

**Efeito das microporosidades nas propriedades de tração, dureza e microestrutural da liga de Alumínio (JIS-AC4C T6) com adição 0,01% de Sr**

**Effect of microporosity on tensile, hardness and microstructural properties of Aluminum alloy (JIS-AC4C T6) with 0.01% Sr addition**

DOI:10.34117/bjdv7n7-311

Recebimento dos originais: 07/06/2021

Aceitação para publicação: 13/07/2021

**Reinaldo de Almeida Rodrigues**

Mestrando em Ciência e Engenharia de Materiais  
Universidade Federal do Amazonas (UFAM)  
Av. Rodrigo Otávio, 6200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69067-005  
e-mail: reinaldo.a.r@gmail.com

**José Costa de Macêdo Neto**

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Professor na Universidade do Estado do Amazonas  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: jotacostaneto@gmail.com

**Andrews Raphael da Silva Vieira**

Especialista em Processos de Fabricação Mecânica  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: andrews.pessoal@gmail.com

**Charlon Wildson Leite Costa**

Especialista em Processos de Fabricação Mecânica  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: charlon.ufam@hotmail.com

**Bruno da Cruz Cardoso**

Especialista em Processos de Fabricação Mecânica  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: bruno.cruz.cardoso@gmail.com

**Jhonatas Santos Morais**

Especialista em Processos de Fabricação Mecânica  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: jhonatas391@outlook.com

**Edson Dany Batista Pisa**

Tecnólogo em Manutenção Mecânica  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Av. Darcy Vargas, 1200 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69050-020  
e-mail: edson.pisa@gmail.com

**Andrew Avelino Mayer**

Engenheiro Mecânico  
Centro Universitário Luterano de Manaus (ULBRA)  
Av. Carlos Drummond de Andrade, 1460 – Manaus  
Amazonas - CEP: 69077-730  
e-mail: avelino.mayer@gmail.com

**RESUMO**

A fim de estudar o efeito das microporosidades nas propriedades mecânicas da liga de alumínio JIS-AC4C T6, vazada em processo de fundição por gravidade e molde permanente, foi realizado uma investigação por meio de ensaio de tração, análises química e caracterização da fratura, para evidenciar a fragilização da liga quando contaminada com microporosidades. As ligas de alumínio apresentam elevada solubilidade de hidrogênio no estado líquido, o que gera a formação de porosidades durante a solidificação. As análises de composição química mostraram que a liga utilizada apresentou parâmetros dentro da normalidade, porém, os resultados dos ensaios de tração e caracterização das fraturas através de técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura (MEV), mostraram que a formação de vazios/porosidades no fundidos, contribui diretamente para a fragilização do material.

**Palavras-Chave:** Pro-link, rechupe, solubilidade

**ABSTRACT**

In order to study the effect of microporosity on the mechanical properties of the JIS-AC4C T6 aluminum alloy cast in gravity casting and permanent cast, tensile testing, chemical analysis and fracture characterization, to demonstrate the embrittlement of the alloy when contaminated with microporosities, carried out an investigation. Aluminum alloys have high solubility of hydrogen in the liquid state, which generates the formation of porosities during solidification. The analysis of the chemical composition showed that the alloy used presented parameters within the normal range, but the results of tensile tests and characterization of the fractures through optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), showed that the formation of voids / porosities, directly contribute to the embrittlement of the material.

**Keywords:** pro-link, rechupe, solubility

## 1 INTRODUÇÃO

Por se tratar de um material leve, em comparação com outros tipos de materiais de engenharia como o aço, as ligas de alumínio são utilizadas com frequência em várias aplicações industriais [1, 9, 11].

As ligas de Al-Si, especificamente a série JIS-AC4C T6, comercialmente conhecida no ocidente como A-356 tratada termicamente, é bastante utilizada na indústria automotiva, onde a relação peso x resistência mecânica é de extrema necessidade e por influenciar diretamente na economia de combustível e emissão de gases poluentes [2]. É também amplamente utilizada em inúmeras aplicações para componentes estruturais, tais como a roda de liga leve, conjunto de amortecedores/suspensão, suportes e os alojamentos, ferrovias, construção naval, através de diversos processos de fundição [3, 10].

As propriedades mecânicas limite de escoamento, resistência à tração e principalmente o alongamento, são sensíveis a quaisquer alterações na morfologia dos fundidos, o que pode gerar fragilização da peça para o projeto desejado caso seja contaminado [4, 10]. Essa absorção de gases, entre eles o  $H_2$ , ocorre devido à reação química  $2 Al(l) + 3 H_2O(v) \rightleftharpoons Al_2O_3(s) + 3H_2(g)$ .

As ligas de alumínio apresentam elevada solubilidade de hidrogênio no estado líquido (acima de  $660^\circ C$ ), onde a forma mais comum de absorção é decorrente da umidade do ambiente. Entretanto, na solidificação, a solubilidade de  $H_2$  diminui drasticamente [5].

Os poros observados são muitas vezes baseados em sua forma, ou seja, os poros arredondados são classificados como poros provenientes de absorção de gás, enquanto que os poros irregulares são classificados como poros de encolhimento, ou seja, rechupe, defeito relacionado a contração volumétrica do alumínio durante o processo de solidificação. Esta classificação incorpora a suposição de que, os poros gerados pelos gases se formam exclusivamente pelo crescimento de bolhas no líquido, enquanto que os poros de encolhimento se formam por remoção de líquido de dendritos solidificados [6].

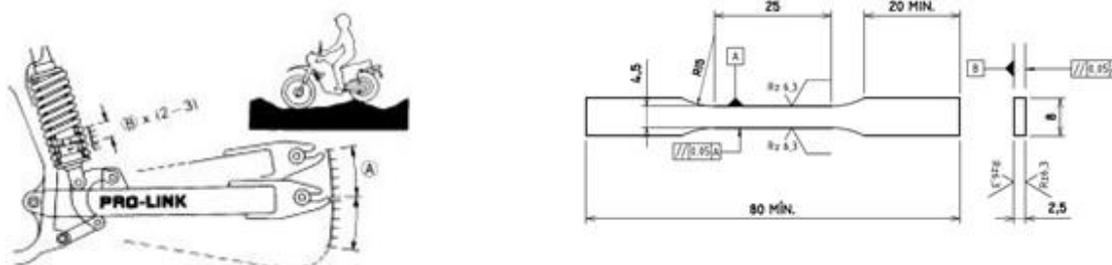
Neste contexto, o presente estudo tem o objetivo de estudar a influência das microporosidades nas AC4C, fundidas em molde permanente e tratadas termicamente (T6). Para este estudo utilizou-se os resultados de análise química do material, ensaios de tração e caracterização das fraturas por meio de microscopia M.D, M.O e MEV

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As amostras foram removidas de um componente da suspensão traseira do motocicletas com sistema pro-link, como mostra a Figura 1, que foram fundidas no processo por molde permanente por gravidade a uma temperatura de  $390 \pm 30 \text{ }^\circ\text{C}$  com tempo de solidificação de 120 segundos. Após o vazamento, a peça é tratada termicamente por solubilização com temperatura de  $540 \pm 5^\circ\text{C}$  por 8h e envelhecimento artificial com temperatura de  $145 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  por 6h (T6). As dimensões das amostras estão de acordo com a Figura 2. Para análise de composição química das amostras, um espectrômetro de emissão óptica foi utilizado (marca Shimadzu, modelo PDA 7000).

Figura 1 – Sistema de amortecimento pró-link Figura. 2 – Dimensões (mm) do corpo de prova para ensaio de tração



### 2.2 ENSAIO DE MICRODUREZA E TRAÇÃO MECÂNICA

Foi utilizada uma máquina para ensaio de microdureza Mitutoyo, modelo HM-100, com lente objetiva 50X. O indentador na forma de uma pirâmide quadrada com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas. As medições foram realizadas sob uma força de 0,3 kgf de acordo com a norma ISO 6507-1 [12]. Os testes de tração foram realizados em temperatura ambiente, as amostras usinadas foram usadas de acordo com as dimensões da Figura 2. A Foi utilizado uma máquina universal de ensaios eletromecânica, fabricante: Instron, modelo: 5582, capacidade da célula de carga: 10 kN, classe 0,5 e um extensômetro eletrônico com capacidade máxima de 2,5 mm (ISO 7500-1) [13] Os testes foram realizados a uma temperatura de  $23 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ , velocidade de  $20 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$  de acordo com a norma JIS Z 2241:2020 [14]. Os resultados dos testes foram submetidos à estimativa da incerteza de medição de acordo com JCGM 100: 2008 [15].

### 2.3 CARACTERIZAÇÃO DE MICROPOROSIDADES ATRAVÉS DE MICROSCOPIA DIGITAL E ELETRÔNICA POR VARREDURA

A análise da fratura das amostras foi realizada inicialmente um microscópio digital com ampliação de 50X, fabricante: Keyence, modelo VHX100. As imagens adquiridas por microscopia óptica foram realizadas após o processo de lixamento, polimento e ataque químico com ácido fluorídrico a 3% e uma ampliação de 100X. O equipamento utilizado foi o microscópio metalográfico, fabricante: Pantec, modelo XJL03. Para obter as imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo VEGA 3, as fraturas das amostras foram analisadas após o ensaio de tração, onde foi verificada uma morfologia da fratura, bem como a análise espectroscopia por energia dispersiva (EDS), a fim de analisar as composições no material da liga local da fratura.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por meio da análise química realizada nos corpos de prova, foi possível evidenciar, através dos resultados encontrados, a presença de outros elementos de liga, se comparar com o padrão de liga A-356 Tabela 1, no entanto, esses elementos, especialmente estrôncio (Sr), têm o objetivo de melhorar as propriedades da liga, modificando a fase eutética [9,11,16]. Os resultados da análise são mostrados na Tabela 2, que pontua a média dos valores.

Tabela 1. Composição química da liga de alumínio JIS-AC4C [%]

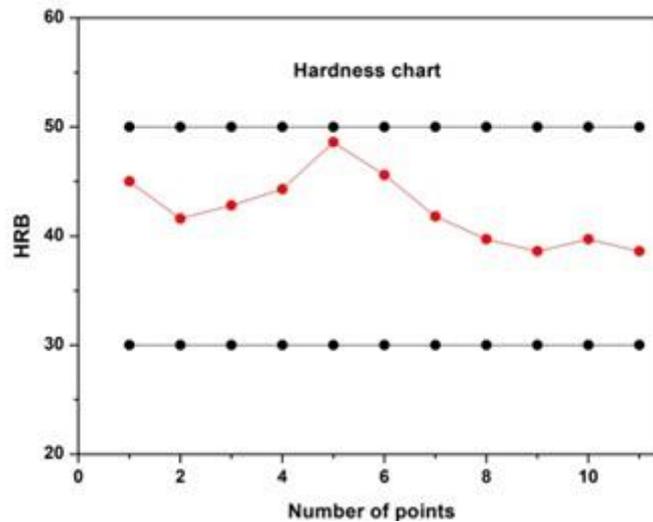
Elementos	Si	Cu <sub>2</sub>	Fe	Mg	Zn	Mn	Ti
Composição [%]	6.5-7.5	0.20	0.20	0.25-0.45	0.10	0.10	0.20

Tabela 2. Composição química encontrada na análise da liga de alumínio JIS-AC4C [%].

Elementos	Si	Fe	Mg <sub>2</sub>	Zn	Mn	Ti	Ni	Pb	Cu	Sr	Sn
Composição Encontrada [%]	7.162	0.106	0.379	0.007	0.002	0.145	0.005	0.003	0.002	0.0144	0.000

Os resultados dos testes de microdureza são mostrados na Figura 3, onde podemos observar que as amostras analisadas estão na faixa de dureza permitida para a liga (30–50 HRB). Os resultados indicam que a dureza da liga foi significativamente influenciada pela solução, temperatura e tempo, onde de acordo com a literatura com esses resultados mostre que a dureza aumenta quando o espaçamento dendrítico diminui. Esta análise foi realizada com o objetivo de descartar qualquer influência dessa propriedade nos resultados de: resistência à tração e alongamento (%) da liga de alumínio [17,18,19].

Figura 3 – Resultados dos testes de dureza em amostras de liga de alumínio AC4C

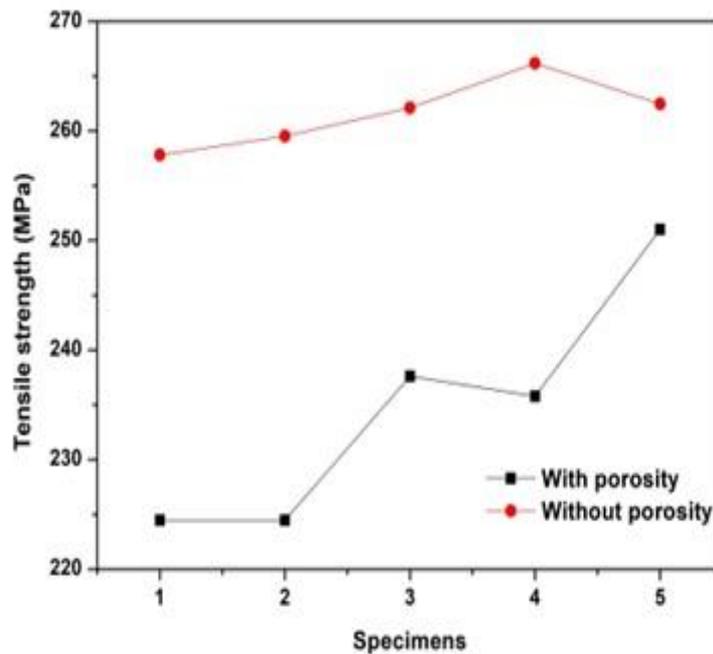


Para resultados do ensaio de tração são mostrados na Tabela 3, onde as propriedades mecânicas de limite de escoamento, resistência a tração e alongamento da liga de alumínio A-356, foram incluídos para comparação entre amostras nas quais foram identificadas inclusões de microporosidades na fratura e amostras sem identificação de qualquer contaminação por porosidade nas fraturas das amostras. Os resultados mostram que as inclusões de microporosidades afetam diretamente as propriedades mecânicas avaliadas, causando a fragilização da liga, como observado em Figura 4, sendo que essas características são abordadas nos trabalhos [2,4,5,9,11,17].

Com microporosidades na fratura				Sem microporosidades na fratura			
C.P	L.E (0.2%)	R.T	Along. (%)	C.P	L.E (0.2%)	R.T	Along. (%)
1	174,49	224,46	1,85%	1	180,00	257,80	6,21%
2	163,98	244,47	2,42%	2	182,10	259,52	5,80%
3	168,47	237,60	1,99%	3	184,30	262,11	6,50%
4	165,30	235,80	1,38%	4	188,60	266,77	7,21%
5	196,39	251,00	3,05%	5	186,80	262,47	6,89%
<b>Média</b>	<b>173,73</b>	<b>238,67</b>	<b>2,14%</b>	<b>Média</b>	<b>184,36</b>	<b>261,73</b>	<b>6,52%</b>
<b>σ</b>	<b>13,30</b>	<b>9,96</b>	<b>0,63%</b>	<b>σ</b>	<b>1,55</b>	<b>5,79</b>	<b>0,55%</b>
<b>U</b>	<b>25,60</b>	<b>19,17</b>	<b>0,95%</b>	<b>U</b>	<b>6,67</b>	<b>6,56</b>	<b>0,87%</b>

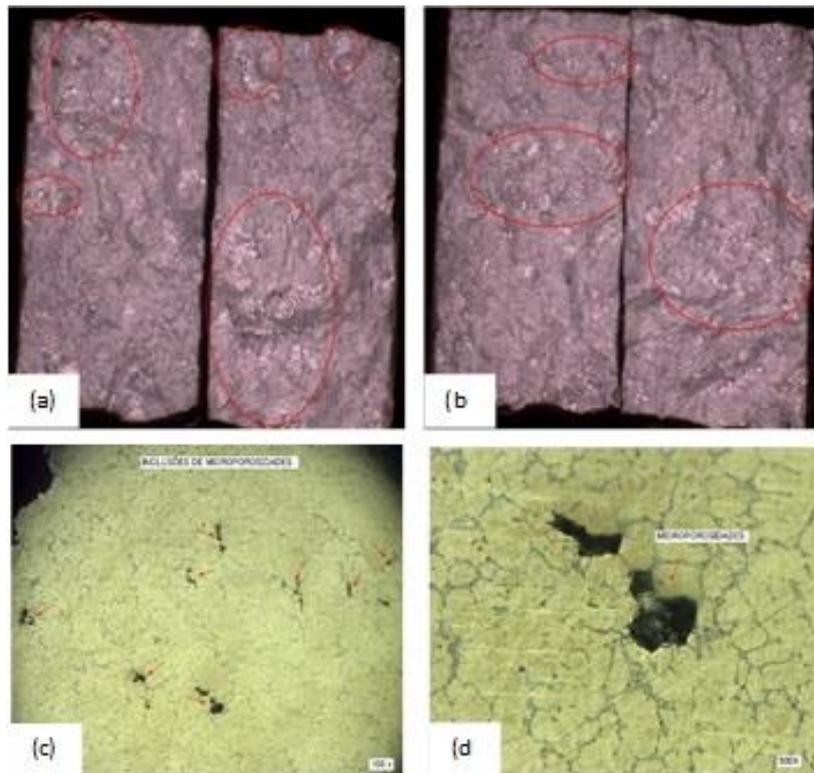
σ- Desvio padrão; U- Estimativa da incerteza padrão de medição (±)

Figura 4 – Influência da microporosidade nas propriedades mecânicas da resistência à tração



Através da microscopia digital, onde foi caracterizada a foram realizadas fraturas das amostras, como mostra a Figura 5 (a-d). Verificou-se que as amostras com valores mais baixos nas propriedades mecânicas Tabela 3, foi encontrado morfologias "brilhante" nas regiões das fraturas, podendo ser os responsáveis pela fragilização do material durante a tensão de tração mecânica. Após a análise do microscópio digital, foi realizado análise macroestrutural nas fraturas por meio de microscopia óptica, onde os corpos de prova passaram pelo processo metalográfico. Foi possível verificar o endurecimento por precipitação de Mg contendo ligas de Al-Si que inicie pela formação de aglomerados finamente dispersos (zona) constituídos por Mg e Si, essas observações foram abordadas em trabalhos [17,18,19].

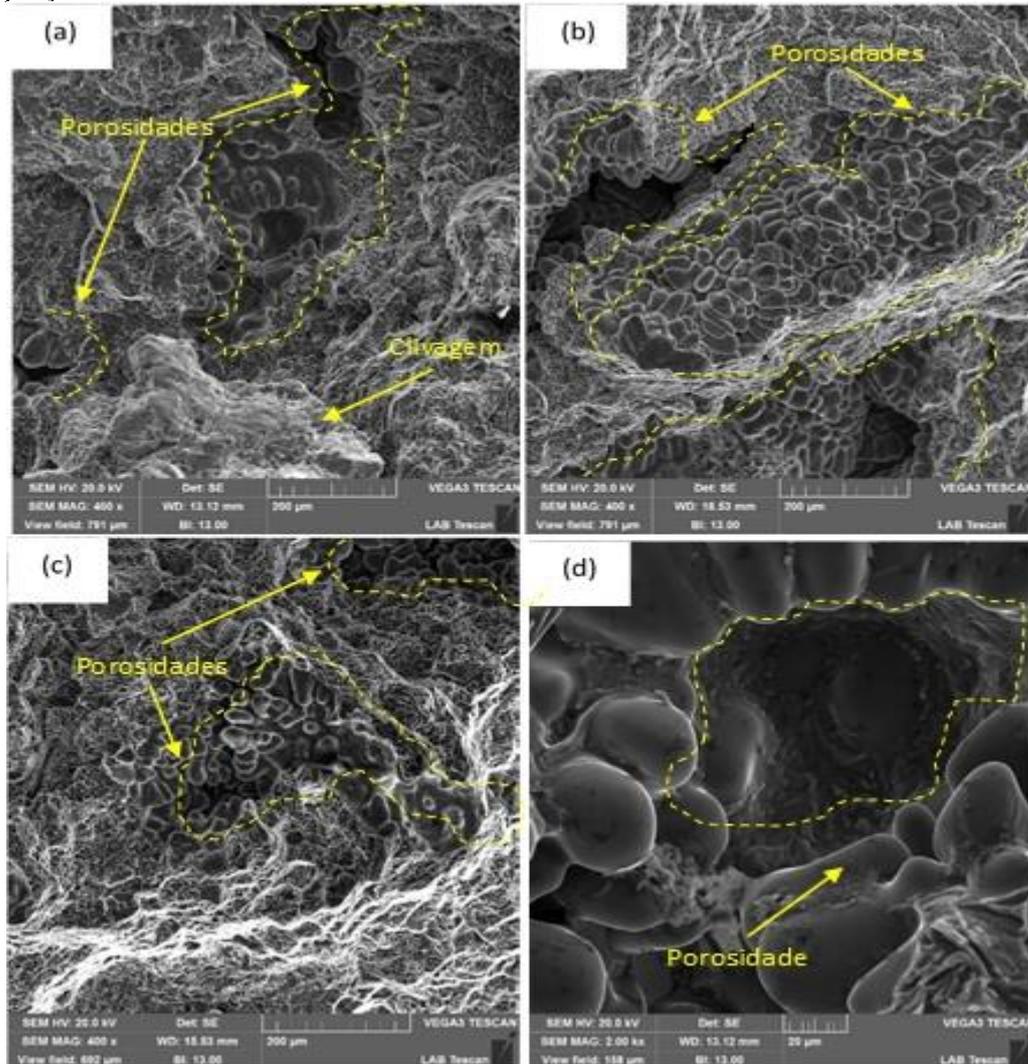
Figura 5 (a-d) - Caracterização da fratura por microscopia digital e óptica



As zonas crescem e se desenvolvem na fase  $\beta$  em forma de agulha, que é incoerente com o Matrix. As agulhas crescentes tornam-se  $\beta$  semi-coerentes e terminam em não-coerentes plaquetas  $\beta$  estáveis. A transformação dos precipitados de coerente para não coerente precipita depende da temperatura e do tempo de envelhecimento. Estudos mostram que a prolongada exposição de Mg contendo ligas de alumínio para o tratamento de envelhecimento levaria a precipita e uma diminuição subsequente nas propriedades. Microporosidades foram identificaram a Figura 5 c-d na região dendrítica rica em partículas de Al e Si, sendo que essas características são abordadas nos estudos [20,21].

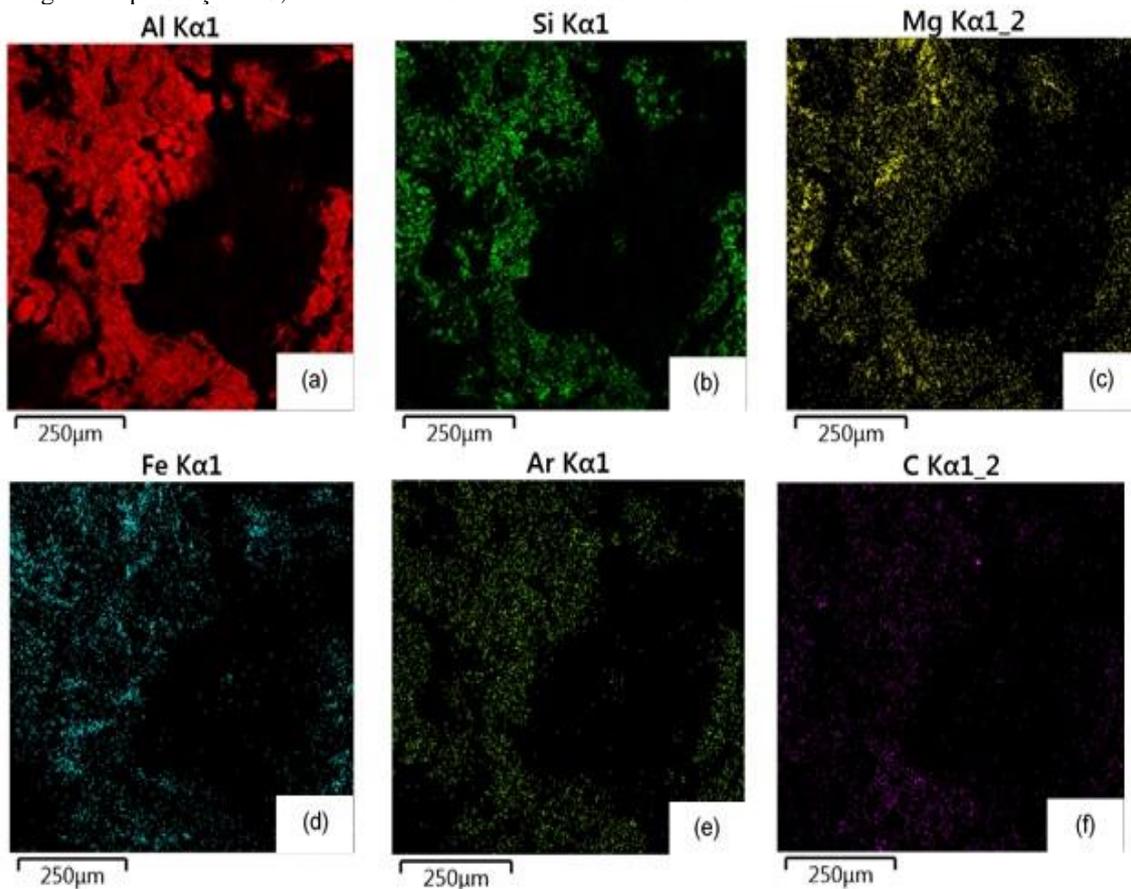
As fraturas superficiais das amostras são mostradas na Figura 6 a-d, são compostas principalmente de fraturas dúcteis relacionadas à deformação plástica e às regiões de fratura por clivagem são pouco observadas, sendo atribuída a elasticidade deformação. De acordo com a literatura [9,17,18,19,21], a formação de microporosidades é devida a um conjunto de fatores interconectados: quantidade de H<sub>2</sub>, falta interdendrítica, solidificação intervalos de tempo e as energias de superfície líquido-sólido, fatores que aumentam o número de microporosidades. Pela quantidade de poros obtidos no trabalho devido à adição de H<sub>2</sub>, que diminuem a área de força efetiva das peças, reduzindo seriamente a tração propriedades [22].

Figura. 6 (a-d) – Região das fraturas com inclusões de microporosidades. (a-c) ampliação de 400X; (d) ampliação de 2000X



A análise EDS sobre a fratura do material foi uma análise qualitativa, com o objetivo de verificar o grau de impurezas encontradas na liga de alumínio e foram encontradas houve presença de Fe e C, conforme exposto na Figura 7 (a-f).

Figura 7 (a-f) - Caracterização da Fratura (SEM EDS) - figura d, há a presença de Fe nas fraturas do material e Figura f a presença de C, evidência de contaminantes residuais



Os resultados deste trabalho mostram grande contaminação por microporosidades da adição H<sub>2</sub> (g) no processo de fundição e mesmo com a adição de estrôncio, mesmo que em Por outro lado, garantiu resultados de microdureza consideráveis nas peças produzidas pela companhia. Existem correlações quantitativas de defeitos de porosidade nas superfícies das fraturas, onde foi observado um ganho de 32,82% na propriedade de alongamento (%). Ainda pode ser possível observar que as inclusões de vazios nas fraturas dos corpos de prova por microscopia eletrônica de varredura e presença de contaminantes residuais (Fe-C).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de Sr (0,0144%) na liga A356 alterou-se de maneira significativa no parâmetros, microestrutura e dureza, pode-se atribuir à finamente esferoidizada Si eutético produzido pela combinação da modificação Sr no tratamento térmico. Análises metalográficas mostram que a modificação Sr favoreceu a esferoidização de Si eutético para reduzir o tempo de solução e desacelerar a precipitação durante envelhecimento.

Ainda foi possível observar que as inclusões nos corpos de prova e por microscópica, seu comportamento metalográfico, através da microscopia eletrônica de varredura arranjo das fases plástica e elástica da liga, já pelas análises em EDS a presença de contaminantes residuais. Sendo assim o método que está sendo adotado O tratamento da empresa está de acordo com as especificações em vigor.

## REFERÊNCIAS

- [1] Gopikrishna S and Binu CY. Study on effects of T6 heat treatment on grain refined A319 alloy with magnesium and strontium addition. *IJTARME*. 2013; 2: 59-62.
- [2] Wang M, Zou Y, Hu, H, Meng G, Cheng P and Chu Y. Tensile Proprieties and Microstructure of Joined Vacuum Die Cast Aluminum Alloy A356 (T6) end Wrought Alloy 6061. *Adv. Mat. Res.* 2014; 939: 90-97.
- [3] Lima H, Silva L, Souza P, Santos J, Nascimento N, Medeiros S, Rodrigues R, Macêdo J. Efeito de Diferentes Tratamentos Térmicos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Ligas Al-Si Fundidas por Gravidade. *Brazilian Journal of Development*. Vol. 6, P. 18681-18696, 2020.
- [4] Jiang H, Nagaumi H, Gou S and Zou C. Study on effects porosity in Al-Zn-Mg-Cu high strength alloy DC ingot. *Mater. Sci. Forum*. 2016; 879: 790-794.
- [5] Mahto RP, Kumar R, Pal SR and Panda SK. A Comprehensive study on force, temperature, mechanical properties and micro-structural characterizations in friction stir lap welding of dissimilar materials (AA6061-T6 & AISI304). *J. Manuf. Process*. 2018; 31: 624-639.
- [6] Neto JCM, De Oliveira, JB, Ribeiro, MR, Guedes AEDS, Rodrigues RA, Silva RNA, Nascimento NR, Neto, JE, Barreda ER, Martins JC and De Freitas, BM. Effects of different annealing time on microstructure and tensile properties of joints welded 5052 aluminum alloy in marine industry. *Mat. Sci. Forum*. 2018; 930: 339-344.
- [7] Lee C. Effect of Ti-B addition on the variation of microporosity and tensile properties of A356 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng. A*. 2018; 668: 152-159.
- [8] Kori SA, Murty BS and Chakraborty M. Development of an efficient grain refiner for Al-7Si alloy and its modification with strontium. *Mater. Sci. Eng.* 2000; 283: 94-104.
- [9] Shivkumar S, Ricci S, Keller C and Apelian, D. Effect of solution treatment parameters on tensile properties of cast aluminum alloys. *J. Heat Treatment*. 1990; 8: 63-70.
- [10] Xiehua L, Lizi H, Yiheng C, Pei Z, Yaping G and Jianzhong C. Effects of microporosity on the tensile properties of aluminum alloy. *Adv. Mater. Res.* 2012; 422: 627-631.
- [11] Varghese P, Joseph F, Varkey MJ, Pooja DDM, Vijeesh V and Sammuel KG. The effect of strontium modification on T6 heat treatment parameters, microstructure and hardness of aluminum silicone-A356 alloy. *JoMME*. 2016; 1: 1-14.
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT-NBR NM ISO 6507-1: Vickers Hardness Test Part 1: Test Method; 2008: 22.

[13] Associação Brasileira de Normas Técnica. ABNT NBR NM ISO 7500-1: Calibration of uniaxial static test machines Part 1: Traction / compression machines - Calibration of the force system. 2004: 17.

[14] Japanese Industrial Standard. JIS Z 2241:2020 - METALLIC MATERIALS - TENSILE TESTING - METHOD OF TEST AT ROOM TEMPERATURE. 11th Edition, October 20, 2020

[15] Evaluation of Measurement Data. Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100. 2008: 141.

[16] Ibrahim MF, Elgallad EM, Valtierra S, Doty HW and Samuel FH. Metallurgical parameters controlling the eutectic silicone characteristics in be-treated Al-Si-Mg alloy. *Mater.* 2016; 9: 1-17.

[17] Pezda J. The effect of the T6 heat treatment on hardness and microstructure of the em AC-ALSi 12CuNiMg Alloy. *Metalurgija.* 2014; 53: 63-66.

[18] Tash M, Samuel FH, Mucciardi, Doty HW. Effect of metallurgical parameters on the hardness and microstructural characterization of as-cast and heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng. A.* 2007; 443: 185-201

[19] Haghshenas M, Zarei-Hanzaki A, Fatemi-Varazansh SM. The effects of thermomechanical parameters on the microstructure of thixocast A356 aluminum alloy. *Mater. Sci. Eng. A.* 2008; 480: 68-74.

[20] Segundo EH, Verran GO, Batista GM. Analysis of the effects of solution heat treatment and artificial aging on the microstructure of aluminum alloy A356. *Matéria (Rio J.).* 2015; 20:936-945.

[21] Kim JH, Kwon IS, Kim KM, Lee CH and Yoon EP. Effect of phosphorous on modification of eutectic silicone in Al-7Si-0.3Mg alloy. *Mater. Sci. Tech.* 2000; 16: 243-248.

[22] Liu MW, Xiao WL, Xu C, Yamagata H, Chen JX, Zhang JB, Ma CL. Effect of the spinning deformation processing on microstructure and mechanical properties of A356 wheels. *Mat. Sci. Forum.* 2016; 850: 526-531.