



IMPACTOS DAS TECNOLOGIAS NA ENGENHARIA DE MATERIAIS E METALÚRGICA

**Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
(Organizadores)**

Atena
Editora

Ano 2019

Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
(Organizadores)

Impactos das Tecnologias na Engenharia de Materiais e Metalúrgica

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Lorena Prestes e Geraldo Alves

Revisão: Os autores

Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

134	Impactos das tecnologias na engenharia de materiais e metalúrgica [recurso eletrônico] / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, Ricardo Vinicius Bubna Biscaia. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader. Modo de acesso: World Wide Web. Inclui bibliografia ISBN 978-85-7247-235-7 DOI 10.22533/at.ed.234190204 1. Engenharia – Tecnologia. 2. Metalurgia. I. Holzmann, Ajuz. II. Biscaia, Ricardo Vinicius Bubna. CDD 620.002854
-----	--

Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

www.atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A engenharia de materiais e metalúrgica, vem cada vez mais ganhando espaço nos estudos das grandes empresas e de pesquisadores. Esse aumento no interesse se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de materiais e metalurgia, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente.

A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas de desempenho técnico e econômico. Ainda são base da formação do engenheiro projetista cujo ofício se fundamenta na correta escolha de materiais e no processo de obtenção do mesmo, estando diretamente relacionados a área de metalurgia.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Aos autores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
Ricardo Vinicius Bubna Biscaia

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ENGENHARIA METALÚRGICA NA UNIVERSIDADE DO ESTADO DE MINAS GERAIS: ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DO CURSO	
<i>Kelly Cristina Ferreira</i>	
<i>Júnia Soares Alexandrino</i>	
<i>Telma Ellen Drumond Ferreira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902041	
CAPÍTULO 2	8
EVOLUÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS NA UEMG/JOÃO MONLEVADE EM SEUS 10 ANOS DE EXISTÊNCIA	
<i>Kelly Cristina Ferreira</i>	
<i>Júnia Soares Alexandrino</i>	
<i>Telma Ellen Drumond Ferreira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902042	
CAPÍTULO 3	15
ACUMULADORES PB-ÁCIDO: CONCEITOS, HISTÓRICO E APLICAÇÃO	
<i>Abdias Gomes dos Santos</i>	
<i>Flávio José da Silva</i>	
<i>Magda Rosângela Santos Vieira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902043	
CAPÍTULO 4	21
ANÁLISE PRELIMINAR DA APLICABILIDADE DA SEPARAÇÃO BASEADA EM SENSORES EM MINA DE CALCÁRIO DE CAÇAPAVA DO SUL (RS)	
<i>Evandro Gomes dos Santos</i>	
<i>Régis Sebben Paranhos</i>	
<i>Carlos Otávio Petter</i>	
<i>Aaron Samuel Young</i>	
<i>Moacir Medeiros Veras</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902044	
CAPÍTULO 5	30
DESEMPENHO DE REAGENTES NA FLOTAÇÃO COLETIVA DE SULFETOS DE UM REJEITO AURÍFERO PARAIBANO	
<i>Marcelo Rodrigues do Nascimento</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902045	
CAPÍTULO 6	40
UTILIZAÇÃO DE SULFONATO DE ALQUILBENZENO LINEAR (LAS) E POLICARBOXILATO ÉTER (PCE) COMO REAGENTES PARA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO	
<i>José Maria Franco de Carvalho</i>	
<i>Mariane Batista de Oliveira Vasconcelos</i>	
<i>Luanne Phâmella da Silva Henriques e Moreira</i>	
<i>Julia Castro Mendes</i>	
<i>Carlos Alberto Pereira</i>	
<i>Ricardo André Fiorotti Peixoto</i>	
DOI 10.22533/at.ed.2341902046	

CAPÍTULO 7 50

COMPORTAMENTO EM TRAÇÃO DE COMPÓSITOS DE MATRIZ POLIÉSTER E FIBRAS DE CURAUÁ E BANANEIRA CONTÍNUAS E ALINHADAS

Michel José Caldas Carvalho

Douglas Santos Silva

Roberto Tetsuo Fujiyama

DOI 10.22533/at.ed.2341902047

CAPÍTULO 8 64

EFEITO DE UM ADITIVO ENZIMÁTICO COMERCIAL NA DEGRADAÇÃO DE PEBD EM MEIO SALINO

Jéssica Pereira Pires

Gabriela Messias Miranda

Gabriela Lagranha de Souza

Flávia Stürmer de Fraga

Alessandro da Silva Ramos

Rosane Angélica Ligabue

Jeane Estela Ayres de Lima

Rogério Vescia Lourega

DOI 10.22533/at.ed.2341902048

CAPÍTULO 9 81

PREPARAÇÃO DE MICROESFERAS DE QUITOSANA/ARGILA PARA USO COMO SISTEMA CARREADOR DO IBUPROFENO

Matheus Aleixo Maciel

Bárbara Fernanda Figueiredo dos Santos

Hanniman Denizard Cosme Barbosa

Albaniza Alves Tavares

Pedro Henrique Correia de Lima

Suédina Maria de Lima Silva

DOI 10.22533/at.ed.2341902049

CAPÍTULO 10 97

CONSOLIDAÇÃO POR SINTERIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DE ALUMÍNIO RECICLADO A PARTIR DE LATAS DE BEBIDA VIA METALURGIA DO PÓ

José Raelson Pereira de Souza

Regina Bertília Dantas de Medeiros

Mauricio Mhirdau Peres

DOI 10.22533/at.ed.23419020410

CAPÍTULO 11 113

ELETRODEPOSIÇÃO DE FILMES DE POLIPIRROL EM SUPERFÍCIES DE ALUMÍNIO 2024: INFLUÊNCIA DO ELETRÓLITO

Andrea Santos Liu

Alex Fernandes de Souza

Liu Yao Cho

DOI 10.22533/at.ed.23419020411

CAPÍTULO 12	128
UMA REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE LIGAS METÁLICAS NO ESTADO SEMISSÓLIDO	
<i>Luis Vanderlei Torres</i>	
DOI 10.22533/at.ed.23419020412	
CAPÍTULO 13	141
INFLUÊNCIA DA TAXA DE RESFRIAMENTO SOBRE MACROESTRUTURA DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 323 SOLIDIFICADO EM MOLDE DE AREIA	
<i>Rafael Brasil da Costa</i>	
<i>Rodrigo da Silva Miranda</i>	
<i>Adilto Pereira Andrade Cunha</i>	
DOI 10.22533/at.ed.23419020413	
CAPÍTULO 14	149
INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS DA MESA CONCENTRADORA WILFLEY NA CONCENTRAÇÃO DE ESCÓRIA METALÚRGICA DA LIGA FESIMN	
<i>Raulim de Oliveira Galvão,</i>	
<i>Filipe Brito Marinho de Barros</i>	
<i>José Carlos da Silva Oliveira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.23419020414	
CAPÍTULO 15	161
INFLUÊNCIA DO ENSAIO METALÚRGICO DE TEMPERA NA MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS AÇOS	
<i>Rodrigo da Silva Miranda</i>	
<i>Adilto Pereira Andrade Cunha</i>	
DOI 10.22533/at.ed.23419020415	
CAPÍTULO 16	171
ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ENTRE CAMADAS NA TÉCNICA DE RECONSTRUÇÃO 3D POR SEÇÃO SERIAL	
<i>Wesley Luiz da Silva Assis</i>	
<i>Talita Fonseca dos Prazeres</i>	
<i>Ana Beatriz Rodrigues de Andrade</i>	
<i>Douglas de Oliveira</i>	
DOI 10.22533/at.ed.23419020416	
SOBRE OS ORGANIZADORES	179

UMA REVISÃO SOBRE A TECNOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE LIGAS METÁLICAS NO ESTADO SEMISSÓLIDO

Luis Vanderlei Torres

Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de São Paulo

Bragança Paulista - SP

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Mecânica Campinas - SP

RESUMO: O processamento de ligas metálicas no estado semissólido trata-se de uma tecnologia recente e que oferece diversas vantagens em relação aos processos convencionais de produção. O interesse por esta tecnologia tem gerado vários grupos de pesquisas, afim de, explorar o potencial deste processo, sendo a indústria automotiva a principal patrocinadora. Este trabalho apresenta uma revisão sobre a tecnologia aplicada ao processamento de ligas metálicas semissólidas, abordando os mecanismos que levam às alterações microestruturais durante seu processamento, ou seja, a obtenção de uma estrutura globular como também os principais processos desenvolvidos para o processamento da matéria-prima semissólida.

PALAVRAS-CHAVE: ligas metálicas, material semissólido, estrutura globular.

ABSTRACT: The metal alloys processing in the semisolid state is a recent technology and offers several advantages over conventional production

processes. The interest in this technology has generated several research groups in order to explore the potential of this process, with the automotive industry being the main sponsor. This work presents a review on the technology applied to the semisolid metal alloys processing, addressing the mechanisms that lead to the microstructural changes during its processing, that is, the obtaining of a globular structure as well as the main processes developed to the semisolid raw material processing.

KEYWORDS: metal alloys, semisolid material, globular structure.

1 | INTRODUÇÃO

A utilização maciça das ligas de alumínio na indústria automotiva ocorreu devido à redução de peso dos componentes, por meio da substituição do ferro fundido e do aço por ligas mais leves (CHIARMETTA, 1996). Todos os anos milhares de componentes são produzidos, como por exemplo, fundidos de alumínio em pistões, cabeçotes de motor, chassis, entre outros (MILLER *et al.*, 2000).

Dentre as matérias-primas empregadas no processamento de materiais no estado semissólido, as ligas de alumínio (A356 e A357) são as mais utilizadas ocupando 95% de

todas as aplicações; no ano 2000 foram processadas cerca de 2.100ton da liga A356 e 11.200ton da liga A357 enquanto que outras ligas representavam apenas 700ton (CHIARMETTA, 2000), no ano de 2008 houve um aumento significativo da produção, com 6.200ton da liga A356 e 25.600ton da liga A357 (NADCA, 2008). A utilização dessas ligas deve-se principalmente a características como excelente fundibilidade, baixa densidade (aproximadamente um terço da densidade do aço) o que somado à sua elevada resistência mecânica torna-as bastante útil para a indústria (ABAL, 2019).

O primeiro pesquisador a observar o comportamento semissólido das ligas metálicas foi Spencer, em 1972 no Massachusetts Institute of Technology (MIT), quando desenvolvia sua tese de doutorado, relacionado com a formação e desenvolvimento de trincas por contração durante a solidificação da liga Sn-15wt%Pb sob ação de forças cisalhantes; o efeito das forças cisalhantes sobre a liga em solidificação faz sua natural formação dendrítica romper-se, com isso as partículas sólidas remanescentes deste processo de rompimento ficam suspensas no líquido em movimento. Mantendo a temperatura da liga num valor intermediário entre as temperaturas *solidus* e *liquidus*, estas partículas sólidas suspensas no líquido e que sobrevivem tendem a assumir uma geometria aproximadamente globular, por efeito da necessidade da redução da tensão superficial do glóbulo cristalino (SPENCER *et al.*, 1972; TORRES, 2013). Essa morfologia globular da liga em solidificação sob ação de forças cisalhantes possui características especiais de escoamento capazes de reduzir sensivelmente sua viscosidade, possibilitando grandes deformações no material semissólido (JOLY *et al.*, 1976). O professor Merton Flemings organizou então o primeiro grupo de pesquisa específico para investigar as ligas metálicas no estado semissólido, primeiramente utilizando as ligas chumbo-estanho e mais tarde as ligas de alumínio (FELTRIN, 2004).

O interesse por esta tecnologia originou um grande número de grupos de pesquisas iniciando uma intensa produção de artigos a fim de caracterizar as ligas metálicas semissólidas, localizados principalmente nos EUA, Europa e Japão; nos EUA as universidades de Connecticut e Illinois, na Inglaterra as universidades de Leeds, Sheffield e Sussex, na Holanda a universidade de Delft, na França a universidade de Grenoble, na China a universidade de Pequim, no Brasil as universidades Unicamp, UFSCar e UFRGS. Os principais centros de pesquisa se localizavam na Alemanha - AACHEN (Casting Institute), no Japão - AIST (Agency of Industry Science and Technology), no Canadá - IMRI (Industry Materials Research Institute), na Inglaterra - Fulmer Institute, entre outros. Como consequência, muitas empresas iniciaram a produção em nível industrial de ligas metálicas no estado semissólido, a saber: Rheocast Corporation, Alumax, Amax, Westinghouse Electric Co., Suzuki Motor Co., Sumitomo Metals, Pratt, Alcan, British Steel, entre outras (PAES, 2000). No Brasil, várias universidades abordam este tema, porém a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) através da Faculdade de Engenharia Mecânica se destaca realizando inúmeros trabalhos através do grupo de pesquisa “Reofundição e Tixoconformação” liderado pelos professores Dra. Maria Helena Robert e Dr. Eugênio José Zoqui.

Portanto, este trabalho visa contribuir com o desenvolvimento da tecnologia semissólida, relatando os mecanismos que levam às alterações microestruturais durante seu processamento, como também abordar alguns dos processos desenvolvidos para o processamento da matéria-prima semissólida.

2 | CONCEITOS INICIAIS: TECNOLOGIA SEMISSÓLIDA

Os termos reofundição e tixoconformação são as designações simplificadas da tecnologia aplicada à obtenção de componentes a partir da conformação de ligas metálicas no estado semissólido. No processo de reofundição o controle da temperatura é realizado na transição do estado líquido para o estado sólido e no processo tixoconformação o controle é realizado na transição do estado sólido para o estado líquido (FLEMINGS, 1991; ATKINSON, 2005). Os resultados obtidos pelos inúmeros trabalhos realizados levaram ao desenvolvimento de vários processos para a produção de ligas metálicas no estado semissólido, assim, inúmeros métodos de produção foram desenvolvidos, substituindo em parte a fundição convencional, sendo derivados dos processos convencionais de conformação termomecânica; os processos empregados para a conformação de materiais no estado semissólido utilizam frações líquidas distintas, a saber: tixofundição (alta fração líquida entre 50 a 90%), tixoforjamento (frações líquidas entre 30 a 50%) e tixoextrusão (baixa fração líquida entre 10 a 50%), conforme apresentados na Figura 1.

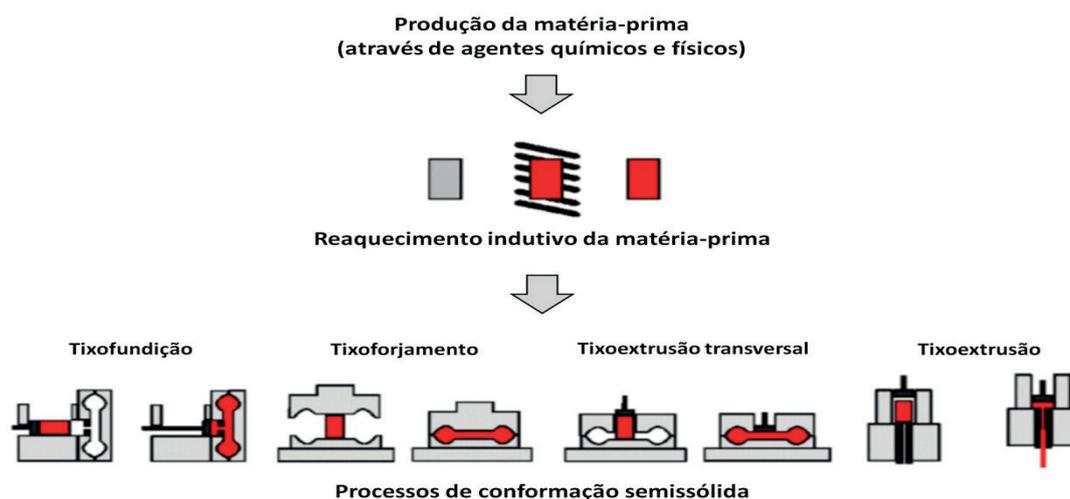


Figura 1 - Processos empregados para a conformação de ligas metálicas no estado semissólido (Adaptado de FELTRIN, 2004).

Existem várias vantagens na utilização do processamento de ligas metálicas no estado semissólido em comparação com os processos convencionais, a saber: maior

eficiência energética; maior produtividade; menor retenção de ar e menor possibilidade do surgimento de porosidades; maior vida útil dos moldes; microestruturas finas e homogêneas com propriedades melhoradas; e produção de peças na condição *near-net-shape*, ou seja, a peça é conformada praticamente no formato final do produto, com o mínimo de etapas em seu processamento. No entanto, como qualquer outro processo de manufatura, o processamento de ligas metálicas no estado semissólido também apresenta algumas desvantagens, a saber: alto custo da matéria-prima em vista de poucos fornecedores; necessidade do controle da temperatura, já que a fração líquida e a viscosidade no estado semissólido são fortemente dependentes da temperatura; e segregação de líquido devido ao aquecimento não uniforme pode resultar em uma composição não uniforme no componente (ATKINSON, 2005).

A estrutura morfológica de um material metálico semissólido consiste em uma fase primária composta de materiais esferoidais e uma fase secundária de matriz líquida a uma determinada temperatura da zona pastosa e quando solidificados, a fase sólida apresenta-se na forma globular e as fases secundárias com morfologia dendrítica (KAPRANOS *et al.*, 2000), conforme apresentado na Figura 2. A estrutura semissólida ideal será a que apresentar os menores tamanhos de grãos, mais homogêneos e mais globulares (FELTRIN, 2004).

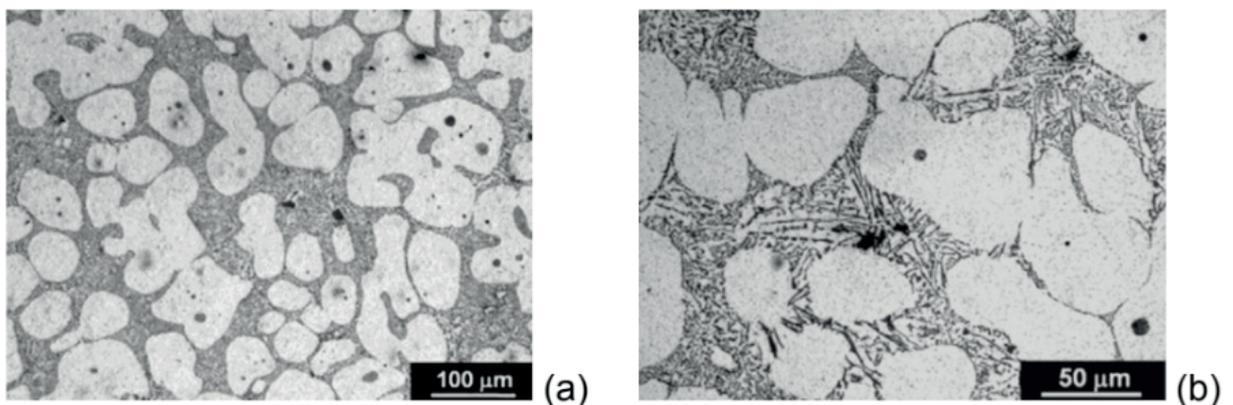


Figura 2 - Microestrutura da liga A356 reaquecida à temperatura de 580 °C: (a) estrutura globular e (b) visualização das fases secundárias com morfologia dendrítica (CAMPOS *et al.*, 2013).

A principal característica das ligas metálicas no estado semissólido e que chamou a atenção dos pesquisadores está relacionada ao seu comportamento reológico, ou seja, a estrutura globular sólida imersa em líquido apresenta deformação por escoamento viscoso não-newtoniano do tipo visco-inelástico. Fluidos não-newtonianos apresentam um comportamento no escoamento onde a relação tensão aplicada e a consequente deformação não é linear, como ocorre com os fluidos newtonianos, onde a viscosidade é constante para qualquer tensão e é dada pela relação tensão de cisalhamento entre camadas e o gradiente de velocidade entre as camadas do fluido. Para fluidos não-newtonianos, o parâmetro comumente utilizado para definir seu comportamento é a viscosidade aparente (relação entre a tensão de cisalhamento aplicada entre as

camadas do fluido em função do gradiente de velocidade entre camadas, porém para uma condição específica de cisalhamento) (SPENCER *et al.*, 1972; PAES, 2000), assim, têm-se a necessidade de se analisar parâmetros metalúrgicos e de processamento, pois estes influenciam de forma direta na viscosidade.

Parâmetros metalúrgicos:

- a) Fração sólida: um dos parâmetros mais importantes que afetam a viscosidade de uma pasta semissólida é a porcentagem de fração sólida da fase primária (no caso das ligas de alumínio, o Al- α), sendo determinada pela faixa de temperatura de trabalho determinada pela composição química da liga e delimitada pelo ponto de composição no diagrama de fase;
- b) Morfologia da fase primária: estudos mostram que, para uma mesma fração sólida, pastas com estruturas dendríticas possuem maior viscosidade que aquelas com estrutura globular;
- c) Distribuição e tamanho de grão: microestruturas refinadas e distribuídas homogeneamente movem-se mais livremente umas sobre as outras com menos colisões, melhorando o fluxo da pasta, acarretando num valor de viscosidade menor;
- d) Composição química da liga: quanto maior a porcentagem de elementos de liga, menor será a porcentagem de Al- α presente, implicando numa quantidade menor de partículas da fase primária em suspensão na matriz líquida (LASHKARI *et al.*, 2007; PRONI, 2014).

Parâmetros de processamento:

- a) Temperatura: a escolha da temperatura de processamento implica na fração sólida efetiva, ou seja, quanto maior a temperatura escolhida, menor a porcentagem de fração sólida, conseqüentemente uma menor viscosidade apresentada pela pasta;
- b) Força aplicada: a força aplicada sobre a pasta e o tempo gasto nesta operação, acarretará na tensão e taxa de cisalhamento operantes sobre o material; dependendo da intensidade, poderá implicar num fluxo laminar ou turbulento, produzindo correntes convectivas que alterarão a microestrutura da pasta semissólida;
- c) Tempo de espera: variações do tempo no qual o material reaquecido permanece na temperatura escolhida possibilita uma melhor globularização, melhorando o fluxo da pasta, conseqüentemente em uma viscosidade menor (ATKINSON, 2005; LASHKARI *et al.*, 2007; PRONI, 2014).

2.1 Mecanismos de Formação de Estruturas Globulares

As matérias-primas empregadas nos processos de reofundição e tixoconformação podem ser obtidas através do processamento durante a solidificação e do

processamento posterior à solidificação, em ambos os casos os processos visam à modificação da morfologia da microestrutura em formação ou já formada de dendrítica para globular. Nestes processos, a globularização apenas parcial já é suficiente, pois, em geral, os processos posteriores implicarão no reaquecimento desta matéria-prima a uma temperatura intermediária entre *solidus* e *liquidus* para viabilizar a conformação, o que implicará na continuidade do fenômeno de globularização da fase primária (FLEMINGS, 1991; ZOQUI, 2001).

Dentre os processos que ocorrem durante a solidificação, existe ainda uma subdivisão entre processos que interferem no crescimento e processos que interferem na nucleação. Os processos que interferem no crescimento são os mecanismos de globularização e o engrossamento, esses mecanismos atuam no líquido em solidificação de maneira a inibir o crescimento dendrítico através de uma grande agitação que gera a ruptura da estrutura já formada e sua globularização por mecanismos de redução de energia superficial (FLEMINGS, 1991).

O mecanismo de globularização ocorre a partir do engrossamento das dendritas em meio líquido. Este fenômeno ocorre a partir de dendritas equiaxiais que estão em crescimento no líquido, resultantes de ramos desprendidos ou mesmo dendritas originais, sendo engrossadas pelos mecanismos de transferência de massa. A Figura 3 apresenta toda a evolução estrutural durante a solidificação sob vigorosa agitação; segundo Flemings (1991), a dendrita se forma de acordo com vários mecanismos, a origem desta dendrita pode ocorrer pela recristalização do material, pela quebra de braço de outras dendritas ou pela refusão de braços dendríticos e estes fragmentos dendríticos continuam a crescer, porém com agitação contínua e o tempo de solidificação, a estrutura dendrítica se transforma em uma estrutura de roseta, durante o seu resfriamento e com resfriamento lento ocorre a transformação da estrutura de roseta para a estrutura globular.



Figura 3 - Evolução da estrutura durante a solidificação sob vigorosa agitação (FLEMINGS, 1991).

O mecanismo de engrossamento envolve preferencialmente a transferência de massa de superfícies com raio menor de curvatura para outras com raios maiores de curvatura ou de superfícies curvas para superfícies planas. Existem dois mecanismos de engrossamento: *ostwald ripening* e coalescência, esses mecanismos ocorrem quando o material é reaquecido ao estado semissólido. O mecanismo de engrossamento por

ostwald ripening consiste na dissolução de ramos menores, incorporação de soluto nos ramos maiores e difusão de soluto no líquido, tendo como resultado uma redução do número de ramos dendríticos e o aumento da distância entre eles (KATTAMIS *et al.*, 1967; KAHLWEIT, 1968). O mecanismo de engrossamento por coalescência consiste na aglomeração de ramos dendríticos secundários, resultando na supressão de superfícies de separação, levando a coalescência de dois ou mais braços em apenas um com maior dimensão (YOUNG, 1992; KIRKWOOD, 1994; GENDA *et al.*, 1987).

Os processos que interferem na nucleação consistem em aumentar a taxa de nucleação inicial, isto é, a quantidade de núcleos em função do tempo e do volume do líquido, restringindo assim seu crescimento e resultando em uma estrutura sólida de grãos finos. Trata-se, portanto, de incentivar uma nucleação extensiva em todo o volume do líquido quando associada à elevada taxa de resfriamento (PAES, 2004). Uma das técnicas tradicionais de controle de tamanho de grãos consiste na adição de agentes nucleantes ao banho fundido. Um agente nucleante é uma substância adicionada intencionalmente ao líquido para agir como um catalisador da nucleação, como, por exemplo, titânio e boro para ligas de alumínio.

2.2 Produção da Matéria-Prima Semissólida

Determinadas características microestruturais são necessárias para que uma matéria-prima seja considerada propícia para o processamento semissólido, a saber: uma estrutura não dendrítica, com tamanho de grãos reduzido e com pouca ou nenhuma segunda fase retida no interior dos grãos (ATKINSON, 2005). Para que tais características sejam conseguidas, são utilizadas diferentes rotas de processamento, utilizando agentes químicos e físicos; na sequência serão abordadas algumas destas rotas.

Agentes químicos:

a) Refino de grãos: A nucleação pode ser definida como a formação de uma nova fase a partir de outra, no caso da solidificação, a nucleação envolve a formação de partículas de sólido envolvidas pelo material líquido. Quando esse sólido é formado dentro do próprio líquido sem o auxílio de nenhum tipo de estimulante energético externo, diz-se que a nucleação é homogênea. Normalmente a formação de um núcleo sólido sofre uma ação catalisadora por meio da presença de superfícies de natureza diversas no meio líquido. O agente catalisador da nucleação pode ser tanto partículas sólidas em suspensão no líquido, paredes de molde, ou elementos inseridos propositadamente. Nestas condições, a nucleação tem início exatamente nessas partículas estranhas ao sistema e é denominada nucleação heterogênea (GARCIA, 2001). Os agentes nucleantes utilizados para o refino de grão consistem em uma substância adicionada ao metal líquido, com o intuito de incentivar ou iniciar a formação de sítios de nucleação; agentes nucleantes da família Al-Ti-B são utilizados há mais de 50 anos pela indústria do alumínio (KEARNS *et al.*, 1992).

Agentes físicos:

a) Agitação mecânica: baseia-se na estimulação dos mecanismos de formação da zona equiaxial pela promoção de agitação no líquido. Tais turbulências tendem a produzir um movimento relativo entre as dendritas e o líquido em contato com elas, facilitando os mecanismos de multiplicação cristalina que dependam da presença de correntes convectivas; podendo ser utilizados rotores horizontais ou verticais como pás, rodas dentadas, entre outros (PRONI, 2014);

b) Agitação eletromagnética: promovida no líquido em solidificação pela ação de fortes campos eletromagnéticos. As correntes elétricas induzidas pelo campo promovem uma forte agitação, rompendo a estrutura em formação, estimulando a multiplicação cristalina e sua conseqüente globularização, (VIVÉS, 1992; ZOQUI *et al.*, 2002; TORRES, 2013). Os benefícios de se utilizar a agitação eletromagnética são principalmente por não haver possibilidades de contaminação pelo contato físico entre o agitador e o metal, pelo baixo consumo de energia elétrica, pela facilidade de ajustar a taxa de resfriamento e por permitir a fundição contínua (FELTRIN, 2004);

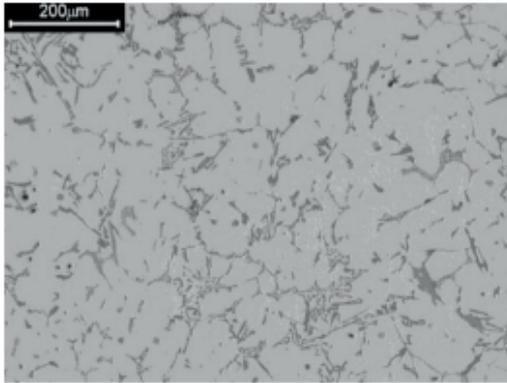
c) Deformação por extrusão em canal angular: A deformação por extrusão em canal angular (ECAP) tem sido usada para impor grandes deformações e produzir refino microestrutural em materiais metálicos. Nesse processo a amostra é pressionada contra uma matriz que possui canais de mesma seção transversal e que se encontram segundo um ângulo Φ , normalmente de 90° ou 120° . Essa configuração de canais faz com que o material que passe por eles seja deformado por cisalhamento simples sem que sua seção transversal seja significativamente alterada (SEGAL, 1995). Quando uma matéria-prima dendrítica é deformada, os grãos são encruados e energia de deformação é armazenada. Durante o reaquecimento ao estado semissólido, a energia é liberada durante a recuperação e, posteriormente, com a recristalização. Como a recristalização envolve a nucleação e crescimento de um arranjo totalmente novo de cristais, estes já possuem uma morfologia globular. Os primeiros trabalhos sobre o uso do processo ECAP para produção de matéria-prima semissólida foram de Ashouri (2008), analisando o efeito do processo no tamanho e morfologia das partículas no estado semissólido da liga A356;

d) Refino de grãos por ultrassom: vibrações ultrassônicas em aplicações metalúrgicas podem ser datadas antes de 1878 quando Chernov propôs a idéia original de aprimorar a qualidade de metais fundidos por meio de oscilações elásticas (ESKIN, 1995; 1998; 2001; 2016; BEIL, 2015). O funcionamento do tratamento por ultrassom consiste essencialmente na aplicação de ondas acústicas na faixa de frequências de 17 a 20 kHz ao metal fundido, de modo a provocar cavitações e misturar o metal fundido (ZHANG *et al.*, 2011). Essa propagação de ondas ocasiona o fenômeno conhecido como cavitação, ocorrendo o refinamento de grãos através da quebra dos braços dendríticos e nucleando um novo grão (GABATUHULER, 1992; ESKIN, 1998; ABRAMOV, 1994; ZHANG *et al.*, 2011).

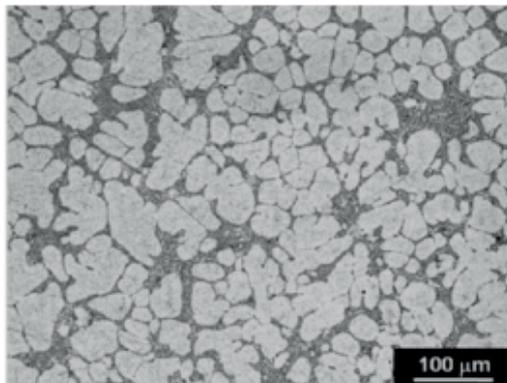
A Figura 4 apresenta as microestruturas obtidas pelas rotas de processamento

discutidas anteriormente, pode-se observar que em todas as rotas, o material reauecido à temperatura semissólida apresenta-se com uma morfologia globular, evidenciando os mecanismos de engrossamento de *ostwald ripening* e coalescência.

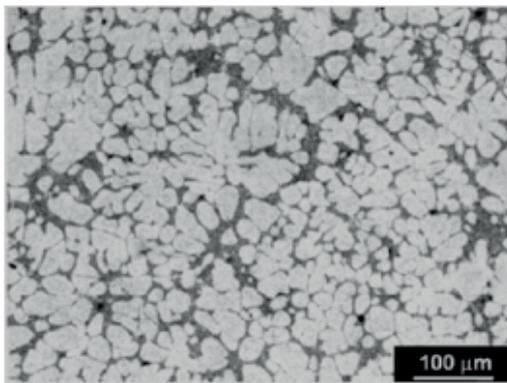
Matéria-prima Processada



(a)

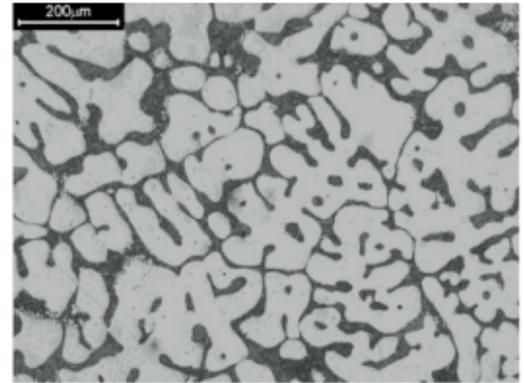


(c)

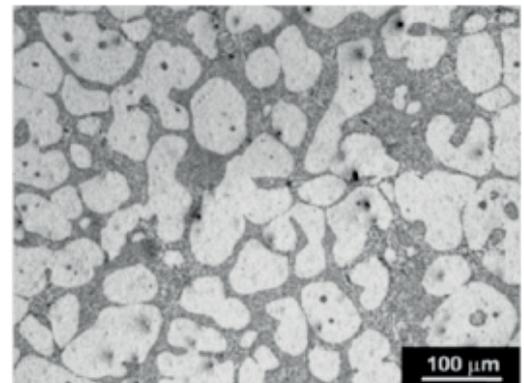


(e)

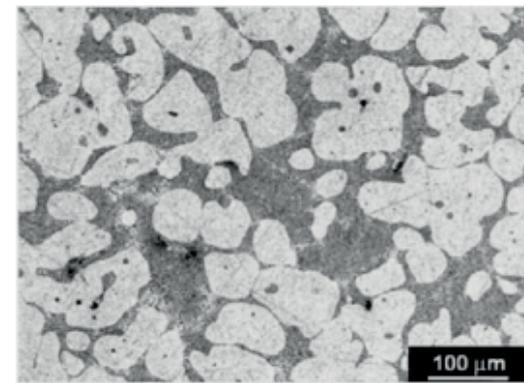
Matéria-prima reauecida



(b)



(d)



(f)

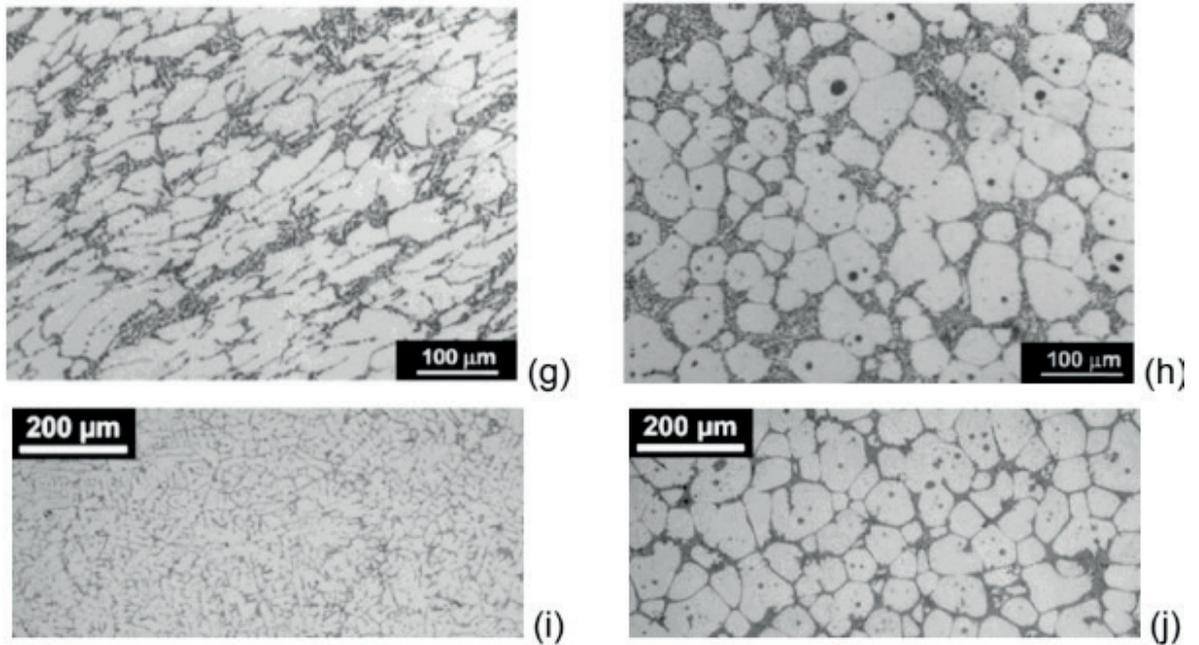


Figura 4 - Microestruturas obtidas pelas diversas rotas de processamento: (a, b) liga Al7Si2.6Cu (similar à liga A356) processada via refino de grãos reaquecida à temperatura semissólida de 580 °C (BENATI *et al.*, 2014), (c, d) liga A356 processada via agitação mecânica, (e, f) liga A356 processada via agitação eletromagnética, (g, h) liga A356 processada via ECAP reaquecidas à temperatura semissólida de 580 °C (CAMPOS *et al.*, 2013) e (i, j) liga A355 processada via refino de grãos por ultrassom reaquecida à temperatura semissólida de 595 °C (DE PAULA *et al.*, 2018).

3 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho oferece uma revisão sobre a tecnologia de processamento de ligas metálicas no estado semissólido e apresenta algumas considerações:

a) A tecnologia semissólida pode ser dividida em dois grupos: reofundição (transição do estado líquido para o estado sólido) e tixoconformação (transição do estado sólido para o estado líquido);

b) Maior eficiência energética, alta produtividade, melhoria da qualidade dos produtos, maior vida útil dos moldes, microestruturas finas e homogêneas com propriedades melhoradas, geometrias mais complexas e produção de peças na condição *near-net-shape* são alguns dos benefícios proporcionados pela tecnologia semissólida;

c) A estrutura semissólida ideal será a que apresentar os menores tamanhos de grãos, mais homogêneos e mais globulares;

d) Diversas rotas de produção da matéria-prima semissólida foram desenvolvidas ao longo dos últimos anos, sempre com o intuito de promover o refinamento de grãos dos materiais e conseqüentemente proporcionar uma microestrutura fina e uniforme.

4 | AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - DEMM/FEM/UNICAMP e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP, campus Bragança Paulista.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio**. Disponível em <www.abal.org.br>. Acesso em: 12 fevereiro de 2019.

ABRAMOV, O. V. **Ultrasound in liquid and solid Metals**, Boca Raton, FL: CRC Press, 1994.

ASHOURI, S. **Semi-solid microstructure evolution during reheating of aluminum A356 alloy deformed severely by ECAP**, Journal of Alloys and Compounds, v.466, p.67-72, 2008.

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

BEIL, W. L. **Projeto e montagem de um sistema para lingotamento contínuo sob agitação eletromagnética para ligas de Al-Si**, 2015, 106p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BENATI, D. M.; ZOQUI, E. J. **Effect of silicon on the thixoformability of Al-Si-Cu alloys**, Journal of Materials Engineering and Performance, v.23(9), p.3165-3179, 2014.

CHIARMETTA, G. **Thixoforming of automobile componentes**, In: Proceedings of the 4th International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, p.204-207, 1996.

CHIARMETTA, G. **Why Thixo?**, In: Proceedings of the 6th International Conference on the Semisolid Processing of Alloys and Composites, Turin, p.15-21, 2000.

CAMPO, K. N.; PRONI, C. T. W.; ZOQUI, E. J. **Influence of the processing route on the microstructure of aluminum alloy A356 for thixoforming**, Materials Characterization, v.85, p.26-37, 2013.

DE PAULA, L. C; TOKITA, S.; KADOI, K.; INOUE, H. ZOQUI, E. J. **Analysis of the 355 aluminium alloy microstructure for application in thixoforming**, Solid State Phenomena, v.285, p.277-282, 2018.

ESKIN, G. I. **Cavitation mechanism of ultrasonic melt degassing**, Ultrasonics Sonochemistry, v.2(2), p.S137-S141, 1995.

ESKIN, G. I. **Ultrasonic treatment of light alloy melts**, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 1998.

ESKIN, G. I. **Broad prospects for commercial application of the ultrasonic (cavitation) melt treatment of light alloys**, Ultrasonics Sonochemistry, v.8(3), p.319-325, 2001.

ESKIN, D. G. **Ultrasonic processing of molten and solidifying aluminium alloys: overview and outlook**, Materials Science and Technology, p.636-645, 2016.

FELTRIN, J. V. **Obtenção e caracterização de estruturas reofundidas e tixofundidas da liga de alumínio AA7075**, 2004, 135p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

GABATUHULER, J. P. **Evaluation of various processes for the production of billets with thixotropic properties**, In: Proceedings of the 2th International Conference on the Semisolid Processing of Alloys and Composites. Massachusetts, p.33-46, 1992.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**, Campinas, Editora da UNICAMP, 2001. 399p.

GENDA, G.; YUYON, C.; GEING, A. **Mechanism of coarsening of dendrite during solidification**, In: Proceedings of the Solidification Processing Conference, Sheffield, p.416-419, 1987.

JOLY, P. A.; MEHRANBIAN, R. **The rheology of a partially solid alloy**, Journal of Materials Science, v.11, p.1393-1418, 1976.

KAHLWEIT, M. **On the ageing of dendrites**, Scripta Metallurgica, v.2, p.251-254, 1968.

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

KATTAMIS, T. Z.; COUGHIN, J. L.; FLEMINGS, M. C. **Influence of coarsening on dendritic arm spacing of Al-Cu alloys**, Transactions of the Metallurgical Society of AIME, v.239, p.1504-1511, 1967.

KEARNEY, A.; ROOY, E. L. **Aluminum foundry products**, In: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-purpose Materials, ASM Handbook, v.2, p.484-568, 1992.

KIRKWOOD, M. C. **Semi-solid metal processing**, International Materials Reviews, v.39, p.173-189, 1994.

LASHKARI, O.; GHOMASHCHI, R. **The implication of rheology in semi-solid metal processes: An overview**, Journal of Materials Processing Technology, v.182, p.229-240, 2007.

MILLER, W. S.; ZHUANG, L.; BOTTEMAETAL, J. **Recent development in aluminium alloys for the automotive industry**, Materials Science & Engineering A, v.280, n.1, p.37-49, 2000.

NADCA. **North America Die casting Association**. Disponível em <<http://www.diecasting.org>>. Acesso em 30 de novembro de 2008.

PAES, M. **Otimização de processo de obtenção de reofundidos da liga A356 por agitação eletromagnética**, 2000, 97p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PAES, M. **Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg para tixoconformação**, 2004, 154p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PRONI, C. T. W. **Efeito da taxa de aquecimento no desmantelamento e na globularização da microestrutura para propiciar a tixoconformação**, 2014, 202p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SEGAL, V. M. **Materials processing by simple shear**, Materials Science and Engineering A, v.197,

p.157-164, 1995.

SPENCER, D. B.; MEHRABIAN, R.; FLEMINGS, M. C. **Rheological behavior of Sn-15%Pb in the crystallization range**, Metallurgical Transactions, v.3, p.1925-1932, 1972.

TORRES, L. V. **Tixotomização de novas ligas Al-Si-Cu**, 2013, 226p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

VIVÉS, C. **Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting processes**, Metallurgical Transactions, v.23B, p.189-206, 1992.

YOUNG, K. **Semi-solid metal forming alloy and composites**, In: Proceedings of The Minerals, Metals and Materials Society Symposium on Nature and Properties of Semi-Solid Materials. San Diego, p.245-266, 1992.

ZHANG, L.; ESKIN, D. G.; KATGERMAN, L. **Influence of ultrasonic melt treatment on the formation of primary intermetallics and related grain refinement in aluminum alloys**, Journal of Materials Science, v.46(15), p.5252-5259, 2011.

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

ZOQUI, E. J.; PAES, M.; ES-SADIQ, E. **Macro and microstructure analysis of SSM A356 produced by electromagnetic stirring**, Journal of Materials Processing Technology, v.120, p.365-373, 2002.

SOBRE OS ORGANIZADORES

Henrique Ajuz Holzmann - Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

Ricardo Vinicius Bubna Biscaia - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutorando em Engenharia de Produção pela UTFPR. Trabalha com os temas: análise microestrutural e de microdureza de ferramentas de usinagem, modelo de referência e processo de desenvolvimento de produto e gestão da manutenção.

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-235-7



9 788572 472357