



# INFLUÊNCIA DA PRESSÃO NA MODIFICAÇÃO ESTRUTURAL E PROPRIEDADE MECÂNICA DA LIGA Al-5%Mg PRODUZIDAS PELO PROCESSO SQUEEZE CASTING<sup>1</sup>

Christopher Cardoso de Brito<sup>2</sup>

Fabício Dias Magalhães<sup>3</sup>

André Luiz de Moraes Costa<sup>4</sup>

Cláudio Siqueira Filho<sup>5</sup>

## 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. 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 da liga hipoeutética Al-5%Mg, solidificando o metal líquido sob pressões de: 10, 20, 40, 80 e 120 MPa, além de solidificação sem pressão. Pôde-se observar uma grande influência da pressão sobre a microestrutura dos lingotes da liga Al-5%Mg, reduzindo-se 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. Posteriormente os resultados da modificação microestrutural foram correlacionados com valores obtidos para o Limite de Resistência a Tração.

**Palavras-chave:** *Squeeze casting*; Modificação microestrutural; Propriedades mecânicas; Liga Al-5%Mg.

## INFLUENCE OF PRESSURE CHANGES IN STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTY OF THE Al-5%Mg ALLOY PRODUCED BY THE PROCESS SQUEEZE CASTING

### Abstract

The Squeeze Casting process is an innovative process within the processes of casting, in which the cast metal in liquid state is solidified under pressure within a closed metallic permanent mold by a puncture. A disadvantage of conventional casting processes is the formation of bubbles, pores, defects Schinkage and macrosegregation that directly influence the mechanical properties of cast products. Thus, the present study was to examine the influence of pressure on the structural modification of hipoeutéticas alloy Al-5% Mg, solidifying the liquid metal at pressures of 10, 20, 40, 80 and 120 MPa, and without application of pressure. It was observed an influence of pressure on the microstructure of the ingots of the Al-5% Mg, falling by about 50% of the values of the Spacing Secondary Dendritic (SDS) between the ingots obtained for pressures of 120 MPa and condition without pressure. Subsequently the results of structural change were correlated with values obtained for the Tensile Strength.

**Key words:** Squeeze casting; Microstructural modification; Mechanical Properties; Alloy Al-5%Mg.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. [christopher\\_engmat@yahoo.com.br](mailto:christopher_engmat@yahoo.com.br)

<sup>3</sup> Aluno de Graduação, Universidade Federal do Pará – UFPA. [fabricao742@hotmail.com](mailto:fabricao742@hotmail.com)

<sup>4</sup> Professor Doutor, Universidade Federal de Sergipe – UFS. [andrekosta@bol.com.br](mailto:andrekosta@bol.com.br)

<sup>5</sup> Professor Doutor, Universidade Federal da Paraíba – UFPB. [siqueira@ct.ufpb.br](mailto:siqueira@ct.ufpb.br)

## 1 INTRODUÇÃO

A fundição é um dos mais antigos e o mais versátil processo de fabricação de componentes metálicos. Os diversos processos de fundição permitem produzir desde milhões de peças de pequeno tamanho até poucas peças pesando várias toneladas. Em 1981 a *American Foundrymen's Society* listou 38 diferentes métodos de fundição.<sup>(1)</sup> os quais se agrupam em cinco categorias principais; uma dessas categorias sendo a dos processos inovadores de moldagem e fundição. Uma grande desvantagem dos processos convencionais em relação ao processo com aplicação de altas pressões (*squeeze casting*) é a formação de inúmeros defeitos, como bolhas de gás (defeitos de shrinkage), porosidades e macrossegregações, os quais influenciam de forma significativa nas propriedades mecânicas, integridade e rentabilidade do produto final. Esse processo vem sendo bastante utilizado em ligas de alumínio na indústria automobilística, pois, oferece ao produto final excelente propriedades mecânica tais como ductilidade e tenacidade à fratura,<sup>(2)</sup> o processo tenta combinar as vantagens das tecnologias de fundição e forjamento: a pressão aplicada e o contato instantâneo do metal líquido com a superfície do molde gera uma condição de rápida transferência de calor e produz peças livres de poros e de granulação fina.<sup>(3)</sup> Estas peças têm propriedades mecânicas próximas daquelas de um produto forjado combinadas com as formas e o baixo custo das peças fundidas.<sup>(4,5)</sup> O baixo custo do processo é um fator importante do ponto de vista industrial, além de possibilitar a automatização da produção.<sup>(6)</sup>

Segundo Maleki,<sup>(7)</sup> a aplicação da pressão diminuiu a quantidade de defeitos de fundição presentes nos lingotes obtidos por Squeeze Casting. Hajjari<sup>(8)</sup> mostrou que o processo Squeeze Casting aplicado à liga 2024 (liga de Al-Cu) diminuí os valores dos Espaçamentos Dendriticos Secundários, aumentando dessa forma a extração de calor. Neste sentido, este trabalho pretende avançar na direção de uma maior compreensão do processo de fundição sobre pressão *Squeeze casting* aplicado a liga de Al-Mg, bem como dos parâmetros operacionais de solidificação e suas influências sobre a estrutura do material fundido. Através da fundição sob pressão, será avaliado o comportamento macro e microestrutural da liga Al-7%Mg, solidificada em diferentes condições operacionais.<sup>(9-10)</sup>

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Material

O material utilizado neste estudo foi a uma liga de alumínio 5% em massa de magnésio. Esta liga atinge o máximo das suas propriedades mecânicas usando-se apenas conformação plástica, não sendo necessário dessa forma o uso de tratamento térmico. A liga Al-5%Mg geralmente é usada na fabricação de tanque para laticínios e no envasamento de alimentos; na confecção de acessórios para produtos químicos e onde requer excelente resistência a corrosão química.

A liga foi obtida por fundição, onde o alumínio foi submetido a uma temperatura de 750°C por 2,5 horas, em seguida foi adicionado o magnésio, a composição da liga foi determinada em função de seu diagrama de fases e confirmada através de análise química, bem como utilização de sua curva de resfriamento, obtida com o auxílio de um registrador de temperatura de seis canais com interface digital, posteriormente as curvas foram comparadas com a *temperatura liquidus* da liga em relação ao diagrama de fases Al-Mg.

## 2.2 Parâmetros do Processo

Para a realização do experimento utilizou-se uma lingoteira de aço ASTM1045 com as seguintes dimensões: diâmetro externo 115 mm, diâmetro interno 55 mm e altura 145 mm, conforme mostra a Figura 1. A lingoteira foi pré aquecida a uma temperatura de 300°C, o metal liquido foi vazado a 720°C, para o punção adotou-se 90°C de temperatura. O tempo de pressão aplicado logo a após o vazamento do metal na lingoteira foi de 30 s. As pressões aplicadas foram de: 10 MPa, 20 MPa, 40 MPa, 80 MPa e 120 MPa, além de solidificação sem pressão. O efeito da aplicação da pressão e a variação estrutural da liga foram investigados.

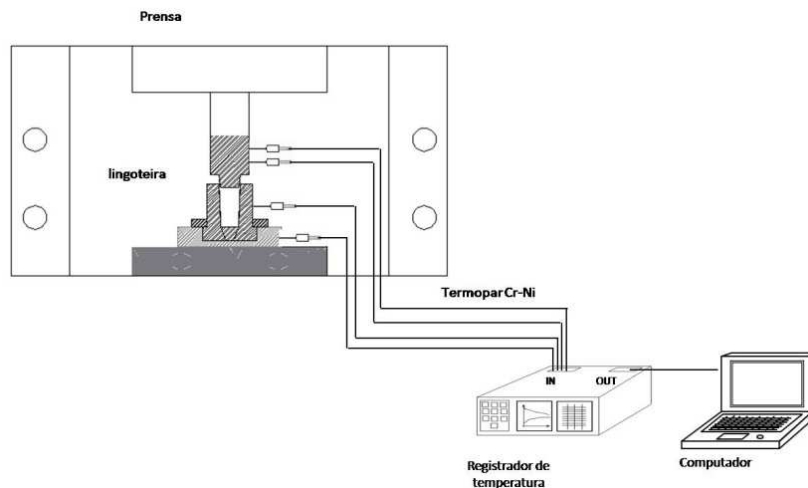


Figura 1. Layout da lingoteira usada na pesquisa.

## 2.3 Análises Microestrutural e Ensaio de Tração

As microestruturas foram obtidas de um região 15 mm abaixo da interface metal/punção nos lingotes. As amostras foram lixadas até a granulométrica de 1.200 mesh, em seguida realizados os procedimentos de polimento e ataque eletrolítico. As imagens das microestruturas foram capturadas através de microscópio ótico com software de análise de imagens e os Espaçamentos Dendritico Secundários medidos.

Os resultados para o Limite de Resistência a Tração foram determinados a partir do ensaio de tração usando uma Máquina de Ensaio Mecânicos Universal.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Macro e Microestruturas

#### 3.1.1 Macroestrutura

A Figura 2 apresenta as macroestruturas para a liga Al-5%Mg confeccionada através do processo Squeeze Casting, sob as condições de pressões: sem pressão, 40 MPa, 80 MPa e 120 MPa.

Pôde-se verificar a predominância de grão equiaxiais em todos os lingotes, para o lingote sem pressão observou-se a presença de grãos maiores, e à medida que se aumentou a pressão houve refinamento no tamanho dos grãos equiaxiais.

A Figura 2a mostra a macroestrutura para o lingote sem pressão, onde a extração de calor ocorreu de forma radial pelas paredes e fundo da lingoteira, e no



topo pelo ambiente. Observou-se a presença de grãos equiaxiais grosseiros. Para a pressão de 40 MPa obteve-se lingotes sem defeitos de fundição, como pode ser visto na Figura 2b, além de apresentar grão equiaxiais relativamente grosseiros. Observou-se que a aplicação de 40 MPa pressão eliminou os defeitos de Shrinkage em virtude da maior força aplicada ao material durante a solidificação, favorecendo uma melhor extração de calor metal/molde.

Para pressões superiores a 80 MPa prevaleceu a formação de grão equiaxiais muito refinados. Na macroestrutura da Figura 2c, para a pressão de 80 MPa, notou-se a presença de alguns pontos de macrosegregação distribuídos pelo lingote. Esta macrosegregação é proveniente do movimento de líquido ou sólido, e que provoca a formação de uma composição química que se difere da composição média.<sup>(6)</sup> No processo Squeeze Casting este movimento pode ser ocasionado pela deformação da fase solidificada por ação de tensões térmicas ou pela pressão. Segundo Ferreira,<sup>(2)</sup> a macrosegregação pode ser evitada aumentando-se a temperatura da lingoteira ou diminuir o tempo de espera para a aplicação da pressão.

Para a pressão de 120 MPa observou-se uma macroestrutura contendo uma combinação de sound casting (peça sem defeito de fundição) e refino grão. Uma pressão de 120 MPa exerceu para a liga Al-5%Mg uma força extremamente alta, suficiente para eliminar quaisquer vestígios de macrosegregação.

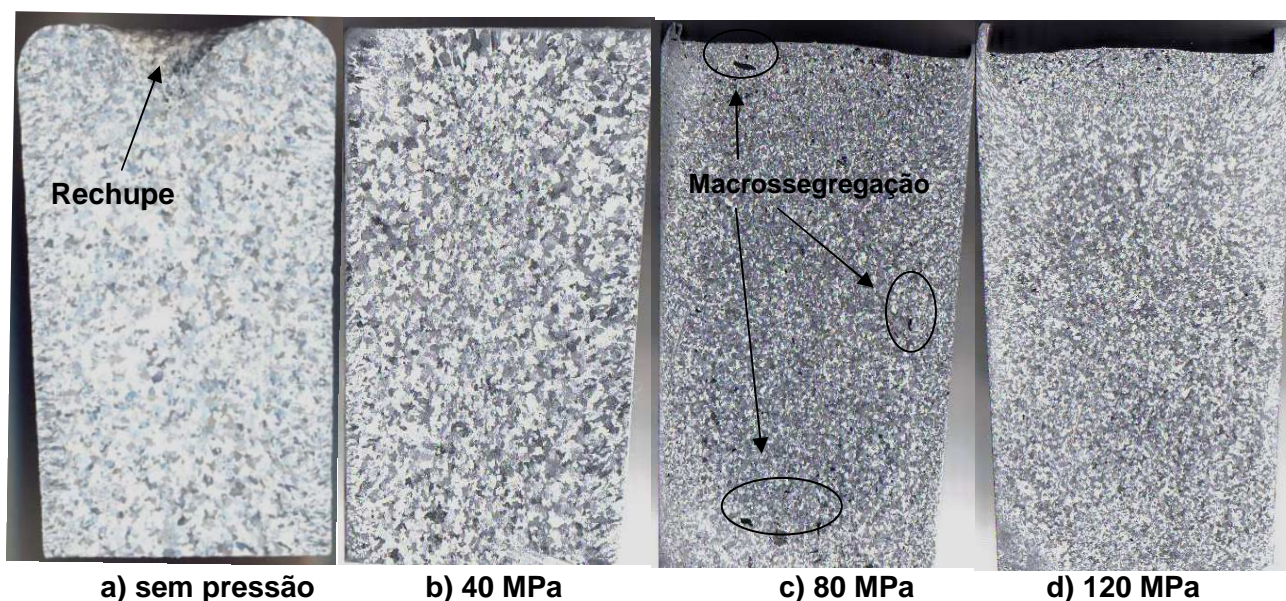


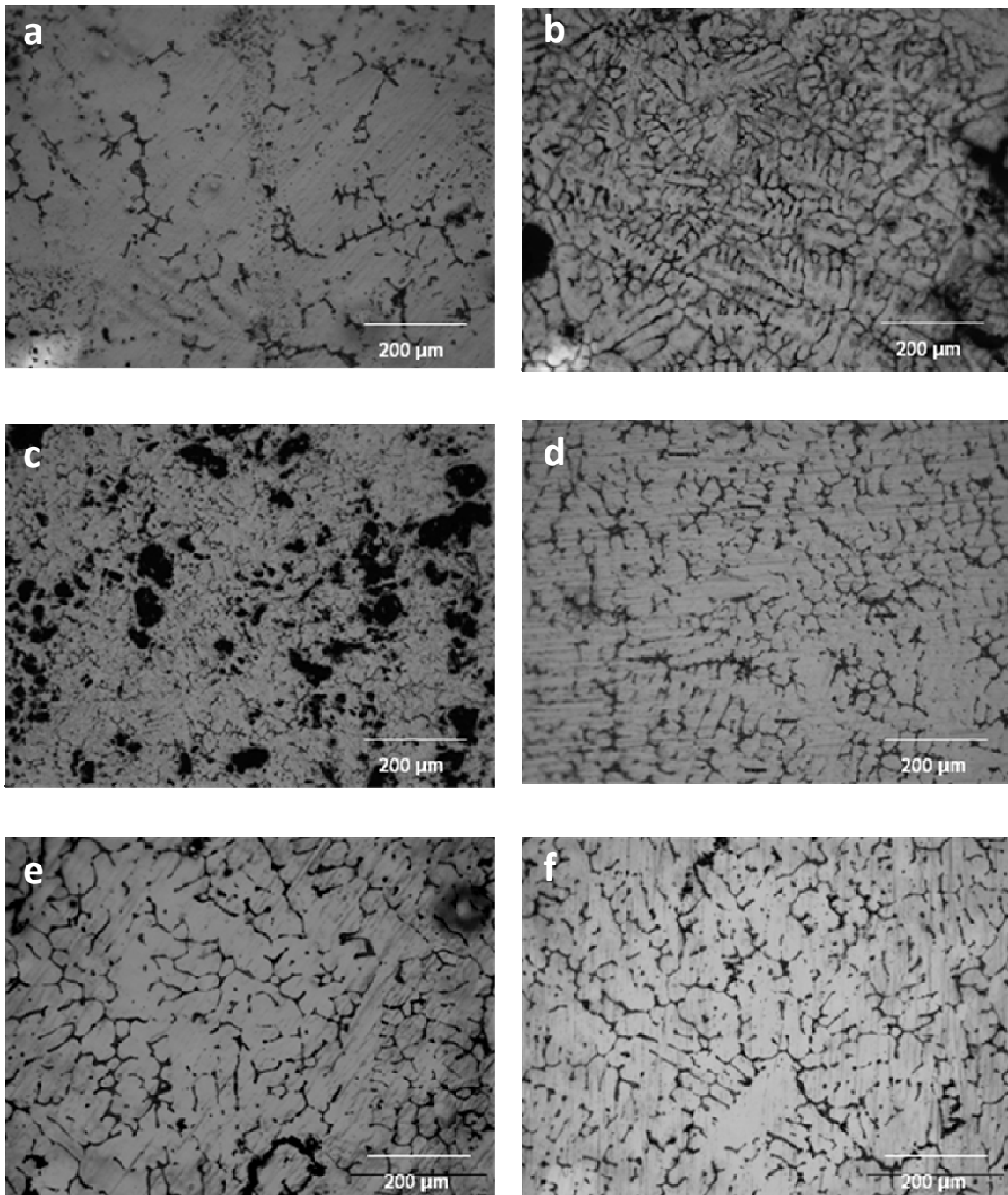
Figura 2. Macroestrutura da liga Al-5%Mg: a) sem pressão; b) 40 MPa; c) 80 MPa; d) 120 MPa. Ataque de Keller's. Aumento de 1/2X.

### 3.1.2 Microestrutura

As análises microestruturais mostraram que a pressão influenciou no refinamento da microestrutura de forma a diminuir o valor do Espaçamento Dendritico Secundário (EDS) à medida que se aumentou a pressão. Nos trabalhos de HAJJARI et al.<sup>(8)</sup> e SKOLIANOS et al.<sup>(11)</sup> é constatada a diminuição do valor do EDS com aumento da pressão, devido á maior extração de calor pelas paredes da lingoteira.

A Figura 3 apresenta as microestruturas para as pressões de 10 MPa, 20 MPa, 40 MPa, 80 MPa, 120 MPa e pressão ambiente. Observa-se que à medida que os

valores da pressão se elevam, os espaçamentos dendríticos secundários tendem a diminuir, bem como as porosidades e macrosegregações.



**Figura 3.** Microestrutura da liga Al-7%Mg: respectivamente pressão ambiente, 10 MPa, 20 MPa, 40 MPa, 80 MPa e 120 MPa. Aumento 200X, ataque eletrolítico.

A aplicação da pressão, mesmo para baixas pressões, contribuiu para a modificação da microestrutura da liga Al-7%Mg como mostrou as Figuras 3a, 3b e 3c, respectivamente: pressão ambiente, 10 MPa e 20 MPa. Pode-se observar o refinamento gradual do EDS com o aumento da pressão. Observa-se ainda que à medida que se aumenta a pressão verifica-se que o gap existente entre o metal e as paredes da lingoteira, diminui, possibilitando uma maior extração de calor na interface metal/molde. Na Figura 3b mostra-se a microestrutura para a pressão de

10 MPa, verifica-se a presença de alguns pontos de porosidades, e mesmo apresentado porosidades houve uma redução de no valor do EDS de 36,74  $\mu\text{m}$  para 26,13  $\mu\text{m}$  entre os lingotes sem pressão de com 10 MPa de pressão. A microestrutura para o lingote com pressão de 20 MPa pode ser observada na Figura 3c, onde pode-se notar a presença de muitos de macrossegregação, e o EDS diminuiu para o valor de 25,66  $\mu\text{m}$ .

Na figura 3d observa-se que, para a pressão de 40 MPa aplicada ocorre uma redução e/ou eliminação dos defeitos de fundição, tais como porosidade, defeitos de Shrinkage e macrossegregação. Condizendo com o resultado da macroestrutura referente à mesma pressão, como foi mostrado na Figura 2b. Para pressões superiores a 40 MPa verificamos a total eliminação dos defeitos de fundição, e conseqüentemente gradual refinamento da microestrutura.

Nas figuras 3e e 3f, respectivamente 80 MPa e 120 MPa, pode-se observar a influencia da pressão do refinamento de grão e conseqüentemente na redução do EDS. Essas pressões apresentaram os menores valores de EDS, correlacionando esses resultados com os trabalhos de Hajjari <sup>(8)</sup> e Skolianos, <sup>(11)</sup> pode-se observar que o aumento da pressão externa aplicada no processo Squeeze Casting diminui os Espaçamentos Dendriticos Secundários para a liga Al-5%Mg.

O gráfico da Figura 4 mostra os valores do Espaçamentos Dendriticos Secundário.

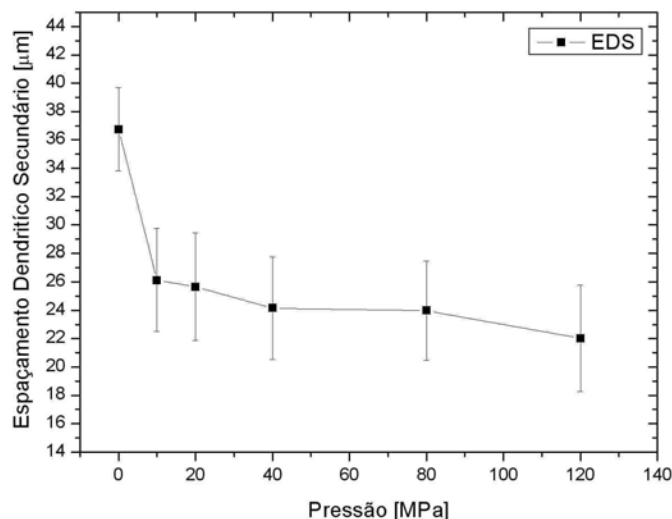


Figura 4. Gráfico do Espaçamento Dendritico Secundário em função da pressão.

Observou-se na Figura 4, que comparando as situação de pressão ambiente e 120 MPa de pressão obteve-se uma redução de 40% no valor do EDS, mostrando dessa forma a influência da pressão no refinamento da microestrutura.

### 3.2 Limite de Resistência a Tração (LRT)

O gráfico da Figura 5 mostra os resultados para o Ensaio de Tração que determinou o Limite de Resistência a Tração (LRT) para as amostras sob pressão ambiente e com aplicação de pressão, processo Squeeze Casting. Observa-se a evolução dos valores da LRT em função do aumento da pressão, atingindo um patamar em torno de LRT = 180 MPa para pressões a partir de 80 MPa. Correlacionando os resultados do Ensaio de Tração com os valores do EDS da

Figura 4 observa-se que a LRT acompanha o mesmo padrão do EDS não variando significativamente para pressões superiores a 80 MPa.

Analisando a Figura 3 e o gráfico da Figura 5 para as pressões de 20 MPa e 40 MPa observa-se que os valores de EDS estão bem próximos, mas há uma diferença quanto ao LRT, respectivamente 164 e 175 MPa, devido a presença de macrossegregação e defeitos de Shrinkage.

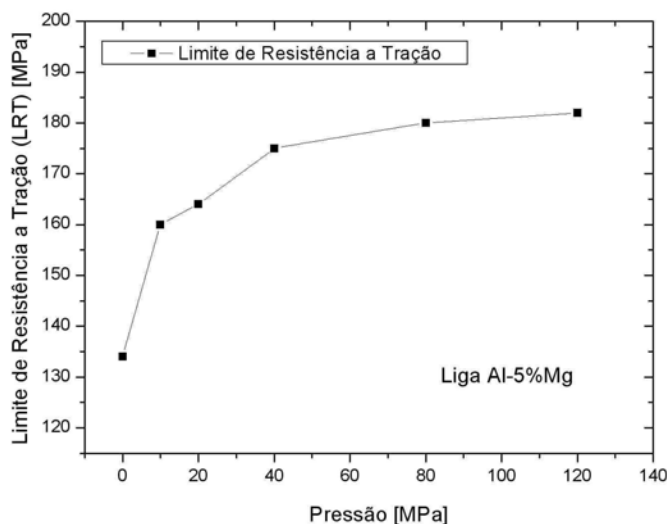


Figura 5. Gráfico do EDS em função da pressão para ligas Al-5%Mg.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que o processo Squeeze Casting para a liga Al-5%Mg, causou refino da macroestrutura, redução dos defeitos de fundição, tais como: porosidades, macrossegregação e defeitos de Shrinkage. Na microestrutura reduziu o Espaçamento Dendrítico Secundário, proporcionando uma redução de 40% entre os lingotes de pressão ambiente e 120 MPa.

Houve evolução no Limite de Resistência a Tração em função aumento da pressão. Observou-se que a presença de porosidades, e Macrossegregação contribuíram para menores valores de LRT entre as pressões 10 MPa e 40 MPa. Constatou-se que para a Liga Al-5%Mg uma pressão de 120 MPa proporcionou um aumento de 35% na resistência mecânica.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Federal do Pará (UFPA) e CNPQ, pelo suporte financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 KANICKI, D. P., *Castings Advantages, Applications, and Market Size*, IN.: American Society for Metals: ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9<sup>a</sup> edition, pp. 37-45, 1988.
- 2 FERREIRA, J. M. G. de C., *Tecnologia da Fundição*, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 507-518, 1999.
- 3 HU, H., *Squeeze Casting of Magnesium Alloys and their Composites*, Journal Materials Science. 33, pp. 1579-1589, 1998.
- 4 DORCIC, J. L. and Verma, S. K., *Squeeze Casting*. ASM Handbook, vol 15, "Casting", 9<sup>a</sup> edition, pp. 323-327, 1988.

- 5 ROHATGI, P., *Cast Metal-Matrix Composites – squeeze casting*. ASM Handbook, vol 15, “Casting”, 9<sup>a</sup> edition, pp. 845-847, 1988.
- 6 GARCIA, Amauri. *Solidificação: fundamentos e aplicações*, Campinas, SP. 2001.
- 7 MALEKI, A. et al. Effects of squeeze casting parameters on density, macrostructures and hardness of LM 13 alloy. *Materials Science & Engineering*. 2006. Pag. 135-140.
- 8 HAJJARI, E. et al. An investigation on the microstructure and tensile properties of direct squeeze cast and gravity die cast 2024 wrought Al alloy. *Materials and Design*. 2008. Pag. 1-5.
- 9 EL-KHAIR Abou MT. Microstructure characterization and tensile properties of squeeze-cast AlSiMg alloys. *Mater Letters*. 2005; 59: 894–900.
- 10 HONG, C. P., Shen, H. F. and Cho, I. S., Prevention of macrosegregation in squeeze casting of an Al - 4.5 wt pct Cu alloy, *Metallurgical Materials Transactions 29A*, pp. 339-349, 1998
- 11 SKOLIANOS, S. M, et al., *Effect of applied pressure on the microstructure and mechanical properties of squeeze-cast aluminum AA6061 alloy* *Materials Science Engineering A231*, pp. 17-24, 1997