

CRYSTOPHER CARDOSO DE BRITO

Influência da Pressão na Modificação Estrutural e Propriedades
Mecânicas da liga Al-7%Mg Obtida Através do Processo Squeeze
Casting

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Faculdade de
Engenharia de Materiais como requisito
parcial para obtenção do título de
Engenheiro de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Alves de Siqueira

MARABÁ-PA
2009

CRYSTOPHER CARDOSO DE BRITO

Influência da Pressão na Modificação Estrutural e Propriedades
Mecânicas da liga Al-7%Mg Obtida Através do Processo Squeeze
Casting

Trabalho de conclusão de curso
apresentado a Faculdade de
Engenharia de Materiais como
requisito parcial para obtenção do título
de Engenheiro de Materiais.

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cláudio Alves de Siqueira Filho - Orientador
FEMAT / UFPA

Prof. Dr. Elias Fagury Neto
FEMAT / UFPA

Prof. M.Sc. Clesianu Rodrigues de Lima
FACEN / UFPA

DEDICATÓRIA

Para chegar onde estou hoje sempre contei com a colaboração e ajuda da minha FAMÍLIA – José Miranda de Brito e Leila Maria Cardoso de Brito, meus pais. E minha irmã Cynthia. Também devo muito a uma nova personagem que a pouco mais de dois anos faz parte da minha vida, minha namorada Talita. E é a estas pessoas, a quem amo muito, que dedico este trabalho. E em especial dedico à minha mãe que em várias etapas da sua vida abriu mão dos seus merecidos momentos de descanso para que eu pudesse está aqui hoje, num dia muito importante para todos nós.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela sabedoria e saúde, virtudes que sempre pedi a ele, e que nunca me foram negadas. Agradeço também a meus pais Miranda e Leila, pelo amor e compreensão nos momentos em que estive distante. À minha irmã pelo carinho e força.

À Talita Almeida Vida, pessoa que esteve sempre comigo nestes últimos anos, obrigado pelo amor, amizade, carinho e dedicação.

Agradeço também ao meu Mestre Professor Dr. Cláudio Alves Siqueira, pelas oportunidades, confiança e ensinamentos.

Ao Professor André Luis Costa pelos anos de coordenação a frente da FEMAT e pelo excelente Mestre que foi aos alunos da Turma de Materiais 2005.

Aos meus avôs José Cardoso e Maria Cardoso, que sempre me ajudaram quando precisei.

À Universidade Federal do Pará – Faculdade de Engenharia de Materiais, pela minha formação em Engenheiro de Materiais.

Ao CNPq, PIBIC e PROINT pelas bolsas de Iniciação Científica.

Aos colegas do Grupo Prometal, na pessoa de Fabrício Dias Magalhães, pela ajuda, força e companheirismo.

Aos meus amigos: Flaviano, Kerlon, Renan e Marcelo, pela amizade e pelas incansáveis horas de estudos que compartilhamos juntos.

E por fim a todos que alguma forma contribuiu para minha formação.

*“Aqueles que sonham de dia sabem
muito mais coisas que fogem a quem
sonha somente à noite”*

Edgar Allan Poe

RESUMO

O processo Squeeze Casting é um processo inovador dentro dos processos de fundição, no qual o metal vazado no estado líquido é solidificado sob pressão dentro de uma coquilha metálica fechada por um punção. “Sound Casting” é a designação dada às peças fundidas de boa qualidade. Uma desvantagem dos processos convencionais de fundição é a formação de bolhas, porosidades, defeitos de Schinkage e macrossegregação que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas dos produtos fundidos. Desta forma, o presente trabalho buscou analisar a influência da pressão na modificação estrutural de três ligas binárias hipoeutéticas do sistema Al-Mg, solidificando o metal líquido sob pressões de: 10, 20, 40, 80 e 120 MPa, além de solidificação sem pressão. A partir dos dados obtidos neste trabalho foi possível elaborar um gráfico experimental que permite prevê a macroestrutura para ligas do sistema binário Al-Mg obtidas a partir do processo Squeeze Casting. Pôde-se observar que houve uma grande influência da pressão sobre a microestrutura dos lingotes reduzindo em torno de 50% os valores do Espaçamento Dendritico Secundário (EDS) entre os lingotes obtidos para as pressões de 120 MPa e a condição sem pressão. Respectivamente para as pressões citadas acima obtiveram-se os seguintes valores do EDS: 18,06 μm , 16,20 μm , 16,19 μm , 16,18 μm , 15,46 μm e 33,46 μm . Posteriormente os resultados da modificação estrutural foram correlacionados com valores obtidos para a densidade, Limite de Resistência a Tração e Microdureza.

Palavras Chaves: Squeeze Casting, Modificação Estrutural, Liga Al-Mg.

ABSTRACT

The Squeeze Casting process is an innovative process within the process of casting, in which the cast metal in the liquid is solidified under pressure within a closed metal ingot by a punch. "Sound Casting" is the name given to the castings of good quality. A disadvantage of conventional casting processes is the formation of bubbles, porosity, shrinkage defects and macrosegregations that directly influence the mechanical properties of cast products. Thus, this study looked for to analyze the influence of pressure on the structural change of three binary alloys Al-Mg system in low compositions, the liquid metal solidified under pressure of: 10, 20, 40, 80 and 120 MPa, and solidification without pressure. From the data obtained in this work could produce a chart that allows trial provides for the macrostructure of the binary alloys Al-Mg obtained from Squeeze Casting process. It was noted that there was a large influence of pressure on the microstructure of parts reducing around 50% the values of Dendritic Spacing Secondary (DAS) between the ingots obtained for pressures of 120 MPa and the condition without pressure. Respectively to the pressures mentioned above were obtained the following values of the DAS: 18.06 μm , 16.20 μm , 16.19 μm , 16.18 μm , 15.46 μm and 33.46 μm . Subsequently the results of structural changes were correlated with values obtained for the Density, Ultimate Limit of Tensile and Microhardness.

Keywords: Squeeze Casting, Structural Modification, Al-Mg Alloys.

LISTA DE FIGURAS

1.	Figura 2.1 – Esquema do processo squeeze casting: (a) fusão do metal, pré-aquecimento e lubrificação, (b) vazamento na coquilha, (c) solidificação do metal sob pressão, (d) ejeção da peça, limpeza da coquilha e recarga.....	17
2.	Figura 2.2 – Tipos de fundição sob pressão: (a) direta e (b) indireta.....	19
3.	Figura 2.3 – Classificação dos tipos de fundição sob pressão levando-se em conta a geometria da peça: (a) direta, (b) com extrusão e (c) indireta [FERREIRA, 1999].....	19
4.	Figura 2.4 – Desvio das condições de equilíbrio no diagrama de fase Mg-Al devido à pressão aplicada [HU, 1998].....	22
5.	Figura 2.5 – Diagrama de fase Al-Si modificado devido à pressão aplicada [GHOMASHCHI e VIKHROV, 1998].....	23
6.	Figura 2.6 – Representação esquemática das diferentes zonas macroestruturais.....	26
7.	Figura 2.7 – Efeito da pressão na densidade da liga LM13 obtida por squeeze casting [MALEKI et. al. 2006].....	27
8.	Figura 3.1 – Fluxograma do Procedimento Experimental.....	32
9.	Figura 3.2 – (a) Cadinho de carbetto de silício, (b) Forno elétrico utilizado na fusão das ligas e (c) Balança digital utilizada para pesagem dos materiais para obtenção das ligas.....	34
10.	Figura 3.3 – (a) Termopar acoplado a um plug-conector ; (b) Sistema de aquisição de dados e, (c) Software utilizado no registro das temperaturas envolvidas nos experimentos.....	35
11.	Figura 3.4 – (a) Lingoteira de aço 1045 (esquerda) e, (b) Prensa hidráulica semi-automática.....	35
12.	Figura 3.5 – (a) Microscópio óptico com interface digital; (b) Microduromêtro e, (c) Máquina Universal de Ensaios mecânicos.....	36
13.	Figura 3.6 – Diagrama de Fases Al-Mg [KANICKI, 1988].....	37
14.	Figura 3.7 - Curva de resfriamento utilizada para quantificar a liga Al-7%Mg.....	39

15.	Figura 3.8 – Posicionamento dos termopares para obtenção das temperaturas.....	40
16.	Figura 3.9 – a) Vazamento do metal e b) aplicação da pressão.....	40
17.	Figura 3.10 – Exemplo da amostra utilizada para a realização das análises experimentais.....	41
18.	Figura 3.11 – Equipamento de eletropolimento e ataque eletrolítico.....	42
19.	Figura 3.12 - Dimensões proporcionais do pino de leitura do teste de tração recomendado pela norma ASTM - E 8M – 03. Métrico, 2001. Em destaque, no quadrado, o utilizado no procedimento deste trabalho.....	43
20.	Figura 3.13 – Corpos de prova de ensaio de tração.....	43
21.	Figura 3.14 – Esquema para realização do Ensaio de Microdureza.....	44
22.	Figura 4.1 – Macroestrutura da liga Al-5%Mg: a) sem pressão; b) 40 MPa; c) 80 MPa; d) 120 MPa. Ataque de Keller's. Aumento de 1/2X.....	46
23.	Figura 4.2 – Macroestrutura da liga Al-7%Mg: a) sem pressão; b)10 MPa; c) 20 MP; d) 40 MPa; e) 80 MPa e f)120 MPa. Ataque de Keller's. Aumento de 1/2X.....	48
24.	Figura 4.3 – Macroestrutura da liga Al-10%Mg: a) sem pressão; b) 40 MPa; c) 80 MPa; d) 120 MPa. Ataque de Keller's. Aumento de 1/2X.....	50
25.	Figura 4.4 – Gráfico Efeito da pressão na macroestrutura das do sistema Al-Mg.....	51
26.	Figura 4.5 – Microestrutura da liga Al-7%Mg: a) pressão ambiente EDS = 33,46 μm . Aumento 200X, ataque eletrolítico.....	52
27.	Figura 4.6 – Microestrutura da liga Al-7%Mg: a) 10 MPa EDS = 18,065 μm , b) 20 MPa EDS = 16,2 μm . Aumento 200X, ataque eletrolítico.....	53
28.	Figura 4.7 – Microestrutura da liga Al-7%Mg: a) 40 MPa EDS = 16,19 μm , b) 80 MPa EDS = 16,18 μm e c) 120 MPa EDS = 15,46 μm . Aumento 200X, ataque eletrolítico.....	54
29.	Figura 4.8 – Gráfico do EDS em função da pressão para a liga Al-7%Mg.....	55
30.	Figura 4.9 – Gráfico do Limite de Resistência a Tração em função da pressão para a liga Al-7%Mg.....	57

LISTA DE TABELAS

1. Tabela 2.1. Tensão de ruptura para a liga AA-6061 fundida por squeeze casting [SKOLIANOS et. al. 1997].....	28
3. Tabela 3.1 – Quantidades dos elementos das ligas do sistema Al-Mg.....	38
4. Tabela 3.2 – Propriedades físico-químicas e mecânicas para ligas do sistema Al-Mg [NUNES, 1990].....	38
5. Tabela 4.1 – Espaçamento Dendritico Secundário em função da Pressão.....	54
6. Tabela 4.2 – Densidade em função da pressão.....	56
7. Tabela 4.4 – Microdureza Vickers em função da pressão.....	58
8. Tabela 4.5 – Taxa de Resfriamento em função da pressão.....	59

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

UFPA	- Universidade Federal do Pará
Al	- Alumínio
Mg	- Magnésio
Si	- Silício
Cu	- Cobre
Zn	- Zinco
°C	- Grau Celsius
cm ⁻³	- Centímetros cúbicos
µm	- Micrômetro
%	- Percentual
T_m^o	- Temperatura de solidificação à pressão de referência
T_m^p	- Temperatura de solidificação à pressão aplicada
P_o	- Pressão de referência
P	- Pressão aplicada
ΔV	- Variação de volume
V	- Volume
H_f	- Entalpia do Material
T_L	- Linha liquidus
T_S	- Linha solidus
LRT	- Limite de resistência a tração
HV	- Microdureza Vickers
HB	- Dureza Brinell
d	- Densidade
C	- Concentração
EDS	- Espaçamento Dendritico Secundário
s	- segundos
mm	- Milímetro
g	- Grama
MPa	- Mega Pascal
ASTM	- American Society for Testing and Materials

SUMÁRIO

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS.....	16
1.1.1. Objetivo Geral	16
1.1.2. Objetivos Específicos	16

CAPITULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1. O PROCESSO SQUEEZE CASTING.....	17
2.2. PARÂMETROS DO PROCESSO.....	20
2.2.1. Pressão aplicada	21
2.2.2. Temperatura das ferramentas	23
2.2.3. Temperatura de vazamento	24
2.2.4. Tempo	24
2.2.5. Lubrificação	25
2.3. MACROESTRUTURA.....	25
2.4. MICROESTRUTURA.....	27
2.5. LIGAS DO SISTEMA Al-Mg.....	29
2.6. DEFEITOS E MÉTODOS DE PREVENÇÃO.....	30
2.6. CAPACIDADE DE PRODUÇÃO.....	31

CAPITULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1. ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	32
3.2. APARATO EXPERIMENTAL DE USO COMUM.....	33
3.3. MATERIAL UTILIZADO.....	36
3.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38
3.5. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL E PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	41

CAPITULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 RESULTADOS.....	
4.1.1. Macroestrutura	45
4.1.1.1. <i>Macroestrutura da liga Al-5%Mg</i>	45
4.1.1.2. <i>Macroestrutura da liga Al-7%Mg</i>	46
4.1.1.3. <i>Macroestrutura da liga Al-10%Mg</i>	49

4.1.2. Microestrutura.....	51
4.1.3. Densidade.....	55
4.1.4. Limite de Resistência A Tração (LRT).....	56
4.1.4. Microdureza.....	57
4.2. DISCUSSÕES.....	58
CAPITULO V	
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	62
5.1. CONCLUSÕES.....	62
5.1.1. Aspectos Morfológicos.....	62
5.1.2. Microestruturas.....	63
5.1.3. Densidade.....	63
5.1.4. Limite de Resistência a Tração e Microdureza.....	63
5.1.5. Taxa de Resfriamento.....	63
5.2. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65