ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDA	ÇÃO FINAL DA
ALVES DA SILVA	E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 29	06,2007
Milen Asbert	
ORIENTADOR	

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

Influência da Microestrutura Inicial e Material de Molde na Tixoconformação da Liga A356

Autor: **Beethoven Max Alves da Silva** Orientador: **Maria Helena Robert**

97/08

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

Influência da Microestrutura Inicial e Material de Molde na Tixoconformação da Liga A356

Autor: **Beethoven Max Alves da Silva** Orientador: **Maria Helena Robert**

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

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

Campinas, 2007 S.P. – Brasil

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

Si38i	Silva, Beethoven Max Alves da Influência da microestrutura inicial e material de molde na tixoconformação da liga A356 / Beethoven Max Alves da SilvaCampinas, SP: [s.n.], 2007.
	Orientador: Maria Helena Robert Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.
	1. Microestrutura. 2. Conformação de alumínio. 3. Alumínio - Metalurgia. 4. Alumínio. 5. Ligas de alumínio. 6. Forjamento. I. Robert, Maria Helena. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: The influnece of the initial microstructure and die material on thixoforming of A356 alloy
Palavras-chave em Inglês: Microstructure, Thixoforming, Aluminium, Die Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação
Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica
Banca examinadora: Jesualdo Luiz Rossi, Rezende Gomes dos Santos
Data da defesa: 29/06/2007
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

Influência da Microestrutura Inicial e Material de Molde na Tixoconformação da Liga A356

Autor: **Beethoven Max Alves da Silva** Orientador: **Maria Helena Robert**

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

aldo

Profa. Dra. Maria Helena Robert, Presidente Instituição: Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Prof. Dr. Jesualdo Luiz Rossi Instituição: Instituto de Pesquisas Energéticas - IPEN

Prof. Dr. Rezende Gomes dos Santos Instituição: Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 29 de Junho de 2007

Dedicatória:

À minha companheira, Mônica, pelo seu amor e dedicação durante esta caminhada, meu eterno amor.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

A Maria Helena Robert pela oportunidade de orientação que me foi dada quando cheguei à UNICAMP e pela amizade que pudemos cultivar.

Aos amigos André, Aristides, Daniel, Fábio, Gisele, Jaime, José Hilton, Lourenço, Miro, Pella e todos que me acompanharam nesta caminhada.

A Luziano e Monica pelas agradáveis conversas ao redor da churrasqueira.

Aos amigos da Agência de Inovação da UNICAMP, INOVA, especialmente ao Rodrigo, pela compreensão durante a fase final de escrita do texto.

Ao CNPq, pelo financiamento e à CAPES, pela bolsa.

A todos os funcionários da FEM/UNICAMP.

Aos meus pais e irmãos, sempre presentes em todas as etapas da minha vida e nas minhas andanças pelo nosso imenso país. Amo vocês.

"A vida é feito ladeiras No seu sobe e desce contínuo Princípio e Fim"

Resumo

SILVA, Beethoven Max Alves da, Influência da Microestrutura Inicial e Material de Molde na Tixoconformação da Liga A356; Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. 147 p. Dissertação (Mestrado)

Neste trabalho investiga-se a influência da microestrutura inicial e do material do molde na tixoconformação da liga A356. São produzidas e testadas em operações de tixoforjamento pastas obtidas por três distintos processos: fusão parcial controlada de estruturas dendríticas grosseiras, fusão parcial controlada de estruturas ultra-refinadas e pastas obtidas por agitação mecânica do líquido durante solidificação. É produzido ainda um compósito A356 + Al₂O₃ obtido por compofundição. Os tixoforjados foram submetidos à análise metalográfica para caracterização microestrutural, medindo-se a fração da fase primária e o tamanho médio de glóbulo ou roseta da fase sólida. Os resultados obtidos mostram a viabilidade da utilização de moldes não metálicos em operações de tixoforjamento são dependentes da condição inicial da matéria-prima, de forma que forças maiores são requeridas com o aumento do parâmetro microestrutural básico (espaçamento interdendrítico, tamanho de glóbulo e tamanho de roseta) da matéria-prima.

Palavras Chave

- Microestrutura, tixoconformação, alumínio, matriz de forjamento.

Abstract

SILVA, Beethoven Max Alves da.; The Influence of the Initial Microstructure and Die Material on Thixoforming of A356 Alloy; Campinas, Mechanical Engineering Faculty, State University of Campinas, 2007. 147p. Dissertação (Mestrado).

This research aims the influence of initial microstructure and die material on thixoforming of A356 alloy. Obtained pastes are produced and tested in thixoforging operation by three distinct processes: controlled partial melting of coarse dendritic structures, controlled partial melting of ultra-refined structures and obtained pastes by liquid mechanical stirring during solidification. It is still produced a composite A356 + A12O3 obtained by compocasting. Thixoforged samples were submitted to metalographic analysis for microstructural characterisation, measuring the primary phase fraction and globule average size or solid phase rosette. Obtained results showed the viability of non-metallic dies in thixoforming operations with good superficial and dimensional finishing products. Thixoforging forces are dependent on initial condition of raw material, so that higher forces are required with the increasing of basic microstructural parameter (interdentritic spacing, globule size and rosette size) of raw material.

Key Words

- Microstructure, thixoforming, aluminium, die.

Índice

Lista de		xi
Figuras.		
Lista de	Tabelas	xiv
Nomenc	elatura	XV
T . 1	-	
Introduç	äo	1
Destar	Viratuániana	0
Pastas I	1xotropicas	9
Fabrica	ção de Pastas Tixotrónicas	9
3 1	Processos de Fabricação de pastas tixotrónicas a partir da liga líquida	9
3.1.1	Processos de reofundição por interferência na nucleação	9
3.1.2	Processos de reofundição por interferência no crescimento do sólido durante	12
011121	solidificação	
3.2.	Processos de Fabricação de pastas tixotrópicas a partir da liga sólida	15
3.3.	Processos de Conformação no Estado Semi-sólido	18
Materia	is, Equipamentos e Métodos Experimentais	24
4.1.	Caracterização da liga utilizada (A356)	24
4.1.1.	Composição química	25
4.1.2.	Diagrama de fases	25
4.1.3.	Determinação do intervalo de solidificação	26
4.2.	Caracterização do reforço (Al ₂ O ₃) para fabricação do compósito	28
4.2.1.	Difração de raios-X	29
4.2.2.	Microscopia eletrônica de varredura	29
4.2.3.	Análise granulométrica	30
4.3.	Produção de matéria prima para o tixoforjamento	31
4.3.1.	Produção de pastas tixotrópicas por agitação mecânica	32
4.3.1.1.	Construção do equipamento	32
4.3.1.2.	Ensaios preliminares	37
4.3.1.3.	Descrição do experimento típico	39
4.3.2.	Preparação de pastas por fusão parcial controlada	39
4.3.2.1.	Preparo da matéria-prima e tratamento térmico	40
4.3.2.2.	Descrição de experimento típico	41

4.3.3.	Produção de compósitos por compofundição	41
4.3.3.1.	Descrição de experimento típico	42
4.4.	Processo de tixoforjamento	43
4.4.1.	Equipamentos utilizados	43
4.4.2.	Ferramentas de tixoforjamento empregadas	45
4.4.3.	Parâmetros do processo de tixoforjamento	47
4.4.4.	Descrição do experimento de tixoforjamento típico	48
4.5.	Análise de resultados	50
4.5.1.	Análise metalográfica da matéria-prima para tixoforjamento	50
4.5.2.	Análise metalográfica do produto tixoforjado	51
Resultad	los e Discussões	53
5.1.	Matéria-prima para o tixoforjamento	53
5.1.1.	Liga A356 fundida sem refinador (SR)	54
5.1.2.	Liga A356 fundida com refinador (CR)	54
5.1.3.	Liga A356 reofundida por agitação mecânica (AM)	54
5.1.4.	Compósitos A356 + Al_2O_3 (CP)	55
5.2.	Produtos tixoforjados	61
5.2.1.	Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado fundido (SR)	61
5.2.1.1.	Aspecto geral do produto tixoforjado	61
5.2.1.2.	Caracterização microestrutural do produto tixoforjado	62
5.2.1.3.	Forças de tixoforjamento	68
5.2.2.	Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado refinado (CR)	69
5.2.2.1.	Aspecto geral do produto tixoforjado	69
5.2.2.2.	Caracterização microestrutural do produto tixoforjado	70
5.2.2.3.	Forças de tixoforjamento	75
5.2.3.	Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado reofundido por agitação mecânica (AM)	76
5.2.3.1.	Aspecto geral do produto tixoforjado	76
5.2.3.2.	Caracterização microestrutural do produto tixoforjado	78
5.2.3.3.	Forças de tixoforjamento	82
5.2.4.	Tixoforjamento do compósito A356 + 15% Al ₂ O ₃ (CP)	83
5.2.4.1.	Aspecto geral do produto tixoforjado	83
5.2.4.2.	Caracterização microestrutural do produto tixoforjado	83
5.2.4.3.	Forças de tixoforjamento	89
5.3.	Discussão geral dos resultados	90
5.3.1.	Efeito da estrutura da matéria-prima e material de molde na operação de tixoforiamento	90
5.3.2.	Efeito da estrutura da matéria-prima e material de molde na qualidade do produto tixoforjado	95
Conclus	ões e Sugestões para próximos trabalhos	98
Referên	cias Bibliográficas	100

Lista de Figuras

2.1	Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Sn-15% Pb: (a) estrutura dendrítica. (b) estrutura não dendrítica. (SPENCER, 1972).	6
2.2	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).	7
3.1	Esquema representativo do processo Ahresty ou "cooling slope" (MOTEGI, 1997).	10
3.2	Esquema representativo do processo New Rheocasting (KAUFMANN et al. 2000).	11
3.3	Esquema representativo de processo SSR. a) líquido com reduzido superaquecimento; b) agitação e resfriamento; c) retirada do agitador-pasta reofundida; d) estação de produção de pastas por SSR (YUKO et al, 2004).	12
3.4	Esquema representativo de reator tipo propulsor para obtenção de pastas reofundidas (FOGAGNOLO, 1996).	14
3.5	Ilustração esquemática do processo de agitação eletromagnética para produção de pastas reofundidas. (a) vista de cima e (b) vista frontal. (VIVÉS, 1993).	15
3.6	Esquema representativo do processo Stirring synthesis.	17
4.1	Diagrama de fases parcial Al – Si (Metals Handbook).	25
4.2	Curva de resfriamento simples da liga A356 durante a solidificação.	26
4.3	Curva de Análise Térmica Diferencial da liga A356.	27
4.4	Ampliação dos picos endotérmico (577,9 °C) e exotérmico (618,0 °C) da curva obtida na ATD da liga A356.	28
4.5	Difratograma do pó de Al ₂ O ₃ .	29
4.6	Foto obtida por MEV dos grãos da alumina utilizada.	30
4.7	Análise granulométrica do pó de Al ₂ O ₃ utilizado como reforço.	31
4.8	Equipamento de compofundição: (1) sistema de alimentação; (2) forno; (3) controlador do forno; (4) motor elétrico e agitador; (5) controlador de velocidade do motor	32
4.9	Sistema de alimentação do forno.	33
4.10	Câmara do forno (com vista do cadinho e do agitador).	34
4.11	Controlador do forno.	34
4.12	Motor elétrico para agitação do rotor.	35
4.13	Etapas de obtenção do agitador em aço inox 304, 1) tarugo, 2) tarugo usinado, 3) rotor usinado e fresado.	36
4.14	Inversor de freqüência (controle da velocidade de agitação).	37
4.15	Detalhe da tampa do cadinho com o furo para passagem do eixo do rotor.	38

4.16	Esquema representativo do sistema de tixoforjamento montado: (a) forno portátil, (b) matriz de forjamento, (c) punção, (d) célula de carga, (e) módulo indicador de pesagem, (f) placa analógica digital, (g) computador, (h) impressora.	43
4.17	Forno de tixoforjamento e indicação da posição dos termopares (ROVIRA, 2001).	44
4.18	Dimensões da matriz de forjamento construída, a) vista de topo, b) vista lateral interna.	46
4.19	Dimensões da matriz de forjamento construída, a) vista de topo, b) vista lateral interna.	47
4.20	Diagrama geral dos experimentos efetuados. (T=600 °C, t=5 min, M1-molde de aço, M2-molde de grafite).	48
4.21	Posicionamento do punção no tixoforjamento: a) no início do processo; b) no fim do processo.	49
4.22	Dimensões dos corpos de prova tixoforjados.	50
4.23	Regiões observadas para análise da microestrutura de produtos tixoforjados - partes internas (medidas em milímetros).	51
5.1	Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por fundição convencional com baixa taxa de resfriamento.	56
5.2	Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por fundição convencional com uso de refinador de grãos e alta taxa de resfriamento.	57
5.3	Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por reofundição.	58
5.4	Microestrutura em diferentes regiões de tarugos do compósito A356 + 15% Al2O3 produzido por compofundição.	59
5.5	Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura dendrítica grosseira (SR), em distintos tipos de matrizes.	63
5.6	Micrografias da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira, em função da distância e do material da matriz.	65
5.7	Distribuição da fração de fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira.	67
5.8	Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira	67
5.9	Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial dendrítica (SR) em matriz a) de aço, b) de grafite.	68
5.10	Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura refinada (CR), em distintos tipos de matrizes.	71
5.11	Micrografías da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura refinada, em função da distância e do material da matriz.	73
5.12	Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial refinada.	74
5.13	Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto tixoforjado a partir de estrutura refinada.	74
5.14	Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial refinada (CR) em moldes a) de aço, b) de grafite.	75
5.15	Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura globular (AM), em distintos tipos de matrizes.	77

- 5.16 Micrografias da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura globular, em função da distância e do material da matriz.
- 5.17 Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da 81 matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura reofundida por agitação mecânica.
- 5.18 Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto 81 tixoforjado a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.
- 5.19 Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto 82 tixoforjado a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.
- 5.20 Diferentes vistas de típicas peças tixoforjadas do compósito A356 + 15% wt Al_2O_3 . 86
- 5.21 Micrografias do tixoforjado do compósito A356 + 15% wt Al₂O₃ em função da 87 distância e do material da matriz.
- 5.22 Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da 88 matriz, no produto tixoforjado a partir do compósito A356 + 15% wt Al₂O₃.
- 5.23 Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde no produto 88 tixoforjado a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.
- 5.34 Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento do compósito A356 + 89 15% wt Al₂O₃ (CP) em matriz de a) aço; b) grafite.
- 5.25 Forças máximas requeridas no tixoforjamento da liga A356 a partir de diferentes 91 microestruturas, em molde metálico e molde de grafite.
- 5.26 Parâmetros microestruturais (tamanho médio de glóbulos/rosetas/espaçamento interdendrítico) da liga A356 em diferentes estados utilizados como matéria-prima para o tixoforjamento.
- 5.27 Matriz de grafite utilizada nos experimentos de tixoforjamento no: a)estado inicial,96 b)estado de descarte, após trinta experimentos.

Lista de Tabelas

4.1	Composição química da liga A356 (% em peso).	25
4.2	Condições iniciais do processo de produção de pastas por agitação mecânica.	38
4.3	Parâmetros de tratamento térmico testados.	40
4.4	Teores de reforço empregados na produção do compósito.	42
4.5	Grafite empregado na construção da matriz e punção.	46
5.1	Parâmetros estruturais da liga A356 produzida por diferentes processos - matéria-	61
	prima para testes de tixoforjamento.	
5.2	Valores de fração sólida primária ao longo da distância na peça tixoforjada com	66
	estrutura inicial dendrítica grosseira e dimensões médias de glóbulos da fase primária.	
5.3	Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial	69
	dendrítica grosseira (SR).	
5.4	Valores de fração da fase sólida primária e suas dimensões ao longo da distância na	72
	peça tixoforjada a partir de estrutura refinada.	
5.5	Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial	76
	refinada (CR).	
5.6	Valores de fração da fase sólida primária e suas dimensões ao longo da distância na	79
	peça tixoforjada a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.	
5.7	Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial	83
	reofundida por agitação mecânica (AM).	
5.8	Valores de fração sólida da fase primária e suas dimensões ao longo da distância na	85
	peça tixoforjada do compósito A356 + 15% wt Al ₂ O ₃ .	
5.9	Valores de força máxima no tixoforjamento do compósito A356 + 15% wt Al ₂ O ₃	90
	(CP).	
5.10	Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 em diferentes moldes, a	91
	partir de distintas microestruturas.	
5.11	Parâmetros microestruturais da matéria-prima (liga A356) em diferentes condições	93
	(SR, CR, AM e CP).	

Nomenclatura

Abreviações

AM	-	Liga A356 reofundida por agitação mecânica
ATD	-	Análise térmica diferencial
СР	-	Compósitos A356 + Al ₂ O ₃
CR	-	Liga A356 fundida com refinador
Fl	-	Fração líquida
FPC	-	Fusão parcial controlada
Fs	-	Fração sólida
MEV	-	Microscopia eletrônica de varredura
PSS	-	Processamento semi-sólido
Reo	-	Reofundição
SR	-	Liga A356 fundida sem refinador
Tliquidus	-	Temperatura liquidus
T _{solidus}	-	Temperatura solidus

Siglas

DEF	-	Dep	oarta	me	nto	de I	Enge	nh	aria	de	Fabricação	
		-				_				•		

FEM - Faculdade de Engenharia Mecânica

Capítulo 1

Introdução

Desde a descoberta das propriedades peculiares de ligas metálicas sob determinadas condições e sua possibilidade de emprego em processos de conformação mecânica, mais de trinta anos já se passaram e o agora denominado Processamento de Semi-Sólidos (PSS) encontra diversas aplicações industriais, sendo a indústria automobilística a principal absorvedora desta tecnologia.

Os principais fatores que levaram a disseminação da tecnologia de PSS residem no fato que há uma busca crescente por parte da indústria ao emprego de processos que possibilitem a obtenção de peças geometricamente complexas seguindo um número reduzido de etapas, reduzindo os custos com equipamento e operações posteriores envolvendo ajustes dimensionais.

A pesquisa empreendida em diversos centros de pesquisa do mundo localizados nos Estados Unidos, Inglaterra, Alemanha, França e Japão, entre outros países, resultou no conhecimento dos fenômenos envolvidos na obtenção da matéria-prima para o PSS, chamada de pasta tixotrópica, cuja morfologia apresenta-se globular, diferentemente da morfologia dendrítica encontrada na microestrutura de ligas solidificadas convencionalmente.

A pasta reo ou tixofundida recebeu esta denominação por apresentar um comportamento reológico especial na qual sua viscosidade é fortemente dependente da tensão aplicada, obedecendo a uma relação não-linear; quando submetida a pequenas tensões se comporta como sólido, apresentando elevada viscosidade e a partir de um determinado valor de tensão, passa a escoar como líquidos viscosos.

Esta característica tornou a pasta reo ou tixofundida promissora para o emprego em processos envolvendo a aplicação de pressão, como a fundição sob pressão, a extrusão, o forjamento, a laminação e a estampagem, tendo como principal vantagem o fato de que como é constituída de sólido em meio líquido, permite uma maior acomodação das tensões internas na conformação, contribuindo assim para a redução da formação de trincas em fundidos e redução de forças requeridas na conformação mecânica. Adicionalmente, o escoamento da pasta reo ou tixofundida ocorre em regime não-turbulento, reduzindo também a formação de poros e inclusões nos produtos.

Diversos métodos podem ser utilizados para a obtenção de pastas reo e tixofundidas, podendo basicamente ser divididos naqueles que são realizados no metal líquido por interferência na nucleação ou no crescimento do sólido e os que são realizados no metal sólido através de tratamento térmico de fusão parcial da liga.

A continuidade das pesquisas propiciou o surgimento de novas tecnologias empregando o PSS, revelando a possibilidade de forjamento a baixas pressões, com reduzido dispêndio energético, e o emprego de ferramental de materiais alternativos de um menor custo e maior facilidade de fabricação.

Bremer et al (1996), tixoforjaram pastas tixotrópicas obtidas a partir da liga de alumínio A356 em duas condições: fundida e laminada, e verificaram propriedades mecânicas semelhantes entre os produtos tixoforjados a partir da liga fundida com as dos produtos obtidos por fundição em molde metálico, e as propriedades dos produtos tixoforjados a partir da liga laminada com as dos forjados convencionalmente.

Pella (2002) mostrou a viabilidade de utilização de materiais cerâmicos de baixo custo na confecção de matrizes e punções para emprego em operações de conformação no estado semisólido. Seus resultados apontaram parâmetros de processo como força para o preenchimento da matriz e temperatura empregada inferiores aqueles utilizados em matrizes metálicas.

Behrens et al (2004), em estudo comparativo empregando matrizes metálicas e cerâmicas, indicaram a possibilidade do emprego de matrizes cerâmicas na operação de tixoforjamento, devido a sua boa resistência mecânica e térmica. Em todos os produtos obtidos em matrizes metálicas os autores verificaram uma maior suscetibilidade à formação de trincas geradas pelo choque térmico.

Os diferentes métodos de obtenção de pastas tixotrópicas resultam em semi-sólidos globulares semelhantes quando observados em micrografias convencionais em duas dimensões, com pequenas variações relacionadas à esfericidade da partícula sólida (quantificada pelo fator de forma) e às suas dimensões.

No entanto, trabalhos recentes de caracterização espacial de estruturas de pastas tixotrópicas (LUDWIG, 2004), utilizando técnicas sofisticadas, têm mostrado a presença de aglomerados tridimensionais de partículas sólidas na pasta tixotrópica. Estes aglomerados devem ditar o comportamento reológico da pasta.

Resultado de Motegi et al (2003) mostra que o comportamento da pasta tixotrópica em operações de tixoforjamento é dependente do seu método de fabricação; portanto, o método de obtenção da pasta deve determinar a sua constituição e microestrutura, o que por sua vez deve determinar o comportamento em conformação.

Diante da pouca informação sobre a influência do método de fabricação ou condição da matéria-prima original, na estrutura e comportamento de pastas tixotrópicas e da importância deste conhecimento no projeto e desempenho do processo de tixoconformação, este trabalho se justifica.

Em adição, embora resultados promissores sobre o emprego de matrizes não-metálicas no PSS tenham sido demonstrados, pouco se encontra na literatura sobre a influência dos materiais utilizados na sua confecção e na qualidade dos produtos.

É objetivo geral do trabalho contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de processamento semi-sólido, investigando a influência da microestrutura inicial e do material do molde no tixoforjamento da liga A356. Serão produzidas e testadas em operações de tixoforjamento pastas obtidas por três distintos processos: fusão parcial controlada de estruturas dendríticas grosseiras, fusão parcial controlada de estruturas ultra-refinadas e pastas obtidas por agitação mecânica do líquido durante solidificação. Será ainda utilizado compósito A356 + Al₂O₃ obtido por compofundição. A influência do material do molde será investigada pela utilização de moldes de aço e de grafite.

Serão produzidas inicialmente três microestruturas distintas a partir da liga A356: dendrítica grosseira, refinada e globular; e um compósito A356 reforçado com Al₂O₃ na forma de partículas produzido por compofundição.

Os produtos obtidos serão analisados em termos de aspectos superficiais, quanto à reprodutibilidade da geometria da matriz, seu preenchimento e imperfeições visuais; em termos de microestrutura, quanto a presença de deformação, homogeneidade e concentração da fração sólida ao longo da peça e a força requerida para o tixoforjamento.

Este trabalho tem por objetivo:

- Investigar a influência do processo de fabricação de pastas tixotrópicas da liga A356 nas suas características estruturais;
- Investigar a influência da estrutura liga A356 do tixofundido na sua conformabilidade;
- Investigar o efeito do material do molde (metálico e cerâmico) na conformabilidade da liga A356.

Capítulo 2

Pastas Tixotrópicas

Toda a tecnologia de semi-sólidos hoje conhecida derivou de pesquisas iniciadas nos anos 70 no Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) sobre o comportamento reológico da liga Sn-15%Pb durante sua solidificação, para diferentes frações de sólido. Observou-se que a imposição de uma agitação a liga durante seu resfriamento resultava em uma estrutura composta de partículas esféricas, ao invés da estrutura convencional de morfologia dendrítica (SPENCER, 1972). Medidas da tensão de cisalhamento feitas em ligas pastosas apresentando sólido com esta morfologia já tinham mostrado apenas pequeno aumento da tensão com a diminuição da temperatura, mesmo quando uma significativa quantidade de sólido já havia sido formada (METZ E FLEMINGS, 1970).

Na Figura 2.1 são apresentados os primeiros resultados de medidas da tensão de cisalhamento em pastas da liga Sn-15% Pb, apresentando estrutura dendrítica (a) e estrutura nãodendrítica (b), para diferentes frações sólidas (SPENCER, op. cit. e FLEMINGS, 1991).

Observa-se que para um mesmo valor de fração sólida (fs) os valores de tensão de cisalhamento são bastante diferentes em função da estrutura presente, sendo significativamente superiores para a liga contendo fase sólida dendrítica. Para exemplificar, a liga com estrutura dendrítica e fs= 0,3 necessita para deformar-se de uma tensão da ordem de 100 kPa, enquanto que a mesma liga com estrutura não-dendrítica necessita de apenas de valores da ordem de 0,05 kPa.

Estudos realizados por Joly (1976) e Miwa (1981) mostram que pastas metálicas com sólido globular apresentam comportamento não–Newtoniano, isto é, sua viscosidade é fortemente

dependente da tensão aplicada seguindo uma relação não linear; apresentando um comportamento reológico peculiar: -para tensões pequenas se comportam como sólidos, apresentando elevada viscosidade; a partir de uma determinada tensão, passam a escoar como líquidos viscosos.



Figura 2.1- Variação da tensão de cisalhamento com a fração sólida da liga Sn-15% Pb: (a) estrutura dendrítica, (b) estrutura não dendrítica, (SPENCER, 1972).

Além disso, a viscosidade da pasta depende ainda do tempo de aplicação da tensão. Este comportamento reológico caracteriza a pasta com sólido globular como tixotrópica.

O comportamento de uma pasta tixotrópica durante escoamento é dependente da sua fração sólida e, como citado, das tensões de cisalhamento aplicada. Na Figura 2.2 são apresentados os resultados pioneiros de Flemings (1991) mostrando a influência da fração sólida na viscosidade aparente da liga Al-4,5%Cu-1,5%Mg, quando submetida a diferentes taxas de cisalhamento.

Nota-se que para valores altos da taxa de cisalhamento a liga apresenta elevada fluidez mesmo para frações sólidas da ordem de 50%; enquanto que para a mesma condição de fração sólida os valores de viscosidade aparente podem ser extremadamente aumentados se a taxa

de cisalhamento aplicada for baixa. Isto mostra a possibilidade de manipulação (sem exercer pressão) das pastas como um sólido mesmo contendo 50% de líquido; por outro lado, o aumento da tensão aplicada modifica a sua viscosidade para reduzidos valores, permitindo sua fácil conformação.



Figura 2.2- 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).

O comportamento reológico das pastas tixotrópicas as tornam interessantes como matéria prima em processos de conformação que envolvem pressões, como é a fundição sob pressão (pastas com alta fração líquida), assim como no forjamento ou na extrusão, ou ainda na laminação ou na estampagem, onde as pastas com alta fração sólida podem encontrar interessante e importante aplicação. A potencialidade de exploração de processos de conformação de pastas tixotrópicas tem sido investigada desde os anos 80; sendo a fundição de componentes de ligas de Al e ligas de Mg, para a indústria automotiva, já uma realidade comercial de sucesso (DAS GUPTA, 1994).

A mais ampla utilização comercial de pastas tixotrópicas em processos de fabricação está ainda por vir; a quantidade de informações sendo disponibilizadas pelo setor acadêmico e industrial sobrfe o assunto tem aumentado significativamente na última década. Somente em recente congresso internacional (SEMI SOLID PROCESSING, 2004) foram apresentados 14 novos processos de fabricação da matéria-prima tixotrópica. Alguns processos principais são apresentados a seguir.

Capítulo 3

Fabricação de Pastas Tixotrópicas

Os processos de produção de pastas tixotrópicas se dividem, de uma forma geral, em dois grupos, dependendo da condição inicial do material: processos de reofundição, a partir da liga no estado líquido; processo de tixofundição, a partir da liga no estado sólido.

3.1. Processos de Fabricação de pastas tixotrópicas a partir da liga líquida

A partir da liga metálica no estado líquido, é possível a produção de pastas tixotrópicas (denominadas, no caso, de reofundidas), por interferência na nucleação do sólido ou por interferência no crescimento, após nucleação.

3.1.1. Processos de reofundição por interferência na nucleação

Os processos que envolvem interferência na nucleação consistem, basicamente, de provocar aumento da taxa de nucleação inicial, de modo a promover a formação de núcleos de maneira extensiva em todo o volume do material em solidificação, suprimindo o crescimento dendrítico e resultando em uma estrutura final extremamente refinada e não dendrítica.

É comum a obtenção de pastas com o sólido primário de morfologia globular ou de rosetas e, pode haver ou não formação de fase secundária. Se a taxa de extração de calor for

muito alta, os núcleos presentes terão um crescimento muito reduzido e o soluto pode ficar dissolvido na matriz supersaturada, resultado assim em uma única fase, a primária.

Os processos mais importantes na obtenção de pastas tixotrópicas que envolvem interferência na nucleação são:

Processo Ahresty: Este processo consiste em promover uma alta taxa de nucleação no metal em solidificação através da retirada de calor pelo contato do metal líquido com uma placa inclinada refrigerada, por onde o metal flui trocando calor e gerando núcleos (coquilhamento). A presença de soluto na liga facilita a ocorrência de empescoçamento dos grãos formados e seu arrancamento da superfície da placa por ação do fluxo de líquido. Novos grãos são nucleados e arrancados, gerando uma pasta reofundida que é imediatamente submetida a resfriamento num processo de lingotamento contínuo, como indicado na Figura 3.1. O processo foi desenvolvido por Motegi (1997) e é conhecido como "cooling slope", é atualmente utilizado para fabricação de tarugos de ligas de Al, de Cu e de Mg.



Figura 3.1 - Esquema representativo do processo Ahresty ou "cooling slope" (MOTEGI, 1997).

• *Processo NRC (New Rheocasting Process)*: Neste processo, o metal ou liga é vazado com baixo superaquecimento em um cadinho especial de aço, isolado termicamente em seu

topo e em sua base, impedindo a troca de calor com o meio nestas regiões. No vazamento, o cadinho é inclinado, de modo que o metal flui de maneira semelhante à maneira como flui no processo "cooling slope". Grãos são nucleados na parede do cadinho e daí arrancados por efeito do fluxo de líquido. Após preenchimento, o cadinho é aquecido/refrigerado pra controle da fração sólida. A pasta resultante deste processo apresenta grãos globulares que são imediatamente conformados em processos de fundição sob pressão. A Figura 3.2 apresenta de maneira esquemática o processo NRC. Desenvolvido por Kaufmann et al (2000), o processo encontra atualmente alguma aplicação comercial na fabricação de componentes automotivos de ligas de Al (GIORDANO, 2004).



a) Vazamento b) Resfriamento controlado para Fs adequada



 Processo SSR (semi-solid rheocasting): o processo, de desenvolvimento recente (MARTINEZ, 2001), combina agitação vigorosa por poucos segundos com rápida extração de calor em um banho metálico a temperatura levemente superior à Tliquidus. Um bastão à temperatura ambiente é mergulhado no líquido, agitado por cerca de quinze segundos e retirado. O efeito observado é a nucleação intensa de grãos nas regiões adjacentes ao bastão; com o rápido resfriamento do líquido até uma temperatura no interior da zona solidus-liquidus é obtida pasta com sólido globular e reduzido diâmetro médio. A pasta produzida é imediatamente utilizada em processo de injeção. O processo, patenteado pela Idra Prince Inc., se encontra em fase de desenvolvimento em escala piloto. A Figura 3.3 esquematiza o processo, bem como apresenta desenho esquemático de uma estação contendo quatro cadinhos que deve ser posicionada junto à máquina injetora.



Figura 3.3 – Esquema representativo de processo SSR. a) líquido com reduzido superaquecimento; b) agitação e resfriamento; c) retirada do agitador-pasta reofundida; d) estação de produção de pastas por SSR (YUKO et al, 2004).

3.1.2. Processos de reofundição por interferência no crescimento do sólido durante solidificação

Os processos de fabricação de pastas tixotrópicas por interferência no crescimento do sólido envolvem a agitação do líquido durante a sua solidificação, estimulando mecanismos de multiplicação cristalina e engrossamento dendrítico. Estes mecanismos provocam a ruptura da estrutura formada e sua globularização por mecanismos de engrossamento naturais ou forçados. A estrutura resultante destes processos consiste de glóbulos de fase primária envoltos por uma fase secundária com morfologia fortemente dependente da taxa de resfriamento, geralmente apresentando morfologia dendrítica finamente distribuída (para altas taxas de resfriamento). A esfericidade das partículas sólidas na pasta obtida depende também dos parâmetros do

processamento: podem variar de dendritas fragmentadas a glóbulos com fator de forma próximo do valor unitário.

A agitação do líquido durante seu resfriamento dentro da zona de solidificação pode ser feita por ação mecânica ou eletromagnética.

• *Agitação Mecânica*: O processo é feito pela agitação forçada no líquido em solidificação, em reatores especialmente projetados, levando à ruptura da estrutura dendrítica em formação pela ação de tensões cisalhantes promovidas no líquido à frente de solidificação. Colisões sucessivas com a superfície do rotor, as paredes internas do cadinho e entre partículas, bem como fenômenos naturais de engrossamento, levam a globularização das partículas sólidas (JACKSON, 1966).

Os reatores mais comumente utilizados se valem de rotores ou propulsores tipo pás, para a promoção da agitação. No primeiro caso, equipamentos constituídos de cadinhos fixos ou móveis e rotores imersos no líquido, podem promover rotações conjuntas e oscilações alternadas do cadinho e do eixo; o rotor pode ou não ser retirado do cadinho para o descarregamento da pasta.

No segundo caso, equipamentos de simples concepção podem fornecer bons resultados. Foram desenvolvidos para a produção de compósitos, pois a pequena espessura da região preenchida pelo líquido nos equipamentos com rotores impede a adição de partículas de reforço à pasta. Estes equipamentos podem, no entanto, ser utilizados na produção de pastas sem reforço. Os propulsores podem ser pás individuais ou sistemas de várias pás; ficam mergulhados no líquido e são agitados a uma temperatura e tempo apropriados. Os propulsores podem ou não ser retirados da câmara para descarregamento da pasta reofundida, a qual pode ser vazada ou resfriada na própria câmara, para posterior aquecimento e utilização em processos de tixoconformação. Pode ainda haver rotações simultâneas do cadinho, melhorando a eficiência na dispersão do reforço e na qualidade do reofundido obtido. Um exemplo típico de equipamento é apresentado na Figura 3.4.

A agitação pode ser promovida desde o início da solidificação e durante o resfriamento do líquido até a temperatura pré-determinada para a obtenção da fração sólida desejada, o que caracteriza agitação contínua até o descarregamento da pasta; ou pode ser iniciada e mantida por um determinado tempo à temperatura pré-determinada, caracterizando, portanto, agitação isotérmica. Os parâmetros de controle nestes processos são a velocidade de agitação e taxa de resfriamento, no primeiro caso, e velocidade de agitação, tempo de agitação e taxa de resfriamento, no segundo caso. Agitação contínua durante resfriamento em geral resulta em

pastas de melhor qualidade, isto é, contendo partículas sólidas mais globulares e de menores dimensões.



Figura 3.4 – Esquema representativo de reator tipo propulsor para obtenção de pastas reofundidas (FOGAGNOLO, 1996).

Parâmetros típicos do processo de obtenção de pastas reofundidas de boa qualidade para ligas de Al, utilizando agitação mecânica por propulsores podem ser citados: velocidades de agitação da ordem de 1000 rpm, tempos de agitação da ordem de 15 min e taxas de resfriamento da ordem de 1,2 °C/min (MELO, 2000).

• Agitação Eletromagnética: Neste processo, a agitação é promovida pela ação de um campo magnético imposto ao líquido em solidificação, como mostrado na Figura 3.5. As correntes elétricas induzidas promovem uma forte agitação, rompendo a estrutura em formação e estimulando a multiplicação cristalina, seguida de globularização da estrutura. Este método tende a produzir estruturas pouco globulares (em comparação com outros métodos), porém, muito mais homogêneas do que aquelas geradas em processos convencionais de fundição. Esta homogeneidade se deve à quebra intensa das dendritas que estão se formando dentro da lingoteira, podendo levar cada fragmento à formação de um grão isolado envolto pela fase secundária (PAES, 2000). As principais vantagens deste processo residem na capacidade de produção de pastas por lingotamento contínuo, no baixo consumo de energia e no fato da agitação ser realizada sem que ocorra contato com o metal fundido, evitando qualquer contaminação e também evitando o desgaste do rotor. (VIVÉS, 1992).



Figura 3.5 - Ilustração esquemática do processo de agitação eletromagnética para produção de pastas reofundidas. (a) vista de cima e (b) vista frontal. (VIVÉS, 1993).

O processo teve significativa repercussão comercial nos anos 90, mas, devido à necessidade de re-aquecimento para a completa globularização da estrutura, vem sendo substituído por processos como NRC e SSR e mesmo processos a partir do estado sólido.

3.2. Processos de Fabricação de pastas tixotrópicas a partir da liga sólida

A partir da liga metálica no estado sólido, em diferentes condições como fundida ou trabalhada, é possível a produção de pastas tixotrópicas (denominadas, no caso, de tixofundidas), por simples aquecimento a temperaturas superiores a Tsolidus e sua manutenção e esta temperatura por reduzidos tempos. O processo é chamado fusão parcial controlada (FPC) e envolve a fusão de fases secundárias (podendo haver fusão de alguma porcentagem da fase primária) e globularização da fase primária em meio líquido, por fenômenos naturais de engrossamento. Estes fenômenos são comandados pela necessidade de redução de tensões superficiais.

Os parâmetros de controle do processo de FPC são: a condição da estrutura da matériaprima inicial, a temperatura e tempo de tratamento térmico e a taxa de aquecimento a esta temperatura.

Quanto à temperatura de tratamento, esta define as frações sólida e líquida presentes na pasta e, portanto, o processo de tixoconformação a ser empregado: baixas frações sólidas são utilizadas em processos de tixofundição, enquanto baixas frações líquidas são empregadas em processos de tixoconformação mecânica. A temperatura de tratamento também define a cinética dos mecanismos de globularização envolvidos, os quais envolvem difusão de massa e são termicamente ativados.

Quanto à taxa de aquecimento até a temperatura de tratamento e o tempo de manutenção a esta temperatura, são fundamentais para a complementação das transformações estruturais requeridas para a obtenção da pasta tixotrópica. Reduzidas taxas e excessivos tempos podem levar ao crescimento exagerado dos glóbulos da pasta.

Quanto à condição da estrutura da matéria-prima, os processos de FPC podem ser divididos em:

- FPC de Estruturas Dendríticas: A manutenção de ligas com estruturas solidificadas convencionalmente acima da temperatura *solidus* permite a transformação, através de fenômenos de engrossamento, da microestrutura originalmente dendrítica em globular. A transformação ocorre pela redução de energia superficial e se dá pela fusão das fases secundárias cujo líquido formado envolve as dendritas da fase primária de forma a permitir a globularização da fração sólida restante. Durante a transformação a microestrutura passa por estágios intermediários, desde dendritas irregulares, dendritas com morfologia de rosetas até a forma final de glóbulos irregulares de grandes dimensões, freqüentemente com poças de líquido em seu interior. (ROBERT, 1993).
- FPC de Estruturas Refinadas: Neste caso, a matéria-prima apresenta estrutura extremamente refinada, muitas vezes com supressão total da presença de dendritas. Nestas condições a globularização ocorre de forma rápida, sem passar por estágios morfológicos intermediários, como no caso de estruturas brutas de fusão. As pastas produzidas utilizando matéria-prima nesta condição apresentam glóbulos de tamanhos reduzidos, sem a presença de líquido em seu interior. O ultra-refino pode ser produzido por diferentes

técnicas, como ultra-refino por ação de agentes nucleantes associada a alta taxa de extração de calor e processos de jateamento do líquido em moldes apropriados.(ROVIRA, 1998).

Processo Stirring Synthesys:: o processo, de origem japonesa consiste em estimular a nucleação através da ação de um rotor facetado posicionado no interior de um recipiente fechado, cilíndrico, onde é vazado o metal líquido. O rotor impulsiona o metal líquido contra as paredes internas do recipiente, provocando a formação de gotículas líquidas que são recolhidas em um molde onde são solidificadas com alta taxa de extração de calor. A estrutura resultante apresenta grãos equiaxiais finos, sem a formação de dendritas, e, por aquecimento a temperaturas superiores a Tsolidus, dão origem à pasta tixotrópica. A Figura 3.6 ilustra o processo.



Figura 3.6 - Esquema representativo do processo Stirring synthesis.

 Processo Osprey: Consiste em gerar um spray com a liga líquida sob pressão, provocando a formação de gotículas que se solidificarão com alta taxa de nucleação, ativada pela elevada troca de calor. O metal líquido é impulsionado através de um canal, a partir de um recipiente, pela pressão de Ar ou N_2 injetado sob pressão no fluxo do metal, gerando gotículas que se projetam sobre um molde onde são solidificadas. O material obtido deve então ser posteriormente reaquecido para a produção da pasta tixotrópica com a fração líquida adequada ao processo de tixoconformação a que se destina. O processo, patenteado pela Osprey Inc., tem utilização limitada para este fim devido ao seu elevado custo.

FPC de Estruturas Dendríticas Deformadas: Neste processo, estrutura inicial dendrítica é deformada a frio e reaquecida posteriormente acima da temperatura solidus até o valor desejado de fração sólida, onde é mantida para que ocorra a globularização. O reaquecimento da estrutura deformada causa a sua recristalização e ao atingir-se a temperatura solidus, ocorre a fusão das fases secundárias presentes em contornos de grãos originais. Se a energia dos contornos de grãos recristalizados for elevada, líquido pode penetrar nesta região, liberando estes novos grãos para o líquido, onde crescem equiaxialmente. A condição para que isto ocorra é dada por:

$$\mathcal{O}_{cg} > 2. \mathcal{O}_{sl}$$

onde \wp_{cg} = energia do contorno recristalizado.

 \wp_{sl} = tensão superficial sólido/líquido.

As pastas resultantes deste processo apresentam glóbulos bem definidos, de reduzidas dimensões e sem a presença de líquido retido em seu interior (ROBERT, 1993).

3.3 Processos de Conformação no Estado Semi-sólido

O comportamento reológico de ligas semi-sólidas tixotrópicas trouxe como principais implicações o desenvolvimento da tecnologia de reofundição e da tixoconformação, uma vez que estes materiais podem ser utilizados tanto em conformação por fundição, em processos como injeção e compressão, quanto em processos mecânicos como forjamento e extrusão, dependendo somente da fração sólida presente na pasta. Todos os processos de conformação de semi-sólidos são baseados nos processos existentes no mercado e o equipamento convencional pode ser empregado com relativa facilidade, sem que sejam necessárias grandes modificações. A seguir são apresentados os principais processos de tixoconformação com potencial comercial:

• **Tixoinjeção**: a tixofundição por injeção foi o processo pioneiro no desenvolvimento e aplicação da tecnologia de conformação de metais em estado semi-sólido, sendo, portanto o processo de tixoconformação mais amplamente dominado atualmente. O equipamento comumente utilizado na tixoinjeção é a máquina injetora do tipo horizontal, geralmente de capacidade maior do que as convencionalmente utilizadas, tendo a ela associados fornos de reaquecimento da matéria-prima com morfologia globular ou pré-globular para a obtenção da fração líquida desejada (YOUNG, 1994).

Yoon et al (2004) estudaram com sucesso a produção de articulações de suspensões automotivas a partir da tixoinjeção de ligas de alumínio, constatando a grande influência da velocidade de injeção do semi-sólido na resistência mecânica, limite de escoamento e elongação das peças produzidas.

Govender e Reinhardt (2002) comprovaram a alta resistência mecânica das ligas A356 e A357, ambas empregadas na produção de suspensão de automóveis, através da tixofundição e também a boa soldabilidade das ligas obtidas por esse processo, frente ao processo convencional de fundição sob pressão.

Garat e Grillon (2002) relatam o uso da tixoinjeção na produção de peças com formas complexas até 4 kg com características metalúrgicas para alto desempenho, aliadas à redução de custos com equipamento e o bom potencial para uso do processo na produção de peças com boa qualidade superficial.

Hirt (2000) demonstrou que as propriedades mecânicas das peças tixofundidas são melhores ou no mínimo similares às obtidas pelo processo convencional de fundição sob pressão. A frente de avanço não turbulento permite um melhor preenchimento do molde, produzindo peças livres de poros e inclusões; também há melhor acomodação das tensões internas (sólido globular), o que reduz a ocorrência de trincas de contração, resultando em estruturas mais homogêneas com melhores propriedades mecânicas.

Para maiores detalhes sobre o emprego da tixoinjeção, citações podem ser encontrados na literatura nos trabalhos de Kuroki (2004), Kang (2004), Liu et al (2002), Svare et al (2002), Chiarmeta (2000) e Pitts (1998).

• **Tixoforjamento**: o tixoforjamento ocupa o segundo lugar em termos de aplicação industrial de processos de fabricação envolvendo pastas metálicas semi-sólidas. Compreende duas etapas: a obtenção da matéria-prima na condição globular e a conformação propriamente dita. A obtenção da matéria-prima (pasta) pode ser feita através de qualquer um dos processos anteriormente descritos e a conformação pode ser efetuada imediatamente a partir do estado pastoso. A pasta pode também ser resfriada à temperatura ambiente e armazenada para posterior conformação. Neste caso, o material é reaquecido para recuperação do estado pastoso e obtenção da fração líquida desejada, e então conformado. A boa qualidade superficial e atendimento dos critérios dimensionais no produto tixoforjado dependem do perfeito controle de parâmetros operacionais no processo (RAMATI, 1978). Os principais parâmetros de controle podem ser citados:

 I) Temperatura e material da ferramenta de tixoforjamento: a temperatura da matriz e do punção empregados devem ser tais que inibam excessiva troca de calor com a pasta tixotrópica, evitando seu resfriamento e conseqüente perda de fluidez. A literatura especializada tem apresentado bons resultados obtidos pela utilização de ferramental a temperaturas semelhantes à do material no estado semi-sólido.

Rovira (1996) apresentou resultados de tixoforjamento, em matriz de aço AISI H13 aquecida à temperatura da pasta, de uma peça de classe de forma 2, segundo a teoria do forjamento convencional, a partir da liga Al-4,5% Cu. Os produtos obtidos mostraram a possibilidade de conformação da liga no estado semi-sólido com peças que reproduziram as cavidades da matriz e com boa qualidade superficial. Os valores das forças requeridas foram da ordem de 35% do valor das forças necessárias para o forjamento convencional.

O mesmo autor, em outro trabalho, testou com sucesso o tixoforjamento da liga A2011 em matrizes de aço AISI H13 também aquecidas à temperatura da pasta, obtendo peças de classe de forma 3 com boa qualidade superficial e reprodução geométrica da matriz, empregando forças da ordem de 30% dos valores requeridos para o forjamento sólido (ROVIRA, 2001).

Quanto ao material empregado na confecção do ferramental para tixoforjamento, pesquisas têm indicado a possibilidade da utilização de materiais cerâmicos, de menor custo e menor condutividade térmica. As reduzidas forças requeridas no tixoforjamento permitem o emprego destes materiais em substituição aos aços de alta resistência mecânica para uso em altas temperaturas.
Pitts (1998) empregou moldes confeccionados a partir de um compósito de grafite e fibras de vidro no tixoforjamento da liga A6061, o qual recebeu o nome comercial Sindayo[®]. Os produtos tixoforjados obtidos não apresentaram um bom acabamento superficial, o molde então foi aperfeiçoado por Burke (1998) pela adição de um lubrificante a base de nitreto de boro, obtendo finalmente peças com bom acabamento superficial e bom preenchimento a partir da liga A7075.

Pella (2002) analisou a viabilidade de utilização de matrizes refratárias não-metálicas como areia aglomerada com resina fenólica e cimento comum, no tixoforjamento de uma peça de classe de forma 3 a partir da liga A2011. Os resultados obtidos mostraram produtos com um bom acabamento superficial, tornando o emprego destes materiais uma boa alternativa para redução dos custos de tixoforjamento.

Behrens et al (2004) discutem o emprego de ferramentas metálicas com insertos cerâmicos para o tixoforjamento de aço AISI 1060 obtendo resultados promissores como utilização de insertos de nitreto de Si em moldes de aços de alta resistência ao calor.

 II) Velocidade de conformação: a velocidade de conformação determina a velocidade de escoamento da pasta e, portanto, o preenchimento correto da cavidade da matriz e qualidade superficial do produto obtido (KITAMURA, 1994; KIRKWOOD, 1994).

Neudenberger et al (2000) em seus estudos sobre conformação de ligas no estado semisólido analisaram alguns parâmetros como velocidade de tixoconformação e geometria da matriz, concluindo a viabilidade de emprego dos processos para obtenção de produtos acabados em diversas geometrias da matriz.

Behrens et al (op. cit.) conclui em seu trabalho sobre o tixoforjamento do aço AISI 1060 que o processo deve buscar encontrar o ponto ótimo entre condições opostas: uma velocidade de conformação rápida o suficiente para prevenir o resfriamento do material e perda de suas características tixotrópicas e ao mesmo tempo evitar heterogeneidades microestruturais causadas durante o fluxo de material na matriz. Estas heterogeneidades são resultado da irregular distribuição das fases sólida e líquida na microestrutura, promovida pela segregação do líquido na frente de escoamento, durante o preenchimento do molde.

Modigell et al (2002) pesquisaram a influência dos parâmetros de tixoforjamento na qualidade dos produtos através de técnicas de modelagem. Os testes mostraram que o efeito de segregação do líquido é afetado principalmente pelo teor inicial de sólido do material, onde um

aumento da fração sólida causa um aumento da segregação de líquido no produto tixoforjado. Foi observado também que a influência da velocidade do processo é muito pequena, quando a segregação do líquido ocorre principalmente na presença de mudanças bruscas na área de seção da matriz de pequena para grande. Mudanças na direção do escoamento mostram ter pouca influência na qualidade dos produtos.

Xie et al (2002), em pesquisa sobre a influência dos parâmetros do processo no tixoforjamento da liga AlSi7Mg, também observam que uma maior velocidade de preenchimento acarreta melhor homogeneidade da microestrutura final.

III) Condição da microestrutura da pasta tixotrópica: as propriedades de escoamento de uma pasta metálica dependem de sua constituição: a relação entre as frações sólida e líquida presentes, a globularidade e dimensões das partículas da fase sólida bem como a interação entre elas. Por sua vez, estas características dependem do método de fabricação da pasta que dependem da condição da matéria-prima inicial. Como visto em item anterior, matéria-prima originalmente com estrutura ultra-refinada, por exemplo, origina pastas com partículas sólidas mais globulares e de menores dimensões que estruturas dendríticas.

Estudos recentes têm procurado investigar a influência da estrutura da pasta em suas propriedades de escoamento utilizando técnicas sofisticadas para a modelagem espacial do arranjo de glóbulos, como tomografia e difração de raios X por luz síncrotron (op. cit.).

Autores como Motegi et al (2002) já observaram que o comportamento no tixoforjamento, avaliado pela distância percorrida no molde e força máxima requerida é dependente do processo de obtenção da pasta: pastas obtidas por controle da nucleação do líquido apresentam maior fluidez do que pastas obtidas por agitação mecânica do líquido durante sua solidificação. Os autores sugerem que processos envolvendo controle de nucleação promovem menores interações entre glóbulos do que processos envolvendo ruptura dendrítica.

O assunto é ainda bastante novo e o aprimoramento de técnicas de análise que permitam o entendimento do arranjo espacial da pasta tixotrópica com certeza levará à melhor caracterização da relação estrutura x propriedades destas pastas.

• **Tixoestampagem**: Não se dispõe na literatura de muitas informações a respeito da estampagem de materiais no estado semi-sólido.

22

Adamiak e Robert (1999) foram uns dos primeiros pesquisadores a se interessarem pelo assunto e estudaram o comportamento da liga AA 5052 no estado tixofundido sólido durante a estampagem profunda, analisando o comportamento estrutural, conformabilidade e mecânica da fratura dos produtos obtidos. Observaram a possibilidade de estampagem de chapas reofundidas com valores de força 50% menores do que no caso da estampagem convencional; também observaram maiores valores de deformação na estampagem, da ordem de 40% superiores nas chapas no estado tixofundido comparativamente às chapas no estado laminado, mostrando a possibilidade de conformação de geometrias mais complexas em um número menor de passos quando se utilizam estruturas tixofundidas.

Em trabalho mais recente, Pires et al (2001) analisaram a possibilidade de estampagem destas mesmas ligas no estado semi-sólido. Os resultados obtidos indicam a viabilidade de produção por tixoestampagem a partir de chapas de elevada espessura. Os autores observaram que a constituição da pasta tixotrópica, contendo sólidos interconectados em arranjos tridimensionais, permite a manutenção de sua integridade quando submetida a tensões de tração de um certo limite. Assim, foi demonstrada a possibilidade de fabricação por estampagem no estado semi-sólido de produtos de boa qualidade.

Capítulo 4

Procedimentos Experimentais

4.1) Caracterização da liga utilizada (A356)

Utilizou-se neste trabalho a liga comercial A356, cuja composição principal, é Al-7,0% em massa de Si. Para a seleção desta liga foram considerados alguns pontos essenciais, levando em conta seu vasto emprego e suas características físicas. São estas as principais justificativas:

- a. Possui um intervalo de cerca de 40 °C entre a temperatura *solidus* e a temperatura *liquidus*, valor que permite um melhor controle dos parâmetros de processo durante o tixoforjamento.
- b. É uma liga de amplo uso comercial, principalmente na indústria automobilística e espacial, por apresentar boas propriedades mecânicas e cujo emprego em processos metalúrgicos é excepcional, devido a sua boa fluidez no estado fundido.
- c. Apresenta um semi-sólido com fácil identificação das fases, o que permite uma melhor caracterização metalúrgica da pasta reofundida ou tixofundida.
- d. Apesar do alto emprego comercial em processos tradicionais de conformação, a literatura não dispõe de muitos dados de conformação desta liga no estado semi-sólido, instigando a pesquisa para o desenvolvimento da ciência da tixoconformação.

4.1.1) Composição química

A composição química da liga utilizada foi fornecida pela ALCOA DO BRASIL S/A, realizada através de espectometria de emissão atômica. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 4.1.

%Al	%Cu	%Fe	%Mg	%Mn	%Si	%Ti
92,1	0,2	0,2	0,2	0,2	6,9	0,1

Tabela 4.1 – Composição química da liga A356 (% em massa).

4.1.2) Diagrama de fases

O diagrama de fases binário Al-Si é apresentado na Figura 4.1, com a composição da liga Al-7%Si em destaque. Após solidificação total em condições normais, a liga apresenta duas fases, uma com estrutura morfológica composta de dendritas da fase primária, chamada Al- α , e uma segunda fase formada de silício puro de forma acicular. Uma vez que o alumínio não tem solubilidade no silício, não há a formação de uma fase beta, sendo o eutético formado de α + Si.



Figura 4.1 – Diagrama de fases parcial Al – Si (Metals Handbook).

4.1.3. Determinação do intervalo de solidificação

Para determinação das temperaturas *liquidus* e *solidus* da liga utilizada foram realizados dois ensaios: curva de resfriamento durante a solidificação convencional e curva de resfriamento e aquecimento por Análise Térmica Diferencial (ATD). A realização do ensaio de ATD teve como objetivo uma maior precisão das temperaturas de transformação de fases da liga.

A curva de resfriamento (Temperatura versus Tempo) durante a solidificação, mostrada na Figura 4.2, foi obtida após o vazamento da liga, com superaquecimento de aproximadamente 50 °C da temperatura *liquidus* teórica, em cadinho metálico. Os dados foram coletados através de um sistema de aquisição constituído por um termopar do tipo K, conectado a um indicador de temperatura da marca Autonics, modelo T4WM-N3NKCC, com faixa de utilização de 0 °C a 1200 °C e erro de ± 1 °C. O software de processamento de dados utilizado foi o *Forja*, da T & S Equipamentos.



Figura 4.2 – Curva de resfriamento simples da liga A356 durante a solidificação.

Observa-se na Figura 4.2 uma temperatura *liquidus* de aproximadamente 610 °C e uma temperatura *solidus* de aproximadamente 568 °C.

O ensaio de ATD foi realizado utilizando um equipamento da marca NETZSCH, modelo STA 409; onde está acoplado um controlador modelo TASC 414/x ligado a uma placa analógica digital modelo IEEE 488, que permite o processamento automático dos dados fornecidos nas diferentes corridas experimentais. O software utilizado para o processamento e leitura dos dados foi o NTZSCH TA. Utilizou-se no ensaio um taxa de aquecimento/resfriamento de 5 °C/min e cada ensaio foi repetido duas vezes.

Observa-se na Figura 4.3 o resultado do ensaio, onde a curva em vermelho (curva 1) refere-se aos ciclos térmicos realizados e a curva em azul (curva 2), refere-se à variação do fluxo de calor versus temperatura durante o aquecimento e resfriamento da liga. Os picos endotérmicos e exotérmicos da curva 2 correspondem, respectivamente, à absorção e liberação de energia em cada ciclo do ensaio.



Figura 4.3 – Curva de Análise Térmica Diferencial da liga A356.

Para maior precisão na determinação das temperaturas de transição de fase, foi feita a ampliação dos picos endotérmico e exotérmico obtidos, mostrados na Figura 4.4, dos quais se

obtém temperatura *solidus* de aproximadamente 578 °C e temperatura *liquidus* de aproximadamente 618 °C.



Figura 4.4 – Ampliação dos picos endotérmico (577,9 °C) e exotérmico (618,0 °C) da curva obtida na ATD da liga A356.

Percebe-se uma pequena diferença entre os valores obtidos através da curva de solidificação Temperatura versus Tempo e o ensaio de ATD, sendo esta última análise superior em 10 °C para a temperatura *solidus* e em 8 °C para a temperatura *liquidus*. Esta diferença devese ao fato de que na análise térmica diferencial tem-se condições de resfriamento e aquecimentos lentas, ou seja, mais próximas do equilíbrio. De acordo com estes resultados foram adotadas as temperaturas de transformação de fase obtidas no ensaio de ATD.

4.2) Caracterização do reforço (Al₂O₃) para fabricação do compósito

A alumina utilizada no trabalho foi fornecida pela ALCOA DO BRASIL S/A e foi caracterizada para confirmação da sua composição por difração de raios X (DRX). Para caracterização da morfologia das partículas foi usado um microscópio eletrônico de varredura e usou-se também classificação granulométrica para determinação do diâmetro médio das

partículas.

4.2.1) Difração de raios-X

A Figura 4.5 apresenta os picos de difração resultantes do ensaio efetuado na alumina, confirmando sua composição, uma vez que foram detectados somente picos relativos a esta composição.



Figura 4.5 – Difratograma do pó de Al₂O₃.

4.2.2) Microscopia eletrônica de varredura

Na figura 4.6 é apresentada uma foto da alumina em pó, obtida através de microscopia eletrônica de varredura, em que se pode observar que as partículas apresentam uma morfologia na

forma de plaquetas, com forte aglomeração, o que pode prejudicar sua distribuição na matriz na fabricação do compósito.



Figura 4.6 – Foto obtida por MEV dos grãos da alumina utilizada.

4.2.3) Análise granulométrica

O conhecimento do tamanho médio das partículas da alumina é um dado importante, pois partículas com dimensões muito reduzidas apresentam uma área específica muito grande, prejudicando a interação sólido-fluido e, conseqüentemente, reduzindo a cinética do processo de incorporação do reforço na matriz (SOUZA SANTOS, 1989). Na compofundição (obtenção de compósitos a partir de pastas reofundidas), melhores resultados têm sido obtidos quando as dimensões das partículas são da ordem de grandeza do espaçamento entre as partículas da fase sólida de liga reofundida (RAY, 1995). Na Figura 4.7 é apresentada a distribuição granulométrica do pó de alumina utilizado, tendo como tamanho mediano 7,0 μm. Neste ensaio foi empregado um equipamento modelo MASTERSIZER 2000, O ensaio consiste no emprego de laser para determinação do tamanho mediano de partícula.



Figura 4.7 – Análise granulométrica do pó de Al₂O₃ utilizado como reforço.

4.3) Produção de matéria prima para o tixoforjamento

Neste trabalho foi investigado o comportamento no tixoforjamento de pastas tixotrópicas da liga A356 obtidas por diferentes processos: por agitação mecânica do líquido durante o resfriamento, em equipamento especialmente projetado e construído para este fim; por fusão parcial controlada de estruturas fundidas grosseiras e por fusão parcial controlada de estruturas fundidas refinadas. Foi também investigado o comportamento no tixoforjamento de compósitos A356 + Al₂O₃, obtido por compofundição.

4.3.1) Produção de pastas tixotrópicas por agitação mecânica

4.3.1.1) Construção do equipamento

Para a produção de pastas tixotrópicas através de agitação mecânica foi projetado e construído um equipamento que permitisse um número mínimo de operações manuais tornando o processo menos dependente do operador. Basicamente, o equipamento é constituído de um forno, dotado de um sistema de alimentação mecânico, e de um sistema de agitação, somando-se a estas partes os respectivos controladores, como mostrado na Figura 4.8 e descrito nos itens que se seguem:



Figura 4.8 – Equipamento de compofundição: (1) sistema de alimentação; (2) forno; (3) controlador do forno; (4) motor elétrico e agitador; (5) controlador de velocidade do motor.

(1) um sistema de alimentação (Figura 4.9) dotado de um elevador onde o cadinho é posicionado e conduzido até o interior da câmara do forno e retirado após o fim do processo. O sistema é ativado através do acionamento de um botão no painel do forno. Duas chaves de fim de curso posicionadas na parte inferior e na parte superior do trilho definem o percurso.



Figura 4.9 – Sistema de alimentação do forno.

(2) um forno resistivo (Figura 4.10) modelo FE-1200/V, da Maitec Ltda., com 6000 watts de potência e capacidade para 5 litros de material fundido. A câmara possui 150 mm de diâmetro por 230 mm de altura e é isolada internamente por fibra cerâmica e

externamente por aço inoxidável.



Figura 4.10 – Câmara do forno (com vista do cadinho e do agitador).

(3) um controlador microprocessado (Figura 4.11) tipo PID, com 10 rampas e 10 patamares, dotado de um controle de segurança para excesso de temperatura ou dano do termopar, cuja variação em torno do *set point* é de 0,5 ° C.



Figura 4.11 – Controlador do forno.

(4) um motor elétrico (Figura 4.12) com potência de 3000 watts para uma tensão de 220V em cujo eixo é acoplado o rotor utilizado na agitação do fundido. O motor é fixado em uma base de um sistema corrediço que permite regular a altura relativa do agitador à base do cadinho.



Figura 4.12 – Motor elétrico para agitação do rotor.

Ao motor elétrico foi acoplado um agitador construído em aço inox AISI 304 com dimensões que pudessem ser introduzidas no cadinho. A eficiência na agitação do fundido e na dispersão do reforço dentro do fundido é função, entre outros parâmetros, das dimensões do agitador que devem obedecer algumas relações matemáticas baseadas na altura (H) e no diâmetro do cadinho (D) (NAGATA, 1975):

- Comprimento da Pá = 0,4D;
- Largura da Pá \leq 0,1H;
- Altura do Agitador relativa à base $\leq 0,3$ H.

Baseado nas relações acima, o agitador foi confeccionado em aço inox AISI 304 através de uma operação inicial de usinagem de um tarugo até a largura da pá e usinagem posterior para ajuste da altura total do agitador e da pá. Em seguida, a base circular foi fresada para a obtenção das quatro pás de agitação. Essa seqüência de operações é mostrada na Figura 4.13.



Figura 4.13 – Etapas de obtenção do agitador em aço inox 304, 1) tarugo, 2) tarugo usinado, 3) rotor usinado e fresado.

(5) um inversor de freqüência (Figura 4.14) modelo CFW080070T2024PSZ, da WEG S.A, de 220V, operando com uma freqüência de entrada de 50/60 Hz ± 2 Hz e freqüência de saída de 0 a 300 Hz, cujo sistema de frenagem é reostático e a eficiência é sempre maior que 95,0%.



Figura 4.14 – Inversor de freqüência (controle da velocidade de agitação).

4.3.1.2) Ensaios preliminares

Feitos os ajustes iniciais no equipamento de compofundição, foram realizados experimentos para levantamento dos parâmetros operacionais que proporcionassem a obtenção de pastas tixotrópicas de boa qualidade, isto é, pastas com microestrutura globular e homogênea. Os parâmetros testados estão listados na Tabela 4.2, e foram determinados com base em resultados anteriores (MUSSI, 2000). Variou-se a temperatura inicial de agitação (de 585 a 650 °C) e o tempo de agitação (de 3 a 5 minutos). Nestas condições e com taxas semelhantes de resfriamento, são previstas frações sólidas da ordem de 60 a 80%.

Condição	Temp. Inicial de Agitação (°C)	Velocidade de Agitação (RPM)	Tempo de Agitação (min)
1	650	1000	5
2	620	1000	5
3	600	1000	5
4	585	1000	3

Tabela 4.2 – Condições iniciais do processo de produção de pastas por agitação mecânica.

Os cadinhos utilizados no experimento foram fabricados em aço SAE 1020, com diâmetro interno de 90 mm, altura de 115 mm e espessura da parede de 3 mm. Para facilitar a operação de desmoldagem, além da conicidade de 2 °, o interior do cadinho foi impregnado com uma camada de alumina. Na tampa do cadinho, fabricada do mesmo aço, foi feito um furo de 12 mm de diâmetro para passar o eixo do agitador, de 11 mm de diâmetro, como mostrado na Figura 4.15.



Figura 4.15 – Detalhe da tampa do cadinho com o furo para passagem do eixo do rotor.

Foi feita uma escala de ajuste da altura relativa, para leitura externa, do rotor à base do cadinho, permitindo que o rotor fosse inserido e posicionado no interior do banho somente no início da agitação. Durante o aquecimento da liga, o rotor ficou posicionado acima de sua superfície. Assim como o interior do cadinho, o rotor também foi impregnado com alumina para minimizar a aderência com a liga fundida, evitando que durante a sua retirada fosse arrastada uma grande quantidade de material.

4.3.1.3) Descrição do experimento típico

Inicialmente, uma massa de aproximadamente 1550 gramas da liga foi introduzida no forno e aquecida até a temperatura de 670 °C. Para monitoramento da temperatura foram utilizados, além do indicador do forno, dois termopares tipo K posicionados externamente à parede do cadinho, um na sua base e o outro na parte superior em contato com a tampa do cadinho. Estabilizada a temperatura, a pá, que já se encontrava à mesma temperatura, foi posicionada até a altura adequada dentro do fundido e monitorou-se o resfriamento até atingir a temperatura inicial de agitação. Neste momento, foi acionada a agitação a uma velocidade de 1000 rpm e, ao atingir-se o tempo estipulado, o cadinho foi retirado do forno e resfriado ao ar até a temperatura ambiente. Cada condição foi repetida três vezes.

Para as condições 1 e 2 ocorreu um "jateamento" do fundido pela pá, havendo expulsão do material pelo orifício da tampa do cadinho, onde passa o eixo do motor. Para a condição 4 a pá ficou presa devido à rápida solidificação do fundido depois de decorrido o tempo de agitação. Para os experimentos definitivos foi escolhida, portanto, a condição 3. Observou-se em todos os casos a formação de um vazio no topo do lingote, de aproximadamente 15 mm, devido ao arraste de material pela pá quando da sua retirada.

Após resfriamento completo, os tarugos obtidos, com dimensões finais de 75 mm de altura por 90 de diâmetro, tiveram porções da base e do centro retiradas longitudinalmente e submetidas à macro e microanálises.

4.3.2) Preparação de pastas por fusão parcial controlada

4.3.2.1) Preparação da matéria-prima e tratamento térmico

Para a obtenção de pastas tixotrópicas por fusão parcial inicialmente foram produzidos tarugos fundidos convencionalmente, portanto com microestrutura dendrítica, com dois distintos tamanhos de grãos, caracterizados aqui como "grosseiro" e "refinado".

Para a obtenção de tarugos com estrutura grosseira a liga foi fundida e vazada com um superaquecimento de 90 °C em um cadinho cerâmico, medindo 200 mm de altura por 100 mm de diâmetro, sendo resfriada à temperatura ambiente. Os tarugos com microestrutura refinada foram produzidos através do refino químico da liga pela adição de 0,5% em massa da ante-liga Al-5%Ti-1%B. A liga A356 foi aquecida à temperatura de 730 °C e inoculada a 650 °C, sendo em seguida vazada em um cadinho metálico e resfriada ao ar. Para a fusão da liga e controle da temperatura de vazamento, nesta etapa, foram utilizados um forno tipo poço e um termopar tipo K, introduzido no cadinho. A partir dos tarugos fundidos foram usinados corpos de prova cilíndricos de 36 mm de altura por 20 mm de diâmetro, e submetidos a tratamento térmico para globularização da estrutura e obtenção da pasta tixotrópica.

O tratamento de FPC foi realizado no interior da matriz de tixoforjamento, tendo sido testadas as condições descritas na Tabela 4.3. Para todas elas foi utilizado um tempo de 5 minutos de retenção à temperatura de trabalho.

Condição	Temperatura	Fração Sólida Prevista		
Condição	(°C)	(%)		
1	580	55		
2	590	45		
3	600	35		

Tabela 4.3-Parâmetros de tratamento térmico testados.

Para o cálculo da fração sólida correspondente a cada condição foi utilizada a equação de Scheil (Equação 4.1). Deve-se lembrar que a equação de Scheil considera como restrita a difusão de soluto no sólido e como total a difusão no líquido durante a solidificação, portanto não correspondendo a condições de equilíbrio.

$$f_s = 1 - \begin{pmatrix} T_f - T \\ / T_f - T_l \end{pmatrix}^{\frac{1}{k-1}}$$
 (Equação 4.1)

em que: fs - fração sólida

- T_f temperatura de fusão do metal puro
- T temperatura da amostra
- T₁ temperatura *liquidus* da liga
- k coeficiente de partição da liga

4.3.2.2) Descrição de experimento típico

Para o tratamento de FPC os corpos de prova cilíndricos foram aquecidos dentro da matriz desde a temperatura ambiente até a temperatura de tratamento a uma taxa de aquecimento de 4 °C/minuto. As dimensões dos tarugos foram calculadas baseando-se no diâmetro interno e na altura total da matriz de tixoforjamento, que será descrita posteriormente, juntamente com o ferramental utilizado, de modo que a peça obtida tivesse uma altura final de 10 mm. Para monitoramento da temperatura foi utilizado um indicador de temperatura de cinco canais modelo T4WM-N3NKCC, da Autonics, com faixa de utilização de 0 °C a 1200 °C com variação máxima de \pm 1 °C. Os termopares utilizados do tipo K foram colocados nos seguintes pontos: 1) no interior do tarugo, através de um orifício feito no seu centro; 2) na parede da matriz; 3) no espaçamento entre a matriz e o forno. O tempo de tratamento foi medido somente após a estabilização da temperatura de tratamento no tarugo e na matriz, através de um cronômetro digital. Decorrido esse tempo (5 min), a peça foi imediatamente submetida ao tixoforjamento e em seguida resfriada ao ar até a temperatura ambiente.

4.3.3) Produção de compósitos por compofundição

Para a produção dos compósitos foi empregada a técnica de compofundição, que consiste na introdução do reforço durante a agitação da matriz no intervalo semi-sólido. Os parâmetros utilizados encontram-se descritos na Tabela 3.4, em que se nota que foi variado apenas o teor de Al_2O_3 . Os demais parâmetros (temperatura e tempo de agitação) foram baseados nos testes realizados na produção de pastas por agitação mecânica, (item 4.3.1.1), usando-se a melhor condição obtida, 600 °C a 1000 rpm durante 5 minutos.

Condição		Teor de Reforço – Em		
		massa		
		(%)		
	1	5		
	2	10		
	3	15		

Tabela 4.4 – Teores de reforço empregados na produção do compósito.

4.3.3.1) Descrição de experimento típico

Os experimentos foram realizados no mesmo equipamento utilizado para produção das pastas e foram repetidos três vezes para cada condição. Usou-se ainda uma mufla modelo EDGCON 5P, da EDG Equipamentos, para fusão da liga e aquecimento do reforço.

Foram pesados inicialmente uma massa de 1550 gramas da liga A356 e uma massa correspondente a 5, 10 e 15% em peso de alumina. Para evitar que o reforço fosse expelido no momento de sua incorporação, este foi acondicionado em uma folha de alumínio e pré-aquecido a 700 °C. O invólucro foi depositado em um cadinho de aço SAE 1020 de 115 mm de altura por 90 mm de diâmetro com parede de 3 mm de espessura. A superfície interna do cadinho foi impregnada com uma fina camada de alumina para facilitar a desmoldagem do compósito.

Após fusão, a liga líquida foi vazada sobre o reforço, a 670 °C. Imediatamente, o conjunto foi colocado no compoagitador e, atingida a temperatura desejada para a condição de teste, a agitação foi acionada a 1000 rpm. Decorridos os 5 minutos da agitação, o rotor foi desligado e o compósito foi retirado, sendo resfriado ao ar e posteriormente desmoldado. Foram obtidos tarugos de dimensões 90 mm de diâmetro por 90 mm de altura. Para retirada do vazio gerado pela remoção do rotor de agitação, foi eliminada uma porção de 15 mm de altura da parte superior do tarugo, do qual foram retirados corpos de prova cilíndricos para ensaio de tixoforjamento.

4.4) Processo de tixoforjamento

4.4.1) Equipamentos utilizados

A Figura 4.16 apresenta esquematicamente os equipamentos utilizados no processo de tixoforjamento, composto por uma prensa, um forno de aquecimento, um módulo de aquisição de dados (através do qual são monitoradas a força aplicada e temperatura da amostra) constituído de célula de carga, módulo indicador transmissor de pesagem, cartão conversor analógico/digital (A/D) e um computador com um *software* apropriado para leitura e processamento de dados. Os diferentes componentes do equipamento são descritos como segue:



Figura 4.16 - Esquema representativo do sistema de tixoforjamento montado: (a) forno portátil, (b) matriz de forjamento, (c) punção, (d) célula de carga, (e) módulo indicador de pesagem, (f) placa analógica digital, (g) computador, (h) impressora.

(1) um forno resistivo, apresentado esquematicamente na Figura 4.17, com 3,1 kW de potência máxima, dotado de uma câmara interna retangular, medindo 280 x 140 x 140 mm. Para controle da temperatura do forno foi utilizado um termopar tipo K ligado a um controlador microprocessado da marca OMRON, com precisão de \pm 1 K, que permite o cálculo da potência necessária para manter a estabilidade térmica através de um cálculo proporcional diferencial. Foram instalados dois termopares tipo K, posicionados nas laterais da matriz e um no centro do tarugo, conectados a um registrador de temperatura de cinco canais, da IP & T, para monitoramento da temperatura interna do conjunto. O forno é cambiável, podendo ser colocado e retirado da mesa da prensa de tixoforjamento, facilitando assim seu transporte e instalação.



Figura 4.17 – Forno de tixoforjamento e indicação da posição dos termopares (ROVIRA, 2001).

(2) uma prensa hidráulica da marca FAREX, com capacidade de carga máxima de 300 kN, dotada de um manômetro com uma precisão de 5 x 10^{-3} Pa. Foi desenvolvida uma mesa (ROVIRA, 2001) com ajuste de altura para apoiar o conjunto matriz e forno, sendo

colocada na base da mesa uma manta refratária para evitar que o calor gerado pelo forno seja transferido para a prensa. A necessidade de instalação dessa mesa deveu-se à exigência de uma melhor centralização da matriz em relação ao pistão hidráulico da prensa, posicionado verticalmente sobre a matriz.

(3) uma célula de carga modelo W, da ALFA Instrumentos. A célula é fabricada em aço de alta resistência, revestido com níquel, com proteção IP67 à prova de água. Possui 4 sensores (extensômetros elétricos) ligados em ponte de Wheatstone, permitindo compensação da temperatura entre 0 e 50 °C. A célula de carga é ligada ao indicador transmissor de pesagem modelo 3103, também da ALFA Instrumentos, destinado à leitura direta da força e ao fornecimento da saída analógica entre 4 a 20 mA, cujo indicador também trabalha como fonte de excitação. Este indicador possui calibração, tara e busca automática de zero, o que facilita o desenvolvimento dos experimentos e garante a repetibilidade dos testes.

(4) um placa de aquisição de dados, ou cartão conversor analógico/digital, do tipo AQB11/12, para instalação em PCs com slot do tipo ISA de 16 bits. É orientada a aquisição de dados e controle de processos nas áreas científica e industrial e sua biblioteca de funções de controle torna sua utilização excepcionalmente simples, particularmente em ambiente Windows.

(5) para o processamento dos dados foi utilizado o *software Forja*, da T&S EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS. Este programa permite a aquisição do sinal gerado pelo cartão A/D, escolhendo qual a faixa de força e quantidade de pontos por segundos que se deseja coletar, isto é, o *software* permite escolher, se necessário, um intervalo de medição de força dentro do espectro gerado pelo sinal da célula de carga, ainda podendo ser escolhida a freqüência de aquisição num intervalo entre 1 e 1000 pontos por segundo.

4.4.2) Ferramentas de tixoforjamento empregadas

Visando pesquisar a influência do material da matriz no processo de tixoforjamento e na microestrutura do tixoforjado, foram confeccionadas matrizes de diferentes materiais: aço ferramenta AISI H13 e grafite com as características descritas na Tabela 4.5. Os punções

empregados também foram fabricados com os mesmos materiais das matrizes.

Grau	Dureza (Shore)	Densidade (kg/m ³)	Resist Específica (mWm)	Resist à Flexão (MPa)	Resist a Compressão (MPa)	Resist a Tensão (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Coefic de Expansão (10-6 °C)	Condutibilidade Térmica (kcal/mhc)
IG 11	55	1770	1100	400	800	250	1000	4.6	100

Tabela 4.5 – Grafite empregado na construção da matriz e punção.

A geometria adotada para as matrizes foi escolhida buscando-se um elevado grau de dificuldade para o tixoforjamento convencional, de modo a testar as características especiais de escoamento das pastas tixotrópicas. Dessa forma, as matrizes possuem vários ângulos retos, como mostram as Figura 4.18 a 4.19, para testar a capacidade de preenchimento da pasta em condições extremas de processamento.



a)





Figura 4.19 – Dimensões do punção de tixoforjamento; a) vista lateral; b) vista de topo.

Para a matriz de grafite fez-se necessária a colocação de um reforço externo para evitar que esta abrisse durante a aplicação da carga, devido à sua fragilidade. Assim, foi confeccionada uma cinta de aço SAE 1020 envolvendo externamente a matriz para manter sua integridade estrutural.

4.4.3) Parâmetros do processo de tixoforjamento

O processo de tixoforjamento foi feito em seguida ao tratamento de fusão parcial controlada a 600 °C e tempo de manutenção a esta temperatura de 5 minutos, que foi realizado já dentro da matriz de tixoforjamento, como descrito no item anterior. Variou-se nos ensaios, portanto, a estrutura da matéria-prima e o material da matriz e do punção empregados, para

análise da influência de diferentes taxas de transferência de calor na força requerida para o tixoforjamento e na microestrutura final do produto obtido a partir de pastas com estruturas distintas.

A Figura 4.20 apresenta um esquema representativo de todos os experimentos efetuados no trabalho. Foram feitas três repetições para cada condição.



Figura 4.20 – Diagrama geral dos experimentos efetuados. (T=600 °C, t=5 min, M1-molde de aço, M2-molde de grafite).

4.4.4) Descrição do experimento de tixoforjamento típico

Para a operação de tixoforjamento foram preparados corpos de prova cilíndricos com 20 mm de diâmetro por 36 mm de altura, com quatro microestruturas distintas: semi-globular, dendrítica grosseira, dendrítica refinada e um compósito. Os tarugos foram submetidos a tratamento térmico de fusão parcial controlada (FPC) para ajuste microestrutural e da fração sólida dentro da própria matriz de forjamento.

A operação de tixoforjamento foi realizada em duas etapas básicas: na primeira foi feito o aquecimento do conjunto matriz, punção e corpo de prova até a temperatura desejada e, na segunda, fez-se a aplicação de carga para o tixoforjamento.

Na primeira etapa, foi feita a montagem do conjunto matriz (impregnada internamente com alumina para facilitar a desmoldagem) e punção na mesa da prensa, a instalação do forno resistivo, a alimentação da cavidade da matriz com o corpo de prova e a colocação dos

termopares tipo K para controle da temperatura junto às duas paredes laterais da matriz e no centro do corpo de prova. O punção foi posicionado sobre a matriz, sendo colocado na cavidade apenas no momento da aplicação da carga, após retirada do termopar. O aquecimento foi iniciado e monitorado pelo sistema de aquisição até 600 °C; estabilizada essa temperatura, foi feita a sua manutenção por um tempo de 5 minutos. Decorrido esse tempo, o termopar que estava posicionado no centro do corpo de prova foi retirado e o punção foi colocado na cavidade, seguindo-se a aplicação da carga pelo acionamento da prensa, a uma velocidade constante de 2,5 mm/s. A força aplicada em função do tempo foi monitorada via *software*, sendo empregada uma freqüência de aquisição de 50 Hz, num total de 500 pontos. Após o punção ter atingido o fim de seu curso, indicado pela sua penetração total na cavidade da matriz até a superfície da peça tixoforjada, foi cessada a aplicação da carga e desligado o forno. O forno foi retirado e a peça permaneceu dentro da matriz, sendo resfriada ao ar até a temperatura ambiente.

As Figuras 4.21a e 4.21b mostram a posição inicial do punção no início do tixoforjamento e sua posição final, respectivamente, que marca o fim do processo.



Figura 4.21 – Posicionamento do punção no tixoforjamento: a) no início do processo; b) no fim do processo.



Foram assim obtidos corpos de prova com as dimensões indicadas na Figura 4.22.

Figura 4.22 – Dimensões dos corpos de prova tixoforjados.

4.5) Análise de resultados

A análise e discussão dos resultados foram baseadas na construção e interpretação dos gráficos de Força versus Tempo, obtidos nos ensaios de tixoforjamento, e na análise microestrutural da matéria-prima e dos produtos, na qual foram calculados o espaçamento interdendrítico, o tamanho médio de glóbulo e a fração sólida, quando fosse o caso.

4.5.1) Análise metalográfica da matéria-prima para tixoforjamento

Inicialmente foram analisadas as microestruturas dos lingotes da liga A356 obtidos por agitação mecânica, dos compósitos produzidos em diferentes condições e dos lingotes obtidos por solidificação convencional.

Os lingotes foram secionados transversalmente para observação da homogeneidade da estrutura em três regiões: uma seção na sua base inferior, uma no centro de sua altura e uma na porção superior. Dessas seções foram retiradas amostras que foram embutidas em resina fenólica para facilitar seu manuseio e passadas manualmente numa seqüência de lixas de carboneto de silício, utilizando água como lubrificante, nas granulometrias 180, 220, 400, 600, 800 e 1200. Na

transição entre cada lixa, as amostras foram lavadas com água e sabão e submetidas à limpeza em ultra-som. O polimento das amostras foi feito utilizando pasta de diamante com granulometria de 6 μ m, seguido de um acabamento em granulometria de 1 μ m. Entre as duas etapas as amostras também foram submetidas à limpeza com água e sabão e ultra-som.

O ataque utilizado para visualização ao microscópio foi uma solução a 5% de ácido fluorídrico durante 20 segundos. As imagens foram feitas utilizando um microscópio óptico NEOPHOT 55 e digitalizadas através do *software* residente LEICA Q 500 MC. Foram medidos os parâmetros: espaçamento interdendrítico (nos lingotes fundidos), fração sólida e tamanho de glóbulo (em lingotes reofundidos e compósitos). Para tanto foi usado o *software* IMAGE TOOL 3.0 Para medição do espaçamento interdendrítico foram feitas trinta medições por micrografia, num total de cinco micrografias de uma mesma seção da peça. Para medição do tamanho médio de glóbulo foram feitas trinta medições, sendo que cada glóbulo foi medido em quatro direções, obtendo-se a média aritmética entre eles.

4.5.2) Análise metalográfica do produto tixoforjado

Na análise metalográfica do produto tixoforjado foram realizados seis cortes transversais, de 10 em 10 mm, tomando como origem a extremidade dos braços laterais da peça, como mostra a Figura 4.23. Nas seções obtidas foram retiradas amostras para preparo metalográfico e avaliação da homogeneidade da microestrutura do produto tixoforjado obtido.



Figura 4.23 – Regiões observadas para análise da microestrutura de produtos tixoforjados - partes internas (medidas em milímetros).

Para preparo metalográfico as amostras foram submetidas ao mesmo procedimento adotado para análise da matéria-prima, descrita no item anterior. Tomou-se o cuidado, durante o embutimento das partes cortadas, de manter sempre a face esquerda das peças exposta para análise para evitar que ocorresse uma repetição na observação da mesma região da peça. Nas microestruturas observadas mediu-se o tamanho de glóbulo e a fração sólida. Para cada região analisada foram efetuadas trinta medições de tamanho de glóbulo, num total de 180 medições por peça. Foram analisadas duas peças por condição de tixoforjamento e o tamanho médio de glóbulo calculado foi baseado na média aritmética das medições. Na medição da fração sólida foram utilizadas três micrografias por região, de duas peças analisadas por condição de tixoforjamento, totalizando seis medições por região.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

Para estudo do processo de tixoforjamento, utilizou-se neste trabalho uma liga A356 em três diferentes condições microestruturais: como-fundida grosseira, como-fundida refinada e préglobularizada por agitação mecânica. Foi produzido ainda o compósito A356 + 15% em massa de Al2O3 via compofundição. Todas as condições foram submetidas a tratamento térmico de fusão parcial controlada (FPC) e tixoforjadas em matriz cerâmica e em matriz metálica. Foram monitorados o tempo e a temperatura de tratamento térmico e obtidas as curvas de força versus tempo na operação de tixoforjamento. As peças tixoforjadas foram seccionadas e submetidas à análise microestrutural ao longo do comprimento dos braços laterais. Os resultados obtidos nas diferentes etapas do trabalho são apresentados a seguir.

5.1) Matéria-prima para o tixoforjamento

A condição inicial da matéria prima é um fator decisivo na qualidade do semi-sólido obtido através do tratamento térmico de FPC. Por sua vez, as características do semi-sólido devem interferir no processo de tixoforjamento e na qualidade do produto tixoforjado. Portanto, a primeira etapa do trabalho consistiu na produção de matéria-prima para o tixoforjamento, isto é, produção de tarugos da liga A356 com três microestruturas distintas e do compósito A356 + 15% Al_2O_3 .

As Figuras 5.1 a 5.5 apresentam a microestrutura revelada após ataque com reagente de Keller (nas regiões destacadas) da matéria-prima sem refinador, refinada, reofundida e do compósito $A356 + Al_2O_3$, obtidas seguindo os procedimentos descritos nos itens 4.3.2 a 4.4.1.

5.1.1) Liga A356 fundida sem refinador (SR)

A Figura 5.1 apresenta a microestrutura da liga fundida sem refinador. Observa-se uma microestrutura totalmente dendrítica, típica de fundidos. As diferentes regiões analisadas apresentam estruturas semelhantes, indicando boa homogeneidade em todo o volume do tarugo.

Dada a reduzida taxa de extração de calor imposta, a estrutura se apresenta grosseira, com tamanho médio de grãos da ordem de 870 µm e espaçamento médio interdendrítico da ordem de 243 µm. Também observa-se a estrutura eutética grosseira, com grande ocorrência de cristais de Si de forma acicular.

5.1.2) Liga A356 fundida com refinador (CR)

A Figura 5.2 mostra a microestrutura do tarugo obtido com adição de refinador. Pode-se observar uma estrutura típica de super-refino: a fase primária se apresenta como rosetas e a estrutura eutética como cristais finos de Si de forma arredondada. Novamente se observa homogeneidade da estrutura em todo o volume do tarugo.

A elevada taxa de resfriamento imposta ao metal líquido durante a solidificação, associada com a alta taxa de nucleação promovida pela adição do agente nucleante, reprimiram o crescimento dendrítico de modo a resultar na estrutura quase-globular observada. Neste caso, o parâmetro medido para caracterizar quantitativamente a microestrutura foi o tamanho médio de glóbulos, que resultou da ordem de 163 µm, um valor inferior ao do espaçamento médio interdendrítico na estrutura grosseira obtida por fundição em molde de areia sem a utilização de agente refinador. A macroestrutura indica que no fundido refinado o tamanho médio de grão é da mesma ordem de grandeza das dimensões dos glóbulos; portanto, cada glóbulo observado na microestrutura se constitui um grão cristalino.

5.1.3) Liga A356 reofundida por agitação mecânica (AM)

A Figura 5.3 apresenta a microestrutura do tarugo produzido por agitação mecânica a 600 oC durante 5 minutos. Observa-se que a fase primária apresenta morfologia irregular, com glóbulos isolados de pequenas dimensões e aglomerados de glóbulos de maiores dimensões. A

estrutura eutética se apresenta refinada. Pode-se também observar a presença de excessiva porosidade, o que pode ser explicado pela entrada de ar durante a agitação e também pela retirada do rotor após o fim do processo, o que acarretou inevitavelmente o arraste de material e a geração de vazios.

As micrografias das quatro regiões do tarugo analisadas são semelhantes, mostrando homogeneidade estrutural em todo o volume do tarugo. O tamanho médio de glóbulo foi de 135 µm e a fração de sólido primário é da ordem de 80%.

A microestrutura obtida é resultado da forte agitação imposta ao líquido durante seu resfriamento até 600 oC: neste processo ocorre o dobramento e separação de ramos dendríticos em crescimento, possibilidade de sua aglomeração e ainda engrossamento de dendritas não rompidas. A estrutura eutética refinada é formada no resfriamento do líquido contido na pasta reofundida quando do seu descarregamento, após cessada a agitação.

Medidas de tamanho de grão indicaram valores de diâmetro médio da ordem de 600 mm. Como a microestrutura obtida por agitação do líquido por 5 minutos a 600 °C e 1000 rpm mostrou-se bastante homogênea, utilizou-se esta condição para a produção de um compósito utilizando alumina na forma de partículas como reforço.

5.1.4) Compósitos A356 + Al2O3 (CP)

A Figura 5.4 apresenta microestruturas de distintas regiões do compósito A356 + 15% de Al₂O₃ produzido. Pode-se observar que o efeito da agitação foi eficiente no sentido de produzir estruturas globulares formadas por fase α circundada pelo eutético, em todos os casos, resultando em estruturas relativamente homogêneas no mesmo tarugo e também comparativamente entre os diferentes compósitos. Glóbulos bem definidos, de dimensões da ordem de 110 µm, foram obtidos em todos os casos; a fração líquida aproximada presente na pasta, medida pela fração de estrutura eutética nas microestruturas à temperatura ambiente, foi da ordem de 20% em todos os casos. O menor tamanho de glóbulo da fase α com relação ao obtido sem adição de reforço pode ser resultado de uma maior fração sólida total (somadas as partículas do reforço), promovendo maior fragmentação. A presença de partículas sólidas do reforço nas regiões líquidas entre os glóbulos da pasta também reduz a possibilidade de aglomeração desses glóbulos, como observado.







Figura 5.1 – Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por fundição convencional com baixa taxa de resfriamento.








d

Figura 5.2 – Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por fundição convencional com uso de refinador de grãos e alta taxa de resfriamento.







С

d

Figura 5.3 – Microestrutura em diferentes regiões de tarugos da liga A356 produzidos por reofundição.







Figura 5.4 – Microestrutura em diferentes regiões de tarugos do compósito A356 + 15% Al2O3 produzido por compofundição.

Pode-se notar, em todos os casos, a dificuldade de incorporação e dispersão das partículas do reforço na matriz.

Para os teores de 5 e 10% Al_2O_3 não se pode mesmo afirmar que houve a incorporação do reforço, uma vez que as regiões escuras observadas são da mesma ordem de grandeza e quantidade dos poros encontrados na matéria-prima produzida por agitação mecânica. Desta forma não é possível identificar se o poro foi gerado na produção da matéria-prima ou através do arrancamento de aglomerados de reforço durante a preparação metalográfica, como observado também por Mussi, (2000).

Uma melhor incorporação e dispersão das partículas Al_2O_3 poderia ser obtida por uma melhor relação entre suas dimensões (7 µm) e as dimensões dos espaçamentos interglobulares na pasta reofundida, que no caso variaram de 30 a 400 µm. Assim, o processo de incorporação do reforço pode ser melhorado quando o tamanho médio de suas partículas é da ordem de grandeza do espaçamento interglobular da pasta reofundida, dificultando a sua aglomeração no líquido presente.

Para o compósito ao qual foi adicionado 15% de Al_2O_3 , se observa regiões porosas de grandes e irregulares dimensões, indicando a presença de reforço adicionado. No entanto, se observa também significativa aglomeração das suas partículas, prejudicando a sua dispersão na matriz.

Medidas de tamanho de grão indicam valores de diâmetros médios da ordem de 570 μ m. Diante do reduzido teor de partículas de Al₂O₃ nos compósitos produzidos pela adição de 5 e 10%, foi utilizado em testes de tixoforjamento somente o compósito ao qual foi adicionado 15% Al₂O₃, para avaliar o efeito da presença de uma partícula sólida na operação de tixoforjamento.

Portanto, como resultado geral da etapa de fabricação de matéria-prima para testes de tixoforjamento foram obtidas amostras da liga A356 com distintas estruturas e do compósito A356 + 15% Al_2O_3 . Os seus parâmetros estruturais gerais são apresentados na Tabela 5.1.

Tipo de Estrutura	Tamanho de grão (µm)	Espaçamento interdendrítico (µm)	Tamanho de glóbulo (µm)	Fração sólida à 600 °C - T _{Reof.} (%)
SR	$870\pm130~\mu m$	$243\pm75\;\mu m$	-	-
CR	$175\pm80~\mu m$	-	$162\pm70\;\mu m$	-
AM	$600\pm102~\mu m$	-	$135\pm88~\mu m$	80
СР	$570\pm92~\mu m$	-	$110\pm64~\mu m$	78

Tabela 5.1 – Parâmetros estruturais da liga A356 produzida por diferentes processos – matériaprima para testes de tixoforjamento.

5.2) Produtos tixoforjados

5.2.1) Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado fundido (SR)

5.2.1.1) Aspecto geral do produto tixoforjado

Todas as peças foram tixoforjadas imediatamente após o tratamento térmico a 600 °C durante 5 minutos para obtenção de pastas com morfologia do sólido primário globular, realizado dentro da própria matriz.

A Figura 5.5 apresenta típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir do estado fundido, em matriz de aço e em matriz de grafite. Observa-se que as peças tixoforjadas na matriz metálica obtiveram um preenchimento total da cavidade da matriz, evidenciado nas fotos pelo comprimento atingido pelos braços da peça. O acabamento superficial pode ser considerado bom, com boa reprodução da geometria do molde e reduzida ou nula quantidade de rebarbas. Pode-se ainda observar o deslocamento e rompimento da camada de óxido superficial do tarugo original, que se localiza, no produto final, na sua região central. Esta película de óxido é apenas superficial, não sendo detectada sua infiltração para o interior do metal, como observado pela análise da microestrutura do produto, apresentada em item que se segue; não havendo, portanto, comprometimento da qualidade do produto. O produto tixoforjado em matriz de grafite apresentou acabamento superficial inferior ao obtido em matriz metálica, com razoável reprodução da sua geometria, sem, no entanto, preenchimento total da extremidade de um dos braços. Também se observa o mesmo padrão de distribuição do filme de óxido superficial daquele observado na peça tixoforjada em matriz metálica. Pode-se notar ainda na peça uma maior quantidade de rebarbas, quando comparada com a peça obtida em matriz metálica. O inferior acabamento superficial produzido pela matriz de grafite reflete o inferior acabamento superficial da própria matriz, fabricada por compactação de pós. Deve-se levar em conta ainda o desgaste da grafite durante sucessivas operações de tixoforjamento, sensivelmente mais acentuado do que o ocorrido na matriz metálica. Este desgaste pode ainda ser responsável pela maior formação de rebarbas observada nas peças fabricadas neste tipo de molde, o que por sua vez pode ser responsável pelo incompleto preenchimento das extremidades dos braços das peças.

É ainda importante salientar que não houve ruptura ou mesmo trincamento da matriz de grafite após sua utilização em todos as condições de ensaio, resultado que prelimirnamente pode indicar a viabilidade de sua utilização para tixoforjamento.

5.2.1.2) Caracterização microestrutural do produto tixoforjado

A Figura 5.6 mostra as micrografias obtidas a partir da peça tixoforjada com matériaprima na condição inicial dendrítica utilizando-se matriz metálica e matriz cerâmica no tixoforjamento. Não se verifica a presença de orientação preferencial de glóbulos na microestrutura, indicando a ausência de deformação. Podem-se observar também variações microestruturais bastante acentuadas desde a extremidade da peça, posição zero, até o seu centro, posição cinqüenta, para ambos os casos.

A região central das peças apresenta estrutura globular, com glóbulos da fase primária a grosseiros e com morfologia irregular. Este tipo de estrutura é resultante do processo de globularização imposto pelo tratamento de fusão parcial à estrutura inicialmente dendrítica grosseira. Fenômenos de engrossamento de ramos dendríticos promovidos pela elevada temperatura e presença de líquido interdendrítico formado pela fusão de estrutura eutética, levam à formação de estruturas globulares grosseiras e altamente heterogêneas como as observadas por Robert, (1993). As dimensões dos glóbulos observados na região central das peças tixoforjadas



a) Matriz Metálica

b) Matriz Cerâmica

Figura 5.5 – Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura dendrítica grosseira (SR), em distintos tipos de matrizes.

são inferiores às dos espaçamentos interdendríticos medidos na estrutura da matéria-prima utilizada neste caso (tarugos com estrutura dendrítica grosseira), evidenciando a possibilidade de penetração de líquido entre ramos dendríticos.

Pode-se também observar nas peças obtidas nos dois tipos de matrizes que a microestrutura passa de globular a dendrítica e a quantidade de fase secundária aumenta à medida que se afasta da região central para as extremidades dos braços. Este fato indica a segregação do líquido presente no material semi-sólido para a frente de escoamento durante o preenchimento da matriz, conforme já observado por Rovira, (2000). Segundo o autor, maiores velocidades de preenchimento poderiam reduzir ou eliminar o problema. Como se trata de um fluido contendo um constituinte sólido (glóbulos da fase primária) e um líquido, há uma velocidade relativa entre o escoamento de um e de outro, resultando na expulsão do líquido.

No resfriamento da pasta tixofundida, o líquido presente solidifica de maneira convencional prevista para a liga em questão. Assim, durante resfriamento, nas regiões centrais, contendo menor teor de líquido, há pequeno crescimento da fase primária e formação de glóbulos coalescidos; por outro lado, na região das extremidades, a presença de fase primária somente com morfologia dendrítica indica a ausência total de sólido, isto é, a região antes do resfriamento era constituída somente de líquido.

Quanto ao efeito do material do molde, pode-se observar que as estruturas obtidas são bastante semelhantes, tanto com relação à distribuição relativa das fases primária e eutética quanto às suas dimensões, em cada uma das regiões das peças obtidas nos dois tipos de matrizes. Não se observa, portanto, significativo efeito do material da matriz na estrutura do produto, nas condições analisadas. Tal resultado deve-se, provavelmente, a utilização de condições isotérmicas e mesma taxa de resfriamento em todos os ensaios de tixoforjamento.

Análise quantitativa das microestruturas, com medidas de tamanho médio de glóbulos e fração de fase sólida primária ao longo de toda a peça, confirma as análises qualitativas feitas por observação das microestruturas. A Tabela 5.2 apresenta os dados obtidos, que são apresentados graficamente, para maior clareza, nas Figuras 5.7 e 5.8.



Figura 5.6– Micrografias da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira, em função da distância e do material da matriz.

	Fração Sólida – α primário (%)		Tamanho Médio de Glóbulo (µm)		
Distância (mm)	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	
$0_{extremidade}$	-	-	-	-	
10	-	-	-	-	
20	-	-	-	-	
30	72	80	-	160 ± 27	
40	89	86	155 ± 61	130 ± 66	
50 _{centro}	93	98	174 ± 86	151 ± 74	

Tabela 5.2 – Valores de fração sólida primária ao longo da distância na peça tixoforjada com estrutura inicial dendrítica grosseira e dimensões médias de glóbulos da fase primária.

*Os valores faltantes se referem a estruturas não globulares.

Pode-se observar, na Figura 5.7, a evidente redução da fração sólida primária na estrutura do produto tixoforjado, da região central para a extremidade do braço da peça, indicando a maior presença de líquido nesta região durante o processamento.

Pode-se observar, na Figura 5.8, a ampla variação dos valores de tamanho médio de glóbulos, como constatado por Paes, (2000). Tomando-se como exemplo a medida de tamanho de glóbulo na posição quarenta: $130 \pm 66 \ \mu m$ para a peça tixoforjada em matriz cerâmica e $155 \pm 61 \ mm$ para a peça tixoforjada em matriz metálica, a variação em torno do valor médio impossibilita afirmar se há um maior tamanho de glóbulo na estrutura obtida em qualquer uma das matrizes.

Diante dos dados, não é possível afirmar que as estruturas obtidas nos dois tipos de moldes se diferenciam entre si; a observação das microestruturas mostra a presença de glóbulos de dimensões tão variáveis quanto 60 mm a 200 mm.



Figura 5.7 – Distribuição da fração de fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira.



Figura 5.8 – Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial dendrítica grosseira.

5.2.1.3) Forças de tixoforjamento

A Figura 5.9 apresenta os gráficos de força versus tempo de avanço do punção, para os dois ensaios de tixoforjamento em molde metálico e de grafite, da liga A356 no estado semi-sólido obtido a partir de estrutura dendrítica grosseira.







Figura 5.9 – Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial dendrítica (SR) em matriz a) de aço, b) de grafite.

Pode-se observar nas Figuras 5.9a e 5.9b duas curvas para cada tipo de matriz, referentes a dois ensaios de tixoforjamento, bastante semelhantes entre si, demonstrando uma boa repetibilidade dos ensaios.

As curvas dos ensaios realizados em matriz metálica, Figura 5.9a, apresentam uma região inicial de menor inclinação, onde a força requerida para o escoamento é bastante reduzida, seguida de um aumento abrupto na inclinação da curva até a força máxima, quando o punção atinge seu fim de curso; neste segundo estágio ocorre a compactação do material.

Em ambos os tipos de matrizes empregadas observam-se os reduzidos valores de força requeridos para o tixoforjamento, apresentados na Tabela 5.3, que refletem a alta fluidez da pasta e sua capacidade em preencher moldes com geometria desfavorável, impossível de ser obtida no processo convencional de forjamento no estado sólido.

Tabela 5.3 – Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial dendrítica grosseira (SR).

Tipo de matriz empregada	Força máxima (kN)		
The activity embredien	Ensaio 1	Ensaio 2	
Metálica	125	103	
Grafite	120	110	

Pode-se observar, na tabela, valores inferiores para o tixoforjamento em matriz cerâmica, apesar das microestruturas serem semelhantes, indicando que não há influência da microestrutura para estes casos.

5.2.2 Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado refinado (CR)

5.2.2.1) Aspecto geral do produto tixoforjado

A Figura 5.10 apresenta típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir do estado refinado, em matriz de aço e matriz de grafite. Pode-se observar que as peças tixoforjadas em ambas as matrizes atingiram um completo preenchimento de suas cavidades, como se observa pelo comprimento total atingido pelos braços das peças. A estrutura globular mais refinada

propiciou o preenchimento total do molde, uma vez que proporciona um melhor escoamento da pasta do que as estruturas grosseiras apresentadas no item 5.2.1.1 (SR). Kattamis (1992), observa a influência do tamanho de glóbulos da pasta reofundida em suas propriedades de escoamento, mostrando que pastas com glóbulos refinados escoam mais facilmente que pastas com glóbulos grosseiros.

O acabamento superficial também pode ser considerado bom, comparativamente às peças tixoforjadas com estrutura inicial dendrítica grosseira, e com boa reprodutibilidade da geometria da matriz. Nota-se que as peças tixoforjadas em matriz cerâmica apresentaram uma maior quantidade de rebarbas, concentradas em grande parte na região central da peça, devido provavelmente ao desgaste do conjunto matriz e punção sem, no entanto, comprometer o preenchimento total do molde.

Mais uma vez observa-se para ambos os tipos de matrizes a presença da película de óxido superficial na região mais central das peças e também uma menor qualidade no acabamento das peças produzidas na matriz de grafite, quando comparadas com as obtidas na matriz metálica.

5.2.2.2) Caracterização microestrutural do produto tixoforjado

A Figura 5.11 mostra micrografias da peça tixoforjada a partir de matéria-prima na condição inicial refinada, utilizando-se matriz metálica e matriz cerâmica no tixoforjamento. Pode-se observar uma menor variação estrutural ao longo do comprimento da peça que àquela observada nas peças tixoforjadas com estrutura inicial dendrítica grosseira.

Com exceção da extremidade da peça, posição *zero*, que apresenta microestrutura mais dendrítica em função da maior concentração de líquido segregado nesta região, observa-se que a partir da posição *dez* até o centro da peça, para ambas as matrizes empregadas, a microestrutura é bastante semelhante, formada de glóbulos de fase primária com morfologia irregular e coalescidos entre si em alguns pontos, e fase secundária dendrítica, originada do resfriamento do líquido formado na temperatura de tratamento térmico de fusão parcial.



a) Matriz Metálica

b) Matriz Cerâmica

Figura 5.10 – Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura refinada (CR), em distintos tipos de matrizes.

A Tabela 5.4 apresenta as medidas de tamanho médio de glóbulos e fração de fase sólida primária ao longo de toda a peça para os dois tipos de moldes. Nota-se a semelhança dos valores de fração sólida em cada região das peças tixoforjadas em matriz cerâmica e metálica, não sendo possível diferenciá-las. Novamente o tamanho de glóbulos apresenta grande dispersão em torno do valor médio, sendo semelhante para as estruturas obtidas por tixoforjamento em ambos os tipos de moldes. As dimensões dos glóbulos da fase primária são compatíveis com as dimensões das rosetas na matéria-prima. A pequena redução de dimensões observada é devida à fusão de certa quantidade da fase α , uma vez que a pasta apresenta cerca de 20% de líquido, e ainda à possibilidade de penetração de líquido em contornos internos, separando fragmentos de rosetas, que se tornam novos glóbulos.

Através dos gráficos das Figuras 5.12 e 5.13 pode-se observar o comportamento de cada parâmetro em função da distância e do material do molde, onde pode-se dizer que, de uma forma geral, há uma certa tendência ao aumento da fração sólida primária e do tamanho de glóbulo da extremidade da peça para o seu centro, decorrentes, no primeiro caso, da segregação de líquido e, no segundo caso, da maior possibilidade de coalescência de partículas que se tocam dada a menor quantidade de líquido nesta região central.

	Fração Sólida – α primário (%)		Tamanho Médio de Glóbulo (µm)		
Distância (mm)	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	
Oextremidade	-	77	-	97 ± 36	
10	80	83	106 ± 39	108 ± 24	
20	78	83	110 ± 47	105 ± 25	
30	79	82	109 ± 42	116 ± 26	
40	84	85	145 ± 42	122 ± 26	
50 _{centro}	89	87	155 ± 69	128 ± 33	

Tabela 5.4 – Valores de fração da fase sólida primária e suas dimensões ao longo da distância na peça tixoforjada a partir de estrutura refinada.

*Os valores faltantes se referem a estruturas não globulares.



Figura 5.11– Micrografias da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura refinada, em função da distância e do material da matriz.



Figura 5.12 – Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial refinada.



Figura 5.13 - Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto tixoforjado a partir de estrutura refinada.

5.2.2.3) Forças de tixoforjamento

A Figura 5.14 apresenta os gráficos de força versus tempo de avanço do punção, para os ensaios de forjamento da liga A356 no estado semi-sólido obtido a partir de estrutura refinada, em molde metálico e de grafite.

Pode-se observar na Figura 5.14 duas curvas para cada tipo de matriz, referentes a dois ensaios de tixoforjamento, mais uma vez bastante semelhantes entre si em relação ao formato da curva e força máxima aplicada, demonstrando a boa repetibilidade dos ensaios.



Figura 5.14 – Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial refinada (CR) em moldes a) de aço, b) de grafite.

As curvas dos ensaios realizados em matriz metálica, Figura 5.9a, seguem o mesmo padrão apresentado pelas curvas realizadas com matéria-prima na condição inicial dendrítica, com a presença de uma região inicial de menor inclinação e reduzida força, seguida de um rápido aumento nessa inclinação até atingir a força máxima. A inclinação da curva nos estágios iniciais da conformação é menor nesse caso, comparativamente a estrutura SR, por se tratar de uma estrutura mais refinada e, portanto, com menor resistência ao escoamento.

Da mesma forma, as curvas dos ensaios realizados em matriz de grafite, mostradas na Figura 5.9b, também diferem pela ausência do estágio inicial da curva, de menor inclinação, partindo diretamente da força *zero* para o valor máximo de tixoforjamento. É notável que em ambos os tipos de matrizes empregadas a força máxima requerida para o tixoforjamento apresenta valores bastante reduzidos com relação ao forjamento no estado sólido. Pode-se observar que as forças requeridas para o tixoforjamento em molde cerâmico são inferiores às requeridas no uso de molde metálico, à semelhança do ocorrido quando do forjamento de estruturas inicialmente dendríticas grosseiras.

A Tabela 5.5 apresenta os valores de força máxima obtidos. Observa-se que os valores são menores que os requeridos para o tixoforjamento da pasta com estrutura inicial dendrítica. A estrutura inicialmente globularizada da matéria-prima refinada permite a obtenção de glóbulos mais finos quando do tratamento de fusão parcial controlada, facilitando o seu escoamento (KATTAMIS, op. cit.).

Tabela 5.5 – Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial refinada (CR).

Tipo de matriz empregada	Força máxima (kN)		
The community of the Same	Ensaio 1	Ensaio 2	
Metálica	97	95	
Grafite	63	58	

5.2.3 Tixoforjamento da liga A356 a partir do estado reofundido por agitação mecânica (AM)

5.2.3.1) Aspecto geral do produto tixoforjado

Na Figura 5.15 são apresentadas as peças tixoforjadas a partir da liga A356 com estrutura inicial globular, obtida através de agitação mecânica a 600 °C durante 5 minutos a uma velocidade de 1000 rpm. Obteve-se um preenchimento total da matriz para as peças tixoforjadas em matriz metálica, como pode ser observado nas fotos, e também um bom comportamento no tocante ao aspecto visual, com ausência de rebarbas e uma superfície lisa e regular. Nota-se que há um pequeno aumento na altura total da peça tixoforjada em matriz de grafite, causada provavelmente pelo desgaste do punção ao longo da sua altura, levando assim, à falta de material para completar o preenchimento da matriz no braço direito da peça.



a) Matriz Metálica

b) Matriz Cerâmica

Figura 5.15 – Diferentes vistas de típicas peças da liga A356 tixoforjadas a partir de estrutura globular (AM), em distintos tipos de matrizes.

5.2.3.2) Caracterização microestrutural do produto tixoforjado

A Figura 5.16 mostra as micrografias da peça tixoforjada a partir de matéria-prima na condição inicial globularizada, utilizando matriz metálica e matriz de grafite no tixoforjamento. Observa-se que neste caso a microestrutura não apresenta grandes variações ao longo do comprimento das peças para ambos os tipos de matrizes empregadas, havendo apenas uma pequena mudança na posição *zero*, extremidade da peça, devido a maior presença de líquido e conseqüente formação de fase primária dendrítica, como já descrito anteriormente.

A estrutura de um modo geral apresenta-se globular, com glóbulos da fase primária α bem definidos. Pode-se observar a possibilidade de coalescência entre dois ou mais glóbulos em contato.

A semelhança microestrutural entre as peças tixoforjadas em matriz metálica e em matriz de grafite indica, a não influência do material do molde na microestrutura das peças tixoforjadas; como já comentado anteriormente, devido à condição isotérmica utilizada na operação de tixoforjamento.

A Tabela 5.6 apresenta as medidas de tamanho médio de glóbulos e fração de fase sólida primária ao longo do braço das peças, nos dois casos. Nota-se a semelhança dos valores de fração sólida primária quando comparadas regiões correspondentes, nas peças tixoforjadas em matriz cerâmica e metálica; também se nota a grande variação percentual em torno do tamanho médio de grão, como já observado nos comentários.

Pode-se observar que, de uma forma geral, há uma tendência ao aumento da fração sólida da extremidade da peça para o seu centro, decorrente da segregação de líquido durante o preenchimento. Os valores de tamanho médio de glóbulo são da mesma ordem de grandeza das dimensões dos glóbulos da estrutura inicial.

Distância (mm)	Fração Sólida – α primário (%)		Tamanho Médio de Glóbulo (µm)		
Distancia (inin)	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	
$0_{extremidade}$	-	-	-	-	
10	77	72	110 ± 26	132 ± 20	
20	80	77	100 ± 30	124 ± 38	
30	80	81	99 ± 21	105 ± 39	
40	87	83	149 ± 48	112±36	
50 _{centro}	91	86	138 ± 40	110 ± 37	

Tabela 5.6 – Valores de fração da fase sólida primária e suas dimensões ao longo da distância na peça tixoforjada a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.

*Os valores faltantes se referem a estruturas não globulares.

A Figura 5.17 mostra de forma gráfica a evolução da concentração da fase sólida primária ao longo do comprimento das peças tixoforjadas em matriz metálica e em matriz de grafite, comprovando a semelhança já citada entre as duas microestruturas e a tendência ao aumento de líquido nas extremidades da peça.

Pode-se notar também na Tabela 5.6 que os valores de tamanho médio de glóbulos não são diferenciáveis para as peças obtidas nos diferentes moldes. Apenas uma tendência ao aumento do tamanho médio de glóbulo com a distância da extremidade pode ser notada nos dois casos.

O tamanho médio de glóbulo calculado é mostrado de forma gráfica na Figura 5.18, notando-se mais uma vez a grande dispersão em torno do valor médio, não sendo possível a diferenciação dos produtos tixoforjados nos dois tipos de moldes.



Figura 5.16 – Micrografias da liga A356 tixoforjada a partir de estrutura globular, em função da distância e do material da matriz.



Figura 5.17 – Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir de estrutura reofundida por agitação mecânica.



Figura 5.17 – Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde, no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica

5.2.3.3) Forças de tixoforjamento

A Figura 5.19 apresenta os gráficos de força versus tempo de avanço do punção, para os ensaios de forjamento da liga A356 no estado semi-sólido obtido a partir de estrutura reofundida através de agitação mecânica, em molde metálico e de grafite. São apresentados também dois resultados para cada tipo de molde.

À semelhança dos resultados obtidos para as estruturas dendríticas e refinadas, também aqui se nota a repetibilidade dos resultados em cada caso. Novamente, os valores máximos de força requeridos são superiores no caso de tixoforjamento em molde metálico.



Figura 5.19 – Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial reofundida por agitação mecânica (AM) em matriz a) de aço; b) de grafite.

Percebe-se mais notadamente para este caso que as forças máximas requeridas, mostradas na Tabela 5.7, apresentam valores bastante reduzidos.

Conforme observado nas microestruturas da matéria-prima inicial é de se prever a obtenção de pastas tixofundidas com menor tamanho de glóbulo a partir da estrutura agitada mecanicamente, que contém internamente contornos preenchidos com fase α que, conforme visto anteriormente, pode, ao ser fundida, promover a formação de uma estrutura globular bastante fina, resultando em alta fluidez. Esta alta fluidez resulta nos reduzidos valores de força observados no tixoforjado.

Tipo de matriz empregada	Força máxima (kN)		
The activity of the second	Ensaio 1	Ensaio 2	
Metálica	53	55	
Grafite	22	24	

Tabela 5.7 – Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 com estrutura inicial reofundida por agitação mecânica (AM).

5.2.4) Tixoforjamento do compósito A356 + 15% Al₂O₃ (CP)

5.2.4.1) Aspecto geral do produto tixoforjado

A Figura 5.20 apresenta típicas peças tixoforjadas utilizando o compósito da liga A356 com adição de 15% de Al_2O_3 produzido por agitação mecânica. Pode-se observar total preenchimento do molde em todos os casos.

As peças tixoforjadas em matriz metálica apresentam uma boa qualidade superficial, pequena formação de rebarbas e o mesmo padrão de distribuição de óxido superficial observado nos casos apresentados anteriormente.

Novamente se observa um pior acabamento superficial nas peças obtidas em molde de grafite, dado o seu pior acabamento. A presença de partículas e aglomerados de alta dureza como o Al_2O_3 pode prejudicar ainda mais a qualidade superficial do molde. Portanto, no caso de tixoconformação de compósitos em moldes não metálicos, um maior cuidado na manutenção da sua qualidade é requerida, com trocas mais freqüentes de ferramental sendo recomendada.

5.2.4.2) Caracterização microestrutural do produto tixoforjado

A Figura 5.21 apresenta micrografias do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 tixoforjado em matriz metálica e matriz de grafite. Observa-se uma microestrutura heterogênea ao longo do comprimento das peças para ambos os tipos de matrizes empregadas, com segregação de líquido ao longo do comprimento do braço no sentido do centro para as extremidades da peça e também irregular distribuição das partículas do reforço. A estrutura

apresenta glóbulos definidos da fase primária α , com morfologia irregular e grande variação de dimensões, para uma mesma região.

Nota-se a presença de glóbulos coalescidos, como resultado de fenômenos de engrossamento. Pode-se observar também uma má dispersão do reforço, como já havia sido observado no tarugo da matéria-prima, e mesmo ausência deste em algumas regiões. São observados aglomerados do reforço devido possivelmente ao grande espaçamento interglobular, com valores algumas ordens de grandeza maiores que o diâmetro médio das partículas do reforço, possibilitando o agrupamento das partículas nas regiões líquidas da pasta tixofundida.

Luo et al (2002) já observavam significativa macrosegregação de partículas do reforço no tixoforjamento de compósitos A2024/SiC contendo alta fração líquida.

Através das micrografias se observa tendência à maior presença de reforço nas regiões mais centrais das peças, provavelmente devido à dificuldade de escoamento dos aglomerados. A segregação de líquido na frente de escoamento concentra as fases sólidas, neste caso constituídas de a primário e partículas de reforço, na região central das peças.

As semelhanças microestruturais observadas entre as peças tixoforjadas nos diferentes tipos de moldes indicam novamente não ter ocorrido influência do material do molde na sua formação, uma vez que foram utilizadas as mesmas condições de processamento.

A Tabela 5.8 apresenta as medidas de tamanho médio de glóbulos e fração de fase sólida primária ao longo de toda a peça, onde se nota uma tendência ao aumento da fração sólida primária nas regiões centrais das peças obtidas nos dois tipos de moldes; e também a grande variação percentual em torno do tamanho médio de glóbulo para uma mesma região das peças, como já observado, o que impossibilita a diferenciação do tamanho médio de glóbulo em diferentes regiões.

A Figura 5.22 mostra de forma gráfica a evolução da concentração da fase sólida primária em função do comprimento e do material da matriz, onde se observa mais facilmente a tendência do aumento da concentração da fração sólida nas regiões centrais das peças. Na Figura 5.23, é apresentado gráfico da variação do diâmetro médio de glóbulo da fase primária em função da distância em relação à extremidade da peça e do material do molde. Como já citado para os casos anteriores onde empregaram-se diferentes matérias-primas, o grau de dispersão em torno da média não permite diferenciar as peças obtidas em matriz metálica e em matriz de grafite, em relação ao diâmetro médio de glóbulos da fase primária.

84

Pode-se notar que as dimensões dos glóbulos nos produtos tixoforjados são da mesma ordem de grandeza dos glóbulos na estrutura da matéria-prima. O reforço pode ter prevenido o aumento das dimensões dos glóbulos por engrossamento.

Tabela 5.8 – Valores de fração sólida da fase primária e suas dimensões ao longo da distância na peça tixoforjada do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 .

	Fração fase primária (%)		Tamanho Médio de Glóbulo (µm)		
Distância (mm)	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	Matriz Metálica	Matriz Cerâmica	
$0_{extremidade}$	-	-	-	-	
10	80	76	103 ± 31	131 ± 64	
20	77	75	122 ± 44	118 ± 49	
30	80	78	116 ± 27	97 ± 32	
40	90	90	109 ± 29	130 ± 48	
50 _{centro}	99	96	99 ± 32	121 ± 37	

*Os valores faltantes se referem a estruturas não globulares.



a) Matriz Metálica

b) Matriz Cerâmica

Figura 5.20 – Diferentes vistas de típicas peças tixoforjadas do compósito A356 + 15% em massa Al₂O₃.



Figura 5.21 – Micrografias do tixoforjado do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 em função da distância e do material da matriz.



Figura 5.22 – Distribuição da fração da fase primária em função da distância e do material da matriz, no produto tixoforjado a partir do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 .



Figura 5.23 - Diâmetro de glóbulo em função da distância e do material do molde no produto tixoforjado a partir de estrutura inicial reofundida por agitação mecânica.

5.2.4.3) Forças de tixoforjamento

A Figura 5.24 apresenta os gráficos de força versus tempo de avanço do punção, para os ensaios de tixoforjamento do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 em molde metálico e de grafite. São apresentados também dois resultados para cada tipo de molde. Novamente se observa a semelhança entre os resultados obtidos nos dois ensaios para um determinado molde.

Na produção do compósito foram utilizados os mesmos parâmetros de produção da matéria-prima reofundida por agitação mecânica, diferindo apenas a adição de 15% de alumina no primeiro caso. Observando as curvas abaixo (CP) e as mostradas na Figura 5.19 (AM) nota-se que a simples adição do reforço na concentração dada, mesmo que mal disperso, acarretou aproximadamente na duplicação da carga máxima requerida para o preenchimento da cavidade da matriz em cada caso, como mostram os valores da Tabela 5.9. O reforço contido na matriz prejudica o escoamento dos glóbulos no líquido, pois além de funcionarem com barreiras físicas à sua movimentação, causam um aumento da viscosidade do líquido.



Figura 5.24 – Curvas de variação de força versus tempo no tixoforjamento do compósito A356 + 15% em massa Al₂O₃ (CP) em matriz de a) aço; b) grafite.

Pode-se observar também que as curvas obtidas para o tixoforjamento em molde metálico (Figura 5.9a) apresentam uma variação já no início do processo, indicando uma certa resistência ao fluxo do material nos primeiros instantes do escoamento, o que não ocorre no forjamento em matriz cerâmica. Este comportamento se assemelha ao observado com as estruturas tixofundidas

a partir de material dendrítico grosseiro (SR). Como lá explicado, a estrutura grosseira da pasta tixofundida dificulta o escoamento, o que ocorre no presente caso devido à presença de alta fração sólida da pasta (constituída de glóbulos da fase α primária e partículas de reforço) e dos grandes aglomerados destas partículas.

Tabela 5.9 – Valores de força máxima no tixoforjamento do compósito A356 + 15% em massa Al_2O_3 (CP).

Tipo de matriz empregada	Força máxima (kN)		
	Ensaio 1	Ensaio 2	
Metálica	107	110	
Grafite	48	54	

5.3) Discussão geral dos resultados

5.3.1) Efeito da estrutura da matéria-prima e material de molde na operação de tixoforjamento

Tomando como parâmetro de avaliação da operação de tixoforjamento a força máxima requerida para a fabricação da peça-teste projetada, pode-se analisar a influência da estrutura da matéria-prima e do material empregado na confecção do conjunto matriz e punção, neste parâmetro.

Os valores de força máxima para testes nas diferentes condições analisadas no trabalho são apresentados na Tabela 5.10; foi considerado, em cada caso, o valor máximo obtido nos dois ensaios efetuados, para cada condição. Os mesmos dados são apresentados graficamente na Figura 5.25.

Pode-se observar, de maneira geral, os reduzidos valores das forças requeridas para o forjamento no estado semi-sólido, em todos os casos. Como comentado anteriormente, a conformação da peça-teste a partir da geometria cilíndrica inicial, na matriz projetada, em somente um passe, seria impossível a partir da matéria-prima no estado sólido. Os resultados gerais mostram, portanto, a flexibilidade do processo de tixoforjamento no que diz respeito ao

material a ser empregado na fabricação do conjunto molde/punção e ao processo de fabricação da pasta reofundida ou tixofundida.

Tabela 5.10 – Valores de força máxima no tixoforjamento da liga A356 em diferentes moldes, a partir de distintas microestruturas.

Forca máxima (kN)	Tipo de microestrutura			
r orşu muximu (kr ()	SR	CR	AM	СР
F _{max} em matriz metálica (kN)	125	97	55	110
F _{max} em matriz de grafite (kN)	110	63	24	54



Figura 5.25 – Forças máximas requeridas no tixoforjamento da liga A356 a partir de diferentes microestruturas, em molde metálico e molde de grafite.

De maneira mais específica, pode-se observar que, com relação ao material do conjunto molde/punção, sua influência na força requerida no tixoforjamento é sensível: em todos os casos a força máxima requerida nos testes feitos em moldes de grafite se mostrou inferior à requerida nos testes em moldes metálicos, como mostra a relação 5.1. Uma vez que a grafite possui alto

efeito lubrificante, a resistência ao deslocamento do punção e ao escoamento do material no interior da matriz é bem menor que a encontrada na matriz de aço, além disso, em todos os testes foi utilizado como parâmetro constante um valor pré-fixado de deslocamento do punção, a rigidez do molde utilizado influencia a força máxima atingida no teste. Assim, ao ser atingido o valor do deslocamento do punção necessário ao total preenchimento do molde, os esforços aplicados, transferidos à matriz de grafite, de menor rigidez que a de aço, resultaram em menores valores. Deve-se salientar que, dada a elevada fluidez do material no estado semi-sólido, as forças máximas atingidas ficaram sempre aquém das requeridas para a ruptura do molde de grafite.

$$F_{max}(A) > F_{max}(G)$$
 (Relação 5.1)

Quanto à influência da estrutura inicial da matéria-prima da qual foi obtida, por tixofundição, a pasta a ser forjada, na força requerida no processo de conformação, pode-se observar também sensível diferença nos valores obtidos, seguindo o seguinte comportamento:

$$F_{max}(SR) > F_{max}(CP) > F_{max}(CR) > F_{max}(AM)$$
(Relação 5.2)

Se observadas as características estruturais da matéria-prima previamente ao processo de tixofundição, apresentados no item 5.1, pode-se deduzir a importância da sua condição no processo de tixoforjamento. A Tabela 5.11 e a Figura 5.26 sumarizam estes dados para confrontação com os valores de forca máxima em cada caso, apresentados na Tabela 5.10.

Foram considerados somente os testes feitos em molde metálico devido à semelhança de comportamento das forças requeridas, nos testes feitos com molde cerâmico, conforme visto anteriormente.
Parâmetro	Condição do Material*			
Estrutural (µm)	SR	CR	AM	СР
Diâmetro de				
glóbulo ou				
rosetas ou	243 ± 75	162 ± 70	135 ± 88	110 ± 64
Espaçamento				
Interdendrítico				

Tabela 5.11 – Parâmetros microestruturais da matéria-prima (liga A356) em diferentes condições (SR, CR, AM e CP).

*Valores de diâmetro de glóbulos tomados na região intermediária entre centro e extremidade do braço da peça tixoforjada (região *quarenta*).



Figura 5.26 – Parâmetros microestruturais (tamanho médio de glóbulos/rosetas/espaçamento interdendrítico) da liga A356 em diferentes estados utilizados como matéria-prima para o tixoforjamento.

Pode-se observar que os parâmetros estruturais no produto tixoforjado seguem a relação:

$$\phi_{\lambda}(SR) > \phi_{roseta}(CR) > \phi_{glóbulo}(AM) > \phi_{glóbulo}(CP)$$
 Relação 5.3

onde ϕ é o tamanho médio.

Pode-se observar também a semelhança entre a relação 5.3 e a relação 5.2, podendo-se concluir que a força máxima requerida para o tixoforjamento decresce com a diminuição do valor do parâmetro microestrutural básico (espaçamento interdendrítico, tamanho de roseta ou tamanho de glóbulo) da matéria-prima.

Estruturas originalmente dendríticas grosseiras devem resultar, no aquecimento para tixofundição, em pastas com glóbulos de grandes e irregulares dimensões e, portanto, com maior dificuldade de escoamento, isto é, com viscosidade elevada. A estrutura destas pastas é conseqüência de fenômenos de engrossamento dendrítico em meio líquido e provavelmente a fase sólida primária apresenta elevado grau de interação entre partículas, dificultando seu escoamento.

Por seu lado, estruturas submetidas a alto grau de refino, apresentando rosetas ao invés de dendritas bem desenvolvidas, ao serem aquecidas à temperatura de tixofundição, devem resultar em pastas com glóbulos da fase primária mais regular e de menores dimensões que as obtidas a partir de dendritas grosseiras, sendo mais facilmente conformadas. Estruturas por sua vez obtidas a partir da fusão parcial de material submetido a agitação mecânica durante solidificação, devem resultar em pastas com glóbulos sólidos das menores dimensões e com o melhor comportamento no escoamento. Conforme já mencionado, o comportamento reológico de pastas reo e tixofundidas é diretamente dependente, segundo vários autores (KATTAMIS, op. cit; SUÉRY, 2000; GULLO, 2000), das dimensões, esfericidade e grau de interação entre glóbulos da fase sólida. Este comportamento foi observado no trabalho, resultando nas menores forças de forjamento das pastas com estruturas mais finas e regulares.

Não foi considerado o parâmetro fração sólida, pois este foi considerado constante em todos os ensaios.

Quanto ao compósito A356 + Al_2O_3 , as partículas do reforço interferem significativamente no comportamento reológico da pasta tixofundida, prejudicando seu escoamento e resultando na elevada força requerida para o preenchimento do molde, quando comparada com a força requerida para a pasta com semelhantes parâmetros estruturais (AM) mas

94

livres de reforço. As partículas de Al₂O₃, aglomeradas ou não, aumentam a fração sólida total da pasta, reduzindo sua fluidez.

Assim, o comportamento no escoamento da pasta contendo reforço (CP), dada a presença de aglomerados de partículas, se aproxima do comportamento reológico da pasta com glóbulos grosseiros (SR).

5.3.2) Efeito da estrutura da matéria-prima e material de molde na qualidade do produto tixoforjado.

Os efeitos da condição inicial da matéria-prima e material do molde na qualidade do produto tixoforjado podem ser avaliados pela qualidade superficial resultante e pela heterogeneidade da sua microestrutura.

No primeiro caso, a avaliação, puramente qualitativa, indica na maioria dos casos um inferior acabamento superficial dos produtos fabricados em moldes de grafite, comparativamente aos obtidos em moldes de aço.

Este efeito pode ser atribuído ao próprio acabamento superficial do molde de grafite, inferior ao metálico pela dificuldade de sua usinagem associada ao próprio processo de fabricação do compactado de grafite, a partir de pó, o que lhe atribui uma certa porosidade, inerente a este processo.

Adicionalmente, foi observado um efeito de variação dimensional do conjunto matriz/punção, causado provavelmente por dois fatores: pela eliminação do ligante utilizado na aglomeração do grafite ao longo das sucessivas utilizações, uma vez que o material foi utilizado a elevada temperatura; e desgaste mecânico do material pelo atrito com a pasta durante tixoforjamento. A perda da qualidade superficial e precisão dimensional da matriz e punção ocorreram de forma gradual, atingindo um estado que inviabilizou seu emprego após cerca de trinta testes.

A Figura 5.27 apresenta a matriz de grafite no estado inicial (com uma peça tixoforjada ainda no seu interior) e no estado de descarte, após cerca de trinta experimentos (com o punção no seu interior).



a)



b)

Figura 5.27 – Matriz de grafite utilizada nos experimentos de tixoforjamento no: a)estado inicial, b)estado de descarte, após trinta experimentos.

Pode-se observar que a matriz apresenta alta porosidade no estado de descarte, devido à eliminação do ligante e comprometimento da precisão dimensional.

Os resultados mostram, portanto, a necessidade de um bom acabamento superficial no molde, além de estabilidade nas temperaturas de trabalho, para a manutenção da qualidade do produto a ser nele fabricado. Materiais cerâmicos mais compactos poderiam representar boas opções a materiais metálicos em operações de tixoforjamento.

Quanto ao efeito da estrutura da matéria-prima utilizada no tixoforjamento, na qualidade do produto, avaliada pela heterogeneidade de sua estrutura, os resultados deste trabalho mostraram que, mantidos os mesmos parâmetros de processo (temperatura e tempo de tixofundição), estruturas originalmente mais grosseiras resultam em maior segregação de líquido durante o preenchimento do molde. Já foi discutido anteriormente que pastas contendo glóbulos mais irregulares e de maiores dimensões apresentam maior dificuldade de escoamento e conseqüente maior heterogeneidade microestrutural no produto.

No caso do tixoforjamento do material compósito, a presença extra do sólido representado pelas partículas do reforço prejudica a fluidez da pasta, comprometendo a homogeneidade do produto, além da heterogeneidade já observada da dispersão das partículas do reforço na matériaprima.

Resultados semelhantes são obtidos para peças produzidas nos dois tipos de moldes testados. Uma vez que os testes de tixoforjamento foram executados, em todos os casos, à elevada temperatura e isotermicamente, não houve influência da condutividade térmica do molde na capacidade de escoamento dos distintos tipos de matéria-prima e na microestrutura do produto tixoforjado resultante.

Capítulo 6

Conclusões gerais

Os resultados obtidos neste trabalho para as condições experimentais dadas permitem concluir que:

- É possível a utilização de moldes não metálicos em operações de tixoconformação, no caso moldes de grafite para o tixoforjamento, uma vez que as forças requeridas para o processo são inferiores às de ruptura do material do molde.
- A qualidade de acabamento e dimensional do produto tixoconformado em moldes de grafite pode ser considerada aceitável, porém inferior à obtida em moldes metálicos devido ao seu maior desgaste em trabalho.
- As forças requeridas para o tixoforjamento são inferiores no molde cerâmico, uma vez que a grafite apresenta alto efeito lubrificante, reduzindo a resistência ao deslocamento do punção e escoamento do material.
- As forças de tixoforjamento dependem da condição da matéria-prima, de forma que forças maiores são requeridas de acordo com o aumento do parâmetro microestrutural básico (espaçamento interdendrítico, tamanho de glóbulo e tamanho de roseta) da matéria-prima.

- São obtidas estruturas semelhantes no tixoforjado para os dois tipos de moldes empregados, em todos os casos de matéria-prima, uma vez que foram adotadas condições isotérmicas de tixofundição.
- A presença de heterogeneidades microestruturais, na forma de variação do teor de fase primária ao longo do comprimento, verifica-se em todos os tixoforjados, devido à segregação de líquido e não sofre influência do material do molde.
- A segregação de líquido é dependente da estrutura da pasta, que por sua vez é dependente da matéria-prima. Pastas contendo glóbulos irregulares e de maior tamanho apresentam um tixoforjado com maior segregação e maior dificuldade de escoamento.

Referências Bibliográficas

ADAMIAK, A. & ROBERT, M.H. Preliminary Studies on the Rheocast Al Alloys for Deep Drawing. In: PROCEEDINGS OF 7TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING, Gliwice, Polônia, 1999.

ASM, Metals Handbook. American Society of Metals (ASM). International Handbook Committee. 1990.

BEHRENS, B., HALLER, B., FISCHER, D. & SCHOBER, R. Investigations on Steel Grades and Tool Materials for Thixoforging. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

BREMER, T., MERTES, H.P., HEUBEN, J. M. M. & KOPP, R. Thixoforging-Material Flow and Mechanical Properties. In: PROCEEDINGS OF 4RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Sheffield, UK, 1996.

CHIARMETA, G. Why Thixo? . In: PROCEEDINGS OF 6 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 2000, Turin, Itália, 2000.

DAS GUPTA, R. Industrial Applications-The Present Status and Challenges We Face. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

DUTTA, B. & SURAPPA, M. K. Microestructure Evolution During Multidirectional Solidification of Al-Cu/SiC Composites. Composites Part A, v. 29a, 1998.

FLEMINGS, M. C. Behaviour of Metal Alloys in Semisolid State. Metallurgical Transactions A. v. 22a, 1991.

FUJII, T., DASHWOOD, R. J. & MCSHANE, H. B. Semi-solid Forming of Commercial SiCp Reinforced Aluminium Alloy Powder. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

GIANARIS, N. J., GARFINKLE, G. A., MYER, D.C & HASHMI, S. A. A. Design and Processing of a Novel Brake Rotor. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

GIORDANO, P. & CHIARMETTA, G. New Rheocasting: A Valid Alternative to the Tradicional Thecnologies for the Production of Automotive Suspension Partts. In: YER, D.C & HASHMI, S. A. A. Design and Processing of a Novel Brake Rotor. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

KAUFMANN, H., NAKAMURA, M., WABUSSEG, H. & UGGOWITZER, P. J. New Rheocasting: A Novel Approach to Semi-Solid Casting. Die Casting World, v. 11, 2000.

GRILLON, G. & GARAT, M. Potentiality of Thixocasting Associated with Impact Treatment for the Manufacture of a Car Wheel Disk. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL

CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

GULLO, G. C., STEINHOFF, K. & UGGWITZER, P. J. Microstructural Changes During Reheating of Semi-Solid Alloy AA6082, Modified wit Barium. In: PROCEEDINGS OF 6RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Turin, Itália, 2000.

HAGA, T., KAPRANOS, P., KIRKWOOD, D. H. & ATKINSON, H. V. Thixoforming Process Using Ingot Cast by a Cooling Slope and Low Super Heat Casting. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

HAGE JR., E. Compósitos e Blendas Poliméricas. Apostila de Curso-IBM Brasil. Campinas, SP, 1989,

HIRT, G. The Thixotec Research Project. In: PROCEEDINGS OF 6 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 2000, Turin, Itália, 2000.

JACKSON, K. A., HUNT, J. D., UHLMANN, D. R. & SEWARD, T. P. On the Origin of the Equiaxed Zone in Castings. Transctions of Metallurgicall Society of AIME, v. 236, 1966.

JOLY, P. A. & MEHRABIAN, R. The Rheology of Partially Solidified Alloy. Journal of Materials Science. v. 11, 1976.

KANG, C. G., SEO, P. K & LIM, M. D. Rheo and Thixo Die Casting for Automobile Suspension Parts. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

KATTAMIS, T. Z. & ANCLA, A. I. Rheological, Microstructural and Constitutional Studies of Semi-Solid Al-4,5%Cu-1,5%Mg. In: PROCEEDINGS OF 2RD INTERNATIONAL

CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Massachusetts, USA, 1992.

KIRKWOOD, D. H. Semisolid Metal Processing. International Materials Reviews. v. 39, n. 5, 1994.

KITAMURA, K. & ANDO, Y. Die Casting of Alloy in Semisolid State. In: PROCEEDINGS OF 3RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, Tóquio, Japão, 1994.

KUROKI, K., SUENEGA, T. TANIKAWA, H. MASAKI, T., SUZUKI, A., UMEMOTO, T. & YAMAZAKI M. Establishment of a Manufacturing Technology for the High Strength Aluminum Cylinder Block in Diesel Engines Applying a Rheocasting Process. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

LIU, D., ATKINSON, H. V., KAPRANOS, P. & JONES, H. Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of Thixoformed Wrought Alloy 2014. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

LUO, S. J., TENG, D.D., JIANG, J. F. & ZHU, L. J. Study on Thixoforming of SiCp-2024 Composite Angle-Frame in Semi-Solid State. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

LUDWING, O., DIMICHIEL, M. FALUS, P., SALVO, L. & SUÉRY, M. In-Situ 3D Microstructural Investigation by Fast X-Ray Microtomography of Al-Cu Alloys During Partial Remelting. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004. METZ, S. A. MEHRABIAN, R. & FLEMINGS. M. C. Rheocasting. Tran. Am Foundrymen's Society. v. 78, 1970.

MELO, S. S. A. Análise Comparativa de Dois Processos de Produção de Matéria-prima para a Tixoconformação: Agitação Mecânica e Fusão Parcial Controlada. Dissertação de Mestrado. 2000. Campinas, SP, UNICAMP.

MIWA, K et al. Apparent Viscosity and Structure in Al-Si alloys Partially Solidified Under Stirring. Japan Inst. of Metals, v. 45, 1981.

MOTEGI, T., ROBERT, M. H. & TANABE, F. Semi-solid Continuous Casting and Thixoforming of Wrought Aluminium Alloys. In: 17th International Congress of Mechanical Engineering. São Paulo-SP, 2003.

MODIGELL, M., KOPP, R., SAHM, P. R., NEUSCHUTZ, D. & PETERA, J. Basic Investigations for Optimisation of the Process Parameters of Thixoforming. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

MUSSI, R. G. S. Contribuição ao Estudo da Fabricação de Compósitos de Matriz Metálica a Partir de Matriz no Estado Semi-Sólido. Dissertação de Mestrado. 2000. Campinas, SP, UNICAMP.

NAGATA, S. Mixing: Principles and Applications. Tokyo: Kodansha. 1985.

NEUDENBERGER, D., KOPP, R. & WINNING, G. Optimization of the Forming Variants Forging and Transverse Impact Extrusion with Alloys in the Semi-Solid State. In: PROCEEDINGS OF 6RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Turin, Itália, 2000. PAES, M. Otimização de Processo de Obtenção de Reofundidos da Liga A356 por Agitação Eletromagnética. Dissertação de Mestrado. 2000. Campinas, SP, UNICAMP.

PELLA JR. W. Estudo da Viabilidade de Tixoforjamento da Liga A2011 em Matrizes Não-Metálicas. Dissertação de Mestrado. 2002. Campinas, SP, UNICAMP.

PITTS, H.E. & ATKINSON, H.V. Thixoforming of 6061 Al Alloy for Automotive Components. In: PROCEEDINGS OF 5 TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 1998, Colorado, USA, 1998.

RAMATI, S. E., ABBASCHIAN, G. & MEHERABIAN, R. Forging of Liquid and Partially Solid Sn-15%Pb. Metallurgical Transaction B, v. 9b, 1978.
REINHARDT, C. & GOVENDER, G. Semi-Solid High Pressure Die Casting of Componentes.
In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

ROBERT, M. H. Partial Melting as an Efficient Method to Produce Rheocast Alloy Slurries. Trans of Japan Foundrymens Society, v. 12, 1993.

ROBERT, M. H. E KIRKWOOD, D. H. Alloy Slurry Formation by Partial Melting. In: PROCEEDINGS OF SOLIDIFICATION PROCESSING CONFERENCE, Sheffield, U. K., 1987.

ROVIRA, M. M. Forjamento da Liga A2011 no Estado Semi-Sólido: Estudo do Processo e do Produto. Tese de Doutorado. 2001. Campinas, SP, UNICAMP.

ROVIRA, M. M. Viabilização do Tixoforjamento da Liga Al-4,5%Cu Super-Refinada. Dissertação de Mestrado. 1996. Campinas, SP, UNICAMP.

SANTOS, S. P. Ciência e Tecnologia de Argilas. 2^a Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1989.

SPENCER, D. B, MEHRABIAN, R. & FLEMINGS, M. C. Rheological Behaviour of Sn-15% Pb in Crystallisation Range. Metals Transactions. v.3, 1972.

SUÉRY, M. & ZAVALIANGOS, A. Key Problems in Reology os Semi-Solid Alloys. In: PROCEEDINGS OF 6RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Turin, Itália, 2000.

SVARE, A. J. & MIDSON, S. P. Gates and Runners for Semi-Solid Castings. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

VIVÉS, C. Effects of Metal Matrix Composites from Thixotropic Slurries Using a New Magnetohydrodynamic Caster. Metallurgical Transcations. v. 24b, 1993.

VIVÉS, C. Elaboration of Semisolid Alloys by Means of New Eletromagnetic Rheocasting Processes, Metallurgical Transactions, v. 23b, 1992.

XIE, S. S., PAN, H. P. & DING, Z. Y. An Experimental Investigation on Thixoforming Property of AlSi7Mg Alloy. In: PROCEEDINGS OF 7RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Tsukuba, Japão, 2002.

YOON, K. M., KO, Y. J., KANG, C. G. & LEE, J. S. The Optimization of Aluminum Ssm Knuckle by New Concept of Die Tooling. In: PROCEEDINGS OF 8RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES. Limassol, Chipe, 2004.

YOUNG, K.P. & FITZE, R. Semi-solid Metal Cast Aluminium Automotive Components. In: PROCEEDINGS OF 3 RD INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 1994, Tóquio, Japão, 1994.