

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E ESTRUTURAL DA LIGA Al-10%Cu SOLIDIFICADA UNIDIRECIONALMENTE EM MOLDES DE AÇO <sup>(1)</sup>

Raimunda Figueiredo da Silva Maia <sup>(2)</sup>

Emerson David Cavalcante Santos <sup>(3)</sup>

André Oliveira Kishi <sup>(4)</sup>

Darci Augusto Moreira <sup>(5)</sup>

José Maria do Vale Quaresma <sup>(6)</sup>

O principal objetivo deste trabalho é avaliar as propriedades mecânicas da liga Al-10%Cu através de ensaios de tração, e posteriormente, fazer uma correlação com os valores obtidos dos espaçamentos dendríticos secundários (EDS) lidos em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

A partir dos lingotes da liga Al-10%Cu, solidificados unidirecionalmente em moldes de aço com 8 e 63mm de espessura, foram retirados corpos de prova para ensaios de tração, segundo as posições 2 (20 mm), 3 (37 mm) e 4 (52 mm) da interface metal/molde. No exame metalográfico foi possível mapear o metal sob o ponto de vista tanto da sua fratura, identificando os elementos presentes na sua estrutura, quanto de sua microestrutura, realizando-se as medidas dos espaçamentos dendríticos secundários para que fosse possível relacionar as propriedades mecânicas ao processo de solidificação unidirecional.

Observou-se que os valores do limite de resistência à tração variam na medida em que os corpos de prova foram obtidos de posições mais afastadas da interface metal/molde, demonstrando uma influência do processo de solidificação no comportamento mecânico da liga. Ao relacionar os dados dos ensaios de tração com os espaçamentos dendríticos, foi possível observar que o limite de resistência à tração aumentou com a diminuição do espaçamento para os moldes utilizados.

Palavras-Chave: Liga Al-10%Cu, solidificação unidirecional, espaçamento dendrítico.

---

V Seminário de Fundição – 17 a 19 de maio de 2004 - Salvador.

<sup>(1)</sup> – Trabalho a ser apresentado no V Seminário de Fundição -2004;

<sup>(2)</sup> – Mestranda em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

<sup>(3)</sup> e <sup>(4)</sup> – Graduandos em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

<sup>(5)</sup> – Mestranda em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará;

<sup>(6)</sup> – Prof. Dr., DEM – CT – Universidade Federal do Pará.

## 1. INTRODUÇÃO

A estrutura que se forma nos instantes iniciais junto à parede do molde determina as propriedades do produto final, não somente no caso de peças de fundição que apresentam essencialmente a forma definitiva, mas também naqueles produtos que serão trabalhados para a produção de chapas, fios e forjados. (Garcia, 2001).

As ligas de alumínio oferecem importantes vantagens na fabricação de materiais, por seu notável peso específico, sua resistência à corrosão e sua boa condutividade térmica (Dubourg, 2002). É obvio e conveniente analisar a microestrutura e há muitas razões para que isso seja feito, e em muitos casos o alvo é correlacionar algumas características microestruturais com uma ou mais propriedades chave do material, (Brian, 1997). A estrutura determina o grau de homogeneidade química, a resistência e a anisotropia gerando um efeito nas possibilidades de trabalhabilidade do material (Mohamed, 2002). O tamanho de grão e a agregação policristalina produzem um importante efeito sobre as propriedades (Ciupinski, 1997). A relação de Hall Petch é confiável à avaliação da característica mecânica dos materiais e a mesma demonstra que a tensão de tração decresce com o aumento dos grãos (Furukawa, 1996). Reconhece-se atualmente que os espaçamentos das ramificações dendríticas têm uma correlação muito mais imediata com as propriedades mecânicas do que com o próprio tamanho do grão cristalino (Quaresma, 2000). A fadiga e fratura são importantes tópicos de pesquisa do comportamento das ligas de Al. Nos diversos tipos de ensaios disponíveis para a avaliação das propriedades mecânicas dos materiais, o mais amplamente utilizado é o ensaio de tração, as ligas de alumínio comercial usualmente exibem ruptura dúctil com testes de tensão realizados em laboratório (Jiang, 1999). Neste estudo foi realizado o ensaio de tração utilizando corpos de prova usinados segundo as dimensões prescritas nas normas convencionais (NBR-6152 E ASTM E-8M). A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para mensurar os espaçamentos dendríticos secundários que ilustram com clareza o crescimento dos braços dendríticos durante a solidificação em moldes fabricados com diferentes materiais.

## 2. OBJETIVO

Avaliar as propriedades mecânicas da liga Al-10%Cu através de ensaios de tração, e posteriormente, fazer uma correlação com os valores obtidos dos espaçamentos dendríticos secundários lidos em microscópio eletrônico de varredura.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 1 ilustra a seqüência operacional da obtenção dos corpos de prova do presente estudo.

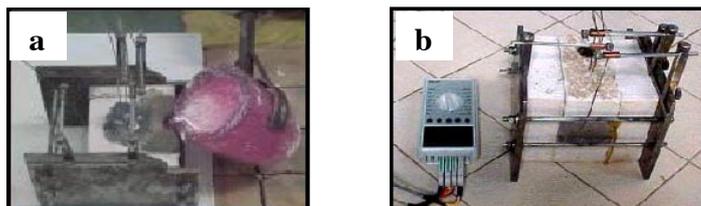


Figura 1 – Em (a): Vazamento da liga Al-10%Cu na câmara de vazamento constituída por uma parede metálica e as demais refratarias. Em (b): Aparelho ALMEMO conectado aos “plugs” dos termopares tipo “K” e “J” em quatro posições distintas da interface metal molde.

A partir dos lingotes solidificados unidirecionalmente com a liga Al-10%Cu, foram retirados corpos de prova para ensaio de tração, segundo as posições 2 (21 mm), 3 (37 mm) e 4 (52 mm) da interface metal/molde. Os corpos de prova foram usinados segundo dimensões prescritas nas normas NBR-6152 E ASTM E-8M e submetidos a ensaio de tração, em uma máquina de ensaio Kratos serie K3. Foi escolhido o ensaio de tração por ser um tipo de ensaio relativamente simples e de realização rápida além de fornecer informações importantes e primordiais para o projeto e a fabricação de peças e componentes (Garcia, 2000).

Na Figura 2 pode-se observar a foto do lingote obtido ilustrando esquematicamente as posições em que foram retirados os corpos de prova para ensaio de tração, bem como dos corpos de prova fraturados, com fratura nitidamente frágil.

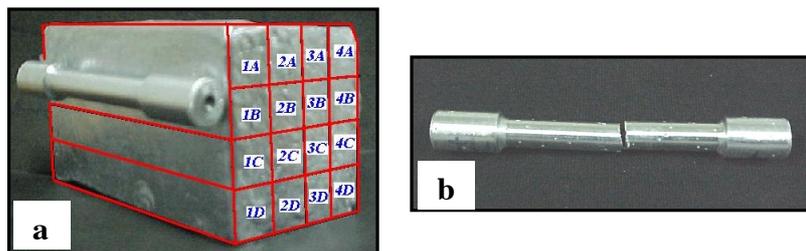


Figura 2 – Em (a): Foto do lingote com as posições dos corpos de prova retirados para o ensaio de tração. Em (b): Corpo de prova com o detalhe da fratura.

O exame metalográfico foi utilizado com a dupla finalidade de mapear o metal sob o ponto de vista tanto da sua fratura, quando se observou o seu aspecto e buscou-se identificar seus elementos presentes, como de sua estrutura, quando foram realizadas as medidas dos espaçamentos dendríticos para que fosse possível relacionar às propriedades mecânicas ao processo de solidificação. O reagente utilizado para a visualização dos EDS foi o Cáustico (10 g de NaOH + 90mL de H<sub>2</sub>O).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira etapa as observações foram direcionadas para a avaliação do limite de resistência à tração correlacionados com os dois tipos de moldes e ao aspecto da fratura. Na segunda etapa as observações se voltaram para a obtenção das medidas dos espaçamentos dendríticos secundários via microscopia eletrônica de varredura.

##### 4.1. Avaliação das características das propriedades mecânicas

O ensaio de tração mostra através dos resultados que os corpos de prova coletados mais afastados da interface metal molde apresentam valores menores para as propriedades mecânicas, como pode ser observado pelo declínio do ponto 2 ao 4 nos gráficos das Figuras 3 e 4.

Os valores superiores tanto para a resistência à tração, como para o alongamento, para os corpos de prova obtidos com o auxílio do molde mais espesso, 63mm, podem ser interpretados como resultados de menor tamanho de grão, gerados como consequência da sua maior eficiência na extração de calor.

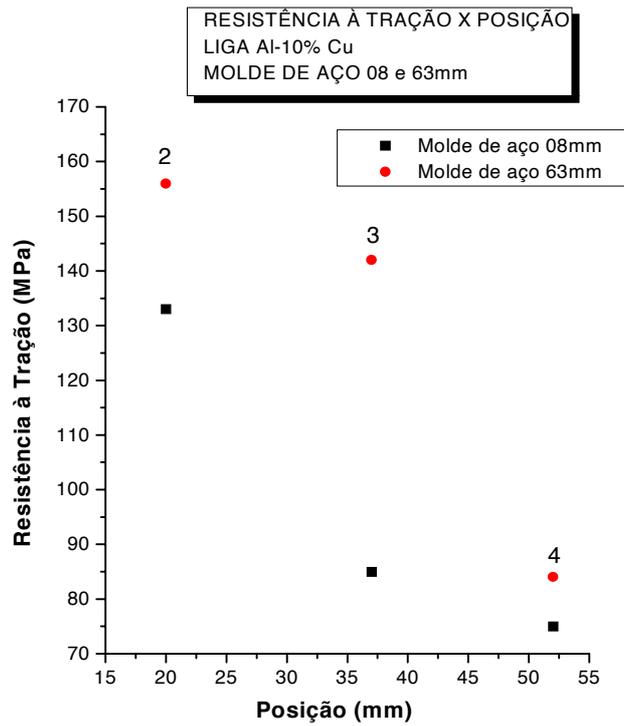


Figura 3 – Gráfico LRT x Posição, para os corpos de prova obtidos via moldes de aço com 08 e 63mm de espessura.

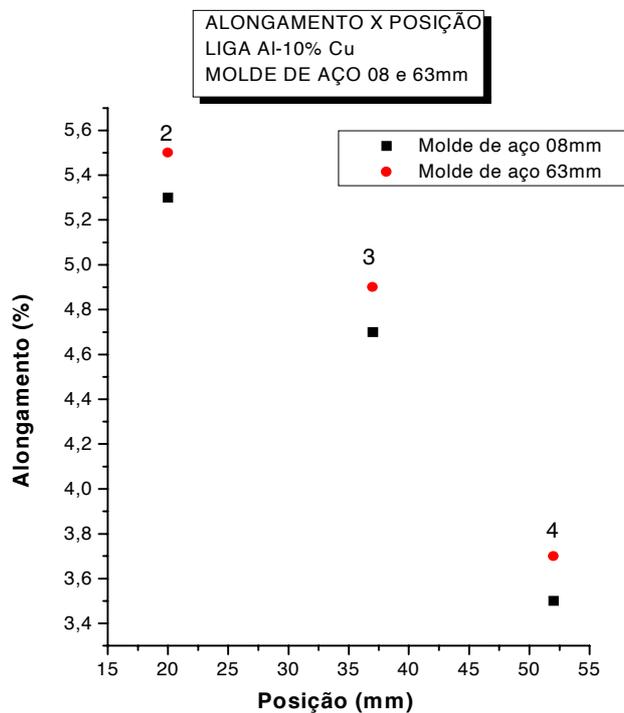


Figura 6. Gráfico Alongamento x Posição, para os corpos de prova obtidos via moldes de aço com 08 e 63mm de espessura.

Por outro, tais leituras permitem observar, ainda que, os valores da resistência à tração e alongamento decrescem quase que linearmente, para cada

molde à medida que podem ser lidos mais afastados da interface metal/molde, induzindo a dizer que estes resultados advêm da diminuição da velocidade, e como consequência, possibilita o crescimento do grão que pode está associado a espaçamentos dendríticos que vão crescendo continuamente durante o processo de solidificação unidirecional, do início ao termino da solidificação.

#### 4.2. Microscopia da fratura

As amostras das fraturas retiradas dos corpos de prova dos ensaios de tração foram analisadas via MEV. Nas fotomicrografias capturadas observa-se através da topografia a fragilidade do material, confirmando os resultados obtidos no ensaio de tração.

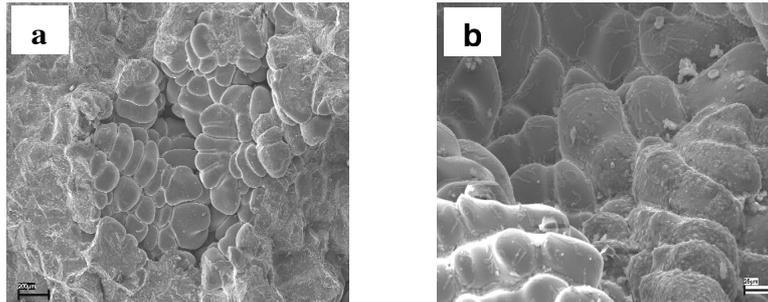


Figura 5 - Superfície da fratura da liga solidificada em molde de aço à 20 mm da interface com aumento de 65x. Em (a): molde com 08 mm de espessura. Em (b): molde com 63 mm de espessura.

A Figura 5 exemplifica uma constante do aspecto da fratura para solidificação em moldes de aço, a qual apresenta um detalhe da fratura onde podem ser identificados os elementos presentes na mesma, a fase escura em forma de um “cacho de ameixas”, constituindo a matriz de Al e a fase clara, constituída do eutético ( $Al_2Cu$ ), que percorre a matriz espalhando-se nos contornos de grão. Observa-se que a matriz ( $\alpha$ ) do alumínio permanece íntegra sem deformar-se enquanto que o eutético ( $Al_2Cu$ ), precipitado em excesso nos contornos de grão, atua como um agente desagregador, pois a fratura ocorre no ligante segundo seu posicionamento intergranular, daí possivelmente o aspecto frágil da fratura.

#### 4.3. Medidas dos espaçamentos dendríticos

A investigação das amostras realizada no MEV possibilitou as leituras do comprimento médio dos EDS em relação ao aumento da distância da interface metal/molde. Na leitura adotou-se a técnica da interceptação linear. Os resultados que permitem avaliar a evolução do EDS e encontram-se relacionados na Tabela 1 e na Figura 6 e 7. Estas amostras foram retiradas por um transversal nos corpos de prova utilizados no ensaio de tração nas posições 20mm e 37mm.

Tabela 1. Relação das medidas dos espaçamentos dendríticos secundários lidos no MEV.

Molde Posição	20 mm	37 mm	Aumento
Aço 08 mm	102µm	129µm	65X
Aço 63 mm	48 µm	66 µm	65X

Na Figura 6, temos fotomicrografias que mostram os espaçamentos dendríticos secundários obtidos em molde de aço com 08mm de espessura.

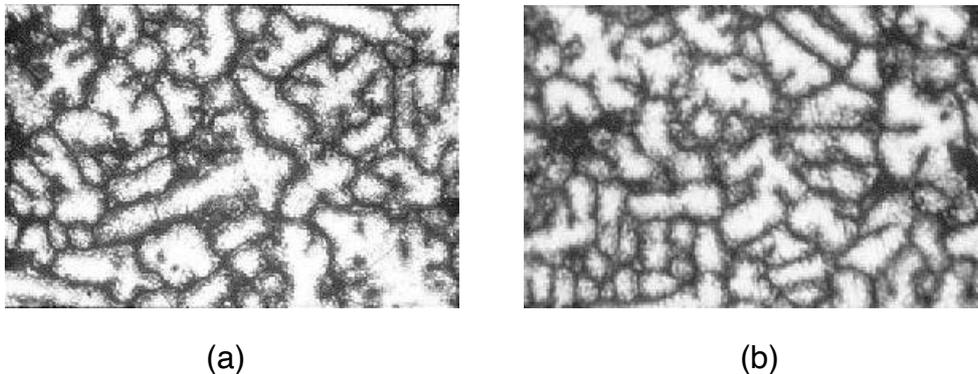


Figura 6 – Fotomicrografias de amostras solidificadas em molde aço com 8mm de espessura (ampliação 200x). (a) posição à 20mm da interface metal/molde, (b) posição à 37mm da interface metal/molde.

A Figura 7 mostra fotomicrografias dos espaçamentos dendríticos secundários obtidos em molde de aço com 63mm de espessura.

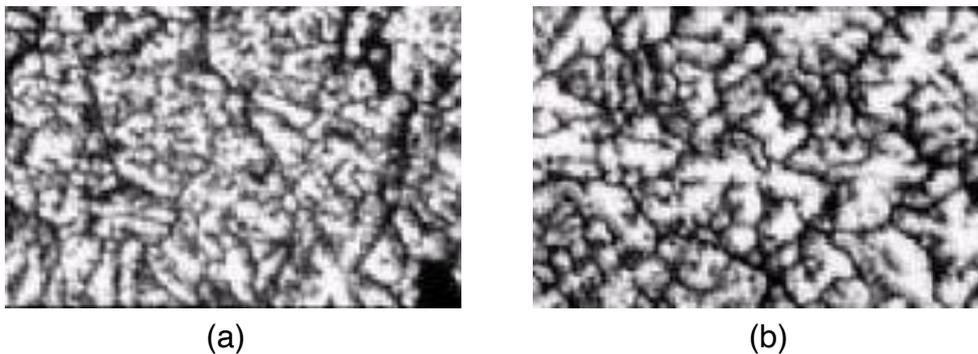


Figura 7 – Fotomicrografias de amostras solidificadas em molde aço com 63mm de espessura (ampliação 200x). (a) posição à 20mm da interface metal/molde, (b) posição à 37mm da interface metal/molde.

Comparando-se as figuras 6 e 7, percebe-se que o molde de 63mm de espessura apresenta melhor capacidade de refinamento das dendritas, que o molde de 08 mm. Isto se deve ao fato de que o molde de 63mm tem maior potencial de extração de calor, pois sua maior espessura possibilita uma velocidade de solidificação maior, já que o molde de 8mm entra em equilíbrio térmico com o metal logo nos primeiros instantes da solidificação.

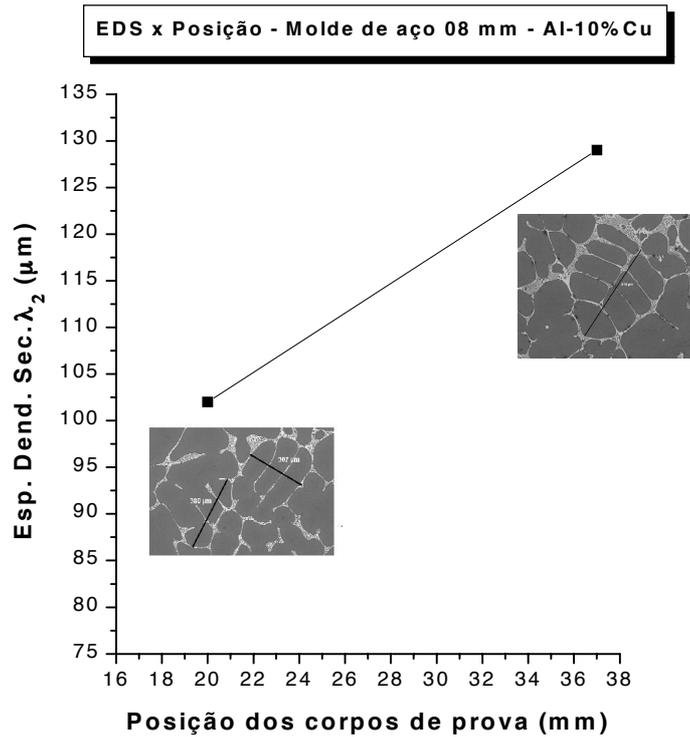


Figura 8 – Conjunto de fotomicrografias obtidas via MEV relativo às posições 20 e 37 mm da interface metal/molde, para o molde de aço com 08 mm.

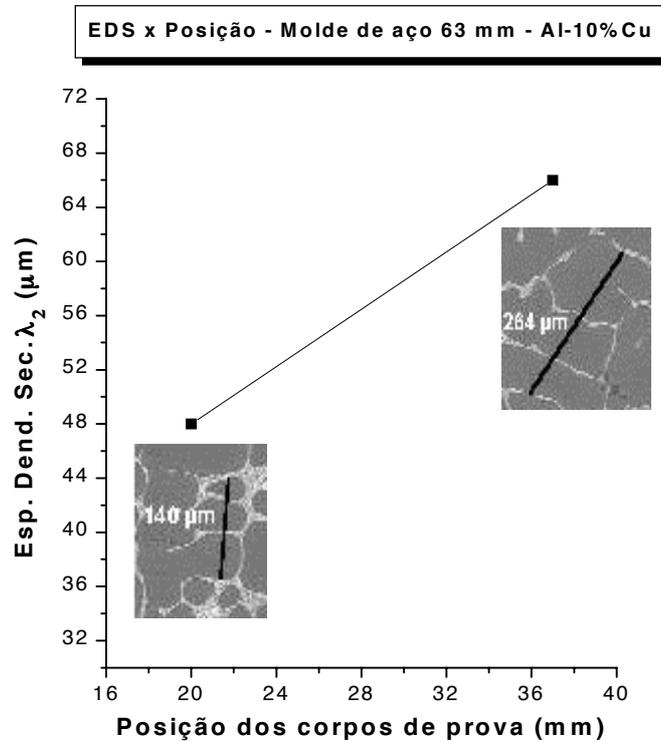


Figura 9 – Conjunto de fotomicrografias obtidas via MEV relativo às posições 20 e 37 mm da interface metal/molde, para o molde de aço com 63 mm.

Os tamanhos maiores para EDS obtidos mais afastados da interface metal/molde denunciam uma menor velocidade da frente de solidificação na proporção que a espessura solidificada aumenta.

Fazendo uma comparação entre as Figuras 8 e 9, percebe-se que o molde de 63mm de espessura apresenta melhor capacidade de refinamento nos espaçamentos dendríticos secundários, que o molde de 08 mm, segundo os valores lidos nas diferentes posições em relação à interface metal/molde.

## 5. CONCLUSÕES

A análise desenvolvida e os resultados obtidos neste trabalho, relativos aos ensaios de tração realizados com corpos de prova da liga Al-10%Cu (retirados de lingotes solidificados unidirecionalmente em moldes de diferentes espessuras) demonstraram que o comportamento mecânico sofreu influência do processo de solidificação. e os valores do limite de resistência à tração se modificam na medida em que os corpos de prova são obtidos de posições mais afastadas da interface metal/molde, e como conseqüência, produzem-se elementos com menor desempenho trativo e menor alongamento refletindo na crescente fragilidade do material. É conveniente ressaltar que a fragilidade elevada, apresentada pelo material pode ter uma significativa parcela atribuída a excessiva concentração de  $(CuAl_2)$ , nos contornos de grão e a não possuir suficiente capacidade de permanecer-se nos contornos de grão apresentando baixa afinidade com a matriz não deixando a matriz ( $\alpha$ ) do alumínio deslocar-se.

Quando comparados as diferentes espessuras do molde (08 e 63 mm) tem-se que o molde de maior espessura apresenta melhor capacidade de refinamento nos espaçamentos dendríticos apresentando maiores valores dos limites de resistência à tração.

Ao relacionar os dados do ensaio de tração aos espaçamentos dendríticos obtidos, foi possível observar que o limite de resistência à tração aumentou com a diminuição do espaçamento dendrítico para os moldes utilizados.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Garcia, A. 2001. Solidificação Fundamentos e Aplicações, Campinas SP Editora da Unicamp, pp. 21.

Dubourg, L. Pelletier, H. Vaissiere, D. Hlawka, F. Cornet. A 2002 Mechanical Characterisation of laser alloyed aluminium-copper systems alloys"; *Wear* 253 (2002) 1077-1085.

Brian Ralph and K. J. Kurzydowski, 1997 The philosophy of microscopic quantification. *Materials characterization* 38 217-227.

Mohamed, A. Taha, Nahed A El-Mahallaway, Rawia M. Hamouda. 2001 Relationship between formability and cast structures in end-chill directionally solidified Al-Cu alloys. *Materials and Design* 23 (2002) 195-200.

Ciupinski, L. Ralph, B. and K. J. Kurzydowski. 1997 Methods for the characterization of grain size. *Materials characterization* 38:177-185.

Jiang, D. M. Kang, S. B. and Kim H. W. 1999 Microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloy sheets for autobody application. *Materials Science and Technology* 15 1411.

Garcia, A., Spim, J. A. e Santos, C. A.; 2000 *Ensaio dos Materiais*. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.

# MECHANICAL AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION OF Al-10%Cu ALLOY UNIDIRECTIONALLY SOLIDIFIED IN STEEL MOLDS <sup>(1)</sup>

Raimunda Figueiredo da Silva Maia <sup>(2)</sup>

Emerson David Cavalcante Santos <sup>(3)</sup>

André Oliveira Kishi <sup>(4)</sup>

Darci Augusto Moreira <sup>(5)</sup>

José Maria do Vale Quaresma <sup>(6)</sup>

The main objective of this work is to evaluate the mechanical properties of the Al-10%Cu alloy through traction tests, and later, to correlate with the obtained values of the secondary dendritic arm spacing read in Scanning Electron Microscope (SEM).

Ingots of the alloy Al-10%Cu, unidirectionally solidified in steel molds with 8 and 63mm of thickness, were took test specimens for traction tests, according to the positions 2 (20 mm), 3 (37 mm) and 4 (52 mm) of the metal/mold interface. In the metallographic exam it was possible to map the metal under the point of view so much of it fracture, identifying the present elements in structure, as of microstructure, taking place the measures of the secondary dendritic arm spacing so that it was possible to relate the mechanical properties to the process of unidirectional solidification.

It was observed that the values of the tensile strength vary in the measure in that the specimens were obtained of moved away positions of the metal/mold interface, demonstrating an influence of the solidification process in the mechanical behavior of the alloy. When relating the data of the traction tests with the secondary dendritic arm spacings, it was possible to observe that the tensile strength increased with the decrease of the spacing for the used molds.

**Keywords:** Al-10%Cu alloy, unidirecional solidification, Dendrite arm spacing.

---

V Foundry Seminar, May 17-19 2004 - Salvador.

<sup>(1)</sup> – Article to be presented in the V Foundry Seminar 2004.

<sup>(2)</sup> – Master's degree student, Universidade Federal do Pará;

<sup>(3)</sup> and <sup>(4)</sup> – Mechanical Engineering Undergraduates, Universidade Federal do Pará;

<sup>(5)</sup> – Master's degree student, Universidade Federal do Pará;

<sup>(6)</sup> – Prof. Dr., DEM – CT – Universidade Federal do Pará.