

Investigação das Resistências Mecânica e ao Desgaste em Ligas Al-Si Contaminadas com Ferro Solidificadas Direcionalmente com Diferentes Teores de Vanádio

Palavras-Chave: Solidificação, Ligas Al-Si, Microestrutura

Autores(as):

Aluna: Laiz Fonseca da Silva

Orientador: Prof. Dr. Noé Cheung

Coorientador: Cássio Augusto Pinto da Silva

Instituição: FEM-UNICAMP

INTRODUÇÃO:

A literatura destaca a importância do silício na formação de ligas à base de alumínio para fundição. Entretanto, durante o processo de reciclagem dessas ligas, a incorporação de impurezas é inevitável, sendo o ferro (Fe) a mais prejudicial para as propriedades das ligas de Al-Si (KASHYAP et al. 1993). O ferro compromete essas ligas devido à formação do intermetálico AlFeSi beta, que apresenta uma morfologia longa e estreita. Esta fase favorece o surgimento de trincas em suas extremidades e a propagação longitudinal devido à sua dureza e fragilidade. Diversos estudos foram realizados para mitigar os efeitos nocivos do ferro por meio da adição de elementos modificadores na fase AlFeSi beta rica em ferro. Nesse contexto, o vanádio (V) tem se mostrado um elemento promissor para atenuar os impactos negativos de intermetálicos indesejáveis (LIN et al. 2019) Contudo, a obtenção de ligas de alumínio com as propriedades desejadas vai além da simples escolha dos elementos de liga, exigindo um entendimento detalhado da evolução microestrutural durante o processo de solidificação. Portanto, é essencial compreender os parâmetros térmicos aplicados durante a solidificação (KURZ et al. 2021). Além disso, há uma carência de estudos que considerem os parâmetros térmicos de solidificação em relação à formação, tamanho e formato das fases presentes em ligas contaminadas com ferro. Logo, o objetivo deste trabalho é investigar os efeitos dos parâmetros térmicos de solidificação em ligas de alumínio-silício (Al-Si) recicladas e avaliar a eficácia do vanádio (V) como modificador para otimizar suas propriedades mecânicas e de desgaste.

METODOLOGIA:

Lingotes das ligas Al-7%Si-1%Fe, Al-7%Si-1%Fe-0,5%V e Al-7%Si-1%Fe-1%V foram produzidos baseado em estudos prévios de solidificação (SILVA et al. 2022; SILVA et al. 2023). Metais comercialmente puros foram utilizados nas proporções em massa calculadas. Um forno mufla foi empregado para fundir os metais, garantindo uma homogeneização adequada. Em seguida, as ligas foram solidificadas direcionalmente em um dispositivo

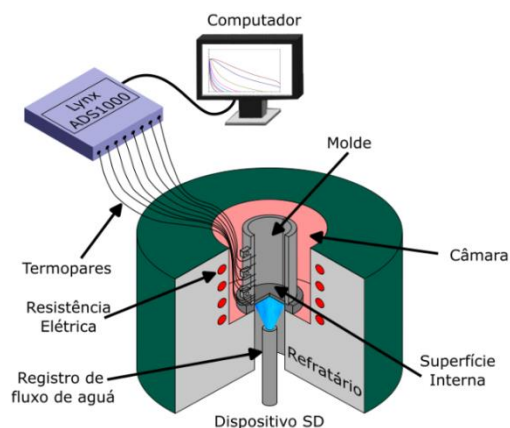


Figura 1 - Desenho detalhado do aparelho de solidificação direcional

unidirecional ascendente, utilizando água em temperatura ambiente como fluido refrigerante, conforme ilustrado na Figura 1. O metal fundido foi despejado na lingoteira, onde termopares foram estrategicamente posicionados ao longo de seu comprimento para aquisição de dados térmicos em diferentes posições.

Curvas de resfriamento foram representadas graficamente através dos históricos de temperaturas obtidos pelos termopares durante a solidificação, o qual foi possível calcular os parâmetros térmicos baseando-se nas curvas. Parâmetros microestruturais das ligas foram obtidos através de equações propostas em trabalhos anteriores (SILVA et al. 2022; SILVA et al. 2023).

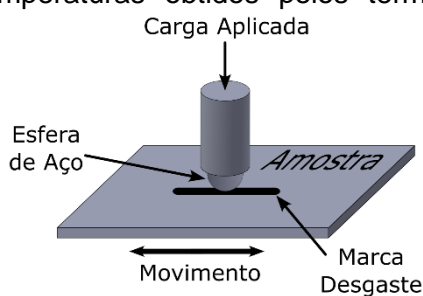


Figura 2 – Desenho esquemático do ensaio de desgaste linear recíproco (adaptado de ASTM G133(2005))

Ensaio de deslizamento recíproco foram realizados em amostras extraídas das posições 5 e 60mm de cada lingote de cada liga. As amostras foram pressionadas por uma esfera padrão de aço SAE 52100, conforme ilustrado na Figura 2. Os ensaios seguiram a norma ASTM G133 (2005) e os parâmetros do tribômetro listados na Tabela 1. Foram testadas triplicatas de duas amostras de cada liga, solidificadas com diferentes históricos de solidificação. A superfície de cada amostra foi polida com abrasivos de 0,25 μm . Os ensaios foram realizados a seco, a 20°C e com umidade relativa abaixo de 50%, sem lubrificantes ou líquidos abrasivos. Após os ensaios, as amostras foram analisadas em um microscópio confocal para determinar o volume desgastado. Os testes e as análises foram conduzidos em colaboração com o Centro Nacional de Investigações Metalúrgicas (CENIM).

Tabela 1 - Valores dos parâmetros adotados nos ensaios de deslizamento recíproco

	Curso	Frequência	Força	Tempo
Teste 1	2mm	5Hz	0,2N	200s
Teste 2	2mm	5Hz	0,5N	200s

Ensaio de tração foram realizados utilizando corpos-de-prova (CPs) produzidos a partir de lingotes solidificados nas mesmas condições daqueles usados para ensaio de desgaste. Os lingotes foram seccionados axialmente em três partes e usinados para obter peças nas dimensões mostradas na Figura 3.

Cortes transversais com intervalos de 4 mm foram feitos ao longo do comprimento das peças.

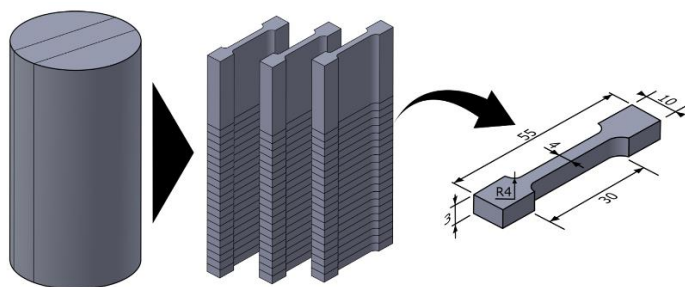


Figura 3 - Ilustração exemplificando os cortes realizados no lingote e a dimensão da amostra de tração

Cada CP apresentou uma seção transversal retangular, com dimensões médias de 4 mm por 3 mm e um comprimento útil de 22 mm para ensaio. Os ensaios de tração foram efetuados no equipamento MTS 810, conforme a norma ASTM E8M (2021), com uma taxa de deformação de 7 mm/min. Cada ensaio foi realizado em triplicata para cada posição.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Conforme a dimensão do CP mostrado na Figura 3, as cargas dos ensaios de tração foram submetidas no sentido perpendicular aos de crescimento dos grãos colunares. Sabe-se que quanto mais refinado for o material, maiores são as resistências mecânicas. Hall e Petch (ARMSTRONG, 2014) propuseram que essa relação varia com o inverso do quadrado do tamanho de grãos. Portanto, a Figura 4 mostra as propriedades obtidas através dos ensaios de tração correlacionadas com o inverso do quadrado de λ_1 , os quais foram medidos no mesmo plano em que a carga foi aplicada.

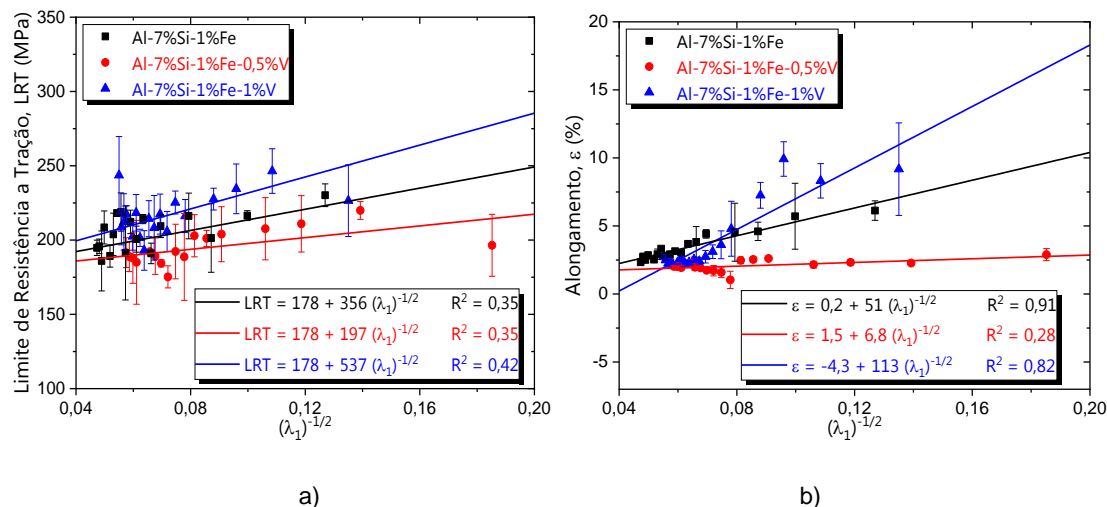


Figura 4 – a) Limite de resistência à tração e b) Alongamento em função do inverso do quadrado do espaçamento dendrítico primário para as três ligas

No que diz respeito ao limite de resistência à tração (LRT), cada liga apresentou uma resposta distinta ao refinamento da microestrutura. A liga Al-7%Si-1%Fe-1%V destacou-se com a maior variação e os valores mais elevados de LRT. Em contraste, a liga Al-7%Si-1%Fe-0,5%V teve a menor variação com o refinamento e os menores valores de LRT, até mesmo em comparação com a liga Al-7%Si-1%Fe. Quanto ao alongamento, a tendência foi similar à do LRT: a liga Al-7%Si-1%Fe-1%V apresentou os maiores valores de alongamento e as maiores variações associadas ao refinamento, seguida pela liga Al-7%Si-1%Fe, enquanto a liga Al-7%Si-1%Fe-0,5%V exibiu os menores valores, tanto em alongamento quanto em variação com o refinamento microestrutural. Esses resultados

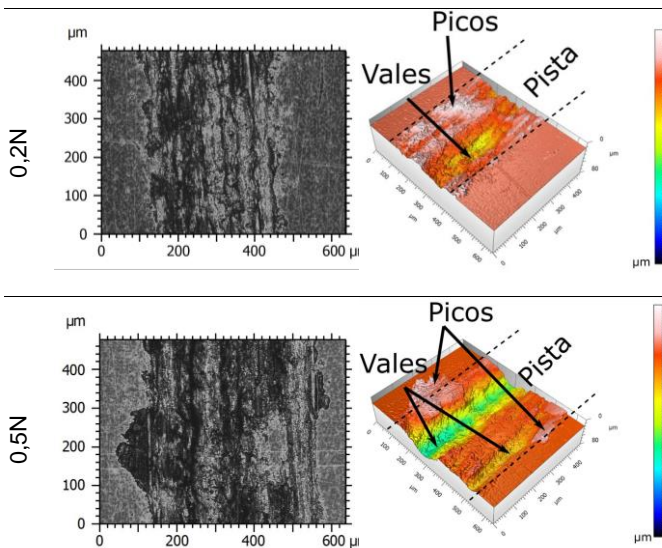


Figura 5 - Imagem microscópica típicas de desgaste para as duas cargas aplicadas.

Os picos observados na região externa da pista sugerem delaminações localizadas, apontando para um desgaste severo dominado pela plasticidade. Essas delaminações resultam da combinação da matriz dúctil rica em alumínio e da alta carga de desgaste, um fenômeno comumente relatado na literatura, como no estudo de Islam e Farhat (2010). Além disso, vales foram observados dentro do sulco em ambas as forças aplicadas, sugerindo que o produto do desgaste aderiu à esfera, formando um aglomerado duro que criou esses vales durante o ensaio.

A Figura 6 apresenta a taxa de desgaste entre as posições de 5 a 60 mm para três diferentes ligas, submetidas a diferentes forças. Observa-se que os valores de taxa de desgaste entre as posições para as respectivas ligas e forças aplicadas estão dentro da mesma faixa. Ou seja, não apresentaram diferença significativa entre elas. Portanto, considerando que a dimensão da microestrutura não afeta a resistência ao desgaste, foi realizada uma análise em função da composição das ligas, levando em conta todos os ensaios para cada teste realizados para cada uma das ligas.

As taxas de desgaste dos 2 testes aplicados para cada liga são mostradas na Figura 7. Observa-se então que não houve variação significativa da taxa de desgaste com a composição quando aplicado a carga de 0,2N. Em contrapartida, houve diferença significativa da taxa de desgaste em relação a composição das ligas para a carga de 0,5N. A liga Al-7%Si-1%Fe apresentou maiores valores de taxas de desgaste em

sugerem que a adição de 1% em massa de V na liga Al-7%Si-1%Fe resultou em valores mais altos de LRT e alongamento.

A Figura 5 exibe imagens representativas da topografia de desgaste em resposta às cargas aplicadas nos testes 1 e 2 para as ligas estudadas. Nos testes com carga de 0,5 N, a região desgastada apresentou maior profundidade em comparação com os testes de carga de 0,2 N, indicando deformações mais intensas e picos mais elevados. Os picos observados na região externa da pista sugerem

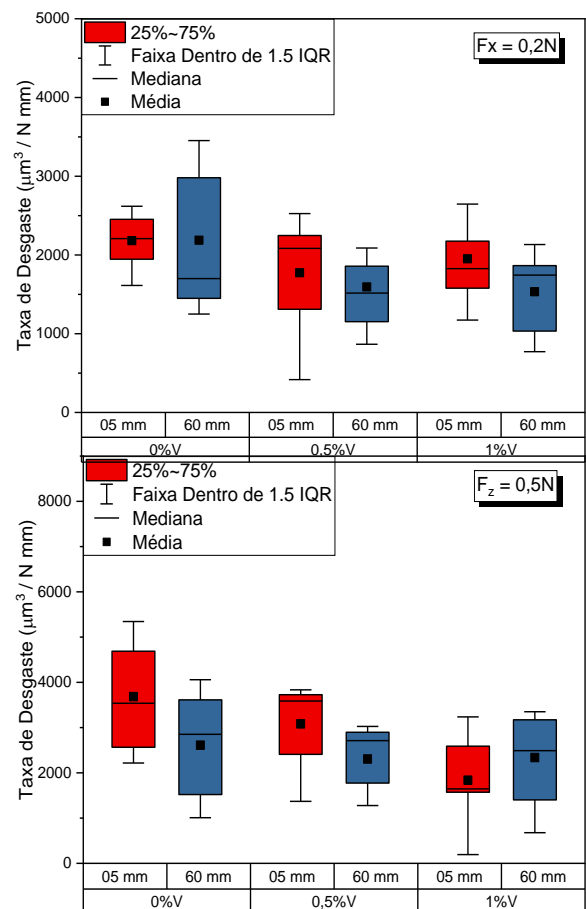


Figura 6 - Taxa de desgaste em função da posição da composição de Vanádio para carga de a) 0,2N e b) 0,5N

relação às outras ligas. Isso indica, portanto, que a presença do vanádio é responsável pelo aumento da resistência ao desgaste. No entanto, não houve diferença significativa com o aumento de vanádio na composição. Esse aumento de resistência ao desgaste pode ser associado a quantidade de vanádio presente na matriz de alumínio, o qual é responsável por elevar a dureza na matriz e pela formação de intermetálicos ricos em V como α -AlFeSiV, como pode ser observado na Figura 8.

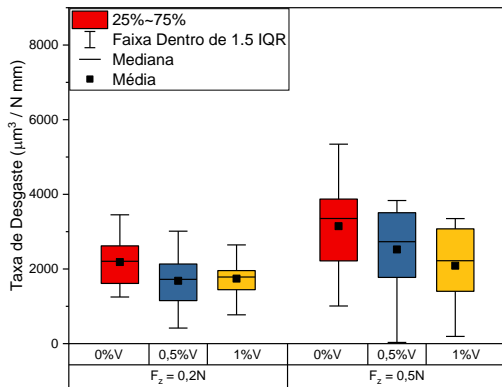


Figura 7 - Taxa de desgaste em função da composição de vanádio e carga aplicada

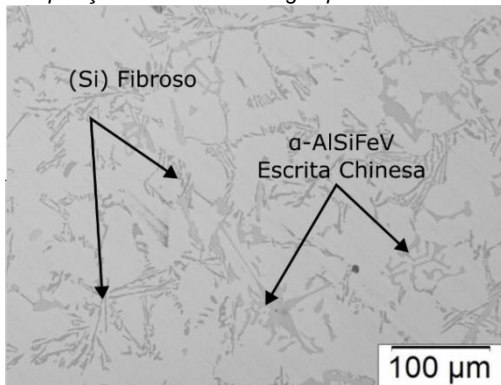


Figura 8 - Microestrutura típica da posição 30mm da liga Al-7%Si-1%Fe-1%V contados a partir da base refrigerada

CONCLUSÕES:

A presença de Vanádio influenciou a formação das fases durante o processo de solidificação, promovendo a nucleação de partículas ricas em V. Isso resultou em ligas com maior resistência e alongamento, especialmente para liga Al-7%Si-1%Fe-1%V, que obteve os melhores desempenhos nos ensaios, demonstrando os benefícios da adição de Vanádio na melhoria das propriedades e na redução do desgaste. No entanto, o acréscimo inadequado de vanádio, como 0,5% em massa, colabora com a redução na resistência mecânica. Portanto, esse trabalho mostra que o Vanádio é um potencial candidato para melhorar as propriedades mecânicas de ligas do sistema Al-Si contaminadas com ferro, desde que tenha a quantidade suficiente para a nucleação das fases ricas em Vanádio.

BIBLIOGRAFIA

- KASHYAP, K. T. et al. Casting and heat treatment variables of Al-7Si-Mg alloy. **Materials Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 189–204, 1993
- LIN, B. et al. Effects of Vanadium on Modification of Iron-Rich Intermetallics and Mechanical Properties in A356 Cast Alloys with 1.5 wt.% Fe. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 28, n. 1, p. 475–484, 11 jan. 2019.
- KURZ, W.; RAPPAZ, M.; TRIVEDI, R. Progress in modelling solidification microstructures in metals and alloys. Part II: dendrites from 2001 to 2018. **International Materials Reviews**, v. 66, n. 1, p. 30–76, 2021.
- SILVA C.A.P., et al. **Microstructure and Tensile Strength of an Al-Si-Fe-V Alloy: Vanadium and Solidification Thermal Parameters as Recycling Strategies**. *Sustainability*, v. 14, n. 21, p. 13859, 25 Out 2022.
- SILVA L.F., et al. **Análise da Evolução Microestrutural da Liga Al-7%Si-1%Fe-1%V e sua Correlação com a Dureza**. Anais do XXXI Congresso de iniciação científica Unicamp, 25 Out 2022.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G133 - Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear**. West Conshohocken, PA. 2005.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA. 2021.
- ARMSTRONG, R. W. Engineering science aspects of the Hall-Petch relation. **Acta Mechanica**, v. 225, n. 4–5, p. 1013–1028, 4 abr. 2014.
- ISLAM, M. A.; FARHAT, Z. Wear of A380M aluminum alloy under reciprocating load. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 19, n. 8, p. 1208–1213, 4 nov. 2010