

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR *Julio Cesar Esposte*

..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM *30* / *07* / 2010

Maria Helena Robert

ORIENTADOR

Profa. Dra. MARIA HELENA ROBERT
Matricula 53350
DEF/FEM/UNICAMP

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

Júlio César Esposte

**Estudo comparativo de estrutura / propriedades da liga
Al-Si5-Cu3-Mg nos estados fundido e tixoconformado,
para utilização em componentes de motores**

Campinas, 2010

Júlio César Esposte

**Estudo comparativo de estrutura / propriedades da liga
Al-Si5-Cu3-Mg nos estados fundido e tixoconformado,
para utilização em componentes de motores**

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: Materiais

Orientador: Profa. Dra. Maria Helena Robert

Campinas

2010

i

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

Es65e Esposte, Julio Cesar
 Estudo comparativo de estrutura / propriedades da liga
 Al-Si5-Cu3-Mg nos estados fundido e tixoconformado,
 para utilização em componentes de motores / Julio Cesar
 Esposte. --Campinas, SP: [s.n.], 2010.

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

 1. Motores. 2. Ligas. 3. Tixotropia 4. Ligas
 (Metalurgia). 5. Fundição. I. Robert, Maria Helena. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Comparative study of structure/properties from Al-Si5-Cu3-Mg
 alloy by casting and thixoforged, for use in engine components.

Palavras-chave em Inglês: Engines, Alloys, Tixotropy, Alloys (Metallurgy), Foundry

Área de concentração: Materiais

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Iris Bento da Silva, Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

Data da defesa: 30/07/2010

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

**Estudo comparativo de estrutura / propriedades da liga
Al-Si5-Cu3-Mg nos estados fundido e tixoconformado,
para utilização em componentes de motores**

Autor: Júlio César Esposte

Orientador: Maria Helena Robert

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



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



Prof. Dr. Iris Bento da Silva
UNICAMP / Universidade Estadual de Campinas



Profa. Dra. Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo
UNIFEI / Universidade Federal de Itajubá

Campinas, 30 de julho de 2010.

Dedicatória

Dedico este trabalho primeiramente a **DEUS**, que sempre esteve comigo e me iluminou nos momentos de dificuldades.

À minha querida esposa **Daniela**, pelo apoio, força, ajuda e compreensão durante toda esta jornada, de forma admirável.

À minha filha **Luiza**, que mesmo antes de nascer já é minha fonte de inspiração.

Aos meus pais, **Antônio e Vanda**, os quais sempre foram a base de tudo em minha vida.

Aos meus irmãos, **Jean e Sônia**, pelo incentivo e estímulo em todos os momentos.

Agradecimentos

Agradeço de forma especial a todos que me ajudaram durante todo o desenvolvimento deste trabalho, como seguem:

À minha orientadora, Profa. Dra. Maria Helena Robert, pelo apoio, compreensão, dedicação, incentivo, confiança e amizade.

Aos amigos e colegas da Unicamp que sempre me ajudaram e apoiaram: Prof. Dr. Eugênio José Zoqui, Fábio Gatamorta, Renato Rafael da Silva.

À empresa MWM International, pela oportunidade e apoio para o desenvolvimento desta importante etapa na minha qualificação profissional.

Aos amigos e colegas da MWM International Adilson, Carlos, Escussel, Eurico, Glevison, Gröner, Humberto, Leandro, Robério e Wilson pelo apoio e ajuda.

Ao todos os amigos e colegas que participaram comigo do Mestrado Profissional, pelas horas de estudo, trabalhos e aprendizado em conjunto.

*“O dever é uma coisa muito pessoal;
decorre da necessidade de se entrar em ação,
e não da necessidade de insistir com os outros
para que façam qualquer coisa.”
(Madre Teresa de Calcutá)*

Resumo

Este trabalho teve como objetivo a análise comparativa entre a liga Al-Si5-Cu3-Mg nos estados fundido sob pressão (injetado) e tixoconformado, tomando-se como base um componente comercial suporte de acessórios utilizado em motores a diesel. Caracterizou-se o componente comercial produzido pelo processo de injeção em termos de estrutura e propriedades mecânicas, e por sua vez o produto final obtido pelo processo de tixoconformação é também caracterizado nos mesmos termos a fim de se obter uma base comparativa. Para análise da tixohabilidade, ou seja, capacidade de obtenção de pastas tixotrópicas da liga em estudo, submeteu-se a mesma a análises térmicas utilizando técnicas de DSC, e através de simulação termodinâmica utilizando *software* THERMOCALC[®]. São discutidas as temperaturas de transformação e intervalos de solidificação, sugerindo-se janelas de tixoconformação para a liga. A liga foi submetida a tratamentos térmicos de globularização de 120 e 300s, para duas condições de frações sólidas, 45 e 60%, além da avaliação da influência de uma pré-formação a frio por compressão do lingote antes da tixoconformação. A liga mostrou-se interessante para a produção de pastas tixotrópicas, com intervalo de solidificação na ordem de 100°C, além de uma variação da fração líquida com a temperatura favorável para definição da janela de tixoconformação. Este comportamento tixotrópico permitiu o total preenchimento do molde e a obtenção de produtos tixoconformados de boa qualidade, com destaque para a diminuição dos teores de porosidade em comparação aos apresentados pelo componente injetado (cerca de 17 vezes inferiores). O material submetido à prévia deformação a frio apresentou glóbulos de diâmetros reduzidos, provenientes do mecanismo de globularização envolvido que passa pela recristalização do material, e consequente melhora das propriedades mecânicas em relação ao material sem deformação. O produto tixoconformado apresenta propriedades mecânicas que atendem às especificações do material estudado, embora apresentem, para algumas das condições de fabricação empregadas no trabalho, valores de limite de resistência e de dureza inferiores aos do material fundido sob pressão.

Palavras-chave: Ligas Al-Si-Cu-Mg, Semi-sólidos, Tixoconformação, Motores.

Abstract

The goal of this work was the comparative study between the Al-Si5-Cu3-Mg alloy obtained by die casting and thixoforging, based on a commercial accessories bracket used in diesel engines. The die casting commercial part was characterized in terms of structure and mechanical properties, and the final sample obtained by thixoforging was characterized in the same terms, in order to have a comparative base. For thixoability analysis, in other words, the capacity to obtain thixotropic slurries of the alloy under study, it was evaluated by thermal analysis through DSC techniques and thermodynamic simulations using THERMOCALC® software. Transformations temperatures and ranges are discussed, proposing thixoforging windows. The alloy was submitted for globularization thermal treatments under 120 and 300s, and solid fractions 45 and 60%, beyond the influence evaluation of a preliminary cold forming before the thixoforging process. The alloy proved to be interesting to produce thixotropic slurries, with solidification range around 100°C, besides a favorable liquid fraction vs temperature to define the thixoforging window. This thixotropic behavior allowed the complete matrix filling and thixoforged samples were obtained with a good quality, highlighting the porosity decreasing in comparison with the die casting component (around 17 times less). Reduced globules sizes were obtained with previous cold forming, due to the involved globularization mechanism of the recrystallization, and consequent mechanical properties improving in face of non cold forming material. Thixoforged product presents mechanical properties according to the studied alloy specifications, although for some manufacturing conditions present lower tensile strength and hardness when compared with die casted component.

Key Words: Al-Si-Cu-Mg alloys, Semi-solid, Thixoforging, Engines.

Lista de ilustrações

1.1	Componentes automotivos produzidos utilizando a tecnologia de semi-sólidos.....	03
1.2	Acumulador de pressão de combustível produzido utilizando a tecnologia de semi-sólidos (abaixo) e brasado (acima).....	04
1.3	Bloco de motor a diesel do veículo Honda Accord produzido utilizando a tecnologia de semi-sólidos.....	05
2.1	Lingote de alumínio no estado semi-sólido.....	08
2.2	Evolução de uma estrutura dendrítica para globular.....	11
2.3	Descrição dos diferentes mecanismos para explicar o fluxo de parcelas líquidas e metálicas em suspensão.....	12
2.4	Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Sn-15%Pb com estrutura dendrítica (a) e com estrutura não dendrítica (b).....	13
2.5	Influência da fração sólida na viscosidade aparente da liga Al-4,5%Cu-1,5%Mg quando submetida a diferentes taxas de cisalhamento.....	14
2.6	Diagrama de fases Al-Si, com micrografia em destaque para as fases Al-Si e CuAl ₂	19
2.7	Curva de DSC para a liga AA7004.....	23
3.1	Esquema representativo das etapas envolvidas no desenvolvimento do trabalho.....	26
3.2	Suporte de acessórios de motor a diesel produzido na liga Al-Si5-Cu3-Mg.....	27
3.3	Lingoteiras utilizadas para a produção das amostras fundidas da liga Al-Si5-Cu3-Mg.....	30
3.4	Desenho da matriz projetada e construída para produção das amostras tixoconformadas.....	32
3.5	Matriz projetada e construída para a para a produção das amostras tixoconformadas.....	32

3.6	Conjunto de equipamentos utilizados para a tixoconformação: a) forno tipo mufla com controle da temperatura por termopar; b) prensa hidráulica utilizada para a tixoconformação; c) detalhe da matriz e amostra antes do aquecimento.....	34
3.7	Indicação de posição de retirada de amostras para análise de microestrutura do componente comercial fundido.....	36
3.8	Indicação de posição de retirada dos corpos de prova para tração do componente comercial fundido.....	37
3.9	Detalhe da disposição do corpo de prova DIN 50125:2004 - B6 x 30 no interior da amostra tixoconformada.....	38
3.10	a) Equipamento para ensaio de tração; b) corpo de prova usinado segundo norma DIN 50125:2004 - B6 x 30; c) detalhe do ensaio.....	39
4.1	Diagrama de fases da liga de estudo, obtida com auxílio de <i>software</i> THERMOCALC®.....	40
4.2	Curvas de aquecimento e resfriamento obtidas por DSC para a liga Al-Si5-Cu3-Mg. Taxa de 10 °C/min.....	42
4.3	Curvas de variação do sinal elétrico/massa de material vs T em ensaios de DSC da liga Al-Si5-Cu3-Mg; a) ciclo de aquecimento, b) ciclo de resfriamento. Taxa de 10 °C/min...42	42
4.4	Variação da fração líquida com a temperatura da liga Al-Si5-Cu3-Mg obtida através do <i>software</i> THERMOCALC® (condições de Scheil). Indicação de janelas de tixoconformação e temperaturas selecionadas para o trabalho.....	45
4.5	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão, para três distintas regiões do componente comercial.....	47
4.6	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão; fotos sob luz polarizada para caracterização de diferentes grãos.....	48

4.7	Micrografia da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão, sem ataque. Destaque para a presença de microporos em todo o volume.....	48
4.8	Porosidades presentes nas regiões 1, 2 e 3 da amostra. Poros destacados em vermelho com o auxílio do <i>software</i> IMAGEJ®. 50x.....	49
4.9	Lingotes da liga Al-Si5-Cu3-Mg obtidos por solidificação em coquilha, por gravidade...51	
4.10	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg solidificada em coquilha, por gravidade.....	51
4.11	Amostras da liga Al-Si5-Cu3-Mg submetidas à deformação por compressão e microestrutura resultante.....	52
4.12	Resultado de testes preliminares de tixoconformação, mostrando produto com falta de preenchimento da cavidade da matriz.....	53
4.13	Amostras típicas obtidas por tixoconformação da liga Al-Si5-Cu3-Mg: (a) amostra no interior da cavidade do molde, (b), (c) e (d) diferentes vistas do corpo de prova.....	55
4.14	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material fundido. Tempo de globularização: 120s.....	56
4.15	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material fundido. Tempo de globularização: 300s.....	57
4.16	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material deformado. Tempo de globularização: 120s.....	58
4.17	Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material deformado. Tempo de globularização: 300s.....	59
4.18	Gráfico de efeitos principais para a variável resposta diâmetro dos glóbulos, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.....	64

4.19	Gráfico de interações para variável resposta diâmetro dos glóbulos, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fs vs deformação.....	66
4.20	Gráfico de efeitos principais para a variável resposta fração líquida, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) condição inicial.....	68
4.21	Gráfico de interações para a variável resposta fração líquida, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: tempo vs deformação.....	68
4.22	Gráfico de efeitos principais para a variável resposta limite de resistência à tração, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.....	73
4.23	Gráfico de interações para a variável resposta limite de resistência à tração, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.....	74
4.24	Gráfico de efeitos principais para a variável resposta alongamento, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.....	75
4.25	Gráfico de interações para a variável resposta alongamento, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.....	76
4.26	Gráfico de efeitos principais para a variável resposta dureza, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.....	77

4.27	Gráfico de interações para a variável resposta dureza, obtido com o emprego de <i>software</i> MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.....	78
------	---	----

Lista de tabelas

2.1	Faixas de solidificação para ligas de alumínio de fundição comuns.....	08
2.2	Composição química da liga Al-Si5-Cu3-Mg, conforme norma EN 1706:1998.....	16
2.3	Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg, conforme norma EN 1706:1998.....	18
3.1	Composição química da liga utilizada no trabalho, segundo análise por espectrometria de absorção atômica.....	28
3.2	Condições de tratamento térmico para obtenção de pastas tixotrópicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg estudada.....	33
4.1	Valores de $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ da liga Al-Si5-Cu3-Mg obtidas através dos ensaios de DSC e através do <i>software</i> THERMOCALC [®]	43
4.2	Valores médios de dimensões de rosetas da fase a e da porosidade em distintas regiões da estrutura do componente fundido sob pressão.....	50
4.3	Parâmetros estruturais da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado.....	62
4.4	Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sobre pressão (componente comercial).....	69
4.5	Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado.....	71

Lista de abreviaturas e siglas

Letras Latinas

d	diâmetro	[mm]
F	força aplicada	[N]
fl	fração líquida	[%]
fs	fração sólida	[%]
t	tempo	[s]
T	temperatura	[°C][°F]
T_L	temperatura <i>liquidus</i>	[°C]
T_s	temperatura <i>solidus</i>	[°C]

Letras Gregas

α	solução sólida	
ϵ	alongamento	[%]
σ	tensão normal	[N/mm ²]
σ_{\max}	tensão máxima	[N/mm ²]
σ_{cg}	tensão de contorno de grão	[N/mm ²]
σ_{sl}	tensão superficial sólido/líquido	[N/mm ²]
σ_e	tensão limite de escoamento	[MPa]

Abreviações

DSC Differential Scanning Calorimetry

HBS Dureza Brinell

- FPC** Fração parcial controlada
- SSM** Material sob o estado semi-sólido
- T5** trabalhado a quente + envelhecimento artificial
- T6** solubilizado + envelhecimento artificial

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	5
2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1. Princípios da tecnologia de metais semi-sólidos	7
2.2. Características e propriedades de estruturas tixoconformadas	12
2.3. Alumínio – Conceitos Gerais	15
2.4. Ligas AlSiCuMg.....	16
2.5. Caracterização térmica via DSC.....	22
3 – MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Seleção da liga e componente a serem analisados.....	27
3.2. Caracterização da composição química da liga.....	28
3.3. Análise da tixoconformabilidade da liga	28
3.4. Produção de corpos de prova para a tixoconformação.....	29
3.5. Tixoconformação.....	31
3.6. Caracterização de microestruturas.....	35
3.7. Análise de propriedades mecânicas.....	37
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. Determinação do diagrama de fases da liga Al-Si5-Cu3-Mg.....	40

4.2. Avaliação da tixoconformabilidade da liga Al-Si5-Cu3-Mg	41
4.3. Caracterização microestrutural da liga no estado fundido sob pressão – componente comercial	46
4.4. Caracterização microestrutural da liga no estado fundido em coquilha, por gravidade.....	50
4.5. Produtos tixoconformados.....	53
4.5.1. Caracterização microestrutural da liga tixoconformada	54
4.5.2. Análises estatísticas da microestrutura da liga tixoconformada	63
4.6. Análise de propriedades mecânicas da liga nos estados fundido e tixoconformado	69
4.6.1. Propriedades mecânicas no estado fundido	69
4.6.2. Propriedades mecânicas no estado tixoconformado	70
4.6.3. Análises estatísticas das propriedades mecânicas do produto tixoconformado.....	72
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
REFERÊNCIAS	85

1 – INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria automobilística tem buscado a utilização de ligas de alumínio em suas aplicações como uma alternativa para redução do peso total dos veículos, do consumo de combustível, das emissões de poluentes, e até por se tratar de um produto facilmente reciclável. O consumo de combustível está diretamente ligado ao peso do veículo, e ao longo dos anos existe uma exigência cada vez maior por parte das indústrias automobilísticas para a redução deste consumo. Projetar um pequeno carro com um motor fraco não basta para os dias atuais, uma vez que os consumidores buscam cada vez mais por acessórios e equipamentos de segurança, o que sempre reflete em um aumento de peso do veículo. Baseado nestes fatores, o alumínio vêm de frente como uma solução para o problema do peso. Se considerarmos uma estrutura de um automóvel, pode-se alcançar uma redução de peso de aproximadamente 45 a 50% em relação aos aços de construção convencionais (ALUMINUM ASSOCIATION, 2009). As taxas de utilização do alumínio em aplicações automotivas estão em significativo crescimento desde a década de 90, sendo que no ano de 2009 o alumínio representou uma média de 8,6% do peso total dos automóveis no mercado norte americano (ABAL, 2010). Entre os principais componentes fabricados em alumínio estão o bloco do motor, cabeçote, rodas, transmissões e periféricos em geral. Podemos destacar os processos de fabricação mais utilizados para a fabricação destes componentes como sendo a fundição sob pressão, fundição por gravidade e também, embora de modo ainda tímido, o processo de conformação ou fundição utilizando a tecnologia de semi-sólidos.

A tecnologia de semi-sólidos apresenta diversas vantagens sobre os processos de fundição sobre pressão tradicionais. Em contraste com a fundição sobre pressão onde o metal fundido entra no molde através de fluxos turbulentos, a pasta semi-sólida tixotrópica preenche o molde inteiramente por deslizamento em uma região plana e frontal do molde, em regime de escoamento não turbulento. Isto resulta uma qualidade melhor do produto final, com menores níveis de porosidades que em uma fundição sobre pressão, e também em uma capacidade para produzir detalhes em peças moldadas. Entre outras vantagens também podemos destacar a

obtenção de componentes com melhores propriedades mecânicas, além de ganhos em custos se comparado à fundição sob pressão. O aquecimento necessário quando se utiliza a tecnologia de semi-sólidos é significativamente menor, e como resultado de moldes operando com temperaturas mais baixas, sua vida útil é prolongada (WANNASIN e THANABUMRUNKUL, 2008). A tecnologia de semi-sólidos no mercado automotivo tem sido também aplicada para ligas de alumínio, onde as ligas AA356 e AA357, uma vez que além de oferecerem boas propriedades mecânicas, são também as mais adaptáveis e utilizadas para este processo de fabricação. A principal vantagem na utilização destas ligas para a tecnologia de semi-sólidos é justamente o seu intervalo de fusão, o qual garante uma faixa de temperatura ideal para que seja realizado o controle do processo de aquecimento e solidificação. O silício como elemento em maior concentração nestas ligas é adicionado para melhoria da resistência mecânica e controle da viscosidade. O cobre nesta liga melhora substancialmente a característica de dureza. Adições de magnésio podem ser utilizadas para aumento das propriedades mecânicas através de tratamentos térmicos, além de colaborar para a resistência à corrosão (WINTERBOTTOM, 2000).

Pode-se destacar, portanto, ligas de alumínio como sendo as mais comuns empregadas na tecnologia de semi-sólidos. Produtores de máquinas de fundição e fornecedores de matéria prima estão aumentando cada vez mais sua produção para suportar o crescimento da indústria na produção de componentes a partir do estado semi-sólido. Apesar do processo de fundição no estado semi-sólido ser percebido como um processo emergente, a produção de componentes em ligas de alumínio são produzidos de maneira crescente a cada ano utilizando esta tecnologia; a Figura 1.2 apresenta alguns exemplos. A indústria automotiva é hoje a principal usuária destes tipos de componentes, embora no Brasil a tecnologia de semi-sólidos é ainda praticamente ausente do setor produtivo. Os benefícios econômicos obtidos a partir da tecnologia de semi-sólidos estão despertando o interesse também de outras indústrias.

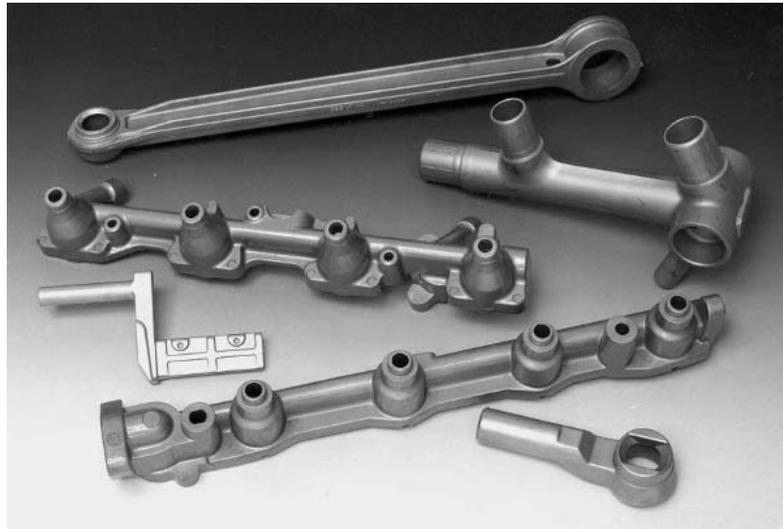


Fig. 1.1 Componentes automotivos produzidos utilizando a tecnologia de semi-sólidos (VINARCIK, 2002).

A tixofundição possibilita a engenheiros e projetistas de automóveis a combinação de numerosos subcomponentes para um componente único, uma vez que é possível a utilização de paredes de seções finas. O acumulador de pressão de combustível dos automóveis é um exemplo deste caso, este é um componente produzido pelo processo de brasagem de subcomponentes, e hoje já existem montadoras que utilizam este acumulador produzido a partir do alumínio tixofundido, possibilitando a integração de diversos componentes em uma peça única, garantindo uma estabilidade dimensional, a diminuição de distorções provocadas pelo processo de brasagem, entre outras vantagens. O componente é mostrado na Figura 1.2.

Em veículos automotivos comerciais, nos quais os custos de manutenção e a economia de operação em longo prazo são cruciais, o alumínio é extensivamente utilizado em carrocerias, e peças internas como pistões, blocos de motores, caixas de câmbio, chassis e acessórios. No Brasil, o uso do alumínio em carros e utilitários é da ordem de 50 kg/veículo, enquanto nos EUA é de cerca de 128 kg/veículo. A tendência do uso do metal nessa indústria é promissora, pois o menor consumo de combustível proporcionará uma redução considerável de emissões de poluentes (ABIAUTO, 2009).

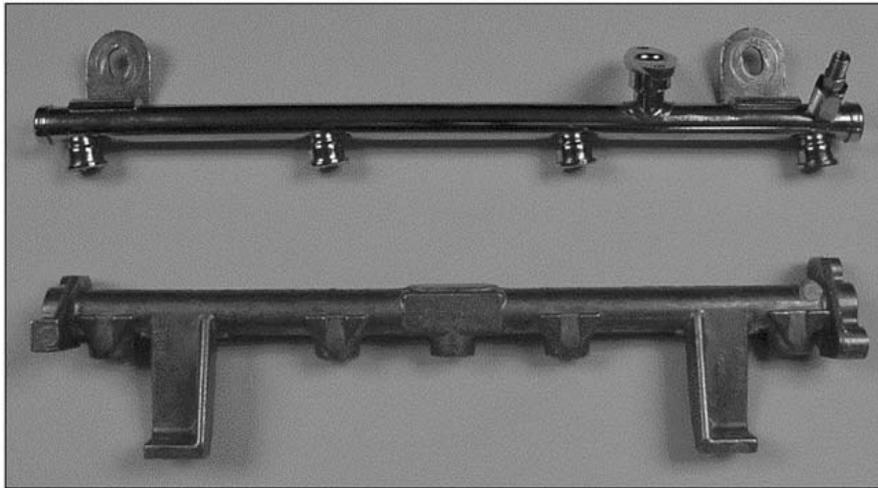


Fig. 1.2 Acumulador de pressão de combustível produzido utilizando a tecnologia de semi-sólidos (abaixo) e brasado (acima) (VINARCIK, 2002).

Em destaque está também o aumento da utilização do alumínio em processos de fundição a partir do estado semi-sólido principalmente nas regiões asiáticas, como resultado do aumento da produção de veículos automotores nestas regiões nos últimos anos, e com forte atuação no Japão e na China. Numerosos componentes são atualmente produzidos partir do estado semi-sólido, especialmente para substituição de componentes fabricados em ferro fundido, como é o caso do bloco do motor do veículo Honda Accord. Trata-se de um motor 2.2L, 4 cilindros a diesel, mostrado na Figura 1.3, aplicado a todos veículos deste modelo vendidos no mercado Europeu. Neste exemplo, destacam-se trabalhos de redução de espessura de paredes, redução do número de operações de usinagem pós-fundição, resultando em um projeto compacto e ainda contando com uma redução de 30% do peso deste novo bloco de motor se comparado aos tradicionais fabricados em ferro fundido para motores a diesel de mesmo porte (MASAKASU *et al*, 2004).



Fig. 1.3 Bloco de motor a diesel do veículo Honda Accord produzido utilizando a tecnologia de semi-sólidos (MASAKASU *et all*, 2004)

Desta forma, levando em conta um mercado automobilístico em busca constante de inovações e melhorias de seus produtos, este trabalho busca a contribuição ao estudo mais aprofundado de processos de fabricação, em particular a tecnologia de semi-sólidos, visando sua aplicação em componentes de motores, para garantia da qualidade e competitividade dos produtos. Para tanto, foi selecionado um componente específico, um suporte de acessórios de motor, fabricado atualmente por fundição sob pressão da liga Al-Si5-Cu3-Mg.

1.1. Objetivos

A partir dos tópicos mencionados, pode-se portanto definir como objetivos gerais deste trabalho a análise da viabilidade de produção do componente selecionado, por processo de tixoconformação, em substituição ou como processo alternativo ao processo de fabricação convencionalmente utilizado, qual seja, a fundição sob pressão.

Estes objetivos gerais compreendem os seguintes objetivos específicos:

- ▶ análise da tixohabilidade ou tixoconformabilidade da liga Al-Si5-Cu3-Mg;
- ▶ obtenção de pastas tixotrópicas e análise da influência de parâmetros de processo na estrutura do material tixotrópico obtido;
- ▶ obtenção de material tixoconformado (amostras);
- ▶ análise comparativa das estruturas e propriedades da liga estudada no estado fundido convencional (fundição sob pressão) e no estado tixoconformado.

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Princípios da tecnologia de metais semi-sólidos

A tecnologia de semi-sólidos é um processo no qual uma mistura de metal parcialmente líquido e parcialmente sólido é injetado na cavidade de fundição. A origem da tecnologia de semi-sólidos pode ser rastreada por mais de 30 anos atrás, entretanto o processo não passou a ser produzido em larga escala para atender o elevado volume de produção até meados de 1990. O processo foi desenvolvido no Instituto de Tecnologia de Massachusetts na década de 70, quando pesquisadores descobriram que metais parcialmente solidificados estavam tixotrópicos, e podiam ser deformados sobre pressão.

Com uma compreensão do comportamento do metal semi-sólido, vários novos processos de fabricação foram desenvolvidos com base em forjamento, fundição sob pressão, extrusões, e os híbridos de tais processos. A tecnologia de semi-sólidos tem sido aplicada a numerosos metais e ligas, incluindo alumínio, magnésio, zinco, titânio e cobre, assim como numerosas ligas ferrosas. As mais comuns em uso são ligas de fundição de alumínio. Estas ligas são ideais para utilização no estado semi-sólido, uma vez que possuem uma grande faixa de temperatura de solidificação.

Na tabela 2.1 podemos observar as faixas de solidificação para as ligas de alumínio mais comuns. Materiais aquecidos até o estado semi-sólido podem ser conformados, cisalhados ou cortados facilmente, como pode-se observar na Figura 2.1 um lingote de alumínio semi-sólido sendo cortado com uma faca (VINARCIK, 2002).

Tabela 2.1 Faixas de solidificação para ligas de alumínio de fundição comuns
(JORSTAD e RASMUSSEN, 1993)

Liga de alumínio - Designação	Faixa de solidificação aproximada (°C)
AA319	604–516
AA356	613–557
AA357	613–557
AA380	593–538
AA383	582–516
AA390	649–507



Fig. 2.1 Lingote de alumínio no estado semi-sólido (adaptado de VINARCIK, 2002)

Conforme citado em Atkinson (2005), assim como em qualquer processo de manufatura existem certas vantagens e desvantagens no processo de semi-sólidos em relação ao processo de fundição sob pressão. Como principais vantagens são destacadas:

- Eficiência energética: O material não necessita ser mantido no estado líquido por longos períodos de tempo;
- As taxas de produtividade são similares ou superiores às encontradas para fundição sob pressão;
- Preenchimento do molde sem aprisionamento de ar e com baixa porosidade de contração permite maior integridade do produto e redução de peso, uma vez considerada a possibilidade de utilização de seções com paredes finas;
- Baixas temperaturas de processo reduzem o choque térmico nas matrizes, aumentam sua vida útil e permitem o uso de materiais não tradicionais para a confecção destas e também o processamento de ligas com alto ponto de fusão, como aços ferramenta, os quais são difíceis de serem conformados por outros meios;
- Microestruturas refinadas e uniformes melhoram as propriedades mecânicas;
- Menores contrações de solidificação dão a possibilidade da utilização de dimensões próximas ao *near net shape*, permitindo a eliminação de etapas de usinagem. Utilizando-se *near net shapes* temos o ganho em redução de custos com usinagem e perdas de material;
- A qualidade superficial é apropriada para a eletrodeposição.

Como principais desvantagens, Atkinson destacou:

- O custo de matéria-prima pode ser alto, e o número de fornecedores é ainda bastante pequeno;

- O conhecimento e a experiência neste processo devem ser continuamente estudados a fim de facilitar a aplicação deste processo em novos componentes. Isto pode gerar custos relativamente altos durante o desenvolvimento de processos, uma vez que a mão-de-obra requer um alto nível de treinamento e habilidades em relação aos processos tradicionais de fundição;
- Controle de temperatura rigoroso, pois no estado semi-sólido a fração sólida e a viscosidade são muito dependentes da temperatura. Ligas com intervalos estreitos de temperatura no estado semi-sólido requerem precisão no controle da temperatura;
- Segregação de líquido devido a um aquecimento não uniforme pode resultar em composições não uniformes no componente.

Apesar das vantagens da conformação no estado semi-sólido, esta tecnologia tem sido aplicada quase que exclusivamente a ligas de baixo e médio ponto de fusão. O desenvolvimento da tecnologia da tixoconformação focado particularmente para estas famílias de ligas se deu principalmente devido aos processos de fabricação de pastas desenvolvidos inicialmente, os quais requerem o manuseio de metal líquido. No entanto, com o progresso da tecnologia de semi-sólidos, vários procedimentos para a obtenção de pastas, a partir da liga no estado sólido, foram viabilizados. A partir destes desenvolvimentos se tornou possível a aplicação da tixoconformação também para ligas de mais alto ponto de fusão, como as ligas ferrosas.

A obtenção de pastas tixotrópicas a partir de ligas no estado sólido consiste em aquecer o material a partir do estado sólido até temperaturas superiores à $T_{solidus}$ (temperatura de solidificação) e mantê-lo nesta temperatura por um determinado tempo para a promoção de modificações estruturais que resultam na pasta tixotrópica. Este método é chamado genericamente de tecnologia de processamento de semi-sólidos por fusão parcial controlada (FPC). A condição inicial da matéria prima pode ser distinta: fundida, contendo microestrutura dendrítica grosseira, refinada ou super refinada a ponto de impedir a evolução dendrítica

completa (contendo, portanto, morfologia de rosetas, por exemplo), ou submetida previamente a tratamentos mecânicos ou termo-mecânicos.

Os mecanismos de evolução estrutural envolvidos na transformação de uma estrutura dendrítica ou de rosetas em globulares, em meio líquido, envolvem difusão de massa movida pela necessidade de redução de energias de superfície. Este fenômeno, termodinamicamente espontâneo, pode ocorrer com elevada cinética tendo em vista as altas temperaturas empregadas para a obtenção de pastas tixotrópicas (CRISTOFOLINI, 2009).

Observa-se na Figura 2.2 uma ilustração que demonstra a evolução da morfologia dendrítica para a morfologia globular. Os ramos dendríticos sofrem o fenômeno da coalescência, retendo certa quantidade de líquido em seu interior. A morfologia final apresenta uma estrutura grosseira e glóbulos irregulares, de grandes dimensões (ZOQUI, 2001).

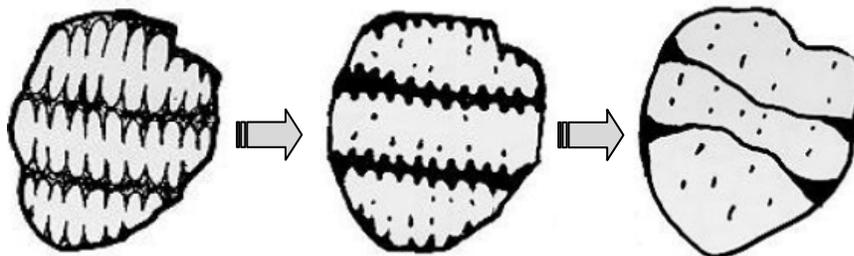


Fig. 2.2 Evolução de uma estrutura dendrítica para globular (Adaptado de BENATI, 2008)

A utilização de tratamentos térmicos para a produção de pastas tixotrópicas com globularização da fase primária se torna interessante para as ligas de alto ponto de fusão, pois apresenta a vantagem de dispensar a necessidade de agitação de líquidos. Viabiliza-se assim a utilização deste processo para este tipo de ligas.

2.2. Características e propriedades de estruturas tixoconformadas

Em contraste aos fluidos Newtonianos, nos quais há uma relação entre o acréscimo na viscosidade com o aumento na tensão de cisalhamento, as ligas metálicas no intervalo da temperatura entre o estado sólido e o líquido exibem comportamento tixotrópico, onde existem partículas sólidas na forma globular dentro de uma matriz líquida, as quais se movem livremente umas contra outras, como representado na Figura 2.3. Desta forma, sua viscosidade é fortemente dependente da tensão aplicada, seguindo uma reação não-linear, apresentando um comportamento reológico peculiar – para tensões pequenas se comportam como sólidos, apresentando elevada viscosidade, e a partir de uma determinada tensão passam a escoar como líquidos viscosos (HIRT e KOPP, 2009).

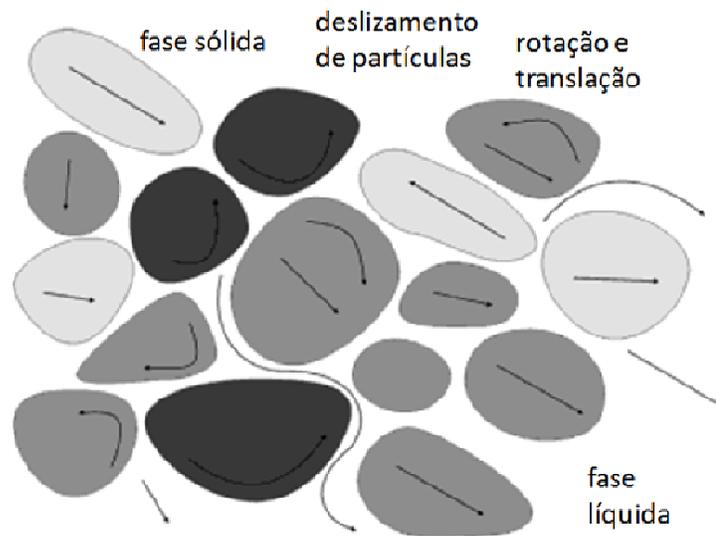


Fig. 2.3 Descrição dos diferentes mecanismos para explicar o fluxo de parcelas líquidas e metálicas em suspensão (HIRT e KOPP, 2009)

Em uma estrutura tixoconformada, para um mesmo valor de fração sólida (f_s) existem valores de tensão de cisalhamento bastante diferentes em função da estrutura presente, sendo significativamente superiores para a liga contendo fase sólida dendrítica.

Para exemplificar, pode-se observar na Figura 2.4 os resultados de estudos obtidos por Spencer (1972) e revisados por Flemings (1991), onde são apresentadas as medidas de tensão de cisalhamento em pastas da liga Sn-15% Pb, apresentando estrutura dendrítica (a) e com estrutura não-dendrítica (b), para diferentes frações sólidas. A liga com estrutura dendrítica e $f_s = 0,40$ necessita de uma tensão da ordem de 200 kPa para deformar-se, enquanto que a mesma liga com estrutura não-dendrítica necessita de apenas 0,2 kPa.

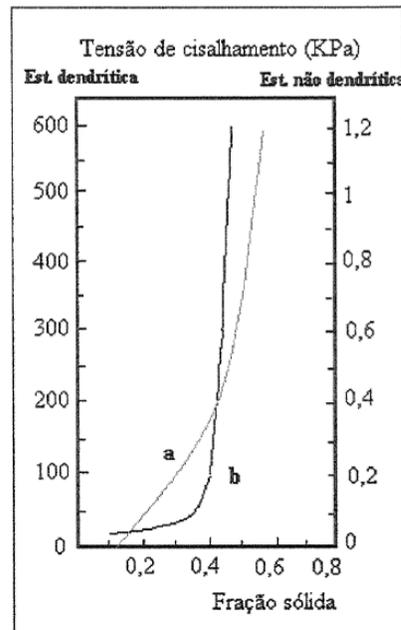


Fig. 2.4 Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Sn-15%Pb com estrutura dendrítica (a) e com estrutura não dendrítica (b). (SPENCER, 1972)

Outro fator também dependente da fração sólida em estruturas tixoconformadas é o seu comportamento durante o escoamento. Pode-se observar na Figura 2.5 os resultados de Flemings (1991) que mostram a influência da fração sólida na viscosidade aparente da liga Al-4,5%Cu-1,5%Mg, quando submetida a diferentes taxas de cisalhamento. O gráfico demonstra que, para uma mesma fração sólida, o aumento da taxa de cisalhamento causa uma diminuição da viscosidade, enquanto que, para taxas de cisalhamento equivalentes, a maior quantidade de fase sólida no material semi-sólido igualmente impacta em maiores viscosidades.

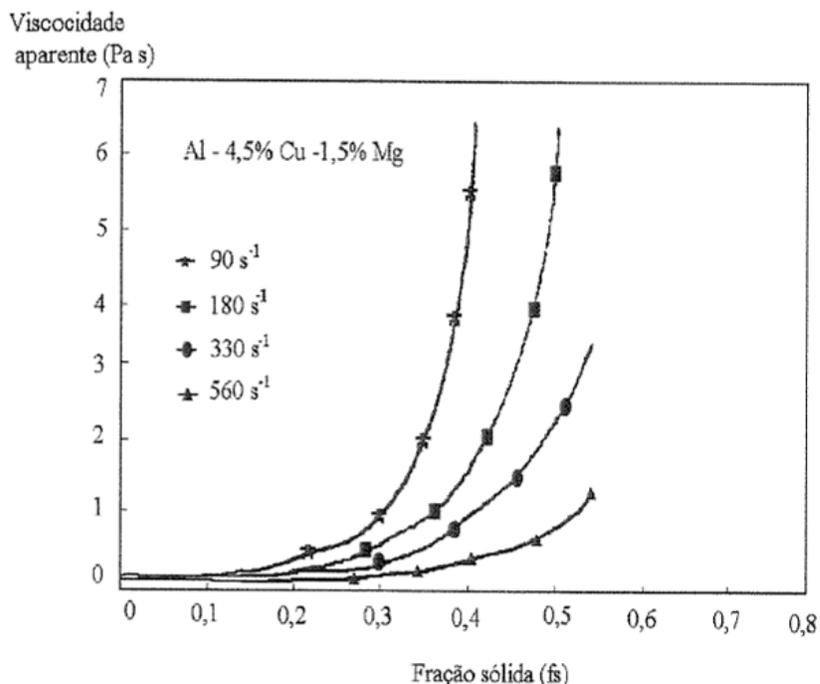


Fig. 2.5 Influência da fração sólida na viscosidade aparente da liga Al-4,5%Cu-1,5%Mg quando submetida a diferentes taxas de cisalhamento (FLEMINGS, 1991)

Este comportamento viscoso de pastas tixotrópicas pode ser relacionado com sua estrutura interna, onde o grau de coesão da estrutura interna do fluido determina sua viscosidade aparente: para altas tensões aplicadas, estruturas internas fortemente coesas podem se tornar desorganizadas, apresentando como consequência, baixa viscosidade aparente. De maneira oposta, reduzidas tensões não conseguem romper a coesão estrutural, resultando em altos valores de viscosidade aparente.

No caso de pastas tixofundidas, o tipo provável de coesão estrutural presente é a interação entre as partículas sólidas globulares, que apresentam alta tendência à aglomeração, podendo ocorrer facilmente o fenômeno da coalescência (ROBERT, 1989).

Com base nestas características reológicas de pastas tixotrópicas, pode-se destacar a importância da sua estrutura interna, para o entendimento e controle de suas propriedades de escoamento. Compreendem-se ainda as possíveis aplicabilidades de pastas com estas

características de escoamento para operações de fundição, uma vez que é possível trabalhar com ligas no estado semi-sólido, obtendo-se um escoamento não turbulento.

2.3. Alumínio – Conceitos Gerais

O alumínio, apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, é o metal mais jovem usado em escala industrial. Mesmo conhecido há milênios, o alumínio começou a ser produzido comercialmente há cerca de 150 anos, e sua produção atual supera a soma de todos os outros metais não ferrosos. Um dos segmentos em que a aplicação do alumínio tem evoluído mais rapidamente no mundo é o automotivo e de transportes. Dos produtos de alumínio, como fundidos, chapas, perfis, pó de alumínio entre outros, derivam cada vez mais soluções para essa indústria, uma vez que o metal oferece um conjunto de vantagens aos fabricantes na concepção de seus projetos e na fabricação de seus produtos (ABAL, 2009).

Um dos aspectos que tornam as ligas de alumínio atraentes como materiais de construção mecânica é o fato do alumínio poder combinar-se com a maioria dos elementos de liga. Com essas associações, é possível obter características mecânicas de acordo com a aplicação do produto final (ABAL, 2009). O alumínio e suas ligas são caracterizados por uma densidade relativamente baixa ($2,7 \text{ g/cm}^3$, em comparação com uma densidade de $7,9 \text{ g/cm}^3$ para o aço), condutividade elétrica e térmica elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. Muitas destas ligas são conformadas com facilidade em virtude das suas elevadas ductilidades. Uma vez que o alumínio possui uma estrutura cristalina CFC, a sua ductilidade é mantida até mesmo em temperaturas reduzidas. A principal limitação do alumínio está na sua baixa temperatura de fusão [660°C (1220°F)], o que restringe a temperatura máxima em que o alumínio pode ser utilizado.

A resistência mecânica do alumínio pode ser aumentada mediante a formação de ligas, porém com uma tendência a reduzir sua resistência à corrosão. Os principais elementos de liga incluem o cobre, o magnésio, o silício, o manganês e o zinco. As ligas que não são tratáveis

termicamente consistem em uma única fase, para as quais um aumento na resistência é obtido através do endurecimento por solução sólida. Outras ligas são tornadas termicamente tratáveis (capazes de serem submetidas a tratamento de endurecimento por precipitação) como resultado do processo de formação da liga (CALLISTER, 2002).

2.4. Ligas AlSiCuMg

As ligas de alumínio da família AlSiCuMg são uma das principais ligas utilizadas em aplicações automotivas e na área aeroespacial. Isto se dá ao fato de suas excelentes propriedades mecânicas, de resistência a temperaturas elevadas e dureza. Os processos de fabricação mais comumente utilizados com esta liga são fundição por gravidade e fundição sob pressão. Pode-se citar a utilização desta liga para a fabricação de blocos de motor, cabeçotes de motor, caixas de transmissão, entre outros (ALUAUTO, 2010).

No desenvolvimento do presente estudo, os principais elementos de liga utilizados são o silício, o cobre e o magnésio. A Tabela 2.2 apresenta os teores máximos e mínimos de cada elemento permitidos nesta liga conforme norma EN 1706:1998.

Tabela 2.2 Composição química da liga Al-Si5-Cu3-Mg, conforme norma EN 1706:1998

Designação da liga	Composição Química (% peso)									
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
EN AC-Al-Si5-Cu3-Mg	-	4,5 6,0	0,60	2,6 3,6	0,55	0,15 0,45	-	0,10	0,20	0,25

De uma forma geral, a influência de cada um destes elementos na estrutura final da liga fundida é descrita por DAVIS, 1993:

- Silício: O efeito mais notado do silício em ligas de alumínio é a melhoria das características de fundição. Adições de silício no alumínio puro promovem melhoria na fluidez, na resistência a trincas de contração e características de alimentação durante o processo de fundição. Ligas comerciais vão desde hipoeutéticas até hipereutéticas, com teores 25%Si ou mais. Em geral, a faixa de silício deve ser definida para cada processo de fundição, onde para processos com taxas de resfriamento baixas são utilizados teores entre 5 e 7%, para fundição em coquilha 7 a 9% e para fundição sob pressão 8 a 12%. As bases para estas recomendações têm relação entre a taxa de resfriamento / fluidez e o efeito da porcentagem de eutético sobre a alimentação de metal líquido. Adições de silício são também acompanhadas pela redução do peso específico e do coeficiente de expansão térmica;

- Cobre: As ligas mais utilizadas contêm entre 4 e 10% deste elemento. O cobre melhora substancialmente a resistência mecânica e a dureza das ligas, em ligas *as cast* ou tratadas termicamente. Ligas contendo entre 4 e 6%Cu respondem favoravelmente a tratamentos térmicos. A presença de cobre na liga geralmente diminui a resistência a corrosão, e em composições específicas afeta também a susceptibilidade à corrosão sob tensão. Adições de cobre também reduzem a resistência a trincas de contração e diminuem a fusibilidade.

- Magnésio: É a base para o desenvolvimento da dureza e resistência das ligas tratadas de AlSi que contem cobre, níquel e outros elementos com o mesmo propósito. A fase Mg_2Si exibe um eficiente limite de solubilidade correspondente a aproximadamente 0,70%Mg. Ligas binárias de AlMg são usualmente utilizadas em aplicações que requerem bom acabamento superficial e resistência a corrosão, bem como resistência mecânica e ductilidade. As ligas mais utilizadas contêm entre 4 e 7%Mg, e acima de 7% favorecem os tratamentos térmicos.

Portanto, assim como nas demais ligas de alumínio uma correta proporção de cada elemento é fundamental para caracterizar o produto final quanto às propriedades mecânicas requeridas, de acordo com a utilização do componente. Pode-se observar na Tabela 2.3 as principais propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg, conforme a norma EN 1706:1998. É importante observar que a diferença entre os limites inferior e superior de cada especificação é diretamente o resultado de ligas tratadas e não tratadas.

Tabela 2.3 Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg, conforme norma EN 1706:1998

Designação da liga	Propriedades mecânicas			
	σ_{max} (N/mm ²)	σ_e (MPa min.)	ϵ (%)	Dureza (HBS min.)
EN AC-Al-Si5-Cu3-Mg	270	180	1	70
	320	280	<1	90

Em face à composição química e propriedades mecânicas apresentadas, a liga em estudo Al-Si5-Cu3-Mg se aproxima da classificação AA-319, conforme Norma Internacional da *Aluminum Association*. Nesta liga AA-319, a presença do cobre leva à formação de uma fase intermetálica de cobre CuAl₂. Esta fase pode solidificar-se em duas formas, blocos tipo CuAl₂ e eutéticos tipo Al + CuAl₂, conforme destacado na Figura 2.6. Modificações com Sr tendem a segregar o cobre em áreas fora da região eutética do Al-Si. Devido a esta segregação, a fase CuAl₂ tende a solidificar em forma de blocos, em vez da forma eutética. Nesta forma, é muito mais difícil o cobre se dissolver na matriz de alumínio. Assim, os benefícios de ter Cu como agente de reforço durante o tratamento térmico são reduzidos. Existe, além disto, a questão do início de fusão, onde, se não for devidamente controlado, esta solução em temperaturas elevadas pode induzir a fusão da fase cobre, resultando na formação de porosidades e redução da resistência da liga (LI *et al*, 2003).

Em seu estudo, Meyer *et al* (1997) reportou que a resistência à tração e a ductilidade para esta liga diminuem com o aumento do espaçamento interdendrítico. Resultados similares foram encontrados por Samuel e Samuel (1995) para as propriedades mecânicas da liga AA-319: conforme o espaçamento interdendrítico foi aumento de 28 para 95 μ m, a resistência à tração diminuiu cerca de 20%, enquanto o alongamento diminuiu em até 80%. Porém observou-se que o limite de escoamento manteve-se constante, independente do tempo de solidificação.

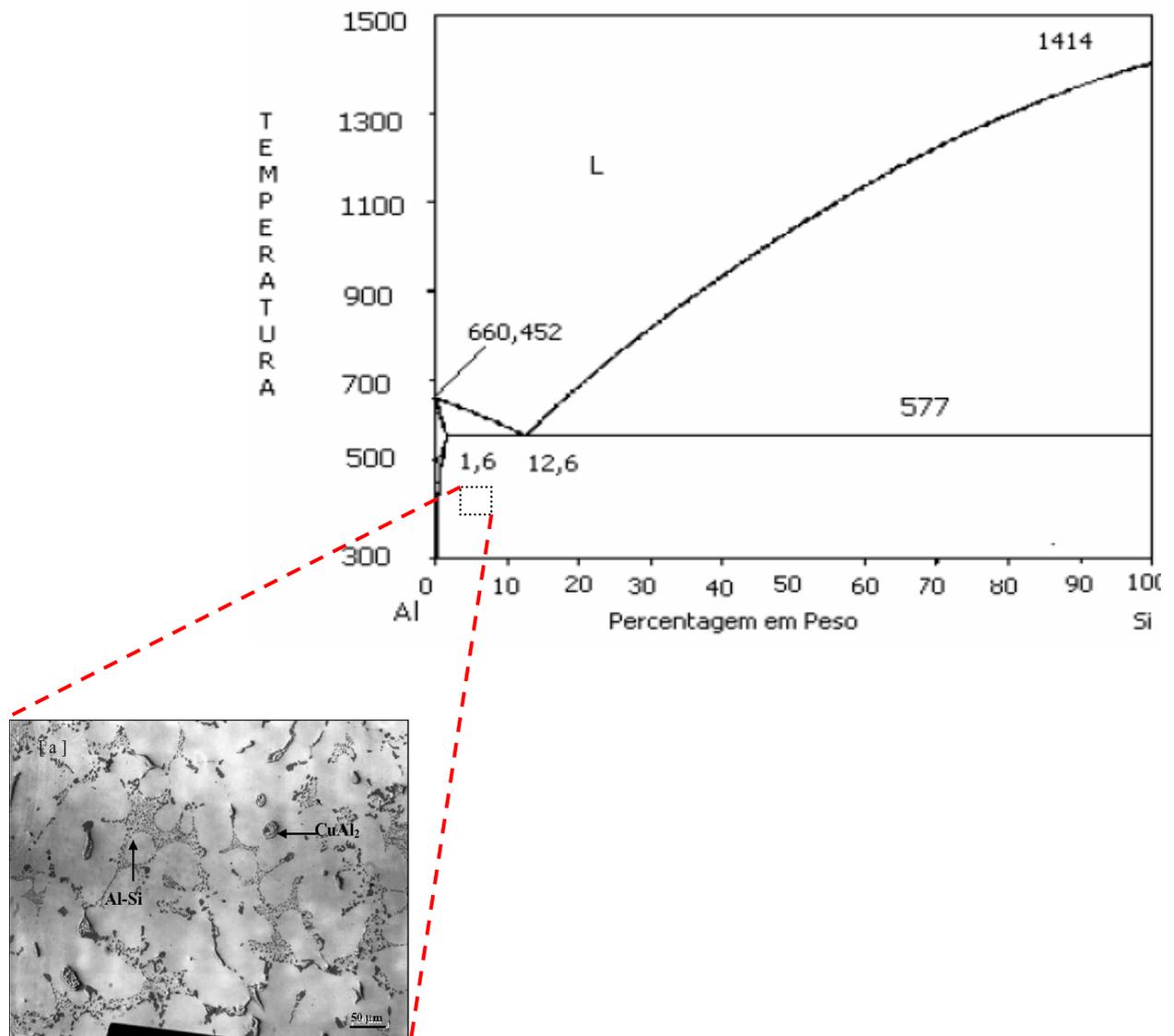


Fig. 2.6 Diagrama de fases Al-Si, com micrografia em destaque para as fases Al-Si e CuAl₂

Assim como em outras ligas, os dois principais fatores que influenciam nos tratamentos térmicos nesta liga são a temperatura e o tempo. Eles são responsáveis pela modificação em partículas de Si e pela dissolução do Cu e Mg nas matrizes (um processo que fortalece a matriz da liga). Temperaturas convencionais de tratamentos térmicos devem estar abaixo do ponto de fusão do Cu, a fim de evitar o início da fusão; no entanto, isto pode ser alto o suficiente para criar condições ótimas para a dissolução do Cu e a esferoidização do silício. A concentração de elementos de liga como o Cu e Mg podem também ser otimizadas para que se obtenha um fortalecimento de solutos a fim de manter as propriedades da liga, ainda que em altas temperaturas (KASPRZAK, KIERKUS e SOKOLOWSKI, 2001).

Estudos das influências da adição de zircônio nas características de resistência ao desgaste e propriedades mecânicas da liga fundida AA-319 foram investigadas por Mahmudi, Sepehrband e Ghasemi (2006). As ligas fundidas foram submetidas a tratamentos de solubilização seguidos de envelhecimento artificial em temperaturas entre 175 e 235°C por diferentes períodos de tempo. As propriedades mecânicas e a resistência ao desgaste da liga com adição de 0,15% de Zr foram comparadas com a mesma liga no estado *as cast*. Os principais efeitos para estes experimentos foram o aumento da dureza, resistência à tração, resistência ao desgaste, além de um melhor acabamento superficial.

Uma vez que a liga AA-319 apresenta excelentes características de fundição e boas propriedades mecânicas, esta se torna uma das ligas candidatas à realização de componentes a partir da tecnologia de semi-sólidos. Porém para ligas hipoeutéticas como é o caso, o eutético deve ser refundido completamente a fim de se obter boas propriedades mecânicas ($572 < T < 582^{\circ}\text{C}$). Existe ainda a possibilidade de se obter uma liga com o máximo de dureza a partir de um tratamento térmico T6 (10h a 170°C ou 6h a 180°C), ou por estabilização para os efeitos de operação a altas temperaturas, obtidos utilizando 4h a 210°C ou 3h a 220°C (CERRI *et al*, 2000). Tratamentos como o envelhecimento artificial T5 também são usualmente aplicados para melhoria de propriedades como alongamento e resistência à tração, usinabilidade e alívio de tensões.

Cerri *et al* (2000) realizou um estudo comparativo de propriedades e estrutura da liga AA-319 no estado tixofundido, para diferentes tratamentos térmicos: T5 e T6. Como resultado foi observado que a liga com o tratamento T5 apresentou resultados de ductibilidade, alongamento e resistência à tração muito próximos a esta mesma liga tratada termicamente com T6. Desta forma, o tratamento T5 torna-se mais interessante em termos de custo e tempo. Ressaltou-se também a recomendação desta liga para aplicações utilizando a tecnologia de semi-sólidos, uma vez que as propriedades mecânicas obtidas são melhores em comparação a outros processos de fundição.

Em um estudo similar, Cavaliere *et al* (2005) avaliou a influência dos tratamentos térmicos T5 e T6 nas propriedades mecânicas da liga AA319 tixoconformada. Como resultado obteve-se um aumento da ductibilidade, sem afetar consideravelmente propriedades como resistência à tração e escoamento. Da mesma forma que ressaltado em estudos anteriores, verificou-se que o tratamento térmico T5 apresentou propriedades mecânicas muito similares às obtidas através do tratamento T6.

Kang, Youn e Seo (2005) desenvolveram uma pesquisa a fim de obter as melhores condições de tratamentos térmicos para a liga AA319 tixoconformada. O tratamento térmico aplicado foi o T6, seguido de verificações da evolução da microestrutura e propriedades mecânicas, em comparação ao componente tixoconformado sem tratamento. Foram avaliadas temperaturas para o envelhecimento artificial nas seguintes condições: 4h / 170°C ; 6h / 170°C e 10h / 170°C. As amostras tratadas na condição de 6h / 170°C se mostraram com as melhores propriedades. Os valores de resistência à tração e alongamento encontrados foram de 366MPa e 6,1% respectivamente.

2.5. Caracterização térmica via DSC

Os ensaios de DSC (Differential Scanning Calorimetry) são utilizados para medir-se a variação de entalpia que ocorre entre uma referência e uma amostra durante o processo de aquecimento / resfriamento. Atualmente têm-se definidos dois tipos de ensaios de DSC:

- DSC de Compensação de Potência: Arranjo no qual a amostra e a referência são aquecidas individualmente, em compartimentos separados. Isto torna possível manter ambas em condições totalmente isotérmicas.
- DSC de Fluxo de Calor: Arranjo no qual a amostra e a referência, contidas em seus respectivos suportes de amostras, são colocadas sob um disco de metal. A troca de calor entre o forno e a amostra ocorre preferencialmente pelo disco.

A técnica do DSC pode ser usada para investigar propriedades térmicas de uma variedade de materiais, sendo empregada para caracterizar materiais metálicos, orgânicos, inorgânicos, poliméricos, etc. Como o DSC permite determinações quantitativas, a área dos picos está relacionada com a energia envolvida no processo. Para tal, utilizam-se padrões para calibração do equipamento. Estes padrões apresentam variação de entalpia conhecida, normalmente de fusão, e a área do pico deste processo é comparada com a área do processo apresentado pela amostra (LEMOS, 2003).

Ainda segundo Lemos, é importante o controle dos gases no interior do forno de DSC, pois o aquecimento em atmosfera não inerte (ar) pode levar a modificações do perfil da curva de DSC devido a processos exotérmicos de degradação oxidativa de compostos orgânicos, combustão, entre outros, enquanto em atmosfera inerte, como a de nitrogênio, estes processos não ocorrem.

Na Figura 2.7 é apresentado um exemplo de curva de DSC para uma liga de alumínio AA7004. Observa-se como sendo uma função do diferencial da entalpia por tempo no eixo das ordenadas *versus* a temperatura (T) no eixo das abscissas, onde as mudanças de inclinação, saltos e picos denotam os eventos térmicos ocorridos. Neste caso pode-se notar a ocorrência de apenas um pico endotérmico. Esse pico corresponde à fusão da liga, ocorrendo entre as temperaturas de 603°C (temperatura *solidus* e início do pico endotérmico) a 660°C (temperatura *liquidus* e final do pico endotérmico).

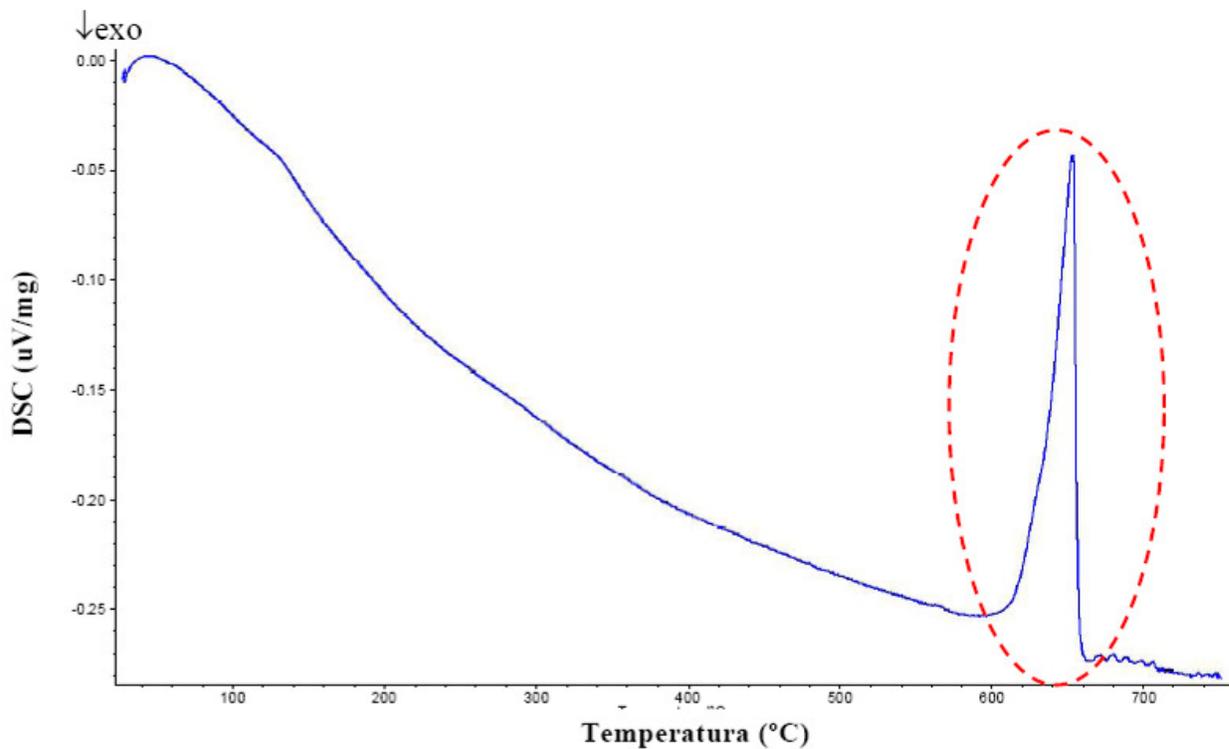


Fig. 2.7 Curva de DSC para a liga AA7004 (adaptado de TORRES, 2009)

O uso de curvas de DSC na caracterização de materiais metálicos, incluindo-se aí materiais semi-sólidos, torna-se cada vez mais recorrente, e tange principalmente a tentativa de se determinar com a maior acuracidade possível as temperaturas de transformação das ligas tixoconformáveis (temperaturas *liquidus* e *solidus*), além da caracterização de propriedades termofísicas para tixoconformação (BENATI, 2008).

Muitas referências foram encontradas utilizando-se dessa técnica para determinação das temperaturas de transformação de ligas de alumínio para tixoconformação, das quais se podem citar como exemplos os trabalhos de Chayong, Atkinson e Kapranos (2005), Kapranos *et al* (2003), Birol (2008), Lasa (2002), Liu *et al* (2003), entre outros.

Com base nos dados apresentados nesta revisão de literatura, pode-se notar que existe hoje um domínio das técnicas de processamento de metais no estado semi-sólido, onde diversos autores pesquisaram e processaram ligas de alumínio e as vantagens deste processo são conhecidas. Porém, para estudo da viabilidade de aplicação desta técnica em componentes de motores a diesel, torna-se importante a realização de um estudo comparativo entre o processo de fundição sob pressão utilizado atualmente com a liga de alumínio Al-Si5-Cu3-Mg para a fabricação de componentes de motores a diesel, frente a esta mesma liga processada a partir do estado semi-sólido através da tixoconformação.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propõe a análise comparativa de estruturas e propriedades mecânicas em tração e dureza da liga Al-Si5-Cu3-Mg, nos estados fundido convencional (fundição sob pressão) e tixoconformada, visando a avaliação da sua utilização em componentes automotivos nestes diferentes estados. Para tanto, as análises a serem realizadas nestas ligas podem ser divididas de modo sucinto nos seguintes tópicos:

- Seleção do componente/liga de Al a ser investigado;
- Seleção de áreas de coleta de material e preparo de amostras para análise, a partir de um componente fundido comercial (fundição sob pressão), buscando a maior representatividade possível da estrutura destes componentes de motores;
- Caracterização da microestrutura da liga no estado fundido: identificação de fases, caracterização de tamanho de grãos, defeitos estruturais; e caracterização de propriedades mecânicas através de ensaios de tração e de dureza, do componente selecionado;
- Análise da tixohabilidade da liga utilizada para a fabricação do componente selecionado: determinação das temperaturas de transformação $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ (temperaturas de solidificação e de fusão), bem como a variação da fração sólida em função da temperatura no intervalo de solidificação (f_s vs T), com a finalidade de estabelecer as condições de processamento da liga no estado semi-sólido;
- Obtenção de estruturas a partir do estado semi-sólido, por tixoconformação;
- Caracterização da microestrutura do produto tixoconformado, com análise para a identificação de fases, tamanho de grãos, defeitos estruturais; e caracterização de propriedades mecânicas através de ensaios de tração e de dureza;

- Análise comparativa de estruturas e propriedades mecânicas da liga nos estados fundido e tixoconformado, visando a avaliação dos dois diferentes processos de fabricação do componente selecionado.

O diagrama da Figura 3.1 apresenta de forma esquemática as etapas de desenvolvimento do trabalho.

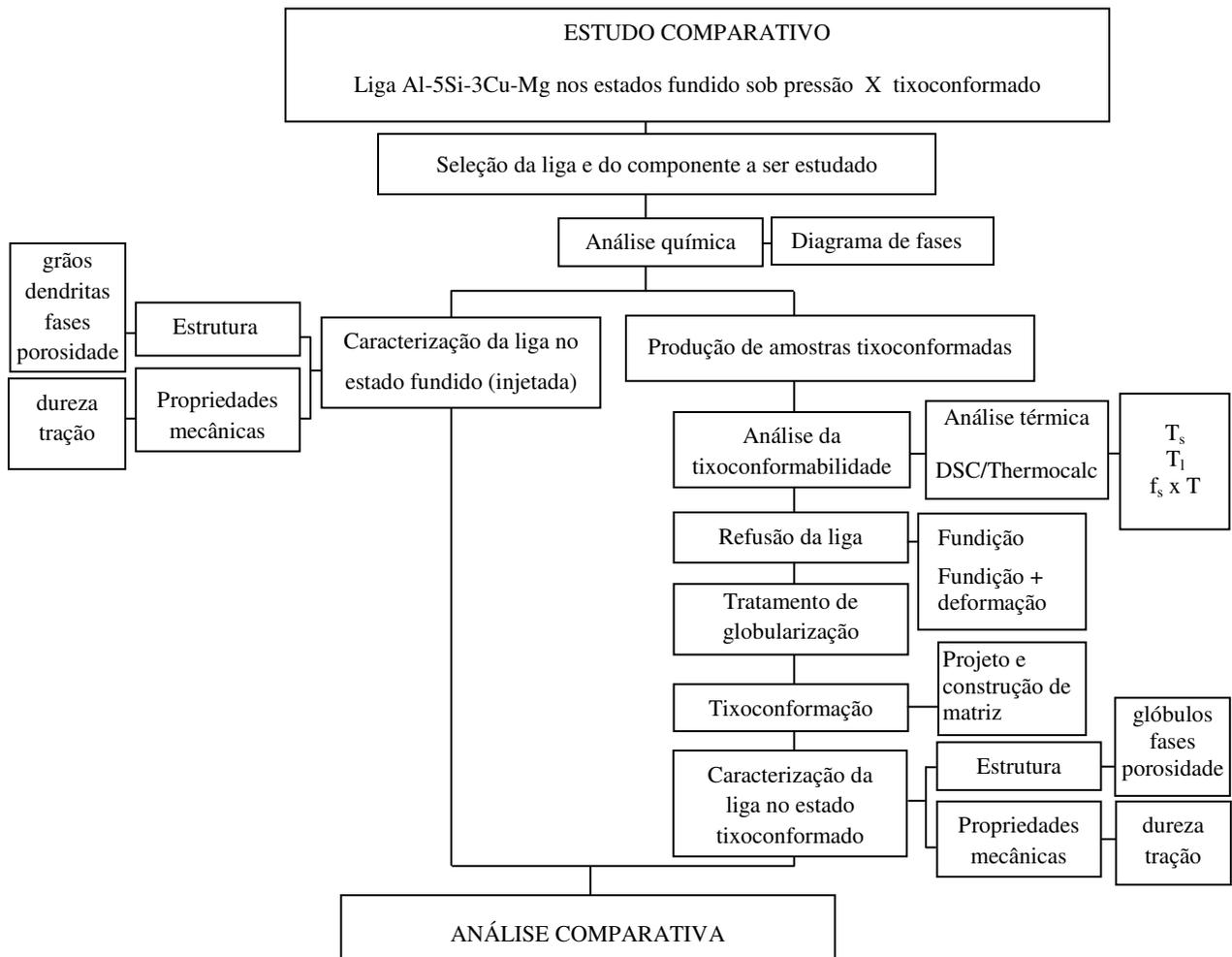


Fig. 3.1 Esquema representativo das etapas envolvidas no desenvolvimento do trabalho.

3.1. Seleção da liga e componente a serem analisados

A escolha da liga a ser estudada neste trabalho tomou como base a busca pela maior representatividade possível das ligas de componentes de motores atualmente utilizadas em maior escala pela indústria automobilística.

Dessa forma, foi selecionada a liga de alumínio Al-Si5-Cu3-Mg (os números representam a porcentagem em peso do elemento precedente), largamente utilizada para a fabricação de suportes de motores a diesel. Como objeto para o estudo foi escolhido um suporte de acessórios que apresenta geometria complexa como pode ser observado na Figura 3.2. Este componente é responsável pela sustentação do alternador, tensionador de correia e compressor do ar condicionado. É fabricado por fundição sob pressão (injeção), um processo concorrente da tixoconformação.

A literatura aponta vantagens da fabricação por tecnologia de semi-sólidos sobre a fabricação por fundição sob pressão (injeção) relacionadas principalmente à melhoria de qualidade do produto, uma vez que a tixoconformação proporciona a obtenção de produtos livres de porosidade (ATKINSON, 2005), muito frequentemente encontrada em produtos injetados. Desse modo, a seleção desse componente para estudo pode trazer importantes informações sobre a pertinência da sua fabricação por processo de tixoconformação em substituição à injeção.



Fig. 3.2 Suporte de acessórios de motor a diesel produzido na liga Al-Si5-Cu3-Mg.

3.2. Caracterização da composição química da liga

Para análise da composição química da liga, foi utilizado espectrômetro de absorção atômica e emissão ótica do fabricante Spectromaxx, pertencente ao Laboratório Metalúrgico da MWM International Motores Diesel. Foram retiradas amostras em diferentes regiões do componente, a fim de se obter uma composição química nominal, uma vez que o processo de solidificação acarreta a presença de segregação em ligas fundidas.

A liga de alumínio utilizada possui composição química média conforme valores apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Composição química da liga utilizada no trabalho, segundo análise por espectrometria de absorção atômica.

Composição Química (% peso)									
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
balanço	5,58	0,47	2,86	0,28	0,37	0,013	0,016	0,17	0,17

Conforme mencionado no capítulo 2, a composição química obtida permite caracterizar a liga como da série AA 3xx.x (ligas Al-Si-Cu/Mg para fundição), aproximando-se da classificação AA-319, segundo a *Aluminum Association*.

3.3. Análise da tixoconformabilidade da liga

A análise prévia da tixoconformabilidade de uma determinada liga é necessária para a determinação de parâmetros de tixoconformação. Para a avaliação da tixoconformabilidade da liga de estudo foram determinadas as temperaturas de início e final de solidificação (*Tliquidus* e

$T_{solidus}$) e, portanto, o intervalo de transformação sólido/líquido, e a variação da fração sólida com a temperatura (f_s vs T). Com estes dados se estabeleceram janelas de tixoconformação para a liga utilizada.

Para a determinação das $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ e o intervalo de solidificação, foi utilizada calorimetria diferencial exploratória (DSC). Foram efetuadas análises em duas amostras da liga de alumínio, ambas com massa aproximada de 50mg, onde as mesmas foram submetidas a temperaturas entre $T_{ambiente}$ e 700°C , com uma taxa de aquecimento e de resfriamento de 10°C por minuto. Esta análise foi realizada utilizando-se um equipamento de análise térmica do fabricante NETZSCH STA 409 CELL e pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da FEM/UNICAMP.

Para a determinação da variação da fração sólida vs temperatura foi empregado *software* THERMOCALC[®]. A simulação foi feita utilizando condições de solidificação de acordo com o modelo de Scheil (assumindo difusão limitada no sólido e total difusão no líquido à frente da interface de solidificação). A partir da curva gerada foi possível a construção de curva df_s/dT vs T para a determinação de janelas de tixoconformação.

3.4. Produção de corpos de prova para a tixoconformação

Para os testes de tixoconformação e obtenção de amostras tixoconformadas para análise, foi necessária em primeiro lugar a produção de corpos de prova da liga, o que envolveu duas etapas: a produção de amostras fundidas e sua usinagem em corpos de prova para testes de tixoconformação.

Na primeira etapa, foram produzidos, por fundição convencional, lingotes cilíndricos da liga em estudo, de dimensões médias de 190 x 25mm de diâmetro. Para tanto a liga no estado líquido foi vazada em lingoteiras metálicas de aço de baixo carbono SAE 1045, de diâmetro interno variando de 24 a 29mm (esta conicidade foi imposta para facilitar a desmoldagem) e comprimento de 190mm. As lingoteiras foram previamente aquecidas a 150°C para retirada de

qualquer umidade presente nas mesmas; não foi utilizado nenhum tipo de revestimento em suas paredes internas. Após secagem, as lingoteiras foram resfriadas à temperatura ambiente para receber o metal líquido.

O vazamento foi feito com baixo valor de superaquecimento no líquido (700°C); não foram utilizados refinadores de grãos. Com a utilização de lingoteiras metálicas à temperatura ambiente e baixo valor de superaquecimento no vazamento, pretendeu-se estimular a formação de grãos equiaxiais finos.

Figura 3.3 apresenta a montagem de lingoteiras utilizadas para a obtenção de amostras para a posterior produção de pastas tixotrópicas a serem tixoconformadas.



Fig. 3.3 Lingoteiras utilizadas para a produção das amostras fundidas da liga Al-Si5-Cu3-Mg

A partir dos lingotes produzidos foram obtidos, por usinagem, corpos de prova cilíndricos com comprimento de 65mm e 13,5mm de diâmetro. Estas dimensões foram definidas de acordo com a geometria e massa requeridas para o preenchimento da cavidade da matriz projetada para a tixoconformação; conforme descrito em item posterior, a cavidade da matriz foi projetada de modo a se obter um produto tixoconformado com geometria próxima à de um corpo de prova padrão para testes de tração.

Uma segunda série de lingotes fundidos foi submetida à deformação a frio por compressão, para a modificação da sua estrutura interna. Foi utilizada razão de deformação de 30% em seu diâmetro. Objetiva-se a formação de estruturas tixotrópicas mais finas nesse caso. Tomou-se o cuidado de se realizar a deformação em várias etapas, de modo que o controle dimensional da deformação foi realizado a cada acionamento da prensa.

Assim, foram obtidos corpos de prova para a tixoconformação em duas diferentes condições: fundido e deformado a frio.

3.5. Tixoconformação

A operação de tixoconformação, para a produção de amostras tixoconformadas da liga em estudo, para análise, envolveu as etapas: projeto e construção de ferramental (adequação e instrumentação de prensa, matriz de tixoconformação); obtenção de pastas tixotrópicas e tixoconformação propriamente dita.

Matriz de tixoconformação: no projeto da matriz de tixoconformação optou-se por uma matriz aberta simples, para produção de corpos de prova retangulares de dimensões próximas às de um corpo de prova padrão para testes de tração. A Figura 3.4 apresenta o desenho da matriz projetada.

A matriz foi fabricada no departamento de usinagem de componentes protótipos, pertencente ao laboratório de testes de Engenharia da MWM International. O material utilizado na fabricação foi o aço de baixo carbono SAE 1045, uma vez que as temperaturas a serem empregadas na tixoconformação da liga de alumínio estão abaixo das temperaturas de transformação austenítica deste material. Os componentes desta matriz foram produzidos em uma fresadora universal ROMI U30 com as ferramentas específicas para o desbaste a acabamento, tomando-se o cuidado para garantir uma rugosidade baixa na região da cavidade, o que poderia causar dificuldades de extração da peça tixoconformada e má qualidade superficial da mesma. A matriz construída é mostrada na Figura 3.5.

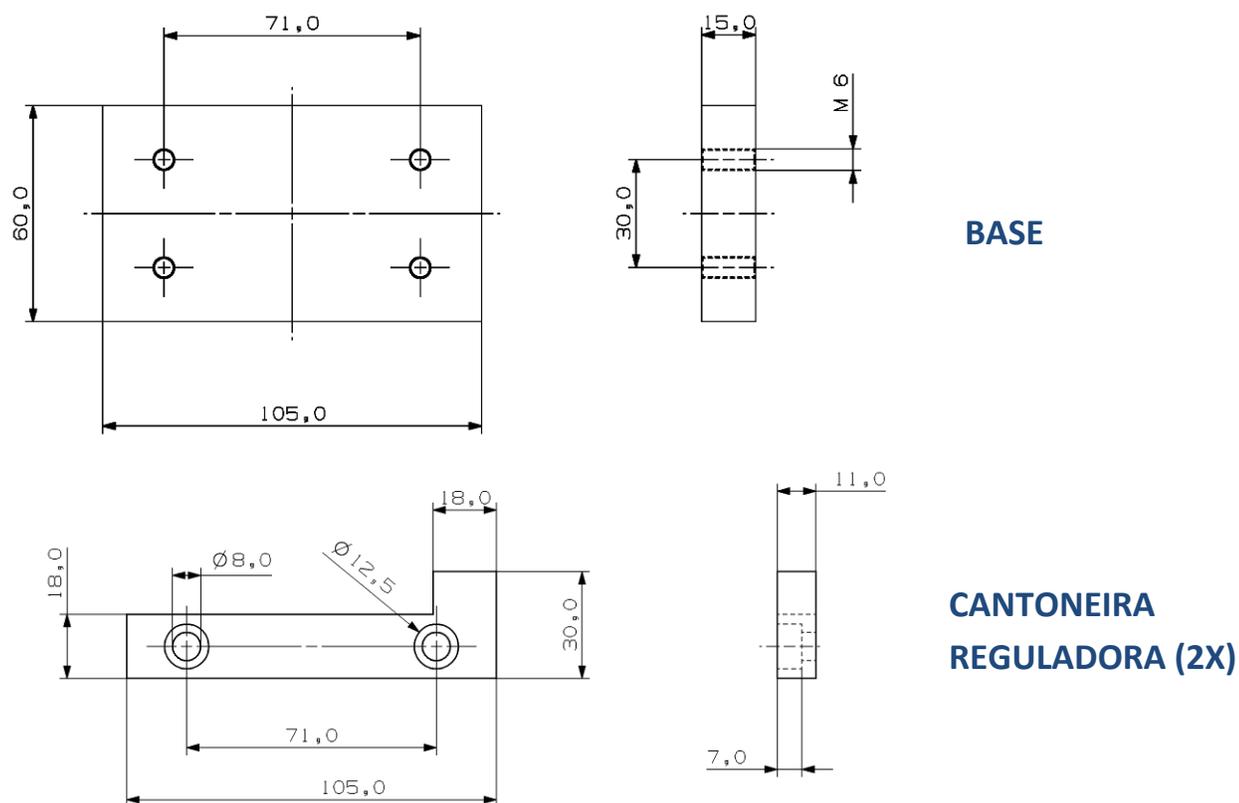


Fig. 3.4 Desenho da matriz projetada e construída para a produção das amostras tixoconformadas.

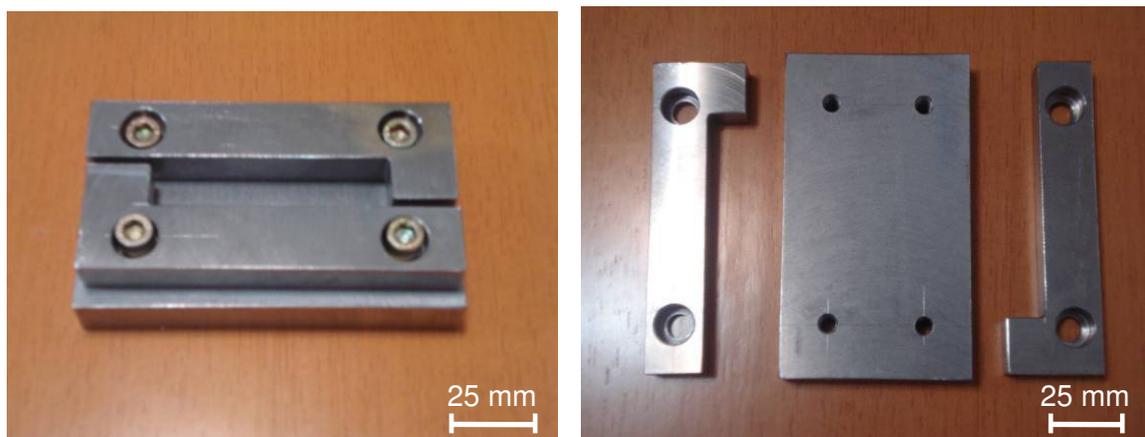


Fig. 3.5 Matriz projetada e construída para a para a produção das amostras tixoconformadas

Produção de pastas tixotrópicas e tixoconformação: as pastas tixotrópicas foram obtidas por simples aquecimento do material (lingote cilíndrico fundido ou deformado) em forno tipo mufla, fabricante QUIMIS modelo Q318. O material foi aquecido juntamente com a matriz, com o lingote já posicionado na sua cavidade. O controle de temperatura de tratamento foi feito com o uso de termopar inserido no corpo da matriz, na região da amostra.

As condições de aquecimento utilizadas são apresentadas na Tabela 3.2. Foram variadas as temperaturas, para a promoção de diferentes frações líquidas na pasta tixotrópica, e os tempos de tratamento à temperatura escolhida, para a observação da cinética da globularização esperada na estrutura do metal. Em todos os casos foi utilizada taxa de aquecimento de 10°C/min.

Tabela 3.2 Condições de tratamento térmico para obtenção de pastas tixotrópicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg estudada.

Estado da matéria prima	Temperatura de tratamento	fs esperado	Tempo de tratamento (s)
Fundido	580°C	0,45	120
			300
	564°C	0,60	120
			300
Fundido + deformado a frio	580°C	0,45	120
			300
	564°C	0,60	120
			300

Após atingidas as condições impostas para o tratamento de globularização da estrutura e obtenção do material semi-sólido, estes foram imediatamente submetidos à compressão para a produção de amostras tixoconformadas. O conjunto de equipamentos utilizados na tixoconformação pode ser visualizado na Figura 3.6 a seguir.



Controlador de temperatura com termopar instalado diretamente na matriz

a)



b)



c)

Fig. 3.6 Conjunto de equipamentos utilizados para a tixoconformação: a) forno tipo mufla com controle da temperatura por termopar; b) prensa hidráulica utilizada para a tixoconformação; c) detalhe da matriz e amostra antes do aquecimento.

Os ensaios de tixoconformação foram realizados utilizando-se uma máquina de ensaio de tração do fabricante Wolpert, modelo Testa 200kN, do Laboratório Metalúrgico da MWM International Motores Diesel. Este equipamento foi utilizado na função de prensa hidráulica, uma vez que garantia a velocidade e carga necessárias para a tixoconformação. Foi utilizada taxa de conformação, medida em termos de avanço do punção, de 5,5mm/s. Durante a operação de tixoconformação, a temperatura da amostra foi também controlada com o uso de termopar.

Após conformação, o material foi resfriado no interior do molde até a temperatura ambiente, sendo em seguida desmoldado. Foram assim obtidas amostras tixoconformadas de geometria retangular, de dimensões 12mm x 12mm x 65mm, em 8 diferentes condições microestruturais.

3.6. Caracterização de microestruturas

Foram caracterizadas as microestruturas do componente fundido, de amostras fundidas em laboratório e utilizadas para a confecção de corpos de prova para a tixoconformação e de amostras tixoconformadas.

Para a caracterização da microestrutura do componente comercial, fundido por injeção, foram retiradas amostras em distintas regiões do componente, conforme indicado na Figura 3.7. Foram selecionadas regiões com diferentes espessuras de paredes. No caso do lingote fundido obtido em laboratório, foi efetuado corte transversal e analisada a microestrutura desta seção. No caso de amostras tixoconformadas, foi observada também a seção transversal da região de fixação do corpo de tração.

As seções selecionadas para análise microestrutural foram preparadas por técnicas de metalografia convencional: embutimento em baquelite, lixamento com lixa d'água nos grãos 220, 320, 400, 600, 1200 e 1500 e polimento com panos Buehler G-Cloth, com pasta de diamante nos

grãos de $1\mu\text{m}$ e $1/4\mu\text{m}$. Para revelar a microestrutura foram realizados ataques químicos com HF (ácido fluorídrico) 1%, por aproximadamente 30s sob agitação moderada e constante.



Fig. 3.7 Indicação de posição de retirada de amostras para análise de microestrutura do componente comercial fundido.

Para a captura das imagens foi utilizado microscópio óptico Leica DM ILM, provido do *software ImageJ*® para processamento de imagens e análises quantitativas. Nas amostras fundidas foram medidos os tamanhos de rosetas e a porcentagem de poros. Nas amostras tixoconformadas foram medidos os tamanhos de glóbulos, avaliada a fração líquida na pasta previamente à tixoconformação e a porosidade. As medições do tamanho de rosetas no fundido e de glóbulos no produto tixoconformado foram realizadas utilizando-se o método dos Interceptos de Heyn, previsto na norma ASTM E112. Foram realizadas medições em quinze diferentes regiões das amostras, para assegurar uma maior representatividade dos resultados. As medições de porosidades foram realizadas utilizando-se recursos do *software ImageJ*®.

3.7. Análise de propriedades mecânicas

As análises das propriedades mecânicas da liga nos estados fundido e tixoconformado visam o levantamento de dados para efeitos comparativos entre a liga nos diferentes processos de fabricação. A definição das propriedades a serem analisadas deu-se de acordo com a funcionalidade do componente estudado, ou seja, resistência à tração, alongamento e dureza são características importantes a serem analisadas em suportes de motor.

Para a caracterização das propriedades mecânicas em tração, do componente comercial fundido, foram retirados corpos de prova do local selecionado, conforme mostrado na Figura 3.8, e posteriormente usinados conforme norma DIN 50125:2004-B6 x 30. Foram retirados oito corpos de prova de 02 componentes distintos, considerando diferentes regiões a fim de analisar possíveis variações das propriedades mecânicas devido às características do seu projeto.

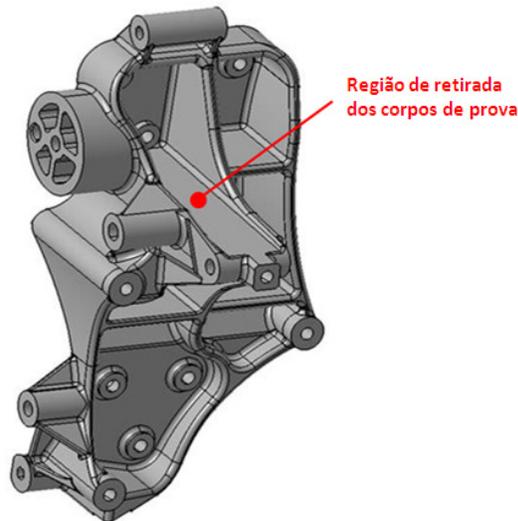


Fig. 3.8 Indicação de posição de retirada dos corpos de prova para tração do componente comercial fundido.

Para análise das propriedades mecânicas em tração das amostras tixoconformadas produzidas, primeiramente estas foram rebarbadas e em seguida usinadas para produção dos corpos de prova de tração (segundo dimensões requeridas pela norma já citada). A Figura 3.9

apresenta as dimensões dos corpos de prova utilizados para os ensaios de tração, bem como o seu posicionamento no interior da amostra tixoconformada. Buscou-se evitar regiões com altos índices de segregação e defeitos eventualmente presentes nas extremidades das amostras tixoconformadas.

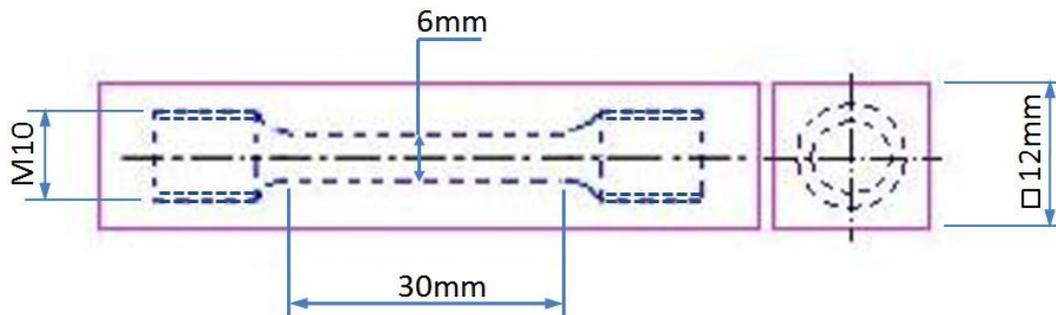


Fig. 3.9 Detalhe da disposição do corpo de prova DIN 50125:2004 - B6 x 30 no interior da amostra tixoconformada.

Os testes de tração foram efetuados em uma máquina de ensaio do fabricante Wolpert, modelo Testa 200kN, do Laboratório Metalúrgico da MWM International Motores Diesel. Para maior confiabilidade dos resultados, foram feitos 2 testes em cada condição de amostra. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,05 mm/s. A Figura 3.10 mostra o equipamento e corpo de prova de tração.

Para análise da dureza do componente comercial fundido, foram retirados corpos de prova de locais selecionados, conforme mostrado na Figura 3.7. A dureza foi medida em 4 pontos diferentes de cada amostra, considerando diferentes regiões a fim de analisar possíveis variações das propriedades mecânicas devido a variações de microestrutura e às características do seu projeto. Para as amostras tixoconformadas a dureza foi medida nas extremidades roscadas dos corpos de prova de tração, sendo contabilizadas duas medições para cada corpo de prova.

Para as análises da dureza foi utilizado durômetro do fabricante EMCO, modelo M5C G3 do Laboratório Metalúrgico da MWM International Motores Diesel. A dureza foi medida

utilizando-se uma esfera de 5 mm de diâmetro e carga de 250kgf, conhecido também como método HB5/250.



a)



b)



c)

Fig. 3.10 a) Equipamento para ensaio de tração; b) corpo de prova usinado segundo norma DIN 50125:2004 - B6 x 30; c) detalhe do ensaio.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Determinação do diagrama de fases da liga Al-Si5-Cu3-Mg

A Figura 4.1 apresenta resultado da determinação do diagrama de fases para a liga de composição química em estudo, utilizando *software* de cálculos termodinâmicos THERMOCALC® com condições de solidificação em equilíbrio. A composição básica Al-Si é destacada em vermelho.

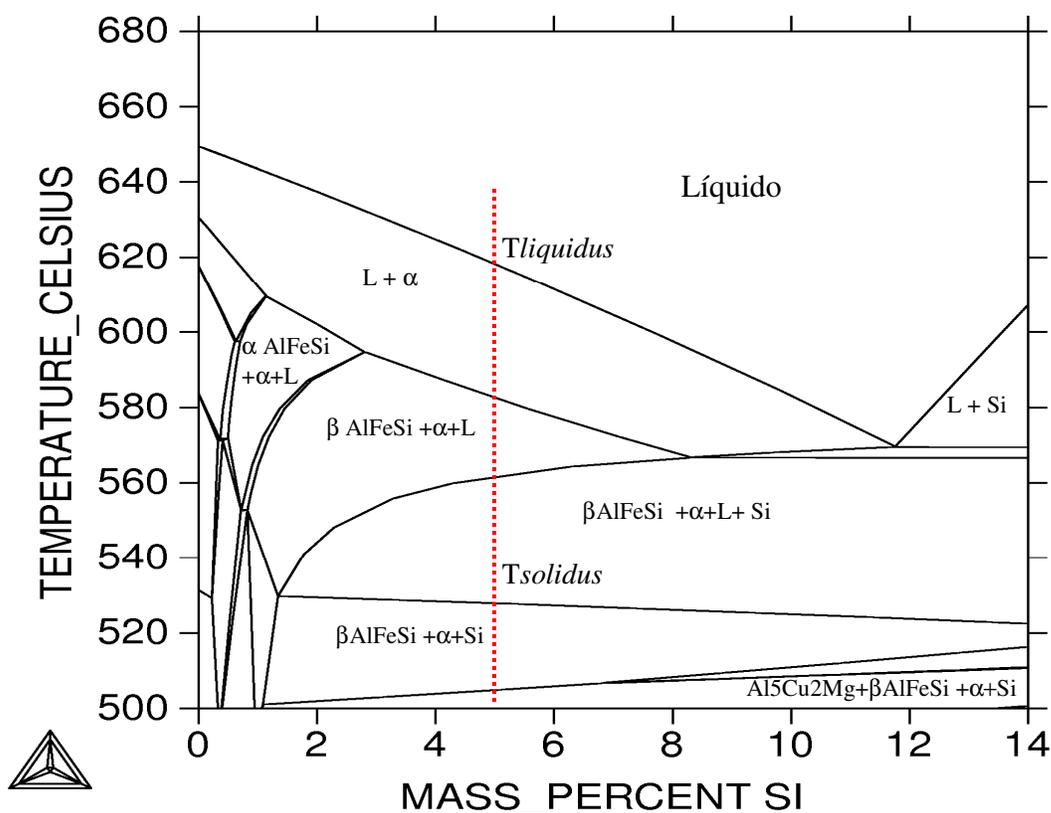


Fig. 4.1 Diagrama de fases da liga de estudo, obtida com auxílio de *software* THERMOCALC®.

O resultado obtido mostra um sistema eutético, com composição eutética a 11,8% em peso de Si. Para a composição binária Al-Si básica da liga utilizada, pode-se observar que, finda a solidificação em condições de equilíbrio, as fases previstas são a fase α , solução sólida de Al com

baixos teores de elementos de liga, Si metálico e também as fases intermetálicas $\text{Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}$ e AlFeSi . O Si está presente como eutético $\alpha + \text{Si}$ em contornos da fase primária. À temperatura ambiente, a presença do cobre deve levar também à formação do intermetálico CuAl_2 , que pode estar presente como partículas discretas ou como o eutético $\alpha + \text{CuAl}_2$.

O diagrama fornece ainda T_{solidus} e T_{liquidus} da ordem de 528°C e 619°C , respectivamente.

4.2. Avaliação da tixoconformabilidade da liga Al-Si5-Cu3-Mg

Para a avaliação da tixohabilidade ou tixoconformabilidade da liga em estudo foram determinadas as temperaturas de transformação T_{solidus} e T_{liquidus} e, portanto, o intervalo de solidificação, bem como a variação da fração sólida com a temperatura dentro deste intervalo. Para tanto foram utilizados ensaios de calorimetria diferencial exploratória (DSC) e utilizado o *software* de cálculos termodinâmicos THERMOCALC[®]. A Figura 4.2 apresenta resultados de análises térmicas da liga, por calorimetria diferencial exploratória (DSC), em ciclos de aquecimento e resfriamento a uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{min}$. Na figura são apresentadas as curvas de variação de energia/massa *vs* tempo.

Pode-se observar a presença de um pico triplo bem definido, que se repete com bastante similaridade nos dois tipos de ciclos (pico exotérmico no resfriamento e endotérmico no aquecimento). O início da transformação ocorre por volta de 500°C e o final por volta de 620°C . Como para a liga em estudo, conforme observado no diagrama de fases apresentado na Figura 4.1, há somente uma transformação importante envolvendo uma quantidade de energia detectável, qual seja, a solidificação, o pico triplo pode, portanto, ser assumido como o intervalo de solidificação. Como também observado no diagrama, há diferentes campos relacionados com formação de fases intermetálicas durante a solidificação, o que resulta na formação do pico triplo observado. Pode-se relacionar os diferentes sub-picos com os campos das transformações de líquido em fase α (à maior temperatura), à formação da fase intermetálica βAlFeSi à temperaturas intermediárias no interior do intervalo de solidificação e, a menores temperaturas no

interior do intervalo, à formação da fase Si. A Figura 4.3 apresenta os resultados sinal/massa de material vs T para os dois ciclos de aquecimento e de resfriamento, para maior clareza das temperaturas envolvidas nas transformações.

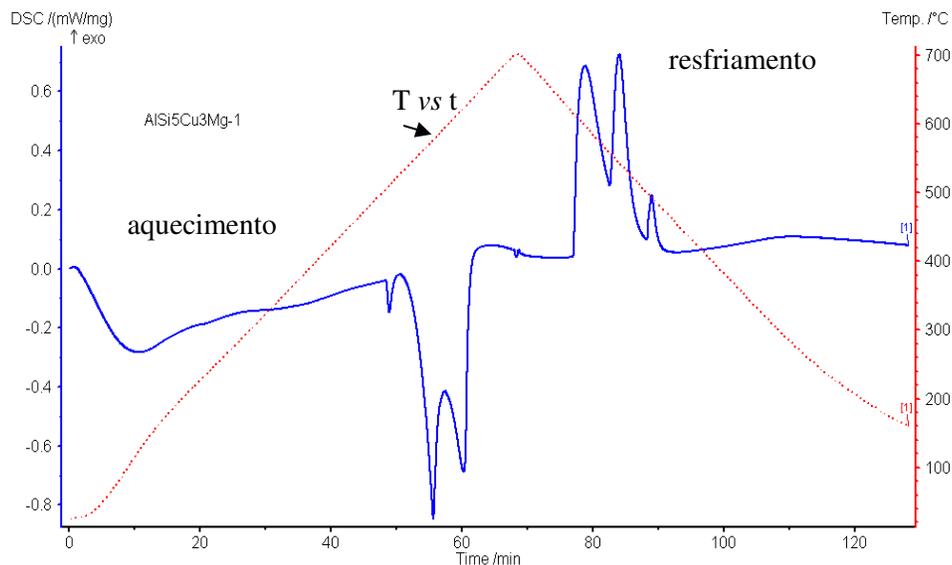


Fig. 4.2 Curvas de aquecimento e resfriamento obtidas por DSC para a liga Al-Si5-Cu3-Mg. Taxa de 10°C/min.

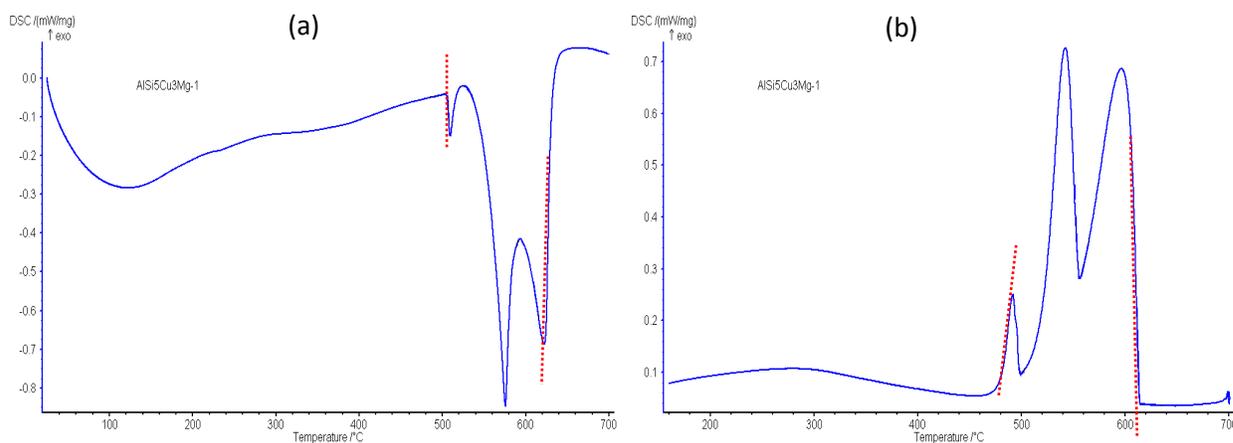


Fig.4.3 Curvas de variação do sinal elétrico/massa de material vs T em ensaios de DSC da liga Al-Si5-Cu3-Mg; a) ciclo de aquecimento, b) ciclo de resfriamento. Taxa de 10°C/min.

Pelo método das tangentes às inflexões nas curvas de análise térmica, é possível a determinação das temperaturas de início e final das transformações detectadas. Com base nos dados obtidos a partir destes ensaios, foi possível determinar as temperaturas $T_{solidus}$ e $T_{liquidus}$ da liga em estudo, apresentadas na Tabela 4.1. Um intervalo de solidificação da ordem de 100°C foi observado.

Também foi construída a curva de variação da fração líquida com a temperatura, no intervalo de solidificação, utilizando o mesmo *software* de cálculos termodinâmicos. Neste caso, para uma maior aproximação com a solidificação em condições reais, foi utilizada a condição de Scheil. A partir da curva obtida pode-se também determinar as $T_{solidus}$ ($f_l = 0\%$) e a $T_{liquidus}$ ($f_l = 1$); os valores obtidos são também apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores de $T_{liquidus}$ e $T_{solidus}$ da liga Al-Si5-Cu3-Mg obtidas através dos ensaios de DSC e através do *software* THERMOCALC[®].

Técnica	$T_{liquidus}$ (°C)	$T_{solidus}$ (°C)	Intervalo de solidificação (°C)
DSC (resfriamento, 10°C/min)	620	490	130
THERMOCALC [®] (equilíbrio)	619	528	91
THERMOCALC [®] (Scheil)	618	510	108

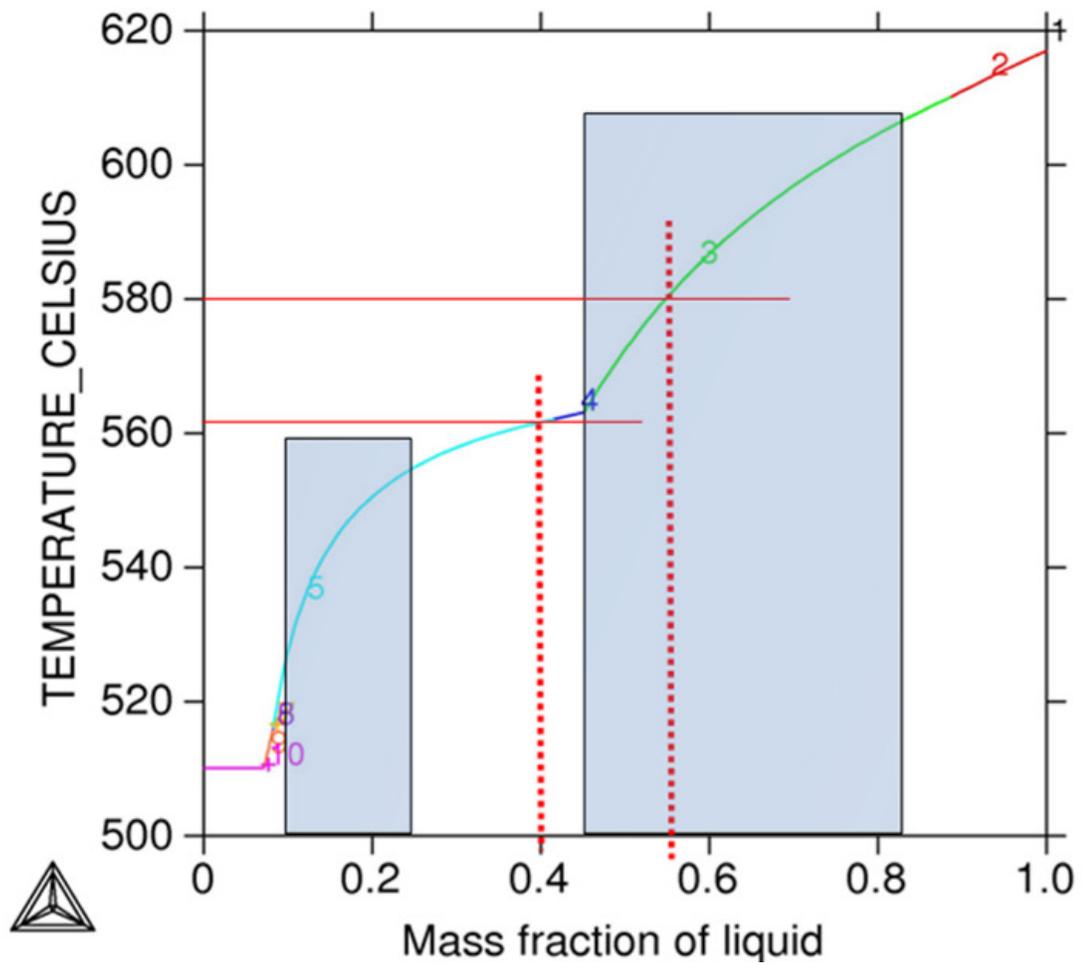
Pode-se notar discrepância entre valores obtidos pelas diferentes técnicas ou diferentes condições para uma mesma técnica, principalmente nos valores da $T_{solidus}$. Estas discrepâncias são explicadas pelas diferentes condições de solidificação consideradas; os fenômenos envolvidos nas transformações de fases em metais são fortemente dependentes de condições cinéticas, uma vez que envolvem difusão de massa. Assim, uma transformação secundária (como a formação de intermetálicos) pode não ocorrer se as condições cinéticas não forem adequadas.

Neste caso, variações nas curvas produzidas por análise térmica e nos simuladores termodinâmicos são previsíveis. Deste modo, a utilização direta na prática de parâmetros determinados por análises em condições não reais deve ser considerada cuidadosamente.

A curva de variação da fração líquida com a temperatura (f_l vs T), no intervalo de solidificação, obtida através do *software* de cálculos termodinâmicos, considerando modelo de Scheil, é apresentada na Figura 4.4. O modelo considera total difusão de soluto no líquido durante a solidificação, e difusão limitada no sólido, isto é, ausência de gradientes composicionais no líquido na frente de solidificação em qualquer momento do progresso da solidificação. Esta situação, embora não reproduza condições de um processo real de solidificação, fornece melhor aproximação do que condições de equilíbrio, nas quais são negligenciadas dificuldades de difusão tanto no sólido quanto no líquido.

Pode-se observar distintas inclinações da curva f_l vs T . Regiões com reduzidas inclinações (altos df_l/dT) indicam reduzida tixohabilidade, isto é, pouca flexibilidade de processamento no estado semi-sólido, pois pequenas variações na temperatura levam a elevadas variações na fração líquida, o que torna o processo instável e de difícil controle. Pode-se, portanto, sugerir janelas de tixoconformação, tomando intervalos em regiões de pequena variação da f_l com a temperatura. Duas janelas de tixoconformação são sugeridas na Figura 4.4: a janela para baixas frações líquidas seria indicada para processos de tixoforjamento, por exemplo, enquanto a janela para elevadas frações líquidas seria indicada para processos de tixofundição.

Na mesma figura são também sugeridas duas frações líquidas para a produção do componente de estudo: 0,40 e 0,55 (40 e 55%). As respectivas temperaturas para a obtenção de pastas tixotrópicas com estas frações líquidas são 564 e 580°C. Frações líquidas superiores podem trazer instabilidade à operação de tixoconformação, e frações inferiores podem requerer maiores forças de tixoconformação. Estas frações líquidas foram selecionadas, portanto, visando uma boa relação entre o requerimento energético para aquecimento e para a conformação e a facilidade de controle do processo.



- 1: LIQUID
- 2: FCC_A1 LIQUID
- 3: ALPHA FCC_A1 LIQUID
- 4: ALPHA FCC_A1 LIQUID SILICON
- 5: ALFESI_BETA ALPHA FCC_A1 LIQUID SILICO
- 6: AL7CU2FE ALFESI_BETA ALPHA FCC_A1 LIQ
- 7: AL7CU2FE ALPHA FCC_A1 LIQUID SILICON
- 8: AL7CU2FE FCC_A1 LIQUID SILICON
- 9: AL5CU2MG8SI6_AL7CU2FE FCC_A1 LIQUID S
- 10: AL2CU AL5CU2MG8SI6_AL7CU2FE FCC_A1 L

Fig. 4.4 Variação da fração líquida com a temperatura da liga Al-Si5- 13-Mg obtida através do *software* THERMOCALC[®] (condições de Scheil). Indicação de janelas de tixoconformação e temperaturas selecionadas para o trabalho.

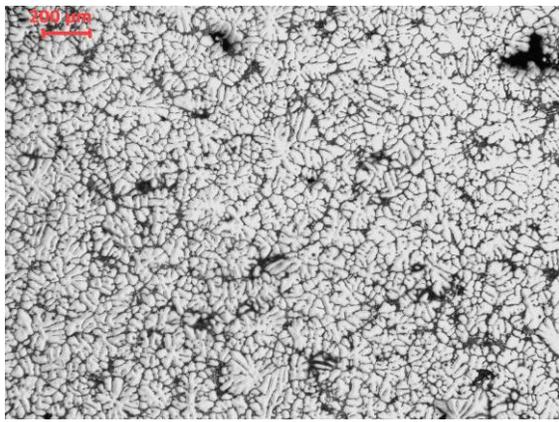
4.3. Caracterização microestrutural da liga no estado fundido sob pressão – componente comercial

Na Figura 4.5 são apresentadas microestruturas da liga Al-Si5-Cu3-Mg de amostras retiradas em diferentes regiões do componente fundido comercial. É possível notar uma estrutura constituída de dendritas de pequenas dimensões, com morfologia tendendo a equiaxial e não alongada, ou de rosetas, típicas de grãos refinados.

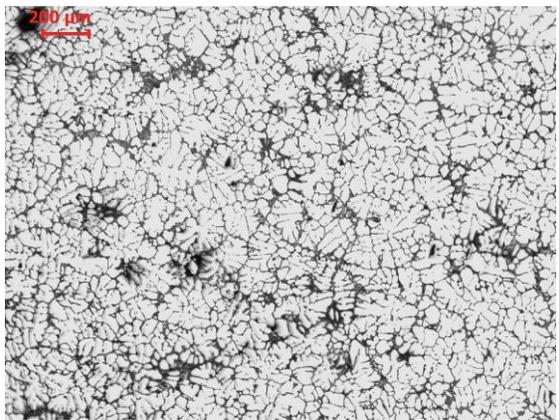
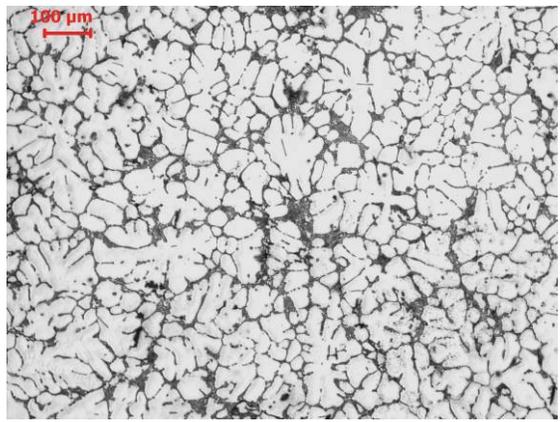
As fases presentes são a fase primária α – solução sólida de Al e elementos de liga, e eutéticos em contornos de dendritas da fase primária. A fase Si se apresenta como pequenas partículas poligonais ou com morfologia de blocos, indicando tratamento de modificação com elementos como Sr ou Na. A adição destes elementos promove a modificação da forma de crescimento dos cristais de Si, de agulhas para pequenas partículas poligonais como observado.

As dimensões de grãos podem ser visualizadas nas fotos da Figura 4.6 onde as rosetas ou dendritas equiaxiais de diferentes cores indicam distintos grãos cristalinos. Pode-se ainda observar que a estrutura do componente não é homogênea com relação às dimensões de grãos/dendritas, apresentando regiões com rosetas mais finas que em outras regiões.

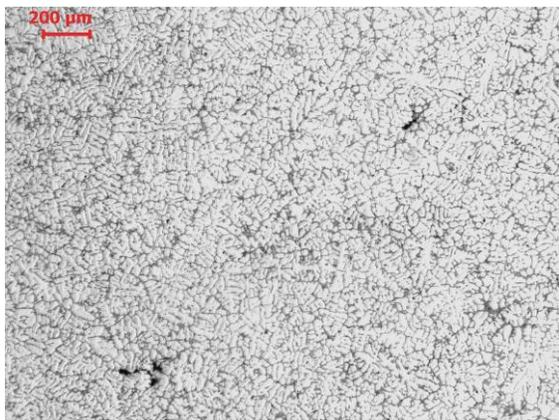
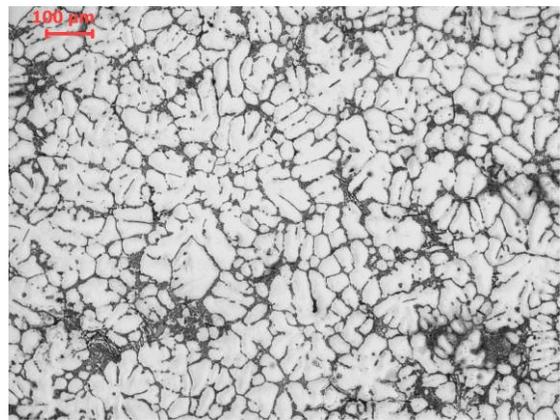
Foi observada a presença de grande quantidade de poros na microestrutura, em todas as regiões analisadas, com teores variáveis nas distintas regiões. A Figura 4.7 apresenta microestrutura típica com a presença de grande quantidade de poros, enquanto a Figura 4.8 apresenta microestruturas de diferentes regiões com os poros destacados em vermelho, com auxílio de ferramenta de análise de imagens (*software* IMAGEJ®), para melhor visualização e quantificação.



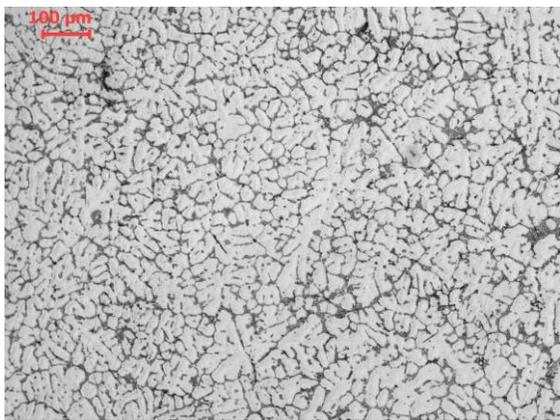
Região 1



Região 2



Região 3



(a) 50 x

(b) 100 x

Fig. 4.5 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão, para três distintas regiões do componente comercial.

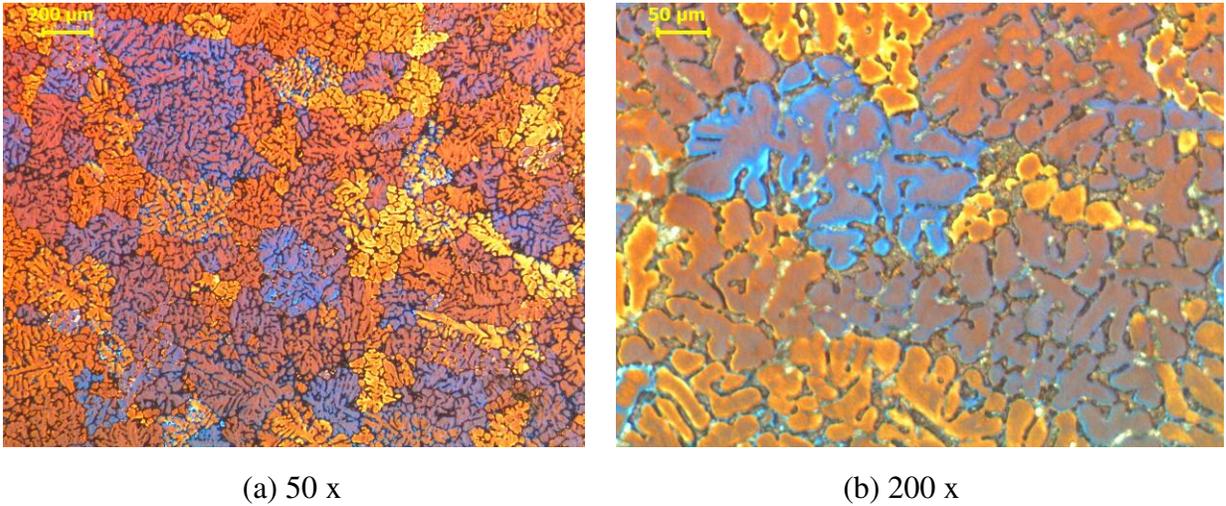


Fig. 4.6 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão; fotos sob luz polarizada para caracterização de diferentes grãos.

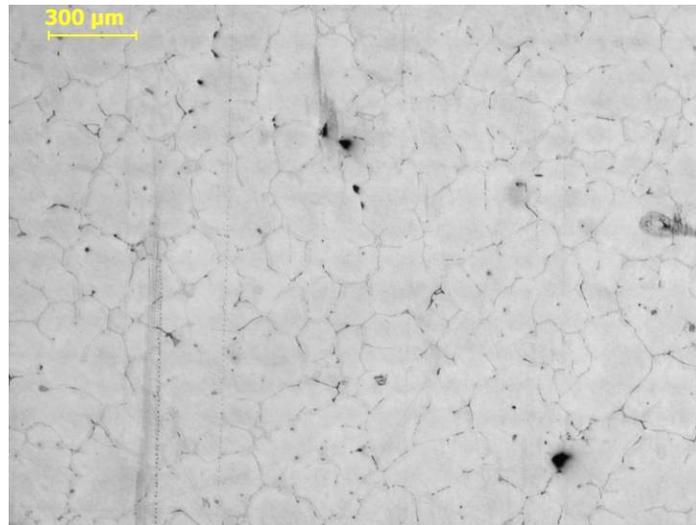


Fig. 4.7 Micrografia da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão, sem ataque. Destaque para a presença de microporos em todo o volume.

Foram quantificadas as dimensões das rosetas da fase α bem como a porcentagem relativa de poros presentes na microestrutura de três distintas regiões do componente fundido. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.2.

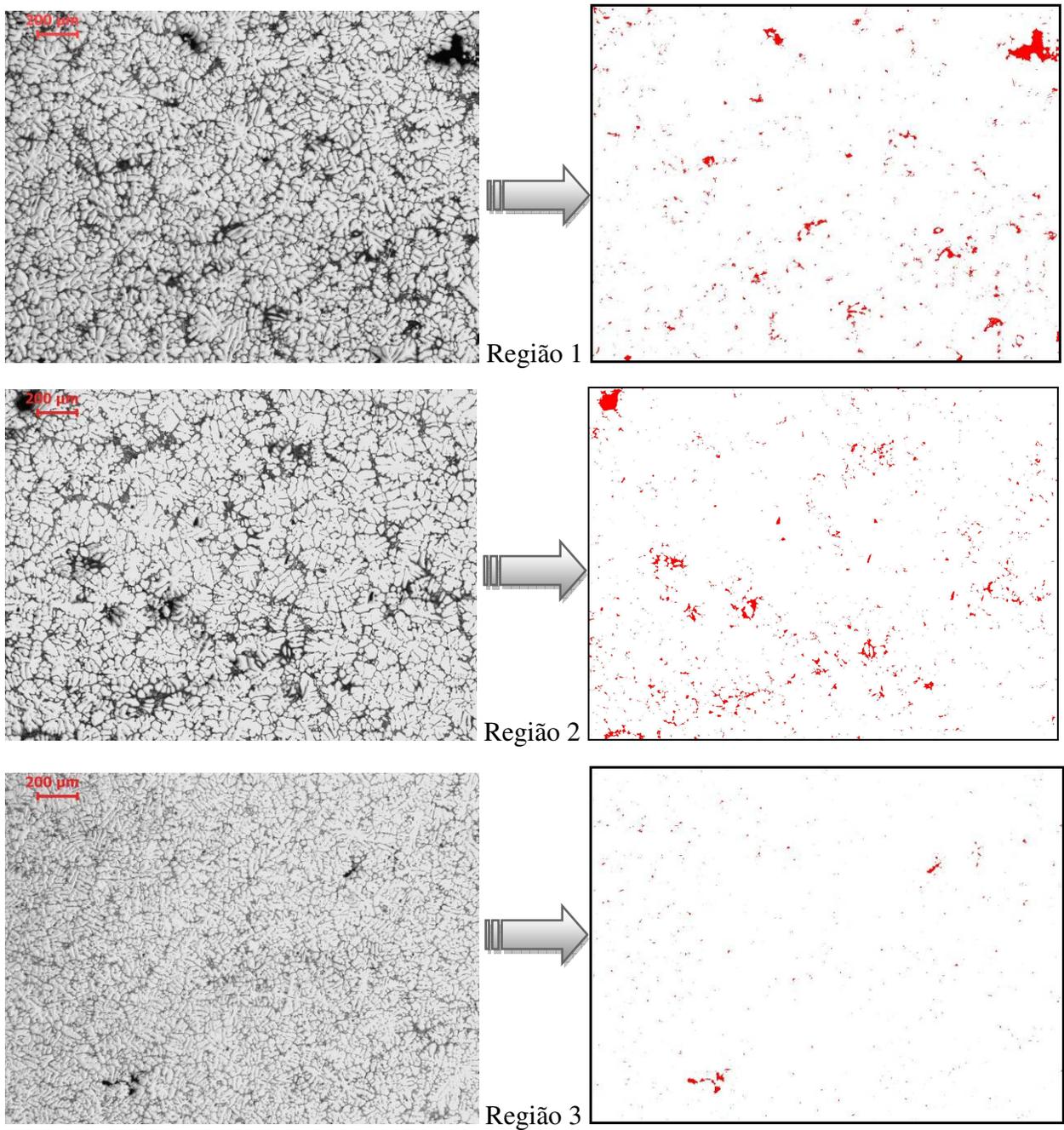


Fig. 4.8 Porosidades presentes nas regiões 1, 2 e 3 da amostra. Poros destacados em vermelho com o auxílio do *software* IMAGEJ®. 50x.

Quanto às dimensões de grãos (rosetas) foram obtidos valores de 92 a 111μm, em diferentes regiões do componente; estes valores caracterizam grãos refinados na estrutura. A

dispersão de valores é bastante elevada, principalmente devido à dificuldade de medição dada a irregular morfologia das rosetas. A obtenção de grãos refinados indica resfriamento rápido típico de processos de fundição sob pressão em matrizes metálicas.

Tabela 4.2 Valores médios de dimensões de rosetas da fase α e da porosidade em distintas regiões da estrutura do componente fundido sob pressão.

Região	Dimensão de rosetas (μm)	Porosidade (%)
1	111 ± 19	1,78
2	99 ± 13	1,51
3	92 ± 8	0,30

A estrutura apresenta elevado nível de porosidade; o excesso de poros, oriundos do processo de fundição, é bastante comum em processos de injeção, onde o líquido preenche a matriz em regime turbulento de escoamento. A presença excessiva de porosidade implica na necessidade de paredes mais robustas, de modo a não comprometer o desempenho do componente, já que poros podem representar grande risco de propagação de trincas.

4.4. Caracterização microestrutural da liga no estado fundido em coquilha, por gravidade

A Figura 4.9 apresenta típicos lingotes obtidos por fundição em lingoteiras metálicas, por gravidade, da liga Al-Si5-Cu3-Mg em estudo. As extremidades dos lingotes foram descartadas, e obtidas, por lingote, duas amostras para confecção de corpos de prova para a tixoconformação, conforme indicado na figura.

A seção transversal central do lingote foi utilizada para análise da microestrutura; os resultados são apresentados na Figura 4.10. Pode-se observar uma microestrutura dendrítica refinada; quando comparada com a microestrutura do componente fundido por injeção, pode-se constatar um maior grau de refino obtido na solidificação após refusão da liga.

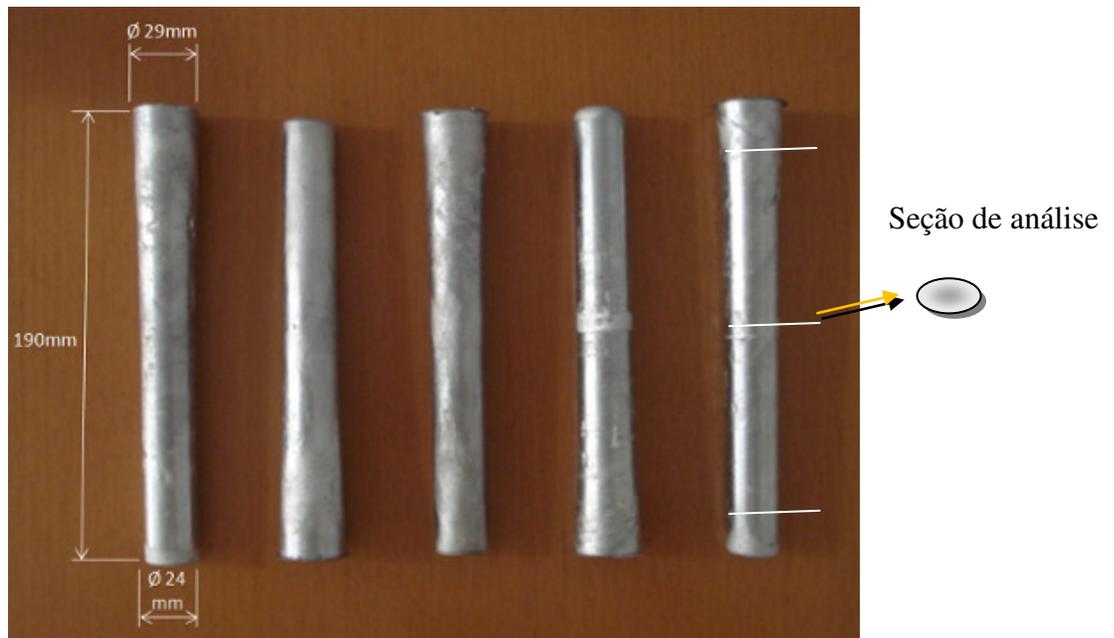


Fig. 4.9 Lingotes da liga Al-Si5-Cu3-Mg obtidos por solidificação em coquilha, por gravidade.

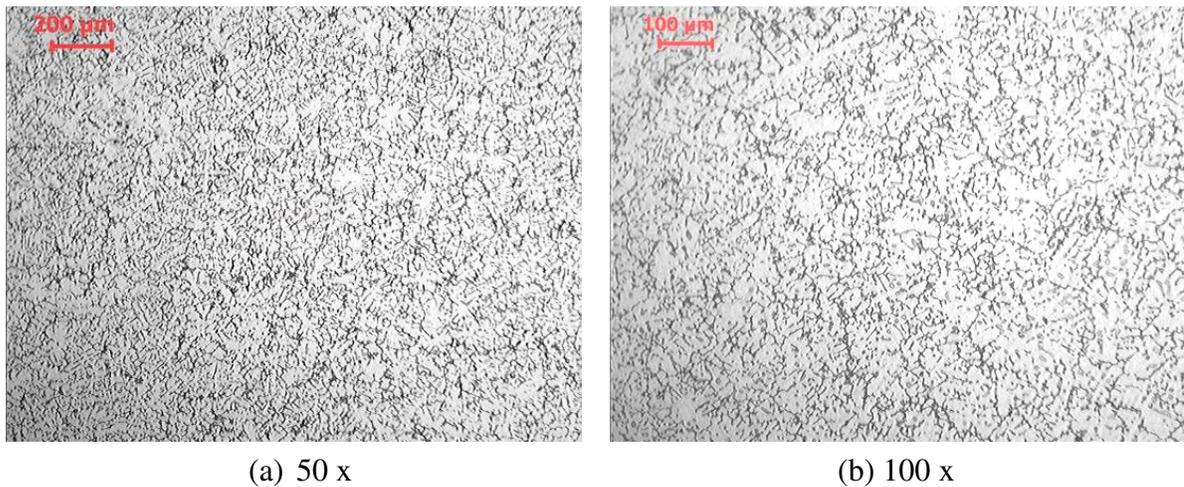


Fig. 4.10 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg solidificada em coquilha, por gravidade.

O elevado grau de refino obtido pode ser atribuído às condições utilizadas, de vazamento do líquido com baixo super-aquecimento, associado com elevada taxa de resfriamento. Estas condições permitiram uma alta taxa de nucleação inicial e reduzida taxa de crescimento dos

grãos, resultando no significativo efeito de refino observado, mesmo sem a adição de refinadores de grãos tradicionais.

É notada a presença de porosidade, que, embora não quantificada, pois o material será posteriormente processado, claramente se mostra em menores teores do que nas amostras fundidas sob pressão. De uma maneira geral, é esperada uma quantidade menor de poros em fundidos por gravidade em comparação com injetados, uma vez que são reduzidas turbulências no preenchimento de moldes, como comentado anteriormente.

As amostras solidificadas em lingoteira foram submetidas à compressão a frio para a introdução de deformação no material, objetivando a obtenção de estruturas tixotrópicas mais refinadas. Segundo ROBERT (1993) a deformação na estrutura leva à produção de glóbulos refinados e pouco aglomerados devido à atuação de mecanismos de recristalização e separação de grãos recristalizados para o interior do líquido, onde constituem os glóbulos da pasta.

A compressão foi feita no sentido do diâmetro (deformação real de 30%); as amostras obtidas são apresentadas na Figura 4.11. Na mesma figura é apresentada a microestrutura do produto deformado. Pode-se observar o alongamento da estrutura na direção da deformação.

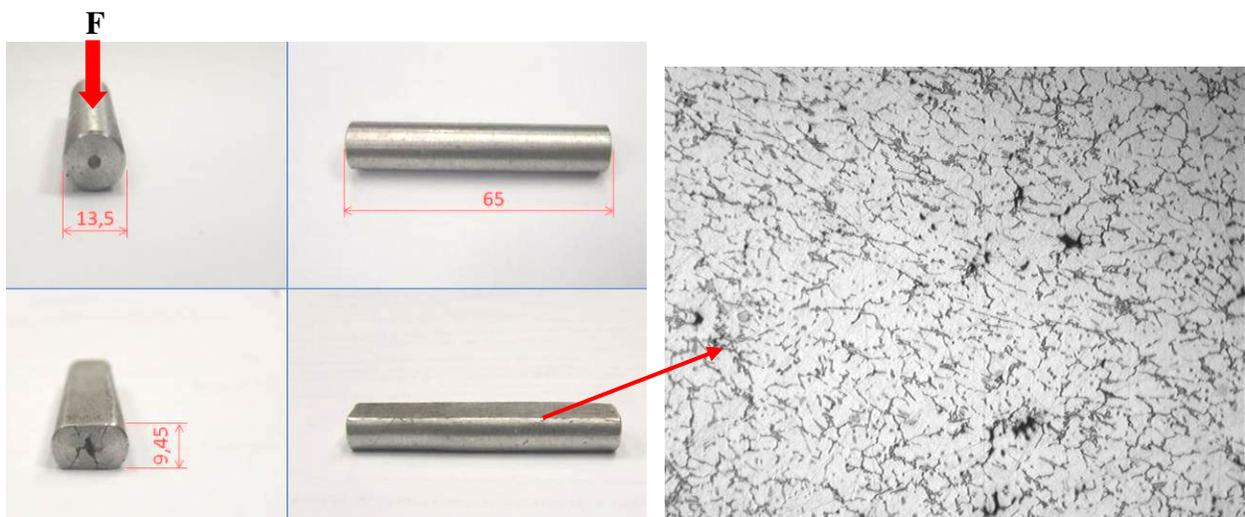


Fig. 4.11 Amostras da liga Al-Si5-Cu3-Mg submetidas à deformação por compressão e microestrutura resultante (100 x).

4.5. Produtos tixoconformados

Para validação do processo de tixoforjamento a ser empregado, e utilizando a matriz projetada e construída, foram realizados testes preliminares a fim de se conhecer o comportamento de escoamento do material no interior da matriz. Para tanto, a amostra fundida ou fundida + deformada foi posicionada na respectiva cavidade da matriz, e este conjunto foi aquecido às temperaturas de tixoconformação pré-definidas (564 e 580°C). Os primeiros resultados não foram bem sucedidos, obtendo-se produtos tixoconformados de qualidade inaceitável, com falhas de preenchimento, como pode ser observado na Figura 4.12.

Os ângulos de entrada existentes nos contornos da cavidade da matriz que tinham o objetivo de facilitar o escoamento do material para dentro da mesma não foram suficientes, ocasionando o acúmulo de material na parte superior da matriz e conseqüente falta de preenchimento de material na cavidade.

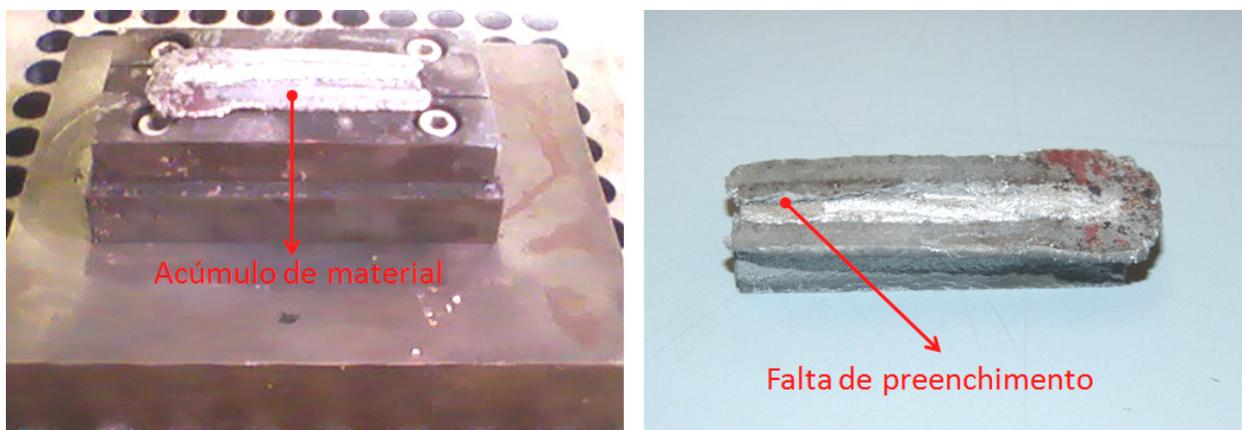


Fig. 4.12 Resultado de testes preliminares de tixoconformação, mostrando produto com falta de preenchimento da cavidade da matriz.

A partir de tal resultado foi necessária a alteração da geometria da matriz, com o aumento do chanfro de entrada da cavidade a fim de melhorar o escoamento do material para o interior da mesma. Com esta ação, o problema foi solucionado obtendo-se um produto de boa qualidade.

Conforme descrito por LOURENÇATO (2008) em seu trabalho, a velocidade de prensagem do material para o interior da cavidade da matriz é um importante fator a ser controlado, uma vez que o material no estado semi-sólido estabelece um patamar de nível de tensão (força/área) baixa e constante por um curto período de tempo. Esse patamar indica a necessidade de se executar o processo de tixoformagem da forma mais rápida possível, aproveitando ao máximo a característica tixotrópica do material semi-sólido. Durante os ensaios notou-se que a velocidade de prensagem do equipamento utilizado foi satisfatória, uma vez que a velocidade de deslocamento da mesma foi constante e na ordem de 5,5 mm/s.

A partir do processo estabilizado e controlado, foram fabricados produtos tixoconformados nas diferentes condições de matéria prima inicial, temperatura, tempo de globularização e fração sólida, pré-estabelecidas e descritas na Tabela 3.2.

A Figura 4.13 apresenta resultados típicos obtidos. É possível observar que o material apresentou uma boa condição de tixoconformabilidade, preenchendo totalmente a matriz e reproduzindo as dimensões da cavidade. As rebarbas observadas atestam a alta formabilidade da matéria no estado pastoso; a elevada fluidez do material tixotrópico permitiu o total preenchimento do molde e a reprodução de arestas e ângulos que seriam de difícil ou impossível reprodução numa conformação convencional no estado sólido.

4.5.1. Caracterização microestrutural da liga tixoconformada

São apresentadas nas Figuras de 4.14 a 4.17 as micrografias dos produtos tixoconformados obtidos para cada condição de processamento. Pode-se observar em todos os casos, independente da condição de tratamento utilizada e da matéria prima inicial, estrutura globular típica de pastas tixotrópicas. A fase primária se apresenta com morfologia globular e as fases secundárias (eutéticos α +Si e α +CuAl₂) em contornos de glóbulos. Os eutéticos são formados nos últimos estágios da solidificação, isto é, no resfriamento final da pasta; pode ser assumido, portanto, que a quantidade de líquido presente à temperatura de tixoconformação é aproximadamente o teor de eutético observado na estrutura resfriada rapidamente a partir de esta

temperatura. Não são observados intermetálicos grosseiros na estrutura, provavelmente devido à sua dissolução durante o tratamento de globularização.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 4.13 Amostras típicas obtidas por tixoconformação da liga Al-Si5-Cu3-Mg: (a) amostra no interior da cavidade do molde, (b), (c) e (d) diferentes vistas do corpo de prova.

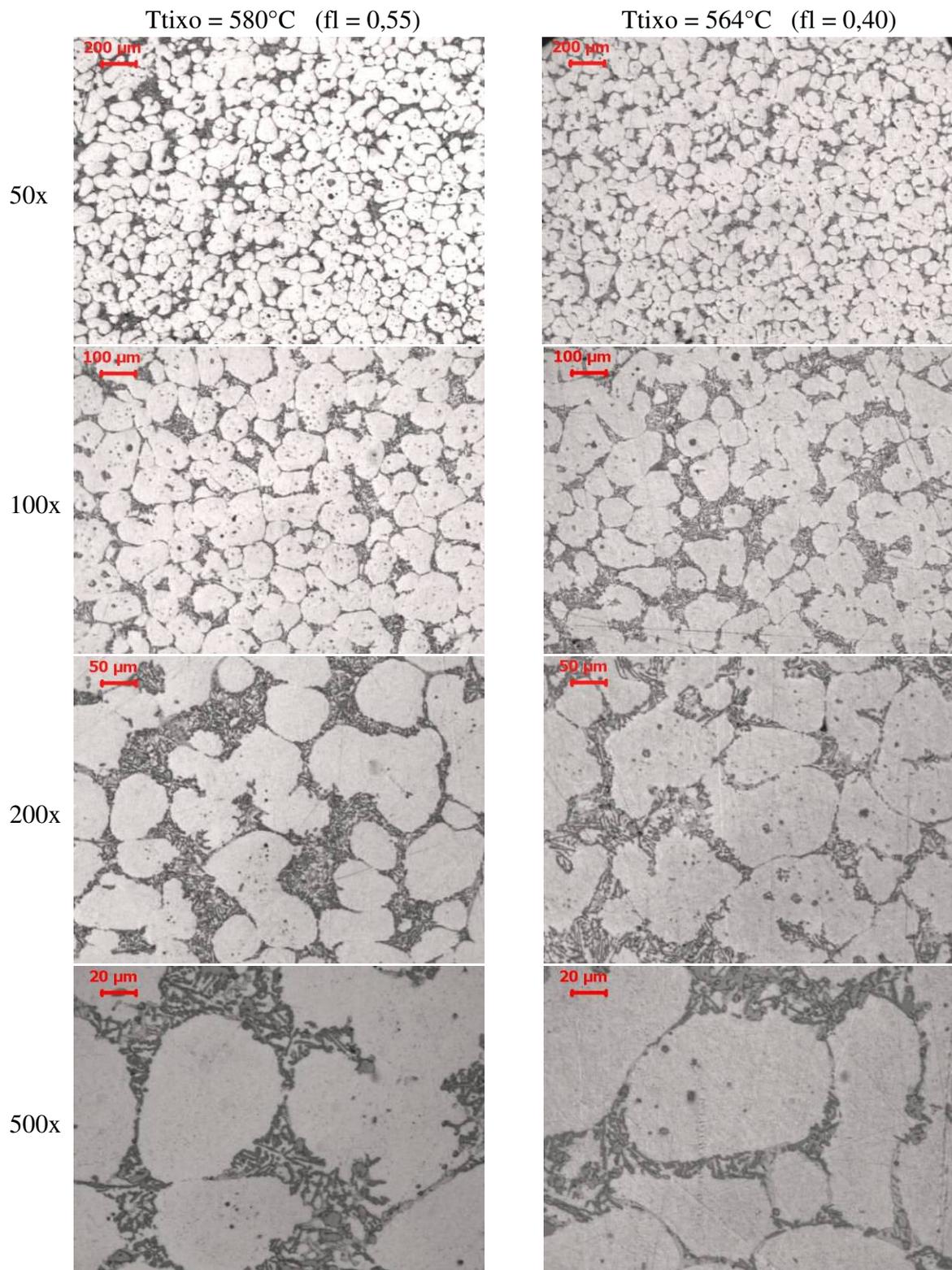


Fig. 4.14 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material fundido. Tempo de globularização: 120s.

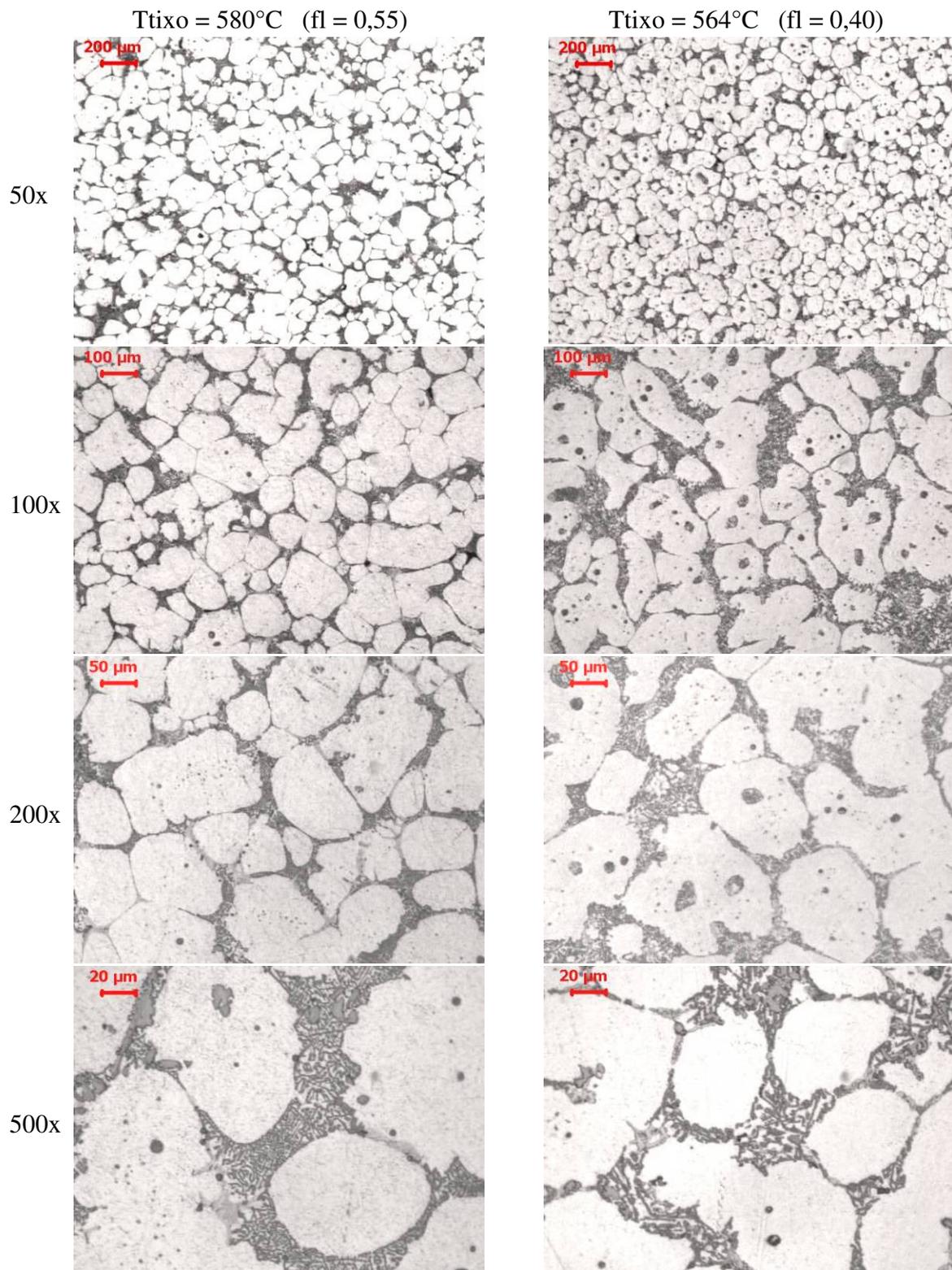


Fig. 4.15 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material fundido. Tempo de globularização: 300s.

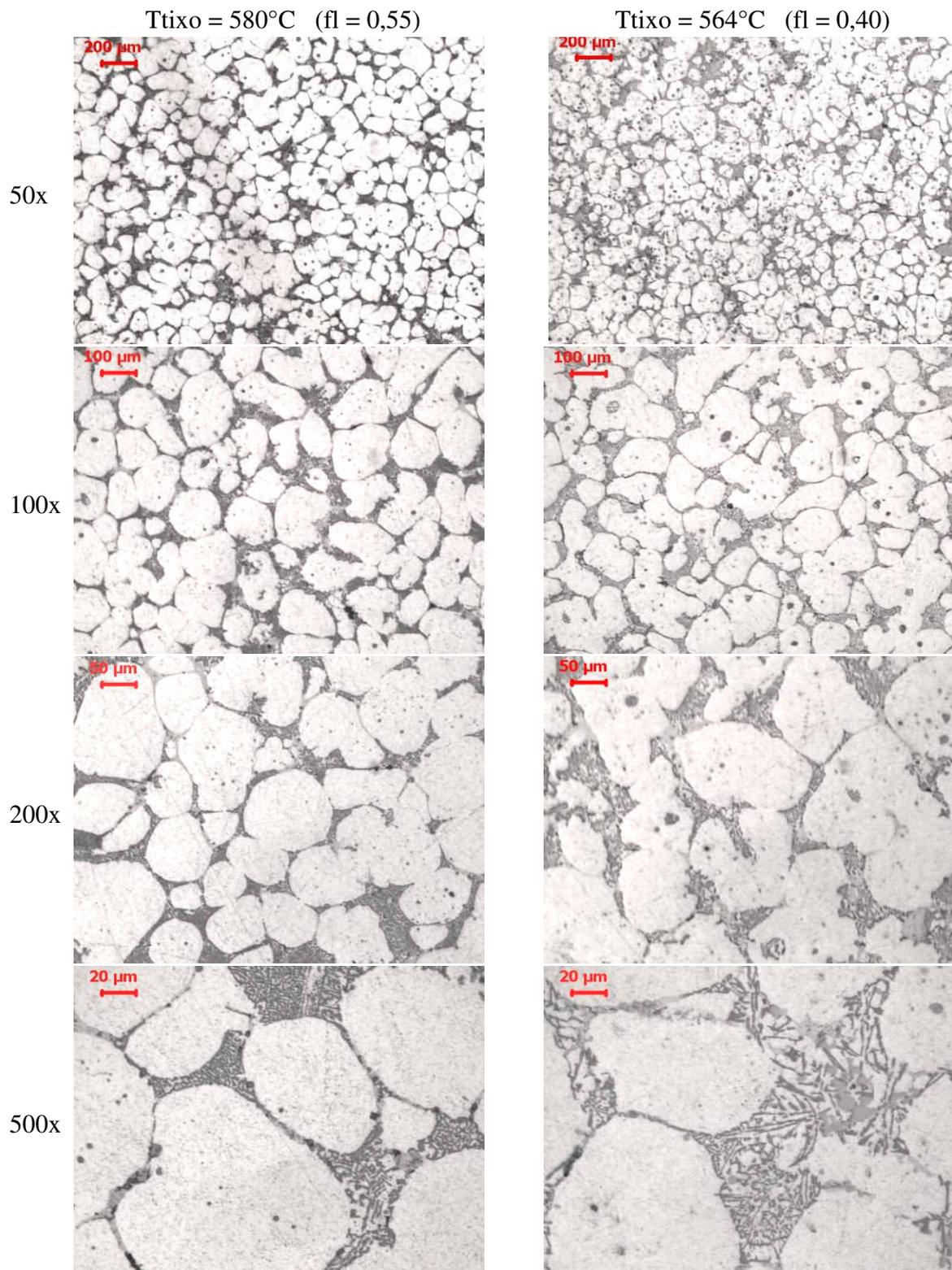


Fig. 4.16 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material deformado. Tempo de globularização: 120s.

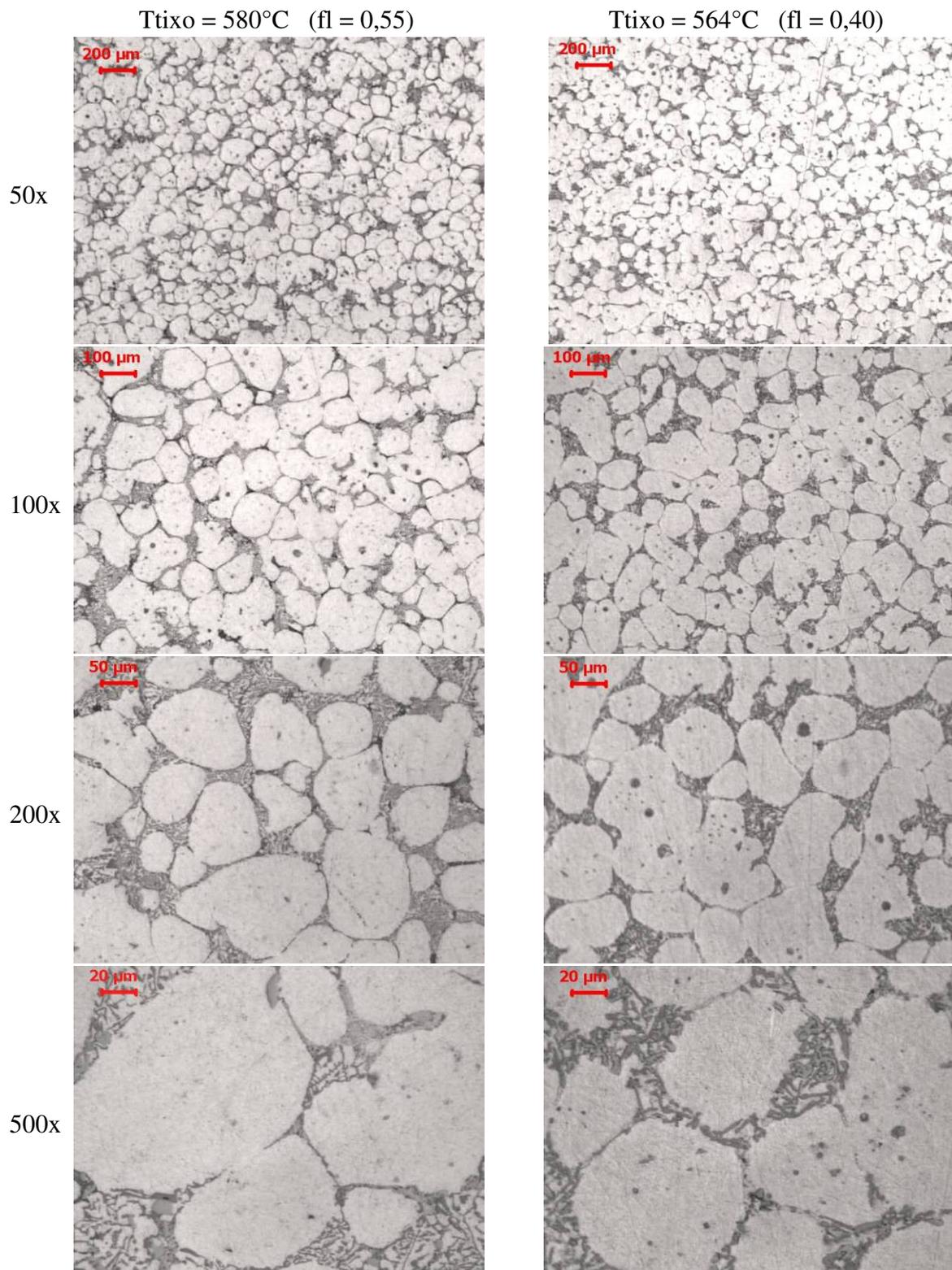


Fig. 4.17 Micrografias da liga Al-Si5-Cu3-Mg tixoconformada em diferentes temperaturas, a partir de material deformado. Tempo de globularização: 300s.

A análise qualitativa das microestruturas obtidas não permite visualizar diferenças significativas entre elas, em função dos diferentes parâmetros de tratamento térmico empregados para a globularização da fase primária. Comparando as diferentes figuras apresentadas, pode-se apenas notar certa tendência à obtenção de glóbulos mais esféricos e regulares quando é utilizada maior temperatura de tratamento (maior fração líquida). Menores frações líquidas tendem a fornecer glóbulos mais irregulares.

Observando-se as microestruturas obtidas a partir de material fundido (microestrutura de rosetas), apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15, pode-se notar que a redução da temperatura de tratamento (redução da fração líquida) tende a fornecer glóbulos menos esféricos e com a presença de poças de eutéticos em seu interior.

A formação da estrutura globular é neste caso promovida por mecanismos de engrossamento das rosetas da estrutura original, envoltas pela fase líquida formada pela fusão de fases secundárias (e também uma certa porcentagem da fase primária), durante o aquecimento e manutenção à $T > T_{solidus}$. Estes mecanismos são motivados pela necessidade de redução de energias de superfície no sistema, levando à formação de partículas sólidas esféricas no meio líquido.

O engrossamento de rosetas ocorre por fenômenos de difusão atômica entre paredes adjacentes de ramos vizinhos e também por difusão de um glóbulo a outro através da fase líquida. No primeiro caso, pode haver o aprisionamento de líquido com alto teor de elementos de liga, entre os ramos coalescidos, resultando na presença de poças de fase eutética no interior do glóbulo final, como pode ser observado nas microestruturas obtidas a partir de tratamentos à menor temperatura. Este fenômeno ocorre com mais frequência quando elevadas frações sólidas estão presentes (ROBERT, 1993).

As microestruturas obtidas a partir de material submetido à deformação (microestrutura refinada e deformada), apresentadas nas Figuras 4.16 e 4.17, são bastante semelhantes às produzidas a partir de material fundido. Também aqui pode-se notar que a coalescência de

glóbulos da fase primária pode levar à obtenção de glóbulos mais irregulares, quando mais altas frações sólidas estão presentes.

A formação da estrutura globular a partir de estruturas deformadas ocorre por mecanismos diversos: neste caso, durante aquecimento há recristalização de novos grãos no interior da estrutura deformada e formação de líquido pela fusão de fases eutéticas nos contornos originais da estrutura. Se a condição $\sigma_{cg} \geq 2\sigma_{sl}$ (onde σ_{cg} = energia do contorno de grão recristalizado e σ_{sl} = tensão superficial sólido/líquido) for cumprida, o líquido pode penetrar nos contornos de grãos recristalizados (que são equiaxiais), separando-os para o meio líquido, onde se constituem os glóbulos da pasta tixotrópica. Neste caso, grãos de menores dimensões, mais esféricos e com menor grau de interconexão espacial são obtidos (MOTEGI, 2002).

A partir das estruturas obtidas foram determinados os parâmetros: teor provável de líquido no material semi-sólido no momento de tixoconformação, as dimensões dos glóbulos da fase primária e o teor de porosidade no produto tixoconformado. Os resultados são apresentados na Tabela 4.3.

Os elevados valores do desvio padrão para a medida de dimensões de glóbulos da fase primária demonstram a sua heterogeneidade, estes valores são, no entanto, característicos de pastas tixotrópicas. Pode ser notado que, de modo geral, a presença de deformação no material previamente ao tratamento de globularização promoveu apenas uma tendência à redução das dimensões dos glóbulos da fase primária. Maiores graus de deformação poderiam resultar em glóbulos mais refinados, ao proporcionar maior taxa de nucleação de grãos recristalizados. Deve-se ainda lembrar que a matéria prima no estado apenas fundido apresentava estrutura de rosetas, o que também leva à produção de glóbulos finos na pasta final, por requerer menor número de estágios de globularização.

Quanto ao efeito da temperatura de tratamento nas dimensões dos glóbulos da pasta tixotrópica, pode-se observar também apenas tendência ao aumento das dimensões com a redução da temperatura de tratamento, isto é, com o aumento da fração sólida na pasta, para o caso de

pastas produzidas sem a presença do fenômeno de recristalização. A maior fração sólida permite uma maior aproximação de glóbulos e, portanto, maior probabilidade de atuação de mecanismos de coalescência que levam ao aumento das dimensões das partículas.

Tabela 4.3 Parâmetros estruturais da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixotomado.

Condições de obtenção da pasta tixotrópica			Parâmetros estruturais medidos		
Estado inicial da liga	T _{tixo} / fl	Tempo de tratamento (s)	Diâmetro do glóbulo (µm)	Porosidade (%)	fl
Fundido	580°C fl = 0,55	120	98 ± 19	0,02	24
		300	107 ± 26	0,03	20
	564°C fl = 0,40	120	135 ± 17	0,11	21
		300	133 ± 22	0,10	23
Fundido + deformado a frio (30%)	580°C fl = 0,55	120	106 ± 17	0,03	24
		300	122 ± 18	0,17	28
	564°C fl = 0,40	120	95 ± 10	0,09	30
		300	109 ± 14	0,04	23

Também se observa apenas tendência de aumento do tamanho de glóbulos com o aumento do tempo de tratamento, na maioria dos casos; é de se considerar que ambos os tempos utilizados são pequenos, para justamente prevenir o excessivo crescimento dos glóbulos.

Quanto à fração líquida presente, podem ser observados valores da ordem de 0,20 a 0,30, inferiores aos previstos pela simulação da relação fl x T calculada pelo *software* de cálculos termodinâmicos utilizado. Deve-se lembrar que para a simulação são consideradas condições de contorno bem distintas das condições práticas: embora tenha sido utilizado o modelo de solidificação de Scheil, este ainda promove resultados distantes dos obtidos na prática. Portanto,

estes cálculos simulados devem ser utilizados com o devido cuidado em condições reais. Não foi possível observar efeito das condições de tratamento nas frações líquidas obtidas para diferentes temperaturas de tratamento. Uma maior diferença entre as temperaturas de tratamento tornariam mais sensível a variação da fração líquida com a temperatura. No entanto, como discutido no item 4.2, a faixa de tixoconformação é restrita por requisitos de facilidade de controle de processo e custo energético.

Quanto ao grau de porosidade obtido, de modo geral pode-se observar níveis bem inferiores aos detectados na amostra do componente fundido sob pressão. No caso do material tixoconformado a porosidade média obtida é de 0,07%, enquanto o material comercial fundido sob pressão apresenta porosidade média da ordem de 1,20%, isto é, cerca de 17x maior.

Não é possível observar a influência de parâmetros de tratamento, no nível de porosidade obtida no produto tixoconformado. Eventuais diferenças de porosidade na pasta tixotrópica são anuladas no processo de tixoconformação. Este comportamento é esperado também na tixoconformação por injeção: o preenchimento não turbulento do molde, sem aprisionamento de ar e a reduzida contração de solidificação do material semi-sólido proporcionam estruturas finais fundidas com menores níveis de porosidades (ATKINSON, 2005).

4.5.2. Análises estatísticas da microestrutura da liga tixoconformada

Foi feita uma análise estatística para a avaliação da influência dos parâmetros de processo de obtenção de pastas tixotrópicas na dimensão de glóbulos do produto tixoconformado, bem como suas possíveis interações. Esta verificação estatística foi elaborada através das análises dos gráficos de efeitos principais, bem como do gráfico de interações para cada fator com o auxílio do *software* MINITAB®15, conforme procedimento previamente descrito no item 3.7.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 são apresentados os gráficos de efeitos principais e os gráficos de interações, respectivamente, correlacionando as variáveis temperatura, tempo de tratamento

térmico para a globularização da estrutura, e condição inicial da matéria prima (fundida ou fundida + deformada) com a variável de resposta diâmetro dos glóbulos.

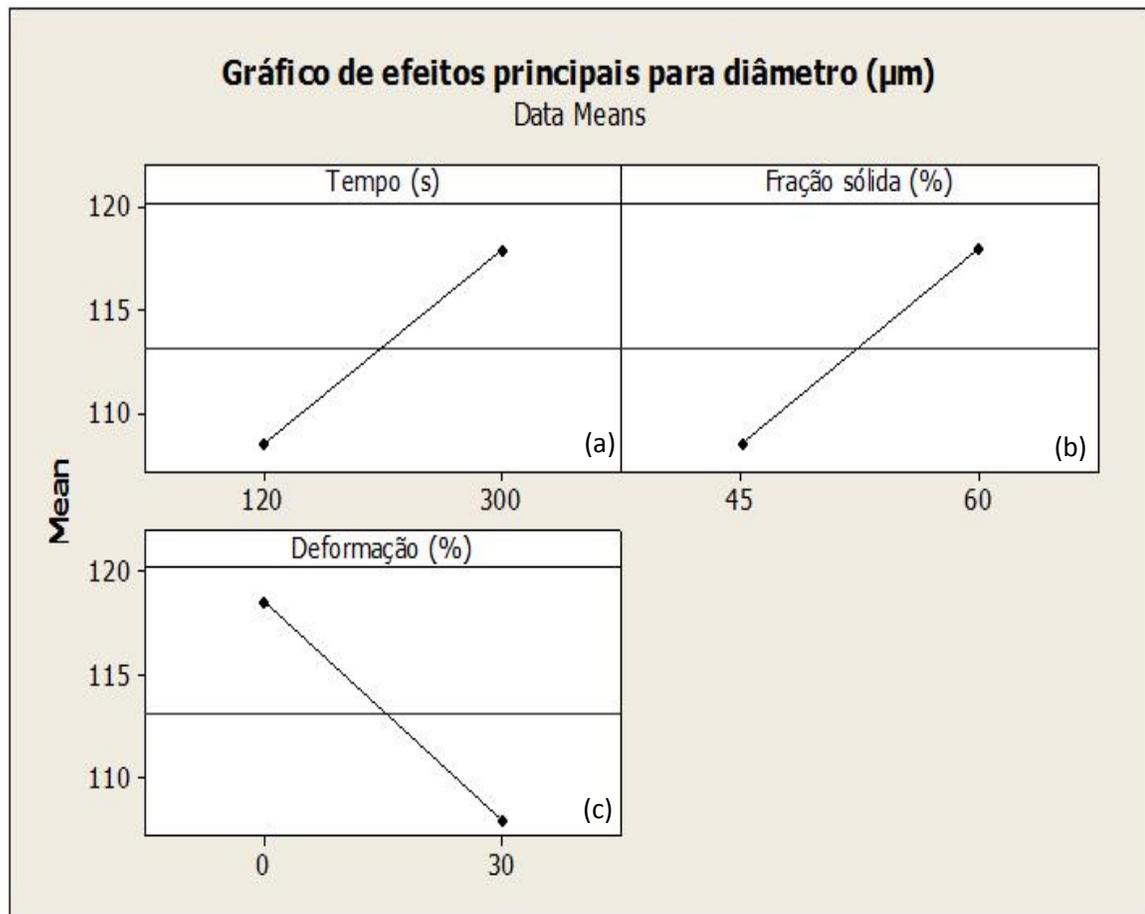


Fig. 4.18 Gráfico de efeitos principais para a variável resposta diâmetro dos glóbulos, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixotomado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.

Na Figura 4.18 pode-se observar, em (a), que o aumento do tempo de tratamento para a globularização resulta em aumento das dimensões dos glóbulos na estrutura tixotrópica, promovido por mecanismos de coalescência de glóbulos conforme discutido anteriormente, promovidos por difusão de massa e movidos pela necessidade de redução de área (superfícies sólido/líquido).

Quanto à influência da temperatura de tratamento, aqui indicada como fração sólida da pasta ($f_s = 1 - f_l$), pode-se observar na Figura 4.18 (b), o aumento dos diâmetros médios dos glóbulos com o aumento desta variável. Comportamento similar foi também encontrado por BENATI, 2008, e pode ser atribuído a maior facilidade de ocorrência de mecanismos de crescimento quando o teor de fase sólida é elevado e, portanto maior é a proximidade dos glóbulos.

Com relação à influência da presença de deformação prévia no material, pode-se observar na Figura 4.18 (c), que esta resulta em menores diâmetros de glóbulos devido à recristalização e formação de novos e equiaxiais grãos que constituem os glóbulos na pasta tixotrópica. Desta forma, uma amostra deformada necessitaria de um maior tempo de manutenção à T_{tixo} para proporcionar um crescimento de grão similar à uma amostra sem deformação. ROBERT, 1989 observou a formação de estruturas mais perfeitamente globulares e de diâmetros menores quando utilizada matéria prima deformada, comparadas a estruturas obtidas a partir de matéria prima fundida, sem deformação prévia.

Figura 4.19 apresenta as interações: (a) tempo *vs* fração sólida; (b) tempo *vs* deformação e (c) fração sólida *vs* deformação. Pode-se observar em (a) que o diâmetro de glóbulos aumenta com o aumento da fração sólida (ou redução da temperatura de tratamento), para ambos os tempos de tratamento empregados, indicando que as duas variáveis tempo e fração sólida operam no mesmo sentido, favorecendo o crescimento dos glóbulos. As influências destes parâmetros são, portanto, somadas. Deve-se lembrar que o aumento do tempo de tratamento e da fração sólida são estimulantes de mecanismos de crescimento das partículas da fase sólida presentes no material semi-sólido.

A interação entre as variáveis tempo de tratamento e deformação, apresentada em (b), mostra a redução de dimensões dos glóbulos com o aumento da deformação, para ambos os tempos de tratamento. A inclinação da reta é, no entanto, menor para tempos de tratamento mais elevados, indicando que esta variável (tempo) pode, para valores muito altos, se sobrepor à influência do efeito da deformação. Estas indicações estão de acordo com os fenômenos

envolvidos na formação da estrutura: a deformação promove o refino de glóbulos, mas o elevado tempo de tratamento pode levar ao seu excessivo crescimento, já que a cinética de difusão é maior para estruturas mais refinadas.

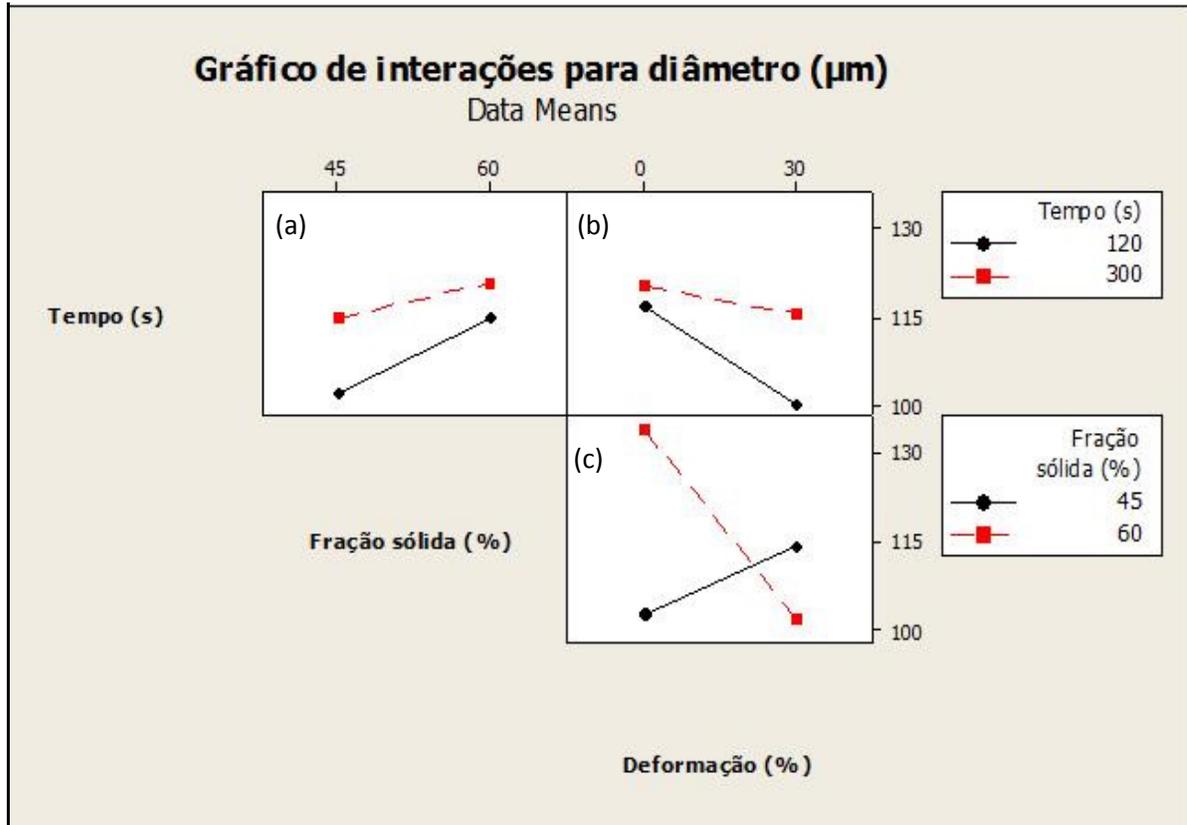


Fig. 4.19 Gráfico de interações para variável resposta diâmetro dos glóbulos, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixotomado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fs vs deformação.

A interação entre as variáveis fração sólida (temperatura de tratamento) e deformação, apresentada em (c), mostra efeitos opostos das duas variáveis: enquanto o aumento da deformação leva à redução das dimensões dos glóbulos, por promover maior recristalização, o aumento da fração sólida leva ao aumento dos glóbulos pela facilidade de coalescência entre glóbulos mais próximos. Assim, as duas variáveis são concorrentes na promoção de glóbulos de pequenas dimensões, geralmente requeridos para um adequado comportamento de escoamento.

Com relação à porosidade, os valores obtidos em estruturas produzidas em diferentes condições são muito semelhantes, indicando portanto, de maneira geral, pouca influência das variáveis de processo analisadas, em sua formação. Além disso, deve-se levar em conta que a porosidade presente no produto tixoconformado pode não corresponder à porosidade presente na pasta, uma vez que o material foi submetido à solidificação sob compressão, o que facilita o colapso de poros, principalmente de vazios de contração. Sendo assim, não foi considerada pertinente a análise estatística da influência de parâmetros de processo de fabricação de pastas na porosidade do produto final tixoconformado.

No caso de fração sólida presente nas pastas tixotrópicas e correspondente fração de fase secundária interglobular no produto tixoconformado, pode-se observar na Figura 4.20 e levando em conta a pouca variação entre os valores de f_l medidos, que existe pouca influência do tempo de tratamento neste parâmetro. A tendência esperada seria um leve aumento da fração líquida com o tempo, principalmente para as menores temperaturas de tratamento, uma vez que o equilíbrio termodinâmico de fases (sólido + líquido) não é atingido imediatamente. Quanto à influência da deformação prévia, pode-se notar que o aumento desta variável tende ao aumento da fração líquida na pasta, provavelmente por acelerar as transformações e possibilitar a ocorrência de equilíbrio mais rapidamente. No entanto, não se nota interação forte entre os parâmetros tempo e deformação, na fração líquida presente na pasta, conforme pode ser observado na Figura 4.21. Entretanto, os reduzidos tempos de tratamento envolvidos não permitem uma conclusão clara a respeito da sua influência na obtenção de equilíbrio das quantidades relativas de fases presentes na pasta tixotrópica.

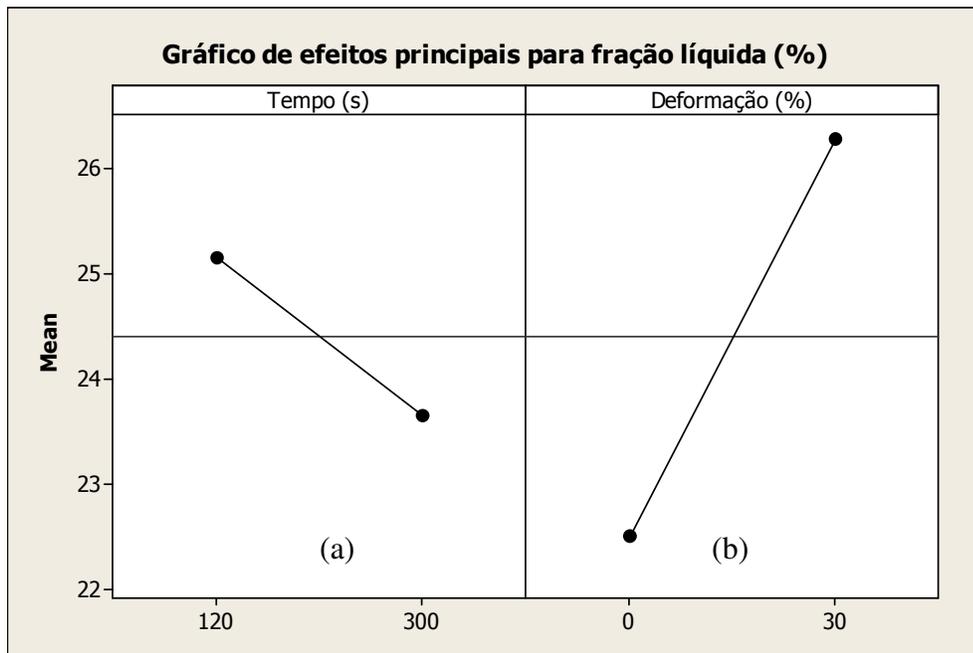


Fig. 4.20 Gráfico de efeitos principais para a variável resposta fração líquida, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixocromado: (a) tempo; (b) condição inicial.

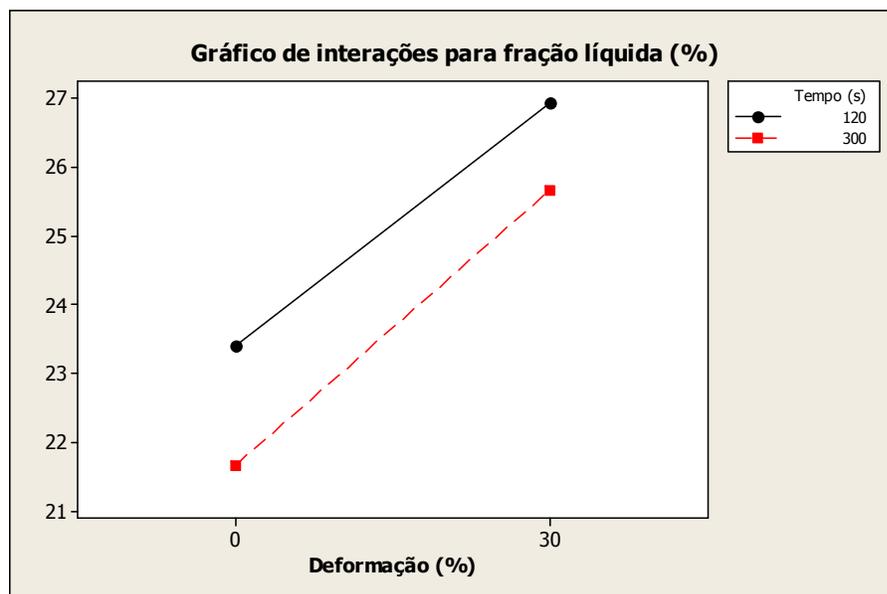


Fig. 4.21 Gráfico de interações para a variável resposta fração líquida, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, na microestrutura de liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixocromado: tempo vs deformação.

4.6. Análise de propriedades mecânicas da liga nos estados fundido e tixoconformado

Neste item são apresentados resultados de testes mecânicos em tração e dureza, de amostras retiradas do componente comercial fundido sobre pressão e de amostras produzidas por tixoconformação, e a sua comparação, visando a análise da possibilidade e pertinência da utilização de tixoconformação para a fabricação do citado componente.

4.6.1. Propriedades mecânicas no estado fundido

O suporte de acessórios em sua condição inicial de estudo, ou seja, fundido sob pressão apresenta os valores de propriedades mecânicas relacionados na Tabela 4.4. Foram analisadas 4 distintas regiões para dois diferentes componentes, A e B.

Tabela 4.4 Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sobre pressão
(componente comercial)

Componente	Região	σ_{\max} (N/mm ²)	ϵ (%)	Dureza (HB10)
A	1	188	0,9	93
	2	192	1,9	94
	3	190	2,0	94
	4	190	1,9	95
B	1	183	2,0	88
	6	184	3,0	62
	7	162	2,9	75
	8	155	2,4	81

Nota-se de uma maneira geral que, nos ensaios de tração, os resultados de tensão máxima (σ_{\max}) se mostram com valores bastante dispersos (cerca de 20% de diferença entre o menor e o maior valor) para os diferentes corpos de prova, dependente da região da amostra onde os

mesmos foram retirados. Porém cabe salientar que, com exceção de uma amostra (uma região), todas as demais atenderam o valor de σ_{max} especificado pela companhia para aceitação deste componente, que é de 160 N/mm² mínimo.

Os valores de alongamento (ϵ) e dureza (HB10), da mesma forma, apresentam valores dispersos, porém ambos atendendo à especificação do componente que é de 4% máximo e 60HB10 mínimo, respectivamente.

As variações de valores em propriedade mecânicas em um mesmo componente refletem as variações observadas na microestrutura do material, conforme apresentado no item 4.3. Além disto, nota-se ainda que os dois diferentes componentes apresentam distintas propriedades, sendo que o componente B apresenta maiores valores de alongamento e menores valores de dureza e limite de resistência do que o componente A. Portanto, o produto comercial apresenta, além de variações estruturais num único componente, variações de componente a componente, indicando deficiência de reprodutibilidade no processo produtivo. Deve-se acrescentar, no entanto, que para os dois componentes analisados, estas variações não comprometem os requisitos de aceitação do produto.

4.6.2. Propriedades mecânicas no estado tixoconformado

A Tabela 4.5 apresenta resultados de propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado.

Pode-se observar que, de um modo geral, os valores de limite de resistência à tração do produto tixoconformado são pouco inferiores aos obtidos pelo produto fundido sob pressão (valores médios de 180 e 165N/mm² respectivamente). No entanto, todas as estruturas obtidas por tixoconformação de pastas com reduzidos diâmetros de glóbulos (as produzidas a partir de material submetido à deformação a frio), atendem ao valor mínimo de limite de resistência à tração especificado para o componente selecionado (160N/mm²).

Ainda, se considerados somente os valores obtidos para as estruturas mais refinadas, o valor médio de σ_{max} se aproxima do valor médio obtido no produto fundido sob pressão (180 e 175 N/mm² respectivamente). A maior resistência à tração para as peças obtidas a partir de matéria prima pré-deformada é consequência do menor tamanho de glóbulos obtidos neste caso, promovido pelo mecanismo de recristalização, conforme explicado anteriormente.

Tabela 4.5 Propriedades mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado.

Condições de obtenção da pasta tixotrópica			Propriedades medidas		
Estado inicial da liga	Ttixo / fl	Tempo de tratamento (s)	σ_{max} (N/mm ²)	ϵ (%)	Dureza (HB10)
Fundido	580°C fl = 0,55	120	164	1,6	72
		300	151	2,3	70
	564°C fl = 0,40	120	154	2,0	74
		300	158	3,5	78
Fundido + deformado a frio (30%)	580°C fl = 0,55	120	164	1,5	72
		300	170	1,5	73
	564°C fl = 0,40	120	190	2,6	77
		300	171	3,1	75

Quanto aos valores de alongamento e dureza, verifica-se que no produto tixoconformado existe uma dispersão menor quando comparada à observada nos valores obtidos para o componente no estado fundido sob pressão, e que diferentemente da resistência à tração, estas duas propriedades atendem ao mínimo especificado pelo projeto, em todos os casos, independente dos diferentes fatores adotados para os ensaios da tixoconformação. Os valores de alongamento são bastante semelhantes nos dois tipos de estruturas (valores médios de 2,1 e 2,3%

respectivamente para o material fundido sob pressão e tixoconformado), enquanto os valores de dureza são inferiores no material tixoconformado, embora folgadoamente superiores aos especificados para o componente estudado.

Os menores valores de dureza e também do limite de resistência do material tixoconformado podem ser consequência não só da globularização da estrutura e, portanto, redução de contornos internos quando comparados com a estrutura de dendritas equiaxiais, como também da dissolução das fases intermetálicas de elevada dureza nas altas temperaturas utilizadas para a obtenção das pastas tixotrópicas, e que não teriam condições de reprecipitação durante o resfriamento rápido da pasta durante a tixoconformação.

No primeiro caso, a promoção do refino de glóbulos de modo a se obter pequenos espaçamentos entre contornos, promove a melhoria das propriedades mecânicas (aumento do limite de resistência e da dureza), como de fato observado; no segundo caso, tratamentos térmicos posteriores na estrutura tixoconformada, a temperaturas inferiores a $T_{solidus}$, poderiam promover a precipitação de intermetálicos na microestrutura e aumento daquelas mesmas propriedades.

4.6.3. Análises estatísticas das propriedades mecânicas do produto tixoconformado

De maneira semelhante à análise estatística da influência de parâmetros do processo de produção das pastas tixotrópicas na sua estrutura, foi também feita análise estatística para a avaliação da influência destes parâmetros nas propriedades do produto tixoconformado, bem como suas possíveis interações.

Nas Figuras 4.22 e 4.23 são apresentados os gráficos de efeitos principais e os gráficos de interações, respectivamente, correlacionando as variáveis temperatura, tempo de tratamento térmico para a globularização da estrutura, e condição inicial da matéria prima (fundida ou fundida + deformada) com a variável de resposta limite de resistência à tração.

Na Figura 4.22, é possível observar que o aumento do tempo de tratamento tende a reduzir σ_{max} , devido à promoção do crescimento dos glóbulos na pasta tixotrópica. Por outro lado, o aumento da fração sólida tende a promover aumento σ_{max} , embora estimule o crescimento de glóbulos e com isto deveria ter o efeito de reduzir esta propriedade. Uma possibilidade de explicação do efeito oposto observado é a presença de contornos de glóbulos mais finos e menos frágeis no produto com maior fração sólida; deve-se lembrar que a liga em estudo apresenta em sua microestrutura intermetálicos e eutéticos de diferentes tipos em contornos da fase primária.

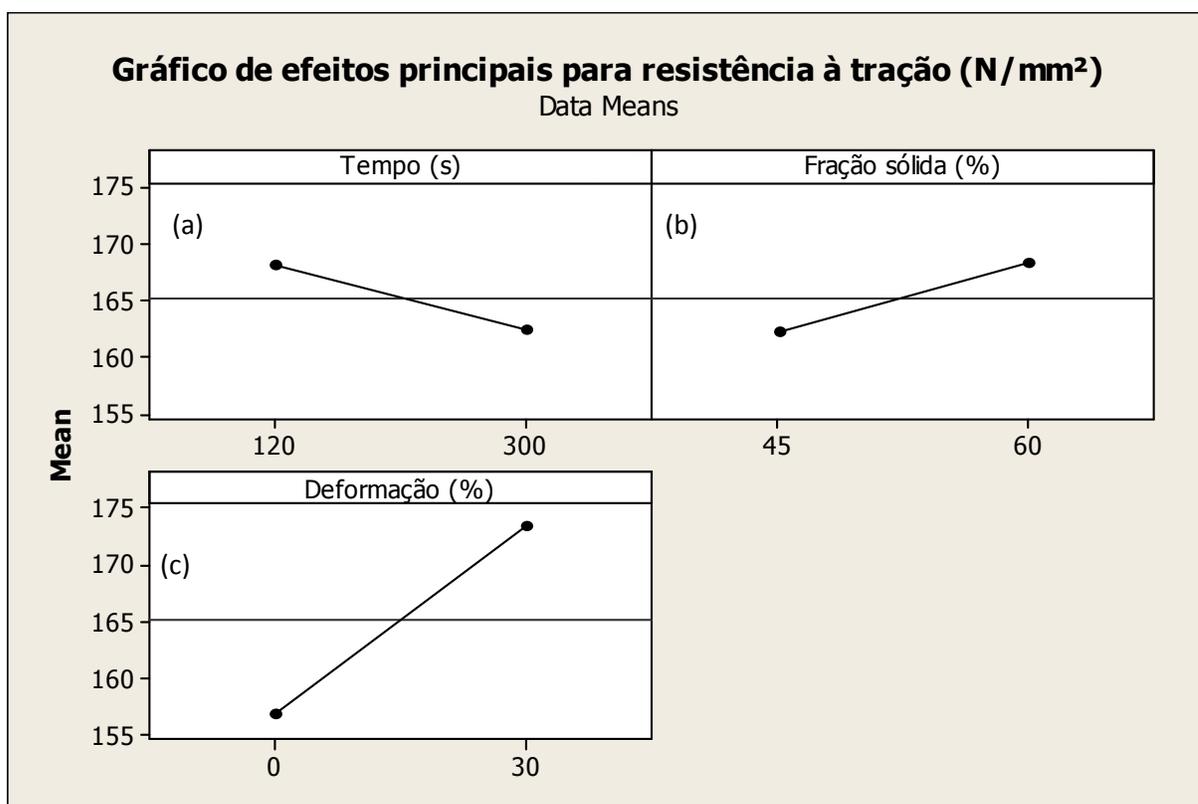


Fig. 4.22 Gráfico de efeitos principais para a variável resposta limite de resistência à tração, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.

Pode-se notar pelos gráficos que a deformação é o fator que mais fortemente influencia os resultados de σ_{max} , podendo-se observar um aumento de cerca de 20% da resistência para o material produzido a partir de matéria prima sem deformação comparativamente ao produzido a

partir de material previamente deformado. Conforme já comentado, isto se deve às menores dimensões dos glóbulos produzidos pelo material deformado; glóbulos menores apresentam melhores propriedades mecânicas (ZOQUI, 1995). É possível também notar que os fatores tempo de tratamento e fração sólida possuem menor influência nos resultados de tração se comparados ao parâmetro deformação prévia. Confirma-se, portanto, que o fator preponderante para a formação de glóbulos de pequenas dimensões é a presença de deformação prévia no material.

Também na Figura 4.23, onde são apresentadas as interações entre os parâmetros do processo para a variável resposta σ_{max} pode-se observar que a variável resposta é menos sensível aos parâmetros tempo e fração sólida do que presença de deformação prévia no material antes do tratamento para a globularização.

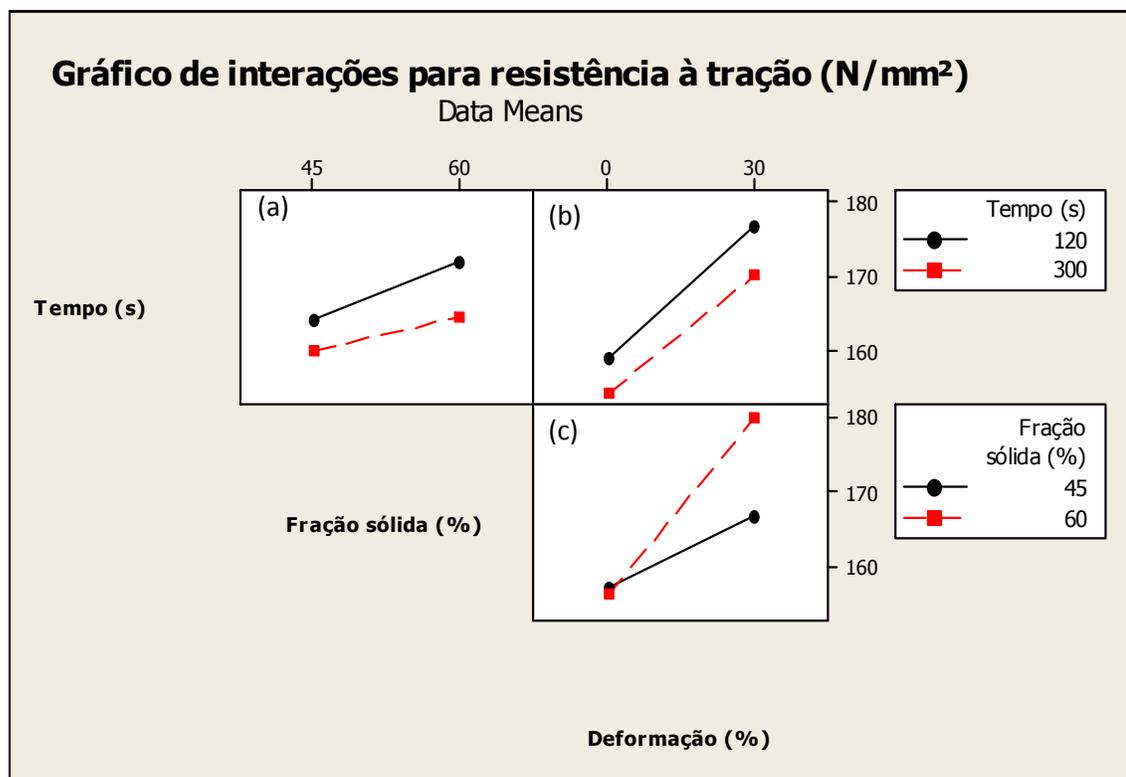


Fig. 4.23 Gráfico de interações para a variável resposta limite de resistência à tração, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixotomado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.

As Figuras 4.24 e 4.25 apresentam os resultados da análise estatística de efeitos principais dos parâmetros do processo de produção das pastas tixotrópicas e as interações entre estes parâmetros, respectivamente, sobre a variável de resposta alongamento.

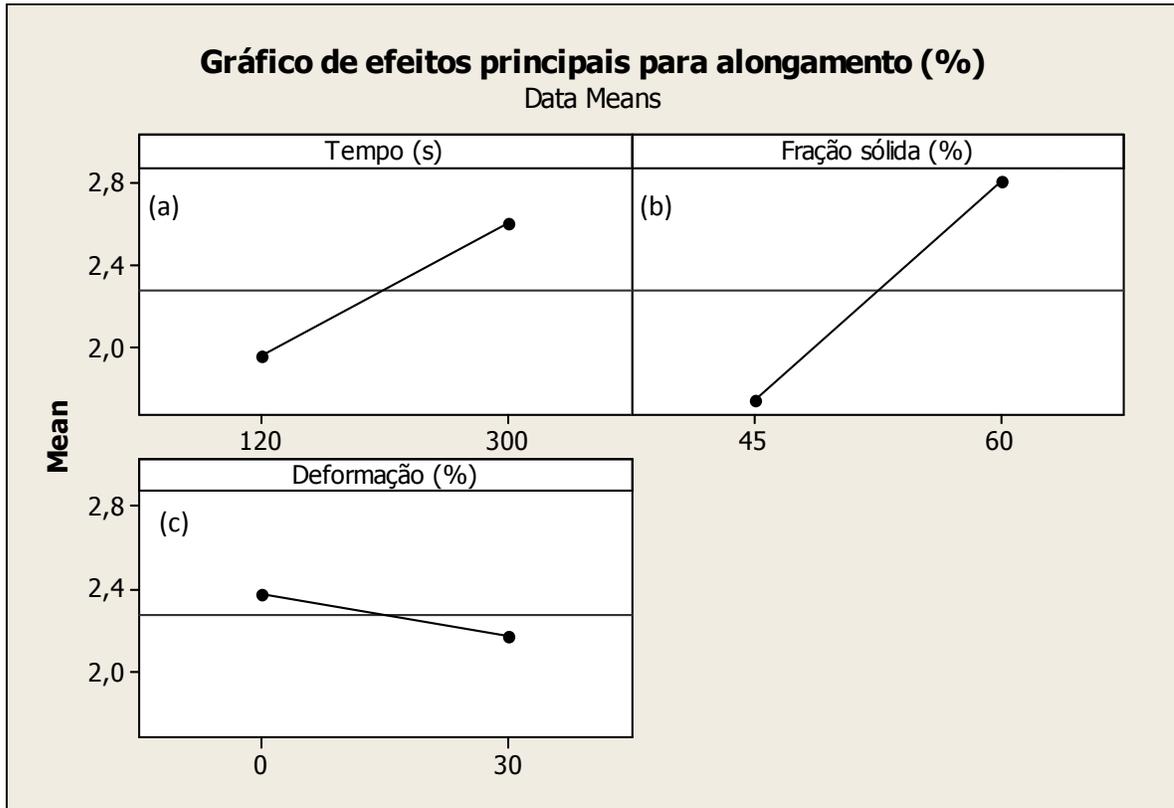


Fig. 4.24 Gráfico de efeitos principais para a variável resposta alongamento, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.

Na Figura 4.24 pode ser observado que o alongamento do material tixoconformado é mais fortemente dependente dos parâmetros tempo de tratamento e fração sólida. O aumento destes parâmetros leva ao aumento de mecanismos de crescimento de glóbulos e também à redução de fases frágeis em seus contornos, possibilitando uma maior deformação plástica do material. Resultados semelhantes foram encontrados também por ROVIRA (2001), que mostra em seu trabalho que produtos da liga AA-2011 tixoconformados a partir de pastas submetidas a longos tempos de tratamento de globularização apresentam elevados valores de alongamento. Estes

valores altos de alongamento obtidos são indicativos do comportamento dúctil do produto tixoconformado, onde a estrutura livre de elementos que limitam a movimentação das discordâncias permite um elevado grau de deformação.

Na Figura 4.25, que apresenta resultados das interações entre os parâmetros de processo e o alongamento do produto tixoconformado, pode-se observar a inexistência de fatores com interação significativa para a variável resposta alongamento. A influência, sobre o alongamento do material, dos parâmetros estudados, não se contrapõem nas faixas de variações estudadas.

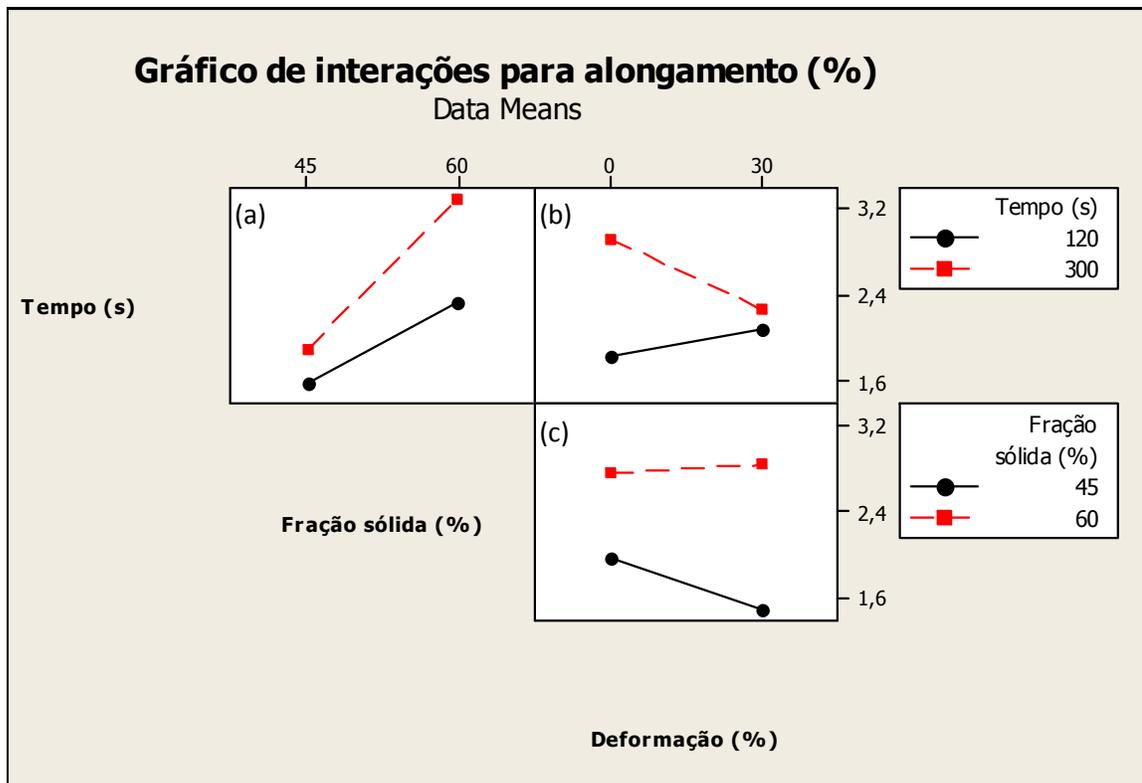


Fig. 4.25 Gráfico de interações para a variável resposta alongamento, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.

Pode-se observar aumento do alongamento com o aumento tanto da fração sólida quanto do tempo de tratamento, em (a); pouca influência do parâmetro grau de deformação. Em (c)

pode-se notar a possibilidade de interação entre os parâmetros deformação e tempo de tratamento, se maiores valores de deformação fossem utilizados. Neste caso, um acentuado efeito de refino (elevada deformação prévia) poderia, por exemplo, se sobrepor ao efeito de crescimento de glóbulos promovido pelo aumento do tempo de tratamento.

Os resultados de análises estatísticas dos efeitos principais dos parâmetros de processo sobre a dureza do produto tixoconformado são apresentados na Figura 4.26, enquanto na Figura 4.27 são apresentados os resultados da influência das interações entre os parâmetros e a variável considerada.

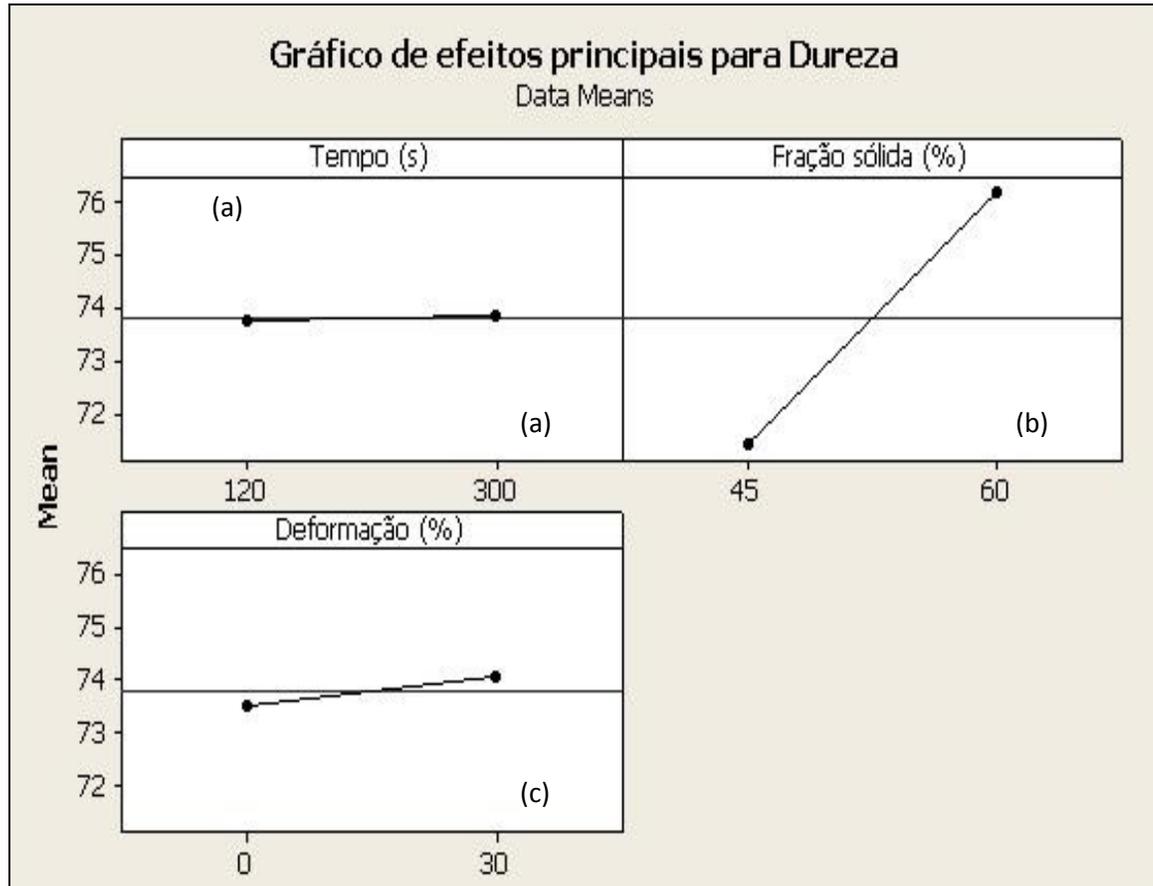


Fig. 4.26 Gráfico de efeitos principais para a variável resposta dureza, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo; (b) fração sólida; (c) condição inicial.

A partir do gráfico de efeitos principais nota-se que o parâmetro que mais fortemente influencia os resultados de dureza da microestrutura tixoconformada é a fator fração sólida, embora em termos absolutos esta variação não seja tão significativa: o valor médio de dureza é cerca de 7% maior para o material obtido a partir de pastas contendo $f_s = 0,60$ em comparação à dureza do material obtido a partir de pastas com $f_s = 0,45$. A estrutura obtida a partir de pastas com menor teor de líquido apresenta contornos de glóbulos menos espessos e com menor teor de intermetálicos e fases eutéticas; como consequência, a fase primária deve apresentar maior teor de elementos de liga em solução, o que pode explicar a maior dureza observada

A observação dos resultados da influência das interações entre os parâmetros de processo sobre a dureza do material tixoconformado, apresentada na Figura 4.27, mostra interações entre os parâmetros tempo e deformação, e tempo e fração sólida.

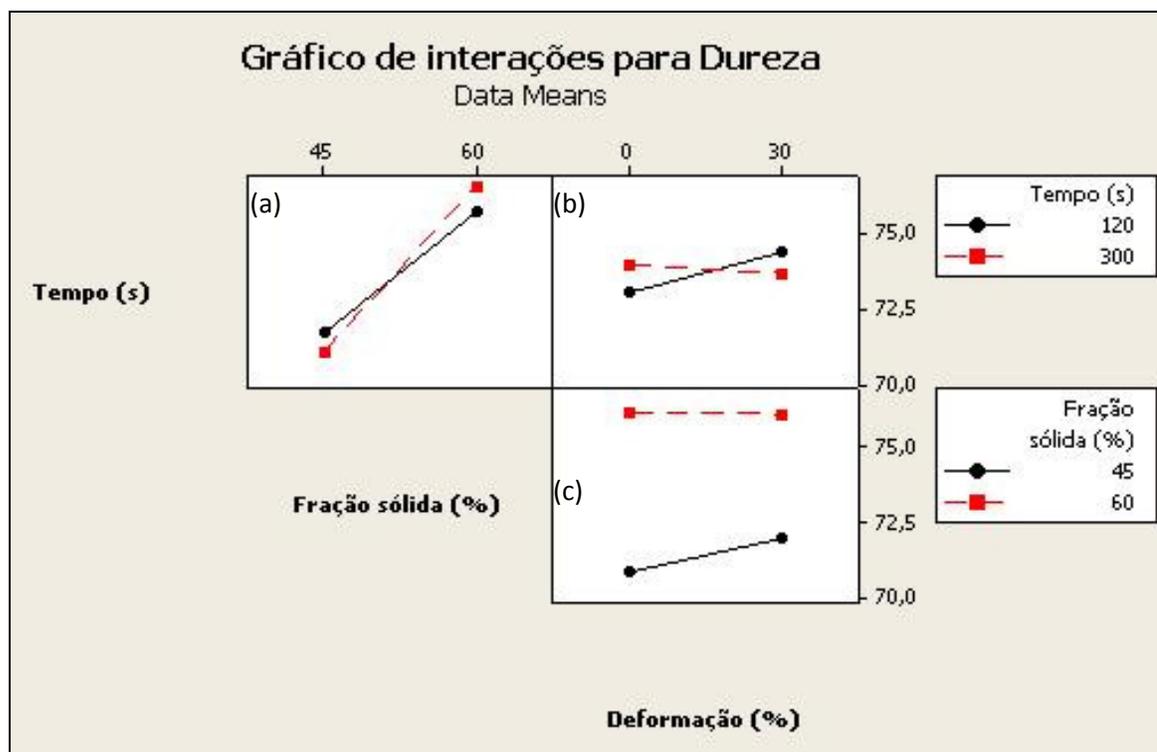


Fig. 4.27 Gráfico de interações para a variável resposta dureza, obtido com o emprego de *software* MINITAB®15, para a liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado: (a) tempo vs fração sólida; (b) tempo vs deformação e (c) fração sólida vs deformação.

Estes resultados mostram, por exemplo, que o aumento da dureza com o aumento da fração sólida depende do tempo de tratamento: tempos maiores levam a aumentos maiores na dureza, talvez por promover melhor solubilização de partículas de intermetálicos no interior da fase primária e, com isto promover maior dureza na microestrutura. Também o efeito do tempo interage com o efeito da presença de deformação na matéria prima, o aumento da dureza só é dependente da deformação prévia (isto é, do tamanho de glóbulo na pasta), para pequenos tempos de tratamento. O efeito talvez possa ser explicado pelo fato do maior tempo de tratamento tornar menos diferenciadas as estruturas obtidas por mecanismos de globularização de rosetas de estruturas obtidas por mecanismos de recristalização.

Como resultado geral das análises de propriedades mecânicas dos produtos tixoconformados obtidos pode-se dizer que seus valores são dependentes da estrutura produzida: glóbulos de pequenas dimensões apresentam boas propriedades e os valores obtidos são comparáveis aos de produtos fundidos sob pressão, quando o espaçamento entre contornos, de glóbulos no primeiro caso, e de ramos dendríticos no segundo caso, são de mesma ordem de grandeza. No caso de glóbulos de maiores dimensões, propriedades também aceitáveis podem ser obtidas nos produtos tixoconformados.

O produto tixoconformado, no entanto, apresenta uma grande vantagem com relação ao produto fundido sob pressão, qual seja, a significativa redução (da ordem de 17 x) do teor de porosidade na estrutura final. Este fato pode ter importante consequência tecnológica para o componente específico analisado: a possibilidade de redução de seções de paredes, o que levaria à redução do peso do componente, com as decorrentes vantagens operacionais relativas ao processo de fabricação, ao custo e ao desempenho do componente.

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos no trabalho possibilitaram a análise comparativa entre produtos da liga Al-Si5-Cu3-Mg fabricados por processos de fundição sob pressão, em particular o componente comercial suporte de acessórios, e por tecnologia de semi-sólidos através do processo de tixoconformação.

Para expor esta base comparativa, neste capítulo utiliza como critério de apresentação a divisão dos resultados em quatro principais tópicos: características metalúrgicas e mecânicas (em tração e dureza) do componente comercial fundido adquirido no mercado; determinação da tixoconformabilidade ou tixohabilidade da liga em estudo; viabilidade de fabricação por tixoconformação; características metalúrgicas e mecânicas da liga tixoconformada; avaliação geral dos resultados obtidos, destacando as vantagens e desvantagens da utilização do processo de tixoconformação para a fabricação do componente selecionado.

➤ **Características metalúrgicas e mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado fundido sob pressão – componente comercial adquirido no mercado:**

- a estrutura do componente se constitui de dendritas finas com pouca ramificação, resultante da ação conjunta dos parâmetros: alta taxa de solidificação (proporcionada pelo projeto da peça, que apresenta paredes de seções finas e alta taxa de extração de calor de moldes metálicos), e elevado teor de elementos de liga na liga;
- a estrutura apresenta elevado teor de porosidade, observada em diferentes regiões analisadas, atribuído ao processo de injeção;
- a microestrutura do componente é variável em distintas regiões;
- dois distintos componentes apresentaram estruturas distintas entre si;

- as propriedades em tração e de dureza do componente comercial variam em distintas regiões de um mesmo componente, de acordo com a variação de microestrutura observada, e de componente para componente, indicando inconsistência no processo de fabricação;
- todas as amostras retiradas de dois distintos componentes apresentam propriedades mecânicas conforme requisitos técnicos, porém com grande dispersão dos valores de limite de resistência à tração, alongamento e dureza.

➤ **Tixoconformabilidade da liga Al-Si5-Cu3-Mg:**

- a liga de estudo apresenta elevado intervalo de solidificação (da ordem de 100°C), o que a torna suscetível de utilização em processos de tixoconformação;
- a variação da fração líquida com a temperatura, dentro do intervalo de solidificação, não é abrupta em todo o intervalo, sendo possível a definição de janelas de tixoconformação factíveis numa operação prática.

➤ **Viabilidade de produção por tixoconformação da liga Al-Si5-Cu3-Mg:**

- a fabricação de produtos tixoconformados de boa qualidade se mostrou factível, em processo de fácil controle operacional;
- pastas tixotrópicas foram obtidas por simples processo de fusão parcial controlada de estruturas brutas de fusão e de estruturas submetidas à deformação; no primeiro caso mecanismos de crescimento por difusão atômica levam à globularização da estrutura, enquanto no segundo caso mecanismos de recristalização são responsáveis pela modificação estrutural;
- o comportamento tixotrópico dos semi-sólidos obtidos nas condições impostas permitiu o total preenchimento de moldes e a obtenção de produtos tixoconformados de boa qualidade.

➤ **Características metalúrgicas e mecânicas da liga Al-Si5-Cu3-Mg no estado tixoconformado:**

- as estruturas tixoconformadas apresentam microestrutura constituída de glóbulos da fase primária α e contornos preenchidos com fases eutéticas, provavelmente $\alpha + \text{CuAl}_2$ e $\alpha + \text{Si}$;
- o produto tixoconformado apresenta teores de porosidade muito inferiores aos apresentados pelo componente fundido (cerca de 17 vezes inferiores);
- as dimensões de glóbulos na estrutura tixoconformada são dependentes dos parâmetros de produção da pasta, principalmente da presença ou não de deformação na matéria-prima: estruturas mais refinadas são obtidas quando deformação está presente, o que é atribuído ao mecanismo de globularização envolvido, que passa pela recristalização do material;
- as dimensões de glóbulos bem como o teor de fases secundárias (líquido na pasta tixotrópica) no produto tixoconformado não são significativamente dependentes dos parâmetros de processo utilizados para a fabricação das pastas tixotrópicas, para as condições analisadas;
- os produtos tixoconformados apresentam limite de resistência à tração dependente de sua microestrutura, principalmente do parâmetro dimensão de glóbulos: maiores as suas dimensões, menor o limite de resistência. O alongamento e dureza são menos influenciados pela variação de dimensões de glóbulos;
- a estrutura tixoconformada atende os requisitos de propriedades requeridos para a fabricação do componente estudado, embora apresentem, para algumas das condições de fabricação empregadas no trabalho, valores de limite de resistência e de dureza inferiores aos do material fundido sob pressão;
- as propriedades do produto tixoconformado podem ser melhoradas com o refino das dimensões de glóbulos e provavelmente com a utilização de tratamentos térmicos para a promoção da precipitação de fases intermetálicas de elevada dureza.

➤ **Pertinência da utilização do processo de tixoconformação para a fabricação de componentes de motores, da liga Al-Si5-Cu3-Mg - vantagens e desvantagens:**

- tomando como base as propriedades mecânicas mínimas exigidas para o suporte de acessórios analisado, o processo de tixoconformação mostra-se viável, apesar do produto tixoconformado nas condições estudadas apresentar valores de resistência à tração e dureza ligeiramente inferiores ao componente fundido sob pressão, porém, em geral dentro dos limites mínimos especificados;

- as propriedades do produto tixoconformado podem, no entanto, serem melhoradas com a alteração dos parâmetros do processo de fabricação das pastas, para a promoção de estruturas mais refinadas;

- uma notável melhoria nos níveis de porosidade é notada nas amostras tixoconformadas em comparação à amostra fundida sob pressão, uma vantagem muito relevante se tratando de um componente de suportação;

- a redução do teor de poros pode permitir a reformulação do projeto do componente, com a redução de espessuras de paredes e, portanto, do seu peso, o que traria vantagens do ponto de vista de fabricação, de custo e de desempenho do equipamento que utiliza o componente;

- esta tecnologia atualmente não está totalmente acessível no mercado nacional, o que geraria um investimento inicial ao fornecedor que deseje implementá-lo no seu processo produtivo. Por outro lado, existem no mercado mundial diversos fornecedores que já possuem esta tecnologia disponível, através dos quais são possíveis ganhos no custo final do componente, baseando-se no fato de ser um processo que desprende de menor energia (fontes de calor) e garante uma maior vida útil dos moldes de fundição, entre outras vantagens.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Finalmente, como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se avaliar as influências de tratamentos térmicos como T5 e T6 para a liga no estado tixoconformado, a fim de melhorar as suas propriedades mecânicas.

Propõe-se também a produção do componente comercial a partir do estado semi-sólido, reproduzindo os mesmos ensaios de resistência à tração, alongamento e dureza.

Por fim, uma avaliação da tixoconformação de ligas de magnésio seria interessante, onde poderia ser agregadas tecnologias de trabalho próximas ao *near net shape* (produtos tixoconformados) a um elemento de baixa densidade, o que seria ideal para reduções de peso significativas em componentes de motores.

REFERÊNCIAS

- ABAL. Associação Brasileira do Alumínio. Disponível em <www.abal.org.br>. Acesso em: 15 março 2010.
- ABIAUTO. Associação Brasileira da Indústria Automotiva. Disponível em <www.abiauto.com.br>. Acesso em 28 setembro 2009.
- ALUAUTO. Alumínio em automotivos. Disponível em <www.abal.org.br/aluauto>. Acesso em 12 maio 2010.
- ALUMINUM ASSOCIATION. Aluminum characteristics. Disponível em <www.aluminum.org>. Acesso em 09 novembro 2009.
- ASHTARI, P.; Tezuka, H.; SATO, T. Modification of Fe-containing intermetallic compounds by K addition to Fe-rich AA319 aluminum alloys. In: **Scripta Materialia**, v.53, 2005, p.937-942.
- ASTM. American Society for Testing and Materials. **E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. West Conshohocken, 1996, 26p
- ATKINSON, H. V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. **Progress in Material Science**, v.50, 2005, p.341-412.
- BASNER, T. Rheocasting of Semi-Solid A357 Aluminum. **SAE International Paper #010059**. SAE 2000 World Congress Detroit, Michigan, 2000.
- BENATI, D.M. **Avaliação da tixotromabilidade de ligas Al-Xwt%Si-2,5wt%Cu-05wt%Mg**. 2008. 121p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- BIROL, Y. Cooling slope casting and thixoforming of hypereutectic A390 alloy. In: **Journal of materials processing technology**, v.207, 2008, p.200-203.
- BIROL, Y. Thermomechanical processing of an aluminum casting alloy for thixoforming. In: **Journal of Alloys and Compounds**, v.479, 2009, p.113-120.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. John Wiley & Sons, Inc. v.5, 2002, 589p.
- CAVALIERE, P.; CERRI, E.; LEO, P. Effect of heat treatments on mechanical properties and damage evolution of thixoformed aluminum alloys. In: **Materials characterization**, v.55, 2005, p.35-42.

CERRI, E.; EVANGELISTA, E.; SPIGARELLI, S.; CAVALIERE, P.; DERIC7CARDIS, F. Effects of thermal treatments on microstructure and mechanical properties in a thixocast 319 aluminum alloy. In: **Materials Science and Engineering**, v.284, 2000, p.254-260.

CHAYONG, S.; ATKINSON, H.V.; KAPRANOS, P. Thixoforming 7075 aluminium alloys. In: **Materials Science and Engineering**, v.390, 2005, p.3-12.

CHO, W.G.; KANG, C.G. Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. In: **Journal of Materials Processing Technology**, v.105, 2000, p.269-277.

CRISTOFOLINI, R. **Estudo da potencialidade da aplicação do ferro fundido nodular ASTM A536 60-40-18 como matéria prima para processos de tixoconformação**. 2009. 181p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DAVIS, J.R. Aluminum and Aluminum Alloys. **ASM Specialty Handbook**, v.1, 1993, p.88-92

DIN, German National Standard, **50125**: Testing of metallic materials - Tensile test pieces. German, 2004, p.04.

EN, Normas Européias, **1706**: Aluminum and aluminum alloys - Castings - Chemical composition and mechanical properties; German version, 2010, p. 10-13.

FLEMINGS, M.C. Behavior of Metal Alloys in Semisolid State. **Metallurgical Transactions A**, v.22-A, 1991, p.957-981.

GARCIA, A. **Solidificação – Fundamentos e aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001, 399p.

HIRT, G.; KOPP, R. Thixoforming – Semi-solid metal processing. **Material Aspects of Steel thixoforming**. Wiley-VCH, cap.3, 2009, p.46-47.

JIANG, J.F.; LUO, S.J. Preparation of semi-solid billet of magnesium alloy and its thixoforming. In: **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, v.17, 2007, p.46-50.

JORSTAD, J.; RAUSMUSSEN, W. Aluminum Casting Technologies. **American Foundry Society**, v.2, 1993.

KAINER, K. U. Hot chamber die casting of magnesium alloys. In: **Proceedings of the 7th International Conference on Magnesium Alloys and their Applications**, Dresden, Germany, 2007, p.87.

KANG, C.G.; YOUN, S.W.; SEO, P.K. Data base construction on mechanical properties of thixoforged aluminum parts and their microstructure evaluation. In: **Journal of Materials Processing Technology**, v.159, 2005, p.330-337.

KAPRANOS, P.; WARD, P.J.; ATKINSON, H.V.; KIRKWOOD, D.H. Near net shaping by semi-solid metal processing. In: **Materials and Design**, v.21, 2000, p.387-394

KAPRANOS, P.; KIRKWOOD, D.H.; ATKINSON, H.V.; RHEINLANDER, J.T.; BENTZEN, J.J.; TOFT, P.T.; DEBEL, C.P.; LASLAZ, G.; MAENNER, L.; BLAIS, S.; RODRIGUEZIBABE, J.M.; LASA, L.; GIORDANO, P.; CHIARMETTA, G.; GIESE, A. Thixoforming of an Automotive Part in A390 Hypereutectic Al-Si Alloy. In: **Journal of Materials Processing Technology**, v.135, p.271-277, 2003.

KASPRZAK, W.; KIERKUS, W.T.; SOKOLOWSKI, J.H. The Structure and Matrix Microhardness of the 319 Aluminum Alloy After Isothermal Holding During the Solidification Process. **American Foundry Society**, 2001, p.1-11.

KOSLOV, A.; DJURDJEVIC, M.C.; FETZER, R.S. Thermodynamic simulation of blending Mg-Alloys by thixomolding. **Clausthal University of Technology**, 2007.

LASA, L.; RODRIGUEZ, J.M. Characterization of the dissolution of the Al₂Cu phase in two Al-Si-Cu-Mg casting alloys using calorimetry. In: **Materials Characterization**, v.48, 2002, p.371-378.

LEBEAU, S.E.; YAMAMOTO, Y.; SAKAMOTO, K. Thixomolding of Magnesium Automotive Components. **International Congress and Exposition**, Detroit, Michigan, 1998.

LEMOES, A.B. **Generalidades da análise térmica**. In: Boletim de desenvolvimento e tecnologia CETEA, v.15, 2003, p.1-4.

LI, Z.; SAMUEL, A.M.; SAMUEL, F.H.; RAVINDRAN, C.; VALTIERRA, S.; DOTY, H.W. Parameters controlling the performance of AA319-type alloys Part I. Tensile properties. In: **Materials Science and Engineering**, v.367, 2004, p.96-110.

LIU, D.; ATKINSON, H.V.; KAPRANOS, P.; JIRATTITICHAROEAN, W.; JONES, H. Microstructural evolution and tensile mechanical properties of thixoforged high performance aluminum alloys. In: **Materials Science and Engineering**, v.361, 2003, p.213-224.

LOURENÇATO, L.A. **Tixoformabilidade e tixoforjamento de ligas Al-Xwt%Si-0,5wt%Mg em prensa excêntrica com matriz aberta**. 2008. 156p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

MAHMUDI, R.; SEPEHRBAND, P.; GHASEMI, H.M. Improved properties of A319 aluminum casting alloy modified with Zr. In: **Materials Letter**, v.60, 2006, p.2606-2610.

MARGARIDO, M.; ROBERT, M.H. Influence of thermomechanical treatments on the production of rheocast slurries by partial melting. In: **Journal of Materials Processing Technology**, v.133, 2003, p.149-157.

MASAKASU, Y.; ATSUSHI, T.; OSAMU, M.; MITSUHIKO, K.; OSAMI, I.; KOICHI, K.; Development of Aluminum Cylinder Block for Diesel Engine. In: **Honda R&D Tech Journal**, 2004, p.111-120.

MEYER, D. MASSINON; GUERIN, P. Influence of Microstructure on the Static and Thermal Fatigue Properties of 319 Alloys. **SAE International Paper #970705**, Warrendale, PA, 1997.

MILLER, W.S.; ZHUANG, L.; BOTTEMA, J.; WITTEBROOD, A.J.; DE SMET, P.; HASZLER, A.; VIEREGGE, A. Recent development in aluminium alloys for the automotive industry. In: **Materials Science and Engineering**, v.280, 2000, p.37-49.

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- International Congress Centre Munich-Alemanha**, 2002, p.22-31.

PAES, M. **Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg para tixoforjamento**. 2004. 155p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ROBERT, M.H. Partial melting as an efficient method to produce rheocast alloy slurries. In: **Transactions of the Japan Foundrymen's Society**. v.12, 1993, p.45-51.

ROBERT, M.H. **Proposição de um novo processo para a obtenção de pastas metálicas reofundidas**. 1989. 151p. Tese (Livre docência) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ROVIRA, M. **Viabilização do tixoforjamento da liga Al-4,5% Cu super refinada**. 1996. 118p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ROVIRA, M. **Forjamento da liga AA 2011 no estado semi-sólido: Estudo do processo e do produto**. 2001. 194p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SAMUEL, A.M; SAMUEL, F.H. A metallographic study of porosity and fracture behavior in relation to the tensile properties in 319.2 end chill casting. **Metallurgical and Materials transactions**, v.26A, 1995, p.2359-2372.

SILVA, B.M. **Influência da microestrutura inicial e material de molde na tixoconformação da liga A356**. 2007. 106p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SPENCER, D.B.; MEHRABIAN, R.; FLEMINGS, M.C. Rheological Behaviour of Sn15% Pb in Crystallisation Range. **Metallurgical Transactions A**, v.3, 1972, p.1925-1932.

TORRES, L.V. **Avaliação da tixoconformabilidade das ligas AA7075 a AA7004**. 2009. 102p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VINARCIK, EDWARD J. **High Integrity Die Casting Processes**. John Wiley&Sons, Inc., v.56, 2002, p.85-87 101-112.

WANNASIN, J.; THANABUMRUNGKUL, S. Development of a semi-solid metal processing technique for aluminum casting applications. In: **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, v.30, 2008, p.215-220.

WINTERBOTTOM, W.L. Semi-solid forming applications: high volume automotive products. In: **Metallurgical Science and Technology**, v.18, 2000, p.5-10.

ZOQUI, E.J. **Obtenção e caracterização mecânico metalúrgica da liga AlCu4,5% no estado reofundido**. 1995. 238p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ZOQUI, E.J. **Obtenção e Caracterização de Ligas Al-Si Reofundidas**. 2001. 192p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.