

Influência do tempo e deformação na microestrutura de ligas de alumínio reciclado condicionadas para tixoconformação

Influence of time and strain on the microstructure of recycled aluminum alloy for conditioned to thixoforming

Gianni Ferreira Alves

Mestre, Professora

Departamento de Metalurgia e Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo.
galves@ifes.edu.br

Estéfano Aparecido Vieira

Doutor, Professor

Departamento de Metalurgia e Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo.
estefanovieira@ifes.edu.br

José Roberto de Oliveira

Doutor, Professor

Departamento de Metalurgia e Materiais
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia do Espírito Santo.
jroberto@ifes.edu.br

Resumo

Um dos pré-requisitos para o processo de tixoconformação de ligas, é que estas apresentem microestruturas globulares. Esse trabalho utilizou o método da deformação seguido por recristalização com o objetivo de determinar a deformação e o tempo mínimos necessários para completa globularização de duas novas ligas de Al no estado semi-sólido (ESS). Buscou-se, também, encontrar a deformação necessária para um máximo refinamento microestrutural. As ligas foram fundidas a partir de sucatas de latas de alumínio, acrescentando-se Si, até atingir 3,5% (Al_{3,5}Si), e Cu para a outra liga, até atingir-se 4% (Al₄Cu). As novas ligas foram laminadas com deformações variando de 5 a 30% e levadas ao ESS com tempo de encharque variando de 1 a 60 minutos. As microestruturas foram caracterizadas por microscopia ótica. Os resultados mostram que a deformação mínima, para promover total globularização, está entre 5 e 10%. Quanto maior a deformação mais refinada é a microestrutura, porém, a partir de aproximadamente 20%, é necessário melhorar as condições de conformação para impedir a formação de trincas.

Palavras-chave: Tixoconformação, condicionamento, reciclagem de alumínio.

Abstract

One of the prerequisites for thixoforming processing of alloys is a globular microstructure. This study used a deformation followed by recrystallization methodology in order to determine the minimum deformation and time needed to complete particle globularization of two new aluminum alloys in semi solid state (SSS). The required deformation for a maximum microstructural refinement was also researched. The alloys were cast from aluminum can scraps, adding up to 3.5% Si (Al_{3,5}Si) and the other alloy up to 4% Cu (Al₄Cu). The new alloys were rolled with deformations ranging from 5 to 30% and taken to the semisolid state SSS with soaking time ranging from 10 to 60 minutes. The microstructures were characterized by optical microscopy. The results show that the minimum deformation to promote entire globularization is between 5 and 10%. The increase of the total strain refines the microstructure; however, from about 20% of strain, it is necessary to improve the conformation conditioning to prevent the formation of cracks.

Keywords: Thixoforming, conditioning, aluminum recycling.

1. Introdução

Descoberta na década 70, as pastas metálicas, no estado semi-sólido com fase sólida globular, deram origem ao processo de tixotixão, que é, hoje, muito utilizado, principalmente na indústria automobilística (Chiarmetta, 1996; Birol, 2009; Cho & Kang, 2000; Kiuchi & Koop, 2002). Trata-se da conformação de ligas num intervalo de temperatura onde coexista a fase líquida e sólida, ou seja, estado semi-sólido (ESS). A fase sólida, necessariamente, deverá ter uma morfologia globular. É uma técnica economicamente viável por proporcionar alta produtividade, aumento da vida útil das matrizes, menor quantidade de defeitos no produto, propriedades mecânicas e

acabamento final de excelente qualidade. No entanto, apresenta algumas desvantagens, como alto custo da matéria-prima, equipamentos caros e rigoroso controle da microestrutura, devido à sensibilidade à temperatura (Fan, 2002). Os recentes estudos sobre novas ligas para tixotixão a partir da reciclagem de latas visam, exatamente, minimizar uma das desvantagens do processo, no que se refere ao alto custo da matéria-prima, além, é claro, dos benefícios ambientais (Alves, 2011). Um dos principais pré-requisitos das ligas utilizadas, nesse processo, é que possuam microestrutura não-dendrítica (Flemings, 1991). Para isso, diversos métodos foram desenvolvidos (Atkinson,

2005) e a esse conjunto de métodos dá-se o nome de condicionamento microestrutural.

Nesse trabalho, ligas produzidas, através do processo de reciclagem de latas (Alves, 2011), foram submetidas a um processo de deformação, como método de condicionamento microestrutural. Essas ligas sofreram reduções sucessivas e foram mantidas por diferentes tempos de encharque numa temperatura correspondente ao ESS. O objetivo foi determinar qual o tempo e qual a deformação mínimos necessários para uma completa globularização e qual refinamento máximo possível de ser obtido aumentando-se a deformação.

2. Procedimentos experimentais

Materiais

Para o presente trabalho, foram fundidas duas placas com dimensões de 16,5x10x20cm, a partir da fusão de um lote de latas de alumínio recicladas

(Alves, 2011). Foram fabricados, em um forno de indução, dois tipos de ligas: um contendo 3,5% de Si e o outro contendo 4% de Cu. O tipo contendo Si recebeu a

denominação de Al3,5Si e o tipo contendo Cu recebeu a denominação de Al4Cu. A composição química das ligas é apresentada na Tabela 1.

LIGA/lata	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
Al3,5Si	3,5	0,5	0,13	0,76	0,76	0,02	0,05	0,03	94,2
Al4Cu	0,8	0,5	4,10	0,80	1,09	0,02	0,03	0,05	92,6

Tabela 1
Composição química das ligas utilizadas (Alves, 2011).

Condicionamento microestrutural

As placas foram homogeneizadas em um forno tipo mufla da marca EDG, Modelo 1300, a uma temperatura de 530°C por 24h e resfriadas em água. Em um laminador “Duo” não reversível da marca Machine, as placas contendo Si foram laminadas a 350°C. A liga contendo Cu foi laminada à temperatura ambiente. As amostras, então

condicionadas, foram levadas ao ESS, utilizando-se um forno de indução da marca Inducto Heat, modelo B1960-7807-0, e os tempos de espera foram de 1,3,5,15,30 e 60min. Esse processo foi seguido de resfriamento rápido em água. Para a liga contendo 3,5% de Si, a deformação foi de 20% e, para a liga com 4,0% de Cu, foi de 25%. Para es-

tudar a influência da deformação, no nível de globularização das partículas, grupos de amostras, variando-se a deformação de 5 a 30%, foram feitos, mantendo-se constante o tempo de espera no ESS em 20min. Para todos os experimentos, visou-se a atingir uma temperatura onde a fração sólida f_s correspondesse a 0,6.

Análise metalográfica

Para o estudo metalográfico, a caracterização foi feita em um microscópio ótico Metallux 3 da marca Leitz. As amostras foram preparadas com lixas d'água com grana variando de 180 a

1000. Em seguida, receberam polimento com óxido de cromo (Cr_2O_3) e líquido DP azul. A liga Al-Si não foi atacada, tendo sido levada ao microscópio após o polimento com Cr_2O_3 . A liga de Al-Cu, após

o polimento com Cr_2O_3 , recebeu outra etapa de polimento com sílica coloidal. Em seguida, foi atacada com solução de 0,5% de HF por 20 segundos até que teve sua microestrutura revelada.

3. Resultados e discussão

Influência do tempo de espera

Na Figura 1, são apresentadas as micrografias para a liga Al4Cu laminada a 25% e mantida em diferentes tempos

de permanência no ESS. Pode-se perceber um aumento considerável no tamanho das partículas globularizadas à medida

que o tempo de permanência aumenta. A Figura 1(a) parece apresentar glóbulos bem definidos, enquanto que, na Figura

1(b), verifica-se um período de transição, onde os contornos de grão desaparecem em alguns pontos para dar lugar aos grãos maiores seguindo, talvez, um processo de coalescência (Kattamis et al., 1997; Loué & Suéry, 1995). Um fato importante analisado é que o crescimento é mais acelerado nos primeiros minutos do tratamento e, entre 15 e 60 minutos, o tamanho das partículas, praticamente, não sofre alterações. Nos primeiros instantes, também, se verifica uma quantidade maior de líquido aprisionado. O referido líquido, entretanto, desaparece rapidamente entre 1 e 5 min.

O resultado da análise microestrutural das ligas Al-3,5Si laminadas a 20% é apresentado na Figura 2. Para um tem-

po de espera no ESS de 1 minuto, verifica-se uma microestrutura recristalizada com contornos de grãos bem definidos. As dendritas da liga bruta de fusão desaparecem e tem-se a formação de partículas globulares. A partir daí, a liga apresenta uma microestrutura homogênea, sem muitas variações de tamanho, até 30 minutos (Figura 2-e), aumentando esse tamanho, consideravelmente, no tratamento de 60 minutos, onde se percebem grãos maiores. Esses resultados confirmam que o condicionamento transforma a microestrutura significativamente e não pode ser dispensado quando o objetivo for a globularização.

Diferentemente da liga Al4Cu, as amostras da liga Al3,5Si, logo no primei-

ro minuto, apresentaram-se mais limpas, não aprisionando quantidade significativa de líquido. Esse fenômeno de aprisionamento de líquido é comum, para os casos em que o crescimento das partículas se dá por coalescência (Kirkwood, 1994; Young & Kirkwood, 1975; Genda et al., 1987), pois os braços dendríticos, quando coalescem, podem circundar uma porção de líquido, retendo-o dentro da estrutura (Paes & Zoqui, 2004). O líquido aprisionado é um parâmetro microestrutural importante porque subtrai o líquido que vai controlar as condições de fluxo, em um processo de tixoonformação. No entanto, é uma variável que pode ser controlada com relativa facilidade, bastando, para isto, aumentar o tempo de espera no ESS.

Figura 1
Microestruturas da liga de Al4Cu laminada a 25% e mantida por diferentes tempos de permanência no ESS, $T=538^{\circ}\text{C}$, $f_s=0,6$.

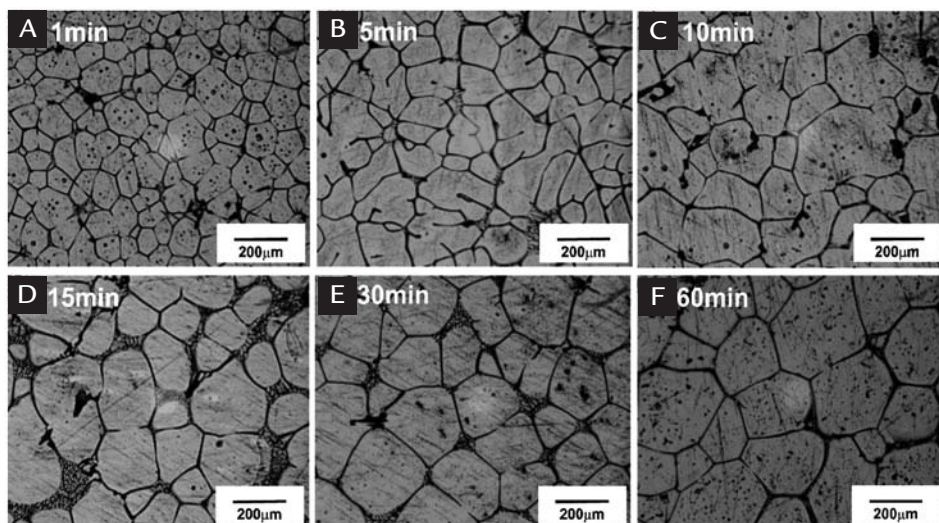
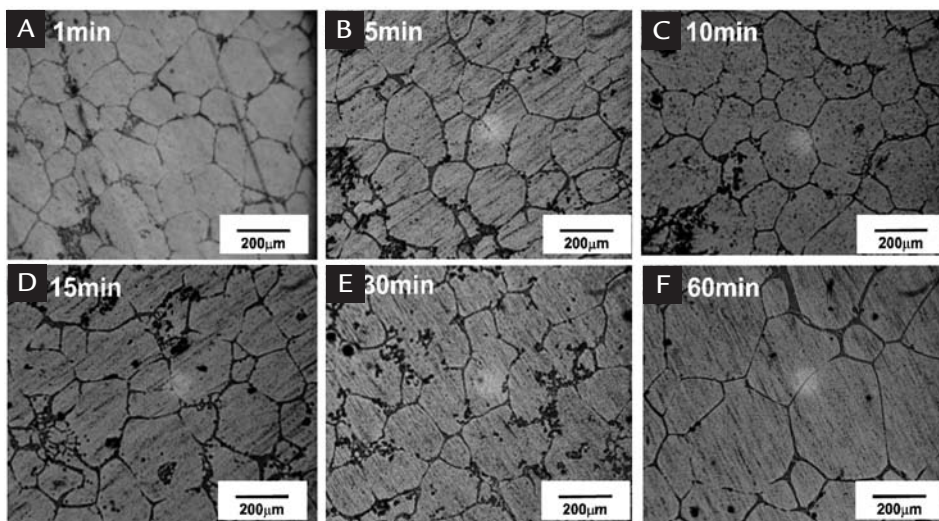


Figura 2
Microestruturas da liga Al3,5Si laminada a 20% em diferentes tempos de permanência no ESS, $T=610^{\circ}\text{C}$, $f_s=0,6$.



Influência da deformação

A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para liga Al4Cu, mostrando a influência da deformação na evolução microestrutural. Na Figura 3(a), é apresentada a microestrutura da liga deformada a 5% e verifica-se que esse nível de

deformação não é suficiente para causar alterações significativas na morfologia da liga. Nessas condições, o processo apenas favoreceu à formação de dendritas grosseiras, sem a presença de braços secundários. Ao se analisar a microestrutura com

10% de deformação, observa-se que os braços dendríticos desapareceram quase que por completo, o que caracteriza o processo de recristalização, onde a fase primária sólida alumínio “ α ” começa a se esferoidizar, devido à ação dos fenô-

menos de redução de energia superficial. Nas figuras seguintes, correspondentes às reduções de 15, 20 e 25%, verifica-se o processo de refino das partículas com contínua melhora do fator de forma “F” (Alves, 2011). Conclui-se que é possível obter uma microestrutura mais refinada, aumentando-se a deformação.

Para a liga Al3,5Si, percebe-se, também, que uma laminação de 5% não é suficiente para formar uma estrutura

globularizada. Na verdade, o que se consegue é uma estrutura composta por dendritas grosseiras. Uma deformação da ordem de 10% (Figura 4-b) apresenta uma microestrutura diferente, na qual predominam grãos que já podem ser considerados equiaxiais, mostrando que esse nível de deformação já foi suficiente para possibilitar a recristalização da liga. À medida que se aumenta o grau de redução, percebe-se um refinamento na microes-

trutura e os grãos globularizados diminuem consideravelmente, como mostram as Figuras 4b, 4c e 4d. O comportamento dessa liga é semelhante ao da liga Al4Cu apresentada anteriormente até 10% de deformação, depois disso a liga Al3,5Si sofre um refinamento, considerável que não se verifica na liga Al4Cu. Esse refino pode ser atribuído ao aquecimento da liga a 350°C, que favoreceu o processo de laminação até 30% de deformação.

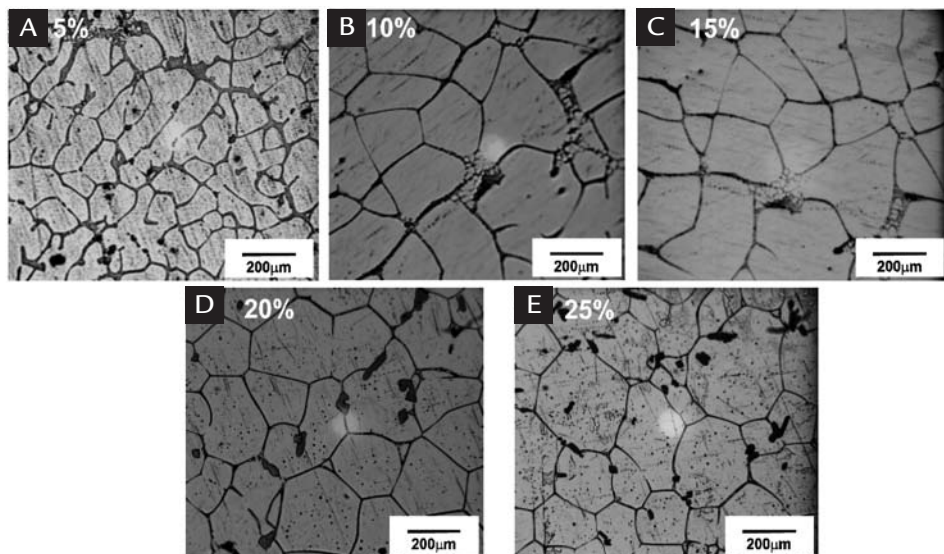


Figura 3
Microestruturas da liga Al-4Cu laminada em diferentes níveis de deformação com tempo fixo de 20 minutos, T=538°C, $f_s=0,6$.

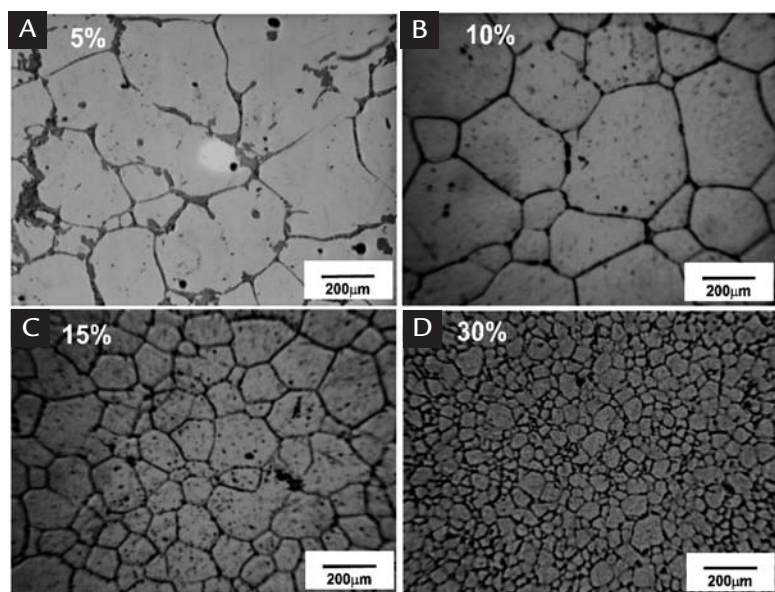


Figura 4
Microestruturas da liga Al3,5Si laminada em diferentes níveis de deformação com tempo fixo de 20 minutos, T=610°C, $f_s=0,6$.

Além disso, esse resultado sugere que a liga Al3,5Si possui uma maior capacidade de acumular defeitos, logo tem-se uma maior quantidade de “sítios” para nucleação e formação de novos grãos ou partículas. Para ambos os casos, o refino dos grãos é justificado pela deformação imposta ao material, que favorece um aumento do número de núcleos no processo de recristalização da liga (Vieira et al., 2007). Porém esse efeito ainda é objeto de estudo e várias teorias existem para

explicar esse fenômeno. Buscou-se descobrir até que ponto os grãos poderiam ser refinados. No entanto, para deformações da ordem de 25 a 30%, as ligas não suportaram os esforços, ocasionando a formação de trincas.

A Figura 5, apresenta algumas amostras onde se teve a ocorrência de trincas durante a etapa de laminação.

Para a liga Al4Cu, a máxima deformação obtida foi de 25% à temperatura ambiente. Já a liga de Al3,5Si, ao ser la-

minada à temperatura ambiente, suportou uma deformação máxima apenas de 20% e por isso, optou-se em aquecê-la a 350°C, para o desenvolvimento desse trabalho. Esse procedimento melhorou, consideravelmente, as condições de deformação, atingindo-se uma redução de 30%. Talvez, maiores reduções, nessas ligas, possam ser alcançadas, melhorando as condições de laminação. Por exemplo, o uso de um laminador, com cilindros de diâmetro maior, pode ser uma alter-

nativa que, devido ao maior contato com o lingote, diminuiria o empenamento, aliviando, conseqüentemente, a formação de trincas. Por fim, há de se desta-

car que, para as duas ligas, foi possível obter placas íntegras com uma deformação de 20%. Para esses casos, embora a microestrutura não seja a mais refinada

possível, ela é globular, constituindo-se, assim, em um excelente requisito para se desenvolverem ligas para o processo de tixoconformação.



Figura 5
Amostras das ligas Al-Cu e Al-Si laminadas com ocorrência de trincas.
A) Al-Cu ($\epsilon=25\%$, $T = \text{ambiente}$).
B) Al-Si ($\epsilon=20\%$, $T = \text{ambiente}$).
C) Al-Si ($\epsilon=30\%$, $T = 350^\circ$).

4. Conclusões

Basicamente, os estudos, para desenvolvimento de novas ligas, para conformação no ESS, envolvem três etapas: evolução microestrutural, estudos reológicos e propriedades mecânicas. Nesse trabalho, focou-se no primeiro aspecto e várias informações importantes foram obtidas.

Podemos destacar como conclusões relevantes, as seguintes:

- A deformação mínima necessária

para uma completa globularização em ambas as ligas está entre 5 e 10%.

- Para os tipos de condicionamentos diferentes adotados em cada liga, verifica-se que a microestrutura dendrítica desaparece, completamente, a partir de tempos inferiores a 1min.
- Para um mesmo nível de deformação, o condicionamento utilizado, na nova liga contendo Si, produz partículas

mais refinadas, quando comparado com o condicionamento utilizado na liga contendo Cu.

- Para ambas as ligas, não foi determinada a deformação máxima, a partir da qual não seria mais possível refinar o tamanho de partícula. No entanto, até os níveis de deformação estudados, está comprovado que, quanto maior a deformação, mais refinada será a microestrutura.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES - Fundação de Amparo a Pesquisa do Es-

pírito Santo, pelo suporte financeiro e ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvol-

vimento Científico e Tecnológico.

6. Referências bibliográficas

- ALVES, G. F. *Desenvolvimento de novas ligas para processos de conformação no estado semi-sólido a partir de alumínio reciclado*. Espírito Santo: IFES - Instituto Federal do Espírito Santo, 2011. 115p. (Dissertação de Mestrado).
- ATKINSON, H. V. Modelling the semisolid processing of metallic alloys. *Progress in Materials Science*, v.50, n. 3, p. 341-412, 2005.
- BIROL, Y. Forming of AlSi8Cu3Fe alloy in the semi-solid state. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 470, n.1-2, p. 183-187, 2009.
- CHIARMETTA, G. Thixoforming of automobile components. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SEMI-SOLID PROCESSING OF ALLOYS AND COMPOSITES, 4. England: Sheffield, 1996. p. 204-207.
- CHO, W. G., KANG, C. G. Mechanical properties and their microstructure evaluation in the thixoforming process of semi-solid aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 105, n. 3, p. 269-277, 2000.
- FAN, Z. Semisolid metal processing. *International Materials Reviews*, v. 47, n. 2, p. 49-85, 2002.
- FLEMINGS, M. C. Behavior of metal alloys in the semisolid state. *Metallurgical Transactions*, v.22A, p. 957-981, 1991.
- GENDA, G., YUYON, C., GEING, A. Mechanism of coarsening of dendrite during solidification. In: SOLIDIFICATION PROCESSING CONFERENCE. *Proceedings...* Inglaterra: Sheffield, 1987. p. 416-419.
- KATTAMIS, T. Z., COUGHIN, J. L., FLEMINGS, M. C. Influence of coarsening on dendritic arm spacing of Al₂Cu alloys. *Transactions of the Metallurgical Society of AIME*, v.239, p.1504-1511, 1967.
- KIUCHI, M., KOPP, R. Mushy/semi-solid metal forming technology - present and future. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, v. 51, n. 2, p. 653-670, 2002.
- KIRKWOOD, D. H. Semisolid metal processing. *International Materials Review*, v.39, p.173-189, 1994.

- LOUÉ, W.R., SUÉRY, M. Microstructural evolution during partial remelting of Al-Si7Mg alloys. *Materials Science Engineering*, v. A203, p. 1-13, 1995.
- PAES, M., ZOQUI, E.J. Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg reofundidas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 16. *Anais...* Porto Alegre, 2004.
- VIEIRA, E. A., KLIAUGA, A. M., FERRANTE, M. On the formation of spheroidal microstructures in a semi-solid Al-Si alloy by thermomechanical processing. *Scripta Materialia*, v.57, n. 12, p. 1165-1168, 2007.
- YOUNG, K.P., KIRKWOOD, D. H. The dendrite arm spacing of aluminium-copper alloys solidified under steady-state conditions. *Metallurgical Transaction*, v. 98, pp. 871-878, 1975.
-

Artigo recebido em 19 de maio de 2011. Aprovado em 16 de agosto de 2011.