

EVOLUÇÃO MICROESTRUTURAL DAS LIGAS Al-3,5%Si E Al-4%Cu PRODUZIDAS A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLADO E CONDICIONADAS POR DEFORMAÇÃO¹

Gianni Ferreira Alves²
Eric Moraes Romagna³
Vinicius Andreatta³
José Roberto de Oliveira⁴
André Itman Filho⁴
Estéfano Aparecido Vieira⁴

Resumo

Um dos pré-requisitos para as ligas conformadas na faixa de temperatura semi-sólida é que apresentem microestrutura não dendrítica. O presente trabalho analisa o comportamento microestrutural de duas ligas de alumínio com adições Cu ou Si produzidas a partir de latas recicladas e condicionadas por deformação para posterior processo de tixoconformação. Aqui se estudou a influência da deformação e do tempo de espera no ESS sobre a evolução microestrutural das novas ligas. Amostras foram deformadas de 5% a 30% e aquecidas até o estado semi-sólido (ESS) com o tempo de espera variando de 0 a 60 minutos. As microestruturas foram caracterizadas por microscopia ótica. Os resultados mostram que ambas as ligas sofrem modificações significativas na microestrutura final, em função do tempo de espera, e do nível de deformação imposto.

Palavras-chave: Tixoconformação; Semi-sólido; Condicionamento; Liga Al-Si; Liga Al-Cu.

MICROSTRUCTURAL EVOLUTION OF THE ALLOY Al-3,5%Si and Al-4%Cu PRODUCED FROM RECYCLED ALUMINIUM AND CONDITONED BY DEFORMATION

A requirement for forming alloys in a semi-solid range temperature is a non dendritic microstructure. This paper analyzes the microstructural behaviour of two aluminum alloys with Cu or Si additions produced from recycled cans and conditioned by deformation for later thixoforming. It were studied the deformation and the resting time in semi-solid state influence on the microstructural evolution of new alloys. Samples were worked from 5% to 30% and were taken to the semi solid state (SS) for a resting time ranging between 0 min to 60 min. The microstructures were characterized by optical microscopy. The results show that both alloys have significant changes in the final microstructure, depending on waiting time, and the strain imposed.

Key words: Thixoforming; Semi-solid; Conditioning; Al-Si alloy; Al-Cu alloy.

¹ Contribuição técnica ao 12º Seminário de Metais Não-ferrosos, 31 de outubro a 1 de novembro de 2011, São Paulo, SP.

² Mestre em Metalurgia e Materiais – IFES.

³ Graduando Engenharia Metalúrgica – IFES.

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais – IFES. estefanovieira@ifes.edu.br

1 INTRODUÇÃO

O processo de tixoconformação é utilizado principalmente nas indústrias automobilísticas.⁽¹⁾ Trata-se da conformação de ligas num intervalo de temperatura onde coexistam as fases líquida e sólida, chamado de estado semi-sólido (ESS). 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 difícil controle da microestrutura devido à sensibilidade a temperatura.⁽²⁾

Estudos sobre novas ligas para Tixoconformação 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.⁽³⁾ Um dos principais pré-requisitos das ligas utilizadas neste processo é que possuam microestrutura não-dendríticas,⁽⁴⁾ para isso diversos métodos foram desenvolvidos⁽⁵⁾ e a este conjunto de métodos dá-se o nome de condicionamento microestrutural.

Neste trabalho, ligas produzidas através do processo de reciclagem de latas⁽³⁾ foram submetidas a um processo de deformação, como método de condicionamento. Estas ligas sofreram reduções sucessivas e foram mantidas por diferentes tempos de encharque na temperatura correspondente ao seu ESS com o objetivo de determinar qual o tempo e deformação mínimos necessários para uma completa globularização. Foi estudado também, o nível de globularização das partículas através da análise do fator de forma em função dos tempos e deformações aplicados.

2 METODOLOGIA

2.1 Materiais Utilizados

Para o presente trabalho foram utilizadas as ligas Al-3,5Si e Al-4Cu produzidas a partir de processos de reciclagem de latas de alumínio.⁽³⁾ Foram fundidas placas com as dimensões aproximadas de 25x20x3,5cm. A Tabela 1 apresenta a composição química das ligas utilizadas.

Tabela 1: Composição química das ligas utilizadas⁽³⁾

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

2.2 Condicionamento Microestrutural: Deformação

Antes do condicionamento as placas foram homogeneizadas em um forno tipo mufla a uma temperatura de 530°C por 24 h e resfriadas em água. Em seguida, foram laminadas a 350°C para a liga contendo Si e a temperatura ambiente para a liga contendo Cu em um laminador “Duo” não reversível. As amostras então condicionadas foram levadas ao ESS utilizando-se um forno de indução e o tempo de espera foi de 10 min ou 20 min 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 estudar a influência da deformação amostras com 15% de deformação foram levadas ao ESS por 20 min.

2.3 Metalografia

As amostras foram preparadas com lixas de granulometria entre 180 e 1000. Em seguida receberam polimento com óxido de cromo (Cr_2O_3) e líquido DP azul. A liga Al-3,5Si não foi atacada tendo sido levada ao microscópio após o polimento com Cr_2O_3 . A liga de Al-4Cu, 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.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 1 compara a microestrutura bruta de fusão das ligas Al-4Cu e Al-3,5Si com e sem homogeneização. Para ambas as ligas notam-se a mudança da microestrutura. Conforme esperado não ocorre efetiva globularização, entretanto com o tempo de tratamento a fase eutética sofre um engrossamento e preenche os intervalos entre os braços dendríticos, desconectando-os e favorecendo também engrossamento da fase primária.

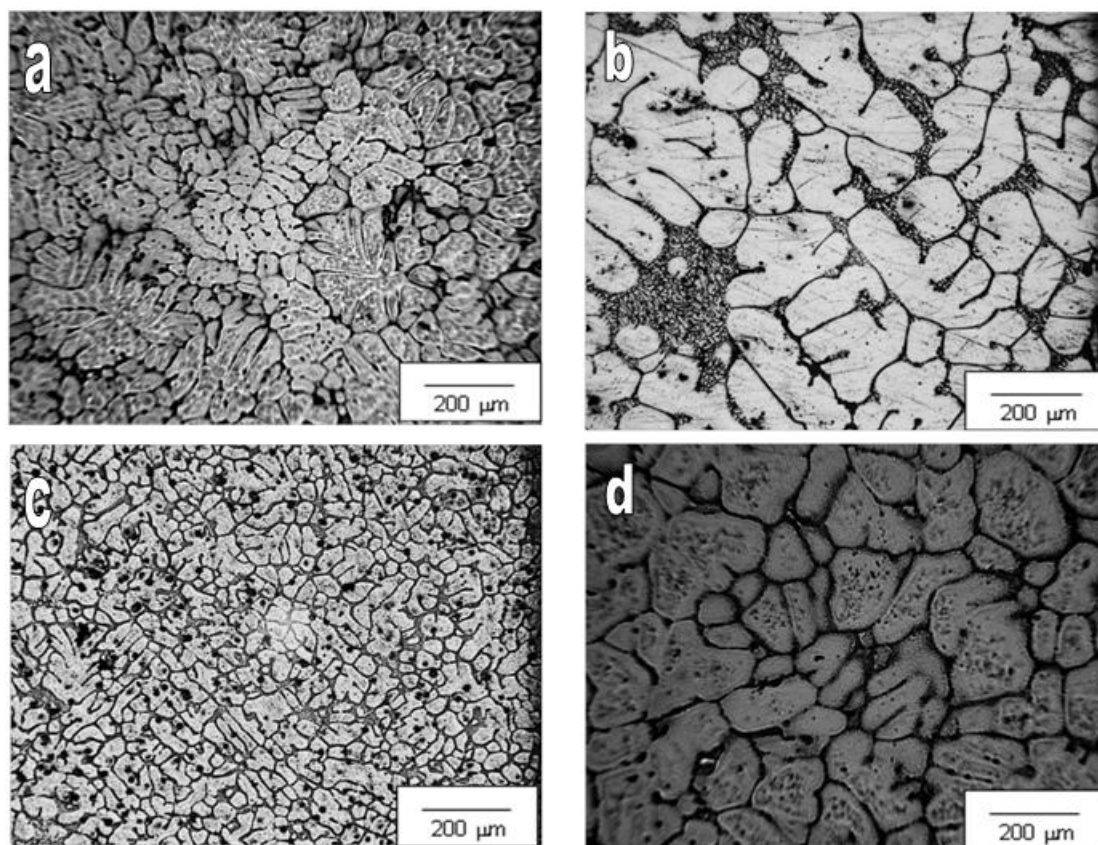


Figura 1: Microestruturas brutas de fusão das ligas Al-4Cu (a) e (b) e Al-3,5Si (c) e (d), (a) e (c) não-homogeneizadas e (b) e (d) homogeneizadas.

Na Figura 2 são apresentadas as micrografias para a liga Al-4Cu e Al-3,5Si laminadas e mantidas no ESS por 10 minutos. Pode-se perceber um engrossamento da fase primária, bem como a presença de partículas globularizadas.

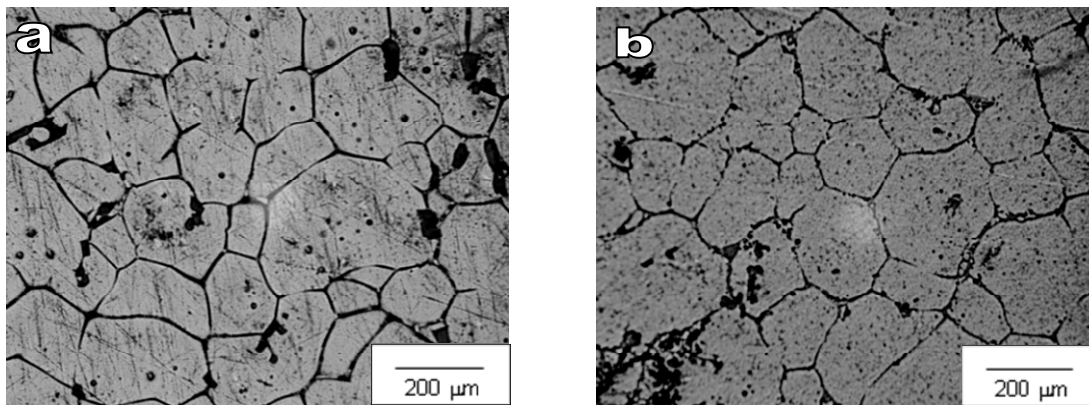


Figura 2: Microestruturas da liga mantidas no ESS por 10 min e $f_s=0.6$ (a) Al-4Cu laminada a 25% e mantida no ESS, T= 638°C. (b) Al-3,5Si laminada a 20% mantidas no ESS, T=610°C.

Para ambas as ligas, podemos observar a presença de uma microestrutura recristalizada com contornos de grãos bem definidos saindo de uma forma dendrítica para globular. Medidas do tamanho de partícula mostram que a liga contendo Si apresenta-se com partículas maiores, sendo o diâmetro médio medido igual a 82μm contra 62 μm para a liga contendo Cu. Estes resultados confirmam que o condicionamento transforma a microestrutura significativamente e não pode ser dispensado quando o objetivo for a globularização.

A Figura 3(a) apresenta a microestrutura da liga Al-4Cu deformada a 25% porém mantida no ESS por 20min, novamente observa-se a ausência dos braços dendríticos, o que caracteriza o processo de recristalização onde a fase primária α ficou equiaxial com melhoria do fator de forma F definido pela seguinte equação:

$$F = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$$

onde, A e P representam a área e o perímetro da partícula, respectivamente. O fator de forma varia entre 0 para objetos com seção alongada e 1 para objetos com forma perfeitamente esférica.

Para a liga Al-3,5Si, o comportamento é bem diferente, pois a Figura 3b mostra um refino de partículas mais eficiente. Este refino pode ser atribuído ao aquecimento a 350°C que permitiu o processo de laminação até 30% de deformação. Mas, além disso, estes resultados sugerem que a liga Al-3,5Si é mais favorável a globularização, pois, mesmo sob deformação a temperatura de 350°C apresentou melhor resultado. Assim, o refino dos grãos é justificado pela deformação imposta ao material o qual promove um aumento do número de núcleos no processo de recristalização da liga.⁽⁶⁾ Porém, a explicação para este efeito ainda é objeto de estudo e deverá ser melhor investigada em trabalhos futuros.

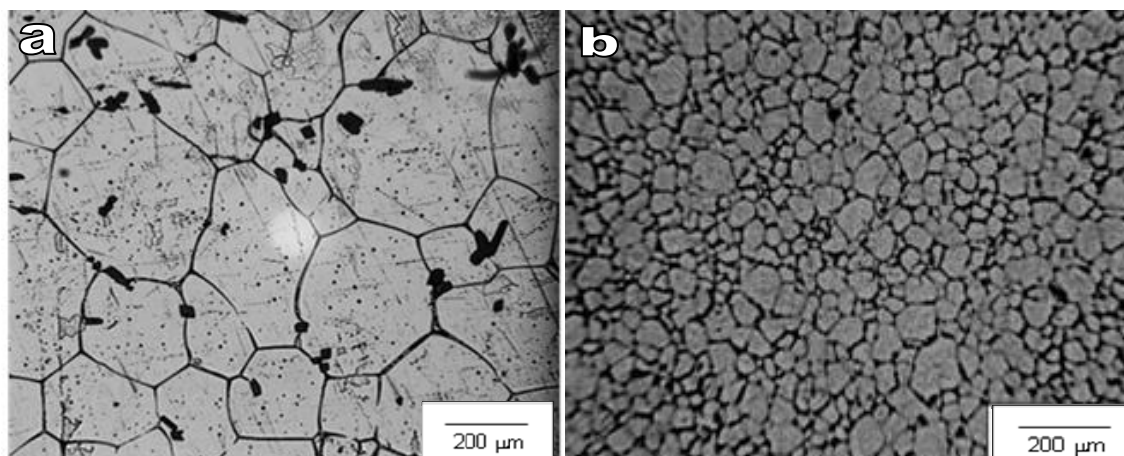


Figura 3: Microestruturas das novas ligas mantidas no ESS por 20 min (a) Al-4Cu, 25% de deformação, $T=638^{\circ}\text{C}$, $f_s=0,6$ (b) (a) Al-3,5Si, 30% de deformação, $T=610^{\circ}\text{C}$, $f_s=0,6$.)

3.1 Evolução do Fator de Forma (F)

A Figura 4 mostra valores de fator de forma em função do tempo de permanência no ESS para as ligas Al-4Cu e Al-3,5Si. Pode-se verificar que para ambas as ligas, à medida que o tempo aumenta o valor de F aproxima-se de 1. Para a liga Al-4Cu, entre 1 e 10 minutos ocorre uma queda no valor de F. Em 1 minuto a microestrutura está bem definida, já entre 5 minutos e 10 minutos ela se encontra numa fase de rearranjo e os contornos não delimitam bem a forma das partículas, isso ocorre provavelmente devido ao processo de coalescimento. Em seguida, há certo equilíbrio e o fator de forma se mantém ligeiramente crescente. Já para a liga Al-3,5Si esta queda ocorre entre 10 minutos e 15 minutos, porém neste caso a variação é mínima e pode ser atribuído à um nível maior de precipitados presentes nos contornos das amostras de 15 minutos.

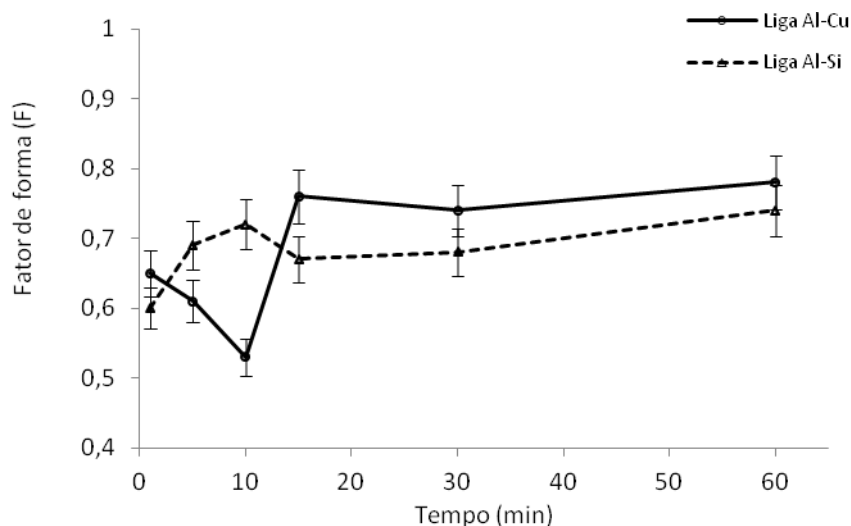


Figura 4: Fator de forma em função do tempo de permanência para as ligas Al-4Cu e Al-3,5Si, $f_s=0,6$. Para a liga Al-4Cu, $T=638^{\circ}\text{C}$ e $\epsilon=25\%$. Para a liga Al-3,5%Si, $T=610^{\circ}\text{C}$ e $\epsilon=20\%$.

Outro resultado que foi analisado é a influência do nível de deformação sobre o fator de forma. A tendência é que quanto maior a deformação imposta ao material, maior deve ser o valor do fator de forma, tendendo a 1, ou seja, mais globularizada a

microestrutura. Porém não é o que se verifica para a liga de Al-4Cu, mostrada na Figura 5. Aqui se percebe que o valor do fator de forma decresce no primeiro instante, mas entre 10 e 15% de deformação cresce consideravelmente e no passe de 20% torna a cair, o que pode ser explicado por eventos de coalescimento de partículas. Já para a liga Al-3,5%Si os resultados apontam um fator de forma mais estável e próximo de 1. Talvez o que favoreceu este resultado foi a laminação chegando aos 30% de redução, fato este possibilitado pelo aquecimento da liga antes da conformação. Este resultado confirma que a liga Al-3,5Si é mais favorável a globularização do que a liga Al-4Cu, nas condições estudadas.

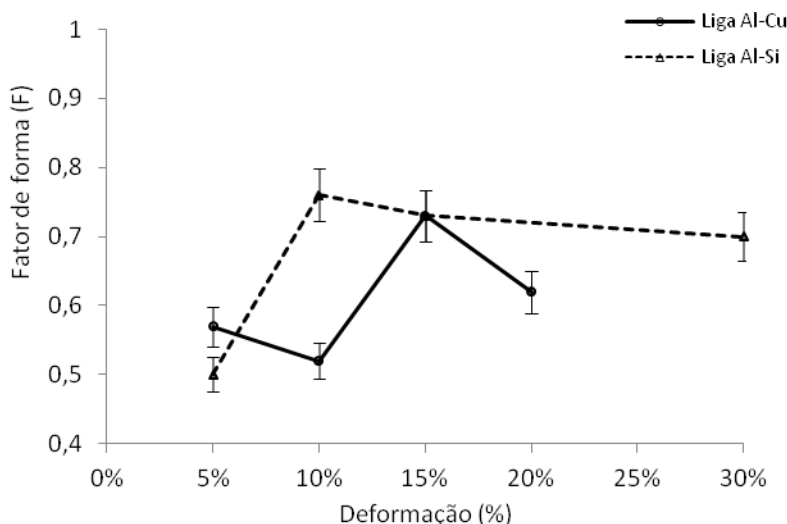


Figura 5: Gráfico dos fatores de forma em função da deformação para as ligas Al-4Cu e Al-3,5Si. Tempo de espera=20min e $f_s=0,6$.

3.2 Evolução no Tamanho da Partícula

Analisando o tamanho da partícula em função do tempo de permanência, as duas ligas apresentaram resultados dentro do esperado, que eram partículas maiores com o passar do tempo. Isso devido ao contato entre elas que favorecem o crescimento por coalescência e/ou por competição. A Figura 6 mostra os resultados obtidos e tanto a liga de Cu quanto a de Si tem-se um crescimento contínuo no tamanho das partículas, chegando a valores próximos a 128 μ m para a liga Al-4Cu e 163 μ m para a liga Al-3,5Si.

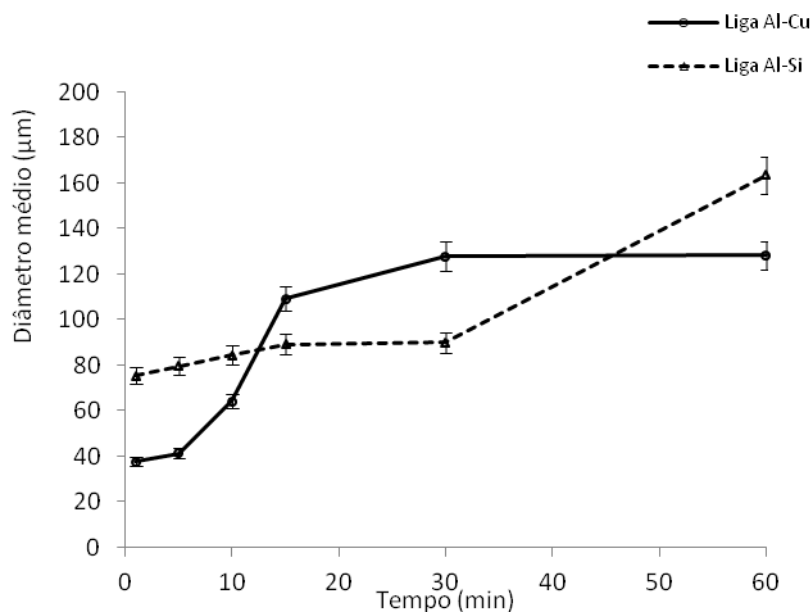


Figura 6: Gráfico do diâmetro médio em função do tempo de permanência, $f_s=0,6$. Para a liga Al-4Cu, $T=638^\circ\text{C}$ e $\epsilon=25\%$. Para a liga Al-3,5Si, $T=610^\circ\text{C}$ e $\epsilon=20\%$.

4 CONCLUSÃO

Diante do exposto as principais conclusões que podem ser tiradas deste trabalho são as seguintes:

- a deformação favorece a globularização e o refino de partículas para as novas ligas estudadas no ESS;
- considerando os condicionamentos estudados, a liga Al3,5Si apresentou uma microestrutura mais refinada no ESS. Não foi possível estabelecer claramente se é devido às diferenças intrínsecas entre as ligas ou se é devido a rota de condicionamento escolhida; e
- o fator de forma melhora com o aumento da deformação total imposta. Nas condições estudadas a liga Al-3,5Si apresentou melhores resultados.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPES – Fundação de Amparo a Pesquisa do Espírito Santo, pelo suporte financeiro e ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.



REFERÊNCIAS

- 1 CHIARMETTA, G.: Thixoforming of automobile components. In: **4th International Conference. on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites**, Sheffield, England, p. 204-207, 1996.
- 2 FREITAS, E de; FERRANTE, M.: Estudos sobre a influência de tratamentos termomecânicos na microestrutura de ligas Al-Cu no estado semi-sólido. In: **Jornada SAM-CONAMET 2001**. Misiones, Argentina, p. 99-108, 2001.
- 3 ALVES, G.F.: **Desenvolvimento de novas ligas para processos de conformação no estado semi-sólido a partir de alumínio reciclado. 2011**. 115p. Dissertação de Mestrado. IFES – Instituto Federal do Espírito Santo. ES. 2011.
- 4 FLEMINGS M. C.: Behavior of metal alloys in the semisolid state, **Metallurgical Transactions**, v.22A, p. 957-981, 1991.
- 5 SPENCER, D.B. MEHRABIAN, R.; FLEMINGS, M.C.: Rheological Behavior of Sn-15%Pb in crystallization range. **Metals Transactions**, v.3, p. 1925-1932, 1972.
- 6 PAES, M. **Obtenção e caracterização de novas ligas Al-Si-Mg para tixoconformação. 2004**. 155p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, São Paulo, 2004.