

Refino de grão versus agitação eletromagnética: caracterização microestrutural e mecânica da liga Al4Si2.5Cu tixoforjada

Grain refining versus electromagnetic stirring techniques: microstructural and mechanical characterization of the thixoforged Al4Si2.5Cu alloy

Luis Vanderlei Torres^{1,2} , Camila Sola Ruiz³, Eugênio José Zoqui²¹Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de São Paulo. Bragança Paulista, SP, Brasil.²Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Manufatura e Materiais. Campinas, SP, Brasil.³Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Semicondutores, Instrumentos e Fotônica. Campinas, SP, Brasil.

e-mail: torres@ifsp.edu.br, camilasr@dsif.fee.unicamp.br, zoqui@unicamp.br

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a tixoconformabilidade da liga Al4Si2.5Cu sob duas diferentes rotas de produção: técnica via refino de grão e via agitação eletromagnética, abrangendo desde a obtenção da liga até sua caracterização microestrutural e mecânica após o processo de tixoforjamento em uma prensa excêntrica mecânica. A liga foi submetida a tratamentos térmicos de globularização que promovem a globularização das partículas de fase primária pelos tempos de 0s e 210s na fração sólida de 45% e na sequencia tixoforjada. Os ensaios de tixoforjamento mostraram que a força necessária de fechamento da matriz é praticamente constante, independentemente do tempo de globularização, ficando em torno de 70 kN, utilizando menos de um terço da capacidade da prensa. Com relação a sua morfologia para ambas as rotas de produção, a mesma apresentou morfologia globular para ambos os tempos de tratamento térmico. As peças tixoforjadas apresentaram boa conformabilidade preenchendo toda a matriz e reproduzindo sua geometria, além de apresentar boas propriedades mecânicas nos ensaios de tração, ou seja, o valor limite de resistência à tração principalmente quando utilizado a rota de produção via agitação eletromagnética apresentou valores próximos a 200 MPa. Demonstrando que a liga torna-se propícia aos processos de tixoconformação.

Palavras-chave: Tixoconformação; Refino de grão; Agitação eletromagnética; Liga Al4Si2.5Cu.**ABSTRACT**

The objective of this work was to evaluate the thixoformability of the Al4Si2.5Cu alloy under two different production routes: the techniques via grain refining and via electromagnetic stirring, ranging from obtaining the alloy to its microstructural and mechanical characterization after the thixoforging process in a mechanical eccentric press. The alloy was subjected to globularization heat treatments promoting the globularization of the primary phase particles for 0s and 210s in the 45% solid fraction and the thixoforged sequence. The thixoforging tests showed that the necessary force to close the die is practically constant, regardless of the globularization time, remaining around 70 kN, using less than a third of the press capacity. Regarding its morphology for both production routes, it presented a globular morphology for both heat treatment times. The thixoforged parts showed good formability, filling the entire matrix and reproducing its geometry, in addition to presenting good mechanical properties through tensile tests, that is, the limit value of tensile strength, especially when using the production route via electromagnetic stirring, presented values close to at 200 MPa. It demonstrates that the alloy becomes suitable for thixoforging processes.

Keywords: Thixoforging; Grain refining; Electromagnetic stirring; Al4Si2.5Cu alloy.

1. INTRODUÇÃO

Muito tem-se discutido, referente à necessidade na redução de energia aplicada nas várias etapas dos processos de fabricação, visando o melhor desempenho dos custos nas indústrias, ou seja, a diminuição das etapas envolvidas na fabricação, com aplicação contínua de melhorias e mantendo a qualidade dos produtos obtidos ao final do processo produtivo. Por esse motivo, os processos de reofundição e tixoconformação têm ganhado mercado e importância nos últimos anos, sendo que a conformação semissólida, nada mais é do que o processamento de peças metálicas a partir de materiais parcialmente solidificados ou semissólidos [1, 2].

As ligas de alumínio são amplamente empregadas como matéria-prima nos processos de fundição e mais recentemente aos processos de tixoconformação e o seu amplo emprego deve-se às boas características apresentadas, tais como: alta fluidez, alta resistência à corrosão, boa soldabilidade, baixo coeficiente de expansão térmica, entre outras. Estas ligas possuem um amplo campo de aplicação, sejam elas na indústria marítima, automobilística, elétrica, alimentícia ou aeronáutica [3, 4]. Para a liga Al-Si-Cu desenvolvida neste trabalho, os seus principais elementos de ligas são o silício e o cobre; desta forma segue alguns comentários acerca da influência de cada um destes elementos no comportamento final das ligas fundidas: a) silício: o efeito majoritário da adição de silício nas ligas de alumínio é a melhora nas características da fundição, ou seja, melhora na fluidez, na resistência a trincas de contração e características de alimentação do metal líquido, além da redução do peso específico e o coeficiente de expansão térmica; b) cobre: tem como efeito a melhora substancial da dureza e resistência mecânica das ligas, seja em condição bruta de fusão ou após tratamentos térmicos [5].

As ligas de alumínio solidificam-se com estruturas dendríticas, porém as propriedades mecânicas dessas ligas podem ser melhoradas pela transformação de sua estrutura dendrítica em uma estrutura globular; a aplicação de tensões de cisalhamento na região semissólida leva à fragmentação dos braços dendríticos que se tornam pequenas partículas, se transformando em morfologia de rosetas ou então em formas globulares [6, 7]. Existem inúmeras técnicas sendo utilizadas nos processos de tixoconformação para o refinamento de grãos nas ligas de alumínio, entre elas citaremos a técnica via refino de grão e a técnica via agitação eletromagnética (que fazem parte do escopo deste trabalho). A técnica via refino de grão ocorre através da adição de agentes nucleantes ao banho fundido, sendo que um agente nucleante é uma substância adicionada intencionalmente ao líquido para agir como um catalisador da nucleação. Industrialmente um grande número de agentes nucleantes são utilizados no refino de grãos, por exemplo, titânio e boro para ligas de alumínio (liga AlTiB) [8]. A técnica via agitação eletromagnética ocorre pela ação de fortes campos eletromagnéticos no líquido em solidificação. As correntes elétricas induzidas pelo campo promovem uma forte agitação, rompendo a estrutura em formação, estimulando a multiplicação cristalina e sua conseqüente globularização. O metal inicia a solidificação com estrutura dendrítica, que é rompida pela ação da turbulência gerada no metal líquido [9].

Portanto, este trabalho tem como objetivo apresentar resultados sobre a viabilidade da utilização de duas rotas diferentes de produção para os processos de tixoconformação, a saber: técnica via refino de grão e técnica via agitação eletromagnética para a liga Al4Si2.5Cu, sendo esta liga tixoforjada em prensa excêntrica e na seqüência submetida à caracterização microestrutural e mecânica.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho no qual irá avaliar a liga Al4Si2.5Cu como matéria-prima para os processos de tixoconformação apresenta-se em: a) produção da liga sob duas diferentes rotas, b) execução do processo de tixoforjamento em prensa excêntrica, c) caracterização microestrutural da liga tixoforjada durante o tratamento térmico de globularização e d) caracterização do comportamento mecânico através de ensaios de tração. Para tanto, utilizou-se a temperatura correspondente à fração sólida de 45% com dois tempos de tratamento de reaquecimento 0s e 210s.

2.1. Produção da liga

A liga Al4Si2.5Cu foi produzida em um forno poço resistivo com potência de 13.000 W utilizando-se uma mistura de ligas base, a saber: liga A356, alumínio comercialmente puro (Al cp), cobre comercialmente puro (Cu cp) e refinador de grão Al5Ti1B.

A produção da liga via técnica de refino de grão ocorreu da seguinte forma: as ligas A356 e Al cp foram aquecidas à temperatura de 750 °C para sua completa fusão em cadinho de SiC sendo adicionado o Cu cp e mantido por cerca de 10 minutos, sendo periodicamente agitado para sua dissolução e homogeneização na mistura da liga fundida; passado o tempo estabelecido, foi adicionada a liga refinadora Al5Ti1B (200 gramas ou 4% em peso) com o objetivo de obter a liga com estrutura não dendrítica (globularização da fase primária), sendo o tempo de contato do refinador com a liga de aproximadamente um minuto e na seqüência, o material foi vazado a uma temperatura de cerca de 50 °C acima da temperatura *liquidus* estimada através do *software* Thermo-Calc®

em lingoteiras cilíndricas de aço carbono AISI 1045 com uma fina camada de alumina em solução aquosa nas paredes internas das lingoteiras para permitir que os lingotes solidificados fossem facilmente desmoldados [10].

A produção da liga via técnica de agitação eletromagnética ocorre da mesma forma, porém seu vazamento ocorre em um sistema de lingotamento estanque, constituído por uma lingoteira refrigerada, feita em cobre, envolta por um indutor eletromagnético com potência de 8000 W capaz de produzir um campo magnético de 13 Gauss [11]. Para cada técnica de produção preparou-se 5 kg de material, gerando 12 lingotes, com 250 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro; devido aos erros inerentes aos processos de pesagem, fundição e análise química, assumiu-se uma tolerância de $\pm 0.50\text{wt}\%\text{Si}$ e $\pm 0.2\text{wt}\%\text{Cu}$. A análise da composição química foi realizada em um equipamento de espectrometria de emissão óptica, modelo *Bill-Oes* e o resultado pode ser visto na Tabela 1.

2.2. Caracterização das temperaturas

A determinação do intervalo de temperatura entre a linha *solidus* e *liquidus*, zona onde a liga apresenta em equilíbrio as fases sólida e líquida é fundamental para a obtenção da pasta semissólida com estrutura globular utilizada como material de partida nos processos de tixoconformação. Nas simulações com o *software* Thermo-Calc® utilizou-se a base de dados termodinâmicos TTA15, utilizando a composição ideal da liga, excluindo-se, portanto, quaisquer inclusões ou elementos residuais; nestas simulações, o *software* empregou uma rotina de cálculos avaliando condições de solidificação dentro e fora do equilíbrio, tomando como base os modelos da Regra da Alavanca e Scheil, respectivamente, determinando assim as temperaturas *solidus*, *liquidus* e a temperatura de trabalho correspondente a fração sólida de 45%.

Salienta-se que a escolha da temperatura de trabalho correspondente à fração sólida de 45% deve-se a trabalho anterior [12] que verificou que a liga deste estudo apresentou excelentes valores referentes ao fator de forma de circularidade, além de apresentar os melhores resultados em termos de viscosidade aparente, ou seja, comprovando de fato a tese de que quando o material possui uma microestrutura composta por glóbulos primários praticamente circulares, isto se traduz em um melhor comportamento durante o escoamento do material nos testes de compressão a quente, característica favorável ao processo de tixoconformação, contribuindo assim para a execução deste trabalho ao analisar o seu comportamento mecânico. Na Figura 1 encontra-se a curva de fração líquida *versus* temperatura estimada pelo *software* Thermo-Calc® para a liga em estudo e na Tabela 2 tem-se as temperaturas encontradas, levando-se em conta uma possível variação de ± 2 °C em seu controle.

Tabela 1: Caracterização da composição química da liga Al4Si2.5Cu [% peso] via espectrometria de emissão óptica.

Al	Si	Cu	Mg	Ti	Fe
Bal.	3,84 \pm 0,16	2,49 \pm 0,30	0,16 \pm 0,006	0,15 \pm 0,006	0,14 \pm 0,01

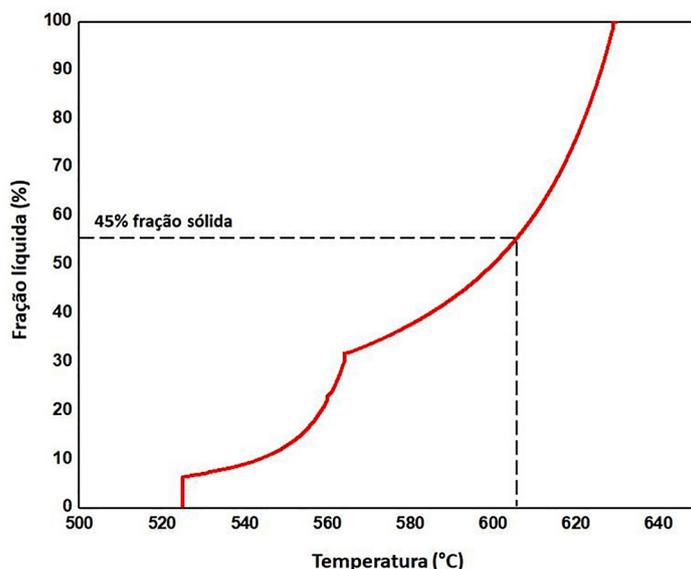


Figura 1: Curva da fração líquida *versus* temperatura para a liga Al4Si2.5Cu estimada pelo *software* Thermo-Calc®.

Tabela 2: Temperaturas obtidas via simulação *software* Thermo-Calc® [°C].

T <i>solidus</i> [°C]	T <i>liquidus</i> [°C]	ΔT [°C]	T trabalho [°C]
525	627	102	605

2.3. Processo de tixoforjamento em prensa excêntrica

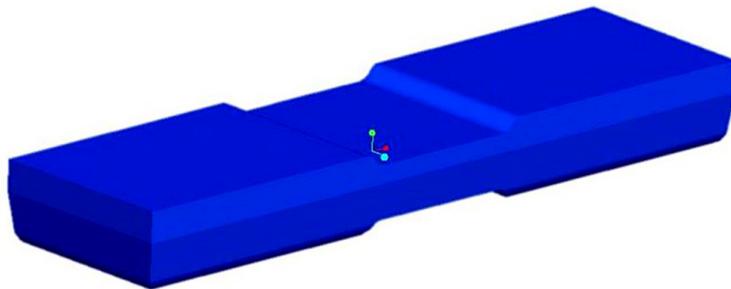
A matriz de tixoforjamento utilizada neste trabalho foi projetada através da ferramenta gráfica *software* Pro Engineer® com o intuito de obter um produto final (Figura 2) que atendessem alguns critérios, a saber: possuir geometria suficiente para a retirada de três corpos de prova para o ensaio de tração, área central do corpo de prova deveria possuir a maior deformação durante o processo de tixoforjamento e possuir raios e chanfros de maneira a facilitar o escoamento do material dentro da matriz, assim como sua extração [13].

A liga de alumínio foi tixoforjada em uma prensa excêntrica com capacidade de 25 toneladas (245 kN) e instrumentada para permitir o monitoramento das forças durante o processo de tixoforjamento, sendo que a força máxima de fechamento da matriz foi de aproximadamente 70 kN, ou seja, menos de um terço da capacidade da prensa. O procedimento estabelecido para a realização dos ensaios de tixoforjamento consistia no aquecimento dos corpos de prova, bem como no aquecimento das matrizes (confeccionadas de aço ferramenta do tipo AISI H13) por resistência elétrica. Os corpos de prova cilíndricos de 27.5 mm de diâmetro e 145 mm de comprimento eram inseridos em um forno indutivo Norax 25 kW 8 kHz, com uma taxa de aquecimento de 80 °C a 100 °C/min, sendo a temperatura controlada por um termopar tipo K inserido em furo central de 1.6 mm de diâmetro por 70 mm de comprimento. Após os corpos de prova, alcançarem a temperatura referente à fração sólida de 45% eram mantidos por tempos de 0s e 210s (que nada mais são do que tratamentos térmicos que favorecem a globularização da fase primária sólida) e depois transferidos para a matriz inferior e logo em seguida realizado o tixoforjamento, gerando um produto tixoconformado com 40 mm de largura e 150 mm de comprimento, cujos detalhes foram apresentados em trabalho anterior [14]. As peças tixoforjadas foram submetidas à caracterização microestrutural, na sequência ao processo de rebarbação, ao corte em uma serra mecânica em três partes iguais na sua largura, por fim, foram usinadas para a obtenção de corpos de prova para os ensaios de tração, regido pela norma ASTM B557M-02a [15]. Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina universal de ensaios MTS 810 de 10 toneladas a uma velocidade de deformação de 2 mm/min.

2.4. Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural compreende a caracterização da estrutura da liga fundida, assim como as amostras que passaram pelo processo de tixoforjamento (tratada termicamente à temperatura correspondente à fração sólida de 45% nos tempos de 0s e 210s), perfazendo-se a contagem de tamanho de glóbulo primário, tamanho de grão, determinação de fator de forma de circularidade e análise de porosidade.

Portanto, após os ensaios de tixoforjamento, foram realizadas as análises microestruturais via metalografia convencional (preta e branca), sendo lixadas em lixa d'água de 220, 320, 400, 600, 800, 1200 e 1500 e polidas com pasta de diamante de 6 μm (polimento grosseiro) e 1 μm (polimento de acabamento). Após o polimento, as amostras foram atacadas com ácido fluorídrico (1 ml HF e 99 ml H₂O) pelo tempo de 10s, sendo utilizado para a aquisição das imagens um microscópio óptico Leica DM ILM. As mesmas amostras passaram pela caracterização microestrutural via metalografia colorida através de um ataque eletrolítico com deposição de HBF₄ (ácido fluorbórico) em solução 2% e tensão de 25 V por aproximadamente 6 minutos com agitação moderada e constante. As medições de tamanho de glóbulos primários e de grãos foram obtidas pelo Método dos


Figura 2: Produto final projetado através da ferramenta gráfica *software* Pro Engineer®.

Interceptos de Heyn, regido pela norma ASTM E112 [16], o fator de forma de circularidade foi avaliado com o auxílio do *software* ImageJ 1.40g e a porosidade foi obtida pelo método de Arquimedes.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As peças tixoforjadas obtidas via tixoforjamento em prensa excêntrica sob a rota de produção via técnica de agitação eletromagnética são apresentadas na Figura 3, uma vez que as peças produzidas via técnica de refino de grão apresentou as mesmas características. Observa-se que as peças tixoforjadas apresentaram boa conformabilidade, preenchendo toda a matriz e reproduzindo sua geometria. Esse bom preenchimento e reprodução da geometria se devem a muitos fatores, mas em especial pelo fato de estar trabalhando com a fração sólida de 45%, pois apresenta uma menor quantidade de fase sólida no material, permitindo uma melhor mistura de sólido globular imersa em líquido, tornando mais favorável ao processo.

ZOQUI *et al.* [17] observou o efeito da fluidez do material sob o estado semissólido para o tixoforjamento em prensa excêntrica, em que basicamente o material é achatado entre as matrizes do tipo aberta, notando que há menor fluidez ao longo do comprimento do material, do que em relação a sua largura. Ou seja, o material deve possuir suas dimensões finais bem próximas às da matriz a ser preenchida, principalmente ao longo de seu comprimento. Uma melhor facilidade na execução do processo de tixoforjamento se deu quando da utilização do tempo de tratamento de 0s, pois longos tempos de tratamento dificultam o manuseio do material, devido à evolução morfológica apresentada no decorrer do aumento no tempo de globularização, ou seja, há uma menor interconexão entre as partículas primárias, consequentemente uma maior dificuldade de manuseá-las.

Após o término dos ensaios, as amostras foram preparadas com auxílio de técnicas metalográficas para a análise morfológica sob a condição tixoforjada (tratada termicamente na temperatura de 45% de fração sólida para tempos de 0s e 210s), perfazendo-se a contagem de tamanho de glóbulo primário, tamanho de grão, determinação do fator de forma de circularidade e análise de porosidade. Analisando a microestrutura da liga sob a condição fundida na Figura 4, nota-se uma microestrutura bastante refinada, principalmente para a rota de produção via técnica de agitação eletromagnética e em formato de roseta (microestrutura intermediária entre dendrítica e globular). Nota-se que a liga fundida apresenta menor tamanho de glóbulo primário/grão em comparação com a liga tixoforjada (tratada termicamente), devido às rotas de produção, ou seja, o refino de grão ocorreu devido ao forte campo eletromagnético que gerou fortes correntes convectivas durante o processo de solidificação.

Analisando-se qualitativamente as Figuras 5 e 6 que apresentam as microestruturas da liga tixoforjada (sob as duas diferentes rotas de produção) nota-se a evolução para morfologia globular mesmo para o tempo de tratamento térmico de 0s, ocorrendo um ligeiro aumento no tamanho destes glóbulos primários/grãos durante a manutenção do material à faixa semissólida para o tempo de 210s de tratamento, como também um sensível

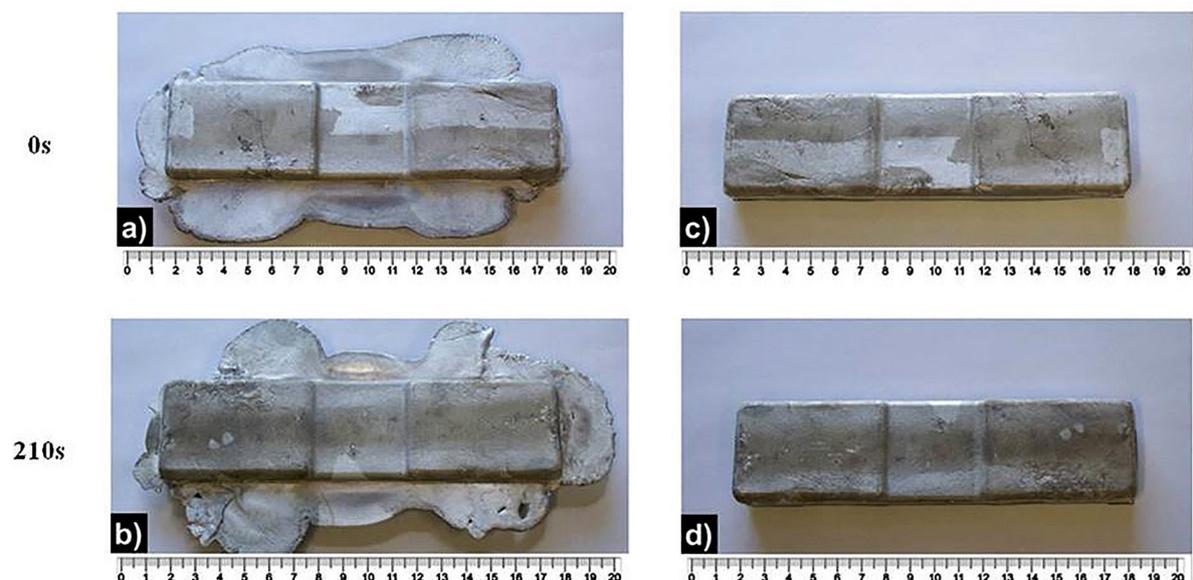


Figura 3: Peças tixoforjadas da liga Al4Si2.5Cu sob a rota de produção via técnica de agitação eletromagnética tratadas termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s e 210s, com rebarbas (a, b) e sem rebarbas (c, d).

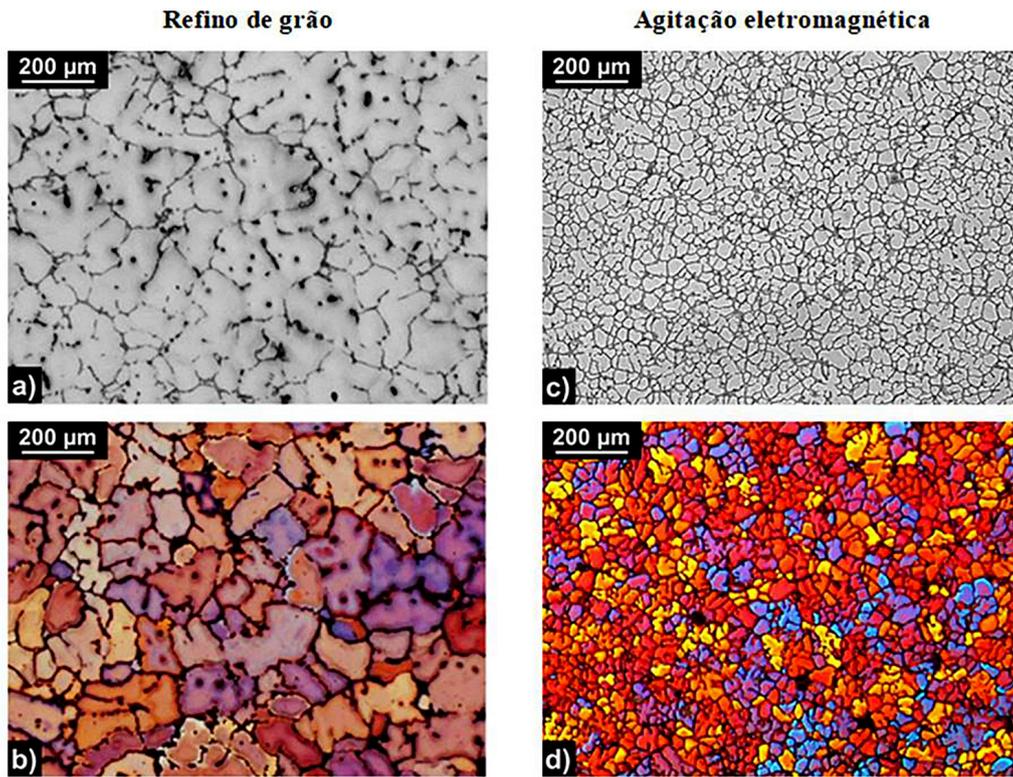


Figura 4: Micrografias da liga fundida Al4Si2.5Cu sob as diferentes rotas de produção, a saber, via técnica de refino de grão e via técnica de agitação eletromagnética: metalografia convencional (a, c) e metalografia colorida (b, d).

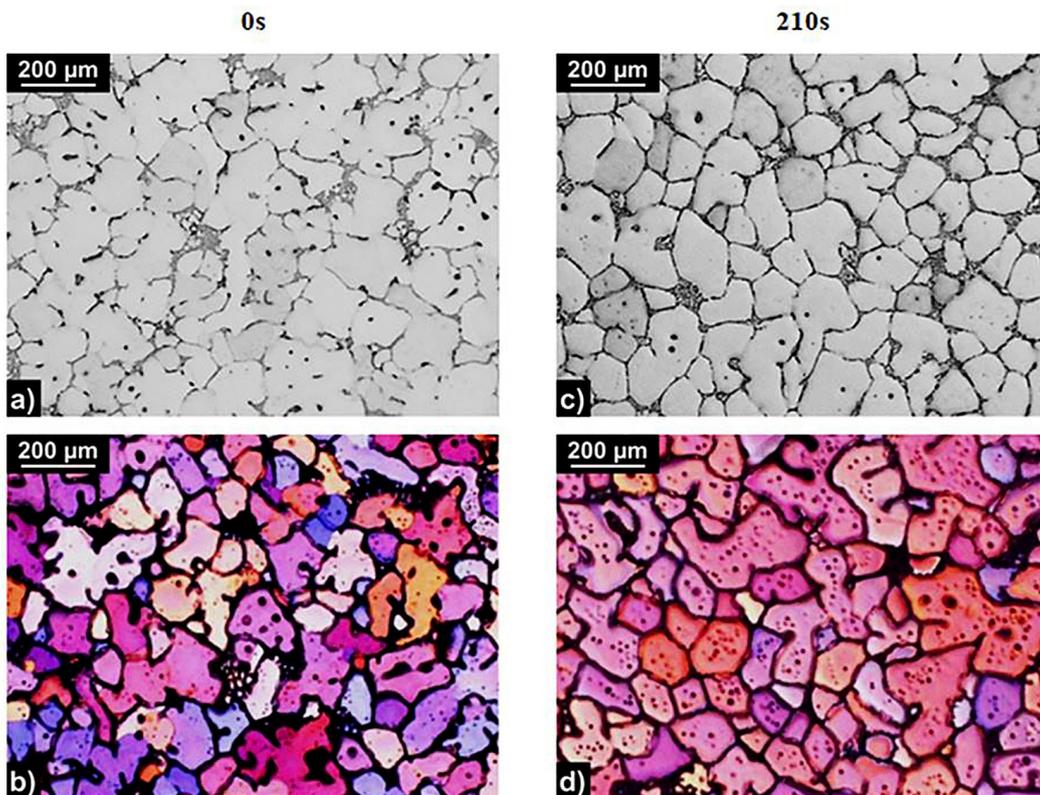


Figura 5: Micrografias da liga tixoforjada Al4Si2.5Cu sob a rota de produção via técnica de refino de grão tratadas termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s e 210s: metalografia convencional (a, c) e metalografia colorida (b, d).

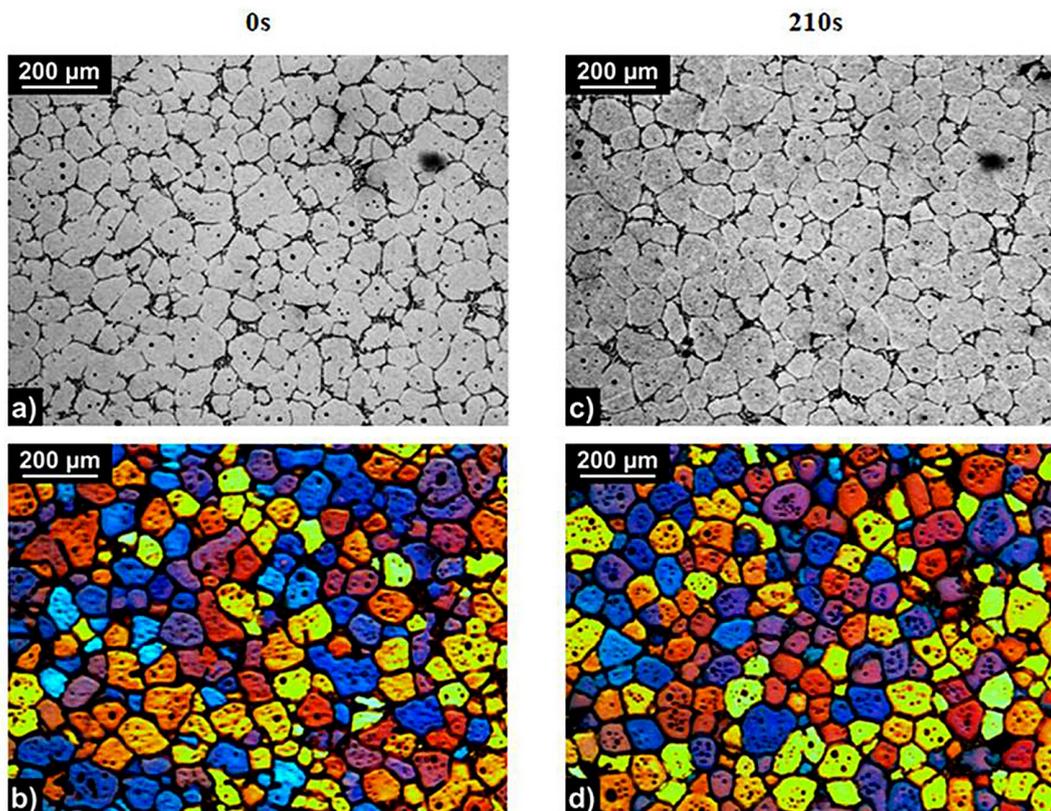


Figura 6: Micrografias da liga tixoforjada Al4Si2.5Cu sob a rota de produção via técnica de agitação eletromagnética tratadas termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s e 210s: metalografia convencional (a, c) e metalografia colorida (b, d).

aumento em seu tamanho e grau de esfericidade no decorrer da evolução morfológica das mesmas; isto se deve principalmente aos mecanismos de *Ostwald ripening* e de coalescência. Nestes mecanismos (*Ostwald ripening* e coalescimento) há o desaparecimento de ramos dendríticos secundários e o engrossamento dos ramos primários, levando a uma rápida globularização com a formação de rosetas na estrutura, demonstrando o início do processo de globularização da estrutura.

Na Tabela 3 são apresentados os tamanhos de glóbulos primários, os tamanhos de grãos, os valores do fator de forma de circularidade e porosidade para a liga deste estudo, lembrando que para o fator de forma de circularidade, quanto mais próximo de “1”, mais globular é a estrutura. Sendo que a liga apresentou uma estrutura globular, com valores acima de 0,50.

A rota de produção que utilizou a técnica via agitação eletromagnética apresenta melhores valores de tamanho de glóbulos primários/grãos, circularidade e porosidade para cada condição de ensaio proposta quando comparados com a técnica de produção via refino de grão, uma vez que o campo eletromagnético utilizado impede o crescimento dendrítico devido a uma forte turbulência gerada no metal líquido, rompendo a estrutura em formação, estimulando a multiplicação cristalina e sua conseqüente globularização. Isto pode ser observado na condição fundida (sem nenhum tratamento térmico), onde quando utilizado a técnica de refino de grão, a liga possui tamanho de glóbulo primário de 96 µm e para a rota de produção via agitação eletromagnética a mesma possui um tamanho de glóbulo primário de 35 µm, ou seja, aproximadamente três vezes menor o seu valor.

Observa-se que após o processo de tixoforjamento (tratada termicamente para 45% de fração sólida nos tempos de tratamento de 0s e 210s e conformada) a rota de produção via técnica agitação eletromagnética apresenta valores satisfatórios de tamanho de glóbulos primários/grãos com uma diminuição em média de 25 µm, já os valores de porosidade quando comparados com a rota de produção via refino de grão chegam a uma diminuição de aproximadamente metade do seu valor. A diminuição dos valores de porosidade encontrada nas peças quando tixoforjada em comparação à condição fundida é devido ao fato de que em seu processo, a pressão (força de fechamento da matriz) exercida sobre a peça estimula a eliminação ou ao menos o colapsamento das bolhas internas, proporcionando assim menor porosidade/defeitos no material e conseqüentemente uma estrutura

Tabela 3: Valores de tamanho de glóbulo primário, tamanho de grão, fator de forma de circularidade e porosidade para cada condição de ensaio proposta.

CONDIÇÃO	TEMPO DE TRATAMENTO (s)	TAMANHO DE GLÓBULO (μm)	TAMANHO DE GRÃO (μm)	CIRCULARIDADE	POROSIDADE (%)
Refino de grão	fundida	96 \pm 13	113 \pm 15	0,27 \pm 0,13	6,8 \pm 0,8
	0	79 \pm 8	115 \pm 18	0,54 \pm 0,03	3,9 \pm 0,3
	210	98 \pm 16	121 \pm 18	0,53 \pm 0,03	3,2 \pm 0,3
Agitação eletromagnética	fundida	35 \pm 3	75 \pm 11	0,43 \pm 0,19	5,1 \pm 0,6
	0	59 \pm 7	92 \pm 15	0,55 \pm 0,18	2,0 \pm 0,2
	210	67 \pm 7	97 \pm 14	0,58 \pm 0,17	1,9 \pm 0,2

Tabela 4: Valores da tensão limite de escoamento (σ_e), alongamento (ϵ) e limite de resistência à tração (LRT) da liga para cada condição de ensaio proposta.

CONDIÇÃO	TEMPO DE TRATAMENTO (s)	TENSÃO LIMITE DE ESCOAMENTO (MPa)	ALONGAMENTO (%)	LIMITE DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO (MPa)
Refino de grão	fundida	147 \pm 5	0,7 \pm 0,3	167 \pm 15
	0	140 \pm 7	1,0 \pm 0,2	169 \pm 15
	210	134 \pm 7	0,9 \pm 0,3	176 \pm 21
Agitação eletromagnética	fundida	137 \pm 3	2,4 \pm 1,4	214 \pm 15
	0	132 \pm 2	2,0 \pm 0,6	191 \pm 17
	210	129 \pm 9	2,0 \pm 0,2	185 \pm 19

mais homogênea. Tem-se que para os processos de tixoonformação, busca-se um material com microestrutura refinada e globular para permitir o melhor fluxo da pasta dentro das cavidades a serem preenchidas, sendo estas características encontradas principalmente com a rota de produção via técnica agitação eletromagnética.

TORRES [12] analisou uma gama de ligas Al-Si-Cu, entre elas, a liga Al4Si2.5Cu sob a rota de produção via técnica de agitação eletromagnética e verificou que a liga apresenta uma microestrutura totalmente globular e homogênea com altos valores de fator de forma de circularidade, o que se traduz em um melhor comportamento durante o escoamento nos testes de compressão a quente, ou seja, uma melhor fluidez. BENATI [18] analisou a mesma liga deste estudo sob a rota de produção via técnica de refino de grão, porém apenas realizou o tratamento térmico de globularização e observou que a liga apresenta crescimento e globularização das partículas de sólido primário durante a evolução morfológica, devido aos mecanismos de *Ostwald ripening* e de coalescência, dependentes do tempo de permanência da liga a altas temperaturas; além de apontar esta liga como sendo a mais adequada para os processos de tixoonformação, por apresentar uma estrutura globular e homogênea.

Após a obtenção dos produtos tixoforjados, estes foram usinados para a retirada dos corpos de prova de tração, cujo objetivo é a determinação das propriedades mecânicas do material, a saber: limite de escoamento, alongamento e limite de resistência à tração. Na Tabela 4, têm-se as propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração, observa-se que as propriedades mecânicas da liga pouco se diferem entre os tempos de manutenção do material no estado semissólido indicando a estabilidade microestrutural do material. Observa-se que o limite de escoamento para as duas diferentes rotas de produção permanecem muito próximos, porém para o alongamento e o limite de resistência à tração ocorre um aumento expressivo. Tem-se que o limite de resistência à tração principalmente quando utilizado a rota de produção via agitação eletromagnética obteve resultados promissores, próximos a 200 MPa, ou seja, demonstrando que a liga em estudo apresenta características favoráveis à utilização como matéria-prima para os processos de tixoonformação.

4. CONCLUSÕES

A partir da avaliação da tixoconformabilidade da liga Al4Si2.5Cu sob duas diferentes rotas de produção, ou seja, utilizando as técnicas via refino de grão e via agitação eletromagnética no processo de tixoforjamento em prensa excêntrica, temos as seguintes conclusões:

- a) Os ensaios de tixoforjamento em prensa excêntrica mostraram que a força necessária de fechamento da matriz é praticamente constante, independentemente do tempo de globularização, ficando em torno de 70 kN, sendo que a capacidade da prensa excêntrica é de 245 kN, ou seja, menos de um terço da capacidade da prensa.
- b) A microestrutura apresentou para ambas as rotas de produção, morfologia globular para os diferentes tempos de tratamento térmico de globularização. Os valores referentes ao tamanho de glóbulos primários/grãos evidenciou que o uso da agitação eletromagnética torna a microestrutura mais fina e conseqüentemente mais homogênea uma vez que o campo eletromagnético utilizado impede o crescimento dendrítico devido à forte turbulência gerada no metal líquido que rompe a estrutura em formação.
- c) A liga apresentou boas propriedades mecânicas, com valores de limite de resistência à tração principalmente quando utilizado a rota de produção via agitação eletromagnética próximos a 200 MPa, demonstrando que a liga em estudo apresenta características favoráveis à utilização como matéria-prima para os processos de tixoconformação.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] SPENCER, D.B., MEHRABIAN, R., FLEMINGS, M.C., “Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range”, *Metallurgical Transactions*, v. 3, n. 7, pp. 1925–1932, 1972. doi: <http://doi.org/10.1007/BF02642580>.
- [2] FLEMINGS, M.C., RIEK, R.G., YOUNG, K.P., “Rheocasting processes”, *AFS International Cast Metals Journal*, v. 1, pp. 11–22, 1976.
- [3] CHIARMETTA, G., “Why thixo?”, In: *Proceedings of the 6th International Conference on the Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, pp. 15–21, Turin, September 2000.
- [4] KORI, S.A., MURTY, B.S., CHAKRABORTY, M., “Development of an grain refiner for Al-7Si alloy”, *Materials Science and Engineering A*, v. 280, n. 1, pp. 58–61, 2000. [http://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00656-5](http://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00656-5).
- [5] ROOY, E.L., “Aluminum and aluminum alloys”, In: ASM International, *ASM Handbook*, West Conshohocken, ASM International, pp. 1622–1696, 1992. v. 15: Casting.
- [6] FLEMINGS, M.C., “Behavior of metal alloys in the semi-solid state”, *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*, v. 22, n. 5, pp. 957–981, 1991. doi: <http://doi.org/10.1007/BF02661090>.
- [7] PAHLEVANI, F., SALARFAR, S., NILI-AHMADABADI, M., “Dendritic-globular structure transition of ductile iron in semi-solid casting using cooling slope plate”, In: *Proceedings of the 8th International Conference on Semi-solid Processing of Alloys and Composites*, Limassol, September 2004.
- [8] KEARNS, M.A., THISTLETHWAITE, S.R., COOPER, P.S., “Recent advances in understanding the mechanism of aluminum grain refinement by TiBAl master alloys”, In: *Proceedings of the 125th The Minerals, Metals and Materials Society Annual Meeting*, Anaheim, 1996.
- [9] FURUI, M., KOJIMA, Y., MATSUO, M., “Fabrication of small aluminium ingot by electromagnetic casting”, *ISIJ International*, v. 33, n. 3, pp. 400–404, 1993. <http://doi.org/10.2355/isijinternational.33.400>.
- [10] RUIZ, C.S., “Avaliação da tixoconformabilidade de ligas Al-Si-Cu produzidas via refino de grão”, Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2014.
- [11] TORRES, L.V., TORRES, L.F., ZOQUI, E.J., “Electromagnetic stirring versus ECAP: morphological comparison of Al-Si-Cu alloys to make the microstructural refinement for use in SSM processing”, *Advances in Materials Science and Engineering*, v. 2016, pp. 9789061, 2016. <http://doi.org/10.1155/2016/9789061>.
- [12] TORRES, L.V., “Tixoconformação de novas ligas Al-Si-Cu”, Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.
- [13] TORRES, L.V., ZOQUI, E.J., “Análise do comportamento mecânico das ligas AA7004 e AA7075 tixoforjadas em prensa excêntrica”, *Tecnologica em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 17, n. 4, pp. e2094, 2020. <http://doi.org/10.4322/2176-1523.20202094>.

- [14] TORRES, L.V., ZOQUI, E.J., “Caracterização microestrutural das ligas AA7004 e AA7075 tixoforjadas em prensa excêntrica”, *Revista Matéria*, v. 24, e-12452, 2019. doi: <http://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0768>.
- [15] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM B557M-02a: Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and cast Aluminum and Magnesium-alloy Products [Metric]*, West Conshohocken, ASTM, 2002.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM E112: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, West Conshohocken, ASTM, 1996.
- [17] ZOQUI, E.J., LOURENÇATO, L.A., BENATI, D.M., “Thixoforming of aluminium-silicon alloys in a mechanical eccentric press”, *Diffusion and Defect Data, Solid State Data. Part B, Solid State Phenomena*, v. 141–143, pp. 517–522, 2008. doi: <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.141-143.517>.
- [18] BENATI, D.M., “Avaliação da tixoconformabilidade de ligas Al-Xwt%Si-2,5wt%Cu-0,5wt%Mg” Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2008.