



EFEITO DA ADIÇÃO DE TITÂNIO NO ESPAÇAMENTO DENDRÍTICO SECUNDÁRIO DA LIGA A356

EFFECT OF TITANIUM ADDITION ON DENDRITIC SPACING A356 ALLOY SECONDARY

Jailson da SILVA¹ Roberli CANTIDIO¹ Freddy SOMMERFELD¹ Edinéia ROTH¹ Elson MARTINS¹ Amanda PIMENTEL¹

¹Faculdade de Tecnologia Assessoritec, Matriz – Rua Marquês de Pombal, 287 – Iriirú, Joinville – SC, 89227-110.

Recebido: 12/11/2019 – Aprovado: 02/03/2020

RESUMO

Técnicas de metalografia quantitativa foram utilizadas para investigar o efeito do Ti sobre a microestrutura da liga A356 bruta de fundição e tratada termicamente (T6). Foram realizadas corridas experimentais com adições de (0%,0,08%,0,10%,0,14% e 0,20% Ti em peso) e verificada a ocorrência de variações no espaçamento dos braços dendríticos secundários (SDAS). O efeito de refinamento foi mais efetivo na região de maior diâmetro dos corpos de prova onde o tempo de solidificação foi maior. Quanto às propriedades mecânicas não foram observados incrementos significativos com a adição de Ti, no entanto medições de dureza na região com maior espessura confirmaram o efeito refinador do titânio.

Palavras-chave: Adição de titânio, Técnicas de metalografia, fundição, tratamento térmico t6.

ABSTRACT

Quantitative metallography techniques were used to investigate the effect of Ti on the microstructure of the heat-treated, cast-in crude A356 alloy (T6). Experimental runs were carried out with additions of (0%,0.08%, 0.10%, 0.14% and 0.20% Ti by weight) and verified the occurrence of variations in the spacing of the secondary dendritic arms (SDAS). The refinement effect was more effective in the larger diameter region of the specimens where the solidification time was longer. As for the mechanical properties, no significant increments were observed with the addition of Ti, however hardness measurements in the region with greater thickness confirmed the refining effect of titanium.

Keywords: Addition of titanium, Metallography techniques, casting, heat treatment t6.

1. INTRODUÇÃO

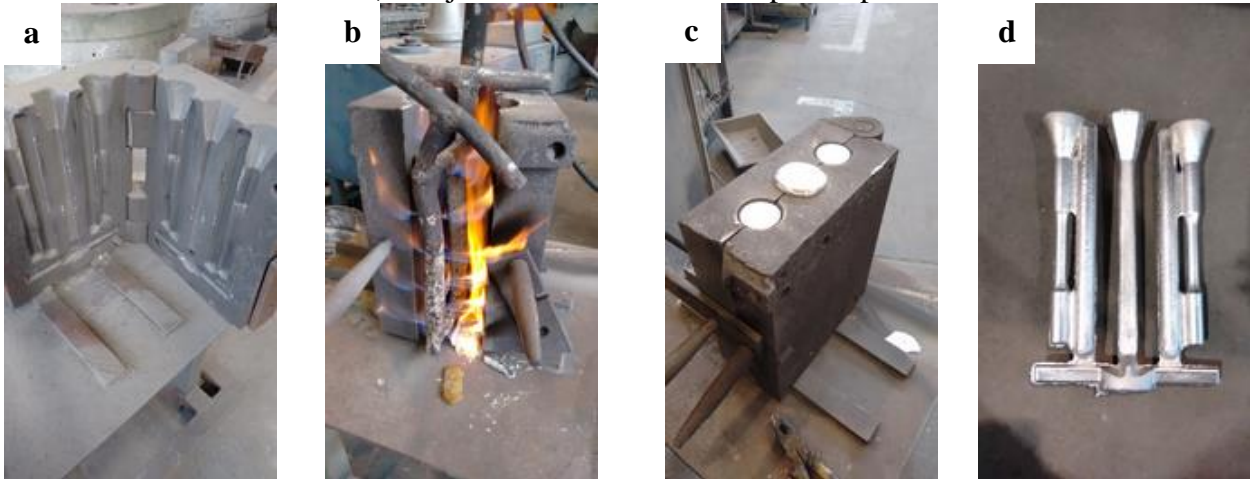
Com a necessidade da obtenção de componentes e produtos mais leves e com boa resistência mecânica, as ligas de alumínio vêm ganhando mercado nos setores de fabricação de peças automotivas e aeronaves (ZENG et al, 2014). Atualmente, a liga de alumínio de fundição mais empregada na indústria é a A356, devido as suas excelentes propriedades físicas e mecânicas, bem como boa resistência à corrosão, excelentes características de fundição, alta tenacidade, altas condutividades térmica e elétrica e baixa densidade permitindo redução no peso dos componentes. Outro fator importante é o fato desta liga ser tratável termicamente, permitindo a obtenção de aumentos significativos na sua resistência mecânica, através da dispersão de precipitados finos dispersos na matriz de alumínio (CASARI, MERLIN e GARAGNANI, 2013). A utilização de elementos de ligas permite a obtenção de melhores propriedades mecânicas. O titânio tem sido empregado industrialmente para promover a redução do tamanho de grão (PYO, 2011).

Nesta pesquisa foi realizado um estudo analisando as variações dos valores de SDAS (espaçamento dendrítico secundário) com adições de titânio utilizando técnicas de metalografia quantitativa. Esta iniciativa se justifica pelo fato de que adições deste elemento podem interferir nas propriedades mecânicas da liga A356 nas condições brutas de fundição e tratadas termicamente (T6). Para avaliar a microestrutura foram utilizadas técnicas de microscopia óptica, enquanto o comportamento mecânico foi avaliado usando ensaios mecânicos de tração e de dureza.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Foi analisada a influência do percentual de titânio na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga A356. A etapa de fusão da liga foi realizada nas instalações da empresa Wetzel S.A - Unidade Alumínio, sendo constituída da transformação do alumínio puro (~99% de pureza) para a classe A356, com adições dos elementos Si e Mg, até atingir os devidos percentuais. Posteriormente, o metal líquido foi transferido para um forno de espera, passando pelo ajuste da composição química e o tratamento de desgaseificação. Após a finalização da preparação da liga, a temperatura do banho foi mantida em $760\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até a execução do vazamento. No primeiro vazamento foram obtidos corpos de prova sem titânio. Ao longo do processo foram realizadas adições progressivas da liga mãe (Al-Ti10%), com o objetivo em alcançar percentuais de 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% Ti em peso. A cada percentual obtido a liga foi vazada por gravidade em uma coquilha de aço pré-aquecida a 200°C . As principais etapas deste processo são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas do processo de fundição. a) Coquilha; b) Aquecimento da coquilha; c) Molde preenchido; d) Conjunto fundido com os corpos de prova



A Tabela 1 apresenta as composições químicas de todos os lotes obtidas usando espectroscopia de emissão óptica. Observa-se que os percentuais de Ti ficaram muito próximos dos valores previstos.

Tabela 1 - Composição química da liga A356 (% em peso) com diferentes percentuais de titânio.

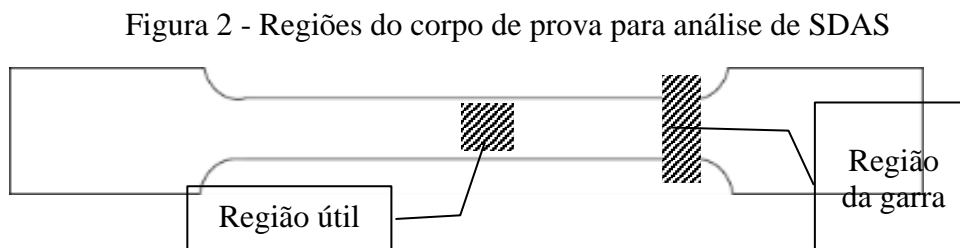
Lote	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Al
1	6.6	0.12	0.002	0.25	0.006	92.9
2	6.8	0.12	0.002	0.35	0.08	92.7
3	6.7	0.12	0.002	0.39	0.10	92.7
4	6.6	0.12	0.002	0.39	0.14	92.7
5	6.6	0.12	0.002	0.35	0.20	92.7

Parte das amostras foi submetida ao tratamento térmico T6 que consistiu em solubilização a 540 °C por 10 horas, seguida de resfriamento em água a temperatura ambiente, na sequência foi realizado envelhecimento artificial a temperatura 155 °C por 5 horas. Os corpos brutos e tratados foram usinados de acordo com a norma A'BNT NBR 6892-1. Uma descrição mais detalhada da metodologia experimental foi descrita em trabalho anterior (KIEPER, 2016).

Os ensaios de tração foram realizados utilizando uma máquina universal de ensaios mecânicos EMIC 300KN, com velocidade de aplicação da carga de 4,2 mm/min, utilizando-se como referência a norma ASTM E 8M – 01, para execução dos ensaios. Nos ensaios de dureza Brinell (HB) foi utilizada esfera de 2,5 mm e aplicação de uma carga de 62,5 kgf por 15 segundos.

Foi utilizado um microscópio óptico para capturar as imagens a serem analisadas. A preparação das amostras foi conduzida usando técnicas convencionais de preparação metalográfica. A revelação da microestrutura das amostras foi feita com ataque químico com ácido fluorídrico 0,5% (COUTINHO, 1980) com um tempo de 15 segundos.

A caracterização da microestrutura teve como objetivo avaliar o espaço entre os braços dendríticos secundários (SDAS), as análises destas variações foram feitas com cortes transversais nas amostras em duas regiões dos corpos de prova, a de maior diâmetro (região da garra) e na região de menor diâmetro (região útil), conforme ilustrado nas regiões destacadas da Figura 2.

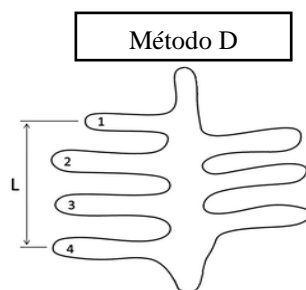


Fonte: Os autores (2020).

No processo de medição, foram feitas 20 imagens de cada amostra, sendo 10 no sentido vertical e outras 10 no sentido horizontal, a ampliação da lente utilizada foi de 100x. Para cada imagem foram realizadas 10 medições dos valores de SDAS.

Utilizou-se o método D, abordado pelo Vandersluis e Ravindran, para obter os valores de SDAS. Neste método é medido o valor L como o comprimento paralelo ao braço principal entre os centros para os braços secundários contados, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Método de medição do SDAS utilizado nesta pesquisa.



Na equação 1 n representa o número de braços secundários contados apenas ao longo de um lado do braço principal, L representa a medida dos braços secundários contados e M refere-se à magnitude da lente. As medições foram realizadas utilizando o Software Analysis®.

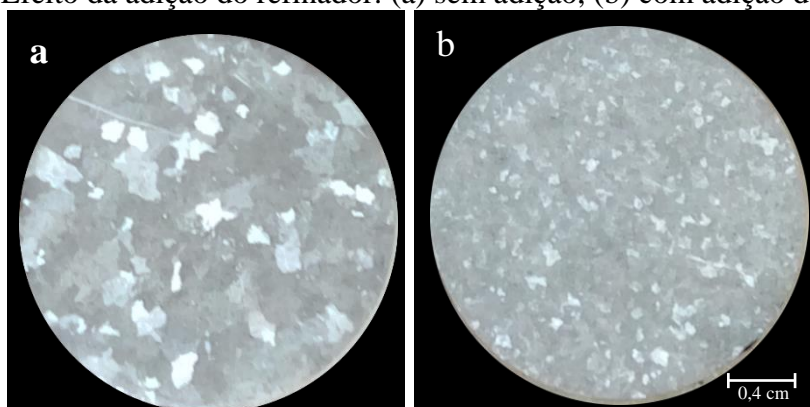
$$SDAS = \frac{L}{n \cdot M} \quad (1)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise macrográfica pode-se comprovar o efeito da adição de titânio na liga A356 na

região da garra dos corpos de prova para ensaios de resistência à tração (figura 4). Na amostra com adição de 0,10% de Ti (fig. 4.b) observa-se grãos mais refinados em comparação com a amostra sem adição de Ti (fig. 4.a), confirmando a eficiência da inoculação do titânio como método para refinamento de grãos na liga em estudo.

Figura 4 - Efeito da adição do refinador: (a) sem adição, (b) com adição de 0,10% Ti.



Os resultados referentes aos ensaios mecânicos de tração são apresentados na Tabela 2, onde se observa pequenas alterações nas propriedades mecânicas com a adição crescente de Ti, indicando uma pequena influência da adição titânio.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios mecânicos de tração.

Bruto de Fundição	Alongamento (%)		Lim. de Escoamento (MPa)		Lim. de Resistência(MPa)	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0% Ti	4,35	0,62	92,85	1,27	181,9	5,93
0,08% Ti	3,26	0,57	102,06	2,83	187,74	0,92
0,10% Ti	4,26	0,72	99,16	2,30	198,23	5,07
0,14% Ti	4,55	0,71	108,70	9,19	198,37	1,28
0,20% Ti	3,61	0,12	106,06	2,11	195,28	3,17
T6	Alongamento (%)		Lim. de Escoamento (MPa)		Lim. de Resistência(MPa)	
	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão	Média	D. Padrão
0% Ti	5,77	1,24	190,35	6,14	266,41	5,52
0,08% Ti	6,29	2,26	208,73	1,59	287,19	8,83
0,10% Ti	8,03	1,32	171,65	14,41	265,80	22,14
0,14% Ti	7,12	0,56	185,85	1,90	281,47	3,64
0,20% Ti	8,03	1,11	190,12	4,71	285,34	3,43

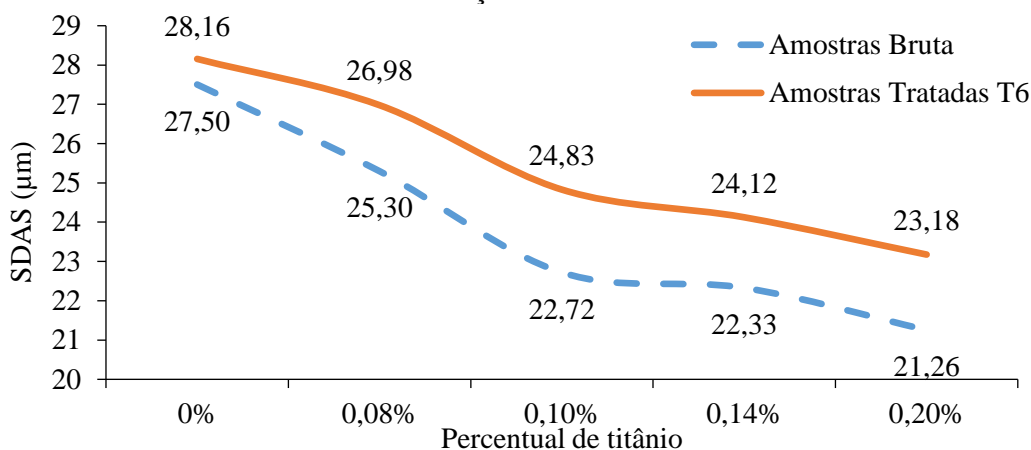
Os corpos de prova tratados com T6 apresentaram valores superiores aos brutos devido a precipitação das partículas de Mg₂Si na matriz. Os valores das amostras tratadas estão de acordo com estabelecido, pelo Metals Handbook (ASM, 1992), assim como nas amostras brutas a adição de titânio não resultou em variações significativas nos valores de resistência. Os resultados das medições dos valores de SDAS são descritos na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores médios de SDAS (μm) nas regiões com maior e menor diâmetro (a) bruta de fundição, (b) tratadas termicamente (T6).

(a) SDAS (μm) – Amostras Brutas de fundição										
Localização	0% Ti		0,08% Ti		0,10% Ti		0,14% Ti		0,20% Ti	
Região da garra	27,5	± 5	25,3	$\pm 4,7$	22,7	$\pm 3,4$	22,3	$\pm 2,6$	21,3	$\pm 3,8$
Região útil	20,5	$\pm 4,4$	20,8	$\pm 3,5$	19,6	$\pm 3,2$	18,4	$\pm 3,1$	18,8	$\pm 2,9$
(b) SDAS (μm) – Amostras Tratadas (T6)										
Localização	0% Ti		0,08% Ti		0,10% Ti		0,14% Ti		0,20% Ti	
Região da garra	28,2	$\pm 5,7$	27,0	$\pm 4,8$	24,8	$\pm 4,2$	24,1	$\pm 3,8$	23,2	$\pm 3,1$
Região útil	21,3	$\pm 4,5$	21,0	$\pm 3,7$	20,8	$\pm 3,6$	21,0	$\pm 2,9$	20,3	$\pm 3,1$

Analisando os valores de SDAS (Tabela 3) observa-se que as amostras brutas e tratadas com menor diâmetro (região útil) não apresentaram alterações significativas dos valores de SDAS com relação à variação do percentual de titânio, este comportamento está associado com a ocorrência de resfriamento rápido nesta seção em função do seu tamanho. Este comportamento quanto aos valores de SDAS ajudam a explicar as pequenas variações observadas nos ensaios mecânicos. No entanto, nas amostras com o maior diâmetro (região da garra) ocorreram reduções significativas nos valores de SDAS em função da adição de titânio (figura 5). O efeito do refinamento ocorreu com mais intensidade a partir de 0,10% Ti para a liga A356, entretanto o valor obtido é inferior ao descrito por Geoffrey (2007), cujo, efeito de refino ocorreu com 0,15% Ti para ligas de alumínio com maiores graus de pureza. Essa diferença de percentual pode estar relacionada com a presença de outros elementos na liga que podem auxiliar durante o processo de nucleação. Com a redução nos valores de SDAS, causada pelo efeito nucleante do Ti, pode-se estimar a ocorrência de redução no tamanho dos grãos, conforme observação foi feita por Zhao et al (2013). Este pesquisador encontrou evidências experimentais que permitem correlacionar a ocorrência de refino dos grãos com a redução dos valores de SDAS.

Figura 5 - Resultados das medições do SDAS da liga A356 na região mais espessa (garra do cp) com variação de titânio



Ficou evidente que o tratamento térmico contribuiu para o aumento do SDAS. As amostras tratadas termicamente apresentam maiores valores de SDAS em comparação com as amostras brutas de fundição. O aumento do espaçamento das dendritas ocorreu devido ao coalescimento das partículas de silício e a sua redistribuição ao longo da matriz, resultando num formato mais arredondado quando comparado com o estado bruto de fundição. Foram realizadas novas medições dos valores de SDAS em regiões específicas de cada amostra. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 4.

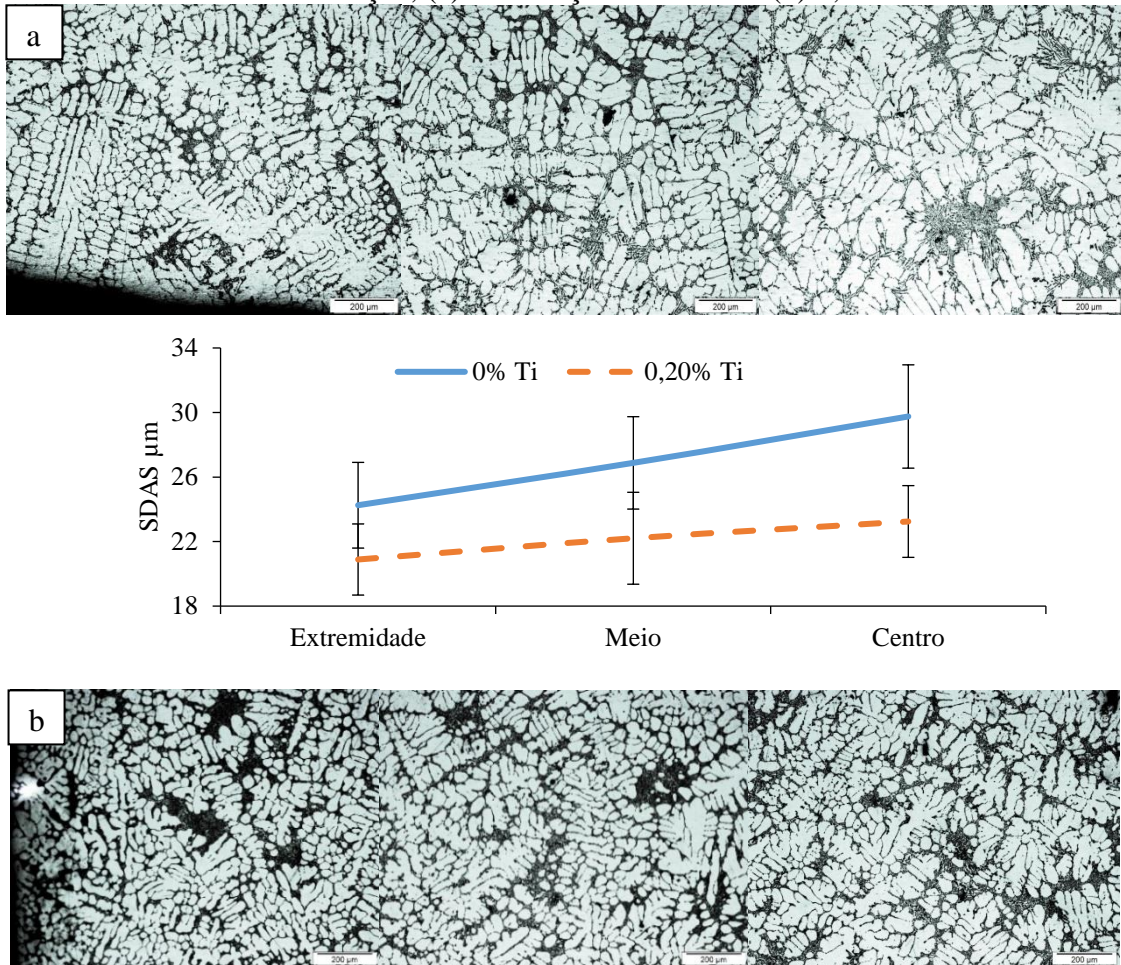
Tabela 4 – Descrição dos valores por regiões da amostra da liga A356 bruto.

SDAS (µm) – Amostras tratadas termicamente T6					
Localização	0% Ti		0,20% Ti		Posição das imagens
Média Geral	27	± 4	22	± 3	
Extremidade	24,3	± 2,7	20,9	± 2,2	Imagens 1, 10, 11 e 20
Meio	26,9	± 2,9	22,2	± 2,8	Imagens 3, 8, 13 e 18
Centro	29,8	± 3,2	23,2	± 2,2	Imagens 5, 6, 15 e 16

Ao comparar os valores de SDAS obtidos nos corpo de prova bruto sem refino com os que tiveram a adição de 0,20% Ti, percebe-se que os valores de SDAS da extremidade apresentaram uma diferença de 14%, ao verificar a posição intermediária (meio), observou-se uma elevação do valor desta diferença para 17%, enquanto que na região do centro, que foi a última a solidificar, esta diferença chegou a 22%. Estas variações confirmam o efeito refinador resultante da adição 0,20% Ti, especialmente nas regiões com maiores tempos de solidificação.

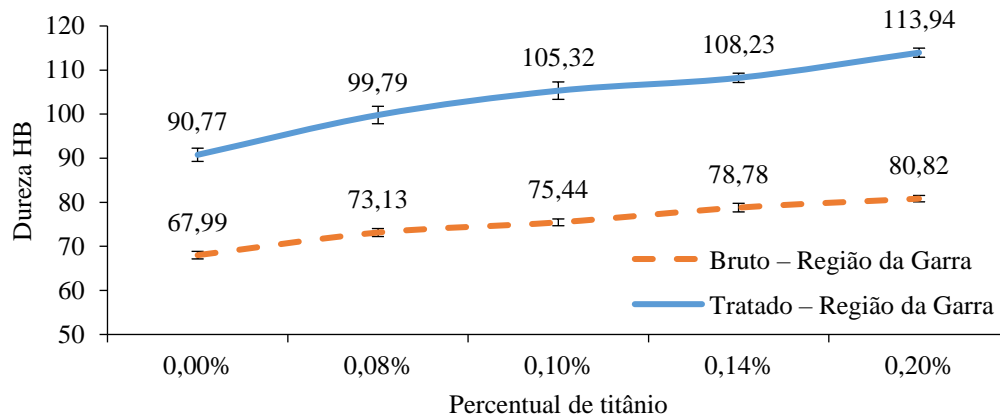
A amostra com 0% Ti, Figura 6, apresentou uma inclinação da reta mais acentuada, que a amostra com 0,20% Ti. A diferença refere-se ao tempo de solidificação, pois, a região central solidificou em um tempo maior que a extremidade. Já a amostra com refino apresentou uma baixa inclinação da reta, resultado da formação de maior número de núcleos durante a etapa de nucleação.

Figura 6 - Comparativo das microestruturas em diferentes regiões de amostras da liga A356 na condição bruta de fundição, (a) sem adição de titânio e (b) 0,20% Ti.



Os resultados de dureza HB estão indicados na figura 7, onde são apresentados os valores médios obtidos na região da garra. Observa-se um aumento da dureza com a variação do percentual de titânio. Este aumento está relacionado com a redução dos valores de SDAS causada pela adição do titânio. Porém as amostras tratadas termicamente apresentaram grandes diferenças em função da precipitação do intermetálico Mg_2Si durante o tratamento T6 após o envelhecimento artificial. Observa-se que a amostra bruta com 0,20% Ti, apresentou um aumento na dureza de 16% em relação a amostra sem titânio, com o tratamento térmico este aumento foi de 20%. As medições feitas na região útil das amostras não apresentaram variações significativas, confirmando que nestas condições o Ti adicionado não agiu como elemento refinador, e a redução dos valores de SDAS foi gerada através de uma elevada taxa de resfriamento.

Figura 7 – Variação da dureza HB da liga A356 com % de titânio na região mais espessa do corpo de prova (região da garra).



4. CONCLUSÃO

Com relação ao efeito da adição de titânio pode-se concluir que:

- A variação do percentual de titânio contribuiu para a obtenção do refino das dendritas, especialmente em regiões com maior espessura, mostrando uma tendência de redução nos valores de SDAS em função do incremento na quantidade de titânio.
- Para regiões de menor espessura, o refino dendrítico foi controlado pela alta taxa de resfriamento, reduzindo o efeito refinador do titânio. Esta observação explica as pequenas variações obtidas nos resultados dos ensaios de tração em amostras com diferentes teores de titânio.
- Análise mais detalhada da variação dos valores de SDAS na região de maior espessura evidenciou o efeito refinador do titânio e a ocorrência de incrementos significativos nos valores de dureza HB, obtendo-se aumentos em torno 15% a 20% com adição de 0,20% de titânio.

REFERÊNCIAS

ASM. **Heat Treating**, Metals Handbook, v 15, 1992

CASARI, D., MERLIN, M., GARAGNANI, G. L. A comparative study on the effects of three commercial Ti-B-based grain refiners on the impact properties of A356 cast aluminum alloy [S I] *Journal of Materials Science*, 2013, v. 48, n. 12, p. 4365-4377.

COUTINHO, T. A. **Metalografia de Não-Ferrosos: análise e prática**. São Paulo, Edgard Blucher, 1980.

KIEPER, R. **Influência do teor de titânio nas propriedades mecânicas da liga A356**. Trabalho de conclusão de curso (TCC). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2016.

PYO, L.Y. Effect of T6 Heat treatment on the mechanical properties of gravity die cast A356 aluminum alloy [S I] *Journal of Applied Sciences*, 2011, v11, p. 2048-2052.

VANDERSLUIS, E., RAVINDRAN, C. Comparison of measurement methods for secondary dendrite arm spacing. [S 1]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2017, v. 6, n. 1, p. 89-94

ZENG, L. et al. Role of eutectic silicon particles in fatigue crack initiation and propagation and fatigue strength characteristics of cast aluminum alloy A356. [S 1] *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, v. 115, p. 1-12

ZHAO, Hong-Liang et al. Grain and dendrite refinement of A356 alloy with Al-Ti-C-RE master alloy. [S. 1]. *Rare Metals*, 2013. v 32, n. 1, p. 12