



INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE Sr e DO TEMPO DE ESPERA NA MODIFICAÇÃO DE UMA LIGA DE Al-Si HIPOEUTÉTICA¹

Pedro Henrique Coutinho²
Estéfano Aparecido Vieira²

Resumo

O tratamento de modificação do Si em ligas de Al-Si é uma prática comum na indústria com o intuito de melhorar os limites de resistência e escoamento, usinabilidade e alongamento das ligas. Neste trabalho tem-se como objetivo estudar alguns parâmetros envolvidos da modificação com o Sr que são: i) concentração na liga e ii) tempo de espera. Nos processos de fundição, uma liga muito comum na fabricação de peças é a A380 e amostras desta liga foram fundidas a uma temperatura de 700°C. Em seguida adicionou-se 0,005%, 0,02% e 0,07% de Sr variando-se o tempo de espera com um tempo máximo de 40 min. Os resultados mostram que o Sr modifica o Si da liga com eficiência, exceto para concentrações inferiores 0,01%. Fusões sucessivas da mesma liga com 0,045% de Sr mostraram que é possível pelo menos nove fusões sucessivas sem perder-se o efeito modificador. Após um tempo de espera de pelo menos 40 min verificou-se que a liga ainda está modificada, porém não totalmente. Após os estudos, percebe-se uma grande influência do tempo de espera e da concentração neste tratamento. Por fim, há também um aumento substancial da porosidade nas ligas modificadas.

Palavras-chave: Tratamento de modificação; Ligas Al-Si; Refino microestrutural; Agentes modificadores.

INFLUENCE OF STRONTIUM CONCENTRATION AND WAITING TIME IN THE MODIFICATION OF HYPOEUTECTIC Al-Si ALLOY

Abstract

The modification treatment in Al-Si alloys is very common in industry aiming to improve the yield point, tensile strength and ductility. This research aims some parameters involved in the modification with strontium like its concentration in the alloy and the waiting time before to tapping. The casting alloy A380 is one of the most used in the fabrication of parts, and samples were fused at a temperature of 700°C. After, was added 0.005, 0.02 e 0.07% of strontium and samples were taken at different waiting times. The results show that the silicon was modified with strontium successfully, except for additions less than 0.01%. Furthermore, at least nine successive fusions are possible using the alloy with 0.045% Sr without losing the effect of modification. For a waiting time of 40 minutes, the alloy remains modified but not totally. After studies, perceives a great influence of waiting time and concentration. Finally, there is an increase of porosity in the modified alloys.

Key words: Modification treatment; Al-Si alloys; Microstructural refinement; Modifying agents.

¹ Contribuição técnica ao 65° Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Depto. de Metalurgia e Materiais – IFES.



1 INTRODUÇÃO

O silício, como elemento de liga, aumenta a fluidez da liga de alumínio, além de possibilitar que o trabalho com a liga possa ser realizado com uma menor temperatura e também melhora a soldabilidade da liga. A liga Al-Si é caracterizada pela excelente resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica, sendo usada extensamente para substituir os materiais tradicionais nas áreas de transporte e de construção. Elas constituem aproximadamente 85% a 90% das peças das ligas de fundição de alumínio produzidas. As ligas Al-Si utilizadas possuem teor entre 5 e 20 de silício, sendo divididas em hipoeutéticas, hipereutéticas e eutéticas. Uma liga Al-Si será eutética caso possua o teor de 12,6% de Si, enquanto que uma liga é hipoeutética para teores menores que este e a hipereutética para teores maiores. As ligas hipoeutéticas (Figura 2), que são o objetivo do presente estudo, possuem uma fase primária de alumínio, que é dúctil, e uma constituinte eutético, que possui alumínio e silício. Entretanto, o silício do eutético em ligas não tratadas é acicular e, frequentemente muito grosseiro, levando às propriedades mecânicas pobres, por exemplo, a ductilidade, pois nessa morfologia o silício age como concentrador de tensão fragilizando a liga. Por isso, mudar a morfologia do silício do eutético para uma morfologia fibrosa e refinada (como pode ser visto, por exemplo, na Figura 9) conduz a uma melhoria significativa nas propriedades mecânicas das ligas Al-Si.

A morfologia acicular da liga Al-Si prejudica a resistência à tração,⁽¹⁻²⁾ e visando melhorar as propriedades dessa liga, agentes modificadores, tais como Na, Ca, K, Sr, podem ser adicionados, objetivando mudar os cristais de silício para uma morfologia fibrosa, culminando em uma microestrutura em que há o endurecimento, com aumento da ductilidade, além de apresentar maiores limites de resistência e escoamento. Dos agentes modificadores, o mais usado era o sódio metálico, contudo, nos últimos anos, o Sr tem ganhado mercado e é muito utilizado industrialmente. A grande vantagem do Sr é o fato de existir a possibilidade de se fazer várias fusões sem perder o efeito modificador. Além disso, o Sr não é tóxico e de fácil manipulação.

A quantidade de agente modificador, a temperatura do banho e o tempo decorrido entre a adição e o vazamento da liga fundida, influenciam na microestrutura final e conseqüentemente nas propriedades mecânicas. Haverá um refino incompleto, caso a quantidade de agente modificador seja insuficiente, no entanto, o excesso pode deixar a liga mais frágil. O refino incompleto pode ocorrer também se a temperatura de vazamento for muito alta.⁽³⁾ Não só os agentes modificadores podem alterar a morfologia e o tamanho das partículas de silício, a velocidade com que a liga é resfriada e solidificada também influenciam. Por exemplo, o aumento da velocidade de resfriamento refina a matriz eutética,⁽³⁾ porém não favorece o arredondamento.

Este projeto é de grande importância visto que a melhoria nas propriedades da liga estudada é imprescindível, pois possibilita uma maior exigência mecânica e confiabilidade. Este tipo de liga é utilizado largamente pela indústria automobilística que hoje no Brasil permanece em constante crescimento. Desenvolver metodologias e processos mais eficientes e econômicos de fabricação é um ponto de fundamental importância. Assim, este trabalho visa definir parâmetros que ainda não estão bem estudados até o momento. Os resultados poderão ser utilizados para otimizar os processos metalúrgicos de fabricação das referidas ligas.

O Na foi bastante utilizado como agente modificador de ligas Al-Si hipoeutéticas. Sua adição pode ser na forma pura ou combinada como, por exemplo,



a halita (NaCl) mineral encontrado na natureza.⁽⁴⁾ Para se ter um bom controle durante a modificação, o agente modificador deve ser adicionado imediatamente antes de o metal ser fundido. Se uma liga de Al-Si hipoeutética, for modificada com Na (supondo que o metal não foi pré-tratado com Sr, por exemplo), as modificações podem ser obtidas pela adição de no mínimo 0.015% em peso. Após a fusão, ficará retido apenas 0,002%.⁽¹⁾ Quando um pouco de sódio é adicionado ao banho, o constituinte eutético cujo silício acicular é bem grosseiro é convertido em um constituinte com silício refinado e disperso, o mesmo ocorre para adições do Sr.. Um aspecto interessante para estes tratamentos é o comportamento da contração durante a solidificação que é disperso, ou seja, formando micro-rechupes em vez de ser concentrado, formando macro rechupes, já que o sódio aumenta a densidade da liga.⁽⁵⁾ Por isso, a usinabilidade e as propriedades mecânicas são melhoradas.

O Sr é, atualmente, o agente modificador mais utilizado em ligas de Al hipoeutéticas.^(6,7) Em muitos processos industriais a modificação é feita com segurança e maior eficiência quando comparado com Na. Ainda, comparando a modificação do Sr com o Na, é sabido que utilizando o primeiro uma quantidade maior precisa ser adicionada, e os melhores resultados são obtidos quando se tem cerca de 0,07 a 0,08% de Sr.⁽¹⁾ Para fusões com o nível de Sr na ordem de 0,01 a 0,02% é possível promover a modificação do Si.⁽⁸⁾ Além disso, existem relatos que mostram que com quantidades ainda menores podem ser suficientes para a modificação, mostrando que de fato o Sr é bastante eficaz como agente modificador.⁽¹⁾ No entanto, para uma modificação adequada e permanente e necessário ao menos 0,008% de Sr retido no metal.⁽¹⁾

Outro aspecto importante é que o Sr retém por mais tempo a modificação quando comparado com o Na. Entretanto, outros trabalhos mostram que a modificação com o Na tem a mesma eficiência de modificação do Sr.⁽¹⁾ Quando Sr é adicionado no metal líquido, aproximadamente 50% são perdidos por evaporação.⁽¹⁾ Outro aspecto interessante é o fato do Sr ser utilizado em conjunto com o Na. Neste caso um elemento não irá destruir o efeito do outro havendo assim uma perfeita compatibilidade. Metalograficamente, a modificação provocada pelo Sr e Na são equivalentes..

A adição do Sr pode ser feita através do Sr₂Si ou Sr puro presente em ligas mães com composições variadas. Dependendo do tipo, forma e composição da liga-mãe utilizada esta poderá flutuar no banho e assim faz-se necessário o uso de acessórios especiais para adição. Para ligas-mãe com baixo Sr a adição pode ser feita à superfície, pois a reatividade com ar é baixa. Para se conseguir uma boa modificação deve-se promover a agitação do banho para homogeneizar a liga. No caso das ligas com alto Sr(Al-90%Sr), as taxas de dissolução são mais elevadas em baixas temperaturas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente estudo, escolheu-se a liga Al-Si comercial A380, que possui a seguinte composição:

Si% = 7,5-9,5 ; Fe% = 2,0 ; Cu% = 3,0-4,0 ; Mn% = 0,50 ; Mg% = 0,10 ;
Ni% = 0,50 ; Zn% = 3,0 ; Sn% = 0,35

Para promover modificação do Si utilizou-se uma ante liga de Al-10%Sr.



Todas as fusões foram feitas em um cadinho de alumina de alta pureza o qual permitiu que o mesmo fosse retirado do forno sem que se quebrasse devido ao choque térmico. As ligas de alumínio-Silício foram fundidas em um forno de resistência à 700 °C. Após garantir que toda liga estava fundida, a camada de óxido de alumínio que ficou por cima do banho foi retirada e em seguida ocorreu a adição da ante liga. Pouco tempo após a adição, foi retirada novamente a camada de óxido remanescente. Esse procedimento foi realizado para facilitar a observação da fusão da ante liga, pois possui densidade menor que a liga e ficava por cima do banho. Após a fusão da ante liga, o tempo de espera foi marcado, seguindo a tabela abaixo.

Após a fusão das ligas estas foram solidificadas em um molde cerâmico. As amostras obtidas foram levadas para análise microestrutural, que ocorreu da seguinte maneira: para revelar as microestruturas, as amostras foram serradas e embutidas a frio utilizando-se uma resina acrílica. Após um tempo de aproximadamente 24h as amostras foram conduzidas ao lixamento passando pela sequência 80, 150, 180, 320, 400, 600, 1000. Para execução do polimento utilizou-se óxido de cromo diluído em álcool. Após o polimento as foram analisadas em um microscópio ótico. Após esse procedimento, foi feita a aquisição das imagens, através de uma câmera fotográfica, anexa ao microscópio. A grade experimental foi a seguinte:

Tabela 1. Grade experimental do projeto

	%Sr	Tempo (min)					
		0	1	5	10	15	40
Grupo 1	0,005				X *		
Grupo 2	0,02						
Grupo 3	0,07						

* Não foi realizado o experimento para o grupo 1 no tempo de 10 minutos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Fusão da liga A380 sem adição de SR

Observou-se que quando comparada com a amostra A380, o Si permanece inalterado (Figuras 1 e 2), demonstrando que as condições de resfriamento não são favoráveis para refiná-lo. Ou seja, ainda que com o resfriamento, o Si continua acicular.

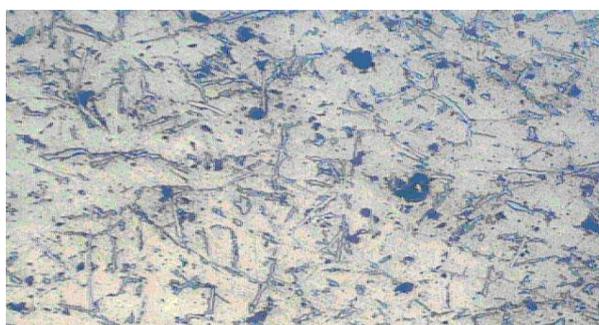


Figura 1. Amostra da liga A380.

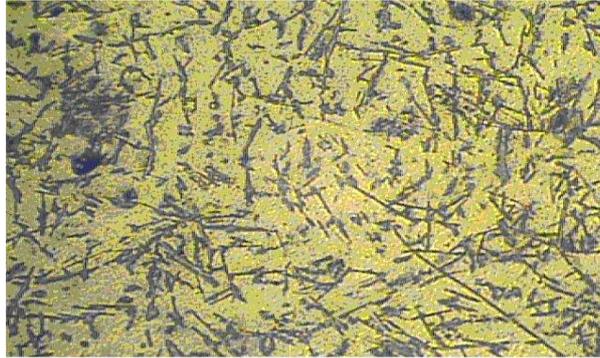


Figura 2. Amostra da liga A380 refundida.

3.2 Modificação da Liga A380 (Grupo I)

Foi constatado que para teores de aproximadamente 0,005 % em peso de Sr, não ocorre a modificação da liga. Esse resultado já era previsto,⁽¹⁾ em que seria necessário cerca de 0,01% de Sr para que houvesse sucesso na modificação. As micrografias deste grupo são muito parecidas, pois não houve modificação.

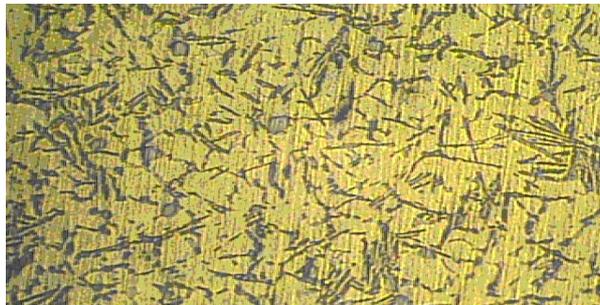


Figura 3. Amostra do Grupo 1, retirada imediatamente após a fusão do Sr..

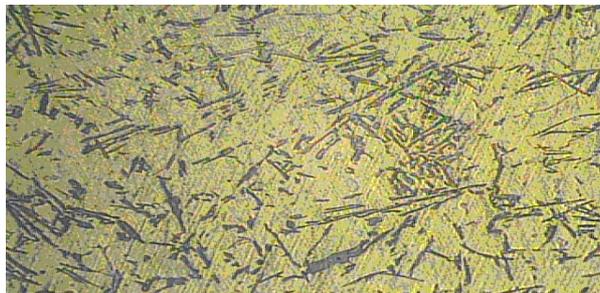


Figura 4. Amostra do Grupo 1, retirada 1 minuto após a fusão do Sr.

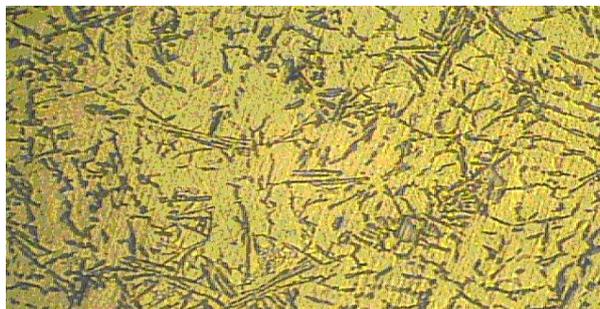


Figura 5. Amostra do Grupo 1, retirada 5 minutos após a fusão do Sr.

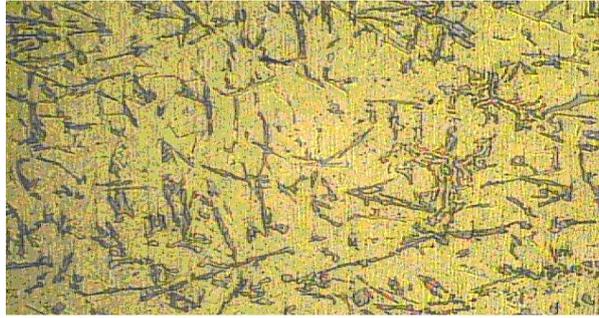


Figura 6. Amostra do Grupo 1, retirada 15 minutos após a fusão do Sr.

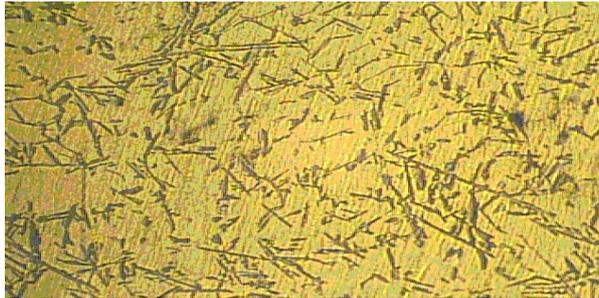


Figura 7. Amostra do Grupo 1, retirada 40 minutos após a fusão do Sr.

3.3 Modificação da Liga A380 (Grupo 2)

A adição de 0.02% de Sr foi suficiente para que houvesse a modificação. Além disso, a modificação não é perdida totalmente caso a liga modificada fique até pelo menos 40 minutos fundida no forno. Através da Figura 13, pode-se observar que com o tempo a microestrutura fica menos arredondada e começa a aparecer silício acicular, que é característica da liga original, ou seja, a liga está refinada parcialmente e perdendo seu efeito modificador. Portanto, o tempo decorrido entre a fusão do agente modificador e o vazamento influencia na modificação de Ligas Al-Si. Como existem perdas de Sr por evaporação enquanto ele está no banho, quanto mais tempo a liga fundida demorar a ser vazada, tem-se menos Sr presente e menor será o grau de modificação.

Outro ponto importante, mas que através das figuras capturadas não é tão visível, é a porosidade da liga, que é aumentada. Os poros formados são os pontos pretos que em algumas micrografias podem ser vistos, como por exemplo, na Figura 8.

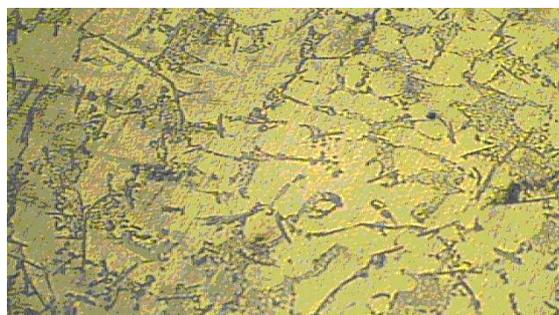


Figura 8. Amostra do Grupo 2, retirada imediatamente após a fusão do Sr.

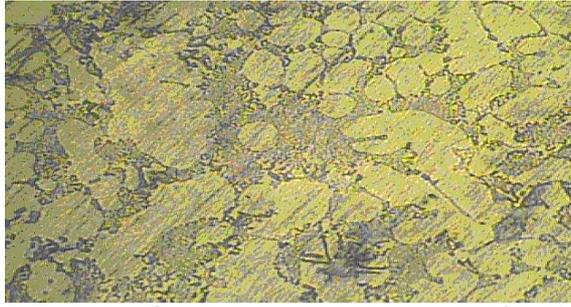


Figura 9. Amostra do Grupo 2, retirada 1 minuto após a fusão do Sr.



Figura 10. Amostra do Grupo 2, retirada 5 minutos após a fusão do Sr.

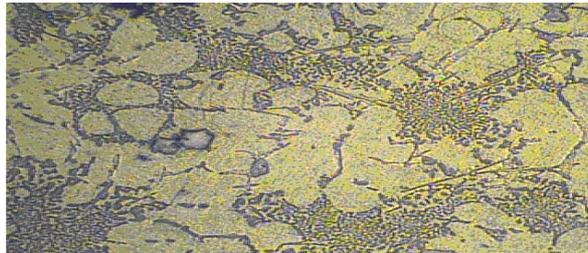


Figura 11. Amostra do Grupo 2, retirada 10 minutos após a fusão do Sr.

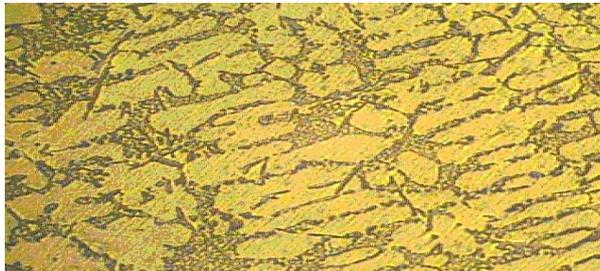


Figura 12. Amostra do Grupo 2, retirada 15 minutos após a fusão do Sr.

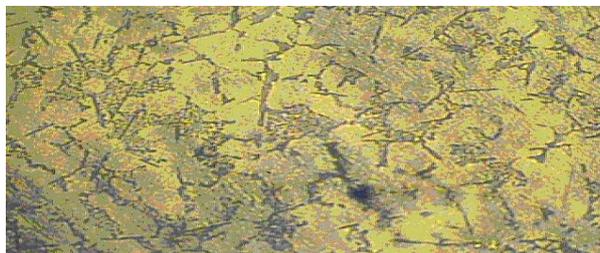


Figura 13. Amostra do Grupo 2, retirada 40 minutos após a fusão do Sr.

3.3 Modificação da Liga A380 (Grupo 3)

De acordo com as bibliografias,⁽¹⁾ para valores de 0,07% a 0,08% a modificação é ótima, no entanto a observação de tal fato apenas por micrografias é

complicada. Com o tempo, a liga modificada perde a modificação, pois a amostra relativa ao tempo de 40 minutos possui uma estrutura do silício menos arredondada e aparece o silício acicular. Além disso, observando as Figuras 13 e 19, nota-se que para concentrações de 0,02% (grupo 2) a modificação é perdida mais rapidamente, pois para o tempo de 40 minutos, a microestrutura (Figura 13) possui mais silício acicular que a 19. Portanto, a concentração de Sr influencia no tempo necessário para se perder a modificação. Isso ocorre, pois ocorrem perdas de Sr enquanto ele está no banho, só no momento da adição são perdidos 50% do Sr.

Neste grupo, a formação de poros é maior, quando comparado ao Grupo 2, logo a concentração de Sr influencia na porosidade, ou seja, quanto maior a concentração do agente modificador mais porosa será a liga modificada. Como pode ser visto na Figura 14.

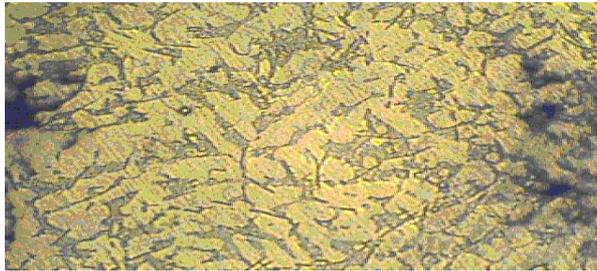


Figura 14. Amostra do Grupo 3, retirada imediatamente após a fusão do Sr.

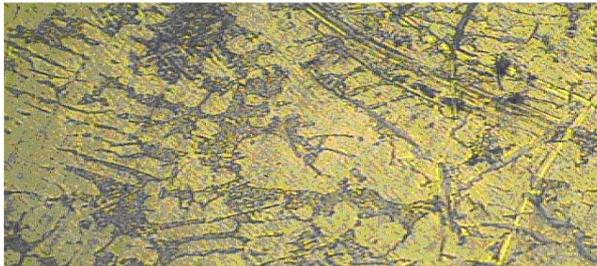


Figura 15. Amostra do Grupo 3, retirada 1 minuto após a fusão do Sr.

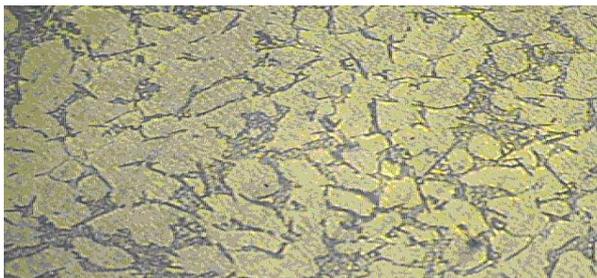


Figura 16. Amostra do Grupo 3, retirada 5 minutos após a fusão do Sr.

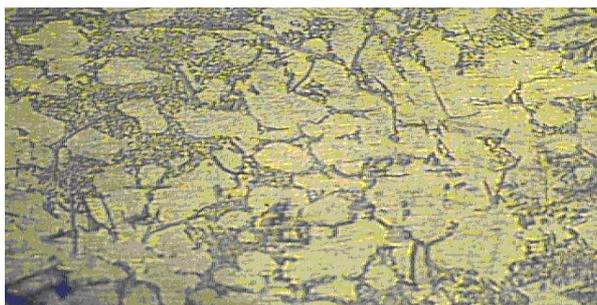


Figura 17. Amostra do Grupo 3, retirada 10 minutos após a fusão do Sr.

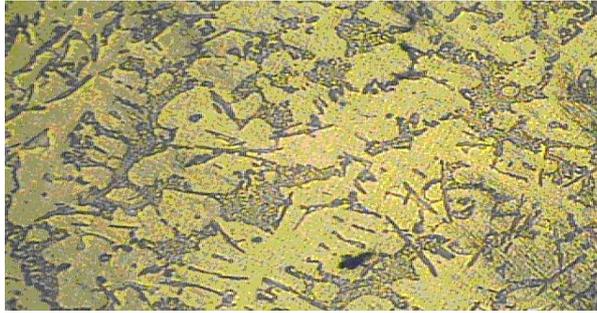


Figura 18. Amostra do Grupo 3, retirada 15 minutos após a fusão do Sr.

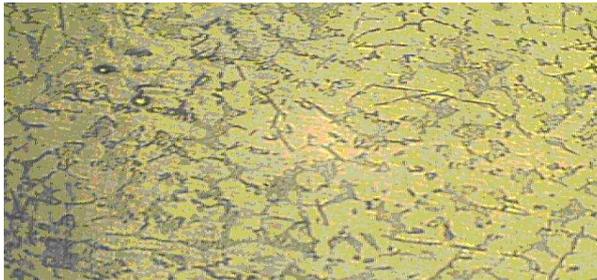


Figura 19. Amostra do Grupo 3, retirada 40 minutos após a fusão do Sr.

3.4 Modificação sob Fusões Sucessivas

O experimento com 0,045% de Sr foi feito com intuito de se obter um número máximo de fusões possíveis sem que a modificação fosse perdida. No entanto, após 9 fusões a liga modificada não perdeu seu efeito totalmente. A última amostra ainda permanece modificada, mas parcialmente, pois se podem observar muitas “agulhas de silício”. Analisando as figuras desse grupo, é perceptível que até a Figura 22 a liga permanece modificada, mas a partir da Figura 23, as agulhas de silício aparecem em maior quantidade, tendo seu ótimo na Figura 28. Portanto, conclui-se que, o efeito da modificação é diminuído a cada nova fusão, pois a cada fusão parte do Sr é perdido, diminuindo a quantidade na liga, até chegar a patamares insuficientes para a modificação.

Ainda analisando o número máximo de fusões para que a liga perca o efeito, não há como determinar um número máximo que englobe todas as concentrações de Sr adicionadas, pois para cada concentração adicionada serão necessários números de fusões diferentes para perder o efeito modificador da liga. Algo que, posteriormente, pode ser feito é um modelo matemático obtido através de experimentos em várias concentrações diferentes, para que assim, seja possível encontrar o número máximo de fusões para uma determinada concentração, diretamente.

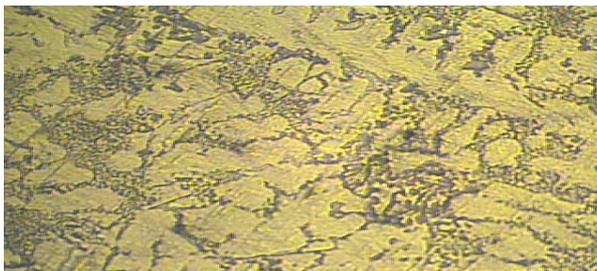


Figura 20. Referente à Fusão Sucessiva nº. 1

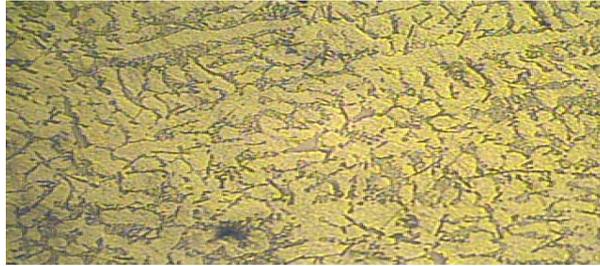


Figura 22. Referente à Fusão Sucessiva nº. 3.

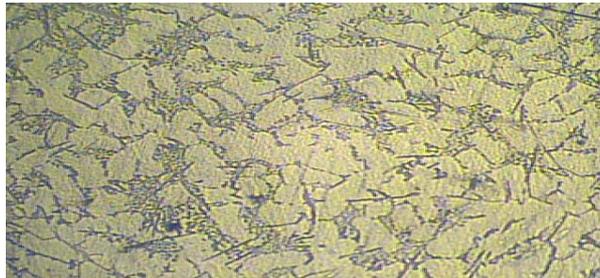


Figura 21. Referente à Fusão Sucessiva nº. 2.

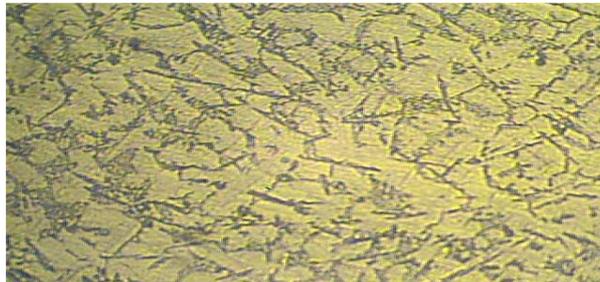


Figura 23. Referente à Fusão Sucessiva nº. 4.

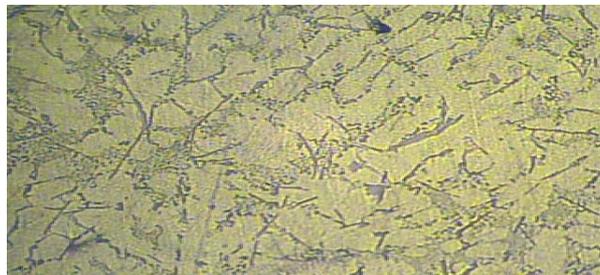


Figura 24. Referente à Fusão Sucessiva nº. 5.

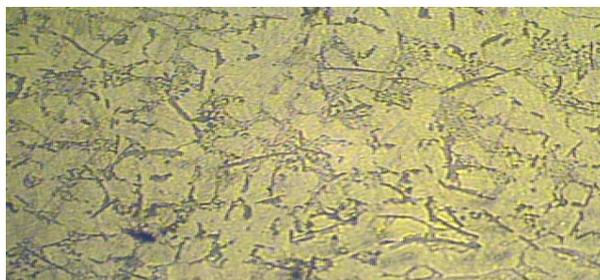


Figura 25. Referente à Fusão Sucessiva nº. 6.

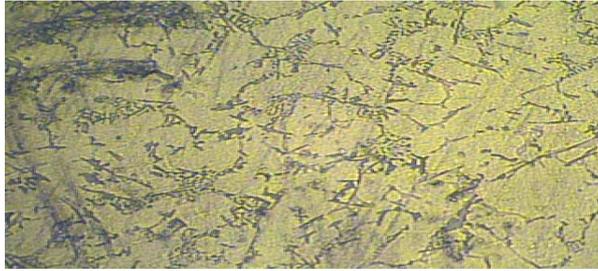


Figura 26. Referente à Fusão Sucessiva nº. 7.

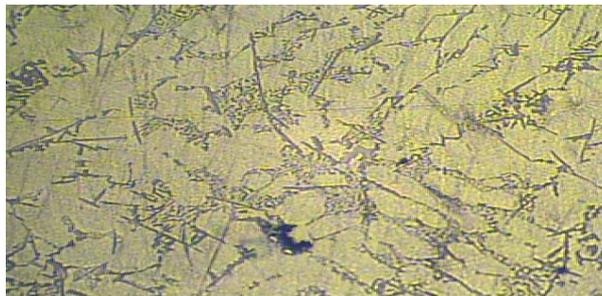


Figura 27. Referente à Fusão Sucessiva nº. 8.

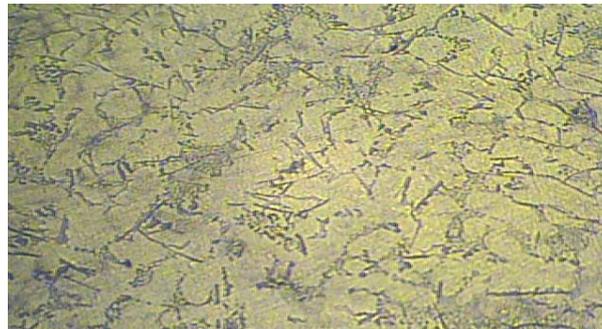


Figura 28. Referente à Fusão Sucessiva nº. 9.

4 CONCLUSÕES

A análise do Tratamento de Modificação em Ligas de Alumínio-Silício e os respectivos parâmetros envolvidos, principalmente concentração e tempo de espera até o vazamento, fornece resultados e conclusões interessantes e condizentes com as bibliografias estudadas.

No tocante à concentração, pode-se concluir que existe uma quantidade mínima de agente modificador retido na liga para que haja modificação, que é conseguida através da adição de cerca de 0,01% de Sr em peso. Quando usado um teor de 0,005% não houve modificação, enquanto que para 0,02% ocorreu, comprovando tal tese.

Além disso, a concentração de Sr influencia no tempo necessário de espera para que a liga perca o efeito modificador. Quanto maior a concentração de Sr, mais tempo demorará para que a liga perca o efeito da modificação.

Por outro lado, a concentração de Sr também influencia no número máximo de fusões sem que a liga perca o efeito da modificação. Quanto maior a concentração de Sr mais fusões deverão ser necessárias para que a modificação acabe.

A concentração do agente modificador Sr também influencia na porosidade da liga, sendo que quanto maior for a concentração, mais porosa ficará a liga.

No tocante ao tempo de espera, conclui-se que o tempo de espera influencia na modificação, pois quando se tem um tempo de espera alto, a modificação não acontece. Logo, quanto maior o tempo de espera, menor o grau de modificação.

Foi comprovado também, que a não é simplesmente a fusão da liga responsável pela modificação, mas sim a adição de agentes modificadores.

Agradecimentos

Agradeço ao orientador deste projeto Estéfano Aparecido Vieira, pelos conhecimentos transmitidos e pela assistência dada. Agradeço também ao CNPQ, pela bolsa de Iniciação Científica e pela oportunidade de ingressar na comunidade científica. Sobretudo, agradeço a Deus por me dar forças e capacidade para concluir este projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 Donna L. Z., **Aluminum casting Technology**, 2nd ed.; The American Foundrymen's Society - AFS, USA, 1993, 19-32.
- 2 Wang, Q. G., Microstructural Effects on the Tensile and Fracture Behavior of Aluminum Casting Alloys A356/357, **Metallurgical and Materials Transactions A**, v.34, n. 12, December 2003, 2887-2899.
- 3 Coutinho, T.A., **Metalografia de não ferrosos**, Edgard Blucher Ltda, São Paulo, SP, Brazil, 1980, 80-101.
- 4 Martinez D., Enrique J., La Rosa R. O., Gerardo Torres C. El estudio del efecto modificado del Na proveniente del NaCl sobre la morfología del Si en una aleación Al-si hipoeutéctica, **Revista Chilena de Ingeniería**, v.14, n. 3, Agosto 2006, 238-244.
- 5 OHNO, Atsumi. *Solidificação dos Metais*. Trad. por Paulo da Silva Pontes. São Paulo: Livr. Ciência e Tecnologia, 1988.
- 6 Wang, L., Shivkumar, S., Strontium modification of aluminium alloy castings in the expendable pattern casting process, **Journal of Materials Science**, v. 30, 1995, 1584-1594.
- 7 Lu L., Dahle, A.K., Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al-Si foundry alloys, **Materials Science and Engineering: A**, v. 435-436, November 2006, 288-296.
- 8 Gruzleski, J.E., Closset, B. M., *The Treatment of Liquid Aluminum – Silicon Alloys*, **AFS**, Des Plaines, Illinois (1990).