, utilizado nos testes de tixoinfiltração.

Os diferentes componentes são a seguir descritos:

- a camisa externa (a), apresentada na Figura 3.11, tem como principal função manter o conjunto fixo durante a aplicação da força de compressão. Esta possui parafusos na parte inferior, para a contenção da base (f), e parafusos na parte superior, que servem como pontos de apoio para extração;

- a tampa auxiliar (b), apresentada na Figura 3.12, tem como principal função auxiliar a tampa principal (c) na vedação do conjunto durante a prensagem;

- a tampa principal (c), apresentada na Figura 3.13, foi primeiramente confeccionada em uma única peça e com a furação dos pinos guias; porém, durante o desenvolvimento do processo, foi necessário fazê-la bipartida para facilitar a retirada do produto após a prensagem. A furação inicial dos pinos guias foi fechada com solda;

- a camisa interna (e), apresentada na Figura 3.14, tem como função definir o diâmetro externo e a altura da peça;

- a base (f), apresentada na Figura 3.15, foi projetada inicialmente com os pinos acoplados para eliminar a operação de furação após a prensagem; porém, durante o processo, verificou-se a necessidade de retirada desses pinos, evitando regiões com pequenos espaços entre os pinos e a camisa interna (e), o que dificultava o escoamento do metal durante a operação e resultava em peças com defeitos de preenchimento;

- o macho metálico central (g), utilizado para a obtenção do furo central da peça, é apresentado na Figura 3.16.

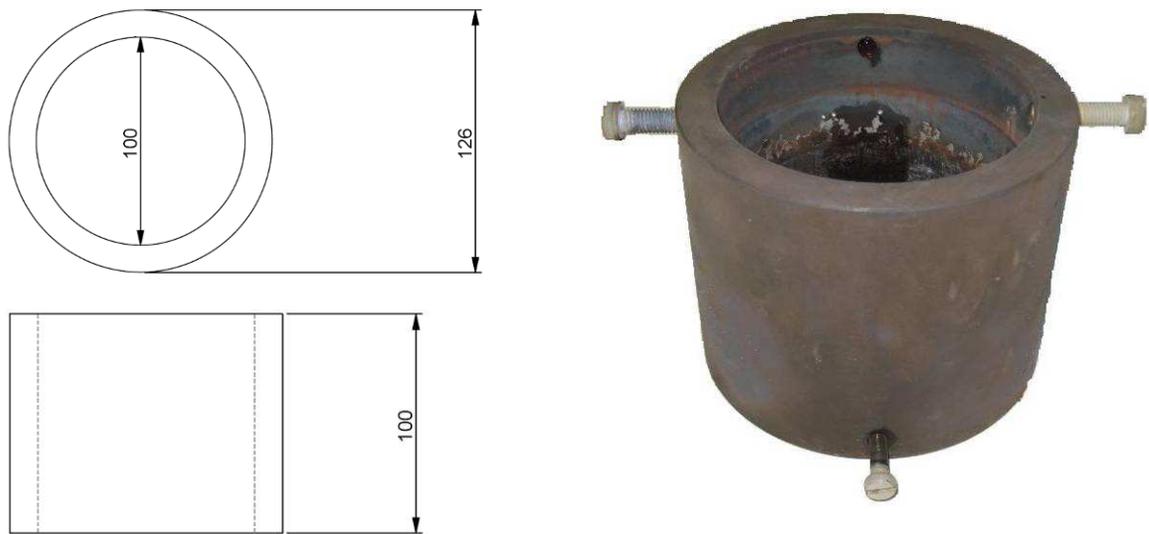


Figura 3.11: Desenho e foto da camisa externa (a).

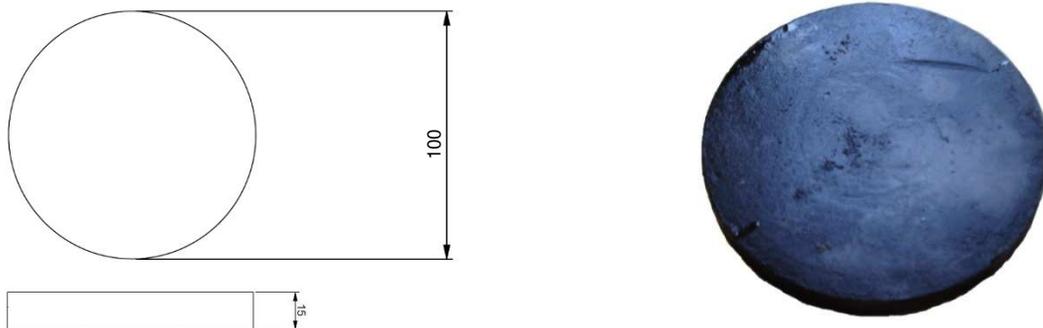


Figura 3.12: Desenho e foto da tampa auxiliar (b).

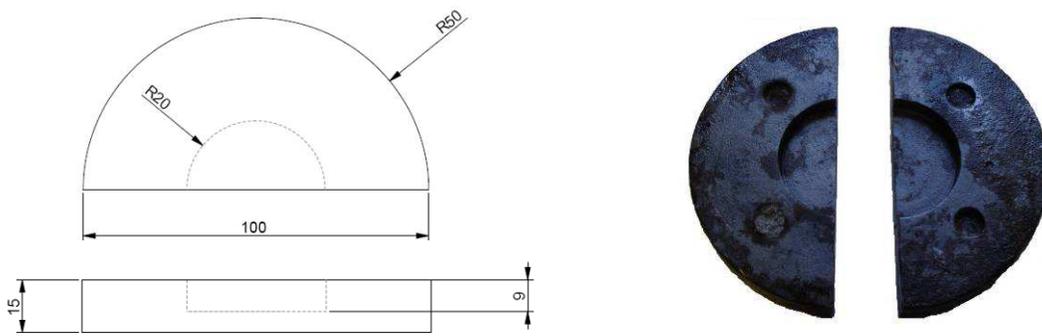


Figura 3.13: Desenho e foto da tampa principal bipartida (c).

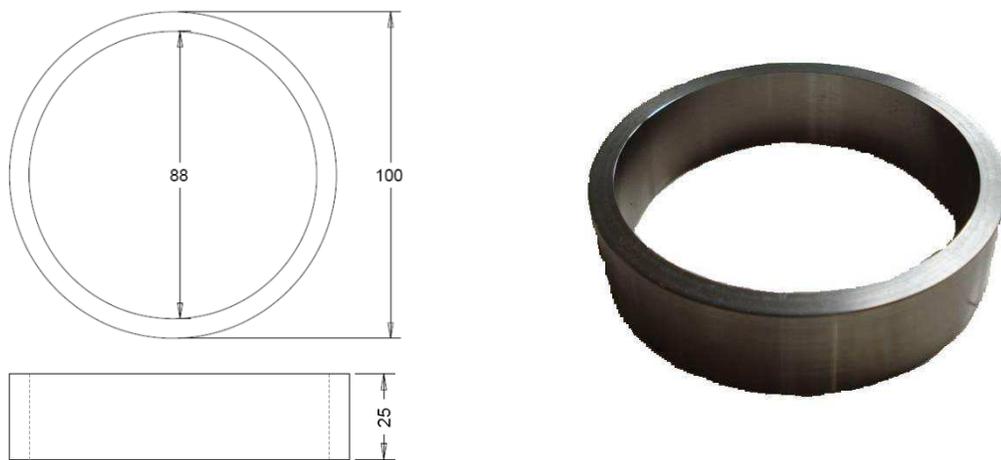


Figura 3.14: Desenho e foto da camisa interna (e).

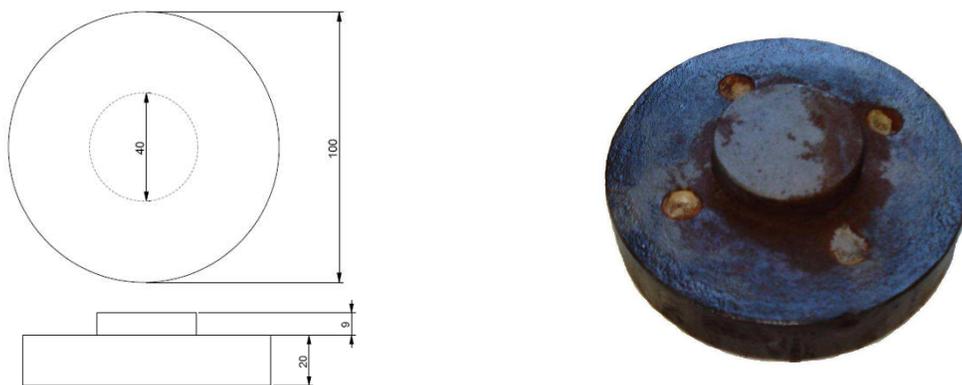


Figura 3.15: Desenho e foto da base (f).

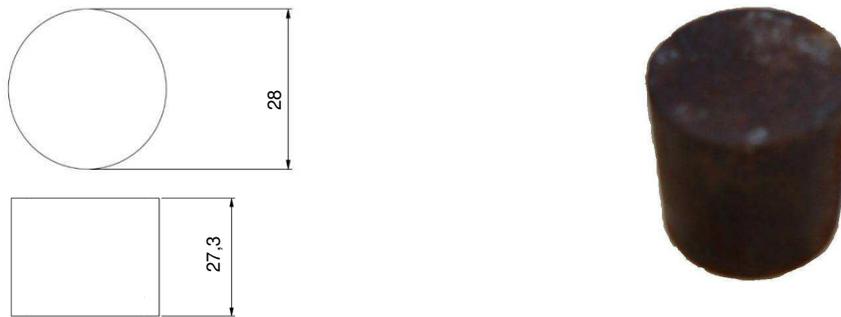


Figura 3.16: Desenho e foto do macho central (g).

3.4.3 Equipamentos utilizados

Para os ensaios de tixoinfiltração foram utilizados os seguintes equipamentos:

- forno resistivo com 2,5 kW de potência máxima, para aquecimento da liga para produção da pasta tixotrópica; o conjunto matriz/matéria-prima foi aquecido simultaneamente. Para controle da temperatura do forno e da liga, durante infiltração, foi utilizado termopar tipo K, conectado a sistema de aquisição de dados;
- prensa hidráulica com capacidade de carga máxima de 300 kN, dotada de manômetro com precisão de 5×10^{-3} Pa e avanço do punção de 2,5 mm/s. Célula de carga ligada a sistema de aquisição de dados para monitoramento das forças durante o processamento.

Na Figura 3.17, é apresentado o sistema de conformação utilizado: prensa e sistema de aquisição de dados (temperaturas e forças).



Figura 3.17: Prensa hidráulica e sistema de aquisição de dados utilizados nos ensaios de tixoinfiltração.

3.4.4 Processo de produção de amostras por tixoinfiltração - operação padrão

Para a produção de amostras do componente selecionado, por tixoinfiltração, foram desenvolvidas sequências para a montagem da matriz e para a operação de tixoinfiltração propriamente dita, com o intuito de padronizar cada etapa e de garantir a repetibilidade do procedimento.

A. Montagem da matriz

A sequência padrão de preparo e montagem do ferramental para a operação de tixoinfiltração para a produção dos componentes porosos (espaçadores com estrutura de esponjas) é apresentada no fluxograma da Figura 3.18.

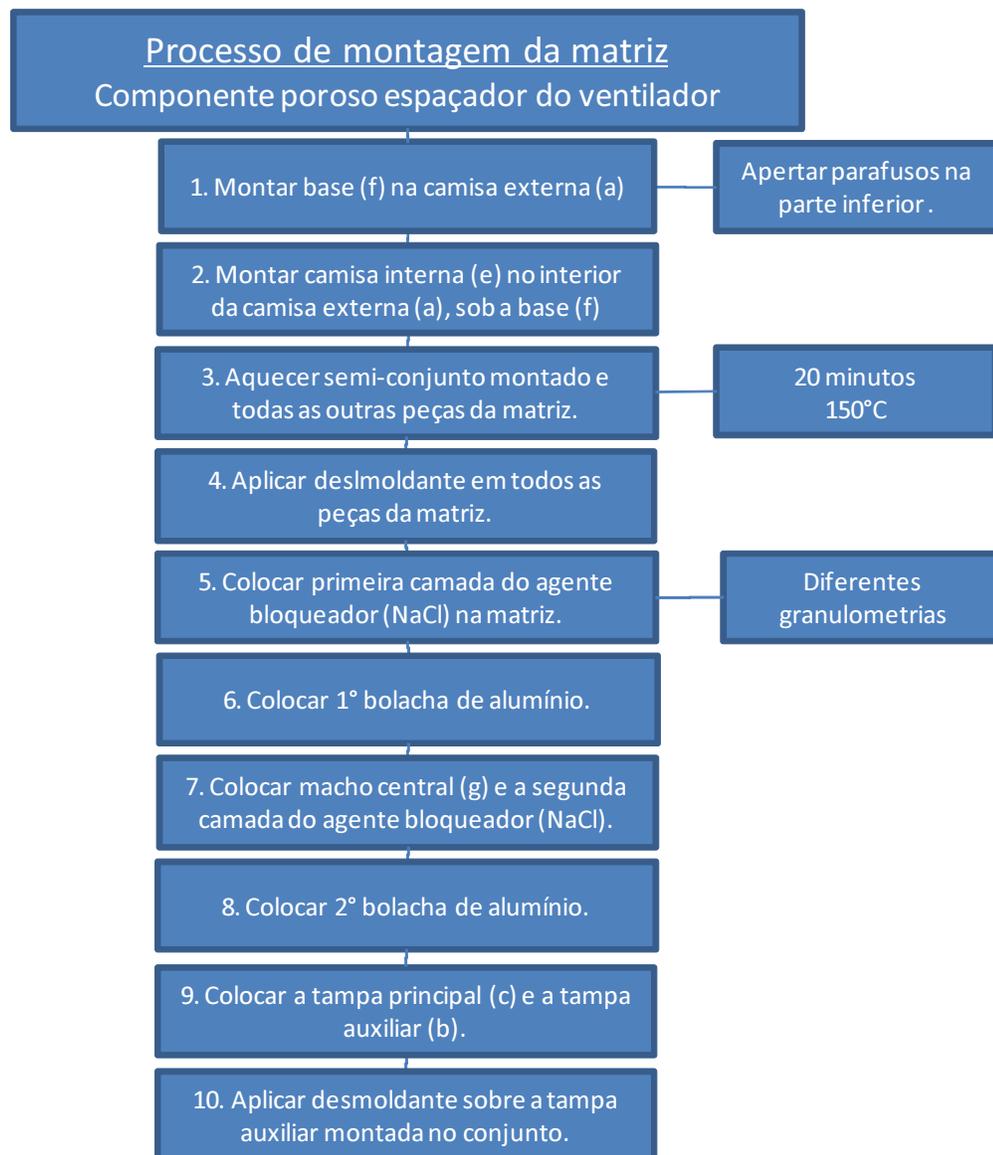


Figura 3.18: Fluxograma de operações-padrão para o preparo e montagem do ferramental para a operação de tixoinfiltração para a fabricação do espaçador do ventilador (condição 2).

No esquema representativo da Figura 3.19, pode ser observado o ferramental montado para a operação de infiltração da pasta metálica sobre a pré-forma do agente bloqueador. Foram testadas duas condições: com a utilização de somente uma bolacha da liga, posicionada sobre a camada de partículas de NaCl (condição 1), e com a utilização de duas bolachas da liga, uma localizada no interior da camada de NaCl e outra sobre esta camada (condição 2). Em todos os casos, foram utilizadas partículas do agente bloqueador em estado livre.

Para facilitar a desmoldagem, foi utilizado, em todas as operações, cimento à base de fibra cerâmica sílico-aluminosa como desmoldante da matriz, o qual foi aplicado à matriz por jateamento.

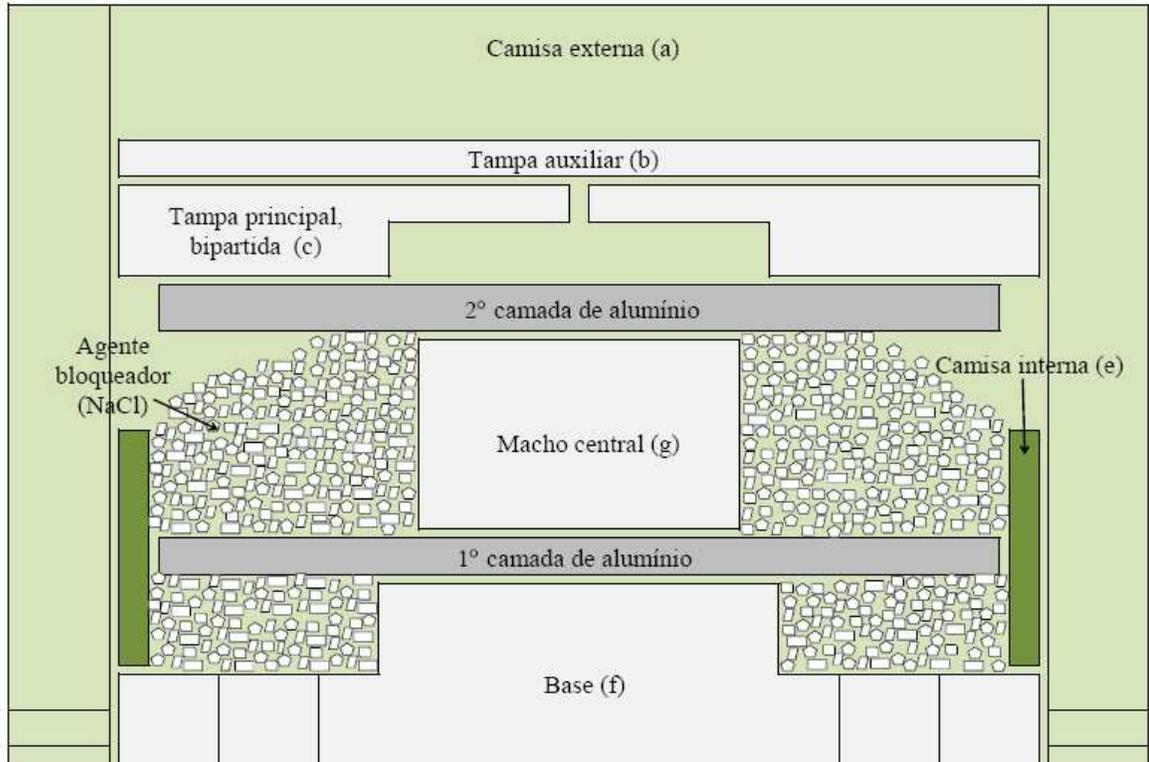


Figura 3.19: Esquema representativo do conjunto de ferramental utilizado para a fabricação do espaçador do ventilador.

Após montagem e fechamento, o conjunto é levado a forno resistivo para aquecimento.

B. Aquecimento do conjunto matriz/matérias-primas

O conjunto para a produção do espaçador de ventilador por tixoinfiltração é composto pela matriz (um conjunto de seis componentes), agente bloqueador e bolachas de Al. O conjunto todo é aquecido à temperatura superior à $T_{solidus}$ da liga A356.0, para a obtenção da pasta tixotrópica a ser infiltrada. Para tanto, o forno foi aquecido e estabilizado a 610°C, sendo, então, colocado o conjunto para aquecimento.

Foi efetuado o controle da temperatura do forno com o uso de dois termopares em seu interior, e temperatura da liga de Al com o posicionamento de um termopar tipo K em seu interior, conforme mostrado no desenho representativo da Figura 3.20.

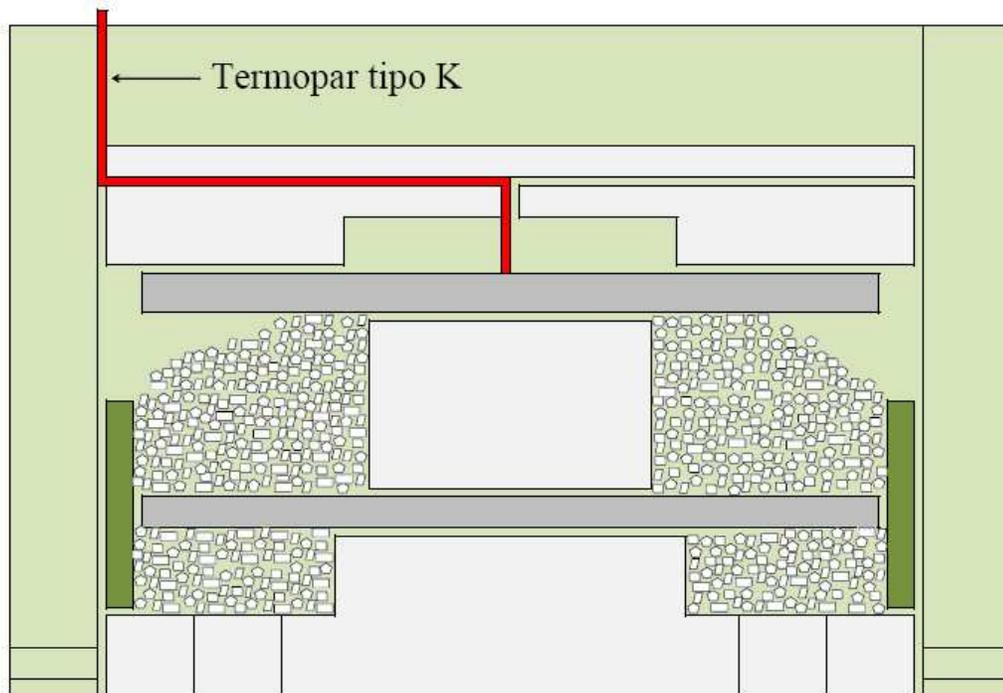


Figura 3.20: Esquema representativo mostrando posicionamento de termopar de controle da temperatura da liga no processo de tixoinfiltração.

C. Operação de tixoinfiltração

A operação padrão típica para a fabricação do componente espaçador de ventilador seguiu a sequência de eventos apresentada no fluxograma da Figura 3.21.

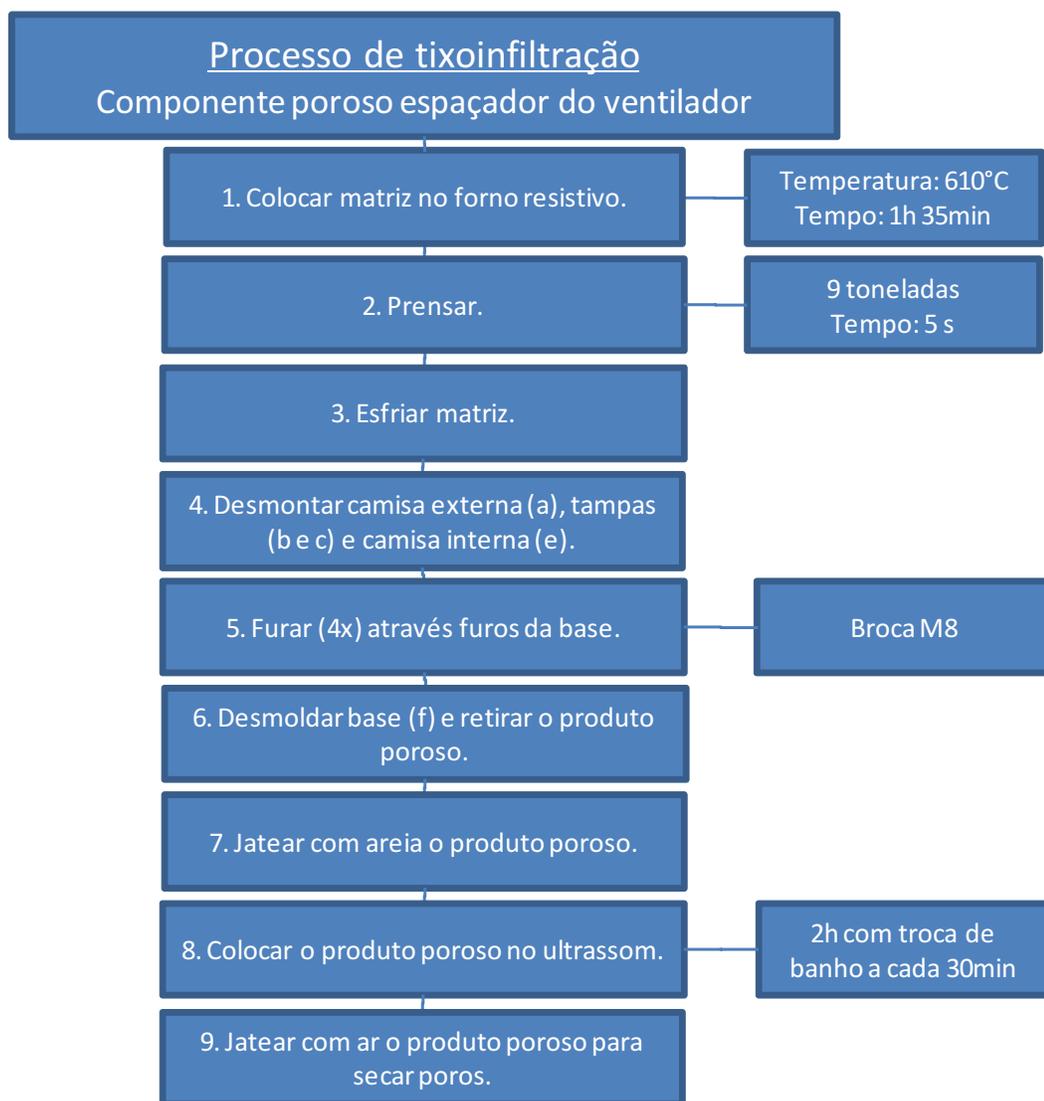


Figura 3.21: Fluxograma da operação de tixoinfiltração padrão para a fabricação do componente poroso espaçador do ventilador.

Os parâmetros variados no processo investigado para a produção do componente selecionado para estudo foram:

- granulometria do agente bloqueador: foram produzidas amostras do componente com três granulometrias de partículas de NaCl, quais sejam: fina (partículas com diâmetro entre 1,0 mm e 1,6 mm), média (partículas com diâmetro entre 1,6 mm e 3,15 mm) e grosseira (partículas com diâmetro maior que 3,15 mm). Inicialmente testado com a combinação de

130g de agente bloqueador e com 160g de alumínio, equivalente a uma relação de 45% de NaCl e 55% da liga;

- quantidades do agente bloqueador (NaCl) e da liga de Al: foram testadas duas combinações, sendo estas 130g NaCl/160g da liga e 160g NaCl/130g da liga de Al, isto é, 45% de NaCl/55% da liga e 55% de NaCl/45% da liga;
- distribuição de massa da liga de Al: foram testados os processos com uma camada colocada sobre o agente bloqueador e com duas camadas, uma colocada no centro da matriz e outra sobre o agente bloqueador. No caso do emprego de duas camadas da liga, foram testadas as combinações: a) utilizando na primeira camada 50g e na segunda camada 80g, ou seja, 38% da massa de alumínio colocado na parte central e 62% da massa de alumínio na parte superior; e b) utilizando na primeira camada 30g e na segunda camada 100g, ou seja, 23% e 77%, respectivamente.

Na Figura 3.22 são apresentados graficamente os parâmetros e seus valores variados nos testes.

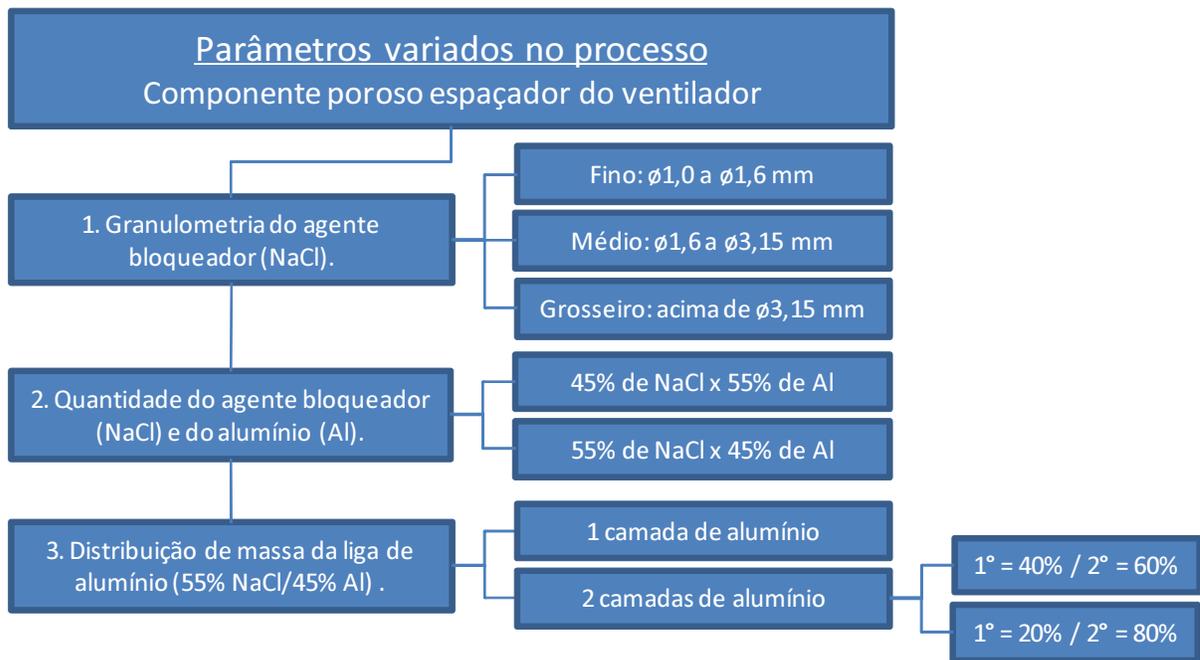


Figura 3.22: Parâmetros variados nos testes de produção das amostras porosas do espaçador do ventilador.

D. Remoção do agente bloqueador

O processo de tixoinfiltração para materiais porosos é realizado através da infiltração da liga de alumínio sobre o agente bloqueador (NaCl), sendo necessária, portanto, sua remoção após prensagem do conjunto, para a formação dos poros interconectados da esponja metálica.

Após a remoção do produto da matriz, este é submetido a jateamento com areia para retirada de eventuais camadas de metal sobre as partículas de superficiais de NaCl. Em seguida, é submetido à lavagem em água aquecida, por aproximadamente 2 horas, com o uso de vibração por ultrassom, permitindo, assim, que o líquido da lavagem penetre nos poros; é feita troca da água a cada 30 minutos. Após a total remoção do NaCl por diluição na água, o produto é secado com jatos de ar.

3.5 Caracterização do produto poroso obtido

As amostras produzidas pelo processo de tixoinfiltração foram submetidas a métodos de análise para verificação da qualidade interna, da arquitetura celular, da microestrutura das paredes celulares, da caracterização física para quantificar a sua densidade real e relativa e, ainda, avaliação do desempenho do componente em regime de trabalho. Foram também avaliadas, teoricamente, as propriedades mecânicas e térmicas do produto poroso.

3.5.1 Qualidade interna e caracterização estrutural

Para verificação da qualidade interna das amostras produzidas, estas foram submetidas a tomografia de raios X; foi utilizado tomógrafo da marca SIEMENS, modelo SOMATOM SPIRIT equipado com *software* SYNGLE versão 5.5 para aquisição de imagens, instalado no CEPETRO/UNICAMP. Foram obtidas imagens de secções transversais das amostras produzidas, distantes 1 mm entre si. Foi possível observar a qualidade interna das amostras, presença de defeitos, bem como a distribuição e dimensões de poros na estrutura.

Além da tomografia dos componentes, para análise quantitativa da espessura das paredes celulares e do tamanho das células, dois componentes distintos foram cortados transversalmente e retiradas duas amostras de cada. Essas amostras foram infiltradas com resina de cura a frio para o preparo metalográfico e observação em microscópio óptico. Através das imagens, foram traçadas linhas perpendiculares às paredes da estrutura celular e, a partir de seu comprimento, determinada a espessura das mesmas. Foram realizadas dez medições em cada um dos corpos de prova embutidos e calculado o valor médio da espessura de paredes celulares.

3.5.2 Caracterização física - densidade

A densidade dos produtos porosos foi obtida através de ensaios de picnometria a gás Hélio. Foram realizadas três medidas para cada uma das amostras.

3.5.3 Avaliação teórica das propriedades mecânicas e térmica

As propriedades mecânicas e térmica do produto poroso foram teoricamente avaliadas através das equações sugeridas por Ashby *et al.* (2000) para materiais celulares de poros abertos, ou seja, esponjas metálicas. É aplicada a cada uma das equações uma relação entre a densidade do material celular e a densidade da liga utilizada, conforme apresentado no Capítulo 2 deste trabalho.

As propriedades mecânicas de módulo de elasticidade do material celular (E) e a tensão de compressão do material celular (σ_c) foram calculadas através das Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

A propriedade térmica do produto poroso, ou condutividade térmica do metal celular (λ), foi calculada através da Equação 2.6.

3.5.4 Análise de desempenho do produto poroso em trabalho

As amostras do produto poroso produzidas pelo processo de tixoinfiltração foram submetidas a testes de montagem e funcional com o objetivo de:

- verificar as dimensões do componente, sem operações de acabamento após a tixoinfiltração;
- observar o comportamento mecânico do produto poroso em sua aplicação no motor, em teste de bancada.

As análises de desempenho foram realizadas na unidade de manufatura de motores da MWM International Motores Diesel, em Canoas (RS). Foi utilizado no teste um motor ciclo diesel, de aplicação fora de estrada em tratores, modelo MS 4,1L Turbinado de 85cv, instalado em banco de testes dinamométrico. Os testes foram divididos em duas etapas:

- Etapa 1: montagem do componente, análise das dimensões básicas de encaixe e paralelismo das faces;
- Etapa 2: teste funcional com o motor em rotação máxima de 2.300 rpm, durante o tempo de 1 hora. A finalidade desse teste foi verificar se a estrutura celular das amostras, sob a compressão dos quatro parafusos, suporta alta rotação com a vibração do motor. O procedimento adotado foi identificar os parafusos que prendem o conjunto espaçador e ventilador à polia do motor, medir o torque de aperto dos parafusos na montagem, utilizando um torquímetro modelo TLP digital de precisão 0,1 N.m, com três leituras em cada parafuso. O torquímetro foi aferido e calibrado pelo Laboratório Dimensional da MWM International Motores Diesel. Após montagem, o motor funcionou durante 1 hora, a 2.300 rpm. Após, com o motor desligado, foi feita análise visual e medido o torque dos parafusos na desmontagem para constatar possível perda de carga devida ao amassamento na estrutura celular do componente produzido.

Na Figura 3.23, são apresentadas fotos mostrando as diferentes etapas dos testes de desempenho do componente produzido, em trabalho. As condições de teste utilizadas são condições usuais para o componente espaçador de ventilador tradicional em metal maciço, produzido por fundição, com a mesma liga A356.0 utilizada no trabalho.

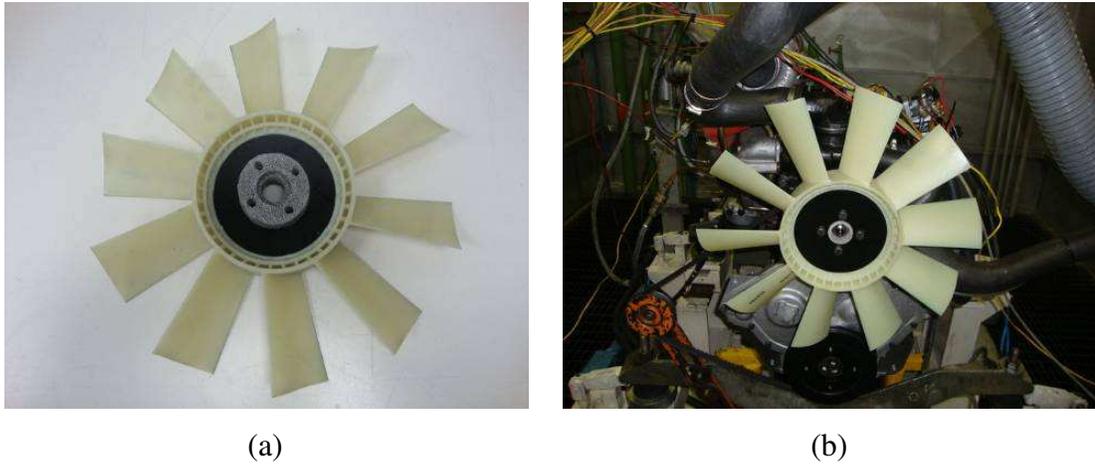


Figura 3.23: Testes de desempenho: (a) ventilador com o espaçador utilizado no teste e (b) motor com o conjunto espaçador e ventilador montados.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da liga A356.0

A técnica proposta e investigada para a fabricação do componente objeto deste estudo envolve o processamento da liga metálica no estado semi-sólido tixotrópico, condição em que apresenta elevada fluidez sob pressão.

É preciso, portanto, em primeiro lugar, determinar a suscetibilidade da liga de estudo à tixoconformação, isto é, a possibilidade de obtenção de pastas tixotrópicas desta liga e de sua manipulação neste estado. A obtenção efetiva da pasta, com qualidades tixotrópicas apropriadas, por sua vez, depend da condição da matéria-prima inicial, principalmente de sua microestrutura.

Portanto, é etapa inicial e fundamental para a iniciação do trabalho, a caracterização da matéria-prima quanto à sua tixohabilidade e microestrutura original. Os resultados obtidos quanto a estes aspectos são apresentados a seguir.

4.1.1 Análise da tixohabilidade da liga A356.0

A tixohabilidade pode ser definida como a capacidade ou a flexibilidade de uma determinada liga metálica de ser processada em seu estado semi-sólido, isto é, constituído por uma mistura de sólido e líquido. Em adição, a fase sólida deve apresentar morfologia globular, o que fornece à pasta características tixotrópicas de escoamento, e, portanto, a capacidade de conformação em reduzidas tensões. Para a análise da tixohabilidade da liga de trabalho foram determinados o

intervalo de solidificação e a sensibilidade da fração líquida com a temperatura dentro deste intervalo.

A Figura 4.1 apresenta curva de resfriamento simples obtida em laboratório, em condições práticas de resfriamento do líquido em molde de SiC, com taxa de resfriamento de 30°C/min.

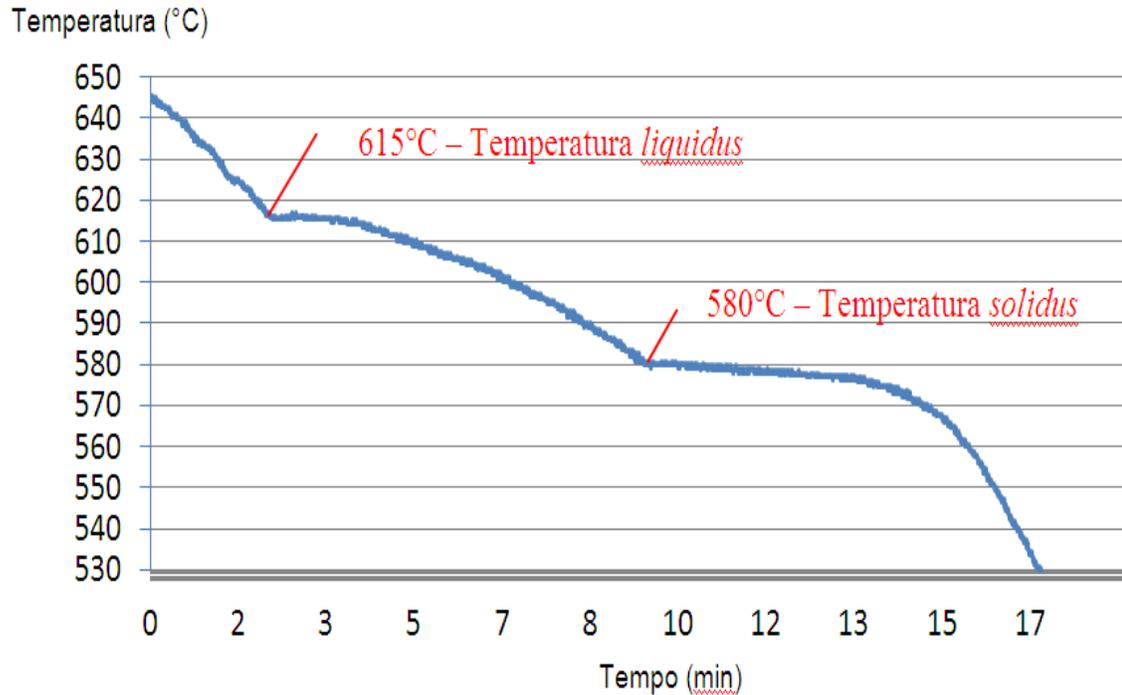


Figura 4.1: Curva de resfriamento simples (T x t) durante solidificação da liga A356.0 em molde de SiC (taxa de resfriamento de 30°C/min).

Pode-se observar, com clareza, duas importantes inflexões na curva de resfriamento, com variação sensível em dT/dt para os valores de temperaturas de 615°C e 580°C. Esses valores correspondem à $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ respectivamente. É, também, observada a manutenção da temperatura a 580°C, por certo tempo, indicando a transformação eutética da liga. A curva obtida indica claramente, portanto, o intervalo de formação da fase primária em meio líquido (fase α , de acordo com o diagrama de fases apresentado na Figura 2.7) e de formação do constituinte eutético ($\alpha + Si$). Não são observadas inflexões indicativas de outras transformações.

De acordo com a curva de resfriamento, portanto, a liga apresenta um intervalo de solidificação de cerca de 35°C; no entanto, a variação da fração sólida com a temperatura dentro do intervalo de solidificação não é linear, uma vez que, durante a transformação eutética, uma significativa quantidade de sólido é formada sem a alteração da temperatura do sistema.

Para uma melhor avaliação do comportamento da variação da fração líquida com a temperatura e, também, confirmação das $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ da liga de trabalho, foram efetuados testes de calorimetria exploratória diferencial (DSC – *Differential Scanning Calorimetry*). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.2.

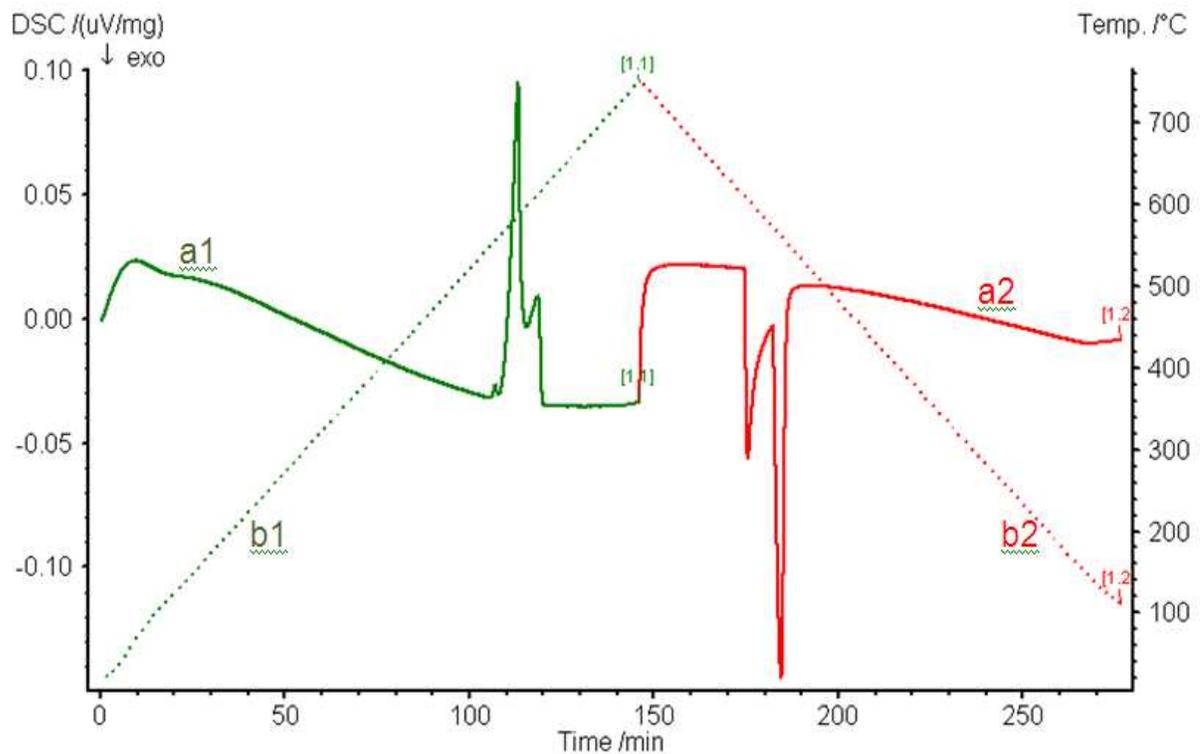


Figura 4.2: Resultados de ensaios de DSC da liga A356.0, em condições de aquecimento e resfriamento, com taxa de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$: a) energia/massa x t; b) T x t; 1) aquecimento; 2) resfriamento.

São apresentados resultados de ensaios de aquecimento e resfriamento, a uma taxa de troca de calor de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. As curvas a1 e b1 correspondem à variação da voltagem do sinal elétrico/massa do material (associada à variação de energia no sistema) e da temperatura com o

tempo, respectivamente, em ensaio de aquecimento, e a_2 e b_2 correspondem às variações dos mesmos parâmetros em ensaio de resfriamento.

Pode-se observar a presença de somente um pico significativo. No entanto, o pico é duplo, indicando a ocorrência de duas importantes transformações, em sequência: no aquecimento, a fusão do constituinte eutético seguida da fusão da fase α . O final das transformações, quando o nível de energia do sistema volta para a linha base da curva, indica o final da fusão da liga. Não são observadas outras transformações com liberação ou absorção de energias relevantes.

A Figura 4.3 apresenta, com maior detalhe, o pico de variação da energia/massa x temperatura, no aquecimento da liga. Pode-se observar o início da transformação (formação de líquido) em torno de 550°C , com um pequeno pico inicial, provavelmente devido à fusão de algum tipo de intermetálico presente na liga (a qual não é binária), seguido das transformações principais, as quais finalizam em cerca de 618°C . Portanto, podem ser consideradas $T_{solidus}$ igual a 550°C e $T_{liquidus}$ igual a 618°C e, portanto, um intervalo de solidificação da ordem de 68°C é obtido para a liga de trabalho.

Os valores obtidos pelo ensaio de DSC não são totalmente coincidentes com os obtidos a partir da curva de resfriamento simples: as temperaturas assumidas como $T_{solidus}$ obtidas nos dois tipos de testes são bastante distintas, talvez devido ao pequeno pico observado na análise por DSC e não detectado na curva $T \times t$ simples; por outro lado, as temperaturas assumidas como $T_{liquidus}$ são bastante coincidentes. Deve ser lembrado que análises térmicas são extremamente sensíveis às condições de ensaio, isto é, dependem da taxa de troca de calor, do tipo de ciclo e, ainda, da massa de material ensaiado, entre outras condições (CRISTOFOLINI, 2009; MOTHÉ 2002). Por exemplo, Cristofolini (2009) observa uma variação em torno de 30°C em valores da $T_{solidus}$ do ferro fundido ASTM A536, obtidos por DSC, em ciclos de aquecimento a taxas de 5 e $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

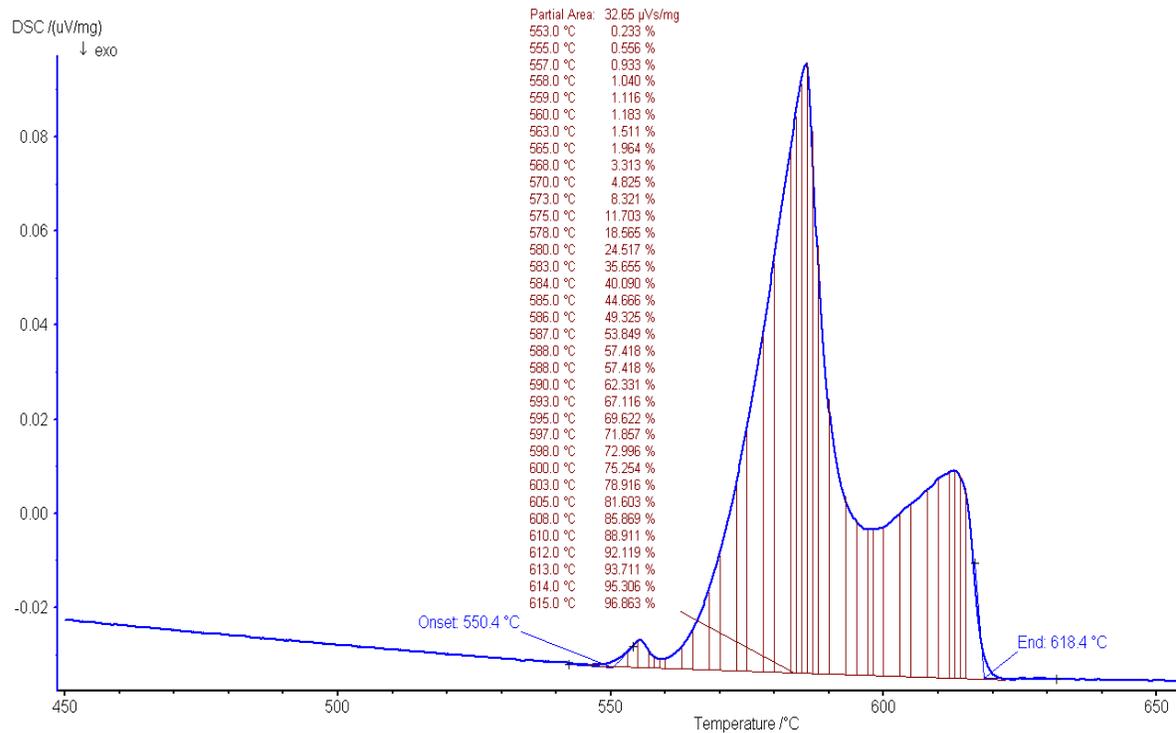


Figura 4.3: Detalhe do pico relativo a fusão da liga A356.0 obtida via DSC; aquecimento com taxa de 5°C/min. Incluso tabela de valores de áreas parciais sob pico x T.

O resultado do cálculo dos valores de áreas parciais sob o pico de energia envolvida na transformação sólido-líquido em função da temperatura, apresentado na Figura 4.4, fornece a evolução da fração líquida (f_L) com a temperatura, no intervalo de solidificação da liga.

A variação da $f_L \times T$ observada na Figura 4.4 indica dois estágios distintos de transformação: na primeira etapa, é acentuada a inclinação da curva $f_L \times T$, isto é, no início da transformação sólido-líquido a variação da fração líquida com a temperatura é elevada, o que é explicado pela fusão preferencial, nesta etapa, do constituinte eutético, o que ocorre sem grandes alterações de temperatura. Nesta etapa, portanto, pequenas variações de temperatura levam a significativas variações da fração líquida no sistema. Nessas condições, o controle do processo de conformação da pasta semi-sólida é dificultado.

A partir de temperaturas em torno de 590°C, a sensibilidade da formação da fase líquida com a temperatura é reduzida, podendo ser observada no gráfico por uma curva menos acentuada.

Nesta etapa, relativa à fusão da fase α da liga, o controle do processo de tixoconformação pode ser menos crítico, uma vez que variações sensíveis na fração líquida dependem de maiores variações de temperatura.

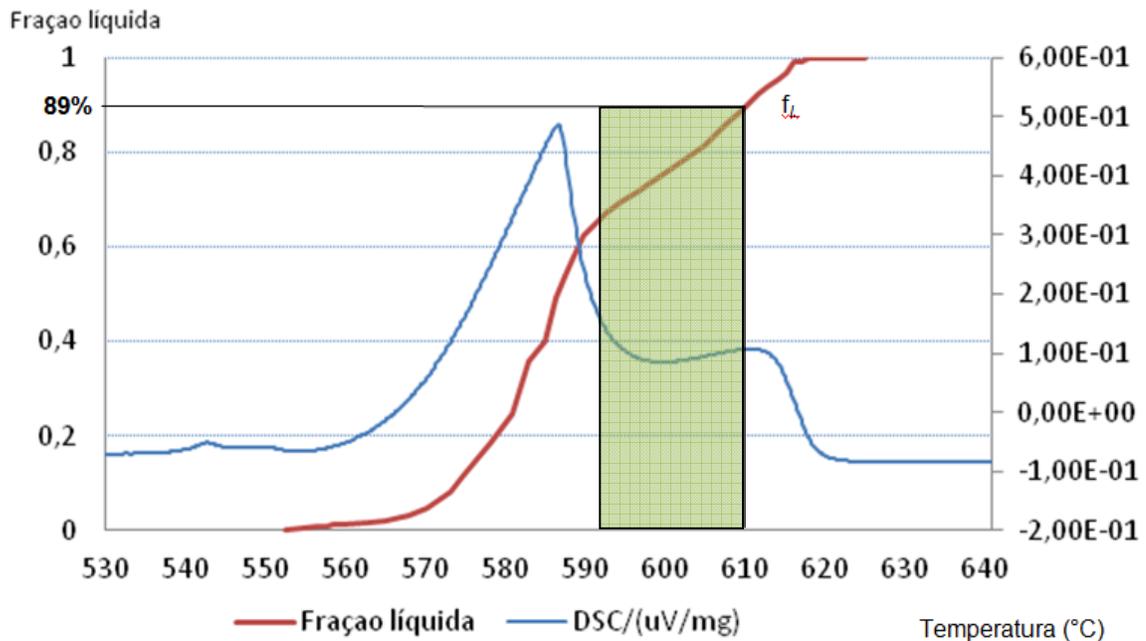


Figura 4.4: Pico endotérmico de fusão da liga A356.0 obtido via DSC (a) e da variação da fração líquida com a temperatura (b). Destaque para janela de tixoconformação sugerida.

É apresentada, na Figura 4.4, uma sugestão de faixa de conformação no estado semi-sólido, ou janela de tixoconformação, para a liga A356.0 de trabalho. Dentro da faixa de tixoconformação, a seleção da temperatura depende da fração líquida apropriada para o processo a ser empregado (injeção, forjamento, etc). No caso do presente trabalho, a pasta tixotrópica é utilizada para a infiltração em espaços reduzidos, confinados entre partículas do agente bloqueador na pré-forma de NaCl. Portanto, elevada fração líquida é aconselhável para prevenir a dificuldade de infiltração; foi selecionada para os testes de produção do componente em estudo a temperatura de 610°C, apresentando nesta condição $f_L \sim 0,89$ e $f_S \sim 0,11$.

4.1.2 Microestrutura da liga A356.0 na condição original

A Figura 4.5 apresenta a microestrutura da liga A356.0 no estado fundido, como adquirida no mercado e empregada como matéria-prima. Pode-se observar a microestrutura típica de fundição, constituída da fase primária α (solução sólida de Al com teor de Si máximo em torno de 1,2% em peso) e do constituinte eutético, composto das fases α e Si. A fase primária α apresenta morfologia dendrítica, com dendritas pouco ramificadas e finas, indicativas de elevada taxa de solidificação; o constituinte eutético, localizado nas regiões interdendríticas, apresenta a fase Si com morfologia arredondada e de pequenas dimensões. Esse tipo de morfologia para cristais de Si em ligas de fundição é indicativo de procedimento de modificação por elementos como Sr, Na ou P. Esses elementos, ao serem adicionados à liga líquida Al-Si, promovem a formação de cristais finos e globulares de Si; na sua ausência, cristais de Si tendem a apresentar morfologia acicular ou agulhada grosseira. A modificação é feita para melhoria de propriedades mecânicas do material.

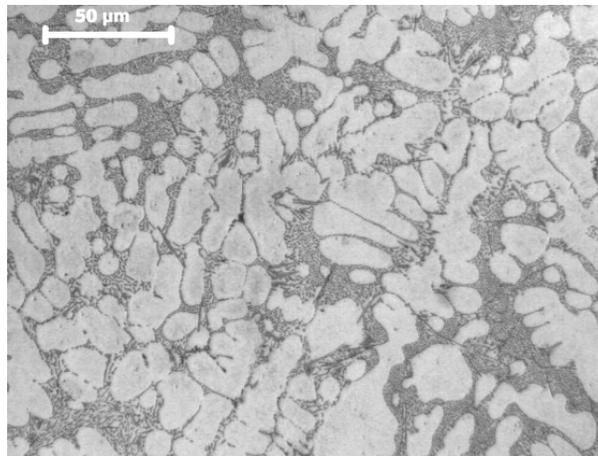


Figura 4.5: Microestrutura da matéria-prima, liga A356.0 fundida em molde metálico.

As dendritas da liga no estado fundido são, como dito, pouco ramificadas e com espaçamento interdendrítico médio da ordem de $14 \pm 8,0 \mu\text{m}$. Para a fabricação de pastas tixotrópicas a partir do metal no estado sólido, isto é, por técnica de fusão parcial controlada, é importante a utilização de matéria prima com estrutura refinada, pois estruturas dendríticas grosseiras podem gerar, no tratamento para globularização, a formação de glóbulos grosseiros e

com alto grau de aglomeração. Nesse caso, a pasta resultante apresentará elevada viscosidade e poderá dificultar o processo de tixoinfiltração.

4.2 Produção de componentes por tixoinfiltração

4.2.1 Aspectos gerais do processo de tixoinfiltração

A. Aquecimento do conjunto pré-forma/liga metálica

O método utilizado para obtenção da pasta tixotrópica a ser infiltrada na pré-forma do agente bloqueador NaCl foi a fusão parcial controlada, com aquecimento do material à temperatura pré-definida para o trabalho (610°C), para promoção da formação de glóbulos a partir da estrutura originalmente dendrítica. O aquecimento da liga foi efetuado diretamente dentro da matriz, com o metal sólido já posicionado sobre (e no interior) da camada de partículas do NaCl.

O conjunto matriz + agente bloqueador + liga metálicas foi, portanto, aquecido simultaneamente. O conjunto foi colocado no interior de forno estabilizado a 610°C, e a temperatura foi monitorada com uso de termopar posicionado em contato com a camada superior da liga de Al, conforme apresentado na Figura 3.21. Foram realizadas três leituras da taxa de aquecimento da liga e a média dos resultados é apresentada na Figura 4.6.

Pode-se verificar que o tempo necessário para o seu aquecimento à temperatura de tixoinfiltração previamente estipulada é de 1 hora e 35 minutos. Esse tempo pode ser considerado longo devido à elevada massa da matriz metálica que contém a camada da liga de Al a ser aquecida. Optou-se por aquecer a liga a ser tixofundida diretamente dentro da matriz de tixoinfiltração para evitar a necessidade de manuseio da pasta semi-sólida e, também, para evitar o resfriamento da pasta, caso fosse empregada a matriz fria.

Trabalhos de tixoconformação apresentados na literatura (ROVIRA, 2001) indicam a necessidade do aquecimento de moldes para a garantia do sucesso do processo, uma vez que o

resfriamento da pasta compromete a sua fluidez e, portanto, a capacidade de preencher adequadamente o molde. Em todo caso, futuros desenvolvimentos podem levar ao aprimoramento da técnica e reduzir o tempo de aquecimento do material para a infiltração. Uma outra alternativa sugerida para a redução do tempo de aquecimento seria o emprego de moldes refratários, o que também já foi demonstrado viável em processos de tixoconformação (ROBERT, 2003), dado que esses processos requerem reduzidas tensões para a promoção do fluxo do metal nos moldes de conformação.

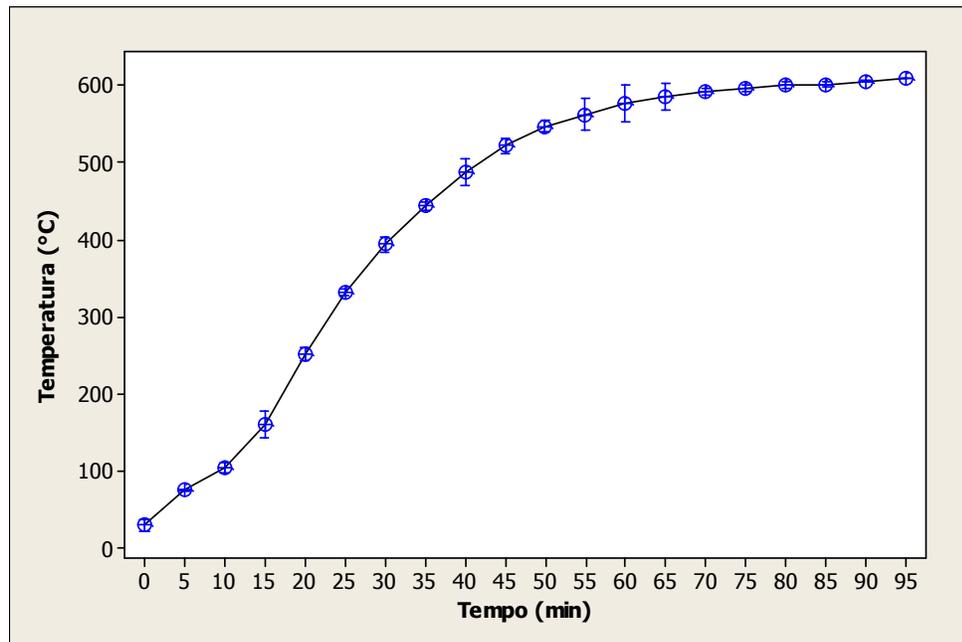


Figura 4.6: Curva de aquecimento média do conjunto matriz + liga A3.56.0 + agente bloqueador, durante ensaio para tixoinfiltração. Linha preta é a média de três leituras e os círculos azuis são o desvio padrão de cada ponto medido.

B. Microestrutura das pastas metálicas obtidas

Na técnica de produção de pastas tixotrópicas empregada, a fusão parcial controlada, o material é aquecido a temperaturas superiores à $T_{solidus}$ e mantido à temperatura definida para a desejada fração líquida na pasta, por tempo suficiente para a promoção da globularização da estrutura. No caso da liga A356.0 utilizada no trabalho, durante o aquecimento, a estrutura

originalmente dendrítica sofre modificações morfológicas devido ao aumento da relação volume/superfície, o que é termodinamicamente orientado.

Ao ser atingida a $T_{solidus}$, o constituinte eutético é fundido, formando uma rede contínua de metal líquido entre os ramos dendríticos da fase primária α . Nessa situação, é acelerada a modificação da morfologia das dendritas da fase α . O aumento subsequente da temperatura promove, também, a fusão parcial da fase α até a formação da fração líquida, devido àquela específica temperatura, isto é, até ser atingida a relação líquido/sólido em equilíbrio àquela temperatura.

Pastas produzidas a partir de estruturas dendríticas grosseiras tendem a apresentar glóbulos de grandes dimensões e morfologia irregular, além de elevado grau de conexão entre eles. Esses fatores prejudicam o comportamento tixotrópico da pasta, inviabilizando seu emprego para processos de tixoconformação. Por outro lado, pastas obtidas a partir de dendritas finas, estruturas pré-globulares ou ainda estruturas com elevado grau de deformação que podem facilmente sofrer recristalização, tendem a apresentar glóbulos de menores dimensões, mais regulares e com menor grau de interconexão (ROBERT, 1993). Estas pastas apresentam melhor comportamento de escoamento (MOTEGI, 2002).

No processo de tixoinfiltração, a fluidez da pasta é fator fundamental, pois o metal semi-sólido deve penetrar os reduzidos espaços entre as partículas do agente bloqueador; isto é particularmente importante no caso de pré-formas sinterizadas, sendo que as dimensões dos vazios são pré-estabelecidas pelo grau de compactação das partículas do agente bloqueador; nestes casos, as dimensões dos glóbulos da pasta devem ser compatíveis com os espaços a serem preenchidos.

A Figura 4.7 apresenta a microestrutura da liga A.356.0 aquecida a 610°C e resfriada rapidamente para manutenção da suas características à temperatura da qual foi resfriada. Pode-se observar estrutura típica de pastas tixotrópicas, isto é, apresentando a fase primária com morfologia globular, cercada pela fase eutética (líquido a 610°C). Medidas de dimensões de glóbulos presentes indicam diâmetro médio de $72 \pm 31 \mu\text{m}$. Comparando-se com as dimensões

das dendritas na estrutura original, é de se supor que cada glóbulo é resultante de processo de aglomeração e engrossamento de várias dendritas (ZOQUI, 1997).

Valores de diâmetro de glóbulos da ordem de 100 μm são típicos para pastas tixotrópicas, portanto, as dimensões de glóbulos da pasta da liga A356.0 a ser utilizada podem ser consideradas finas. Levando-se em conta que a pré-forma utilizada é constituída de partículas soltas de NaCl e que um máximo grau de compactação entre elas ocasiona vazios da ordem de 0,8 mm (ver resultados de espessuras médias de paredes celulares na Tabela 4.2), é de se esperar uma boa capacidade de infiltração.

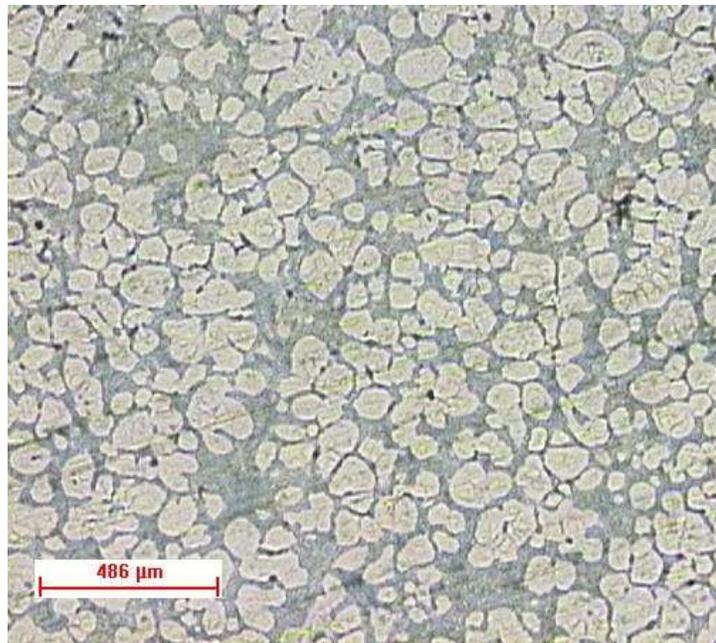


Figura 4.7: Microestrutura da liga A356.0 em estado tixotrópico aquecida a 610°C.

C. Forças empregadas

O processo de infiltração da pasta tixotrópica da liga A356.0 sobre a camada de partículas de NaCl para a fabricação do componente poroso requereu força de compressão máxima de 90 kN, aplicada com uma taxa de avanço do punção de 2,5 mm/s. Esta força corresponde a uma tensão de, aproximadamente, 9 kN/cm^2 , a qual foi mantida por 5 segundos sobre o material, sendo em seguida retirada. Tal reduzido valor de tensão para a conformação de uma liga metálica em um molde é típica do processamento no estado semi-sólido e consequência do comportamento

tixotrópico da pasta. Resultados da literatura indicam valores da ordem de 10 kN/cm^2 , por exemplo, para o tixoforjamento da liga AA2011 (ROVIRA, 2001), ou ainda valores de 8 kN/cm^2 para a infiltração de pastas semi-sólidas da liga AA2011 em pré-formas de micro-esferas de vidro na fabricação de espumas sintáticas (GATAMORTA, 2009).

A reduzida tensão requerida para a tixoinfiltração representa uma facilidade operacional, bem como economia de energia para o processamento, o que torna o processo atraente para o setor produtivo.

4.2.2 Produtos obtidos e aspectos gerais das amostras

A investigação da viabilidade de produção de um componente poroso da liga A356.0 pela técnica de tixoinfiltração de pré-formas de agente bloqueador (NaCl) envolveu a exploração da influência de alguns parâmetros de processo no sucesso da operação e, portanto, na qualidade do produto. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

A. Efeito da granulometria do agente bloqueador

Para análise do efeito das dimensões das partículas do agente bloqueador NaCl (finas, médias e grosseiras) foram realizados testes, conforme a montagem descrita no item 3.4.4, com a relação de 45% de NaCl para 55% em peso da liga, sendo toda a massa da liga em uma única camada, colocada acima da camada de agente bloqueador, no interior da matriz.

A Figura 4.8 apresenta aspecto geral do componente fabricado com partículas finas de NaCl ($1,0 \text{ mm} < \text{diâmetro} < 1,6 \text{ mm}$). Pode-se observar que não houve preenchimento total do molde, comprometendo a qualidade do produto. Um percentual de falhas de aproximadamente 30% de seu volume é constatado. Pode-se observar, também, paredes metálicas finas e frágeis.

Está, portanto, evidente que a granulometria fina dificulta a penetração do metal semi-sólido entre os finos interstícios das partículas, para o teor de NaCl utilizado, mesmo para a elevada

fração líquida presente na pasta tixotrópica. Menores teores de NaCl poderiam permitir a infiltração, mas poderia resultar em produtos com baixo nível de porosidade e consequente alta densidade.

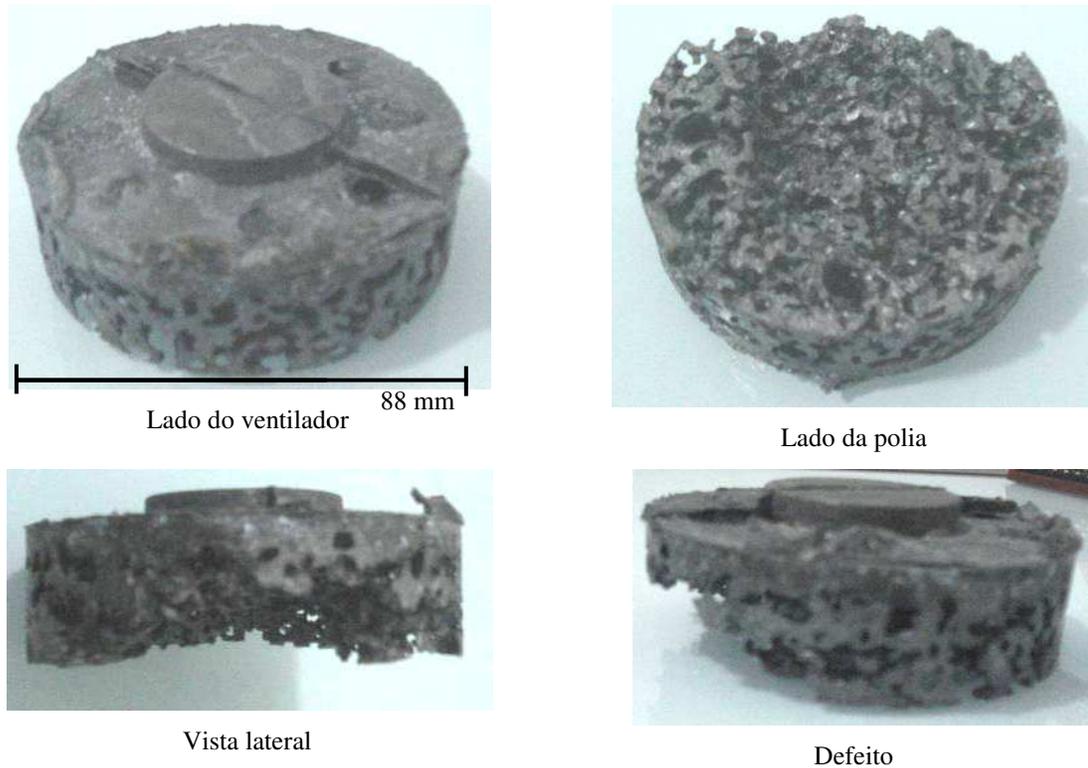


Figura 4.8: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria fina. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.

A Figura 4.9 apresenta componente fabricado com partículas de NaCl de dimensões médias ($1,6 \text{ mm} < \text{diâmetro} < 3,15 \text{ mm}$). Nesse caso, pode ser observado o preenchimento total do molde; algumas falhas podem ser observadas na parte interna (lado da polia), sendo que as faces de apoio e as laterais estão isentas de defeitos estruturais. É possível, também, observar que a parte superior do componente (lado do ventilador) apresenta camada sólida maciça da liga metálica. Nesta região estava localizada a camada metálica a ser infiltrada. Portanto, como observada a ocorrência de total preenchimento do molde durante aplicação da pressão, isto é, total fluxo da pasta da liga até a base da matriz, a quantidade de metal utilizada se mostrou excessiva, resultando em uma camada sólida não porosa na peça, na região em contato com o punção.

É observada uma distribuição macroscopicamente homogênea de vazios por todo o volume da peça. As paredes celulares se apresentam, desta forma, com espessura aparentemente homogênea, não havendo evidência de locais com aglomeração de vazios, que seriam consequência da aglomeração de partículas de NaCl durante a infiltração da liga metálica.



Figura 4.9: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.

Na Figura 4.10, é apresentado produto típico obtido pela infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido, sobre camada de partículas de NaCl de granulometria grosseira (diâmetro > 3,15

mm). Pode-se observar, novamente, total preenchimento da matriz, resultando em uma peça íntegra. Foi observada apenas uma região de defeito, em uma das faces.

Os vazios são aparentemente distribuídos de maneira homogênea no volume do componente; são de maiores dimensões e em menor quantidade que os vazios produzidos por partículas de menores dimensões (mesma fração em peso de NaCl foi utilizada). Também é observada uma camada sólida maciça na região do componente – lado do ventilador – mais distante da ação do punção durante a infiltração.

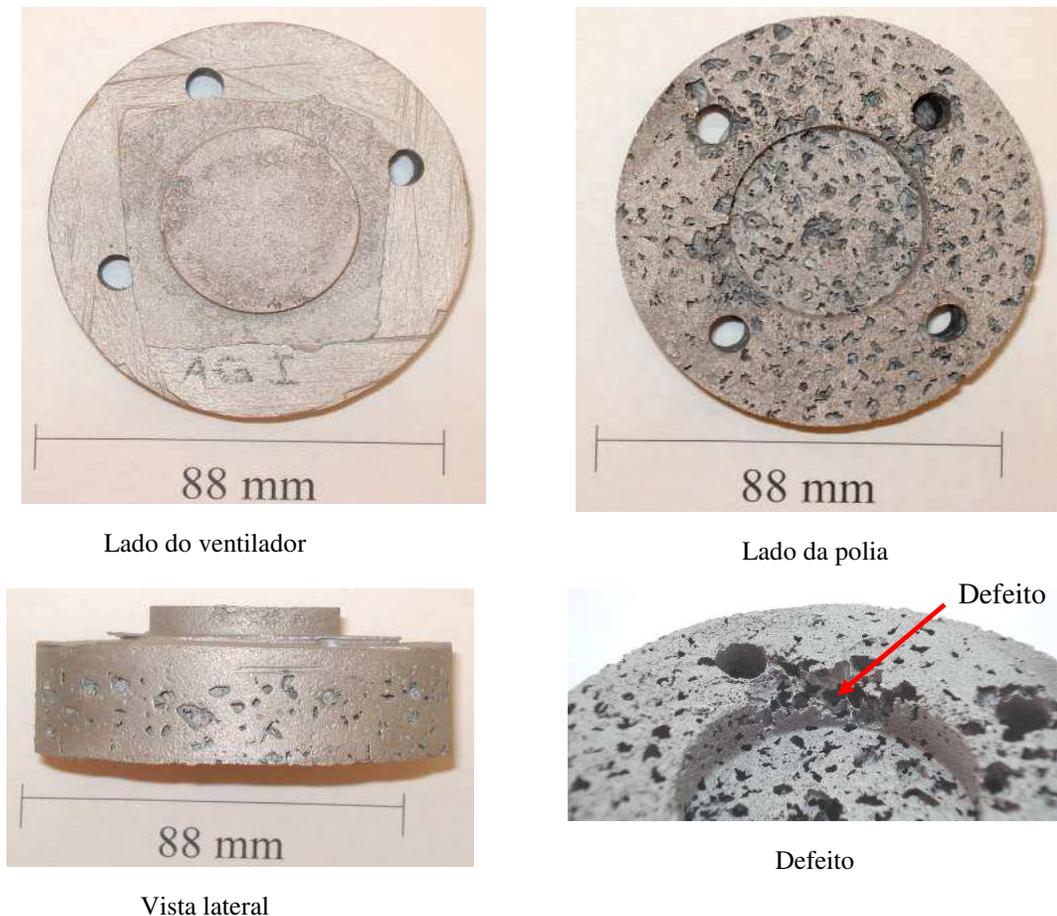


Figura 4.10: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria grosseira. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.

Os resultados obtidos, variando-se a granulometria do agente bloqueador, mostram que, na faixa de dimensões de partículas empregadas e nas condições de infiltração utilizadas, os

componentes fabricados com partículas de granulometria média apresentaram as melhores condições de qualidade, dimensões e distribuição de poros.

B. Efeito da quantidade relativa do agente bloqueador e da liga metálica

Para análise do efeito da quantidade relativa de partículas do agente bloqueador e da liga metálica foram realizados testes nas seguintes combinações: 45%/55% e 55%/45% em peso de NaCl e liga, respectivamente. Foram empregadas partículas de NaCl de granulometria média e toda a massa da liga foi posicionada como uma única camada sobre a camada de partículas do agente bloqueador.

Uma vez observada a possibilidade de total preenchimento do molde com a geometria inicial, para estes testes, foi introduzida uma modificação na matriz, com o intuito de obter um produto com geometria mais próxima do componente fabricado por fundição: foi inserido um macho central para a produção do anel central vazado do componente utilizado nos motores Série 229. Desta maneira, é reduzido o peso do componente.

A Figura 4.11 apresenta o resultado típico obtido para a combinação 45%/55% de NaCl e liga metálica, respectivamente. Pode-se observar total preenchimento do molde, mas algumas falhas podem ser vistas na parte interna, no lado da polia, indicando maior dificuldade de fluxo da liga nestas regiões devido à presença do macho. Nessas regiões, as paredes celulares são mais finas e frágeis e os poros apresentam maiores dimensões, devido, provavelmente, à aglomeração de partículas de NaCl.

Observa-se, ainda, a presença de uma camada maciça de Al na parte superior da peça (lado do ventilador), indicando o excesso de massa da liga empregado.



Lado do ventilador



Lado da polia



Vista lateral



Defeito

Figura 4.11: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média e com a utilização do macho central. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 45%/55%.

A Figura 4.12 apresenta resultado obtido quando empregada a combinação 55% e 45% em peso de partículas de NaCl e da liga metálica, respectivamente. O resultado da alteração das proporções de sal e liga levou a uma melhora significativa na qualidade interna da peça, sendo que a camada maciça da liga, que ficava concentrada na parte superior, distribuiu-se mais uniformemente. Apesar da distribuição mais homogênea do alumínio, a peça ainda apresenta a possibilidade de defeitos internos, como observado junto a um dos orifícios para passagem de parafuso.



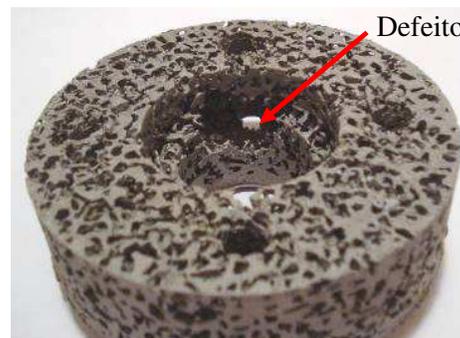
Lado do ventilador



Lado da polia



Vista lateral



Defeito

Figura 4.12: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre camada de partículas de NaCl de granulometria média. Relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%.

Os resultados obtidos, variando-se a quantidade relativa de partículas do agente bloqueador e da liga metálica, bem como a inserção de um macho na matriz para a promoção do orifício interno do componente, mostram que, em primeiro lugar, mesmo com a presença do macho é possível a total infiltração da liga metálica e o total preenchimento do molde; em segundo lugar, que a relação 55% e 45% de NaCl e liga, respectivamente, produziu os melhores resultados, eliminando a camada maciça de liga na região da peça junto ao punção.

C. Efeito da distribuição de massa da liga metálica

Para a análise do efeito da distribuição de massa da liga metálica na montagem do sistema metal/agente bloqueador para infiltração, foram empregadas três distintas configurações: toda a massa do metal (100%) em uma única camada, posicionada sobre a camada de partículas de NaCl; a massa total da liga dividida em duas camadas, sendo uma interna (40% da massa) no interior das partículas do agente bloqueador e outra (60% da massa) sobre as partículas de NaCl; novamente camadas duplas, a interna contendo 20% da massa total da liga e a superior contendo 80% da massa. O esquema representativo da montagem com dupla camada da liga A356.0 pode ser observada na Figura 3.19, Capítulo 3.

Em todos os casos, foi empregada a relação de 55% de agente bloqueador de granulometria média e 45% da liga metálica.

O resultado obtido com o emprego de toda a massa da liga sobre a camada de partículas de NaCl pode ser observado na Figura 4.12, na qual se constata o total preenchimento, bem como a eliminação praticamente completa da camada sólida maciça na parte superior e, ainda, a presença de alguns defeitos no interior da peça. Na Figura 4.13, é apresentado resultado obtido na condição de divisão da massa do metal em duas camadas, interna e sobre o agente bloqueador, contendo 40% e 60% da massa total empregada, respectivamente.

Pode-se observar que houve o total preenchimento do molde, sem defeitos na parte interna (ver imagem “lado da polia”). Pequeno defeito de infiltração é observado na região superior da peça, talvez por insuficiência de metal na região; a camada maciça de Al na última região a ser infiltrada, junto ao punção (lado do ventilador) se apresenta com espessura bastante reduzida. As bordas superiores apresentam imperfeições de preenchimento. Os defeitos observados não impossibilitam a utilização da amostra em testes funcionais, pois não se encontram na região de apoio dos parafusos.



Figura 4.13: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre partículas de NaCl de granulometria média; relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%. Massa da liga distribuída em duas camadas: 40% na camada interna e 60% sobre as partículas do agente bloqueador.

A Figura 4.14 apresenta o componente obtido na condição de divisão da massa do metal em duas camadas internas e sobre o agente bloqueador, contendo 20% e 80% da massa total empregada, respectivamente. Esta configuração resultou em uma amostra aparentemente livre de defeitos. Não há defeitos de preenchimento ou poros de excessivas dimensões detectáveis visualmente, no corpo da peça. Somente são observados defeitos de preenchimento nas bordas da peça, na sua parte superior, ou seja, a última região a ser infiltrada. Este defeito pode ser atribuído a um possível resfriamento da pasta em contato com o punção, ou a um aumento da fração sólida na pasta, na região, devido à separação do líquido no processo de infiltração. É conhecido que o fluxo da pasta tixotrópica pode ocasionar a separação das fases líquida e sólida, pelo movimento preferencial do líquido na frente do fluxo (ROBERT, 2001).

De modo geral, os poros se apresentam bem distribuídos e com dimensões homogêneas. Ainda é observada fina camada superficial maciça no produto, resultante de fina película de material solidificado na superfície, junto ao punção. A qualidade total observada no produto obtido nesta condição permite concluir que a distribuição da massa da liga no interior da camada do agente bloqueador produz os melhores resultados.



Lado do ventilador



Lado da polia



Vista lateral



Defeito

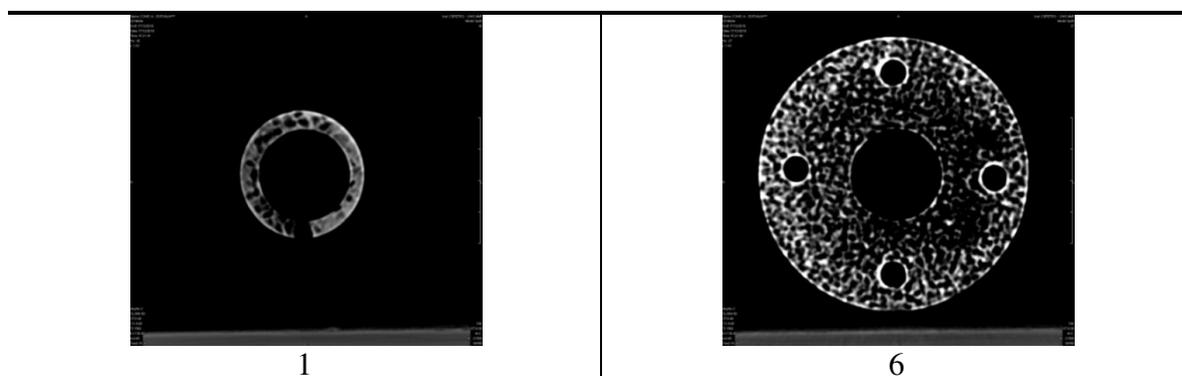
Figura 4.14: Típico componente fabricado por infiltração da liga A356.0 no estado semi-sólido sobre partículas de NaCl de granulometria média; relação de teor percentual em peso de NaCl e liga: 55%/45%. Massa da liga distribuída em duas camadas: 20% na camada interna e 80% sobre as partículas do agente bloqueador.

4.2.3 Caracterização dos produtos obtidos – componentes porosos

A. Qualidade interna

Os componentes produzidos, considerados de boa qualidade, foram submetidos à tomografia de raios X para análise da qualidade interna. A Figura 4.15 apresenta resultado referente ao componente produzido com distribuição de massa da liga em duas camadas, uma interna e outra sobre as partículas do agente bloqueador, numa relação de 40%/60%, respectivamente (amostra apresentada na Figuras 4.13).

Pode-se observar que o componente apresenta boa qualidade interna, com total preenchimento e distribuição de vazios bastante homogênea. Somente um pequeno defeito é observado: uma descontinuidade no anel superior (imagens 1 e 2); este defeito não foi considerado crítico, pois esse anel possui apenas função de alinhamento de outro componente a ser montado sobre ele, neste caso, o ventilador. As imagens seguintes apresentam uma formação homogênea das paredes celulares, sem defeitos nas regiões críticas compreendidas entre os furos dos parafusos e o vazio central da peça.



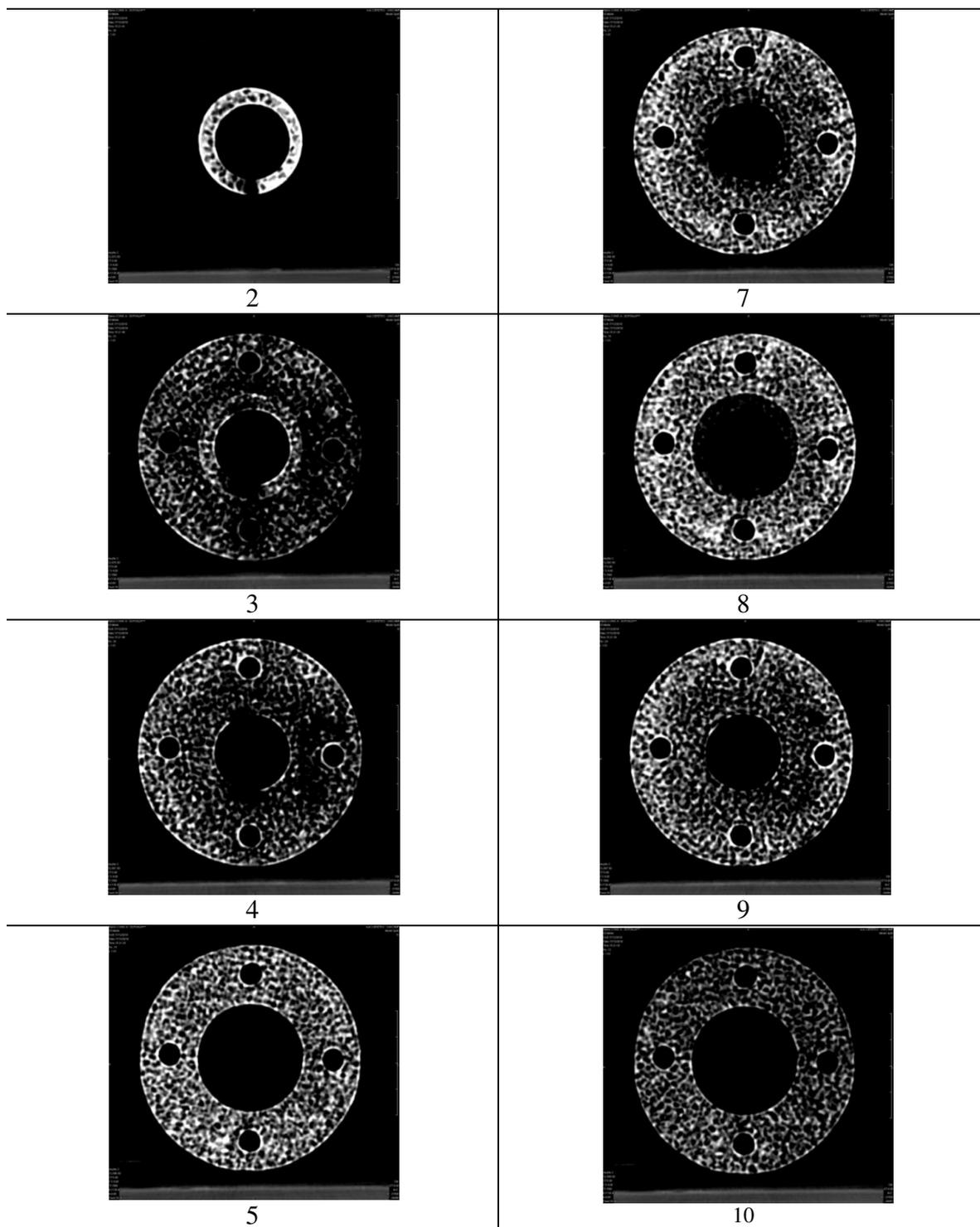


Figura 4.15: Imagens por tomografia de raios-X de componente poroso da liga A356.0 fabricados com distribuição de massa da liga em duas camadas, uma no interior e outra sobre partículas de agente bloqueador.

B. Densidade

Os componentes produzidos foram caracterizados quanto às densidades real e relativa e teor de porosidade. As medidas de densidade foram feitas por picnometria a gás He em amostras retiradas em regiões sem defeitos dos componentes apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13 (3 amostras de cada componente). A Tabela 4.1 apresenta os valores médios obtidos em cada caso.

Tabela 4.1: Valores médios de densidade relativa e teor de porosidade dos componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração em camada de partículas de NaCl.

Origem corpo de prova	ρ_{real} (g/cm³)	ρ_{rel} * (%)	Porosidade (%)
Componente 1 (Figura 4.12)	1,31 ± 0,07	49,34 ± 0,05	51,52 ± 0,19
Componente 2 (Figura 4.13)	1,33 ± 0,12	49,93 ± 0,11	52,91 ± 0,32

* $\rho_{rel} = 2,685 \text{ g/cm}^3$ (METALS HANDBOOK, 2004)

Pode-se observar que os dois componentes apresentam densidades e teores de porosidade semelhantes. A variação da quantidade relativa de NaCl e da liga nos níveis empregados (componente 1 com relação 45%/55% e componente 2 com 55%/45% de NaCl e liga, respectivamente), não levaram a variações sensíveis na densidade e porosidade do material.

A redução da densidade do material é bastante significativa, cerca de 50%, com relação ao valor teórico da densidade da liga maciça. Na Figura 4.16, são apresentados valores de densidade real e peso de componentes porosos produzidos e, para efeito de comparação, os valores de densidade e peso de componentes convencionais maciços produzidos por fundição – são apresentados os quatro diferentes tipos de espaçadores fundidos utilizados pela empresa MWM International Motores Diesel, conforme apresentados no item 3.1, Capítulo 3.

Os atuais componentes fundidos utilizados nos motores, chamados de “Peça” no gráfico da Figura 4.16, tiveram seu volume medido através de *software* de desenho, devido à sua forma irregular. Para o peso, foi utilizada a mesma balança para medir as peças e as amostras. As indicações “Peça 1”, “Peça 2”, “Peça 3” e “Peça 4” se referem, respectivamente, aos componentes apresentados nas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6 do Capítulo 3. As colunas azuis

representam a densidade real dos componentes fundidos e as colunas verdes representam a densidade real dos componentes 1 e 2 porosos produzidos por tixoinfiltração. No mesmo gráfico, a linha contínua em vermelho representa o peso em gramas dos diferentes componentes.

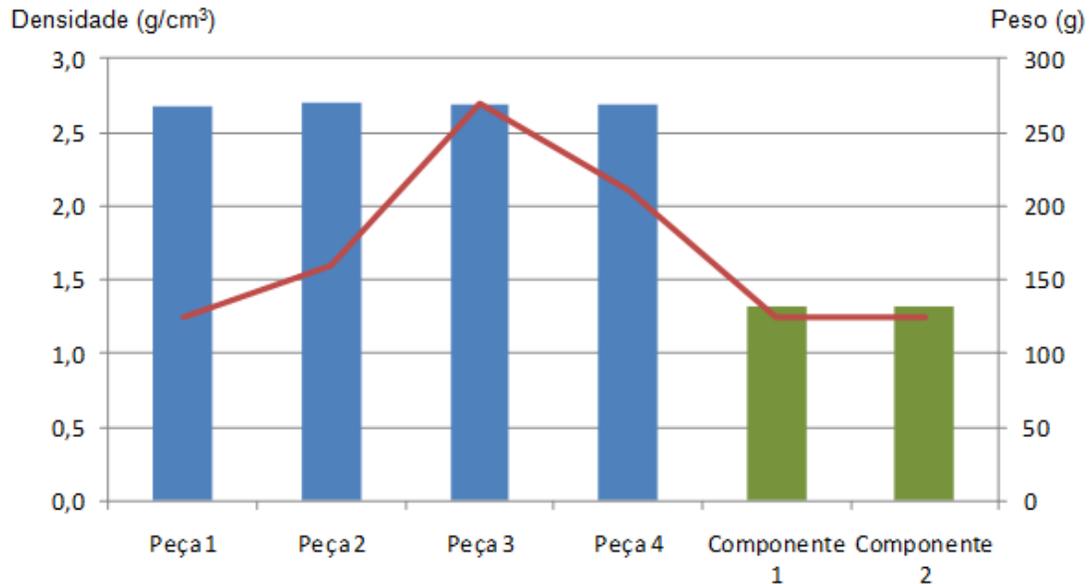


Figura 4.16: Densidade real e peso de componentes – espaçador de ventilador – da liga A356.0 fundidos (Peças 1, 2, 3 e 4) e porosos (Componentes 1 e 2). Colunas: densidade real; linha: peso. Peças 1, 2, 3 e 4 se referem aos produtos apresentados nas Figuras 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 e Componentes 1 e 2 se referem aos componentes apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13.

Pode-se observar que os componentes porosos apresentam menor peso que todos os componentes fundidos empregados atualmente, mesmo apresentando maior volume. Observa-se a significativa redução da densidade do componente no estado poroso, cuja estrutura contendo vazios fornece uma densidade real da ordem de 50% menor que a densidade média das peças fundidas. Esta redução de densidade proporciona componentes com pesos inferiores aos das peças convencionalmente empregadas, mesmo para geometrias modificadas, isto é, com maior volume, como a utilizada. A modificação da geometria da peça, neste estágio do desenvolvimento, se fez necessária para a garantia do total preenchimento do molde e obtenção de peças de boa qualidade. O aprimoramento do processo desenvolvido poderá levar à capacidade de produção de peças com geometria otimizada, de menor volume, proporcionando uma redução ainda maior do peso do componente.

C. Caracterização de paredes celulares - espessura

Em um material celular, além da densidade e teor de vazios, importantes parâmetros para a definição de suas propriedades são a espessura de paredes celulares e a sua microestrutura. A espessura de paredes reflete a distribuição de massa e tem importante papel no comportamento mecânico do material: paredes finas podem facilmente sofrer ruptura e provocar o colapso das células a reduzidas tensões. Por outro lado, paredes excessivamente espessas podem requerer altas tensões para deformação, reduzindo a capacidade de proteção em casos de choques, por exemplo.

A espessura das paredes metálicas foi medida através de análise de imagens de corpos de prova preparados com técnicas metalográfica, retirados de componentes porosos que apresentaram boa qualidade. Foram realizadas vinte medidas em cada corpo de prova; os valores médios encontrados para este parâmetro são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Valores médios da espessura das paredes celulares dos componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração em camada de partículas de NaCl.

Origem corpo de prova	Espessura da parede (mm)
Componente 1 (Figura 4.12)	0,78 ± 0,39
Componente 2 (Figura 4.13)	0,84 ± 0,43

Pode-se observar valores médios de espessuras de paredes da ordem de 0,80 mm. Não há diferença significativa nas espessuras de paredes de células nos dois componentes analisados; ambos apresentaram a mesma densidade e mesmo teor de poros.

Esses valores de espessuras de paredes metálicas, as quais correspondem ao espaçamento entre partículas do agente bloqueador, são superiores aos valores das dimensões dos glóbulos sólidos na pasta metálica tixotrópica empregada (da ordem de 70 μm , como previamente indicado), proporcionando, portanto, condições de infiltração, como observado.

Um fato a ser notado é a elevada dispersão dos valores médios das espessuras de paredes, indicando grande variação das paredes celulares no interior do produto. Esta variação é típica de esponjas em geral; é possível a produção de materiais celulares com espessuras de paredes homogêneas, com o emprego de técnicas mais sofisticadas, como, por exemplo, a utilização de pré-formas regulares fabricadas por prototipagem ou arranjos mecânicos regulares de partículas/fios, entre outras.

D. Caracterização de paredes celulares - microestrutura

O comportamento mecânico de materiais celulares está relacionado não só à arquitetura dos poros (dimensões, distribuição, espessura de paredes), mas também às propriedades metalúrgicas da liga que constitui essas paredes, a qual, por sua vez, depende da sua microestrutura.

Na Figura 4.17, são apresentadas imagens típicas de paredes celulares de componentes porosos produzidos. Pode-se observar estruturas constituídas de fase α de morfologia aproximadamente globular e do constituinte eutético contendo Si na forma de agulhas finas, o que confirma a infiltração no estado semi-sólido. Se comparada com a microestrutura da pasta antes da infiltração (Figura 4.7) pode-se observar que houve aglomeração e coalescimento dos glóbulos sólidos durante o processo de infiltração, levando à degeneração de sua morfologia e aumento de suas dimensões. Como o processo ocorre à temperatura constante, esta aglomeração pode ser resultado da separação líquido/sólido da pasta durante o fluxo, levando a heterogeneidades de distribuição de sólido/líquido no interior da peça. Regiões com maior teor de sólido podem ocasionar a sua aglomeração e coalescência entre glóbulos, como observado. De fato, a análise de regiões mais distantes da região de aplicação da tensão para infiltração revela estruturas com maior teor de líquido, conforme apresentado na Figura 4.17 (d), em que uma estrutura mais dendrítica pode ser observada. O crescimento de glóbulos sólidos da pasta infiltrada pode, ainda, ocorrer no processo de resfriamento, no interior do molde aquecido; a peça foi desmoldada após, aproximadamente, 3h de resfriamento.

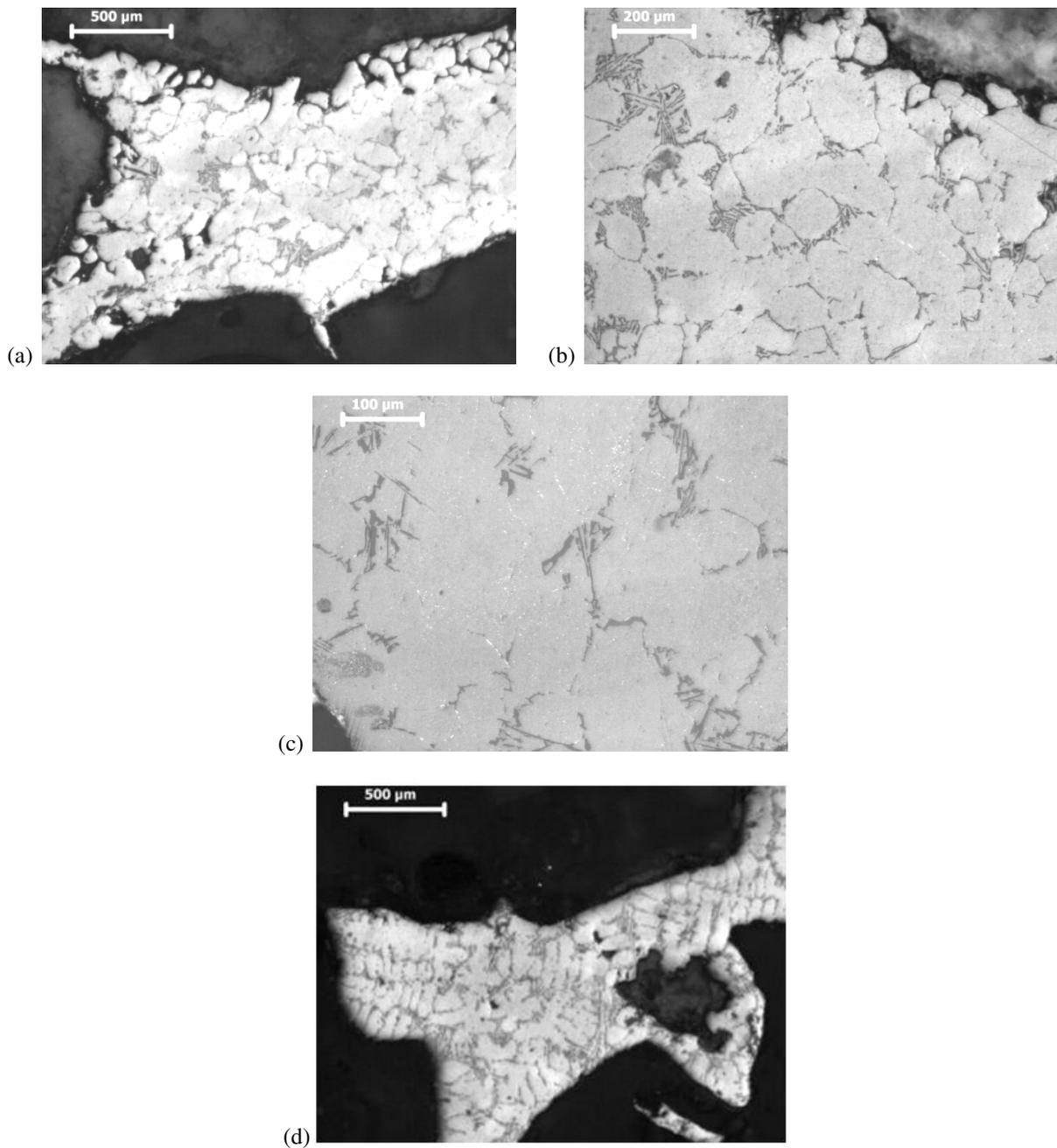


Figura 4.17: Microestruturas típicas de paredes celulares de componentes porosos da liga A356.0, fabricados por tixoinfiltração. (a, b, c) região intermediária; (d) região inferior da peça.

E. Estimativa teórica de propriedades mecânicas e térmicas

Foram feitas estimativas teóricas de alguns parâmetros relativos às propriedades mecânicas e térmicas do material poroso produzido. Foram calculados o Módulo de Elasticidade (E), a Tensão

de Compressão (σ_c) e a Condutividade Térmica (λ). Para tanto, foram utilizadas as equações propostas por Ashby, 2000, apresentadas no Capítulo 2.

Para o cálculo do módulo de elasticidade (E) do material dos componentes porosos produzidos pelo processo de tixoinfiltração foi utilizada Equação 2.2, dada por:

$$E \approx \alpha_2 \cdot E_S \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^n \quad (\text{Equação 2.2})$$

onde:

$E_S = 260$ MPa para a liga A.356.0 maciça (METALS HANDBOOK, 2004)

$\alpha_2 = 2$ (tomando valor intermediário entre valores mínimo de 0,4 e máximo de 4,0 para metais celulares, segundo Ashby, 2000).

$n = 2$ (indicado por Ashby, 2000)

$\rho = 1,31$ g/cm³ e $1,33$ g/cm³ (valores médios de densidade do material de dois diferentes componentes – apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13)

$\rho_S = 2,685$ g/cm³ para a liga A.356.0 maciça (METALS HANDBOOK, 2004)

Para o cálculo da tensão de compressão (σ_c) do material dos componentes porosos produzidos pelo processo de tixoinfiltração foi utilizada Equação 2.3, dada por:

$$\sigma_c = n_I \cdot \sigma_{c,s} \left(\frac{\rho}{\rho_S} \right)^{3/2} \quad (\text{Equação 2.3})$$

onde:

$n_I = 0,5$ (valor médio entre valores mínimo de 0,1 e máximo de 1,0 para metais celulares, segundo Ashby, 2000).

$\sigma_{c,s} = 195$ MPa (METALS HANDBOOK, 2004)

$\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ e $1,33 \text{ g/cm}^3$ (valores médios de densidade do material de dois diferentes componentes – apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13)

$\rho_s = 2,685 \text{ g/cm}^3$ (METALS HANDBOOK, 2004)

Para o cálculo da condutividade térmica (λ) do material dos componentes porosos produzidos pelo processo de tixoinfiltração foi utilizada Equação 2.6, dada por:

$$\lambda \approx \lambda_s \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^q \quad (\text{Equação 2.6})$$

onde:

$\lambda_s = 0,36 \text{ cal/cm.s.}^\circ\text{C}$ (METALS HANDBOOK, 2004)

$\rho = 1,31 \text{ g/cm}^3$ e $1,33 \text{ g/cm}^3$ (valores médios de densidade do material de dois diferentes componentes – apresentados nas Figuras 4.12 e 4.13)

$\rho_s = 2,685 \text{ g/cm}^3$ (METALS HANDBOOK, 2004)

$q = 1,725$ (tomando valor médio entre valores mínimo de 1,65 e máximo de 1,8 para metais celulares, segundo Ashby, 2000).

Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4.3. Na mesma tabela, são repetidos os valores de densidade e espessura de paredes celulares, para facilidade de análise.

Pode-se observar que os valores de todas as propriedades calculadas são semelhantes para os dois componentes analisados, com apenas leve tendência ao aumento da densidade e espessura de paredes de células na estrutura.

Os valores resultantes demonstram que o módulo de elasticidade (E) dos materiais celulares é da ordem de 50% do valor do material maciço, resultando em um componente com reduzida capacidade elástica quando submetido a tensões de compressão, isto é, a deformação plástica se inicia rapidamente, a reduzidas tensões.

Tabela 4.3: Valores do módulo de elasticidade (E), tensão de compressão (σ_c) e condutividade térmica (λ) dos materiais porosos de dois distintos componentes da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração, calculados segundo modelos de Ashby (2000).

Origem corpo de prova	Densidade (g/cm^3)	Espessura de paredes celulares (mm)	Módulo de Elasticidade calculado E (MPa)	Tensão de compressão σ_c (MPa)	Condutividade Térmica λ (cal/cm.s.°C)
Componente 1 (Figura 4.12)	1,31 ± 0,07	0,78 ± 0,39	124	33	0,104
Componente 2 (Figura 4.13)	1,33 ± 0,12	0,84 ± 0,43	128	34	0,107
Maciço (A356.0)	2,68	-	260	195	0,36

Quanto à tensão de compressão (σ_c), os resultados mostram, para o material celular, valores cerca de 6 vezes inferiores aos do material maciço. Esses reduzidos valores tornam a esponja interessante para aplicações em proteção a choques, pois o material se deforma plasticamente por adensamento a reduzidas tensões, não transferindo a energia do choque para o sistema que protege. Para a aplicação do componente estudado, o baixo valor de σ_c pode comprometer a sua fixação por parafusos. Em item posterior, é analisada a possibilidade de montagem do componente fabricado.

Quanto à condutividade térmica (λ), os resultados obtidos para os materiais celulares são da ordem de 3 vezes menores se comparados com os do material maciço. Isso demonstra que o material celular possui maior capacidade de dissipação de calor, devido à sua estrutura constituída de vazios entre as células, fazendo com que a transmissão de calor entre um componente e outro seja significativamente menor.

Pode-se comentar, aqui, que os modelos empregados são bastante simplificados e empíricos, levando em conta basicamente a densidade do material e não a distribuição de massa, refletida, por exemplo, na variação da espessura das paredes de células. Esse parâmetro deve ser particularmente importante quando se trata de comportamento mecânico do material.

Desenvolvimentos devem ser feitos no sentido de aprimorar os modelos para a previsão de propriedades desta classe de materiais.

F. Avaliação de desempenho

Foram realizados testes de desempenho do componente poroso fabricado; os testes envolveram a montagem do componente no motor e a análise do seu desempenho com o motor em funcionamento. Os testes foram efetuados segundo normas da empresa MWM International Motores Diesel empregadas para testes de componentes fundidos. Os resultados são apresentados a seguir.

F1. Teste de montagem

Este teve como finalidade verificar se as dimensões funcionais da amostra estão dentro das especificações de uso do componente, como a planicidade entre as faces, as dimensões de montagem no lado da polia do motor e no lado de encaixe do ventilador e o posicionamento dos quatro parafusos de fixação. A montagem do conjunto permite, também, verificar se o acabamento e o paralelismo entre as faces de apoio, quando o conjunto polia, espaçador e ventilador estiverem montados, não interfere no balanceamento, de tal forma que não gere vibrações de caráter visual ou sonoro enquanto o motor estiver em funcionamento.

A Figura 4.18 apresenta fotos da montagem do componente no motor: em (a), está a parte frontal do motor com a polia de montagem do espaçador do ventilador (a1); na imagem (b), a amostra do espaçador do ventilador está posicionada no centro do ventilador; na imagem (c), são mostrados os quatro parafusos M8 e, em (d), é mostrado o conjunto montado.

Após a montagem, pode-se concluir que as dimensões da amostra produzida em esponja metálica atingiu os objetivos dimensionais, estando o posicionamento dos furos dentro das tolerâncias necessárias a uma perfeita montagem e o paralelismo das faces não comprometendo o balanceamento do ventilador.

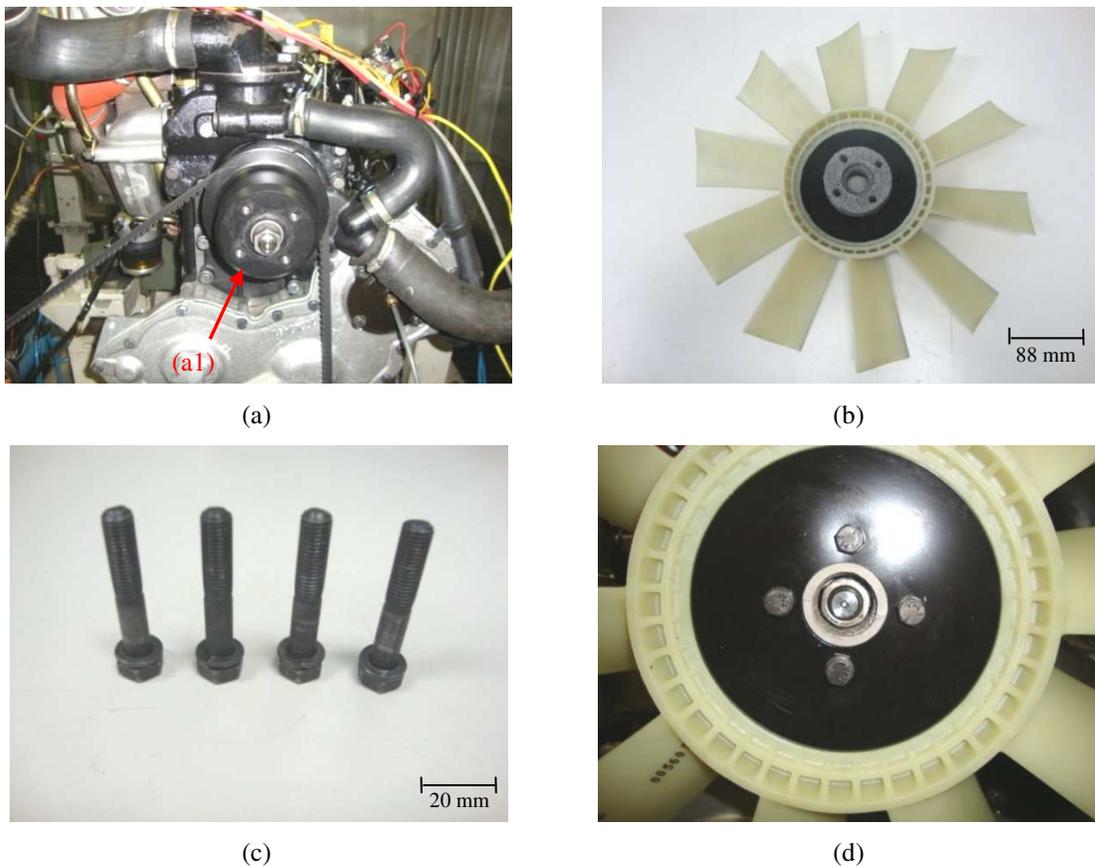


Figura 4.18: Teste de montagem de componente poroso da liga A356.0 fabricado por tixoinfiltração. Polia do motor (a), ventilador e espaçador (b), parafusos M8 (c) e conjunto montado (d).

F2. Teste com motor em banco dinamométrico

O teste do componente poroso fabricado com o motor em funcionamento, em banco dinamométrico, teve como finalidade verificar o seu comportamento durante uma hora, em rotação máxima permitida para o motor. Uma possível perda de carga nos parafusos de fixação, após essa condição de uso, acusaria um amassamento ou quebra das paredes celulares. Sendo assim, o componente celular foi montado no motor instalado no banco dinamométrico número 4, da área de testes na planta de manufatura de motores da MWM International Motores Diesel em Canoas (RS). Foi numerado cada um dos parafusos e, após, aplicado um torque (aperto) de montagem de 18 N.m em cada parafuso, medidos por um torquímetro. Após conferência dos valores, o motor foi ligado e colocado em funcionamento por 5 minutos a 2.300 rpm (rotações

por minuto). Essa primeira etapa foi necessária para verificar um possível assentamento do componente, o que poderia causar perda de carga nos parafusos e, conseqüentemente, soltar o componente durante o teste proposto. Assim, após os 5 minutos a 2.300 rpm, verificou-se que nenhum dos 4 parafusos perdeu carga, sendo o conjunto aprovado para iniciar o segundo ciclo de teste.

No segundo ciclo de teste, de 1 hora a 2.300 rpm, o objetivo foi submeter o conjunto a uma condição extrema de utilização do motor e dos componentes. Após transcorrida a 1 hora de teste proposto para o segundo ciclo, o motor foi desligado, sendo primeiramente feita uma análise visual e, após, a desmontagem do conjunto, com a medição do torque de desaperto na mesma seqüência da montagem e com o mesmo dispositivo (torquímetro).

A Tabela 4.4 apresenta os valores de torque em cada parafuso durante a montagem, chamados de torque inicial e, após o segundo ciclo de teste, bem como as diferenças encontradas.

Pode-se observar, através dos valores de perda de carga da Tabela 4.4, que os parafusos 1 e 2 tiveram uma perda de carga de 0,7 N.m e 0,4 N.m, respectivamente, demonstrando um possível amassamento das paredes celulares em parte do componente. Já os parafusos 3 e 4 não apresentaram perda de carga, logo, sem amassamento das paredes celulares.

Tabela 4.4: Valores dos torques de aperto de parafusos de montagem do componente poroso da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração, antes e após teste em motor em funcionamento.

	Torque inicial (N.m)	Torque (N.m) após 1h a 2.300 rpm	Perda de carga (N.m)
Parafuso 1	18,2	17,5	-0,7
Parafuso 2	18,0	17,6	-0,4
Parafuso 3	18,0	18,0	0
Parafuso 4	18,1	18,1	0

As fotos da Figura 4.19 foram feitas após o segundo ciclo de teste, sendo possível observar nas imagens (b), (c) e (d) a ocorrência de um início de amassamento do componente, no lado do ventilador.

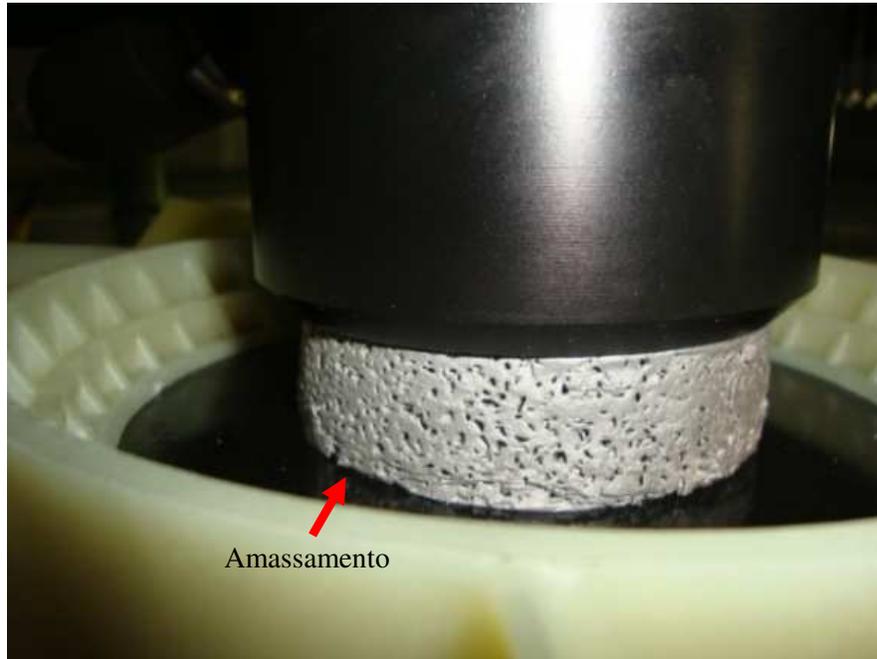
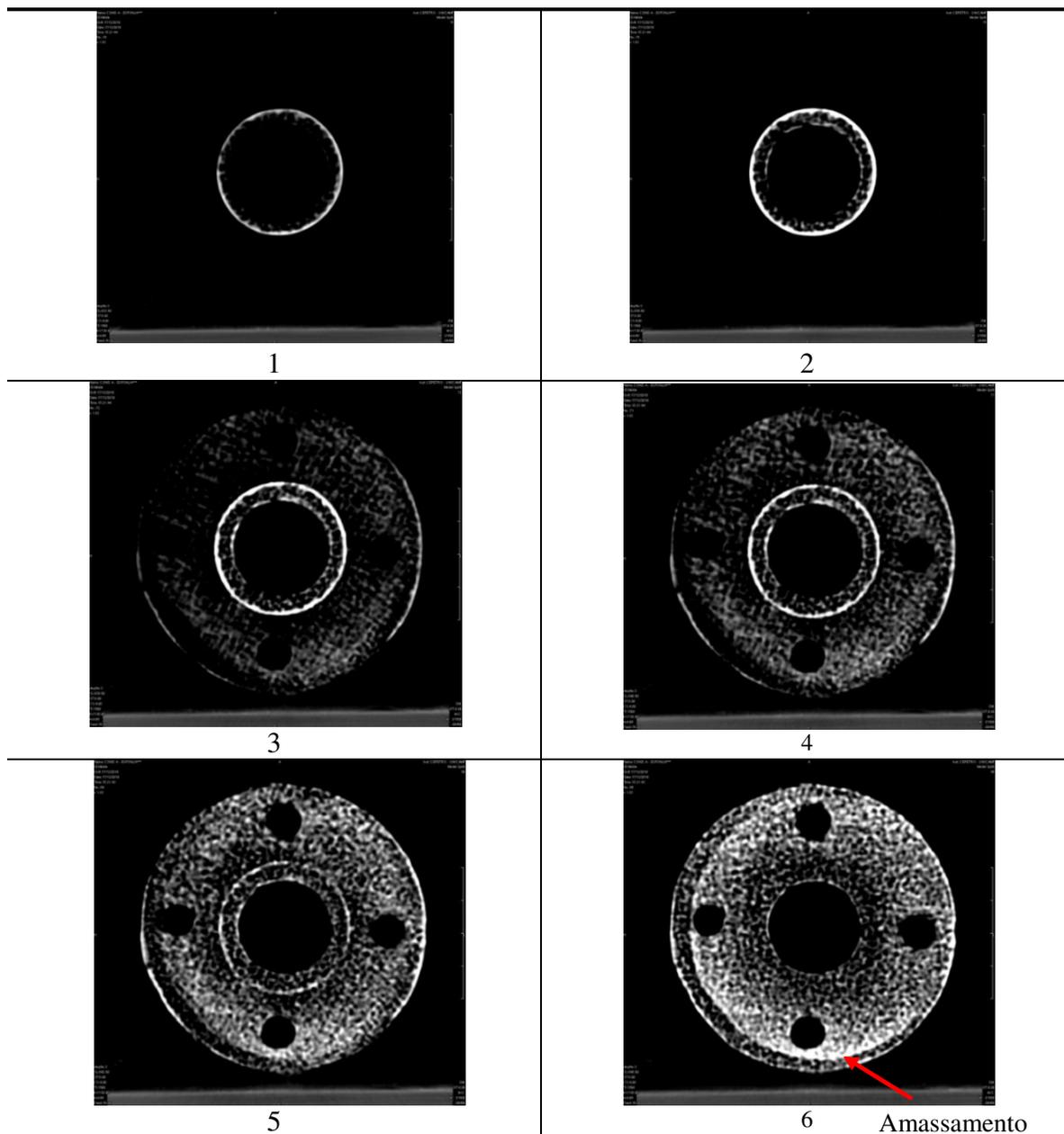


Figura 4.19: Foto de componente poroso da liga A356.0 fabricado por tixoinfiltração, após teste de desempenho com motor em funcionamento.

Para uma melhor avaliação do dano causado no componente testado, este foi submetido à tomografia de raios X; os resultados são apresentados na Figura 4.20. As imagens 5 a 8 mostram um adensamento de regiões do material, provocadas por colapso de células, isto é, amassamento de paredes celulares, o que pode ser observado através da diminuição dos vazios nas regiões periféricas do componente.

Apesar das condições de teste terem provocado uma certa deformação do componente, o balanceamento do conjunto não foi visivelmente alterado; o monitoramento através dos sensores do banco de teste também não acusou alterações do desempenho do motor com o emprego do componente poroso, nas condições testadas. No entanto, a ocorrência do amassamento compromete a confiabilidade do componente para utilização em tempos prolongados, devido ao risco de causar desbalanceamento do conjunto e até possível quebra.

Pode-se, ainda, acrescentar que a elevada porosidade do componente fabricado pode resultar em capacidade de atenuação de vibrações em trabalho; estudos futuros poderão ser efetuados para a determinação desta propriedade.



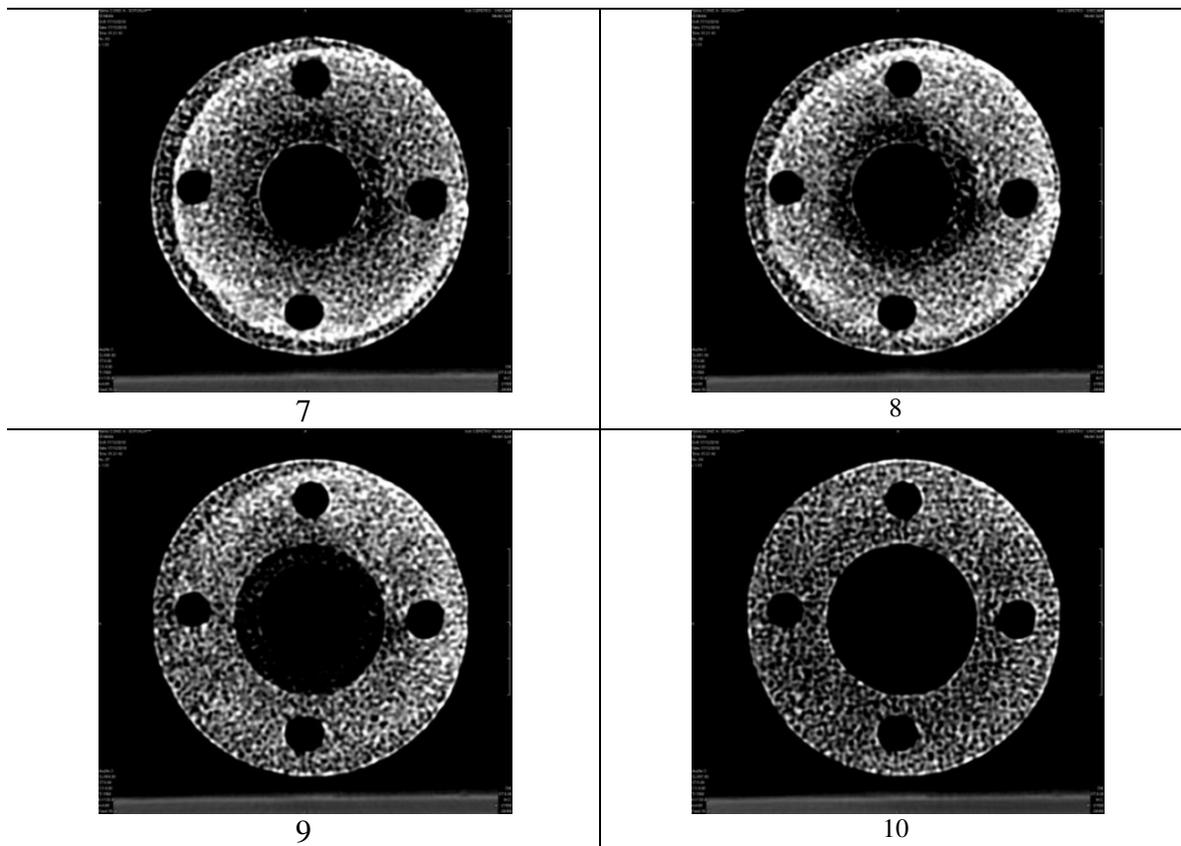


Figura 4.20: Imagens por tomografia de raios-X de componentes porosos da liga A356.0 fabricados por tixoinfiltração; componente submetido a teste de desempenho com motor em funcionamento.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho, para as condições similares às experimentais analisadas, permitem concluir que:

- é tecnicamente viável a produção do componente de motor espaçador do ventilador pelo processo de tixoinfiltração com agente bloqueador pós-removível, utilizando a liga de alumínio A356.0 em estado semi-sólido. O produto obtido apresenta poros interconectados caracterizando uma esponja metálica;
- é eficiente a utilização do cloreto de sódio iodado comum (NaCl), como agente bloqueador em estado livre (não sinterizado) para obtenção de material celular com a liga de alumínio A356.0. Sua completa remoção é possível devido à interconexão dos poros presentes na estrutura da esponja metálica;
- a utilização de bloqueadores de granulometria média resulta em um material mais homogêneo em relação à distribuição de poros, enquanto que o uso de bloqueadores grosseiros tende a resultar em poros de grandes dimensões e paredes espessas. Já os bloqueadores de granulometria fina dificultam a infiltração da pasta tixotrópica. Todos os testes realizados utilizaram a mesma força de compressão para tixoinfiltração e a mesma temperatura;
- os melhores resultados foram obtidos com a utilização de agente bloqueador de granulometria média, nas proporções de 55% de agente bloqueador para 45% de alumínio, e

com duas camadas de 20% e 80% da liga, colocadas no interior e sobre o agente bloqueador, respectivamente;

- a densidade do material celular é sensível à variação da granulometria do agente bloqueador, fato ocasionado pela variação da espessura das paredes celulares, nas condições analisadas. A densidade das amostras produzidas é da ordem de 50% do valor da densidade dos componentes atuais, significando sensível redução de peso do componente;
- o aspecto físico das amostras obtidas, seu acabamento e dimensões, podem ser considerados aceitáveis para a utilização no motor;
- o desempenho da amostra de estrutura celular, verificado através do teste funcional, demonstrou que, quanto à montagem, a amostra produzida em esponja metálica atingiu os objetivos dimensionais, com o posicionamento dos furos dentro das tolerâncias necessárias a uma perfeita montagem e o paralelismo das faces não comprometendo o balanceamento do ventilador;
- o desempenho da amostra de estrutura celular, verificado através do teste funcional, demonstrou que, com o motor em funcionamento, apresenta possibilidade de amassamento do componente, comprometendo a sua vida útil; mais testes são necessários para determinar estatisticamente o índice de peças com este tipo de problema;
- os resultados gerais permitem afirmar que a possibilidade de utilização de um espaçador do ventilador com estrutura celular é plenamente viável, como verificado no presente trabalho, podendo ser citado como maior benefício a redução de peso.

Sugestões para trabalhos futuros

Como desafios e oportunidades, sugere-se o estudo contínuo para as potenciais aplicações dos materiais celulares, seus métodos produtivos e a viabilização de produção em escala industrial, tanto técnica como comercial.

As sugestões para trabalhos futuros leva em consideração as técnicas, os equipamentos e os materiais utilizados neste estudo, bem como as condições experimentais e os resultados obtidos, deixando assim, as oportunidades listadas, como:

- a realização de mais testes funcionais no motor em regime de trabalho utilizando o componente poroso, espaçador de ventilador, com o intuito de verificar estatisticamente a capacidade em suportar a tensão de compressão exercido pelos parafusos;
- o estudo para identificar o tipo de liga de alumínio que melhor se adapta ao processo de tixoconformação;
- a utilização de técnicas de planejamento de experimentos para os testes de produção do componente poroso;
- o aumento da taxa de aquecimento da pasta tixotrópica, objetivando a redução do tempo de processamento;
- o emprego da metodologia utilizada neste trabalho em outro estudo de caso, em que o componente tenha diferentes requisitos funcionais;
- a realização de um estudo específico e detalhado dos benefícios econômicos na utilização do processo de tixoconformação.

Referências

- ABAL – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Desenvolvida por Associação Brasileira do Alumínio. Apresenta informações gerais sobre o mercado do alumínio no mundo e no Brasil, extração, aplicações, impacto e reciclagem. <<http://www.abal.org.br/desenvsust/introducao.asp>> Acesso em 15 de dezembro de 2010.
- ANFAVEA – Associação Nacional dos fabricantes de Veículos automotores. Desenvolvida pela Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Apresenta informações gerais sobre a produção do setor automobilístico no Brasil. <<http://www.anfavea.com.br/anuario2009/indice.pdf>> Acesso em 26 de julho de 2010.
- ALUSION METAL FOAMS. Desenvolvida por ALUSION. Apresenta informações técnicas, comerciais e sobre aplicações de Espumas Metálicas. <<http://www.alusion.com/product.html>> Acesso em 05 de outubro de 2010.
- 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.
- ASM METALS HANDBOOK. New York: ASM International Materials Informational Society, 1993. Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials. Cap. 3: Specific Metals and Alloys: Aluminum Foundry Products. 10 Ed., p. 127-168.
- ASM HANDBOOK. New York: ASM International Alloy Phase Diagram and the Handbook Committees, 1992. Volume 3: Alloy Phase Diagram. 1st Ed., p. 321.
- ASTM, New York. E 8M - 97: Standart Test Methods for Tension Testing of Materials [metric]. New York, 1997. 19p.
- ATKINSON, H. V. Alloy development for thixoforming. In: 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites. Turin, 2000. Proceedings...Turin, Italy, 2000.p. 443-450.

- BABCSÁN, N., LEITLMEIER, D., DEGISCHER, H. P., BANHART, J. The Role of Oxidation in Blowing Particle-Stabilised Aluminium Foams, *Advanced Engineering Materials*, June, 2006, Volume 6, p. 421-428.
- BABCSÁN, N., BANHART, J., LEITLMEIER, D. Metal Foam – Manufacture and Physics of Foaming, International Conference “Advanced Metallic Materials” 5-7th November, 2003, Smolenice, Slovakia.
- BANHART, J., BAUMEISTER, J., WELLER, M., *Mat. Sci. Eng.*, 1996, pp. 205-221.
- BANHART, J., Manufacturing Routes for Metallic Foams, *JOM*, 52, December, 2000, p.p. 22-27.
- BANHART, J., *Europhys News*, 1999; 30:17 in BANHART, J., Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foam. *Progress in Materials Science*, 2001, pp.559-632.
- 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. Metal Foam – from Fundamental Research to Application. *Solidification Science*, Bremen, Alemanha, 2007.
- BAUMEISTER, J., WEISE, J., JESWEIN, A., BUSSE, M., Metal Foam Production AlMg4.5Mn Recycling Machining Chips by Means of Thixocasting and the Effects of Different Additives for Stabilization, *Fraunhofer Institute Manufacturing Advanced Materials*, Bremen, Germany, 2009, p. 83-86.
- BERCHEM, K., MOHR, U., BLECK, W. Controlling the Degree of Pore Opening of Metal Sponges, Prepared by the Infiltration Preparation Method, *Materials Science and Engineering A323* (2002) 52-57, October, 2000.
- CARDOSO, E. Estudo do Emprego da Espuma Metálica no Design Automotivo, Porto Alegre: Faculdade de Arquitetura, UFRGS, 2009, Dissertação (mestrado).
- CRISTOFOLINI, R. Estudo da Potencialidade da Aplicação do Ferro Fundido Nodular ASTM A536 60-40-18 como Matéria Prima para Processos de Tixoconformação, 2009, 181f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- 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 de Liga A2011 a Partir do Estado Semi-sólido, 2009, 134f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

- DANNEMANN, K. A.; LANKFORT, J. JR. The Strain Rate Effect of an Open Cell Aluminum Foam. *Materials Science and Engineering A*. v. 293, pp. 157-164, 2000.
- DIETER, G. E. Fundamentos da Mecânica. In: *Metalurgia Mecânica* 2nd ed. Rio de Janeiro: Guanabara dois, 1981. Cap. 1, p. 2-62
- DIN – German standard – 52, 215,1963.
- ERG Inc. Oakland, USA. Product information of “Duocel” and (<http://www.ergaerospace.com>), 1996. In Banhart, J., *Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foam*. *Progress in Materials Science*, 2001, pp. 559-632.
- ESMAEELZADEH, S., SIMCHI, A., LEHMHUS, D. Effect of Ceramic Particle Addition on the Foaming Behavior, Cell Structure and Mechanical Properties of P/M AlSi7 Foam, *Materials Science and Engineering A* 424 (2006) 290-299.
- FLEMINGS, M. C.; RIEK, R.G.; YOUNG, K. P. Rheocasting. *Materials Science and Engineering*. v.25. p.103-117 , 1976.
- FREI, J., GERGLEY, V., MORTENSEN, A., CLYNE, B. The effect of Prior Deformation on the Foaming Behavior of “FORMGRIP” Precursor Material, *Advanced Engineering Materials*, April, 2002, Volume 10, p. 749-752.
- GARCIA-MORENO, F., BANHART, J. Investigation of the Influence of Blowing Agent and Alloy Composition on the Foaming Behaviour of Thixocast AlSiCu4 Precursor Material, Hahn-Meitner Institut, Berlin and Technische Universitat, Berlin, 2004.
- GARCIA-MORENO, F., BABCSAN, N., BANHART, J., HAESCHE, M., WEISE, J. Analysis of Metal Foaming Behavior and Development of Foaming Process, *Cellular Metals and Polymer* 2004.
- GATAMORTA, F. Obtenção de Espumas Sintáticas da Liga AA2011 a Partir do Metal no Estado Semi-sólido e sua Caracterização Metalúrgica, Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas, UNICAMP, Setembro, 2009, Dissertação (mestrado).
- GERGELY, CLYNE, T. W. Drainage in Standing Liquid Metal Foams: Modeling and Experimental Observations, Elsevier Ltd on behalf of Acta Materialia Inc., March, 2004.
- GERGELY, V., CURRAN, D. C., CLYNE, T. W. The FOAMCARP process: Foaming of Aluminum MMCs by the Chalk-Aluminum Reaction in Precursors, *Composites Science and Technology* 63 (2003) 2301-2310.
- GIBSON, L. J., ASHBY, M. F., *Cellular solids: Structure and properties*, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- HAN, F., SEIFFERT, G., ZHAO, Y., GIBBS, B., PHYS, J. D., *Appl. Phys.* 36, 2003, pp. 294-302.

- IBRAHIM, A., KORNER, C., SINGER, F. The Effect of TiH₂ Particle size on the Morphology of Al-Foam Produced by PM Process, *Advanced Engineering Materials*, October, 2008, Volume 9, p. 845-848.
- IFAM – Fraunhofer Institute, Bremen, “Foaminal: Properties Overview and Design Guideline - Version 1.4” (<http://www.ifam.fraunhofer.de/>). Acesso em 6 de maio de 2011.
- KAMMER, C. Aluminium foam. TALAT – Training in Aluminium Application Technologies. EAA, Germany, 1999, p. 24.
- KANETAKE, N. Foaming Behavior of Aluminum Precursor Produced from Machined Chip Waste, *Advanced Engineering Materials*, October, 2008, Volume 9, p.p. 840-844.
- 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.
- MATTOS, J. J. I. - Propriedades de Fadiga e Microestrutura de Fratura da Liga de Alumínio-silício AlSiMg0,6 Utilizada em Cabeçote de Motor Diesel, 2009, 122f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MOTEGI, T.; TANABE, F.; ROBERT, M. H.; PAES, M.; ZOQUI, E. J. -“Thixoforming of A356 Alloys Produced by Different Processing Routes”, *Materials Week 2002-ICM- Int. Congress Centre Munich-Germany*, September 2002, p.22-31.
- MOTHE, C. G.; AZEVEDO, A. D. – *Análise Térmica de Materiais*. Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Ieditora, São Paulo, 2002.
- MWM INTERNATIONAL MOTORES DIESEL. – *Folheto Técnico*. São Paulo, 2008.
- MUSSI, R. G. S. Contribuição ao Estudo da Fabricação de Compósitos de Matriz Metálica a Partir de Matriz no Estado Semi-sólido, Faculdade de Engenharia Mecânica de Campinas, UNICAMP, Julho, 2000, Dissertação (mestrado).
- NPL – National Physical Laboratory – *Workshop on Metal Foams*, March, 2000 ([http://www.npl.co.uk/materials/metal foams/pdf files/foamworkshop2b.pdf](http://www.npl.co.uk/materials/metal%20foams/pdf%20files/foamworkshop2b.pdf)) acesso em 15 de Maio de 2010.
- OLIVEIRA, B. F., CUNHA, L. A. B., OCHSNER, A., CREUS, G. J. Comparison between RVE and Full Mesh approaches for the Simulation of Compression Tests on Cellular Metals. In: *ACE-X – 2007 Advanced Computational Engineering and Experimenting*, Algarve 2007.
- PAUL, A.; RAMAMURTY. U. Strain rate sensitivity in a closed-cell Al foam. *Materials Science and Engineering A* v. 281. n. 1-2., p. 1-7, 2000.
- 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.
- ROBERT, M. H.; PELLA Jr., W. – “Thixoforming in Ceramic Moulds: Microstructure of A2011 Products”. II International Materials Symposium, 14-16 Abril 2003, Caparica, Portugal. Caderno de Resumos, p. 123-124.
- ROBERT; M. H. - “Partial melting as an efficient method to produce rheocast alloy slurries”. Transactions of the Japan Foundrymen’s Society, Japan, vol. 12, October 1993, p.45-51.
- ROBERT, M. H.; ROVIRA, M. M. M.; PIRES, G. P.; ARRIEUX, R. - “Mechanical Forming of Al alloys in the semi-solid rheocast state”. Proc. of the ICPR – 16th International Conference on Production Research, Prague, TchekRep., July 2001, p. 1-10.
- ROBERT, M. H., ROVIRA, M. M. M. – “Analysis of the thixoforging process of the Aluminium Alloy AA 2011”. Proc. 3rd International Conference on Industrial Tools – ICIT, Maribor, Eslovênia, Abril 2001, p. 121-124.
- ROBERT, M. H.; JORGE, A. F.; GATAMORTA, F.; SILVA, R. R. “Thixoinfiltration: a new approach to produce cellular and other low density metallic materials”. Journal of Achievements in Mechanical and Engineering Manufacturing, vol.34, n.2, June 2010, p.180-187.
- ROSSO, M., GRANDE, M.A. Influence of the casting process on the properties of Al based automotive components, Advanced material research vol.23 pag. 25-32, 2007.
- ROVIRA, M. M. M.; ROBERT, M. H. – “Effect of the thixoforging operation on the microstructure of AA2011 alloy”. Proc. of the 10th International Scientific Conference Achievements in Mechanical and Materials Engineering, Zakopane, Poland, December 2001, p. 357-360.
- SEAC, International B. V. Krimpen, Netherlands, product data sheet of “recemat” (<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.
- SILVA, R. R. Produção de Esponjas Metálicas por Tixoconformação em Pré-formas Removíveis e sua Caracterização Mecânico Metalúrgica, 2008, 148f. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- SILVA, R. R; ROBERT, M. H. – “Mechanical and Metallurgical characterization of open cell porous Al alloys produced by thixoforming into removable space holders pre-forms”. Proceedings of METFOAM – 6th Intl. Conf. on Porous Metals and Metallic Foams, Bratislava, Slovakia, 1-4 September 2009.

- 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. 1-4 and 215-241.
- WARMUZEK, M., Aluminum-Silicon Casting Alloys: Atlas of Microfractographs 1st edition, Introduction to Aluminum-Silicon Casting Alloys, Chapter 1, pp 1 a 8, ASM Handbook, vol.9, 2004.
- ZOQUI, E .J.; ROBERT, M. H. - “Contribution to the Study of Mechanisms Involved in the Formation of Rheocast Structures”. Proc. of VI International Conference on Achievements on Mechanical and Materials Engineering, Gliwice, Poland, December 1997.