

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
CURSO SUPERIOR ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS SIMÃO NOGUEIRA

**CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA Al-5wt%Si-
0,5wt%Mg PARA TIXOCONFORMAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2014

LUCAS SIMÃO NOGUEIRA

**CARACTERIZAÇÃO DA LIGA Al-5wt%Si-0,5wt%Mg PARA
TIXOCONFORMAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato.

PONTA GROSSA

2014



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DA LIGA Al-5wt%Si-0,5wt%Mg PARA TIXOCONFORMAÇÃO

por

LUCAS SIMÃO NOGUEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 10 de fevereiro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz
Membro Titular

Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
Responsável pelos Trabalhos
de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Coordenador do Curso de
Engenharia Mecânica

Dedico este trabalho a minha família, todos meus amigos e professores que de alguma forma me apoiaram e não mediram esforços ao me ajudar para que eu pudesse concluir esta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Primeiramente a **Deus** por mais este sonho realizado, sem Ele na minha vida nada seria possível.

A minha mãe **Maria Aparecida Simão Nogueira** e ao meu pai **José Wanderley Nogueira**, por todo apoio dado durante esses 5 anos de estudo.

Ao meu irmão **Marcelo Simão Nogueira**, pela orientação nas horas de estudo e para realizações de trabalhos.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. **Luciano Augusto Lourençato**, pelo acompanhamento e orientações durante os experimentos e, também pelo apoio e incentivo nas horas de tomar decisões.

A todos os professores da **Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa**, por proporcionarem a formação de profissionais de qualidade e por sempre estarem à disposição para tirar dúvidas e passarem seus conhecimentos aos alunos.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os colegas de curso, pelo convívio durante esses 5 anos de curso.

“Um homem nunca deve sentir vergonha de admitir que errou, o que é apenas dizer, noutros termos, que hoje ele é mais inteligente do que era ontem.”

(Alexander Pope)

RESUMO

NOGUEIRA, Lucas Simão. **Caracterização Microestrutural da liga Al-5wt%Si-0,5wt%Mg para tixoconformação**. Defesa realizada em 2014. Número total de folhas: 54. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2014.

As ligas Al-Si-Mg utilizadas para o processamento no estado semi-sólido são notadamente as ligas de fundição A356 e A357. A 8ª Conferência Internacional de Processamento de Ligas Semi-sólidas e Compósitos mostra um incremento em 40% na produção de componentes por este tipo de tecnologia nos anos recentes, com perspectivas de aumento de 30% até 2012. O desenvolvimento de novas ligas especialmente projetadas para o uso na tixo-conformação é um novo desafio nesta área de pesquisa, principalmente no Brasil. O presente trabalho irá apresentar alguns resultados referentes ao estudo da liga Al-5,0wt%Si-0,5wt%Mg obtida via fundição convencional seguida de ultra-refino, a saber, a sua evolução morfológica apresentada no reaquecimento do material para obtenção de fração sólida de 45% em quatro tempos distintos (0s, 30s, 90s e 210s). A evolução morfológica mostrou que com o aumento do tempo de permanência do material no estado semi-sólido houve mudança no tipo de estrutura, passando de dendrítica para globular, apresentando a liga favorável quanto a utilização como liga semi-sólida. Também se notou que o aumento do tempo de tratamento significou num aumento no tamanho médio dos glóbulos.

PALAVRAS-CHAVE: Alumínio; Tixoconformação.

ABSTRACT

NOGUEIRA, Lucas Simão. **Microstructural Characterization of the Al-5wt%-Si-0,5wt%Mg alloy for thixoforming.** Defense held in 2014. Total number of sheets: 54. Conclusion Work of the Course of Bachelor in Mechanical Engineering - Federal Technological University of Paraná. Ponta Grossa, 2014.

The Al-Si-Mg alloys used for processing on the semi-solid state are notably Foundry alloy A356 and A357. The 8th International Conference on Processing of alloy Semi-solid and Composite shows a 40% increase in the production of components for this type of technology in recent years, with prospects of increase of 30% by 2012. The development of new alloys specially designed for use on thixo-conformation is a new challenge in this area of research, mainly in Brazil. This work will present some results of the study of the alloy Al-5,0wt% Si-0,5wt%Mg obtained by conventional casting followed ultra-refining namely their morphological evolution presented in reheating of material for the production of solid fraction of 45% in four different times (0s, 30s, 90s and 210s). The morphological developments showed that with increased residence time in semi-solid state, materials there was change in the type of structure, going from dendritic to globular, presenting the alloy favorable for the use as an alloy semi-solid. Also it was noted that the increase of treatment time meant an increase in the average size of the globules.

KEYWORDS: Aluminum; Thixoforming.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL	12
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
1.3	JUSTIFICATIVA	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE TIXOCONFORMAÇÃO	14
2.2	OBTENÇÃO DO MATERIAL NO ESTADO SEMI-SÓLIDO	16
2.2.1	Por Solidificação Parcial	17
2.2.2	Por Refusão Parcial	18
2.3	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO NO ESTADO SEMI-SÓLIDO	20
2.3.1	Tixofundição.....	21
2.3.2	Tixoextrusão	23
2.3.3	Tixolaminação	24
2.3.4	Tixoforjamento	24
2.4	MECANISMOS DE SOLIDIFICAÇÃO	26
2.4.1	Nucleação	28
2.4.2	Zona Coquilhada	28
2.4.3	Zona Colunar	29
2.4.4	Zona Equiaxial.....	30
2.5	VISCOSIDADE EM ESTRUTURAS REOFUNDIDAS	31
2.6	REFINAMENTO DA LIGA.....	32
2.7	LIGAS AL-SI-MG	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO DOS LINGOTES	35
3.2	USINAGEM DOS LINGOTES	36
3.3	PROCESSO DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA	36
3.4	FURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	37
3.5	TRATAMENTO DE GLOBULARIZAÇÃO	37
3.6	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	38
3.6.1	Corte	38
3.6.2	Embutimento	38

3.6.3	Lixamento.....	39
3.6.4	Polimento.....	39
3.7	ATAQUE QUÍMICO	40
3.8	CAPTURA DE IMAGENS EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO.....	40
3.9	CERTIFICAÇÃO DA FRAÇÃO SÓLIDA	41
3.10	MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GLÓBULOS	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
5	CONCLUSÕES.....	50
6	REFERÊNCIAS	51

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Diferença entre as microestruturas. a) microestrutura dendrítica. b) microestrutura não dendrítica	17
Figura 2- Processos de tixoconformação.....	21
Figura 3- Processo de tixofundição. a) Aquecimento até ESS; b) Material colocado na máquina de injeção; c) Tixofundição injetada.....	23
Figura 4- Diagrama esquemático do processo de tixoforjamento	26
Figura 5- Estrutura dendrítica colunar e dendrítica equiaxial	27
Figura 6- Representação esquemática da zona coquilhada e zona colunar	29
Figura 7- Representação esquemática da zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial	30
Figura 8- Diagrama de fases Al-Si	33
Figura 9- Propriedades versus teor de Si	34
Figura 10- Forma utilizada para fazer a macro-contagem.....	42
Figura 11- Estrutura bruta de fusão	45
Figura 12- Morfologia da liga com $t=0s$	46
Figura 13- Morfologia da liga com $t=30s$	46
Figura 14- Morfologia da liga com $t=90s$	47
Figura 15- Morfologia da liga com $t=210s$	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química da liga obtida no trabalho (em wt%)	36
Tabela 2- Resultado da contagem de uma imagem	43
Tabela 3- Resultado final do tamanho de glóbulo em uma amostra	43
Tabela 4 - Certificação da fração sólida	44
Tabela 5- Tamanho médio dos glóbulos.....	48

1 INTRODUÇÃO

As indústrias possuem atualmente grande interesse para o desenvolvimento de novos processos de fabricação, tendo como objetivo reduzir a quantidade de matéria-prima e também a quantidade de etapas para se chegar ao produto final. A redução de peso do produto já acabado, juntamente com sua obtenção próxima da geometria final e a eliminação das etapas posteriores de usinagem, auxilia a indústria a reduzir o custo final do produto. Neste sentido pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de atender às necessidades do mercado, aperfeiçoando antigos processos de produção, ou até mesmo criando novos processos de fabricação.

Na última década, a indústria automobilística mostrou-se como a principal patrocinadora para o desenvolvimento de novos processos para produção de peças com materiais no estado semi-sólido (ESS). A utilização de alumínio nos automóveis, primariamente sob a forma de fundido, aumentou consideravelmente devido à necessidade de se produzir partes com alta resistência mecânica, baixo peso e alta confiabilidade. Assim sendo, é neste nicho de mercado que o desenvolvimento de tecnologias de produção de peças via ESS se torna importante.

Entre os processos de fabricação utilizados pelas indústrias tem-se o processo:

- Mecânicos: são os processos que modificam as propriedades dos materiais, estando eles no estado sólido, através da aplicação de tensões externas (forjamento, usinagem, extrusão, etc.)

- Metalúrgicos: são os processos que modificam as propriedades dos materiais, estando eles no estado líquido ou não, com a utilização de altas temperaturas (fundição, sinterização, tratamentos térmicos, etc.).

No tocante ao processo metalúrgico, objeto deste estudo, existe uma tecnologia relativamente nova, denominada de tixoconformação, que é a conformação de metais no estado semi-sólido, aplicando-se uma tensão de cisalhamento durante a solidificação. Através do cisalhamento produz-se uma pasta semissólida com estrutura não dendrítica, podendo ser transferida diretamente para um molde ou matriz, para obtenção do produto final.

As ligas utilizadas para produção de peças no ESS são limitadas e comumente empregadas em fundição convencional. Geralmente, conforme constatado na literatura, as ligas mais empregadas são A356 e A357 (FAN, 2002; ATKINSON, 2005; FIGUEREDO, 2001). As ligas de alumínio A356 são utilizadas geralmente em situações onde se deseja uma alta fluidez, boa soldabilidade, boa resistência à corrosão e também resistência à compressão.

Já o alumínio A357 é utilizado quando se deseja realizar tratamento térmico e também uma combinação entre boa soldabilidade, alta resistência e ductilidade.

Assim sendo, constata-se que existe uma grande lacuna de mercado referente a tipos de ligas disponíveis para sua utilização em processos que utilizem o material no estado semi-sólido. Desta forma, empreenderam-se esforços para desenvolver e testar diferentes tipos de ligas de alumínio com o intuito de sua utilização em processos que já empregam o ESS como matéria-prima.

Assim, este trabalho apresenta a seguinte problemática:

A utilização da liga Al-5,0wt%Si-0,5wt%Mg é válida como material semi-sólido conforme o estudo de sua caracterização realizado?

Para atender aos pressupostos emanados pelo problema objetiva-se:

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência do tempo de permanência em temperatura de semi-sólido na microestrutura da liga Al-5,0wt%Si-0,5wt%Mg.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtenção da liga com microestrutura globular.
- Caracterização da microestrutura da liga.
- Avaliar a microestrutura da liga para uso no estado semi-sólido.

1.3 JUSTIFICATIVA

As ligas de alumínio são amplamente utilizadas pelas indústrias, na fabricação dos mais diversos tipos de peças. Muitas dessas indústrias utilizam processos de fabricação convencionais para a fabricação dessas peças, necessitando, na maioria das vezes, de diversos processos para se chegar ao produto final. A tixotomografia surge como um método

alternativo para a fabricação de peças, diminuindo o número de processos envolvidos para se chegar ao produto final e, conseqüentemente, diminuindo o desperdício de matéria-prima.

Conforme abordado na literatura, existem poucas ligas empregadas para a produção de peças com o material sob estado semi-sólido. As ligas de alumínio mais utilizadas na tixoconformação são as compostas por Al-Si-Mg. Desta forma, foi definido como objeto de estudo, para uma possível utilização como material semi-sólido, a liga Al-5,0wt%Si-0,5wt%Mg.

Neste trabalho são apresentados resultados obtidos a partir de estudos realizados para a liga Al-5,0wt%Si-0,5wt%Mg, obtida via fundição com ultra-refino. Foi realizado o estudo da evolução morfológica da liga no reaquecimento para obtenção de uma fração sólida de 45%, realizado em quatro tempos distintos (0s, 30s, 90s e 210s).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do processamento de materiais sob o estado semi-sólido teve início por volta de 1970, quando Flemings e Spencer, estudaram o comportamento de metais como fluido no estado semi-sólido. Utilizou-se uma liga de Sn-15%Pb como sistema modelo para avaliar a viscosidade da liga parcialmente solidificada, utilizando um viscosímetro Couette (SPENCER, 1971).

Spencer descobriu através de tal experimento, que quando a estrutura dendrítica é quebrada, a liga parcialmente solidificada tem a fluidez de óleo de máquina e exibe um comportamento tixotrópico. Percebendo a importância desta descoberta, Flemings e sua equipe logo realizaram testes na indústria mostrando a viabilidade de duas rotas, designadas “reofundição” e “tixofornabilidade” (SPENCER, 1972).

A reofundição envolve a aplicação de uma força de cisalhamento durante a solidificação do material para produzir uma estrutura semissólida não dendrítica, podendo ser transferida diretamente para um molde ou matriz para produzir o produto final (BROWN, 1993).

De acordo com Brown (1993), a tixofornabilidade é usada para descrever a produção de peças próximas à sua forma final (*near net shape*), com a liga no estado semi-sólido e estrutura não dendrítica em matriz metálica, sendo tixofundição em matriz fechada e tixofornamento em matriz aberta.

2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO PROCESSO DE TIXOCONFORMAÇÃO

Atkinson (2005) ao comparar a tixoconformação com o processo de fundição em matriz, cita as seguintes vantagens e desvantagens:

- **Vantagens:**

1) Eficiência energética - o material não permanece por longos períodos de tempo sob o estado líquido, o que diminui o consumo de energia.

2) Alta produtividade – similar ou até mesmo superior ao processo de fundição por pressão.

3) Facilidade no preenchimento – se dá devido ao comportamento viscoso da liga, auxiliando na ausência de aprisionamento de ar e na diminuição da porosidade causada pela contração, o que permite o uso de tal tecnologia na produção de peças de alta integridade e também em processos que exigem o uso de ligas tratáveis termicamente de alta resistência.

4) Baixas temperaturas no processamento – esta característica reduz o choque térmico sob a matriz, promovendo um aumento da vida útil da matriz, permitindo o uso de materiais não tradicionais em sua confecção e permite também o processamento de ligas com alto ponto de fusão, como por exemplo aços ferramenta.

5) Confecção de matrizes de forma mais simples – devido à baixa carga de impacto na matriz, existe a possibilidade de fabricá-las através de uma rápida prototipagem.

6) Formação de microestruturas uniformes – possibilita um aumento nas propriedades mecânicas do material.

7) Reduzida contração de solidificação – as dimensões finais ficam muito próximas da forma final do produto, não necessitando de muitas operações posteriores para ficar acabada, reduzindo custos com máquinas e desperdício de material.

8) Melhor acabamento superficial.

- Desvantagens:

1) Alto custo da matéria-prima – devido ao reduzido número de fornecedores e ao emprego de um sofisticado processo para a obtenção da liga primária de SSM.

2) Pouco conhecimento do processo – ajuda a aumentar os custos para desenvolvimento do ferramental.

3) Exige mão de obra especializada - inicialmente requer pessoal com alto nível de treinamento e habilidade, se comparado com os processos mais tradicionais.

4) Controle da temperatura – a fração sólida e a viscosidade, no estado semi-sólido, são muito dependentes da temperatura. Ligas com uma estreita faixa de temperatura na região semissólida requerem um controle de temperatura muito rígido.

Com essa comparação entre as vantagens e desvantagens, pode-se dizer que a principal desvantagem da tixoconformação é o custo elevado do ferramental e também da matéria-prima.

2.2 OBTENÇÃO DO MATERIAL NO ESTADO SEMI-SÓLIDO

Para se obter o material no estado semi-sólido e com microestrutura globular ou tixotrópica, a qual se prefere trabalhar devido ao alto grau de deformação, o que diminui a carga a ser aplicada durante o processo, deve-se ocorrer uma fusão parcial ou solidificação parcial do material. Com isso, procurando obter uma microestrutura com finas partículas na fase primária (inferior a 100 μ m de diâmetro), se sua morfologia final for esférica (LOURENÇATO, 2008).

A característica da microestrutura do material semi-sólido obtido está diretamente ligada a fatores como: a velocidade e as condições de resfriamento, a temperatura adotada para o estado semi-sólido e ao tempo que o material permanecerá nesta temperatura.

Existem dois caminhos para obtenção do material no estado semi-sólido:

- Pela solidificação parcial (partindo do estado líquido).
- Pela refusão parcial (a partir do estado sólido).

Nos dois caminhos, o objetivo principal a ser alcançado é a mudança na morfologia da microestrutura do material, de forma a se transformar de uma microestrutura dendrítica para uma globular ou tixotrópica, fato que pode ser observado na figura 1.

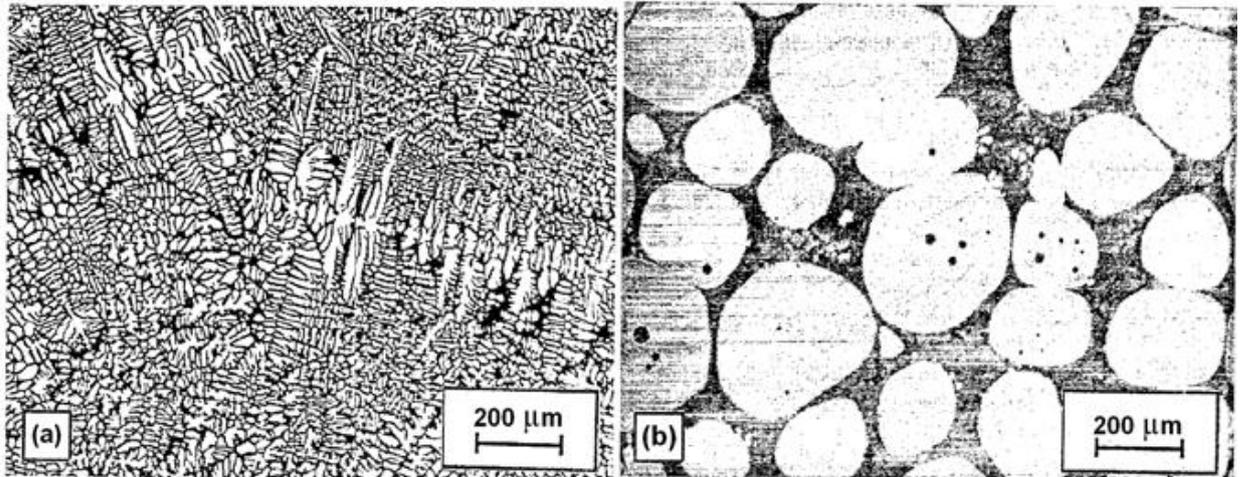


Figura 1- Diferença entre as microestruturas. a) microestrutura dendrítica. b) microestrutura não dendrítica

Fonte: FELTRIN (2004)

Na figura acima, fica evidente a diferença entre as estruturas dendrítica e tixotrópica.

2.2.1 Por Solidificação Parcial

O material a ser obtido sob estado semi-sólido por solidificação parcial é resfriado de forma contínua de uma temperatura superior a linha *liquidus* até uma temperatura entre a *solidus-liquidus*. Após essa temperatura, correspondente a fração sólida, ser atingida, o material permanece nessa mesma temperatura por um determinado tempo, permitindo a globularização do material. Atingido o tempo de globularização correspondente a fração sólida desejada, o material é utilizado para produção do produto final (LOURENÇATO, 2008).

Flemings e Spencer mostraram que a estrutura dendrítica cede lugar para uma esferoidal sob ação de uma força de cisalhamento. O crescimento da dendrita é suprimido e seus braços sofrem uma fragmentação se houver uma agitação do líquido durante a solidificação. O líquido agitado agir sob os braços da dendrita e os dobrarão, submetendo as dendritas a movimentos de flexão. A recristalização fará parecer contornos de grão com forte desorientação, criando-se certa deformação plástica. O contorno de grão é então dissolvido pelo líquido, sendo sua energia elevada, e os braços das dendritas destacam-se do tronco.

Alguns dos processos que possibilitam obter material no estado semi-sólido por solidificação parcial são:

- **Agitação mecânica:** tecnologia utilizada por Flemings et al. (1976) em seus estudos de semi-sólido. Neste processo, a agitação ocorre geralmente por um rotor montado num eixo central de rotação. A taxa de cisalhamento pode ser estimada através da relação da velocidade da extremidade do rotor pela folga entre a ponta do rotor e a parede do molde. O cisalhamento ocasionado pelo agitador durante a solidificação promove a formação de uma estrutura não dendrítica, ou seja, globular ou tixotrópica (FAN, 2002).

- **Agitação eletromagnética:** este processo utiliza o fenômeno de corrente induzida. Uma agitação eletromagnética é ocasionada no líquido em solidificação através da ação de fortes campos eletromagnéticos. As correntes elétricas induzidas pelo campo promovem forte agitação do líquido, causando o rompimento da estrutura em formação e estimulando a multiplicação cristalina e, conseqüentemente a globularização.

Neste processo de agitação eletromagnética, o equipamento é constituído por uma câmara superior, contendo o material numa temperatura acima da temperatura *liquidus* e outra inferior onde se processa a re fundição. As câmaras inferiores são construídas de materiais não magnéticos e refrigeradas, obtendo-se assim uma redução de temperatura aos níveis necessários para se obter uma determinada fração sólida. O metal inicia sua solidificação com estrutura dendrítica, a qual é quebrada através da turbulência gerada no líquido. O campo magnético se mantém em toda zona de solidificação, impedindo o crescimento da estrutura dendrítica (LOURENÇATO, 2008).

2.2.2 Por Refusão Parcial

Lourençato (2008) cita em seu estudo que a refusão parcial é realizada em duas etapas, onde a primeira é caracterizada pela fundição do material e sua estocagem. Na segunda etapa o material é reaquecido até uma temperatura no intervalo *solidus-liquidus*, onde é mantido por um pré-determinado período de tempo para produção da pasta, que em seguida será utilizada para produção do produto final. Neste caso, há também alguns parâmetros que podem influenciar na microestrutura final do material:

- Condições iniciais de solidificação.
- Tratamentos termomecânicos eventualmente submetidos (recozimento, encruamento mecânico).
- As condições de reaquecimento.
- A temperatura e tempo de permanência no intervalo *solidus-liquidus*.

O aquecimento do material, acima da temperatura *solidus*, de estruturas convencionais dendríticas promove a fusão parcial do material, iniciando-se por fases eutéticas em ligas hipoeutéticas e hipereutéticas. A fase primária envolta em líquido tende a se globularizar naturalmente, devido a fenômenos de redução de energia superficial. Sendo assim, mantendo esse material a temperatura e tempo adequados, têm-se como resultado estruturas globulares (LOURENÇATO, 2008).

Alguns dos processos para obtenção de estrutura globular por refusão parcial são:

- Utilização de refinadores de grãos compostos por titânio e boro para produção de pastas para tixofundição: conceito desenvolvido por Laxmanan na General Motors em 1980 (FIGUEREDO, 2001). A utilização de técnicas especiais para refinamento de grãos, sendo combinada com a técnica de resfriamento contínuo, impede-se a formação de grãos colunares, produzindo tarugos com tamanho de grãos menores que 150 μ m e com forma equiaxial ou de rosetas. Logo, quando na refusão, a evolução para uma estrutura globular será rápida. A principal desvantagem deste processo é que estes aditivos permanecem presentes no produto sob a forma de inclusões não metálicas, podendo afetar no processamento do material semi acabado e também nas propriedades mecânicas do produto final (FAN, 2002).

- O processo *Stress induced and melt activated (SIMA)*: processo desenvolvido originalmente por K. P. Young, C. P. Kyonka e J. A. Courtois (FAN, 2002), possuindo uma modificação feita por D. H. Kirkwood e colegas (FAN, 2002), é utilizado para produção de barras de forma industrial e consiste em submeter o material antes da refusão parcial a uma deformação plástica, promovendo assim a recristalização dos grãos. No reaquecimento do material até atingir o estado semi-sólido, o material deformado recristaliza na temperatura abaixo da temperatura *solidus* formando grãos minúsculos, que tornar-se-ão grosseiros e começarão a globularizar numa curta fração de tempo no regime da temperatura de semi-sólido (LOURENÇATO, 2008).

- Refusão parcial de dois tipos de ligas, sob forma de pó, com granulometria fina compactada (YOUNG, 1986). O processo consiste na ideia de que ao aquecer este pó, somente uma liga venha a fundir-se, conservando a outra sob o estado semi-sólido (LOURENÇATO, 2008).

- Processo *Thixomolding*: desenvolvido por Dow Chemical, é um processo industrializado utilizado para ligas de magnésio. Possui como princípio, aquecer o material e injetá-lo dentro de um molde. Há um cisalhamento constante e intenso imposto ao material, no estado semi-sólido, permite quebrar as dendritas, permitindo a formação de partículas sólidas finas e esféricas (FIGUEREDO, 2001).

2.3 PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO NO ESTADO SEMI-SÓLIDO

Conforme Paes (2004), a conformação de metais realiza-se normalmente no estado totalmente sólido, citando como exemplo o forjamento, ou no estado totalmente líquido, onde se pode citar como exemplo o processo de fundição tradicional. A conformação de metais no estado sólido apresenta um alto desempenho, porém, envolve também alto custo de máquinas e ferramental, além de um elevado consumo de energia. Já com a fundição, se pode produzir formas bastante complexas, mas que não possuem um alto desempenho mecânico como nos produtos fabricados a partir da conformação no estado sólido.

A tixoconformação é um processo muito eficiente no que diz respeito à produção *near net shape*, devido às suas várias vantagens quanto aos processos de conformação convencionais. Desta forma, com o material estando sob o estado semi-sólido, é possível combinar as vantagens da conformação no estado sólido com as da conformação no estado líquido, ou seja, será combinada a formabilidade dos metais líquidos com as boas propriedades mecânicas dos metais sólidos, além de reduzir as etapas do processo desde a matéria-prima até o produto acabado (PAES, 2004).

O processo permite ainda a redução de custos substanciais para processos de forjamento e o aumento da qualidade e confiabilidade dos fundidos. Porém, o uso de metais solidificados convencionalmente não é feito pela tixoconformação, pois se aquecido até a região semissólida, ele apresentaria uma rede de dendritas envoltas por uma fase líquida, levando à formação de trincas a quente e zonas de segregação (PAES, 2004).

A figura 5 mostra os principais processos de tixoconformação.

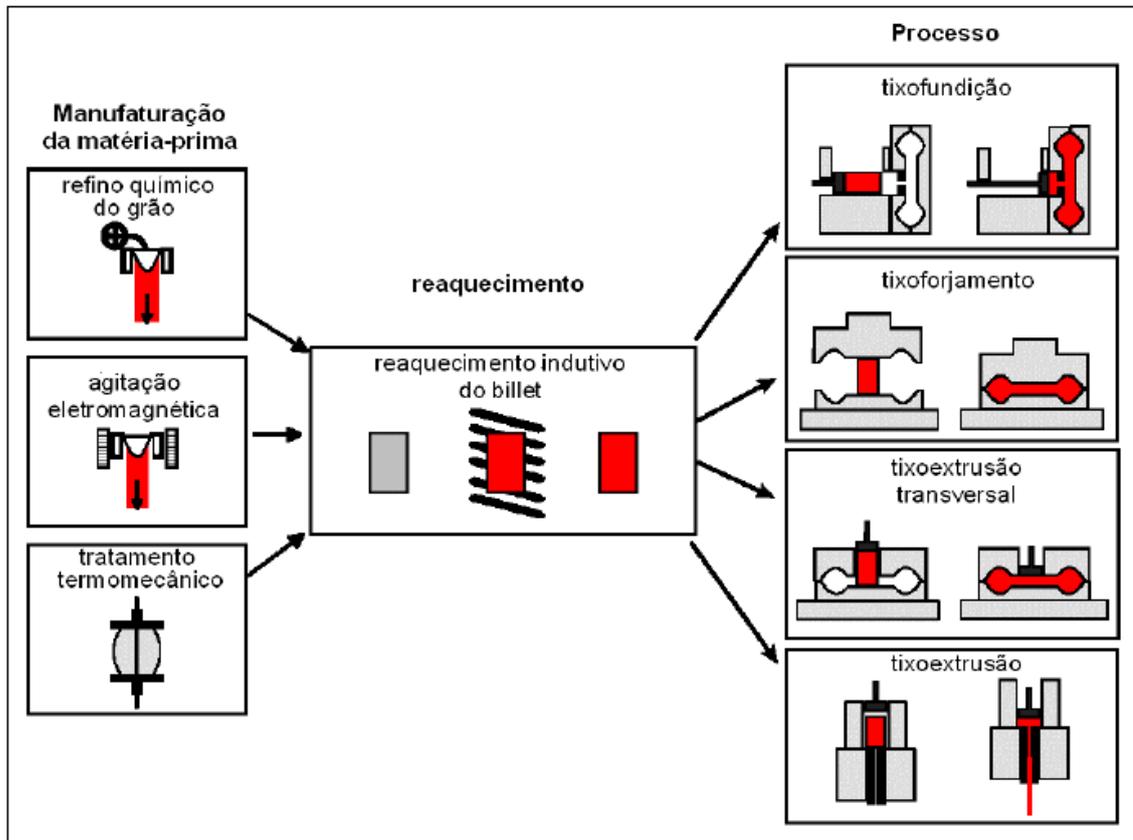


Figura 2- Processos de tixoconformação
Fonte: KOPP (2001)

Dentre os processos ilustrados na figura 5, pode-se citar a tixofundição como sendo o primeiro processo a utilizar o metal no estado semi-sólido para fabricação de peças.

2.3.1 Tixofundição

A tixofundição por injeção pode ser considerado o processo pioneiro no processamento do material sob o ESS, sendo também o mais utilizado atualmente. O equipamento geralmente utilizado neste processo é a máquina injetora do tipo horizontal, muitas vezes com capacidade maior do que as comumente utilizadas para injeção de alumínio no estado líquido, associados a ela ainda existem fornos de reaquecimento de tarugos (previamente reofundidos). Tal processo é muito utilizado por países desenvolvidos, principalmente para a fabricação de peças para a indústria automobilística, mais especificamente, para peças de alumínio ou magnésio (LOURENÇATO, 2008).

Segundo Alves (2011), quando comparado com o processo de fundição por injeção convencional, a tixofundição possui algumas vantagens, que são:

- Pelo fato do material de trabalho ser utilizado sob o estado semi-sólido, a emissão de gases prejudiciais a atmosfera e até mesmo ao operário é evitada.

- Redução na temperatura de trabalho, sendo a temperatura do lingote abaixo da temperatura *liquidus*.

- Redução no índice de defeitos dos produtos pelo fato da eliminação de impurezas, escórias e fundentes e, também devido a diminuição da temperatura de trabalho fazendo com que as distorções térmicas e contrações de solidificação sejam menores.

- Diminuição na quantidade de lubrificantes utilizados nos moldes.

- Menor porosidade gasosa, devido ao fluido penetrar no molde com fluxo laminar.

- Tempos menores para solidificação.

- Pelo fato da temperatura de processamento ser menor, ocorre menor desgaste dos moldes, aumentando a vida útil dos mesmos em torno de 20%.

As peças produzidas por este processo possuem uma complexidade igual ou até mesmo superior à das peças produzidas por fundição injetada. A seguir, apresentam-se as desvantagens da tixofundição em relação à fundição injetada (ALVES, 2011):

- Alto custo da matéria prima, ou seja, do lingote refundido.

- Elevado custo do forno de indução utilizado para o aquecimento dos lingotes.

- Restrição na composição da liga.

A figura 6 ilustra o processo de tixofundição.

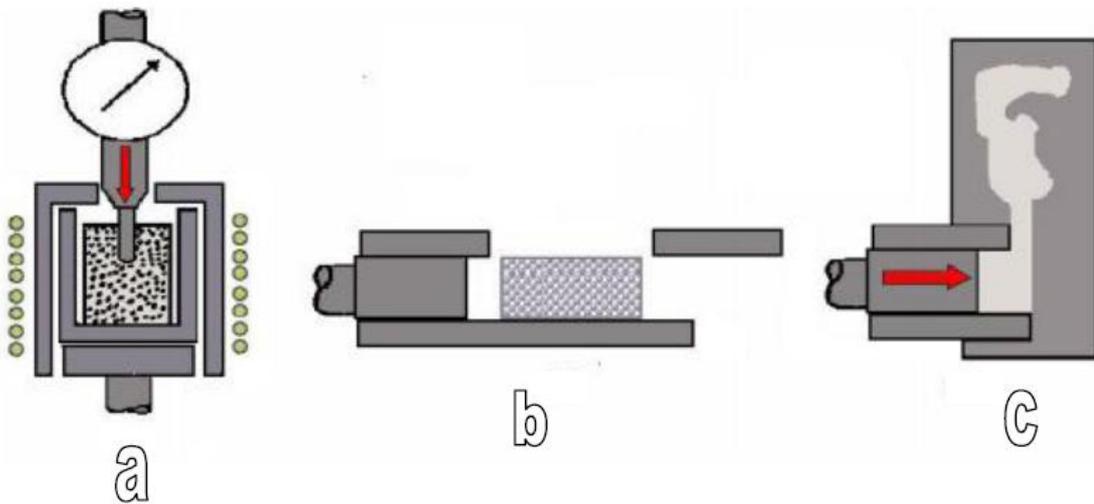


Figura 3- - Processo de tixofundição. a) Aquecimento até ESS; b) Material colocado na máquina de injeção; c) Tixofundição injetada
Fonte: OLIVEIRA (2008)

A figura 6 ilustra o processo de tixofundição desde o aquecimento da matéria-prima até o ESS e a sua injeção na matriz.

2.3.2 Tixoextrusão

De acordo com Hirt et al. (2009), a extrusão no estado sólido é um processo de conformação onde um lingote é inserido primeiramente em um recipiente e depois ele é extrudado através da matriz de conformação por um pistão. O processo da tixoextrusão ocorre da mesma maneira, porém com o material no estado semi-sólido.

Segundo Lourençato (2008), os resultados obtidos pela tixoextrusão são:

- A pressão necessária para a tixoextrusão é cerca de 75% menor que a pressão utilizada pelo processo de extrusão convencional a quente.
- Através de apenas um passe do material, consegue-se uma redução muito maior do que na extrusão convencional, devido à baixa pressão a ser utilizada.
- O líquido atua como lubrificante.
- Os materiais que possuem baixa deformabilidade são extrudados com mais facilidade no estado semi-sólido.

2.3.3 Tixolaminação

O processo de tixolaminação é estudado para a aplicação na fabricação de chapas e barras. Segundo Kiuchi e Sugiyama (1994), estudando o comportamento da liga AA7075 para a laminação no ESS, chegaram às seguintes conclusões:

- Quando existem altas frações de líquido e baixa razão de deformação, a fase sólida mantém sua forma globular durante a deformação, não tendo muito contato entre os glóbulos.
- Para uma elevada fração sólida e alta razão de deformação, ocorre a deformação dos grãos, gerando assim uma estrutura fibrosa.
- Algumas vezes, a estrutura obtida através desse processo não é homogênea, pelo fato do líquido ser rejeitado para as bordas do produto e o sólido se concentrar no meio, ocasionando variação nas propriedades mecânicas.
- Produtos gerados pela tixolaminação possuem bom alongamento.
- Através de tratamento térmico é possível eliminar heterogeneidades da estrutura.
- Os valores de tensão em produtos de tixolaminação são menores do que na laminação convencional.

2.3.4 Tixoforjamento

Dois estágios são envolvidos em operações de tixoforjamento: o aquecimento ou reaquecimento da matéria prima e então a conformação propriamente dita. Assim, pode-se obter o material reofundido isoladamente, armazená-lo sob o estado sólido e reaquecê-lo, atingindo o estado semi-sólido para a sua conformação. Pode-se ainda preparar a pasta semissólida na matriz de forjamento, por fusão parcial controlada, e em seguida conformá-la (PAES, 2004).

Conforme Paes (2004), as variáveis que influenciam no processo são:

- Taxa de deformação: deve-se ter um controle da tensão aplicada e do tempo de aplicação da mesma.

- Estrutura interna da matéria prima: a estrutura deve ser globular com parâmetros como o tamanho de grão, tamanho de glóbulo, fração sólida e fator de forma conhecidos.

- Composição química da liga: através dela é definida a temperatura de trabalho, ou seja, delimita a temperatura da região semissólida.

- Temperatura e tempo de trabalho: a temperatura é a temperatura na qual o material atinge o estado semi-sólido. O tempo, é o tempo de permanência do material na temperatura de trabalho.

- Ferramenta de trabalho: o cuidado que se deve ter com a matriz de tixoforjamento é manter sua temperatura a ponto de que o material refundido não sofra um resfriamento excessivo.

Segundo Alves (2011), algumas vantagens e desvantagens do tixoforjamento são:

- Boa reprodução da forma da matriz.
- Facilidade para utilização nas ligas Al-Si.
- Viabilidade nas ligas com alto ponto de fusão.
- Elevada vida útil da matriz.
- Tamanho limitado dos lingotes quanto ao diâmetro.
- Elevado custo dos lingotes refundidos.
- Alto investimento nos equipamentos.
- Necessita de pessoal qualificado.
- Propriedades mecânicas um pouco inferiores ao forjamento convencional.

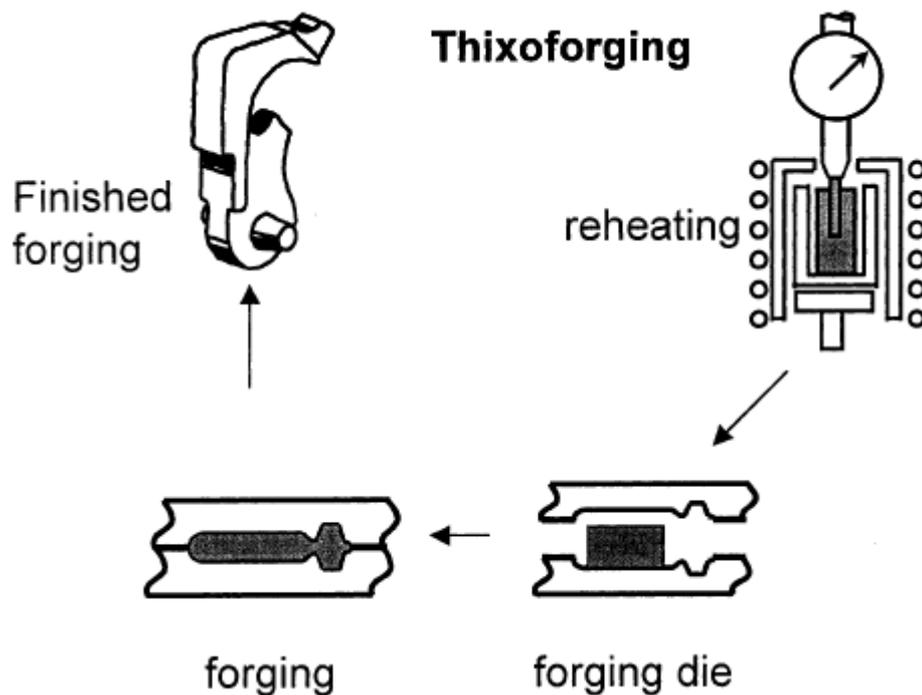


Figura 4- Diagrama esquemático do processo de tixoforjamento
Fonte: FAN (2002)

2.4 MECANISMOS DE SOLIDIFICAÇÃO

A estrutura que é formada após a solidificação do material é responsável por determinar as propriedades do produto final, não apenas em peças de fundição que já apresentam sua forma definitiva, mas também em produtos que serão utilizados para fabricação de fios, chapas ou forjados. As características mecânicas desses produtos irão depender do tamanho de grão, espaçamentos dendríticos, espaçamentos lamelares ou fibrosos, das heterogeneidades da composição química, do tamanho, forma e distribuição das inclusões, da porosidade formada, entre outros fatores. Depois de fixada a composição química da liga metálica, o processo de solidificação será o responsável por determinar a microestrutura resultante (GARCIA, 2001).

A microestrutura que resulta de uma solidificação convencional é a estrutura dendrítica, que se desenvolve a partir de duas grandes fases, ocorrendo primeiramente a nucleação de partículas sólidas no líquido e, posteriormente, o crescimento dos núcleos. O refinamento da estrutura depende diretamente da taxa de resfriamento utilizada para sua

obtenção. Sendo o resfriamento de uma forma mais rápida, a estrutura se tornará mais refinada caso o número de núcleos aumente (LOURENÇATO, 2008).

Dependendo de como se dão as condições de solidificação do material, a morfologia dendrítica pode ser coquilhada, colunar ou equiaxial.

De acordo com Kurs (2002), inicialmente ocorre o surgimento de um núcleo sólido em meio ao líquido, ou até mesmo na parede do molde. Em um curto período de tempo, esses núcleos aumentam seu tamanho e formam uma zona equiaxial externa, também chamada de coquilhada. As dendritas desta zona equiaxial externa podem crescer paralelamente ou de forma oposta à direção do fluxo de calor, a qual avança mais rapidamente. Existem ainda outras orientações excessivamente grandes, que ajudam na formação da zona colunar. Além do estágio de crescimento das dendritas colunares, existe ainda o crescimento dos braços dendríticos que se destacam e crescem independentes, tendendo a ter formato equiaxial devido ao seu calor latente ser extraído diretamente no superesfriamento do metal. Esta é a região denominada de zona equiaxial interna.

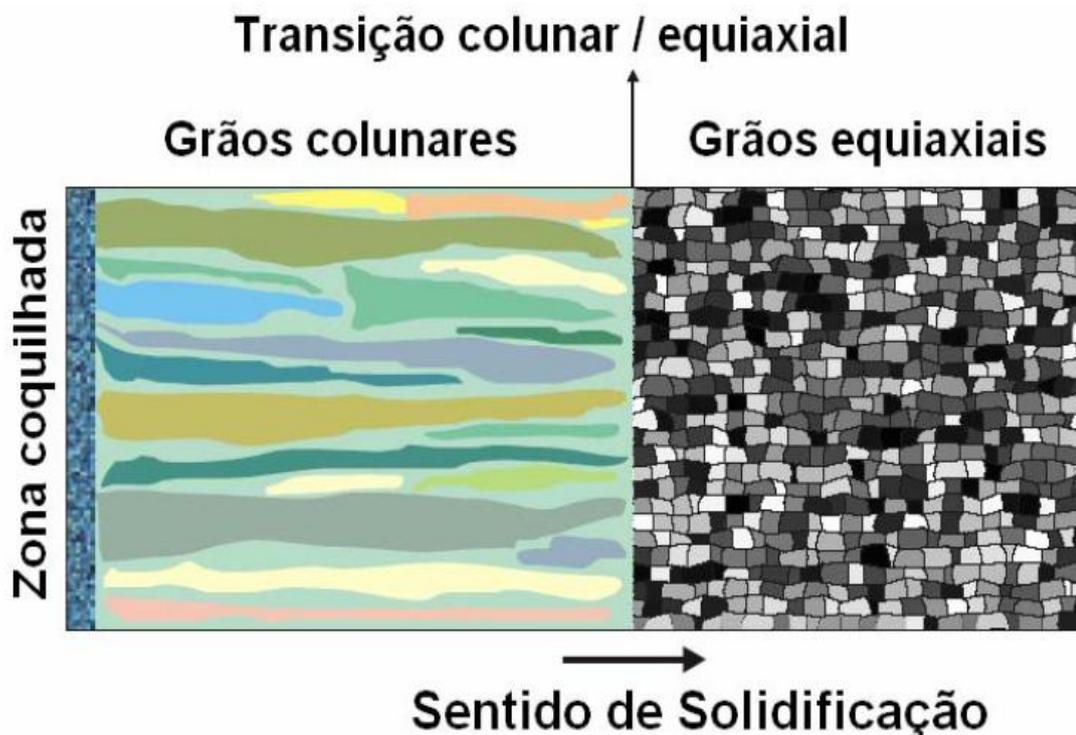


Figura 5- Estrutura dendrítica colunar e dendrítica equiaxial
Fonte: GOULART (2005)

A figura 2 mostra a diferença entre as zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial.

2.4.1 Nucleação

Segundo Lourençato (2008), a nucleação pode ser definida como a formação de uma nova fase a partir de outra, ocorrendo em posições específicas, sendo caracterizadas por contornos bem definidos separando-a do meio que a gerou. Na solidificação, ocorre a formação de partículas de sólido em meio ao líquido. Existem dois tipos de nucleação: homogênea e heterogênea.

A nucleação homogênea ocorre quando o sólido é formado dentro do próprio líquido, sem o auxílio de estimulante energético externo. Nos metais, pode ocorrer o surgimento de regiões de ordenação cristalina de curto alcance, mesmo a temperaturas acima da temperatura de fusão. Essas regiões constituem-se de embriões da fase sólida e, não são estáveis, podendo continuar instáveis mesmo a temperaturas abaixo do ponto de fusão (KURS, 2002; AMAURI, 2001).

A nucleação heterogênea ocorre sob ação catalizadora de um agente externo num meio líquido. Os agentes catalizadores podem ser partículas sólidas em suspensão no líquido, paredes do molde ou compostos inseridos propositalmente como refinadores de grãos. Esses agentes atuam como facilitadores energéticos da nucleação. Sendo assim, a nucleação inicia-se exatamente nessas partículas estranhas ao sistema (PAES, 2004; KURS, 2002; GARCIA, 2001).

2.4.2 Zona Coquilhada

Segundo Mager (2008), a zona coquilhada é constituída por uma camada de grãos cristalinos com orientações aleatórias, possuindo geralmente pequenas dimensões, localizados juntos às paredes do molde, onde, logo que o líquido entra em contato ele é super-resfriado, pelo fato das paredes estarem à temperaturas muito inferiores.

Em geral, esta zona não ocupa mais que uma espessura de milímetros, formada por pequenos grãos com orientações cristalina aleatórias, situada na maioria das vezes na parede do molde. O tamanho desta zona depende de diversos fatores como: propriedades termofísicas do material do molde, o coeficiente de transferência de calor material/molde e a temperatura de vazamento do material (LOURENÇATO, 2008).

Quando o metal é vazado com alto grau de superaquecimento e as paredes do molde estão frias, temperaturas abaixo da temperatura de nucleação são atingidas apenas por uma fina camada de líquido, formando então uma pequena zona coquilhada. Quando o vazamento do líquido se dá a uma temperatura muito próxima da temperatura de transformação, a zona coquilhada se torna maior e, se o molde for pré-aquecido antes do vazamento esta zona torna-se praticamente inexistente (GARCIA, 2001; KURS, 2002).

2.4.3 Zona Colunar

A zona colunar é formada por grãos cristalinos alongados e alinhados paralelamente à direção do fluxo de calor. A constituição da zona colunar é iniciada a partir do crescimento de grãos formados de núcleos oriundos do resfriamento rápido do líquido no início da solidificação, com direção cristalográfica favorável ao crescimento na direção da extração de calor. Tais núcleos possuem a tendência de crescer mais rapidamente que os demais, bloqueando o crescimento dos outros grãos da zona coquilhada. Estes grãos da zona colunar possuem dimensões muito maiores que os grãos da zona coquilhada, como pode ser observado na figura 3 (MAGER, 2008).

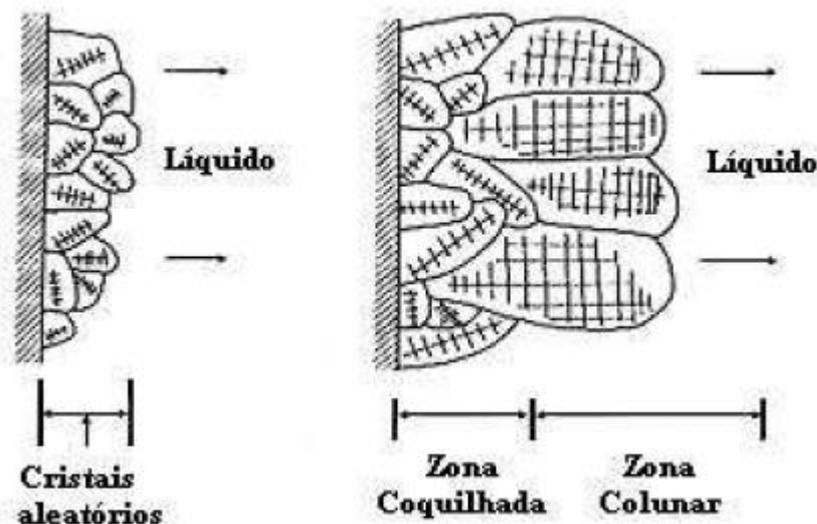


Figura 6- Representação esquemática da zona coquilhada e zona colunar
Fonte: GARCIA (2001)

A figura 3 ilustra a diferença de tamanho entre os grãos da zona coquilhada e da zona colunar.

2.4.4 Zona Equiaxial

O crescimento de grãos colunares em direção ao centro do lingote continua enquanto o calor é retirado progressivamente, através da condução, por meio do sólido e sendo conduzido ao molde. Já o líquido na região central do molde também pode sofrer super-resfriamento, tanto por efeito térmico quanto constitucional e, quando isso ocorre qualquer embrião sólido que surgir poderá crescer aleatoriamente, formando os conhecidos cristais equiaxiais. Assim, o crescimento da zona colunar é bloqueado pelo aparecimento de uma zona equiaxial central (GARCIA, 2001).

A formação da zona equiaxial central é favorecida por altos teores de elementos de liga e baixos sobreaquecimentos de vazamento. A temperatura de sobreaquecimento aumentando, diminui-se a tendência para a formação de grãos equiaxiais, sendo o comprimento da zona colunar maior. Porém, os grãos equiaxiais que conseguem se formar possuem maior dimensão (MAGER, 2008).

Ainda, a zona equiaxial pode ser totalmente ausente em produtos fundidos de pequena secção. A zona equiaxial é uma região formada por pequenos grãos no centro do molde como resultado da nucleação de cristais ou da migração de fragmentos de braços dendríticos, que são arrastados para o centro por correntes de convecção do líquido. Essa zona é a mais propícia para a formação da estrutura conhecida como globular, devido a geometria das dendritas de solidificação (LOURENÇATO, 2008).

A figura 4 ilustra a três zonas descritas anteriormente.

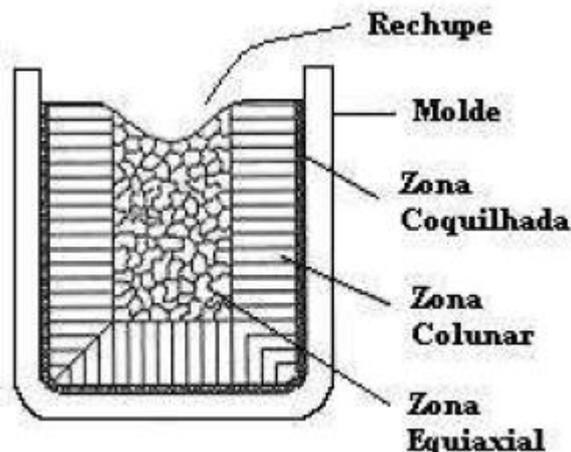


Figura 7- Representação esquemática da zona coquilhada, zona colunar e zona equiaxial
 Fonte: GARCIA (2001)

2.5 VISCOSIDADE EM ESTRUTURAS REOFUNDIDAS

A viscosidade é um parâmetro reológico de extrema importância em materiais no estado semi-sólido, sendo equivalente ao parâmetro fluidez, para materiais líquidos, e módulo de resistência para materiais sólidos. Ela indica a capacidade que o material semi-sólido possui em preencher um molde e, auxilia a determinar a força necessária para ocorrer o fluxo do material e também sua deformação (LASHKARI, 2007).

Os primeiros estudos referentes ao comportamento reológico de pastas reofundidas foram realizados por Spencer em 1972, utilizando a liga de Sn-15%Pb. Spencer percebeu que a liga em estado semi-sólido apresentava em seu escoamento o comportamento de um material não ideal e inelástico, ou seja, apresentava deformação por escoamento viscoso não-Newtoniano do tipo visco-inelástico.

Fluidos Newtonianos são aqueles que apresentam uma viscosidade constante, independentemente da tensão que está sendo aplicada sobre o material. Já os não-Newtonianos não possuem uma linearidade no seu comportamento, quando a tensão que está sendo aplicada varia. Desta forma, para definir o comportamento de um fluido não-Newtoniano, utiliza-se um parâmetro conhecido como viscosidade aparente.

Já as pastas reofundidas apresentam um comportamento tixotrópico, ou seja, a viscosidade aparente além de depender da tensão que está sendo aplicada, irá depender também do tempo que esta tensão será aplicada sobre o material.

O viscosímetro utilizado por Spencer para estudar o comportamento viscoso dos materiais no estado semi-sólido era do tipo Couette. Este tipo de viscosímetro é muito complexo e verifica o comportamento viscoso dos materiais em situações muito controladas, distantes das situações em aplicações práticas.

Um ensaio mais simples para caracterização de material semi-sólido é o ensaio de compressão proposto por Laxmanan (1980). Este ensaio consiste na compressão entre placas paralelas a quente para caracterização reológica do material no estado semi-sólido.

2.6 REFINAMENTO DA LIGA

Ligas de Al-Si são muito utilizadas como matéria-prima em fundições, devido às suas boas propriedades apresentadas durante e, até mesmo após o processo de fundição. As principais propriedades são: alta fluidez, baixa susceptibilidade ao trincamento, alta resistência à corrosão, boa soldabilidade, fácil brasagem e baixo coeficiente de expansão térmica. Estas ligas apresentam uma vasta área para aplicação, dentre as quais se destacam as indústrias marítimas, automobilísticas, elétricas, alimentícias e até mesmo indústrias voltadas para a aviação. São utilizadas para a fabricação dos mais variados componentes, desde a produção de blocos de motor até peças estruturais, que exigem sempre um alto grau de confiabilidade (KORI, 2000).

Quando se procura alcançar uma estrutura equiaxial, é necessário reprimir o crescimento de grãos colunares. Para que isso ocorra devem ser obedecidas duas condições, possibilitando um efetivo refino de grão. Primeiramente, introduzem-se no material fundido potentes substratos onde pode ocorrer uma nucleação heterogênea. A segunda condição é de que as condições composicionais, térmica e cinética, do fluido devem permitir aos substratos se tornarem ativos para nucleação, formando uma rede de grãos equiaxiais. Porém, grãos nucleados não podem crescer muito rapidamente, pois os primeiros que se formam consomem os núcleos menores, os quais formariam futuros grãos equiaxiais (PAES, 2004).

Na solidificação de ligas de fundição há a possibilidade de formação de três morfologias de grãos, as equiaxiais, colunares e coquilhada. Nas indústrias, são adicionados inoculantes para reprimir o crescimento das morfologias colunares e coquilhada, tendo como objetivo sempre a formação de uma morfologia equiaxial. Tal morfologia, a ser alcançada, proporciona melhor alimentação dos moldes reduzindo a porosidade devido à contração, menor ocorrência de microporosidades e melhor usinabilidade (MOHANTY, 2001).

Os inoculantes mais utilizados em ligas de alumínio são: Ti-Al, Al-Ti-C, Al-B, Al-Ti-B. Alguns dos benefícios gerados pela técnica do refino de grão são o aumento da resistência mecânica, acabamento superficial uniforme e reproduzível e a redução das tensões residuais internas (MAXWELL E HELLAWELL, 1975).

Dentre as técnicas de refino de grão, algumas são baseadas sobre princípios térmicos, mecânicos ou termomecânicos e químicos. As técnicas baseadas no princípio químico

baseiam-se no princípio de adição de elementos de liga ou de substratos de nucleação heterogênea (LOURENÇATO, 2008).

2.7 LIGAS Al-Si-Mg

As ligas binárias Al-Si são muito utilizadas pela indústria, seja na área da fundição ou nos processos de tixoconformação. O silício é o segundo elemento mais abundante no alumínio, originado da sílica ou do silicato de bauxita. Sua adição no alumínio puro tem como objetivo conceder alta fluidez ao metal líquido e boas propriedades mecânicas, através de compostos que permitem que a liga seja tratada termicamente. O diagrama de fases é um eutético simples, onde as fases em equilíbrio são o Al e Si, como mostrado na figura 8 (PAES, 2004; LOURENÇATO, 2008).

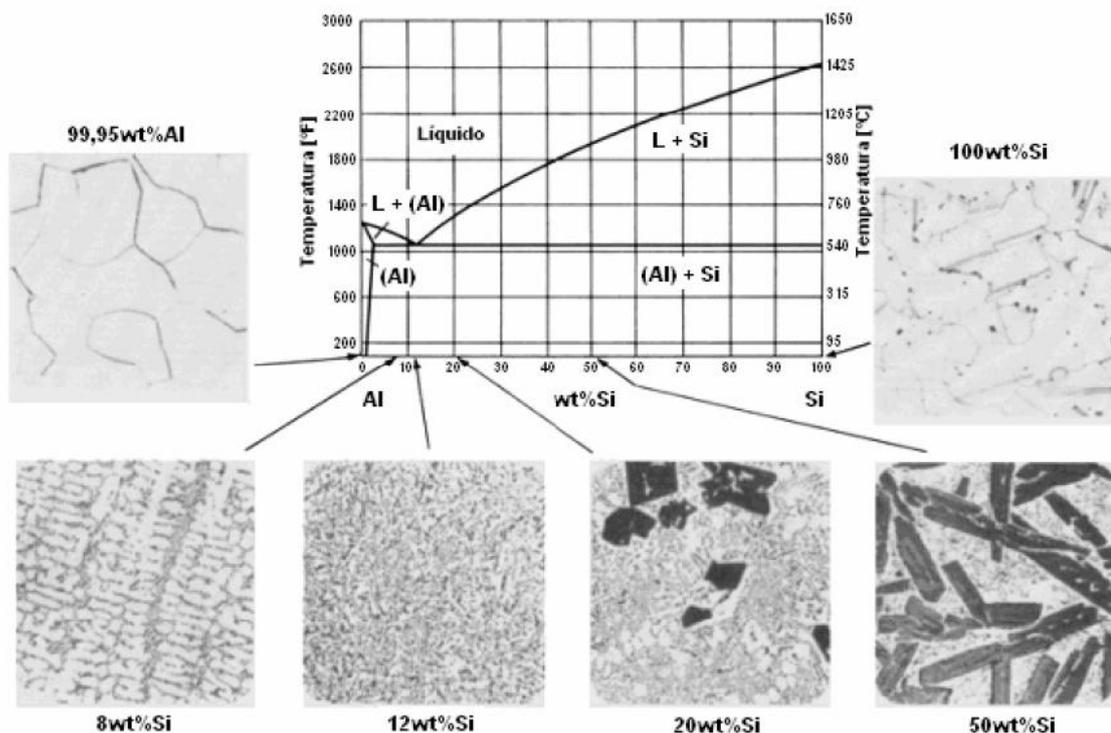


Figura 8- Diagrama de fases Al-Si
Fonte: WAMUZEK (2004)

As ligas binárias simples constituem-se por cristais de alumínio que são endurecidos por átomos de silício em solução sólida e por micro dispersão de outra fase formada por cristais duros e frágeis de silício. Ligas eutéticas são muito utilizadas por apresentarem boas propriedades de fundição e também uma combinação de resistência e outras propriedades

funcionais. A resistência de uma liga eutética pode ser controlada pela fina dispersão de partículas de silício numa matriz dúctil, havendo a necessidade do refino do silício através da adição de sódio ou resfriamento rápido (LOURENÇATO, 2008).

As ligas hipoeutéticas possuem um menor número de cristais de silício, porém a matriz pode ser envelhecida caso a liga possua uma pequena quantidade de magnésio. Silício e magnésio podem formar uma fase intermetálica de endurecimento de Mg_2Si , precipitando na matriz de α -alumínio e aumentando o limite de escoamento. O composto Mg_2Si pode ser dissolvido e dispersado na matriz através do tratamento de solubilização, seguido de envelhecimento, assim, uma liga, mais resistente que qualquer liga binária e preservando as boas propriedades de fundição, é formada. A quantidade máxima de magnésio que pode ser adicionada na presença simultânea de α -alumínio e Mg_2Si está entre 0,45wt% e 0,75wt%, em 555°C. Ainda, quantidades pequenas de magnésio podem ser adicionadas à liga eutética com o intuito de se obter uma liga que seja tratável termicamente, similar à liga hipoeutética.

Diagramas do silício podem ser vistos na figura 9.

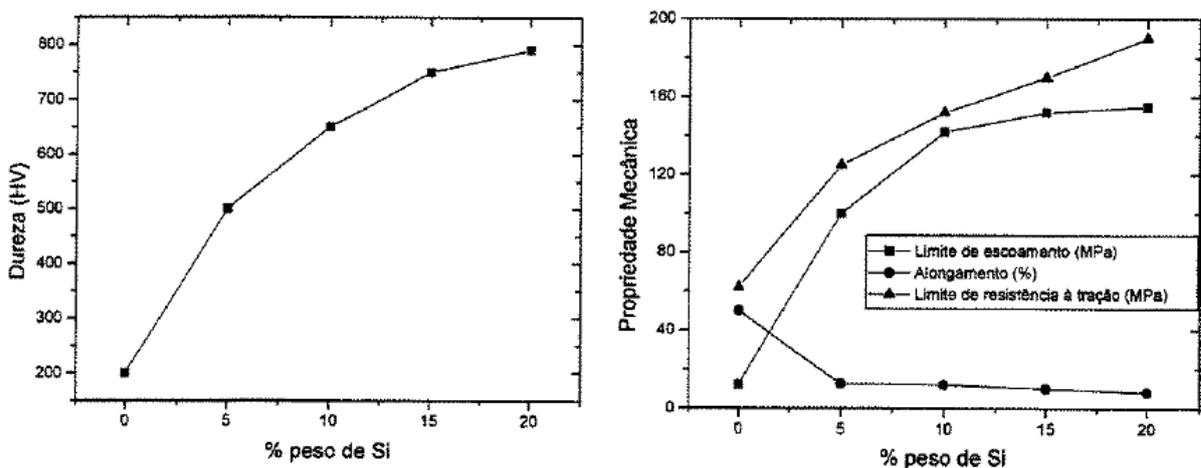


Figura 9- Propriedades versus teor de Si
Fonte: PAES (2004)

A figura 9 mostra a variação das propriedades do silício em função de seu teor. Com o tratamento térmico há um aumento na resistência, porém menor do que se pode ganhar no trabalho a frio. O silício não tem um efeito decisivo no refino de grão durante a solidificação do alumínio, mas afeta a fragilidade a quente na fundição e também na soldagem. A resistência de ligas Al-Si diminui muito rápido com o aumento da temperatura (PAES, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir são descritos os materiais e métodos utilizados para alcançar os resultados, iniciando-se pela fundição dos lingotes, partindo para a usinagem destes, corte dos corpos de prova, furação dos corpos de prova, tratamento de globularização, preparação das amostras, ataque químico, captura de imagens em microscópio eletrônico, certificação da fração sólida e por fim foi medido o tamanho médio dos glóbulos.

3.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO DOS LINGOTES

A escolha dos materiais foi realizada de acordo com a necessidade na porcentagem necessária de alumínio, silício e magnésio. Para se chegar à porcentagem esperada de 5% de silício, foram utilizados dois tipos de materiais, alumínio puro e alumínio A356. Para a obtenção da quantidade de 0,5% de magnésio, que é considerada a quantidade que proporciona melhor evolução morfológica, adiciona-se esta, posteriormente, juntamente com o refinador de grãos. Em razão da alta reatividade do magnésio contido na liga 90wt%Mg-10wt%Al e do rápido efeito do refinador de grãos da liga Al-5wt%Ti-1wt%B, ambas foram adicionadas ao banho no cadinho aproximadamente 5 minutos antes de seu vazamento nas lingoteiras.

Para se definir o valor exato em massa de cada uma das ligas, necessário para compor uma massa total de 3kg de vazamento, foi realizado um balanço de massa por intermédio de um equacionamento simples. Optou-se em realizar o vazamento de uma única vez, para não haver disparidade na composição química entre os lingotes.

Para a fusão do material que compôs a carga de 3kg foi utilizado um forno resistivo que foi primeiramente aquecido até chegar a temperatura de 750 °C. Para a deposição do material foi utilizado um cadinho de Carbetto de Silício pré-isolado com cimento tipo QF180 (Carbolante). O volume do cadinho levou aproximadamente 3 horas para chegar a sua fusão total. Conforme já relatado anteriormente, o refinador e a liga Al-5wt%Ti-1wt%B, ambos foram adicionadas ao banho do cadinho aproximadamente 5 minutos antes de seu vazamento nas lingoteiras.

O vazamento da liga desejada foi realizado em molde permanente. Foram utilizadas lingoteiras de aço que possuíam o diâmetro interno cônico, variando de 30 a 32 mm para

facilitar a extração do material solidificado, o diâmetro externo era de 36 mm e a altura de 250mm. As lingoteiras precisaram ser preparadas para receber o material fundido, sendo inicialmente colocadas num forno tipo “mufla” e aquecidas até a temperatura aproximadamente 100°C, e posteriormente mergulhadas num banho de alumina e água para criar uma camada de alumina interna. Após criada esta camada de alumina, as lingoteiras retornavam ao forno para eliminar a água contida na solução. Esta camada tinha como função evitar a aderência do alumínio nas lingoteiras.

Para se realizar a análise da composição química do material obtido no vazamento, utilizou-se um lingote referente ao meio da fundição. Este lingote foi cortado ao longo de seu comprimento com o auxílio da serra mecânica, e de uma das partes foi removida uma amostra para análise. A superfície desta amostra foi submetida a um lixamento, a qual posteriormente foi analisada por um equipamento de fluorescência de raios-X. Nesta análise química, pode-se verificar que os resultados referentes aos teores de Si, Mg, Ti, Fe, Cu, Ni e outros elementos foram satisfatórios. Na tabela 1, pode ser verificada a composição química obtida pela análise da composição química da amostra.

Tabela 1- Composição química da liga obtida no trabalho (em wt%)

Liga	Si	Mg	Ti	Fe	Mn	Cu	B	Al
Al-5,0wt%Si- 0,5wt%Mg	5	0,5	0,17	0,13	0,03	0,06	0,004	balanço

Fonte: Autoria própria

3.2 USINAGEM DOS LINGOTES

Os lingotes foram então usinados, primeiramente para a retirada de rebarbas. Após essa retirada, e ainda utilizando-se o torno, usinaram-se os lingotes para que ficassem com o diâmetro previamente especificado para a confecção dos corpos de prova.

3.3 PROCESSO DE CORTE DOS CORPOS DE PROVA

Para fins de estudo foram feitos corpos de prova em dimensões previamente especificadas, cujas dimensões são de 20mm de diâmetro e 15mm de espessura.

Para a fabricação de tais corpos, após os lingotes terem sido torneados até atingirem o diâmetro requerido, foram então levados até o laboratório de materiais, onde, através da policorte, foram cortados na espessura desejada. Tal opção de corte dos corpos foi escolhida pelo fato da policorte possuir um corte mais uniforme nas peças, o que era desejado devido aos processos posteriores a serem feitos nestes corpos.

3.4 FURAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Após os corpos de prova terem sido cortados no tamanho desejado, foram realizados furos com o diâmetro de 2,5mm, onde a profundidade atingia aproximadamente a metade da espessura do corpo para que se pudesse encaixar o termopar e assim conseguir monitorar a temperatura em que o corpo de prova se encontrava dentro do forno, no momento do tratamento térmico. Tal procedimento é imprescindível para realização do estudo, pois a temperatura para realização do mesmo deve ser sempre a temperatura previamente estipulada para se obter a fração sólida desejada, neste caso é de 45%, não podendo esta temperatura ser nem abaixo e nem acima de 604°C, temperatura utilizada para realizar o estudo.

3.5 TRATAMENTO DE GLOBULARIZAÇÃO

Para a se fazer o tratamento térmico nos corpos de prova foi utilizado um forno tipo “mufla”, onde este foi aquecido a uma temperatura de 630°C, e então inserido o corpo de prova dentro do forno com o termopar devidamente fixado, seguiu-se os mesmos passos para os 4 tempos (0s, 30s, 90s e 210s) nos quais os corpos de prova deveriam permanecer à uma determinada temperatura, que neste caso, para corpos com 5% de Si, era de 604°C. O tempo para que estes corpos atingissem esta temperatura deveria, de preferência, ficar entre 10 e 15 minutos, e para tais corpos ficou em aproximadamente 11 minutos.

Para o resfriamento dos corpos de prova após a retirada do forno, utilizou-se um recipiente grande com bastante água, o qual foi colocado em frente ao forno. Quando os corpos de prova atingiam a temperatura desejada, e após atingido também o tempo de permanência dos mesmos a esta temperatura, eles eram retirados com o auxílio de uma pinça e então largados neste recipiente, para se obter um resfriamento rápido.

Os tempos citados anteriormente dizem respeito ao tempo de permanência dos corpos de prova dentro do forno, após atingida a temperatura desejada. No caso do tempo de 30 segundos, por exemplo, o corpo irá ficar dentro do forno por 30 segundos após atingida, neste caso, a temperatura de 604°C, e assim será para os demais corpos. No caso do tempo 0 (zero) segundos, imediatamente quando atingida a temperatura o corpo é retirado do forno.

3.6 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Depois de completados os tratamentos nas amostras, foi realizada a preparação dos corpos de prova para as análises macrográficas seguindo a seguinte ordem:

3.6.1 Corte

Os corpos de prova foram cortados na mesma policorte utilizada para o corte dos lingotes, utilizando-se disco de corte novo, para se evitar contaminação por partículas de outros materiais que foram cortados na mesma, e também para se obter um corte mais uniforme, o que facilitaria um processo posterior, que é o de lixamento e polimento dos corpos de prova. Tais corpos foram cortados novamente para poder ser feito o processo de embutimento, o qual não seria possível sua realização com o tamanho original dos corpos, mas o principal motivo deste corte, é para poder se obter uma visualização, através do microscópio, do interior do corpo de prova, para um posterior estudo de suas microestruturas, e conseqüente obtenção dos resultados.

3.6.2 Embutimento

Utilizando-se a embutidora do laboratório de materiais, o corpo de prova cortado foi embutido com baquelite de cor preta, com a pressão devendo ficar entre 150 e 200 N/m², e permanecendo por um tempo de aproximadamente 10 minutos. Após embutidos os corpos passaram para a etapa seguinte, que é o lixamento.

3.6.3 Lixamento

Com a amostra embutida, partiu-se para o lixamento feito em uma politriz padrão, utilizando-se as lixas de desbaste de granulometrias 320, 400, 600, 1200 Mesh, nesta ordem. Para a realização desta etapa deve-se primeiramente seguir obrigatoriamente a ordem das lixas, indo sempre da mais grossa para a mais fina, segundo a ordem citada anteriormente. No processo de lixamento propriamente dito, deve-se sempre realizar o mesmo perpendicularmente aos sinais deixados pela lixa utilizada anteriormente, e assim até chegar à lixa com granulometria de 1200 Mesh. Após terminada esta etapa, parte-se para o polimento.

3.6.4 Polimento

Nesta etapa faz-se o polimento dos corpos de prova com duas pastas de diamante. A primeira é de 0,3 μm , eliminando os pequenos riscos deixados pela lixa de 1200 mesh e melhorando um pouco o acabamento superficial. Terminada esta fase, parte-se para a pasta de diamante de 0,1 μm , que dará o acabamento superficial desejado para a realização dos estudos no microscópio. Lembrando que sempre deve-se utilizar panos de polimento, ou novos ou que foram utilizados em material igual, para não haver nenhuma contaminação da amostra e também para evitar que a amostra seja riscada, no caso do outro material a ter sido polido fosse mais duro que o alumínio.

Esta etapa foi realizada em uma politriz automática, que também se encontra no laboratório de materiais, e possuía capacidade para polir quatro corpos de prova por vez. O polimento foi realizado em etapas de 5 minutos cada uma, ou seja, colocava-se os corpos de prova na máquina e deixava por 5 minutos, então eles eram retirados, lavados e verificava-se, a olho nu, como estava o acabamento da superfície. Para que a mesma alcançasse o acabamento desejado foram necessários 25 minutos, ou seja, 5 etapas de 5 minutos.

Feito o polimento, partiu-se então para o ataque químico nos corpos de prova.

3.7 ATAQUE QUÍMICO

O ataque químico foi realizado para se conseguir ter uma boa visualização das macrografias com a evolução morfológica da liga. As amostras submetidas aos tratamentos térmicos foram preparadas metalograficamente e sofreram um ataque químico com solução aquosa de 0,5wt% HF (ácido fluorídrico).

Após esta etapa, foi realizada a captura de imagens em microscópio eletrônico.

3.8 CAPTURA DE IMAGENS EM MICROSCÓPIO ELETRÔNICO

Através deste microscópio é possível passar as imagens obtidas por ele para o computador, o qual possui um software que possibilita capturar as imagens mostradas pelo microscópio.

Para a obtenção dos resultados obtidos neste trabalho, foi feita uma varredura, na horizontal da amostra, de lado a lado, e fazendo captura das imagens a cada ponto quando deslocada a amostra sob o microscópio.

Tal varredura foi feita em cinco amostras, que são:

- amostra sem tratamento térmico, material fundido
- amostra com tratamento térmico em 0s
- amostra com tratamento térmico em 30s
- amostra com tratamento térmico em 90s
- amostra com tratamento térmico em 210s

Feita esta varredura nas cinco amostras, foi realizada certificação da fração sólida.

3.9 CERTIFICAÇÃO DA FRAÇÃO SÓLIDA

Para a certificação da porcentagem de fração sólida nas amostras, as imagens obtidas via microscópio eletrônico foram abertas no programa *Paint* e inseridas sobre elas linhas de grade medindo 5mm x 5mm, com a imagem em sua proporção e resolução originais.

Segundo a norma ASTM E-562, devem ser utilizados no mínimo 30 pontos para a determinação da fração volumétrica por contagem manual. No presente trabalho foram utilizados 40 pontos por imagem, de maneira a evitar ao máximo que dois pontos ficassem na mesma fase.

Na contagem manual, segundo a ASTM E-562, quando um ponto se encontrava totalmente dentro de uma fase contava-se ele como sendo 1, porém, quando se encontrava parte em uma fase e parte em outra contava-se como sendo $1/2$. Em caso de dúvida o valor utilizado era sempre $1/2$.

3.10 MEDIÇÃO DO TAMANHO DE GLÓBULOS

Para a realização desta etapa foram selecionadas cinco imagens de cada amostra para se fazer a contagem dos glóbulos, e assim obter-se os resultados finais.

Para realizar a contagem, quando se capturava a imagem do microscópio colocava-se no canto inferior direito da imagem uma régua, que é a proporção do aumento da imagem, tendo assim um comparativo para se fazer a contagem. Utilizando-se o Excel, fizeram-se três linhas do mesmo tamanho desta régua e então foram unidas de maneira a ficarem duas delas com um ângulo de 90° entre elas, e a terceira foi unida com as outras duas de maneira a fazer um ângulo de 45° com cada uma, conforme a figura 10.

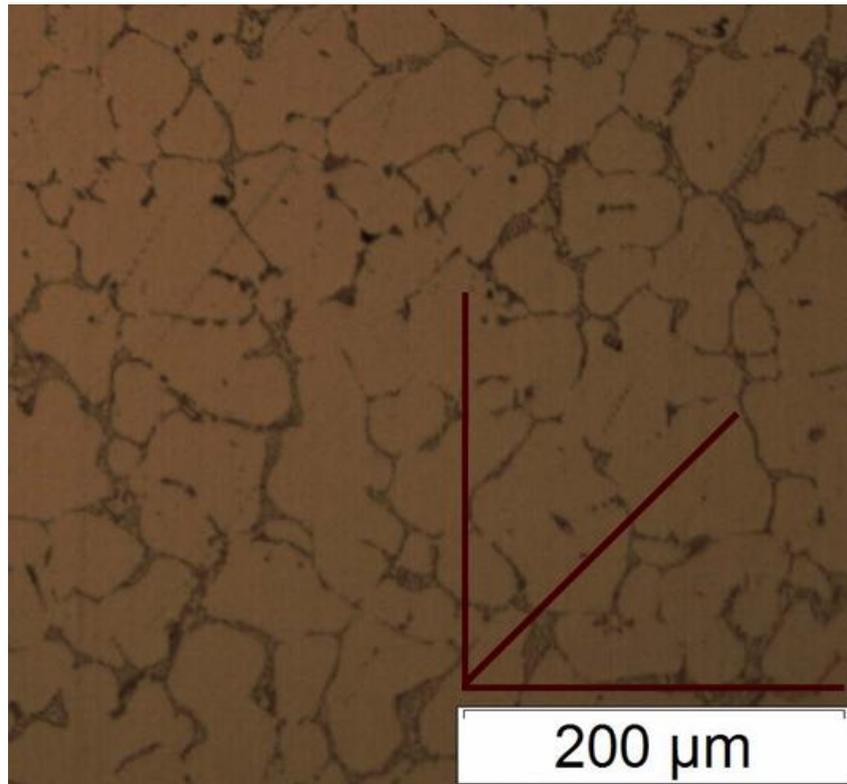


Figura 10- Forma utilizada para fazer a macro-contagem
Fonte: Autoria própria

Colocava-se então essas linhas (unidas) em cinco posições distintas em cada imagem das amostras, e então fazia-se a contagem dos glóbulos pelos quais as linhas passavam, lembrando que a contagem era realizada separadamente para cada linha, ou seja, contava-se na vertical, horizontal e em 45°, e cada uma com um valor distinto. Calculava-se então a média e o desvio padrão para cada contagem, e também uma média e desvio padrão entre todas as medições de cada imagem, e o tamanho médio dos glóbulos é dado pela divisão entre a proporção da imagem (200 μ m) pela média da contagem nas três direções, como demonstrado na tabela abaixo.

Tabela 2- Resultado da contagem de uma imagem

5%Si-T=30-45%Fs 02					
	H	V	45°	Média	Tam.
1	1,5	2	2,5	2,0	100,0
2	2	3	2	2,3	85,7
3	2,5	3	2	2,5	80,0
4	1,5	1,5	2	1,7	120,0
5	1,5	2,5	2	2,0	100,0
Média				2,1	97,1
Desvio Padrão				0,3	15,5

Fonte: Autoria própria

Feito isto para cada imagem, que são 5 para cada amostra, fazia-se então outra tabela onde colocava-se os valores da média do tamanho de grão, e também do desvio padrão do tamanho dos grãos, para se chegar ao tamanho médio dos grãos para aquela amostra, como demonstrado na figura abaixo.

Tabela 3- Resultado final do tamanho de glóbulo em uma amostra

T=30s - 45%Fs		
Figura	Média	Desvio Padrão
5%Si-T=30-45%Fs-01	90,4	9,2
5%Si-T=30-45%Fs-02	97,1	15,5
5%Si-T=30-45%Fs-03	96,6	12,5
5%Si-T=30-45%Fs-04	103,2	13,9
5%Si-T=30-45%Fs-05	100,9	11,3
Média	97,6	12,5
Desvio Padrão	4,9	2,4

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 4 apresenta os resultados da certificação da fração sólida da liga em estudo.

Tabela 4 - Certificação da fração sólida

Certificação da fração sólida		
Contagem	%FS - média	Desvio padrão
T=0s	44	2,7
T=30s	49,3	8,2
T=90s	50	4,5
T=210s	53,1	5,9
Média	49,1	5,3
Desvio Padrão	3,8	2,3

Fonte: Autoria Própria

Através dos resultados demonstrados na tabela 4, percebe-se que com o aumento do tempo de permanência do material no estado semi-sólido a porcentagem de fração sólida também aumenta, fato que pode ser atribuído ao escoamento da parte líquida para as laterais do corpo de prova, região onde a fração sólida é menor, fato presenciado na contagem manual, onde imagens tiradas mais próximas às bordas possuíam menor porcentagem de fração sólida.

Para o tempo de 0 segundos a liga apresentou um valor muito próximo ao valor de 45% de fração sólida teórica, calculada pela regra da alavanca a partir do diagrama de fases Al-Si da figura 8. O ponto eutético é com aproximadamente 11 wt%Si, pela regra da alavanca, a liga em estudo com 5wt%Si possui uma fração sólida de 45,45%, no eutético.

Considerando a média das frações sólidas como resultado, juntamente com o desvio padrão, pode-se dizer que a liga ficou com uma porcentagem aceitável de fração sólida quando comparada com a quantidade teórica.

As figuras a seguir ilustram a evolução morfológica da liga conforme o aumento do tempo de permanência do material sob a fração sólida estipulada (t=0s, t=30s, t=90s, t=210s), sendo esta de 45% fs. De forma qualitativa, pode-se notar que o aumento no tempo de permanência do material no estado semi-sólido estimulou uma mudança na estrutura bruta de fusão dendrítica para globular, quando comparada com a mesma. Como se observou, as estruturas primárias do material no estado semi-sólido apresentaram-se globularizadas e com menores dimensões quando comparadas com a estrutura do material fundido e ultra-refinado. Além disso, observou-se que houve um ligeiro crescimento no tamanho de grão à medida que

se aumentou o tempo de permanência do material no estado pastoso, fenômeno que pode ser atribuído ao fato da estrutura possuir uma maior área superficial e, dessa forma, ela será mais apta a incorporar maior quantidade de matéria conforme o mecanismo de Ostwald Ripening. Porém, não se observou a aglomeração das partículas à medida que se aumentou o tempo de tratamento da liga.

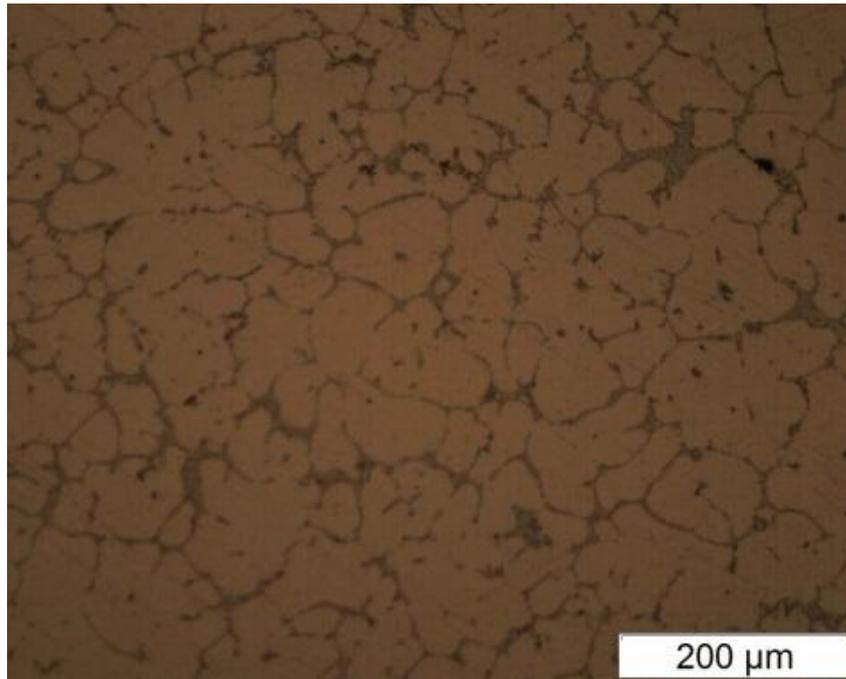


Figura 11- Estrutura bruta de fusão
Fonte: Autoria própria

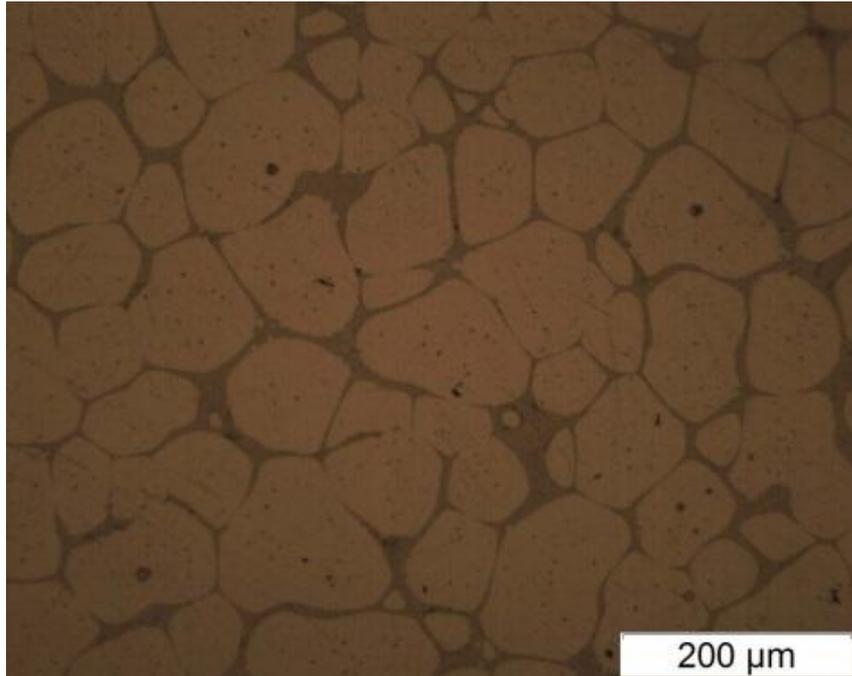


Figura 12- Morfologia da liga com t=0s
Fonte: Autoria própria

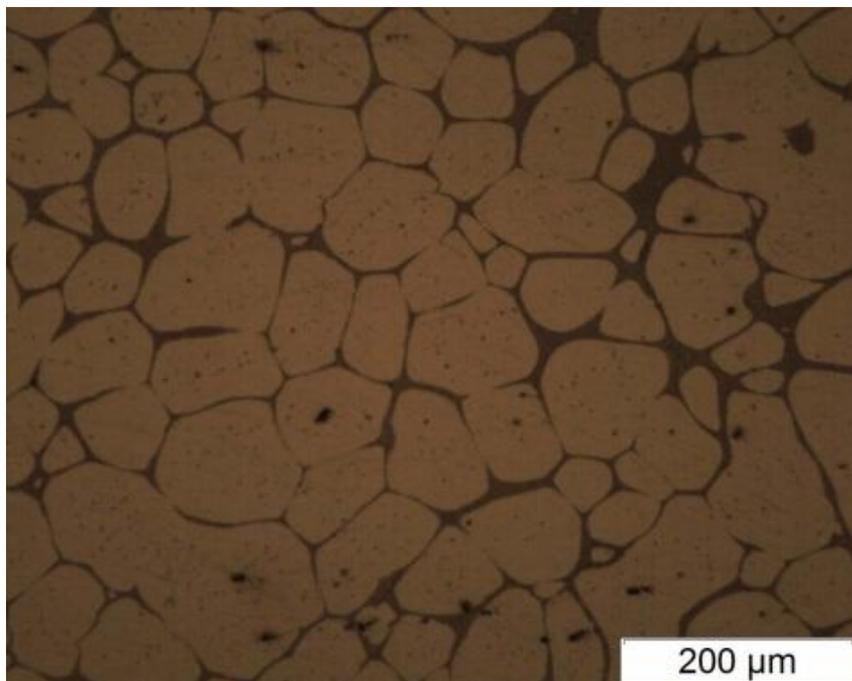


Figura 13- Morfologia da liga com t=30s
Fonte: Autoria própria

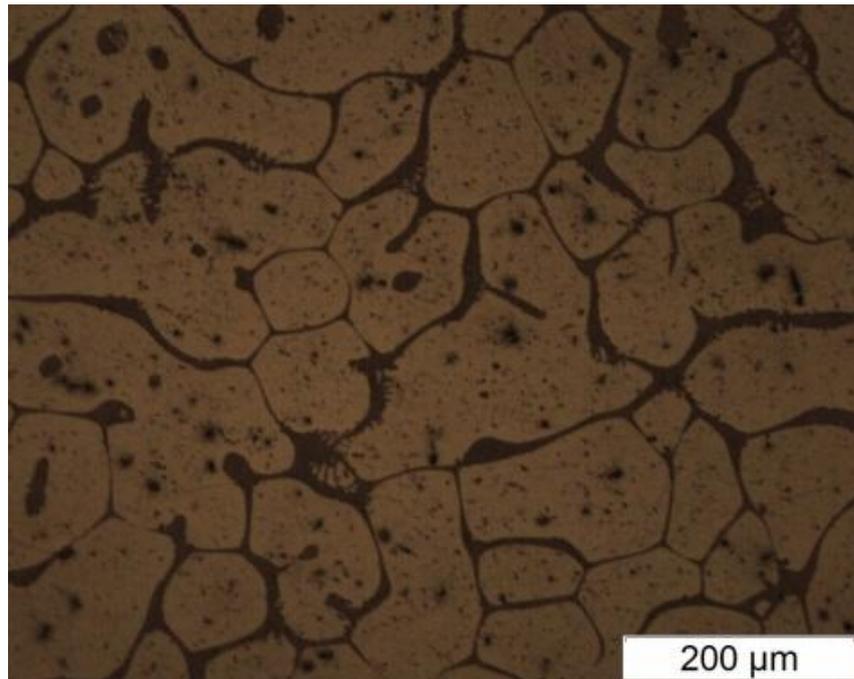


Figura 14- Morfologia da liga com t=90s
Fonte: Autoria própria

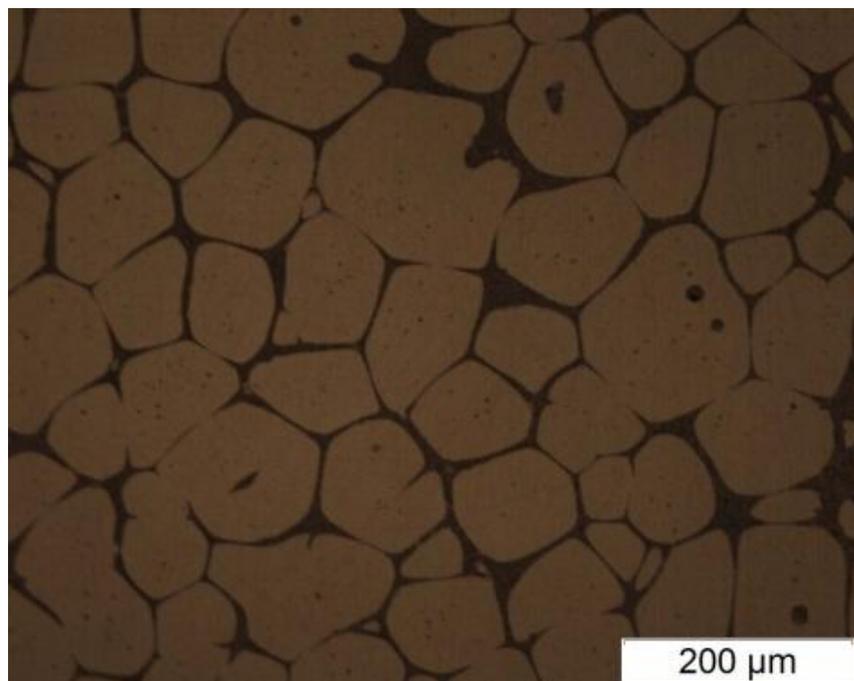


Figura 15- Morfologia da liga com t=210s
Fonte: Autoria própria

A seguir é apresentada a tabela com os resultados da macro-contagem da liga, após ser tratada termicamente com os tempos de 0, 30, 90 e 210 segundos, respectivamente.

Tabela 5- Tamanho médio dos glóbulos

Al-5wt%Si-0,5wt%Mg		
Tempo de permanência (segundos)	Tamanho médio dos grãos (μm)	Desvio Padrão
0	94,7	5,5
30	97,6	4,9
90	102,4	2,6
210	105,6	3,8

Fonte: Autoria própria

A partir dos resultados demonstrados na tabela acima, obtidos após a medição do tamanho de glóbulos, pode-se constatar que realmente houve um aumento no tamanho médio dos mesmos, partindo de 94,7 no tempo de $T=0\text{s}$ e aumentando progressivamente até 105,6 no tempo $T=210\text{s}$. Porém, este aumento de tamanho de glóbulo se mostra pouco expressivo.

Resultados parecidos, com uma liga Al-Si-Mg em porcentagens um pouco diferentes, foram obtidos por Lourençato (2008) a partir de estudos realizados em sua tese de doutorado, onde também observou um aumento no tamanho médio dos glóbulos à medida que se aumentou o tempo de permanência do material no estado semi-sólido. Outro fato relevante que se notou foi que com o aumento do tratamento houve uma tendência dos glóbulos apresentarem-se na sua geometria mais esférica.

Os resultados obtidos neste estudo para a liga com 5wt%Si com 45%fs, se mostram muito parecidos com a liga com 7wt%Si com 45%fs estudada por Lourençato (2008).

Outro fato a ser levantado é que neste trabalho a média do tamanho dos glóbulos nas amostras ocorreu de forma crescente em relação ao tempo de permanência no estado semi-sólido, ou seja, quanto maior foi o tempo de permanência no estado semi-sólido maior ficaram os mesmos. Já no trabalho de Lourençato, com o aumento do tempo de permanência os glóbulos não cresceram de forma gradativa.

Como desenvolvimento tecnológico esta liga pode ser considerada uma boa opção para emprego na indústria, não somente pelo fato de cada vez maior número de indústrias estarem aumentando a variedade de produtos fabricados a partir da matéria-prima alumínio, mas principalmente por esta liga poder ser utilizada no estado semi-sólido. O emprego do alumínio sob o estado semi-sólido reduz a quantidade de matéria-prima a ser utilizada para obter o produto final, assim como quantidade de etapas para conseguir chegar ao produto final. A peça produzida com o material sob estado semi-sólido já sai próxima de sua

geometria final (*near net shape*), causa menos desgaste no ferramental, porém o custo final do produto acaba sendo mais elevado devido ao alto investimento com ferramental, mão de obra especializada e, a matéria-prima deve ser específica para este uso.

5 CONCLUSÕES

Por intermédio da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Ligas de alumínio quando fundidas com baixa porcentagem de Si e utilizando a técnica do ultra-refino tendem a formar uma estrutura globular, estrutura essa a mais apropriada, segundo a literatura, para utilização como material no estado semi-sólido;

- Quanto maior o tempo de permanência do material no estado semi-sólido, maior será sua porcentagem de fração sólida;

- Quanto menor o tempo de permanência no semi-sólido, mais próximo da fração sólida teórica a liga fica;

- A estrutura bruta de fusão dendrítica alterou-se para uma estrutura globular sob ação do tratamento, viabilizando assim o estudo deste material quanto seu emprego de forma tecnológica na indústria;

- A permanência do material sob o estado semi-sólido contribuiu para um aumento no tamanho médio dos grãos;

- Conforme constatado no estudo, e utilizando-se como referência o trabalho de Lourençato (2008), a liga em questão pode ser uma alternativa para utilização como material no estado semi-sólido, pelo fato de se transformar de dendrítica para globular de forma completa após os tratamentos.

6 REFERÊNCIAS

ALVES, Gianni Ferreira. **Desenvolvimento de novas ligas para processos de conformação no estado semi-sólido a partir de alumínio reciclado**. 2011. 112 f. Dissertação (Mestrado) - IFES, Vitória, 2011.

ATKINSON, H. V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. **Progress in Materials Science**, v. 50, p. 341-412, 2005.

FAN, Z., 2002, “Semisolid Metal Processing”, **International Materials Reviews**, Vol. 47, No. 2, pp. 49-85.

FELTRIN, Josè Vanderlei. **Obtenção e caracterização de estruturas reofundidas e tixofundidas da liga de alumínio AA7075**. 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado) - UFRGS, Porto Alegre, 2004.

FIGUEREDO, A., 2001, “Science and Technology of Semi-Solid Metal Processing”, **Worcester Polytechnic Institute**. Worcester, MA, USA.

FLEMINGS, M. C.; RIEK, R. G.; YOUNG, K. P. Rheocasting. **Materials Science and Engineering**, v. 25, p. 103-117, 1976.

FLEMINGS, M. C. Behavior of metal alloys in the semisolid state. **Metallurgical Transactions A**, v. 22A, p. 957-981, 1991.

GARCIA, Amauri. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001. 399 p.

GOULART, P. R. **Variáveis térmicas de solidificação, microestrutura e propriedades mecânicas de ligas hipoeutéticas Al-Si**. 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

KANG, C.G., Youn, S.W., Seo, P.K., 2004, “Data Base Construction on Mechanical Properties of Thixoforged Aluminium Parts and their Microstructure Evaluation”, **Journal of Materials Processing Technology**, Article in Press.

KIRKWOOD, D. H. **International Materials Review**, v. 39,p. 173-179, 1994.

KIUCHI, M.; SUGIYAMA, S. Mashy – state extrusion, rolling and forming. **In: 3th INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES.** Japan, 1994. p. 245-257.

KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. Development of efficient grain refiner for Al-Si alloy and its modification with strontium. **Materials Science and Engineering A**, v.283, p. 94-104, 2000.

KOPP, R., Neudenberger, D., Winning, G., 2001, “ Different concepts of thixoforging and experiments for rheological data”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 111, pp. 48-52.

KURS, W.; FISHER, D. J. **Fundamentals of Solidification.** Tras. Tech Publications LTD,Switzerland, 2002.

LASHKARI, O. and Ghomashchi, R., 2007, “The Implication of Rheology in Semi-Solid Metal Processes: An overview”, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 182, pp. 229-240.

LAXMANAN, V.; FLEMINGS, M. C. Deformation of semi-solid Sn-15 Pct Pb alloy. **Metallurgical Transactions A**, v. 11A, p. 1927-1937, 1980.

LIU, D., Atkinson, H.V., Jones, H., “Thermodynamic Prediction of Tixoformability in Alloys Based on the Al-Si-Cu and Al-Si-Cu-Mg Systems”, **Acta Materialia**, Vol. 53, pp. 3807-3819.

LOURENÇATO, L.A. **Tixoformabilidade e Tixoforjamento de Ligas Al-Xwt%Si-0,5wt%Mg em Prensa Excêntrica com Matriz Aberta.** 2008. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2008.

MAGER, Bárbara Renata Garcia. **Comportamento Microestrutural da Liga Eutetóide Zn-22%Al em Relação à Taxa de Solidificação e ao Envelhecimento.** 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado) - PUC, Porto Alegre, 2008.

MAXWELL, I., HELLAWELL, A simple model for grain refinement during solidification. **Acta Metallurgica**, v. 23, p. 229-237, 1975.

MOHANTY, P. S., GRUZLESKI, J. E. Mechanism of grain refinement in aluminium. *Acta Metallurgical Material*, v. 43, n. 5, p. 2001-2012, 1994.

OLIVEIRA, N. R. **Transformações microestruturais em ligas de alumínio arrefecidas desde o domínio semi-sólido.**2008. 152 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Aveiro.Portugal. 2008.

PAES, M. **Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg para tixoconformação.** 2004. 192 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

WARMUZEK, M. **Metallographic techniques for aluminium and its alloys, Metallography and microstructures.** ASM Handbook, ASM, International, v. 9, p. 711-751, 2004.

YOUNG, K. P. United States Patent N. 4.565.241, 1986.

ZOQUI, E.J., Paes, M., 2005, “Semi-Solid Behaviour of New Al-Si-Mg Alloys for Thixoforming”, **Materials Science and Engineering** , pp. 63-73.

ZOQUI, E.J.; Lourençato, L.A.; Benati, D.M., 2008, “Thixoforming of Aluminium-Silicon Alloys in Mechanical Eccentric Press”, **Proceedings of the 10th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites**, Aachen, Germany (Submetido).