



# AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA 6351 REOFUNDIDA

**Palavras-Chave:** REOFUNDIÇÃO, MICROESTRUTURA, REOLOGIA

**Autores(as):**

**Isabela Freitas Kierulff**

**Orientador:** Prof. Dr. Eugênio José Zoqui - FEM Unicamp

---

## INTRODUÇÃO:

O processamento de ligas metálicas no estado semissólido consiste na conformação de materiais metálicos no estado pastoso permitindo a obtenção de peças estruturais com geometria complexa e isentos de defeitos. Esta mistura possui características distintas do material tanto no estado líquido quanto sólido, se comportando como um líquido viscoso, com fluidez que pode ser comparada ao mel ou à argila, dependendo das condições de processamento. Isso confere ao material processado no estado semi-sólido algumas vantagens em relação aos metais fundidos, como baixa porosidade gasosa, menor contração e melhores propriedades mecânicas.

Dentre os principais processos destacam-se a reofundição e a tixoconformação. A tixoconformação implica na fusão parcial de uma liga metálica, enquanto a reofundição implica na solidificação parcial e controlada. As duas técnicas buscam produzir uma mistura de sólido particulado, com pequena dimensão e com formato esférico, imerso em líquido, e esta massa semissólida é então conformada em prensas horizontais e verticais para se obter uma peça estrutural com geometrias complexas, como as obtidas pela injeção sob pressão [1,2]. O trabalho em questão utilizou a técnica da reofundição, com uma prensa pneumática Alphamatic 12 Ton.

Um dos métodos utilizados para processar ligas no estados semi-sólido é o GISS (Gas Induced Semi-Solid), que consiste na injeção de um gás inerte a fim de provocar uma agitação em um metal fundido durante os estágios iniciais de solidificação [3]. Neste trabalho, uma técnica análoga ao GISS com a utilização de gás argônio foi utilizada para processar a liga 6351 no estado semi-sólido. A liga em questão, 6351, é uma liga comercial de alumínio da série 6xxx (Al 95.9 - 98.5%, Si 0.70 - 1.30%, Mn 0.40 - 0.80%, Mg 0.40 - 0.80%), à base de alumínio/silício/magnésio. Ela é comumente utilizada para a conformação plástica, em estruturas extrudadas de veículos rodoviários e ferroviários; tubos e canos para transportar água, óleo ou gasolina, e portanto, não se tratando de uma liga comumente utilizada na indústria de fundição convencional [4].

Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar comparativamente a microestrutura e as propriedades mecânicas da liga 6351 conformada no estado semissólido, por GISS, de forma a verificar a viabilidade técnica da produção dessa liga por reofundição.

## **METODOLOGIA E RESULTADOS:**

Foram produzidas amostras da liga 6351 com a utilização da técnica GISS (Gas Induced Semi-Solid), com a injeção de gás argônio a uma vazão de 0,6 litros/minuto à temperatura ambiente no metal aquecido à 670 °C. Variando o tempo de vazão do gás, foram produzidas amostras com 3, 5 e 7 segundos de vazão além de uma amostra sem injeção de gás. As Figuras 1 e 2 abaixo mostram exemplos das peças produzidas no processo e das amostras já cortadas embutidas e polidas.



*Figura 1 e 2 - Exemplos de peças produzidas e amostras preparadas  
(Da esquerda para a direita, condição Líquida, 3, 5 e 7 segundos de gás)*

A partir das amostras preparadas e utilizando um microscópio óptico, foi possível obter imagens para avaliar a porosidade da liga em cada caso. A Figura 3 e 4 abaixo mostra dois exemplos das imagens utilizadas, com excesso de saturação da cor branca e iluminação, evidenciando os poros. A Figura 5 apresenta um gráfico da porcentagem de porosidade por área de cada amostra.

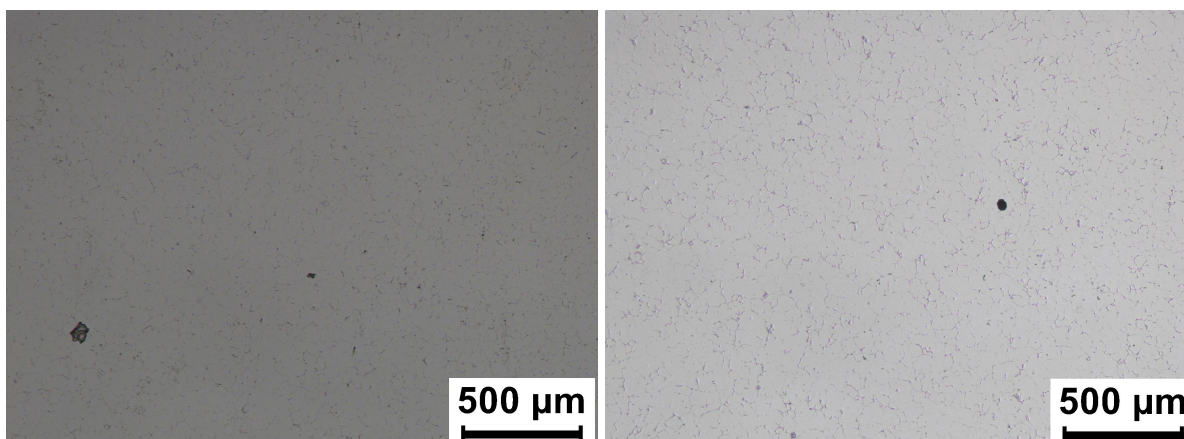


Figura 3 e 4 - Imagens usadas para avaliar porosidade  
Condição líquida (à esquerda) e 3 segundos de gás (à direita)

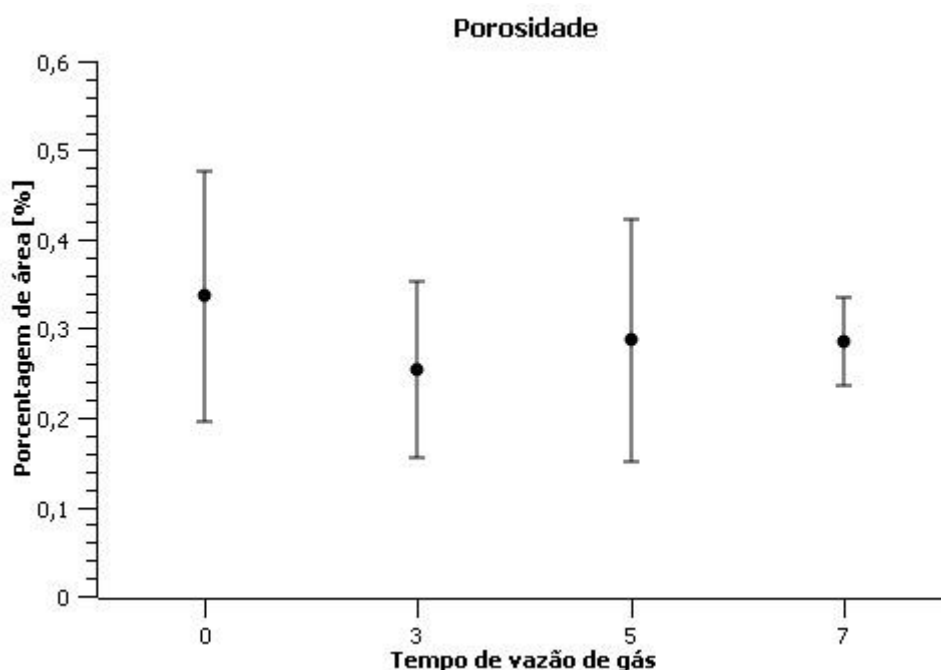


Figura 5 - Curva de porosidade média

Também foram realizados ataques eletrolíticos nas amostras, com solução de  $\text{HbF}_4$  a 1,8% e corrente de 20 Volts durante 7 minutos. Novamente com o auxílio do microscópio, foi possível obter imagens para determinar o tamanho médio de glóbulos, além de imagens microscópicas coloridas que permitiram determinar o tamanho médio de grão de cada amostra. Nas Figuras 6 e 7 é possível observar exemplos das imagens preto e branco dos casos sem injeção de gás e do caso com 3 segundos de vazão de gás utilizadas para determinar o tamanho médio dos glóbulos. Já nas Figuras 8 e 9 há exemplos das imagens coloridas, obtidas por microscopia óptica de luz polarizada para os mesmos casos.

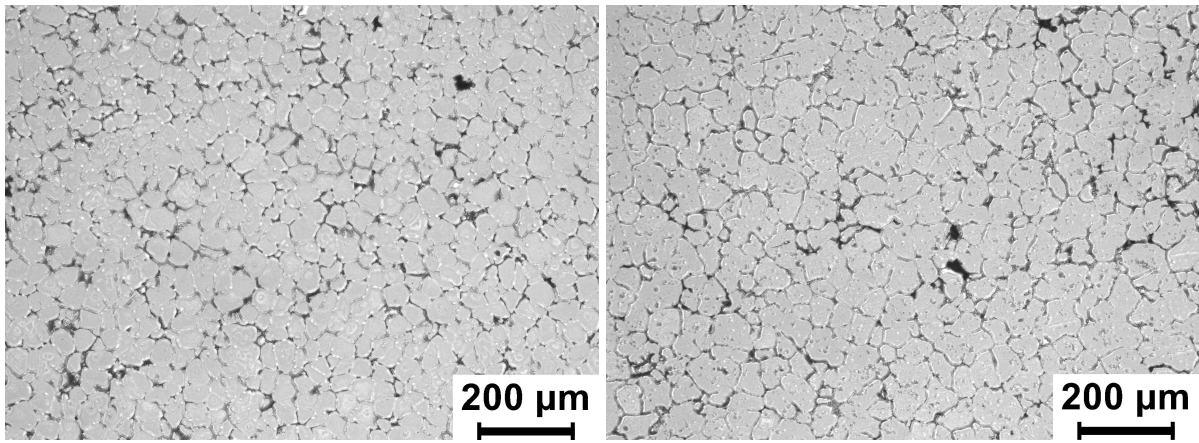


Figura 6 e 7 - Imagens usadas para avaliar tamanho de glóbulo  
Condição líquida (à esquerda) e 3 segundos de gás (à direita)

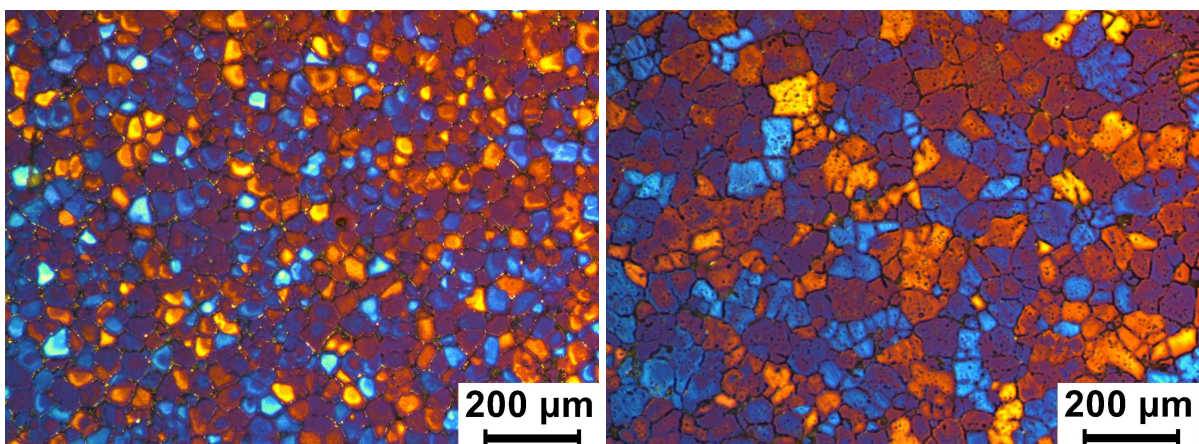


Figura 8 e 9 - Imagens usadas para avaliar tamanho de grão  
Condição líquida (à esquerda) e 3 segundos de gás (à direita)

A Tabela 1 abaixo contém os principais resultados obtidos da análise da microestrutura, de maneira numérica:

Tempo de GISS [s]	Porosidade [%]	$\sigma$	Tamanho de grão	$\sigma$	Tamanho de glóbulo	$\sigma$
0	0,336	0,141	57,798	9,472	31,623	3,409
3	0,254	0,099	84,352	13,713	52,104	8,551
5	0,287	0,136	97,536	14,885	69,996	11,624
7	0,285	0,050	78,658	14,760	59,577	8,209

Tabela 1 - Valores numéricos das análises de porosidade, tamanho de grão e tamanho de glóbulo, com seus respectivos desvios padrão ( $\sigma$ )

A dureza das amostras foi determinada com o auxílio de um durômetro digital FV-800 para teste de dureza Vickers. A carga aplicada foi de 1 Kgf com 15 segundos de aplicação conforme a norma ASTM E384 - *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials* [5]. Os resultados se encontram na Tabela 2.

Tempo de GISS [s]	Dureza [HV]	$\sigma$
0	56,7	2,9
3	56,0	4,3
5	54,2	3,1
7	55,8	3,4

Tabela 2 - Resultados teste de dureza com desvio padrão ( $\sigma$ )

## CONCLUSÕES:

Observando os resultados da análise de porosidade, percebe-se que a amostra com 3 segundos de gás foi a que teve um menor resultado médio de porosidade, diminuindo cerca de 24% em relação a condição líquida, e essa também foi a amostra com menor tamanho de glóbulo, ficando pouco atrás somente da condição com 7 segundos em tamanho de grão, a condição de 3 segundos é, portanto, a amostra com os melhores resultados da análise da microestrutura. Dos resultados de dureza, ao se levar em consideração o desvio padrão, não há variação aparente dos resultados entre as amostras.

---

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Flemings, M. C., Behavior of metal alloys in the semisolid state, Metallurgical Transactions, v. 22A, p. 957-981, 1991.
- [2] Zoqui, E. J., "Alloys for Semisolid Processing", Casting, Semisolid Forming and Hot Rolling, Comprehensive Materials Processing, V. 5, Elsevier, (2014), pp. 163-190.
- [3] Wannasin, J.; Martinez, R.A.; Flemings, M.C. Grain refinement of an aluminum alloy by introducing gas bubbles during solidification. *Scr. Mater.* 2006, 55, 115–118. Disponível em: [[Google Scholar](#)]
- [4] ASM International Handbook: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Volume 2 (1992)
- [5] ASTM E384. ASTM E384: Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials, ASTM Standards, West Conshohocken, PA, 2012. Disponível em: <<http://www.astm.org>>