

# INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA DE SOLIDIFICAÇÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UMA LIGA DE MAGNÉSIO <sup>1</sup>

Thiago Vieira Ferri <sup>2</sup>  
Arlan Pacheco Figueiredo <sup>2</sup>  
Carlos Alexandre dos Santos <sup>3</sup>  
Carlos Raimundo Frick Ferreira <sup>4</sup>  
Jaime Alvares Spim <sup>5</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é verificar a influência das taxas de resfriamento na formação das microestruturas e relacionar esta com as propriedades mecânicas ( $\sigma$ ,  $\sigma_e$ , Alongamento) de uma liga de magnésio (Mg-4%Al-3%La-1%Ca) solidificada em um sistema unidirecional vertical ascendente. Para análise experimental foi elaborado um aparato de solidificação unidirecional vertical ascendente, em forno resistivo projetado e acoplado há um sistema de injeção de gases protetores, com termopares para controlar a solidificação, placa de aquisição para captar os sinais dos termopares e computador para processar os dados da análise térmica da liga. Para caracterização microestrutural foram extraídas do lingote amostras representativas da microestrutura dos corpos de prova que foram ensaiados em uma máquina de tração universal. A correlação entre a microestrutura das amostras retiradas do lingote, as curvas de análise térmica e os resultados dos ensaios de tração dos corpos de prova correspondem à informações relevantes para a caracterização do comportamento na solidificação da liga (Mg-4%Al-3%La-1%Ca).

**Palavras-chave:** Liga de magnésio; Solidificação; Microestrutura; Propriedades mecânicas

## RELATION BETWEEN SOLIDIFICATION MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF A ALLOY MAGNESIUM

### Abstract

The objective this paper is to check the influence of cooling rates and other parameters the solidification in the formation the microstructure and mechanical properties ( $\sigma$ ,  $\sigma_e$ ,  $\delta$ ) of magnesium alloy ZAXLa05413. For experimental analysis has been used the system of unidirectional solidification vertical with resistive furnace, system of injection gas protectors, immersion thermocouple to monitor the solidification, acquisition system to capture the signals from thermocouples and computer to process the thermal analysis. For ingot were extracted samples and test specimen to microstructural characterization and uniaxial tension test respectively. The present article focuses on the relationships between solidifications conditions, dendrite structure, and mechanical properties of cast magnesium alloy ZAXLa05413.

**Key words:** Magnesium alloys; Solidification; Microstructure; Mechanical properties.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Mestre LAFUN / PPGEM / UFRGS

<sup>3</sup> Prof. Adjunto NUCLEMAT/PGETEMA/FENG/PUCRS – carlos.santos@pucrs.br

<sup>4</sup> MSc. Pesquisador LAFUN / PPGEM / UFRGS - frick@vortex.ufrgs.br

<sup>5</sup> Prof. Adjunto LAFUN / PPGEM / UFRGS - spim@ufrgs.br

# 1 INTRODUÇÃO

As ligas de magnésio podem ser consideradas como materiais metálicos do futuro. O consumo de peças fundidas neste metal tem aumentado 25% por ano e esta taxa de crescimento tende a se manter constante, pois as indústrias de computadores, ferramentas, eletrônicos e automóveis estão aproveitando as propriedades vantajosas do magnésio, tais como; a sua elevada relação resistência e baixo peso, as suas boas propriedades de amortecimento, a sua resistência contra a deformação e a sua boa blindagem eletromagnética.<sup>(1)</sup>

O interesse renovado pelo desenvolvimento de novas ligas metálicas leves retornou nos últimos anos. Alguns fatores mundiais têm contribuído efetivamente para tal interesse, como as reservas energéticas do petróleo e seus derivados que sofrem oscilações constantes de preços e são essenciais para os veículos, assim como o anúncio recente da comunidade científica do aquecimento global e da gestão ambiental cada vez mais efetiva no controle das emissões e processos de produção industrial. Neste contexto os fatores externos de pressão frente às indústrias faz do magnésio uma liga com grande interesse, principalmente no setor automobilístico por apresentar entre os metais estruturais a melhor relação peso/resistência.

Neste sentido muitas ligas de magnésio vem sendo estudadas nos últimos anos, já que a liga de magnésio AZ91 conhecida e produzida em alta escala não oferece estabilidade em altas temperaturas, devido ao enfraquecimento do contorno de grão a partir da precipitação descontínua da fase  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> de baixo ponto de fusão.<sup>(1,2)</sup>

Na literatura encontramos muitos trabalhos que correlacionam os parâmetros de solidificação com as propriedades mecânicas, para as ligas convencionais como os aços, as ligas de cobre, de alumínio. No entanto poucos estudos sobre ligas de magnésio relacionam a influência das variáveis de solidificação na formação das microestruturas e as suas respectivas propriedades mecânicas, principalmente pelo fato do magnésio ser de difícil fusão, com relação aos cuidados que se devemos ter ao fundir a liga, já que a mesma em presença de oxigênio entra em combustão.<sup>(3)</sup> Sabendo desta dificuldade projetamos um aparato de solidificação unidirecional especialmente para fusão de ligas de magnésio, e após realizamos análises experimentais subsequentes deste artigo.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Aparato de Solidificação Unidirecional Vertical Ascendente

O aparato de solidificação unidirecional vertical ascendente projetado pelo Laboratório de Fundição (UFRGS) foi desenvolvido focando os desafios de fusão das ligas de magnésio, principalmente a sua alta reatividade com a atmosfera em especial ao oxigênio que reage prontamente com magnésio entrando em combustão.<sup>(4)</sup> O objetivo do aparato de solidificação é isolar a liga da atmosfera não permitindo a entrada de oxigênio para o banho líquido, como também forçar a solidificação unidirecional de baixo para cima induzindo a frente de solidificação nesta direção de crescimento. Um esquema do aparato de solidificação desenvolvido para solidificação unidirecional, está representado pela Figura 1, onde: (1) Representa entrada de água, (2) Base do molde (parte inferior do molde), (3) Termopares inserido no banho metálico, (4) Computador, captação dos dados do

processo de fusão, (5) Placa de aquisição de dados, registro de temperatura por tempo, (6) Lingote metálico, (7) Lingoteira, onde ocorre a fusão do banho, (8) Controle de temperatura do forno, (9) Resistências elétricas do forno, (10) Paredes de isolamento térmico, manter a inércia de aquecimento do forno, (11) Sistema de gás, manter a atmosfera inerte durante a fusão e solidificação do banho.

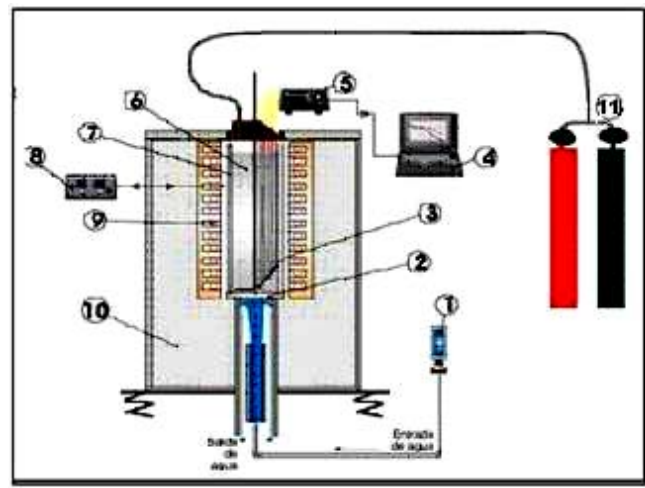


Figura 1: Aparato experimental de solidificação.<sup>(5)</sup>

A realização da solidificação unidirecional da liga de magnésio sugerida tem como objetivo buscar uma melhor compreensão sobre as influências das variáveis térmicas do processo de solidificação na formação de microestruturas e conseqüentemente, nas propriedades mecânicas.

## 2.2 Planejamento Experimental

Um planejamento experimental foi montado, onde os experimentos foram numerados e planejados segundo a Tabela 2.

Tabela 2: Planejamento experimental

Experimentos	Data da fusão	Liga utilizada	Condições	Superaquecimento * ( $T_1$ )
1	02/10/07	ZAXLa05413	Solidificação Unidirecional	27,4%
2	20/10/07	ZAXLa05413	Solidificação Unidirecional	11,8%

Onde: ( $T_1$ ) é o termopar 1 inserido no banho metálico

Para aquisição dos dados de temperatura sob o banho metálico de magnésio, foi montada uma metodologia, segundo as informações da Tabela 3, onde a distância entre termopares em profundidade é de 15 mm. O termopar mais próximo da base refrigerada está distante 15 mm da mesma e a 30 mm do centro do lingote e o mais distante se encontra a 105 mm no centro do lingote.

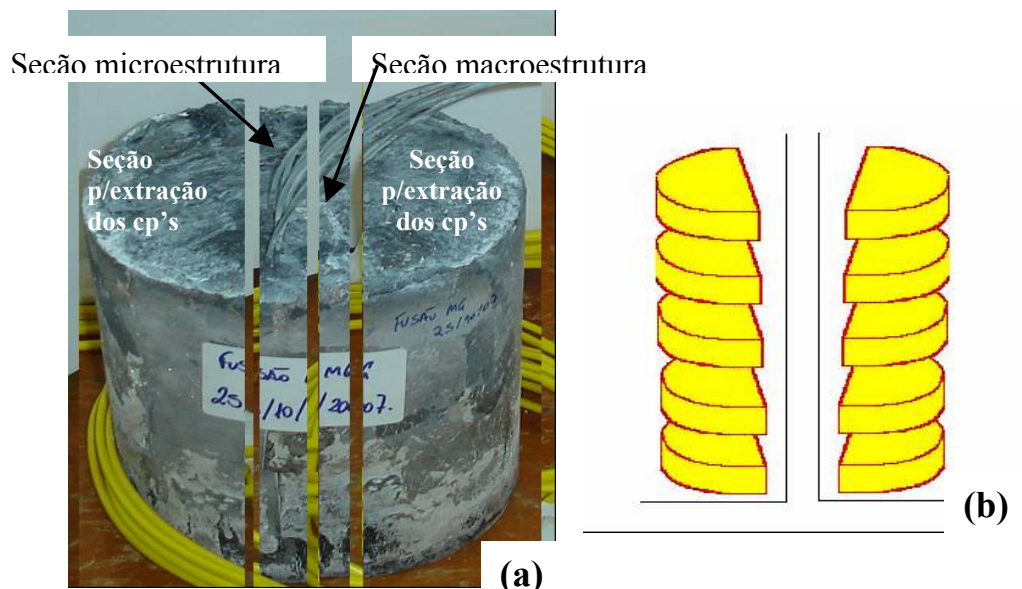
**Tabela 3:** Posição dos termopares para análise térmica

* Termopar	Distância a partir da base	Distância a partir do centro do lingote
T <sub>1</sub>	15 mm	30 mm
T <sub>2</sub>	30 mm	25 mm
T <sub>3</sub>	45 mm	20 mm
T <sub>4</sub>	60 mm	15 mm
T <sub>5</sub>	75 mm	10 mm
T <sub>6</sub>	90 mm	5 mm
T <sub>7</sub>	105 mm	0

onde: T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>4</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>6</sub>, T<sub>7</sub> são os termopares um, dois, três, quatro, cinco, seis e sete respectivamente

Os lingotes de magnésio solidificados no aparato experimental foram extraídos e submetidos as seguintes análises, conforme mostra a Figura 2:

- Análise macroestrutura;
- Análise microestrutura (espaçamento dendrítico, fases...);
- Propriedades mecânicas



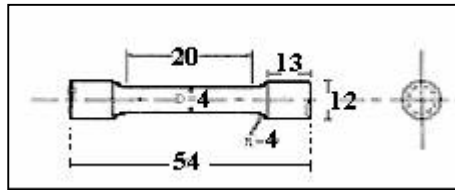
**Figura 2:** Regiões cortadas do lingote para análises metalográficas e ensaios mecânicos

Na análise macroestrutural foi tirada uma fatia do lingote solidificado e revelada a macroestrutura ao longo de toda a seção longitudinal revelando a macro da base até a escória no sentido de crescimento da frente de solidificação, mostrado na Figura 3. O reagente químico (20 ml de álcool etílico e 80 ml de água destilada) foi utilizado no ataque para revelação da macro.

Na análise microestrutura foi cortada uma fatia do lingote solidificado na qual foi recortada amostras para análises da microestrutura no sentido longitudinal e transversal, nas mesmas alturas dos termopares inseridos na análise térmica.

No ensaio de tração foram tirados 4 corpos de prova (cp's) por região analisada, as mesmas alturas reveladas para a microestrutura e de registro térmico pelos termopares. A Figura 2 (b) representa as fatias na qual foram tirados os corpos de prova, dois em cada semi-esfera totalizando 4 por área analisada relacionando-as com as propriedades mecânicas. O tamanho do corpo de prova segue a norma técnica ASTM B557-02a,<sup>(6)</sup> onde as dimensões estão representadas na Figura 3. Para cada lingote foram analisadas 5 regiões nas alturas de 15 mm, 30 mm, 45 mm,

60 mm , 75 mm a partir da base do molde representada na Figura 1, totalizando 20 cp's por lingote.



**Figura 3:** Dimensões do corpo de prova extraído para ensaio mecânico (ASTM B557-02a)<sup>(6)</sup>

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Análise Térmicas

##### 3.1.1 Experimento 1 – Solidificação unidirecional – Liga ZAXLa05413

A análise térmica do experimento 1 foi realizada com a liga de magnésio ZAXLa05413, na qual fundimos a liga até a temperatura aproximada de 28% acima da temperatura líquidus ( $T_L$ ) registrada pelo termopar 1, neste momento iniciamos a solidificação acionando o sistema de refrigeração com água a temperatura ambiente, tendo assim uma solidificação forçada com a frente de solidificação no sentido da base refrigerada até a sua superfície gerando uma estrutura bruta de solidificação colunar. No procedimento experimental foi utilizado 7 termopares imersos no banho metálico a alturas de 15 ,30 ,45 ,60, 75, 90 e 105 milímetros (mm) da base refrigerada que registraram a curva de solidificação da liga ZAXLa05413, nas condições mencionadas.

##### 3.1.2 Experimento 2 - Solidificação unidirecional – Liga ZAXLa05413

A análise térmica do experimento 2 foi realizada com a liga de magnésio ZAXLa05413 na qual fundimos a liga até a temperatura aproximada de 12% acima da temperatura líquidus ( $T_L$ ), registrada pelo termopar 1, a partir deste momento foi acionado o sistema de refrigeração com água.

O sistema de refrigeração à água em temperatura ambiente consiste no acionamento da água que bate literalmente sob a base refrigerada, e retorna para um sistema que capta a água. Assim provavelmente no primeiro contato da água com a base refrigerada, o metal líquido sofre influência gerando uma certa perturbação que pode influenciar na morfologia da estrutura bruta formada, e de fato a macroestrutura em 15 milímetros e 30 milímetros parece ter sofrido esta perturbação, já que sua macro-estrutura ficou bem irregular, mostrado na Figura 5 do experimento 2, voltando a uma tendência colunar somente acima dos 45 milímetros de altura.

Os parâmetros de solidificação estão representados na forma de gráficos na Figura 4, onde estão correlacionados os dois experimentos em função da posição com relação a base refrigerada na posição de registro dos termopares.

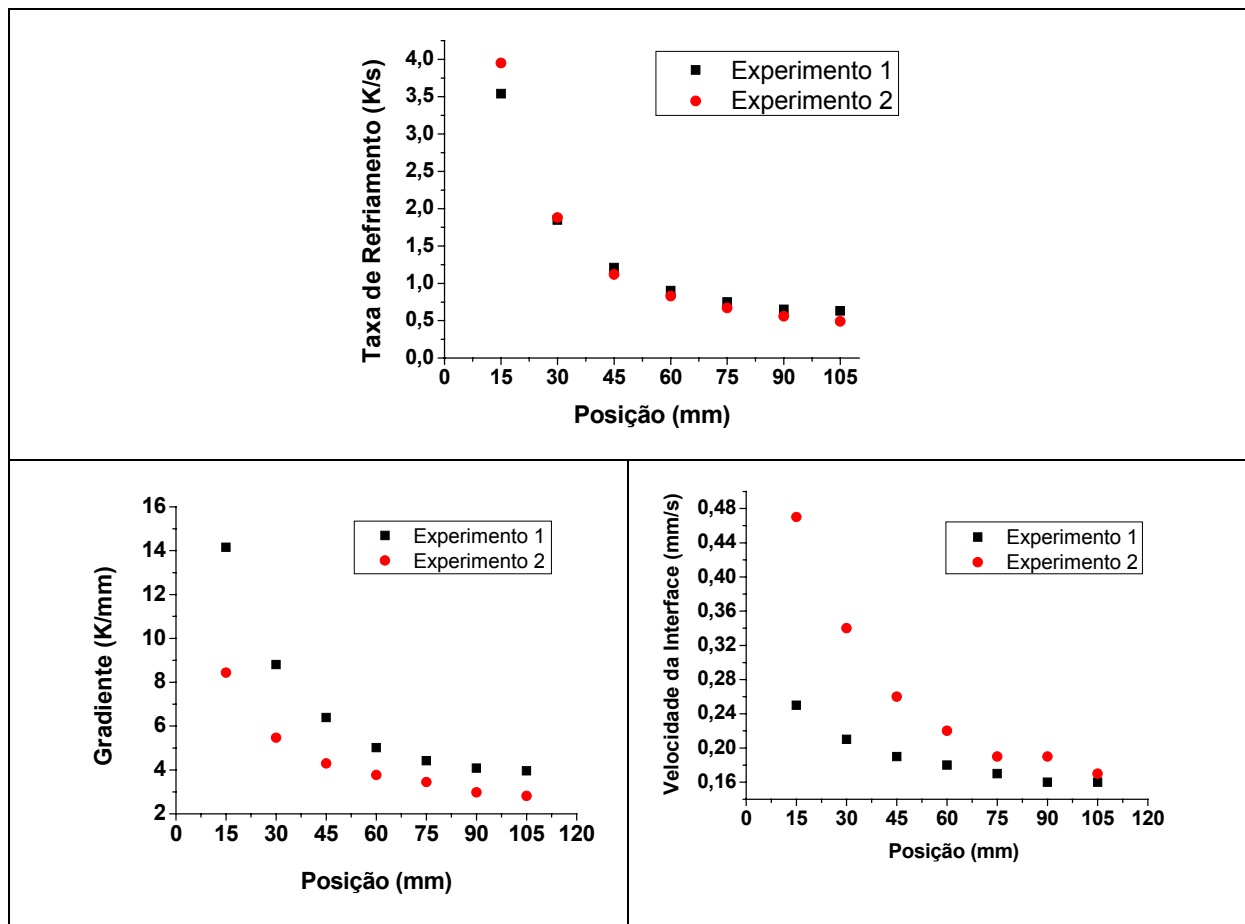


Figura 4: Parâmetros de solidificação dos experimentos 1 e 2.

### 3.2 Macroestrutura

A Figura 5, representa as macroestruturas dos lingotes fundidos e solidificados no aparato de solidificação unidirecional, onde no experimento 1 a macroestrutura mostrou-se totalmente colunar até 70 milímetros de altura, para o experimento 2 a macroestrutura no início até aproximadamente 40 milímetros apresentou uma macroestrutura irregular voltando a tendência colunar após os 40 milímetros de altura, este fato pode ser a influência da água ao entrar em contato com o sistema de refrigeração (a base), que provavelmente propagou uma interferência para o banho metálico e como no experimento 2 o sistema de refrigeração com água foi ligado quando o magnésio estava aproximadamente 12% acima da temperatura líquidus, o intervalo de tempo até atingir a temperatura de início de solidificação não foi suficiente para o sistema entrar em equilíbrio novamente sem perturbações.

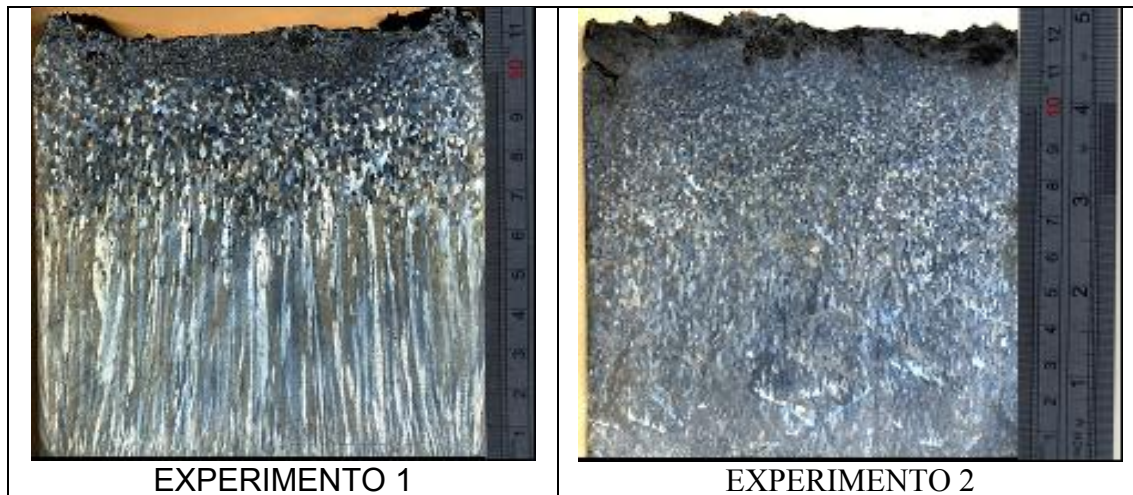


Figura 5: Macroestruturas dos experimentos 1 e 2

### 3.3 Microestrutura

A relação entre o espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) e a posição (P) para os experimentos 1 e 2 estão representados na Figura 6, onde nota-se que no experimento 1 ocorreu um refinamento mais significativo no início da solidificação.

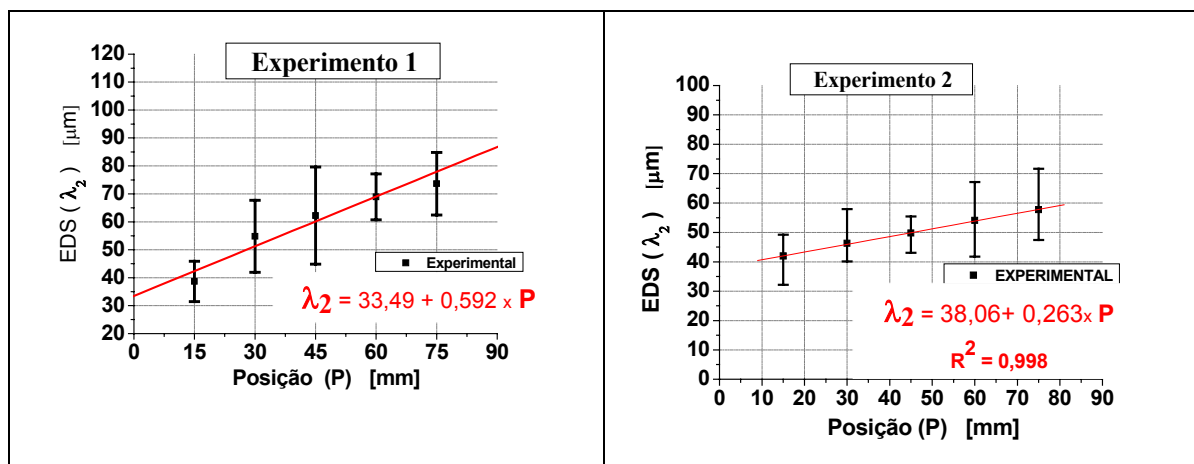


Figura 6: Espaçamento Dendrítico Secundário em função da posição para os experimentos 1 e 2.

### 3.4 Propriedades Mecânicas

Os valores máximos, mínimos e médios das propriedades mecânicas ( $\sigma_u$ ,  $\sigma_e$ ,  $\delta$ ) dos resultados obtidos das regiões de 15 mm, 30 mm, 45 mm, 60 mm e 75 mm de distância da base do lingote solidificado foram correlacionados com a raiz quadrada do inverso do espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ).

Os gráficos da Figura 7 com os experimentos 1 e 2, mostraram que os melhores resultados de resistência mecânica estão relacionados ao experimento 1.

Ao analisarmos os parâmetros de solidificação obtidos, na Figura 4, e as propriedades mecânicas da Figura 7, notamos que os melhores resultados de propriedades mecânicas para a liga de magnésio ZAXLa05413 estão correlacionados com gradientes (k/mm) maiores e velocidades da interface de solidificação (mm/s) menores, para taxas de resfriamento similares.

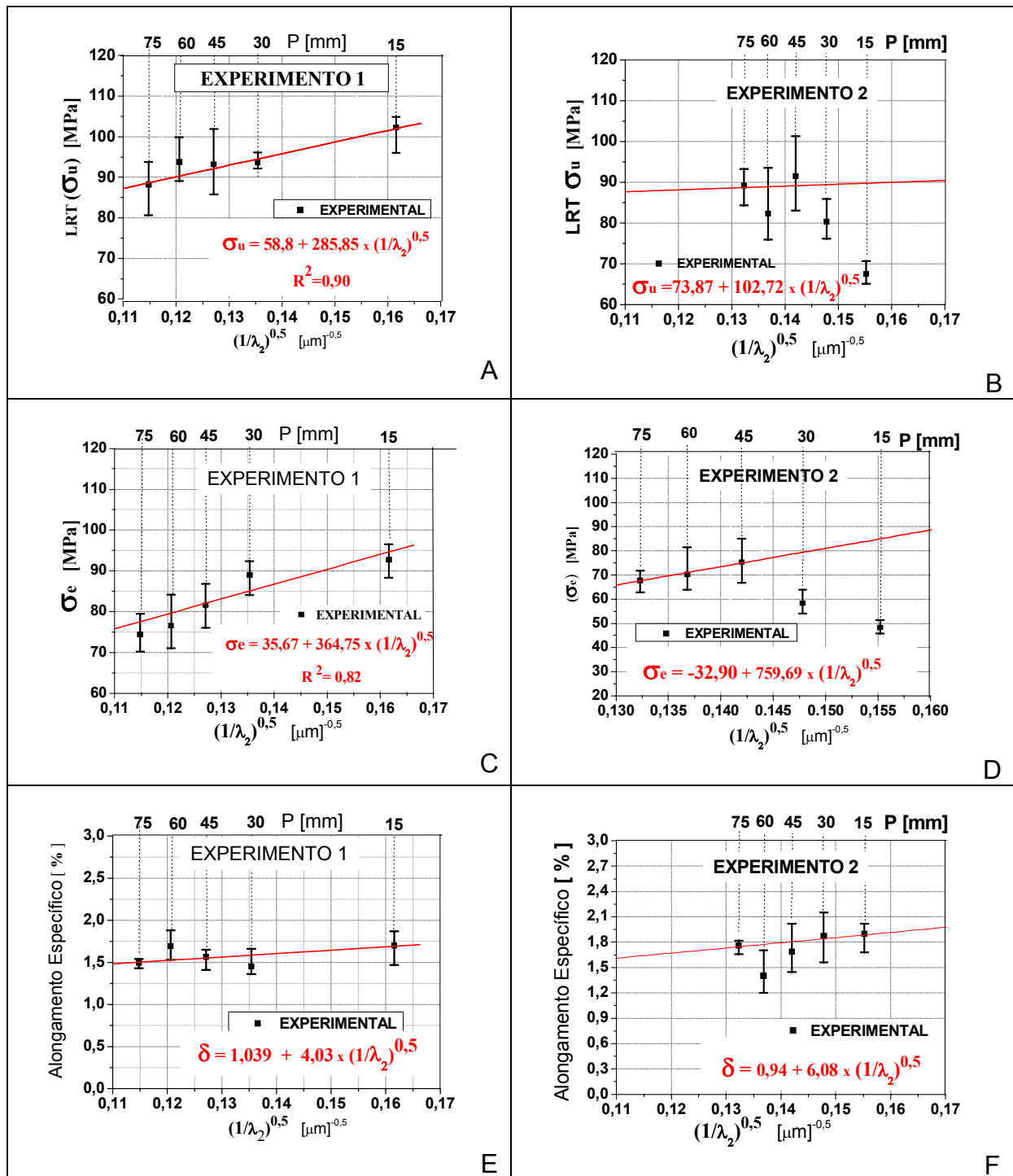


Figura 7: Propriedades Mecânicas em função da posição dos experimentos 1 e 2.

Para calcular as equações representativas das propriedades mecânicas ( $\sigma_u, \sigma_e$ ) em função do espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) do experimento 2, ilustrado na Figura 7 (B) e (D) foram descartados os valores de propriedade mecânica ( $\sigma_u, \sigma_e$ ) referentes a posição (P) 15 mm e 30 mm, já que nesta região ocorreu a formação de uma macroestrutura totalmente irregular (Figura 5), o que refletiu na resposta de propriedades mecânicas aquém do esperado.



## 4 DISCUSSÃO

Embora os fenômenos que envolvam a solidificação sejam extremamente complexos, sabe-se que há uma grande influência destes parâmetros no comportamento mecânico das ligas no estado bruto de fusão que apresentam, dentro dos grãos cristalinos individuais, uma rede dendrítica com teor de soluto que varia continuamente, uma complexa dispersão de segundas fases, porosidades e inclusões.<sup>(5)</sup>

Quanto ao tamanho de grão em particular sabe-se que quanto mais refinado é mais elevada é a resistência mecânica da liga,<sup>(7)</sup> em particular podemos citar a equação de Hall-Petch, que correlaciona a tensão de escoamento como diretamente proporcional ao inverso da raiz quadrada do diâmetro do grão.

Na literatura a trabalhos que relacionam o grau de refino do espaçamento dendrítico como fator mais influente do que o próprio tamanho de grão sobre as propriedades mecânicas.<sup>(5,8,9)</sup> Seguindo esta mesma linha de raciocínio os gráficos que seguem correlacionam as propriedades mecânicas com o tamanho de grão e com o espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ).

Neste contexto os resultados apresentados de propriedades mecânicas estão em coerência com a linha de pesquisa dos autores,<sup>(5,8,10)</sup> apresentado melhores resultados de Resistência mecânica para as regiões com menores espaçamentos dendríticos secundários ( $\lambda_2$ ).

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos são coerentes com a literatura, segundo os critérios abaixo:

1. A atmosfera inerte e protetora para a fusão do magnésio, a que apresentou melhores resultados formando pouca escória foi a mistura do gás Hexafluoreto de Enxofre e Gás Argônio.
2. O refinamento microestrutural em especial o espaçamento dendrítico secundário ( $\lambda_2$ ) eleva a resistência mecânica da liga de magnésio ZAXLa05413.
3. Quanto aos parâmetros de solidificação, para taxas de extração de calor semelhantes, é preferível optar por Gradiente Térmicos mais elevados e Velocidades da frente de solidificação menores, para obtenção de melhores propriedades mecânicas na solidificação da liga de magnésio ZAXLa05413.
4. Os resultados obtidos são de suma importância na pré-programação de propriedades mecânicas da liga, com relação aos parâmetros de solidificação, sendo possível à utilização dos dados obtidos em softwares que correlacionem as propriedades mecânicas com os parâmetros de solidificação, sabendo-se previamente na fusão quais os melhores parâmetros a serem utilizados para obtenção de propriedades mecânicas melhores.

## REFERÊNCIAS

- 1 HU, B.H., ET AL., Tecnologias de fundição e conformação para a produção de peças de magnésio, in fundição e serviços. p. 16, 2003.

- 2 BRONFIN, B., M. KATSIR, AND E. AGHION, Preparation and solidification features of AS21 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering A*, v.302, n.1, p. 46-50, 2001.
- 3 MORENO, I.P., et al., Microstructural stability and creep of rare-earth containing magnesium alloys. *Scripta Materialia*, v. 48, n.8, p. 1029-1034, 2003.
- 4 SHIH, T.-S., J.-H. WANG, AND K.-Z. CHONG, Combustion of magnesium alloys in air. *Materials Chemistry and Physics*, v.85, n.(2-3), p. 302-309, 2004.
- 5 RAVI KUMAR, N.V., et al., Effect of alloying elements on the ignition resistance of magnesium alloys. *Scripta Materialia*, v. 49, n.3, p. 225-230, 2003.
- 6 ASTM-B557 (2003). Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products.
- 7 GARCIA, A., Influência das variáveis térmicas de solidificação na formação da macroestrutura e da microestrutura e correlação com propriedades decorrentes, in *Revista Projeções*, p. 13-32, 2005.
- 8 LEE, C.D., Effect of grain size on the tensile properties of magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 459, n.(1-2): p. 355-360, 2007.
- 9 QUARESMA, J.M., SANTOS, C. A., GARCIA, A., Correlation between Unsteady-State Solidification Conditions, Dendrite Spacings, and Mechanical Properties of Al-Cu Alloys, in *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy and Materials Science*, p. 3167-3178, 2000
- 10 OSORIO, W.R., AMAURI.G, Modeling dendritic structure and mechanical properties of Zn-Al alloys as a function of solidification conditions. *Materials Science and Engineering A*, v. 325, n.(1-2), p. 103-111, 2002.