

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

SHAYEMME OLIVEIRA DE PONTES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA
MICROESTRUTURA DA LIGA A380 DURANTE PROCESSO DE
FUNDIÇÃO COM E SEM A ADIÇÃO DE REFINADOR AL-5TI-1B**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

SHAYEMME OLIVEIRA DE PONTES

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA
MICROESTRUTURA DA LIGA A380 DURANTE PROCESSO DE
FUNDIÇÃO COM E SEM A ADIÇÃO DE REFINADOR AL-5TI-1B**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin

Co-orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE VAZAMENTO NA
MICROESTRUTURA DA LIGA A380 DURANTE PROCESSO DE FUNDIÇÃO COM
E SEM A ADIÇÃO DE REFINADOR AL-5TI-1B**

por

SHAYEMME OLIVEIRA DE PONTES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 04 de dezembro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin
Orientadora

Profa. Ma. Heliety Rodrigues Borges Barreto
Membro Titular

Prof. Me. Fábio Edenei Mainginski
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Carvalho
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

À Profa. Ma. Sandra Mara Kaminski Tramontin, pela excelência em orientação, apoio e principalmente pela parceria nesta importante jornada acadêmica.

Ao Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato, pelo comprometimento e excelência em sua co-orientação assim como na execução da metodologia proposta no trabalho.

Ao coordenador do curso, Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho pelo auxílio prestado ao longo da execução do presente trabalho.

À Profa. Ma. Helietey Rodrigues Borges Barreto, pelo comprometimento, auxílio laboratorial e na preparação metalográfica das amostras além da parceria.

Ao Prof. Dr. Ivanir Luiz de Oliveira, pela excelência de ensino e pelo suporte na execução da caracterização dos materiais.

Ao Téc. Eriel Biagini Sabino, pelo seu comprometimento e auxílio na utilização dos equipamentos do laboratório de usinagem e materiais.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, pela realização do trabalho.

À todos os meus professores de curso de Engenharia Mecânica, que contribuíram para a realização desse trabalho e que acreditaram no meu potencial.

Aos meus amigos que considero como irmãos, Allan Rodrigues, Felipe Bernadi, Felipe Galvão, Lucas Paiva, Nathalia Radeck, Pedro Frassan, Vinicius Marrone, Rafael Araújo, Thalita Knapik, Gabriel Dezordi, Ariston Xavier, Tuane Vieira e Bruna Naoe, os quais estiveram sempre ao meu lado me dando todo suporte e apoio nessa jornada.

Aos alunos de iniciação Elisson e Bernardo pelo comprometimento e apoio durante a execução da fundição da liga de alumínio A380.

À minha querida mãe Elizabete Maria Oliveira de Pontes, minha referência de caráter, exemplo de vida, aqui está mais um sonho nosso realizado.

Ao meu pai e irmão pelo apoio e paciência durante essa jornada.

À minha avó Maria Izabel de Oliveira, tia Noemia Maria de Oliveira, prima Fabiana Ananias e madrinha Bernadete Félix por todo amor, carinho e cuidado.

Aos meus finados, avô José Henrique de Oliveira, tio José Lafaiete e primo Bruno Ananias por todo amor e incentivo, foram e sempre serão minha fonte de inspiração.

RESUMO

Atualmente, as ligas de alumínio vêm sendo objeto de estudo em muitos trabalhos, pois possuem vasta aplicação, desde refletores, luminárias, painéis decorativos, dissipadores de calor, isolantes térmicos, telhas, placas, barcos, furgões, forros e principalmente utilizada no setor automobilístico, construção civil e em aeronaves. O alumínio pode passar por determinados tratamentos térmicos ou adição de elementos de liga, fazendo com que suas propriedades físicas sejam alteradas de acordo com as diferentes necessidades de aplicações. O objetivo deste trabalho é analisar a influência da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380 durante processo de fundição com e sem a adição de refinadores. Após formulação das ligas, dois dos lotes foram fundidos à 670 °C e dois à 630 °C , com e sem adição de refinadores para cada uma das temperaturas. Os refinadores utilizados nos dois lotes foram o Al-5Ti-1B e o estrôncio. As amostras retiradas dos lotes fundidos foram preparadas e analisadas por espectrometria, microdureza Vickers e microscopia ótica. Observou-se então que as ligas fundidas apresentaram variação morfológica significativa conforme variaram as temperaturas de vazamento, evidenciando a influência da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380.

Palavras-chave: Liga A380, Refinador Al-5Ti-1B, Temperatura de vazamento.

ABSTRACT

Currently, aluminum alloys have been studied in many works, since they have a wide application, from reflectors, luminaires, decorative panels, heat sinks, thermal insulation, tiles, plates, boats, vans, linings and mainly used in the automotive, sector civil construction and aircraft. Aluminum can undergo certain thermal treatments or addition of alloying elements, causing its physical properties to be altered according to different application needs. The objective of this work is to analyze the influence of the casting temperature on the microstructure of the A380 alloy during casting process with and without the addition of refiners. After formulation of the alloys, two of the batch were melted at 670 °c and two at 630 °c, with and without refining for each of the temperatures. The refiners used in both batches were al-5ti-1b and strontium. Samples taken from the molten batches were prepared and analyzed by spectrophotometry, Vickers microhardness and optical microscopy. It was observed that the molten alloys presented significant morphological variation as the casting temperatures varied, evidencing the influence of the casting temperature on the A380 alloy microstructure.

Keywords: Alloy A380, Al-5Ti-1B Refiner, Leakage Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de liga.....	14
Figura 2 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a morfologia de uma liga eutética Al-Si-Cu-Fe-Zn (a) modificada pela adição de 50ppm de Sr e 80ppm de Bi, (b) sem modificação.	17
Figura 3 - Dentrita em solidificação (a); aspecto típico da seção de um lingote (b); efeito dos cantos na cristalização (c)	18
Figura 4 - 670°C, 100x, sem ataque 4 (a) lote 4, sem refinador - 2g Sr; (b) Lote 1 - 85g refinador - 4g Sr.	28
Figura 5 - 630°C, 100x, sem ataque 5 (a) lote 3, sem refinador - 4g Sr ; (b) Lote 2 - 83g refinador - 4g Sr.	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 1 - 85g refinador - 4g Sr - 670 °C	26
Tabela 2 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 2 - 83g refinador - 4g Sr - 630 °C	26
Tabela 3 - Resultado do espectrômetro para a amostra do lote 3 - sem refinador - 4g Sr - 630 °C	27
Tabela 4 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 4 - sem refinador - 2g Sr - 670 °C	27
Tabela 5 - Microdureza Vickers lote 1, 85g refinador, 4g Sr, 670°C.....	30
Tabela 6 - Microdureza Vickers lote 2, 83g refinador, 4g Sr, 630°C.....	30
Tabela 7 - Microdureza Vickers lote 3, sem refinador, 4g Sr, 630°C.....	30
Tabela 8 - Microdureza Vickers lote 4, sem refinador, 2g Sr, 670°C.....	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

°C: Grau Celsius

α : Alfa

β : Beta

μm : Micrômetro

Al: Alumínio

Bo: Boro

Cr: Cromo

Cu: Cobre

Fe: Ferro

kg: Kilograma

Mn: Manganês

Mg: Magnésio

Ni: Níquel

PG: Ponta Grossa

ppm: Partes por milhão

Si: Silício

Sr: Estrôncio

Ti: Titânio

UTFPR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Zn: Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	LIGAS DE ALUMÍNIO E A ADIÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS	13
2.2	LIGA DE ALUMÍNIO A380.....	15
2.3	SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO	15
2.4	PROCESSO DE FUNDIÇÃO E FUNDIÇÃO EM COQUILHA	18
2.5	ANÁLISE POR ESPECTRÔMETRO	20
2.6	MICROSCÓPIO ÓPTICO	20
2.7	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	21
3	METODOLOGIA	23
3.1	PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM MOLDE METÁLICO	23
3.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA ATRAVÉS DO ESPECTRÔMETRO	24
3.3	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA E ANÁLISE EM MICROSCÓPIO ÓPTICO	24
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS	25
4	RESULTADOS	26
4.1	RESULTADO ESPECTRÔMETRO.....	26
4.2	MICROSCOPIA ÓPTICA	27
4.3	ENSAIO DE DUREZA VICKERS	29
5	CONCLUSÃO	33
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um elemento químico presente em grande quantidade na Terra e mesmo assim, ainda é o metal mais novo a ser utilizado em escala industrial, seu uso iniciou-se em vasos com alumina, cosmetologia e alguns produtos medicinais. Com a evolução das técnicas e a empregabilidade do material, modernizaram-se as técnicas de extração e sofisticação do seu uso em diversos artefatos. (RODRIGUES *et al*, 2014)

Esse material não é retirado diretamente em estado metálico. Sua obtenção é através da mineração de bauxita, seguindo para refinaria e redução.

O alumínio possui baixa densidade ($2,7 \text{ g/cm}^3$) o que em comparação com o aço puro ($7,85 \text{ g/cm}^3$) é aproximadamente três vezes menor. Não é um material ferromagnético, possibilitando assim uma elevada condutividade térmica e elétrica, não é tóxico sua oxidação ela ocorre progressivamente, já que os átomos da superfície se combinam com o oxigênio da atmosfera gerando assim uma camada de óxido, que serve de proteção contra a deterioração do material, além da possibilidade de reciclagem por várias vezes. (CALLISTER, 2006)

O alumínio pode passar por determinados tratamentos térmicos ou adição de elementos de liga, fazendo com que suas propriedades físicas sejam alteradas e se torne resistente mecanicamente, por exemplo. Isso faz com que o uso do aço, gradativamente, passasse a diminuir. (NETO, 2014)

Atualmente, as ligas de alumínio vêm sendo objeto de estudo em muitos trabalhos, pois são ligas muito utilizadas e pode se encontrar uma vasta variedade de tipos, formando um grupo de um dos materiais metálicos mais utilizados.

As aplicações desse material são inúmeras, desde refletores, luminárias, painéis decorativos, dissipadores de calor, isolantes térmicos, telhas, placas, barcos, furgões, forros, principalmente utilizada no setor automobilístico, construção civil e em aeronaves.

1.1 OBJETIVO GERAL

Análise da influência da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380 durante processo de fundição com e sem a adição de refinador Al-5Ti-1B

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- 1) Avaliar quantitativamente a composição química da liga de alumínio A380 utilizando espectrometria para verificar a composição química gerada.
- 2) Avaliar a influência da adição de Al-5Ti-1B e da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380 utilizando microscopia ótica.
- 3) Avaliar a influência da adição de Estrôncio e da temperatura de vazamento na propriedade de dureza da liga de Alumínio A380, por meio do ensaio de microdureza Vickers.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO E A ADIÇÃO DE ELEMENTOS QUÍMICOS

O alumínio é um dos metais que mais existem em abundância na crosta terrestre, além disso, é um material com ótimas propriedades físico-químicas onde pode-se ressaltar o baixo peso específico, alta condutividade elétrica, alta condutividade térmica e alta reciclabilidade. Em seu estado puro, o alumínio apresenta baixa dureza não servindo para diversas aplicações. Tornou-se necessário combiná-lo com outros tipos de materiais metálicos para que sua aplicabilidade dentro do setor utilizado fosse aumentada. (SOUSA *et al*, 2015)

Cada liga de alumínio possui características diferentes de acordo com os metais que a constituem, podendo ser capaz de alterar as propriedades do material como ductilidade, dureza, condutividade térmica e elétrica assim como outras.

As ligas de alumínio podem ser divididas em dois grupos: ligas conformadas ou trabalhadas (*wrought alloys*), que são ligas com destinação à fabricação de produtos semiacabados como os laminados planos, laminados não planos, perfis extrudados e componentes forjados e ligas fundidas (*cast alloys*) que são ligas destinadas a fabricação de componentes fundidos. O primeiro grupo é a respeito das ligas conformadas mecanicamente o qual podem ser subdivididos em duas classes, ligas que não podem ser tratadas termicamente, onde suas propriedades mecânicas são alteradas através do trabalho a frio ou encruamento e ligas que podem ser tratadas termicamente, onde suas propriedades mecânicas são melhoradas através do tratamento térmico de endurecimento por precipitação. No segundo grupo existem ligas com baixo ponto de fusão e alto ponto de ebulição, utilizando métodos de fundição em areia, sob pressão e de precisão. (VIANA *et al*, 2009)

Do ponto de vista da elaboração de uma liga pode-se ver que frequentemente as ligas de alumínio tem a adição de elementos como silício, cobre, magnésio, manganês e zinco.

As propriedades dependem diretamente da composição, microestrutura, tipo de tratamento térmico ou tratamento mecânico pelo qual é submetido. Na figura 1 encontram-se os principais elementos de ligas utilizados e os efeitos que eles podem ocasionar ao serem introduzidos nas ligas de alumínio.

Figura 1 - Elementos de liga

ELEMENTOS	EFEITOS GERADOS
Cobre (Cu)	Aumento da resistência e da dureza com a adição de até 12% deste elemento. Gera à liga boas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas, porém diminui a resistência à corrosão.
Silício (Si)	Valores crescentes de Si até o ponto eutético aumentam a fluidez e a resistência mecânica da liga, diminuindo a fragilidade a quente a contração do material.
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência e dureza além do aumento na resistência a corrosão e excelente usinabilidade juntamente com boa resistência ao impacto.
Estrôncio (Sr)	Alteração morfológica nas dendritas de fase α , tendência em arredondar e diminuir o tamanho das dendritas e também de seu espaçamento.
Zinco (Zn)	Confere ao alumínio excelente limite de resistência e ductilidade à temperatura ambiente, por outro lado, aumenta a susceptibilidade à corrosão sob tensão.

Fonte: Adaptado de Bradaschia, 1988a.

O alumínio quando fundido solubiliza outros metais e quando solidificado, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida fazendo com que o metal resultante fique mais resistente e mais duro. Quando ocorre esse resfriamento, existe a tendência de que haja a precipitação do excesso dos elementos de liga da solução e com isso podem ser geradas as partículas duras, que são formadas pelos compostos intermetálicos. Essas partículas de átomos metálicos podem transformar a rede cristalina, deixando-as mais rígida e por consequência, endurecendo a liga. (OLIVEIRA, 2011)

Existem excelentes e diversas ligas de alumínio onde verifica-se uma enorme diversidade nas propriedades das peças fundidas, podendo ter diversas finalidades.

2.2 LIGA DE ALUMÍNIO A380

Esta liga de alumínio quando comparada a outras ligas é mais adequada no processo de fundição pois apresenta excelente fluidez, baixa solubilidade para gases com exceção do gás hidrogênio, baixo ponto de fusão e do ponto de vista químico é altamente estável. A liga de alumínio-silício 380 tem alta reciclabilidade e sua composição pode ser altamente variada tanto nos elementos de ligas adicionados quanto nas impurezas encontradas. (VERRAN, 2017)

A leitura do tipo de alumínio é feita de acordo com o número de série, as ligas de alumínio da série 3XX.X podendo conter Al+Si & Mg, Al+Si & Cu, Al+Si & Mg & Cu.

A respeito da composição química encontram-se elementos de liga primário como silício, cobre e magnésio, elementos de liga secundários como níquel e estanho, elementos com potencial de modificação da microestrutura como estrôncio, titânio, manganês, boro, cromo, fósforo e berílio e também os elementos que são considerados impurezas como o ferro, cromo e zinco. (VERRAN, 2017)

Alumínio e silício geram uma reação eutética tornando o material fluido e diminui contração no processo de solidificação. Quando encontram-se alumínio e cobre ou alumínio e magnésio pode ser observado alta solubilidade sólida e conseqüentemente um aumento de resistência através dos tratamentos térmicos. (VERRAN, 2017)

2.3 SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Sobre a classificação geral das ligas de alumínio também se encontram ligas de fundição e ligas de conformação. Dentre das ligas de fundição buscam-se boas propriedades de fundição, já nas ligas de conformação o objetivo é buscar alta ductilidade e baixa resistência mecânica. Ambas podem ser previstas através de diagramas de equilíbrio e composição química. Quando os mecanismos de endurecimento são analisados nas ligas de alumínio para fundição estas são dividida em tratamentos do banho e tratamentos térmicos. (BRADASCHIA, 1988b)

As ligas de Al-Si são as ligas de fundição mais utilizadas e objeto deste estudo. Ao analisar o diagrama Al-Si observa-se que o ponto eutético é encontrado

com 12,6% de Si e a uma temperatura de 577°C. Classificam-se as ligas de Al-Si em função do teor de Si em 3 tipos:

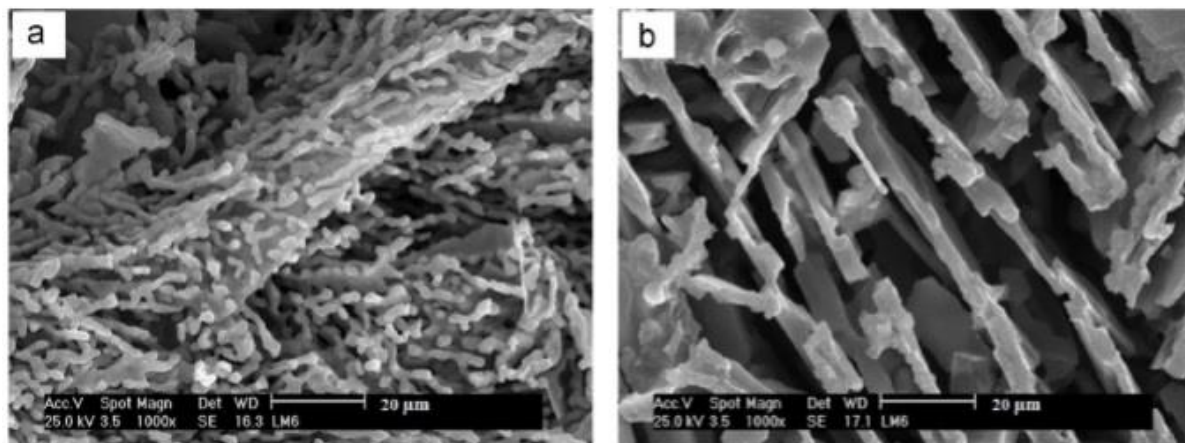
- 1) Ligas hipoeutéticas: As mais utilizadas, com boas propriedades de fundição, moderadas propriedades mecânicas e melhores propriedades mecânicas quando existe a adição de outro elemento.
- 2) Ligas eutéticas: Excelentes propriedades de fundição e também uma fragilidade em função da morfologia do silício.
- 3) Ligas hipereutéticas: São utilizadas para aplicações especiais como por exemplo em meios que exige altíssima resistência ao desgaste.

Com a adição de Si obtém-se uma melhor estanqueidade, redução do coeficiente de expansão, melhora da soldabilidade, aumento da resistência mecânica ao desgaste e também da resistência à corrosão.

Os elementos de liga são de grande importância, serão utilizados o Ti e o B os quais atuam como refinadores do grão, Cr e Mn também atuam com esse propósito. Já quanto aos elementos de liga que formam os precipitados endurecedores encontram-se o Fe, Zn e Ni, o refinador de grão de Ti-B que quando utilizado prevê um incremento à resistência a tração e a ductilidade, assim como na redução da condutividade térmica. Já o Sr atua como modificador do Si podendo ser visto microscopicamente e muitas vezes podem se encontrar formações dendríticas de solução sólida na matriz de Al- α . (APELIAN, 2009)

O agente modificador (nucleante) Sr favorece a solidificação do Si na forma de partículas arredondadas e finamente dispersadas na matriz de Al- α , esse agente modificador tende a deslocar a composição e a temperatura de equilíbrio eutético de maneira a permitir que possam ser fundidas ligas hipereutéticas com suas características de fundição iguais as ligas eutéticas ou também tornar ligas eutéticas levemente hipoeutéticas. (ARAÚJO, 2012)

Figura 2 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a morfologia de uma liga eutética Al-Si-Cu-Fe-Zn (a) modificada pela adição de 50ppm de Sr e 80ppm de Bi, (b) sem modificação.



Fonte: Farahany *et al*, 2015

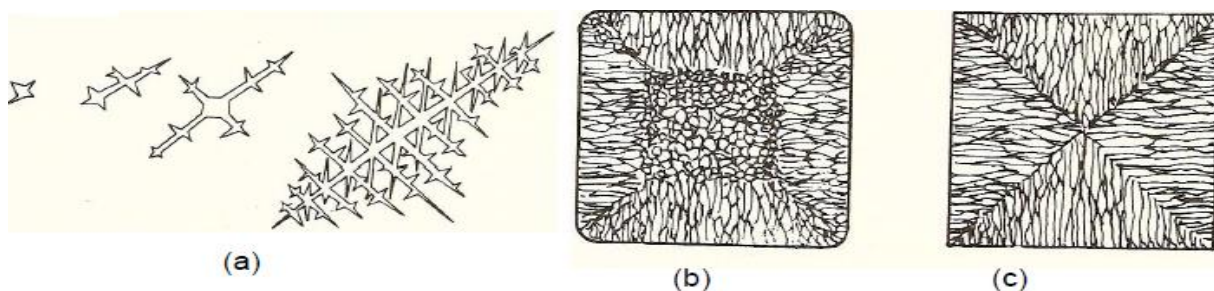
Segundo Kori *et al* (2000), a principal consequência prevista pela adição Sr é um aumento da resistência e da ductilidade nas ligas de Al-Si fundidas. Para que haja uma melhora no comportamento mecânico da liga de Al-Si utiliza-se a adição do refinador Al-5Ti-1B refinando assim as estruturas dendríticas de Al- α .

Esse refinador de Ti-B forma agulhas de Al_3Ti e partículas de TiB_2 encontrados dispersos no alumínio. Não existe um consenso entre os pesquisadores de qual seria o exato mecanismo de nucleação no alumínio primário as quais as ligas são refinadas, mas já é conhecido que o Al_3Ti faz com que as partículas de TiB_2 sejam encobertas por estas mesmas partículas, melhorando o processo de refinamento. (LUMLEY, 2011)

Do ponto de vista da cristalização, pode-se ver as primeiras células cristalinas que servem como núcleo para que posteriormente aconteça o crescimento dos grãos definitivos dando origem a estrutura granular típica dos metais. O crescimento dos cristais não ocorre de maneira uniforme, a velocidade em que ocorre o crescimento é diferente em todas as direções dos eixos cristalográficos e o molde limita esse crescimento. (FLEMINGS,1991)

O resultado para os núcleos metálicos e os grãos cristalinos tem aspectos como os apresentados na figura 3.

Figura 3 - Dendrita em solidificação (a); aspecto típico da seção de um lingote (b); efeito dos cantos na cristalização (c)



Fonte: Chiaverini, 1986.

As dendritas crescem progressivamente até se encontrarem e o crescimento é impedido pelas dendritas vizinhas, gerando assim os grãos e seus respectivos contornos gerando a delimitação dos mesmos, formando assim uma massa sólida. (GARCIA, 2001)

As diagonais que se formam fazem com que haja maior fragilidade durante o processo de conformação mecânica da liga a qual as peças passam posteriormente podendo gerar fissuras no material tornando-o inutilizado.

2.4 PROCESSO DE FUNDIÇÃO E FUNDIÇÃO EM COQUILHA

A fundição é o ponto inicial para que sejam fabricados os produtos metálicos, através dela podem-se preparar diferentes tipos de ligas de alumínio de acordo com a destinação e tipos de produto. É um processo de fabricação mecânica que consiste em um metal no estado líquido sendo vazado em um molde com formato e medidas correspondentes aos da peça a ser produzida. A principal matéria-prima utilizada na fundição é o alumínio primário, em estado líquido com aproximadamente 800°C, em seu estado sólido é colocado nos fornos para que ocorra fusão, o alumínio puro recebe então a adição de outros elementos para a formação das ligas. (PAREDES, 2017)

Do ponto de vista das vantagens podem ser produzidas peças com formas externas e internas desde as mais simples até as mais complexas, trabalha com dimensões limitadas, limites de acabamento e tolerância dimensional, os produtos fundidos podem ser encontrados em tarugos, lingotes, vergalhões, placas e bobinas por fundição contínua.

Alguns tipos de processos de fundição:

- A. Fundição contínua em chapas: O metal líquido dentro do forno escoar através de uma calha onde recebe ou não a adição de refinadores de grão, passa então através de um filtro de bolas para chegar no injetor que injeta o metal entre os cilindros fazendo que com durante a troca de calor o alumínio se solidifique na forma de chapa.
- B. Fundição contínua em tarugos: O metal líquido escoar por uma calha, passando por um sistema de desgaseificação e filtragem, até chegar a mesa de vazamento na qual o metal se distribui entre as cavidades onde os moldes se localizam, o pistão então inicia a descida à medida que o metal é adicionado no molde formando assim o tarugo.
- C. Fundição contínua em vergalhões: O metal líquido é introduzido através de uma calha refratária e passa por um sistema de desgaseificação até a roda de vazamento que possui um canal trapezoidal por onde o metal passa. Conforme há o giro da roda o metal em estado líquido se mantém na ranhura por uma cinta metálica que envolve a roda. Com a troca de calor, há solidificação e então é obtida a barra contínua de seção trapezoidal, após isso ela é laminada, fazendo assim a redução da seção transversal até as dimensões desejadas.
- D. Fundição em lingotes: São produzidos em um equipamento contínuo por meio de um processo em que o metal líquido é colocado em uma esteira de vazamento com diversos moldes metálicos, o metal se solidifica em contato com o molde gerando assim o lingote.

As principais propriedades do processo de fundição são a temperatura de fusão e a fluidez.

2.5 ANÁLISE POR ESPECTRÔMETRO

Na técnica de espectrometria de absorção atômica, o equipamento determina a concentração de elementos existentes em solução e de sólidos pré-processados para a solução.

Sob alta temperatura, elementos são transformados em nível atômico, os átomos de cada elemento absorvem a radiação em comprimento de onda específicos e esta absorção é dependente da concentração dos mesmos. (KAUER, 2008)

Essa técnica universal da análise química instrumental para detecção quantitativa e determinação qualitativa de metais e semi-metals através da absorção de radiação eletromagnética por átomos livres e presentes em estado gasoso, consiste em que todos os átomos e íons absorvem energia de diferentes formas e comprimento de onda em regiões específicas do espectro eletromagnético. (KAUER, 2008)

Existem comprimentos de onda de radiação no espectro eletromagnético e o estudo de cada região do espectro pode oferecer informações únicas a respeito da estrutura, composição ou até mesmo configuração eletrônica do elemento.

2.6 MICROSCÓPIO ÓPTICO

A microscopia óptica é utilizada quando se necessita uma melhor visualização das amostras, para isso é necessário que as mesmas estejam bem preparadas, gerando assim uma melhor visibilidade no microscópio óptico.

O funcionamento do microscópio óptico é dado através da utilização de uma fonte luminosa, uma luz branca a qual é gerada por uma lâmpada contendo filamento de tungstênio.

A composição do microscópio é feita por sistemas de lente de aumento, tanto oculares como objetivas, produzindo imagens ampliadas do material a ser analisado. Também existem partes mecânicas como sua base, seu braço, revólver, platina, charriot, sistema de iluminação (filtros, condensador, diafragmas) entre outros componentes.

A imagem da amostra analisada pode ser ampliada combinando o número de lentes de maneira correta gerando assim grandes aumentos, a lente objetiva é a primeira lente, a que está mais próxima do objeto sendo examinado.

O funcionamento se dá através da luz emitida pela fonte luminosa do microscópio, essa luz passa por um condensador o qual condensa o feixe de luz no formato de um cone fazendo com que a luz seja concentrada em uma direção, a luz projeta uma imagem real, invertida e aumentada da amostrada e pode ser visualizada no microscópio, chamado de plano médio intermediário pois a imagem parece estar flutuando cerca de 9 mm abaixo do topo do tubo de observação. (KINGSLAKE, 1967)

Quando se utiliza a lente ocular utiliza-se então o mais distante componente óptico da amostra, fazendo com que haja um aumento da imagem, gerando uma imagem real projetada pela objetiva, assim a ocular gera uma imagem secundária maior e que é captada pelo olho de quem está observando a amostra, o aumento total é calculado multiplicando os valores do aumento ocular e da objetiva.

Pode-se encontrar dois sistemas de focalização da amostra: a comum e fina. A focalização possui um mecanismo de direção que move o braço ou o plano da amostra, nos modelos mais modernos de microscópio óptico esse movimento é feito no plano da amostra, a partir daí caso seja necessária, a focalização da amostra é feita através do foco fino, esse consegue uma profundidade de foco de até 0,2 micrometros quando utilizadas objetivas de alta potência de ampliação. (KINGSLAKE, 1967)

2.7 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

A dureza é uma propriedade mecânica utilizada para especificações de materiais tanto no aspecto de estudos e pesquisas mecânicas e metalúrgicas quanto na comparação entre distintos materiais, a dureza e a resistência a penetração de um material em outro, é a resistência à deformação plástica permanente. Para o presente trabalho, foi escolhido o ensaio de dureza. Em ensaios de dureza estáticos geralmente encontramos uma pequena marca incrustada na superfície da peça através da pressão aplicada fazendo com que haja essa marcação através da ponta de penetração, a medida é dada de acordo com a marca de impressão e carga aplicada.

Conhecer a dureza é importante pois através dela sabe-se a resistência ao desgaste do material, controle de qualidade de tratamentos térmicos, qualidade em processos de conformação, pesquisa e desenvolvimento de ligas entre outros.

O ensaio de microdureza Vickers não é destrutivo, apenas deixa uma pequena marca por penetração no material não o comprometendo. No ensaio de microdureza Vickers o penetrador de diamante gera duas diagonais das endentações na superfície do corpo de prova, a leitura da medida é através de um microscópio, com os dois valores lidos pelo operador e então é feito o cálculo da média, calcula-se também a área da superfície inclinada da endentação. (ROY, 2013)

Serão coletadas 3 medidas, iniciando a primeira na região da borda das amostras e caminhando ao centro para avaliar possíveis diferenças, a leitura das diagonais d_1 e d_2 são feitas através do operador, além disso o cálculo de HV é feito direto pelo equipamento mostrando em seu visor digital.

3 METODOLOGIA

Neste tópico serão discutidos os materiais e os procedimentos utilizados para a fundição do lingote, preparação das amostras, caracterização e análise da microestrutura, microdureza, composição química.

3.1 PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM MOLDE METÁLICO

A partir do lingote de liga de alumínio A380, com seu peso total aproximado em 7kg, inicia-se o procedimento do corte do material com a serra METACOTEST/MAXICUT, esse corte é realizado gerando 18 peças com pesos distintos e aleatórios.

Para a confecção dos quatro lotes a serem estudados foram pesadas três amostras com aproximadamente dois quilogramas e para quarta amostra utilizou-se o excedente de material contido no laboratório com aproximadamente um quilograma.

Os refinadores utilizados nos lotes fundidos foram o Al-5Ti-1B e estrôncio. Dois dos lotes foram fundidos à 670 °C e dois à 630 °C respectivamente, com e sem refinador para cada temperatura. O vazamento foi realizado em coquilha, utilizando o modelo de forno por indução da marca GRION do laboratório de conformação mecânica da UTFPR-PG.

O primeiro lote teve seu peso de 2,028 quilogramas de alumínio com adição de 85 gramas de Al-5Ti-1B e 4 gramas de estrôncio, a temperatura de fusão atingida foi de 670°C.

O segundo lote teve seu peso de 1,994 quilogramas de alumínio com adição de 83 gramas de Al-5Ti-1B e 4 gramas de estrôncio, a temperatura de fusão atingida foi de 630 °C.

O terceiro lote teve seu peso de 2,140 quilogramas de alumínio com adição de 4 gramas de estrôncio, a temperatura de fusão atingida foi de 630 °C.

O quarto lote teve seu peso de 1,084 quilogramas de alumínio com adição de 2 gramas de estrôncio, a temperatura de fusão atingida foi de 670 °C.

Após a fundição dos materiais o vazamento foi realizado em molde cônico metálico e o resfriamento ao ar ambiente. Efetuou-se então o desmolde das peças para análise.

3.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA ATRAVÉS DO ESPECTRÔMETRO

Iniciou-se o processo de limpeza das amostras em sua superfície oposta à superfície que foi preparada metalograficamente, utilizou-se apenas lixa para o desbaste desta face.

Definiu-se o parâmetro de três queimas em cada amostra de cada lote para a leitura, decidiu-se que as regiões analisadas serão no centro, entre o centro e a borda e na borda.

O equipamento utilizado foi o espectrômetro da marca SHIMADZU modelo PDCA-7000 do laboratório de fundição da UTFPR-PG.

Com equipamento estabilizado por 24 horas para que a temperatura do equipamento atingisse 40°C, foi feita a calibragem do equipamento para a base de dados do alumínio utilizando uma amostra padrão de alumínio.

Após isso, posicionou-se cada amostra nas três regiões definidas e realizaram-se as queimas para que o equipamento analisasse a composição.

Os resultados foram obtidos em forma de tabelas com a porcentagem dos elementos que constituem a liga A380 analisada.

3.3 PREPARAÇÃO METALGRÁFICA E ANÁLISE EM MICROSCÓPIO ÓPTICO

Com os lingotes fundidos foram cortadas 3 amostras de cada lote para preparação metalográfica. A seguir, todas as amostras passaram pelas lixas d'água de granulometria de #200, #300, #400 e #600, lixadeiras da marca AROTEC, foram utilizadas na preparação das amostras no laboratório de caracterização de materiais da UTFPR-PG.

Pode-se observar que conforme aumentavam-se as granulometrias das lixas a qualidade da condição superficial das amostras piorava, justificando a parada na lixa

d'água de granulometria 600 já que a partir desta era evidente a origem riscos profundos nas amostras.

Após lixadas o procedimento subsequente foi de polimento, foi utilizado pano de feltro com a utilização de suspensão de diamante de 0,3 μm para os lotes 1, 2 e 3 e suspensão de diamante de 0,25 μm para o lote 4 para que a qualidade superficial fosse alcançada. O equipamento utilizado foi a politriz da marca AROTEC.

A limpeza das amostras durante o polimento somente foi realizada com álcool. Visando uma qualidade de preparação superficial, evitando oxidação, as peças foram para polimento eletrolítico na politriz eletrolítica da marca BUEHLER, encontrada no laboratório de materiais da UTFPR-PG. Cada peça ficou em média 2 horas no polimento.

O equipamento utilizado na microscopia óptica foi o microscópio óptico OLYMPUS modelo BX60.

As regiões de interesse foram o centro, entre centro e borda e borda da amostra. Foram observadas, nestas regiões, as fases mais proeminentes além de buscar regiões de transições entre as fases, selecionando as imagens de maior representatividade e melhor qualidade de cada lote.

Outro cuidado tomado no momento de fotografar as áreas de interesse foi fazer a marcação da escala corretamente, assim como a escolha da ampliação e a correlação com o software de captura de imagem Olympus Image Analysis Software, para que não sejam tiradas micrografias com escalas erradas fazendo com que a leitura dos resultados gere dúvidas ou erros.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de microdureza Vickers foi realizado no laboratório de materiais da UTFPR-PG, utilizou-se o microdurômetro da marca Shimadzu.

O parâmetro definido para as marcações das amostras foram o centro, entre centro e borda e borda. Utilizou-se para medição a carga de 300 gf por 15 segundos.

Foram medidas as diagonais da endentação na amostra obtendo-se a medida de microdureza na escala Vickers (HV).

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADO ESPECTRÔMETRO

Após a coleta dos resultados do espectrômetro para as amostras dos quatro lotes foi possível realizar a leitura dos dados gerados. Através desta pode-se realizar a análise e então a liga pode ser caracterizada.

Usou-se os três valores mais expressivos de composição química e em todas as ligas obteve-se o esperado das quantidades de Cu, Si e Zn já que a liga de alumínio A380 é composta majoritariamente destes elementos. Os resultados obtidos para cada lote formulado foram dispostos nas tabelas 1 à 4.

Tabela 1 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 1 - 85g refinador - 4g Sr - 670 °C

Elemento	Média	N=1	N=2	N=3
Cu	2,9647	3,0943	2,8946	2,9052
Si	7,3188	7,5356	7,4302	6,9907
Zn	2,6452	2,7506	2,6226	2,5625

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 2 - 83g refinador - 4g Sr - 630 °C

Elemento	Média	N=1	N=2	N=3
Cu	3,2085	3,1669	3,3033	3,1552
Si	7,4102	7,3303	7,5723	7,3281
Zn	2,7812	2,7082	2,8888	2,7465

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Resultado do espectrômetro para a amostra do lote 3 - sem refinador - 4g Sr - 630 °C

Elemento	Média	N=1	N=2	N=3
Cu	3,1369	3,1554	3,1087	3,1466
Si	7,5347	7,6033	7,5581	7,4428
Zn	2,8079	2,8112	2,7758	2,8367

Fonte: A autoria própria.

Tabela 4 - Resultado do espectrômetro para amostra do lote 4 - sem refinador - 2g Sr - 670 °C

Elemento	Média	N=1	N=2	N=3
Cu	3,0734	3,0778	3,1980	2,9444
Si	7,5931	7,7035	7,6471	7,4287
Zn	2,7785	2,7775	2,8131	2,7448

Fonte: A autoria própria.

Porém ao realizar análise minuciosa dos elementos que constituem a liga de alumínio A380, observou-se que a concentração de chumbo é de aproximadamente 0,17%.

Além deste elemento também se encontrou outros elementos que tem comportamento de contaminantes como cálcio e estanho.

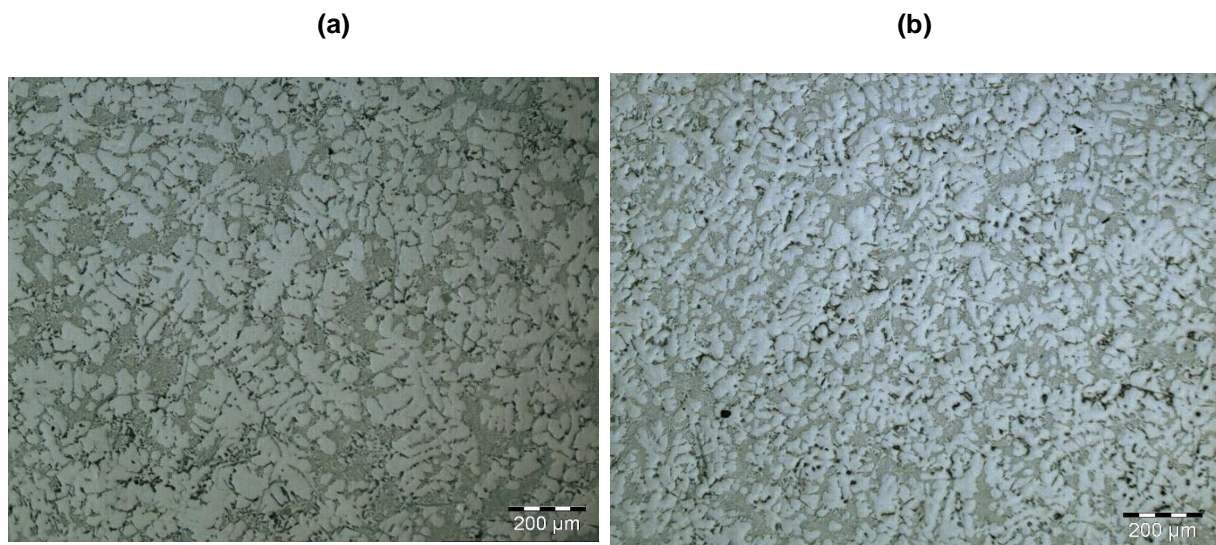
Sabendo-se que a liga de alumínio A380 é reciclada, considera-se a dificuldade no rastreamento da origem exata dos contaminantes encontrados.

4.2 MICROSCÓPIA ÓPTICA

Os resultados obtidos por microscopia ótica foram agrupados de acordo com as temperaturas de vazamento de cada lote e em relação a utilização ou não do refinador Al-5Ti-1B.

As figuras 4 (a) e 4 (b) correspondem aos lotes fundidos e vazados a 670°C. Na figura 4 (a) que representa a liga fundida sem utilização de refinador, pôde-se observar a formação dendrítica característica das estruturas brutas de fusão das ligas Al-Si. Enquanto que se nota um refinamento destas estruturas quando utilizado o refinador, como apresenta a figura 4 (b).

Figura 4 - 670°C, 100x, sem ataque 4 (a) lote 4, sem refinador - 2g Sr; (b) Lote 1 - 85g refinador - 4g Sr.

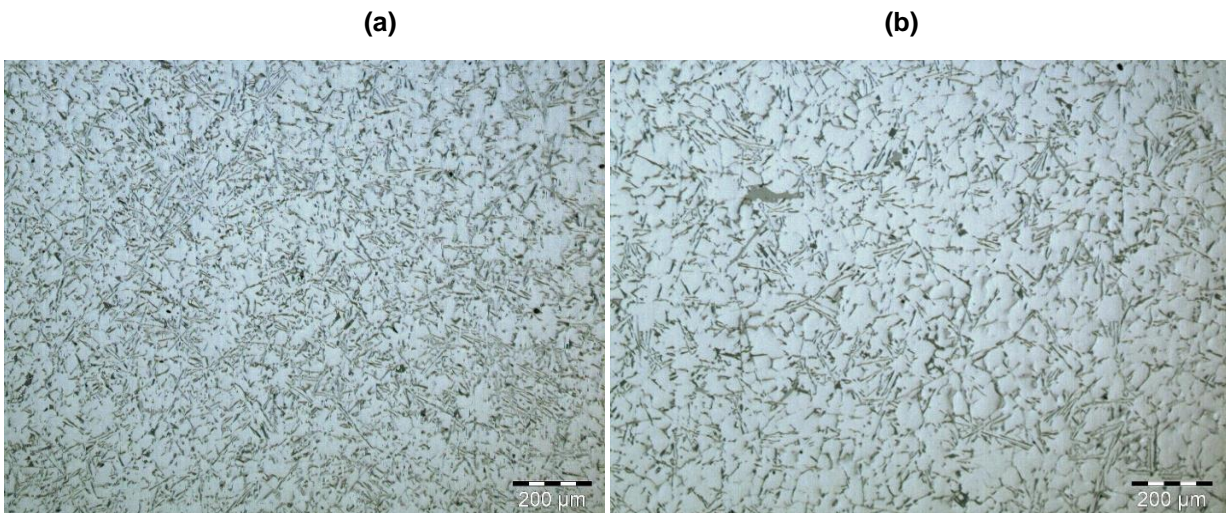


Fonte: Autoria própria

Ao comparar as microestruturas das ligas com temperatura de vazamento de 670°C, das figuras 4 (a) e (b), com as microestruturas das ligas fundidas com temperaturas de vazamento de 630 °C, apresentadas nas figuras 5 (a) e (b) nota-se uma variação morfológica expressiva. mostrando maior solubilidade da fase

precipitada na fase matriz, evidenciando a influência significativa da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380.

Figura 5 - 630°C, 100x, sem ataque 5 (a) lote 3, sem refinador - 4g Sr ; (b) Lote 2 - 83g refinador - 4g Sr.



Fonte: Autoria própria

Em relação às modificações microestruturais provocadas pela adição dos refinadores, não se pode afirmar influência significativa para esta temperatura de vazamento, uma vez que as microestruturas permanecem com morfologia semelhante, inclusive, a morfologia da liga sem refinador, figura 5 (a) compondo uma microestrutura aparentemente mais refinada.

4.3 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

Foram coletadas 3 medidas de dureza Vickers (HV) no microdurômetro Vickers para cada lote em cada amostra, na região da borda, entre borda e centro e centro gerando uma tabela com 36 valores coletados. Com esses valores pode-se calcular a média de cada amostra por lote e também a média de cada lote como pode ser observado nas tabelas 5 à 8.

Tabela 5 - Microdureza Vickers lote 1, 85g refinador, 4g Sr, 670°C

Lote 1		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
100	92	102
106	95	98,7
102	96	103
Média das amostras		
102,6	95	101,2
Média do lote		
99		

Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Microdureza Vickers lote 2, 83g refinador, 4g Sr, 630°C

Lote 2		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
104	106	107
105	103	105
100	102	102
Média das amostras		
103	104	105
Média do lote		
104		

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 - Microdureza Vickers lote 3, sem refinador, 4g Sr, 630°C

Lote 3		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
105	109	109
102	106	114
108	108	110
Média das amostras		
105	108	111
Média do lote		
108		

Fonte: Autoria própria

Tabela 8 - Microdureza Vickers lote 4, sem refinador, 2g Sr, 670°C

Lote 4		
Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
102	111	102
99,8	108	105
99,6	109	103
Média das amostras		
100	109	103
Média do lote		
104		

Fonte: Autoria própria.

Era esperado que as fases constituintes da liga de alumínio A380 em suas respectivas adições de refinador e estrôncio pudessem gerar um valor de microdureza diferente dos obtidos utilizando os parâmetros previamente escolhidos de centro, entre centro e borda e borda.

Ao realizar medições de microdureza Vickers, constatou-se que nestas fases observadas e que eram mais expressivas, não houve o incremento de microdureza esperado se comparado à média das amostras e do lote em geral, caracterizando uma uniformidade de microdureza nas amostras.

Ao comparar pela temperatura de vazamento, para a temperatura de 670°C sem refinador, a média do lote 4 teve sua dureza quantificada em 103 HV, para 670°C com refinador a média de microdureza do lote 1 é de 102 HV. Os valores de microdureza para essas duas condições com e sem adição do refinador e mesma temperatura de fundição mostrou que os valores de HV ficaram próximos mostrando que a adição de refinador não alterou o comportamento da microdureza.

Comparando agora às temperaturas de vazamento de 630°C, para o lote 2 com refinador obteve-se uma microdureza de 104 HV, já no lote 3 sem a adição do refinador a microdureza foi de 108 HV, houve um pequeno incremento no lote 4 em relação ao lote 3, porém considera-se o valor baixo, portanto pode-se afirmar que adição de refinador para esses lotes não causou efeito ao parâmetro de microdureza Vickers.

O local do corte do lingote fundido pode ter relação direta com este fato observado, pois em cada local o tempo de resfriamento foi diferente, influenciando

diretamente na microestrutura gerada, como não seguiu-se um padrão no momento do corte acredita-se que este parâmetro seja responsável por essa observação.

Sugere-se então, que a técnica de microdureza Vickers pode não ser a mais indicada para a medição de dureza desta liga que apresenta heterogeneidade significativa de fases. Talvez, a utilização de uma técnica com maior abrangência na área de contato entre o indentador e as fases possa representar melhor esta propriedade, como por exemplo, a técnica de medição de dureza Brinell.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que as ligas fundidas com temperaturas de vazamento de 630 °C e 670 °C apresentaram uma variação morfológica expressiva, evidenciando a influência significativa da temperatura de vazamento na microestrutura da liga A380.

Observou-se que nos lotes fundidos e vazados a 670 °C a adição do refinador promoveu um refinamento das estruturas dendríticas formadas, quando comparados os lotes com e sem adição deste. Fato que não se mostrou reproduzido para os lotes fundidos à 630°C.

Ainda se observou que a técnica de microdureza Vickers mostrou resultados muito semelhantes, mesmo para morfologias microestruturais diferentes, podendo-se sugerir a confirmação destes valores por outra técnica de medição de dureza que contemple maior área de contato entre o edentador e as fases presentes no material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APELIAN, D. **Aluminum Cast Alloys: Enabling Tools for Improved Performance**. North American Die Casting Association. NADCA, 2009.

ARAÚJO, SACHA K., **Efeito da modificação com estrôncio na microestrutura e nas propriedades mecânicas da liga alumínio-silício 356**. UDESC, 2012.

BRADASCHIA, Clóvis, **Técnicas de Fundição do Alumínio e suas Ligas**, São Paulo: Abm, 1988a.

BRADASCHIA, Clóvis. **Fundições de Ligas Não-Ferrosas**. São Paulo: Abm, 1988b.

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2, 2. ed. p.2. São Paulo, 1986.

FARAHANY, S.; IDRIS, M. H.; OURDJINI, A. **Effect of bismuth and strontium interaction on the microstructure development, mechanical properties and fractography of a secondary Al-Si-Cu-Fe-Zn alloy**. Materials Science & Engineering. p. 28-38, 2015.

FLEMINGS M. C. **Behaviour of metal alloys in the semisolid state - metallurgical Transactions**, v. 22, 1991. 957-981 p

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2001.

KINGSLAKE, Rudolf. **Applied Optics and Optical Engineering**, Volume IV, Parte I, 31-93, 1967.

KORI, S. A.; MURTY, B. S.; CHAKRABORTY, M. **Development of a grain refiner for Al-7Si alloy**. Materials Science and Engineering, v. 280, 2000

KAUER, Fabiano Z., **AAS – Princípios e instrumentação**. São Paulo, 2008. Disponível em: http://www.shimadzu.com.br/analitica/noticias/seminarios/seminario_de_quimica-cc_e_ctgas/AAS-Fundamentos_e_Instrumentacao.pdf >. Acesso em 14 nov 2017

LUMLEY, R. **Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications**. Cambridge, UK. Woodhead Publishing, 2011, 843 p.

NETO, Rui J. L.; **Tratamentos térmicos das ligas de alumínio**. ISEP, 2014. Disponível em: <
http://www.aluminio100porcento.com/uploads/files/1_tratamento_t%C3%A9rmico_de_ligas_de_alum%C3%ADnio.pdf >. Acesso em 07 dez 2017

OLIVEIRA, Rene R. **Avaliação da tensão residual em alumínio 7050 conformado pelo processo peen forming**. Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, autarquia associada à USP. São Paulo, 2011.

PAREDES, Ramón S. C. **Processos de fundição do alumínio**. UFPR: Curitiba, 2017

RODRIGUES, Josienei P.; OLIVEIRA, Larissa S.; Almeida, Natália C. **Produção de alumínio**. FACET. Belo Horizonte, 2014.

ROY, Patricia B.; CALLAHAN, Edward J. Armellino; O'CONNEL, Fiona M; ELBAN, Wayne L. **Vickers microindentation hardness testing of brazed joints in aluminium**. Baltimore: Loyola University, 2013.

SOUSA, B. B.; SOUSA, L. N.; MOREIRA, A. L. S.; CARDOSO, J. C. **Estudo da corrosão em ligas de Al-3%Cu e Al-5%Cu**. Disponível em: <
<http://pdf.blucher.com.br.s3-sa-east-1.amazonaws.com/chemicalengineeringproceedings/cobeqic2015/163-32605-259314.pdf> >. Acesso em: 31 jul. 2017.

SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**. 3.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1977. 216p

VIANA, Sergio Mello, Sérgio R. C. M., Citeli, Natalie L. **Alumínio e suas ligas**. UFF, 2009.

VERRAN, Guilherme O.; **Solidificação de ligas de alumínio**. UDESC. Santa Catarina, 2017. Disponível em: <
http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/verran/materiais/Aula_05__Solidificacao_de_Ligas_Al.pdf > Acesso em 31 out 2017.