

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DOMINGOS ANDREY PAES GONÇALVES

**AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE DIFERENTES
TEORES DE ESTRONCIO NA MICROESTRUTURA E
COMPORTAMENTO MECANICO DA LIGA A380**

PONTA GROSSA

2019

DOMINGOS ANDREY PAES GONÇALVES

**AVALIAÇÃO DA INFLUENCIA DA ADIÇÃO DE DIFERENTES
TEORES DE ESTRONCIO NA MICROESTRUTURA E
COMPORTAMENTO MECANICO DA LIGA A380**

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.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE DIFERENTES TEORES DE ESTRÔNCIO NA MICROESTRUTURA E COMPORTAMENTO MECÂNICO DA LIGA A380

por

DOMINGOS ANDREY PAES GONÇALVES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 11 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
Orientador

Prof. Dr. Oscar Regis Junior
Membro Titular

Prof. Dr. Hipólito Domingos Carvajal Fals
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de
Carvalho**
Coordenador do Curso

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela vida, por permitir ingressar em uma Universidade e ajudar a superar cada desafio.

Aos meus pais, Andréa e Enio, e irmãos, Johnatham, Iuri e Crístofer pelo apoio incondicional, paciência e amor durante todo o tempo de graduação e por me forjarem com valores e ética.

Ao Professor e amigo Luciano Augusto Lourençato pelas orientações, apoio e confiança depositada em mim neste percurso.

Ao Professor e amigo Hipólito Domingo Carvajal Fals, pelo apoio e orientações na reta final do trabalho

Ao Eriel Biagini Sabino, pela disposição, ajuda e participação na execução dos ensaios e acompanhamento no laboratório.

Aos professores da UTFPR pelos ensinamentos ao longo dos anos que ajudaram a formar um melhor profissional para o mercado de trabalho.

Aos meus amigos pelos momentos de descontrações, apoio nos tempos difíceis e de estudos.

RESUMO

Gonçalves, Domingos A. P. **Avaliação da influência da adição de diferentes teores de estrôncio na microestrutura e comportamento mecânico da liga A380.** 2019. 44P. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Neste trabalho estudou-se o comportamento mecânico e microestrutura da liga de alumínio A380 com quatro diferentes variações de modificador de grão, estrôncio, sendo 0ppm, 30ppm, 200ppm e 600ppm. Foi realizado vazamento por gravidade em molde metálico e preparados os corpos de prova para a realização do teste de tração, seguindo a norma ASTM B557M. As análises microscópicas constataram as modificações dos grãos, mas as propriedades mecânicas tiveram um decréscimo em comparação à literatura, por este motivo, foi realizado a contagem de poros, utilizando o software Imager A2 e constatado que foi o número excessivo de poros influencia os resultados.

Palavras-chave: Liga A380. Modificador de grão. Estrôncio.

ABSTRACT

Gonçalves, Domingos A. P. Evaluation of the influence of the addition of different strontium contents on the microstructure and mechanical behavior of A380 alloy. 2019. 44P. Work of Conclusion Course (Graduation in Mechanical Engineering) – Federal Technology University – Paraná – Paraná. Ponta Grossa. 2019

In this work we studied the mechanical behavior and microstructure of A380 aluminum alloy with four different variations of grain modifier, strontium, being 0ppm, 30ppm, 200ppm and 600ppm. Gravity casting was performed in a metal mold and the specimens prepared for the tensile test, following the ASTM B557M standard. The microscopic analysis found the grain modifications, but the mechanical properties had a decrease compared to the literature, therefore, the pore counting was performed using the Imager A2 software and it was found that the excessive number of pores influences the results.

Key-words: Alloy A380. Grain Modifier. Strontium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Al-Si	14
Figura 2 - Exemplo de fundição por gravidade	18
Figura 3 - Corpo de Prova Padrão	19
Figura 4 - Ensaio de Ruptura por tração.....	20
Figura 5 - Tipos de poros e suas origens. a) Poro gerado pela solidificação. b) Poro gerado por ar preso em processo de injeção	23
Figura 6 - Forno de Indução Grion	25
Figura 7 - Moldes para lingotes	25
Figura 8 – Medidas de corpo de prova tração	28
Figura 9 - Apresentação do ensaio de tração	29
Figura 10 - Metodologia de análise da porosidade	30
Figura 11 - Microscopia Ótica.....	32
Figura 12 - Microscopia ótica e Microscopia por varredura eletrônica	34
Figura 13 - MEV - Amostra 1 (0ppm)	35
Figura 14 - MEV - Amostra 4 (600ppm)	35
Figura 15 - Corpos de prova após Ensaio	36
Figura 16 – Curvas tensão vs deformação da liga A380, modificada com Sr.....	37
Figura 17 - Imagens de microscopia ótica que representam cada condição de modificação com Sr e as porosidades formadas.....	39
Figura 18 - Relação entre Porosidade e Tensão Última	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema de classificação de acordo com The Aluminium Association	13
Tabela 2 - Composição química da liga A380	15
Tabela 3 - Propriedades mecânicas Alumínio A380	16
Tabela 4 - Influência de elementos na liga A380	16
Tabela 5 - Condições de vazamentos	26
Tabela 6 - Dados obtidos pelo ensaio de tração	37
Tabela 7 - Resultado da análise de porosidade	39

SUMÁRIO

1 Introdução	11
1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.1 Objetivos Específicos	12
2 Referencial Teórico	13
2.1 Ligas de alumínio empregadas em fundição	13
2.2 Ligas de Alumínio-Silício	14
2.3 Liga de alumínio A380	15
2.4 Efeito do estrôncio na solidificação de ligas de alumínio.....	17
2.5 Processo de fundição em coquilha	17
2.6 Propriedades mecânicas de metais	18
2.6.1 Ensaio de tração	19
2.7 Porosidade	22
3 Metodologia	24
3.1 PREPARAÇÃO DAS LIGAS.....	24
3.2 Preparação metalográfica e Microscopia	27
3.3 Ensaio de tração.....	28
3.4 Análise de porosidade	30
4 Resultados	31
4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA	31
4.2 Ensaio de tração.....	36
4.3 Análise da porosidade	38
5 Conclusões	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

Lista de Abreviaturas e Siglas

α : Alfa

β : Beta

μm : Micrometro

Al: Alumínio

AIP: fosforeto de alumínio

ASM: *International the Materials Information Society*

ASTM: *American Society for Testing Materials*

Bo: Boro

Cr: Cromo

Cu: Cobre

EDS: espectroscopia de energia dispersiva

Fe: Ferro

GPa: Giga Pascal

kg: Kilograma

MEV: Microscopia eletrônica de varredura

Mg: Magnésio

Mn: Manganês

MPa: MegaPascal

Ni: Níquel

Ppm: Partes por milhão

Si: Silício

Sr: Estrôncio

Ti: Titânio

UTFPR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná

wt%: porcentagem em peso

Zn: Zinco

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais importantes para o setor metalmeccânico sendo o mais importante em se tratando de não-ferrosos.

O material é extraído na forma de minérios de bauxita e alumina, passando por processos metalúrgicos como refino e redução, para obtenção do alumínio puro.

Podemos destacar como principais características a baixa densidade, alta condutividade elétrica, grande resistência à corrosão e baixo ponto de fusão que permitem que o mesmo seja utilizado de forma extensiva para a produção de diversos itens, tais como ligas metálicas, laminados e extrudados. (Cardoso *et al.*).

Com o esforço contínuo da indústria automobilística para reduzir o peso dos veículos e promover a economia de combustível, a fundição de alumínio tem uma gama de possibilidades, gerando interesse de pesquisas e desenvolvimento de suas propriedades. (Bonifácio, M.C.R, 2000).

A liga de alumínio A380, objeto deste estudo, tem como principais metais de sua composição, além do alumínio supracitado, Silício, Cobre, Ferro e Zinco e é comumente utilizada em processos de injeção sob pressão para a fabricação de diversos componentes no setor automobilístico.

Devido às suas boas propriedades mecânicas e boa aparência do produto final, é de grande importância comercial. Como pode ser obtido através de reciclagem e combinado a outros elementos, gera um amplo leque de atuações possíveis e atende à preocupação socioambiental da indústria, hoje, tema em evidência no mercado.

Cada vez mais se buscam novas ligas para melhorar as propriedades mecânicas mantendo o custo de fabricação baixo. Para tal muitas vezes são introduzidos elementos inoculantes em ligas-mães para a mudança microestrutural que resultem em alguma alteração em suas propriedades.

Normalmente para ligas de Alumínio-Silício são utilizados titânio e boro para o refino do grão, resultando em um aumento na resistência à tração e na ductilidade.

O estrôncio é responsável pela modificação do mecanismo de nucleação da fase eutética, alterando as dentritas da fase alumínio- α para nuclear nas

placas do intermetálico Ferro- β , dessa forma melhorando consideravelmente a ductibilidade da liga. (Ferreira, J. P. G.,2017).

1.1 OBJETIVO GERAL

Análise da influência da adição de diferentes teores de estrôncio na microestrutura e propriedades mecânicas da liga A380.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Analisar as micrografias da liga A380 sem e com adição do modificador estrôncio.
- Avaliar características mecânicas, σ_e , ϵ , $\sigma_{ruptura}$, das diferentes variações através do ensaio de tração.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO EMPREGADAS EM FUNDIÇÃO

As ligas de alumínio são divididas em dois grandes grupos, ligas para fundição e ligas trabalháveis mecanicamente, sendo essas aquelas destinadas à fabricação de produtos semiacabados como laminados, trefilados, perfis extrudados e componentes forjados.

As ligas para fundição são divididas em dois outros grupos, o de termicamente tratável, que pode ser endurecido por processos térmicos e as não-tratáveis termicamente, que não respondem ao tratamento térmico. De acordo com a *The Aluminium Association* as ligas de alumínio têm uma classificação por números com quatro dígitos, conforme tabela 1.

O primeiro código corresponde ao principal elemento de liga, o segundo indica modificações da liga mãe ou limites de impurezas e os dois últimos dígitos indicam a composição química da liga ou o grau de pureza do alumínio. As ligas de fundição apresentam um ponto entre os dois últimos dígitos, e se o último for zero, muitas vezes é suprimido. (Alves, 2011)

Tabela 1 - Sistema de classificação de acordo com *The Aluminium Association*

Ligas	Classificação	Principais elementos de liga
Trabalháveis termicamente	1xxx	Al puro comercial
	2xxx	Al-Cu
	3xxx	Al-Mn
	4xxx	Al-Si
	5xxx	Al-Mg
	6xxx	Al-Mg-Si
	7xxx	Al-Sn
	8xxx	Al - outros elementos
Fundidas	1xx.x	Puro (> 99% Al)
	2xx.x	Al-Cu
	3xx.x	Al-Si + Cu e/ou Mg
	4xx.x	Al-Si
	5xx.x	Al-Mg
	7xx.x	Al-Mg-Si
	8xx.x	Al-Sn

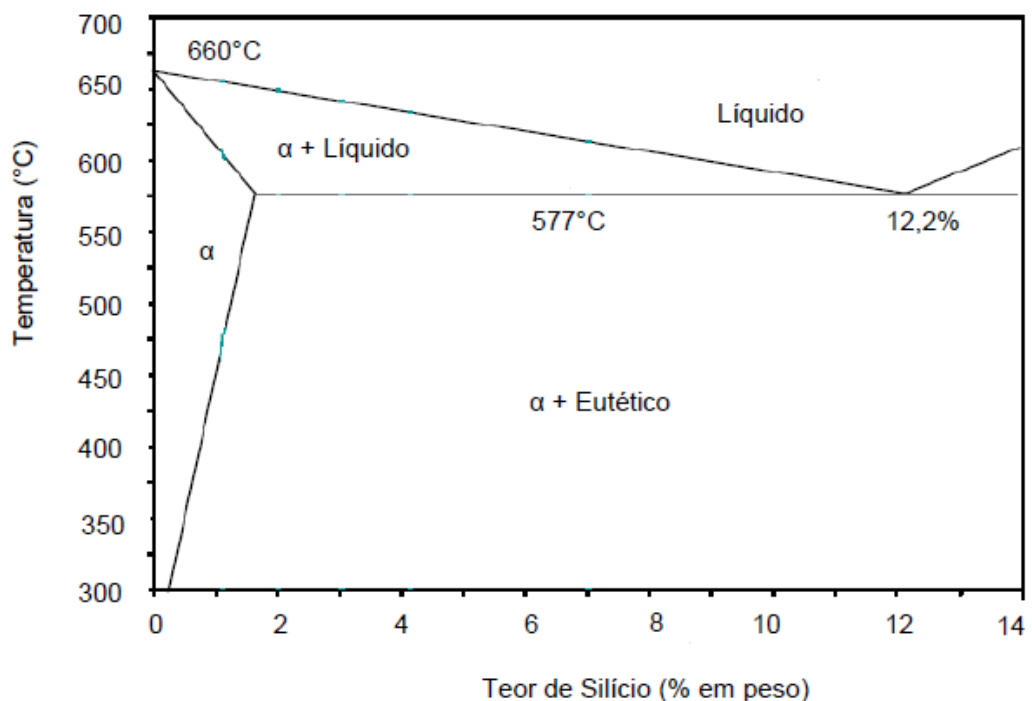
Fonte: Autoria Própria

2.2 LIGAS DE ALUMÍNIO-SILÍCIO

O silício confere, através dos compostos, fluidez na fundição e boas propriedades mecânicas às ligas de alumínio permitindo que seja tratável termicamente. A liga binária Al-Si pode ter formação hipo-eutética e hiper-eutética, sendo estas diretamente relacionadas a %Si e temperatura.

O eutético é formado a partir do líquido contendo 12,5% de Si e temperatura abaixo de 577°C e é constituído das fases alfa e beta. O diagrama deste binário pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Diagrama Al-Si



Fonte: Alves, 2011

As ligas hipoeutéticas, com percentagem em peso (%wt) de Si variando entre 7% a 11% são as mais importantes. A microestrutura dessas ligas é formada majoritariamente de dendritas da fase alfa e do eutético Al-Si. Variando a velocidade de resfriamento se obtém diferentes estruturas. Por exemplo, com velocidade de resfriamento lenta, é produzida uma microestrutura em formato de agulhas grosseiras, que reduz a ductilidade pela fragilidade que essas agulhas proporcionam, devido ao seu exagerado tamanho de tamanho de grão. O

resfriamento rápido produz o refino das agulhas e o dos cristais de Si, assumindo a morfologia fibrosa, aumentando a resistência ao limite de escoamento e a ductibilidade. O eutético pode ser refinado por metais alcalinos, ocorrendo uma mudança na morfologia dos cristais de Si para globularizada. (ALVES, 2011)

2.3 LIGA DE ALUMÍNIO A380

A liga A380 é largamente utilizada no setor industrial devido a sua combinação entre propriedades mecânicas, boa aparência e fácil produção. Muito utilizada em componentes automotivos, equipamentos eletrônicos e de comunicações, sistemas de engrenagem e transmissão. (NADCA, 2009).

A composição química da liga A380.0 está expressa em faixa de porcentagem em peso (wt%), conforme tabela 2.

Tabela 2 - Composição química da liga A380

Componentes elementares	wt(%)
Alumínio, Al	80.3 - 89.5 %
Silício, Si	7.5 - 9.5 %
Cobre, Cu	3.0 - 4.0 %
Ferro, Fe	<= 1.3 %
Magnésio, Mg	<= 0.10 %
Manganês, Mn	<= 0.50 %
Níquel, Ni	<= 0.50 %
Outros, total	<= 0.50 %
Estanho, Sn	<= 0.35 %
Zinco, Zn	<= 3.0 %

Fonte: Bradaschia, 1988a

Com os elementos químicos identificados temos também, como informação importante para a liga hipoeutética A380 o comportamento mecânico no sistema métrico.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas Alumínio A380

Tensão de ruptura	340 MPa
Dureza Brinell	80
Elongação até ruptura	3,5%
Tensão de Escoamento	159Mpa
Módulo de elasticidade	71,0 GPa

Fonte: Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.

Os elementos de liga possuem diversas influências das propriedades da Liga A380. Como pode ser observado na tabela 4 que demonstra especificamente o Si, Cu, Mg e Zn.

Tabela 4 - Influência de elementos na liga A380

Silício (Si)	Resulta em aumento da fluidez da liga diminuindo a contração térmica da liga durante o processo de solidificação.
Cobre (Cu)	Aumento da resistência mecânica e da dureza da liga em até 12%, melhora as propriedades a temperaturas elevadas, causando um decréscimo na resistência à corrosão, melhora a usinabilidade da liga devido a facilitação de formação de cavaco.
Magnésio (Mg)	Aumento do limite de resistência mecânica e dureza além de do aumento à resistência a corrosão e proporciona uma melhora na usinabilidade e resistência ao impacto
Zinco (Zn)	Aumento no limite de resistência e ductibilidade à temperatura ambiente, mas diminui a resistência à corrosão sob tensão.

Fonte: Bradaschia, 1988a.

2.4 EFEITO DO ESTRÔNCIO NA SOLIDIFICAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

O estrôncio age como nucleante favorecendo a modificação da estrutura da liga eutética de silício através dos compostos NaSi_2 e Al-Si-Sr que incorporam o fósforo residual em sua estrutura via sólido. (Ferrarini, 2005).

Com o acréscimo do estrôncio a morfologia do silício eutético se altera da forma acicular para a forma fibrosa. (Kim, et al, 2005)

Ocorre uma alteração do mecanismo de solidificação da fase eutética, onde a mesma deixa de nuclear de maneira adjacente às dentritas de $\text{Al-}\alpha$ e passa a nuclear nas placas do intermetálico $\text{Fe-}\beta$, demonstrando com isso a interação entre o estrôncio e as partículas de fosforeto de alumínio (AIP). (Cho et. Al, 2008 e Ludwig et al., 2013)

Ao interagir com as partículas de fosforeto de alumínio, o estrôncio faz com que o silício deixe de nuclear próximo ao alumínio primário e passe a nuclear de outras formas. Uma vez que o silício deixa de nuclear de maneira adjacente ao alumínio primário, o alumínio eutético também perde a coerência com tal fase. (Cho et. Al, 2008 e Ludwig et al., 2013)

2.5 PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM COQUILHA

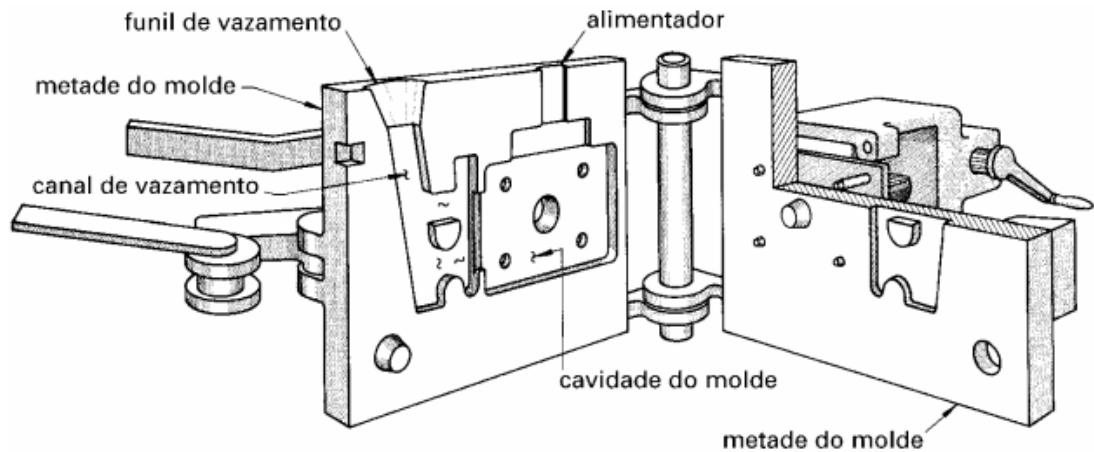
O processo de fundição em moldagem metálica, também nominado coquilha pode ser dividido em dois sub-processos, a fundição por gravidade e fundição por baixa pressão.

A fundição em moldagem metálica com vazamento por gravidade consiste em obter uma peça fundida a partir do vazamento de metal líquido no interior de moldes metálicos, sendo o preenchimento conseguido através da ação da gravidade. (Torres, 2000)

A fundição em moldagem metálica com vazamento por baixa pressão tem resfriamento rápido da massa fundida através do molde devido à alta resistência ao calor. Resultando em uma textura densa de granulação fina com propriedades mecânicas melhoradas.

O processo de fundição com o uso de coquilha é utilizado em muitas indústrias devido a reutilização do molde metálico e facilidade na automação dos processos, que possibilita alta produtividade.

Figura 2 - Exemplo de fundição por gravidade



Fonte: Telecurso 2000

2.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS DE METAIS

Cada material tem um conjunto de atributos ou propriedades, sendo essencial para um bom projeto, a escolha pontual daquelas que se adaptam aos requisitos do cliente.

As propriedades mecânicas são obtidas através de ensaios laboratoriais podendo estes serem destrutivos ou não destrutivos, variando o processo ao qual a peça ensaiada é submetida.

Os ensaios destrutivos são utilizados quando não será necessário o uso da peça ensaiada após os testes, sendo necessário a extração e fabricação de corpos de provas para a realização dos métodos em laboratórios. Podemos citar alguns:

- **Tração:** mensura a deformação na direção do esforço aplicado (alongamento), exibindo a relação tensão-deformação.
- **Compressão:** semelhante ao ensaio de tração, este é mais utilizado para materiais frágeis (ferro fundido, por exemplo).
- **Dureza:** identifica a resistência do material à penetração, ação do risco, corte, abrasão e absorção de energia com aplicação de cargas dinâmicas. Em linhas gerais, sua resistência à deformação plástica.

- Dobramento e flexão: avalia a maleabilidade do material, sendo que a deformação elástica indica a flexão e a plástica, o dobramento.

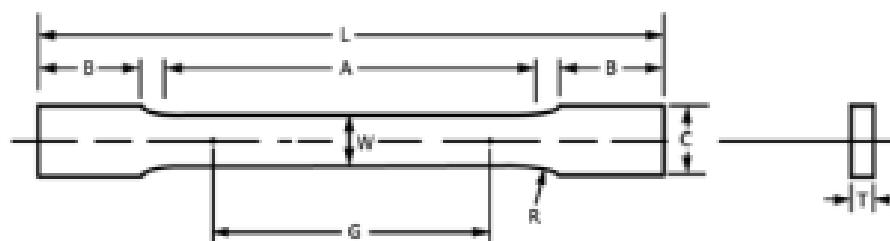
Ao realizar ensaios mecânicos é importante seguir as normas preestabelecidas para a situação tratada, pois proporciona a padronização do teste, reprodutibilidade e comparação dos dados obtidos com outras fontes. As normas que regem os ensaios laboratoriais mecânicos foram publicadas pela *American Society for Testing Materials* (ASTM). Nelas são descritos procedimentos, requisitos para a fabricação de corpo de provas, requisitos exigidos para o equipamento utilizado e demais informações referentes as análises das informações obtidas. (SOUZA, 1982).

A característica mecânica obtida pela análise laboratorial de qualquer material determina qual o tipo de ensaio mais adequado. Conforme citado anteriormente as especificidades de cada ensaio e os resultados potenciais obtidos de cada um deles, tem-se como objeto primordial de estudo os ensaios de tração.

2.6.1 Ensaio de tração

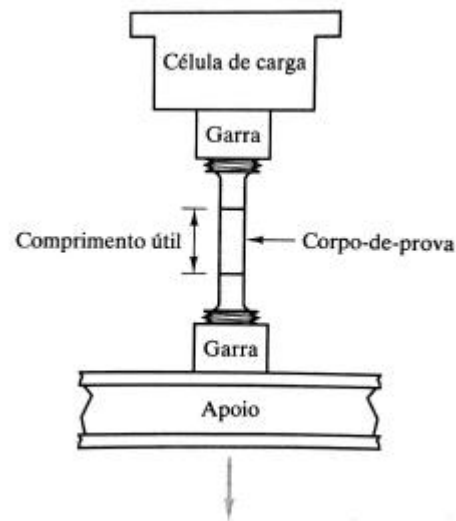
O ensaio de tração é o teste convencional mais importante para a determinação de propriedades mecânicas devido a sua fácil execução. Para a realização do teste, o corpo de prova é colocado na máquina específica para o ensaio representado pela figura sendo tracionado com velocidade constante na direção axial até sua fratura.

Figura 3 - Corpo de Prova Padrão



Fonte: ASTM B557M

Figura 4 - Ensaio de Ruptura por tração



Fonte: SHACKELFORD, 2008

Esse teste experimental é primordialmente utilizado para determinação da relação entre a tensão normal média e a deformação normal média. (HIBBELER, 2010). Fornecendo também a resistência e a ductibilidade do material sob tensões de tração uniaxial, que são uteis para comparação de ligas materiais, controle de qualidade de material e projetos em circunstâncias específicas. (HANDBOOK, 1990).

Com o ensaio de tração são obtidos os dados da carga F aplicada na direção axial do corpo de prova em função da variação de comprimento Δl medido com auxílio de um extensômetro.

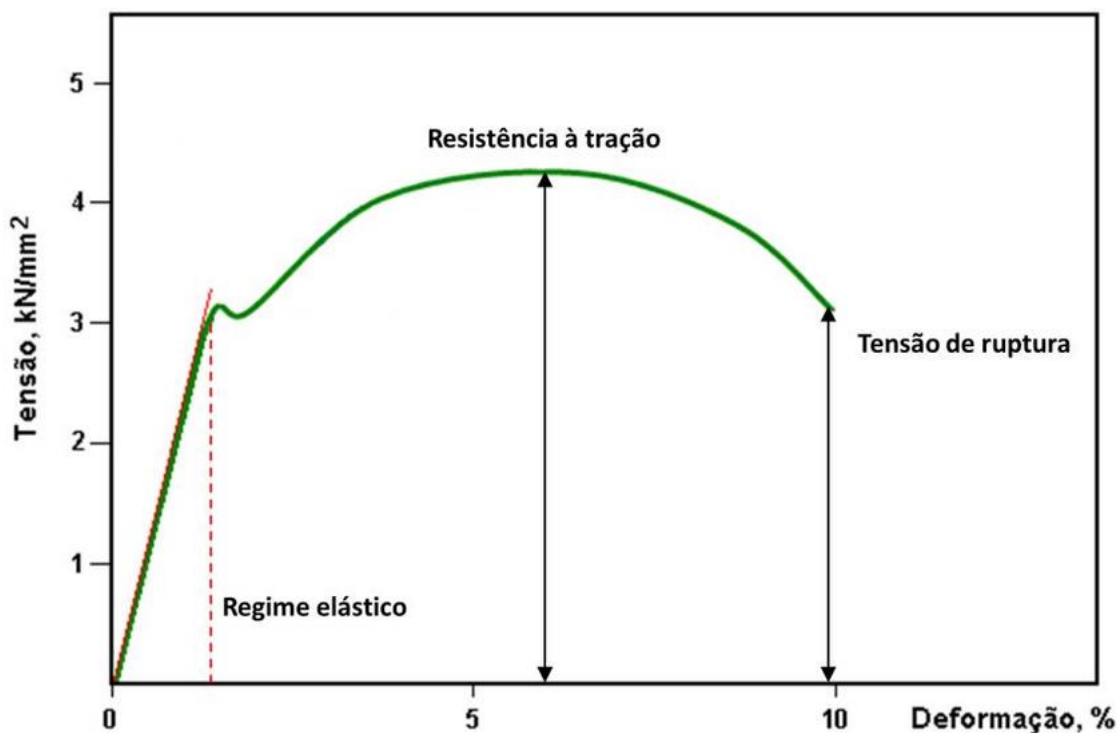
Esses valores são automaticamente convertidos pelo maquinário em tensão (σ) e deformação (ϵ), plotando assim, a curva tensão-deformação de materiais. Essa conversão é obtida pelas Equações 2.1 e 2.2, nas quais A_0 é a seção transversal inicial do corpo de prova, l_0 é a distância inicial entre as garras da máquina e Δl a variação do comprimento sob a força F .

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

No primeiro estágio da curva tensão-deformação, ainda no regime elástico, o corpo de prova retornaria à sua seção inicial se a carga fosse cessada. O segundo estágio da curva, regime plástico, o corpo de prova tem uma deformação uniforme não retornando a seção inicial e após limite de resistência à tração, LRT, a deformação não é mais uniforme, pois a área de seção transversal começa a diminuir em uma região localizada e não em todo seu comprimento, chamado de estricção ou empescoçamento, a partir deste ponto a amostra é regida pelo regime plástico, onde não retorna a seção inicial, até a ponto de ruptura, representado pelo ponto final do gráfico 1.

Gráfico 1 - Curva Tensão-Deformação



Fonte: Adaptado de Callister

Com a curva tensão-deformação, tem-se o módulo de elasticidade, valor constante específico de cada material, podendo ser obtido pela equação 2.3 ou pela inclinação da curva na região elástica. Quanto maior essa constante, menor deformação elástica do material, conseqüentemente mais rígido ele será. (SOUZA, 1982).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

O limite de resistência à tração e a tensão última do material podem ser facilmente encontrados na curva tensão-deformação. Sendo o primeiro, o valor de tensão máximo da curva e o segundo, a tensão na ruptura. Já o limite de escoamento é dificilmente mensurado, devido ao começo da estricção do corpo de prova, por isso ele é definido convencionalmente como a intercessão da curva tensão-deformação com uma reta paralela à parte elástica em 0,2% da deformação. (SHAKELFORD, 2008).

2.7 POROSIDADE

A porosidade é um dos problemas mais comuns no processo de fundição de alumínio, que nada mais são que espaços vazios ou que foram preenchidos com gases onde deveria existir metal, e devido à natureza física dos metais, peças fundidas tendem a ter alto índice de porosidade. As razões mais comuns para o aparecimento deste defeito são a contração devido à solidificação e a presença de gases no metal fundido. (BREVICK, 2009).

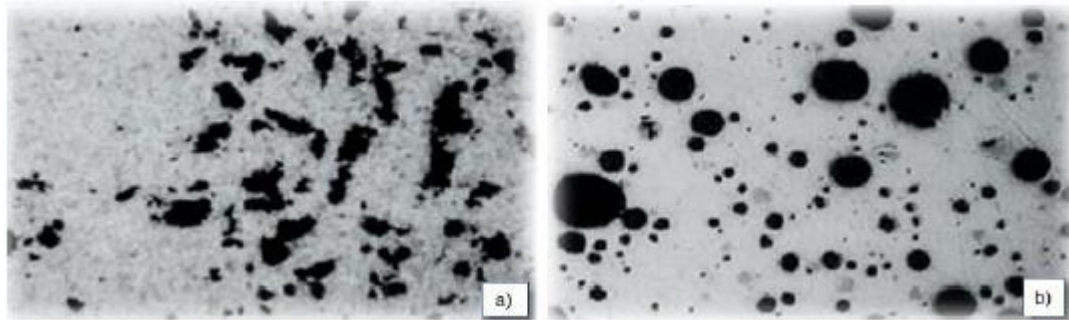
Produtos com porosidade tem maior probabilidade de trincas no decorrer de ciclo de vida, pois a resistência a fadiga diminui com o aumento do índice de porosidade microestrutural. (AMMAR, *et al.*, 2008).

Este defeito pode ser decorrente das reações do alumínio com a superfície do aço do molde, ou do gás dissolvido no metal. (MIDSON, 1998)

Os metais fundidos no estado líquido têm a tendência de absorver gases da atmosfera. Com relação as ligas de alumínio, elas apresentam grande solubilidade de hidrogênio quando líquido, acima de 660°C. Durante a solidificação temos cerca de 95% do hidrogênio segregado para as últimas partes líquidas, atingindo elevados teores acarretando a formação de poros em regiões interdendríticas. (MENDES, 2018).

A figura 5 apresenta o comportamento dos poros de acordo com suas origens, decorrente da solidificação ou gases na fundição.

Figura 5 - Tipos de poros e suas origens. a) Poro gerado pela solidificação. b) Poro gerado por ar preso em processo de injeção



Fonte: KIRKMAN, 2006

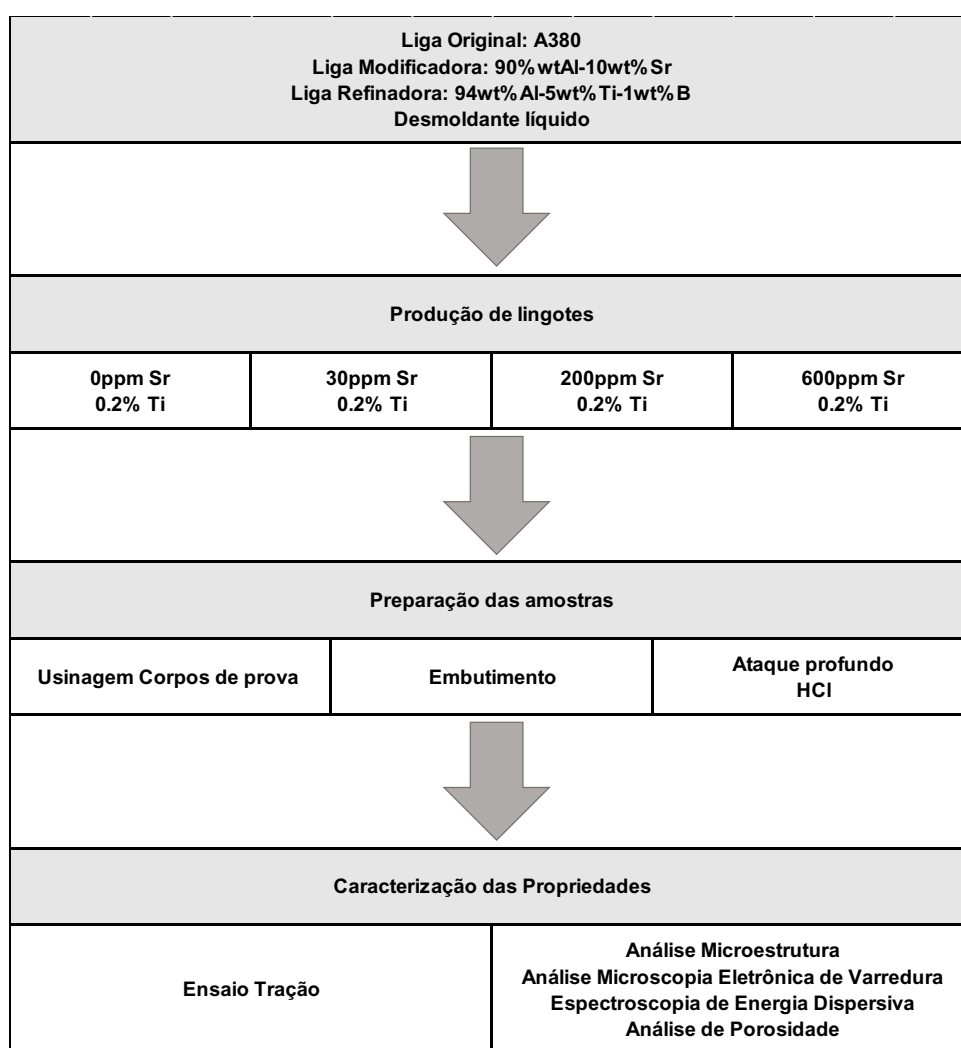
A porosidade em ligas modificadas por estrôncio é frequentemente associada com óxidos de estrôncio, desenvolvidos durante o processo de fundição, devido à alta afinidade entre o modificador e o oxigênio e a dificuldade de remoção de gás durante o processo de desgaseificação. (Liu,2003).

A morfologia destes poros, sejam redondos ou irregulares, são determinados pela forma do óxido de estrôncio, seja fina com partículas dispersas ou filmes grosseiros, nas periferias dos poros estão as regiões eutéticas da liga Al-Si e tem como composição $Al_{2.3}SrO_{3.3}$ ou Al_2SrO_3 obtidos pelo método espectrômetro de raio X dispersivo de comprimento (Liu, 2003).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se detalhadamente a metodologia adotada para a realização experimental e obtenção dos dados, desde a elaboração das ligas até a realização dos ensaios destrutivos. Todas as etapas estão resumidas no fluxograma 1.

Fluxograma 1 - Atividades a serem desenvolvidas



Fonte: Autoria Própria

3.1 PREPARAÇÃO DAS LIGAS

A liga A380 utilizada foi obtida comercialmente na forma de lingotes provenientes de alumínio reciclado com aproximadamente 7kg, sendo

fracionados em partes menores utilizando uma serra fita modelo DPT 180/300^a da marca Diplomat® 3001 para manuseio da matéria prima e melhor distribuição no cadinho do forno de indução.

Para o refino de grão foi utilizado a liga AL-5Ti-1B de composição 94wt%Al-5wt%Ti-1wt%B para a concentração de 0,2% de Ti resultando no refino da fase Al- α , sendo obtida comercialmente na forma de varetas e seccionada em partículas menores com o objetivo de facilitar a dissolução no soluto.

Para modificador de grão da fase eutética usou-se liga com composição 90wtAl-10wtSr, obtida comercialmente em varetas e partida em pedaços menores para melhorar a dissolução.

Aplicou-se o desmoldante líquido no molde metálica para facilitar a retirada dos lingotes após a solidificação.

O refinador de grão assim como o modificador da fase eutética foram adicionados com 05 minutos de antecedência à liga-mãe, para que ocorresse a total dissolução dos elementos envolvidos, proporcionando homogeneidade na liga desejada.

A fusão do material foi realizada no Laboratório de Conformação Mecânica da UTFPR – *Câmpus* Ponta Grossa em um forno de indução da marca GRION com potência de 35 KW e a capacidade do cadinho com aproximadamente 2,4kg de carga de alumínio, representado na figura 6.

Figura 6 - Forno de Indução Grion



Fonte: Autoria Própria

Ao todo foram preparadas 4 diferentes ligas utilizando as mesmas composições químicas, mantendo o padrão de 0,2% de Ti e diferenciando a proporção do refinador de grão, o estrôncio, utilizando as proporções de 0ppm, 30ppm, 200ppm e 600ppm

Foram utilizados 4 moldes cilíndricos cônicos, representados pela figura 7.

Figura 7 - Moldes para Lingotes



Fonte: Autoria Própria

Antecedendo a realização dos vazamentos das ligas foi necessária a determinação do balanço de massa das ligas mantendo assim a capacidade de segurança do cadinho do forno de 2,4kg. Utilizou-se como ferramenta para tal uma tabela dinâmica do Excel que determina a quantidade de cada material mantendo a porcentagem em peso (wt%) de 2% do refinador TiBAI em todas as amostras e a alteração de concentração do modificador estrôncio. Essas condições dos vazamentos estão descritas na tabela 5 a seguir.

Tabela 5 - Condições de vazamentos

Amostras	Refinador (g)	Modificador (g)	A380 (kg)
1 (0 ppm)	92,08	0	2,21
2 (30 ppm)	91,95	0,69	2,21
3 (200 ppm)	91,27	4,56	2,19
4 (600 ppm)	91,99	13,80	2,19

Fonte: Autoria própria

3.2 PREPARAÇÃO METALOGRAFICA E MICROSCOPIA

Com os lingotes já fundidos, a próxima etapa foi a preparação para o embutimento em baquelite. Foram escolhidos de cada amostra, o segundo e o terceiro vazamento, para possibilitar que as ligas que foram submetidas aos testes terão em sua composição a maior homogeneidade dos elementos.

Foi utilizado a policorte da marca MAXICUT para o corte dos lingotes, dividindo o círculo em 04 partes iguais. Com a finalidade de padronizar as amostras para uma análise mais confiável, foram selecionados para o embutimento as seções da face externa do lingote, logo após o descarte do rechupe.

Os parâmetros da embutidora metalográfica MAXIPRESS foram pressão de 100 a 150 kfg/cm² com temporizador de 10 minutos. Após o tempo, realizou-se alívio da pressão para a retirada do material já embutido e preparado para o processo de lixamento e polimento que antecede a análise microscópica.

Foi realizado o lixamento com a lixadeira da marca AROTEC com quatro diferentes lixas, em ordem decrescente de mais grossa 200mesh, passando por 320mesh e 500mesh chegando a mais fina com 600mesh tendo como finalidade diminuir a rugosidade para melhor visualização no microscópio ótico. Foram utilizados alumina 3,00 µm, 1,00 µm. Por último as amostras foram submetidas ao polimento em sílica coloidal de 0,04µm com ph neutro utilizando a politriz vibratória BUEHLER VibroMet 2 durante 1h para melhorar a visualização da microestrutura.

Para a análise microscópica, foi utilizado o microscópio do Laboratório de Caracterização de Materiais (LabCMat) da UTFPR – *Campus* Ponta Grossa, da marca ZEISS modelo Axio Imager.A2m, não sendo necessário nenhum ataque químico para revelar os componentes estruturais das amostras. Foram obtidas imagens utilizando aumentos de 50 e 200 vezes.

Com a finalidade de identificar com maior exatidão a alteração de microestrutura e análise da morfologia tridimensional do silício eutético, foram utilizadas imagens realizadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV) com aumento de 2000 vezes através da técnica de elétrons secundários, depois quimicamente analisadas via espectroscopia de energia dispersiva (EDS), permitindo-se determinar a composição semi-quantificada das amostras, a partir

de raios X característico. Sendo utilizado como equipamento, o microscópio eletrônico de varredura Vega Tescan operando a 20KV.

Para a obtenção das imagens das morfologias tridimensionais as amostras foram submetidas a um ataque químico profundo durante 4 horas a uma solução de ácido clorídrico com 20% e etanol 80%, com o objetivo de corroer as fases do alumínio consequentemente revelando a microestrutura do silício eutético. (Farahany et. Al, 2015)

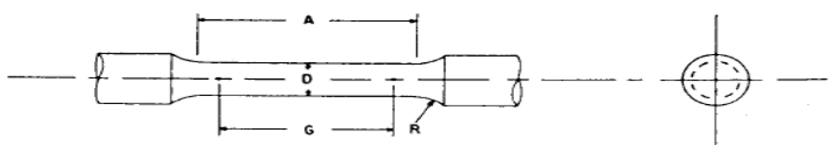
3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Com os lingotes fundidos, foi necessário a usinagem dos mesmos com finalidade de padronizar a medida de diâmetro com 29 mm.

Dos quatros vazamentos realizados, foram utilizados para a fabricação dos corpos de prova o segundo e o terceiro, onde tivemos a maior homogeneidade da liga e menor quantidade de impurezas obtidas pelo vazamento.

Para a preparação dos corpos de provas para o ensaio de tração foi seguido a norma ASTM B557 M – *Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminium – And Magnesium-Alloy Products* Padronização dos métodos de teste tensão das ligas de alumínio forjado e fundido e produtos da liga de magnésio. A escolha do padrão do corpo de prova foi em acordo ao tamanho e diâmetro do lingote, seguindo a especificação 2, com o comprimento útil cinco vezes o diâmetro, medidas de acordo com a figura 8.

Figura 8 – Medidas de corpo de prova tração



	Dimensões, mm
Diâmetro Nominal	9
G - Zona de estrangulamento	45.00 ± 0.09
D - Diâmetro	9.00 ± 0.10
R - Raio do filete, min	8
A - Comprimento da seção de redução, min	54

Fonte: ASTM B557 M – Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials

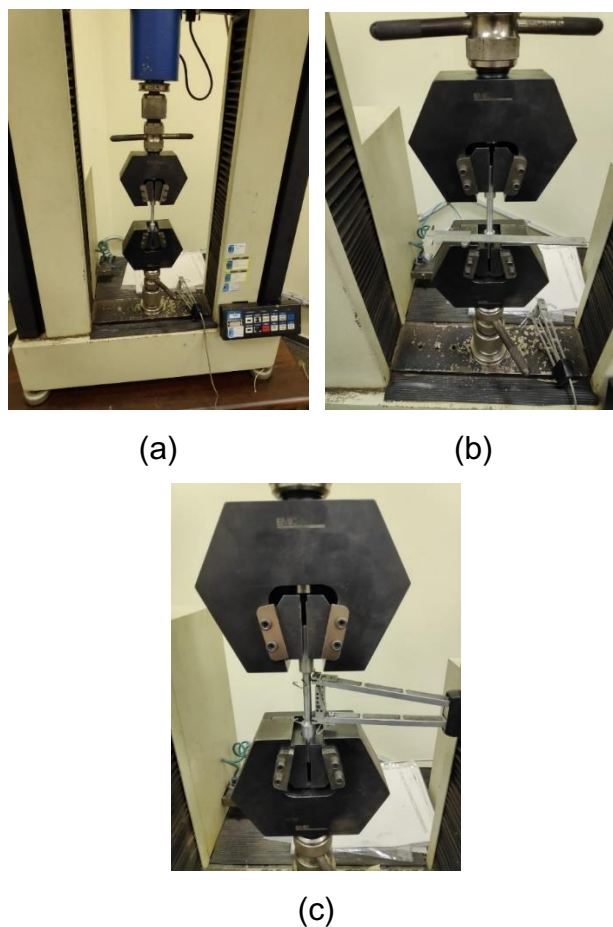
Para atingir o padrão da norma para a realização do ensaio de tração, foi utilizado um centro de usinagem ROMI para manter a tolerância normalizada.

O ensaio de tração foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da UTFPR, sendo utilizado a máquina de ensaio universal EMIC DL2000 com célula de carga de 50N, extensômetro do tipo clip de 50mm e velocidade de 5mm/s.

A figura 9, exemplifica o equipamento utilizado assim como o set-up do posicionamento do corpo de prova para a execução do ensaio, posicionamento do extensômetro e comparação entre o corpo de prova e um paquímetro de 150mm.

Padronizou-se a proporção de $2/3$ do comprimento da cabeça do corpo de prova para a fixação nas garras da máquina, figura 9c, antecedendo o início do teste, assim como posição do extensômetro, mantendo concordância com a norma de ensaio ASTM B557 M e corpo de prova.

Figura 9 - Apresentação do ensaio de tração



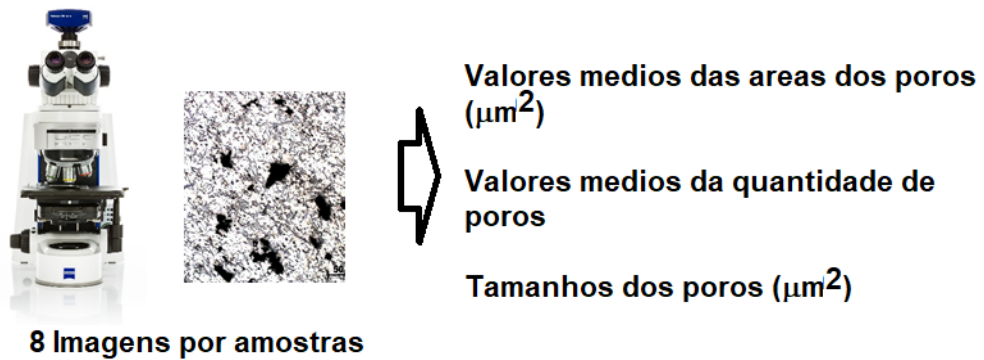
Fonte: Autoria Própria

3.4 ANÁLISE DE POROSIDADE

Foi realizado a análise de porosidade das amostras usando o método de análises de imagens. Para tanto foram usadas as amostras ensaiadas por tração. Os corpos de prova ensaiados foram seccionados na seção transversal da região útil, próximo as fraturas, seguido pela preparação metalográfica.

Para a obtenção das imagens foi utilizado o microscópio da marca Zeiss Axio com o, com o zoom de 50x , e utilizado o software Imager A2, para mensurar a área dos poros e sua proporção em relação a área total. Na figura 10, se mostra de forma esquemática a metodologia empregada e os parâmetros analisados.

Figura 10 - Metodologia de análise da porosidade



Fonte: Aatoria própria

4 RESULTADOS

Esse capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados conforme os objetivos propostos, sendo dividido em três subcapítulos.

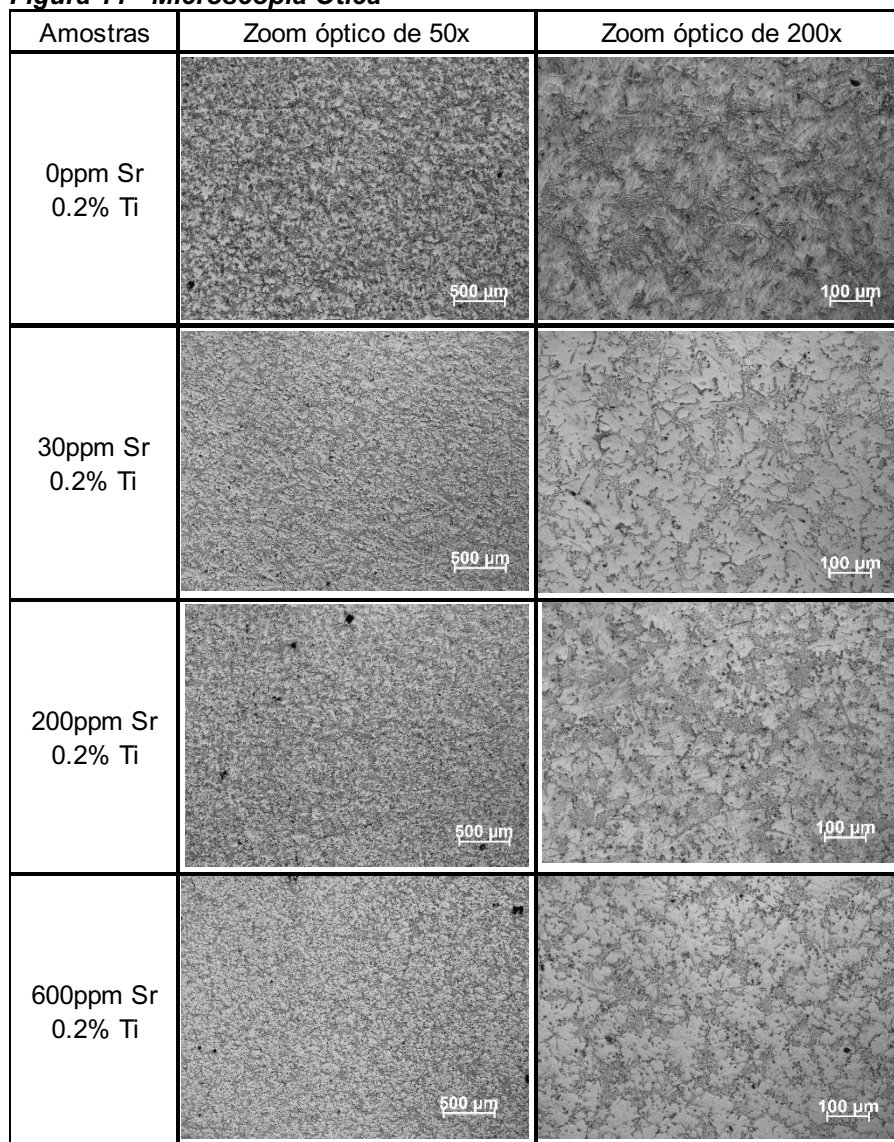
No primeiro são apresentados e discutidos os resultados da análise metalográfica e análise da microscopia eletrônica de varredura identificando os principais constituintes da liga A380. Além disso, é analisado o efeito do modificador de grão, no caso, estrôncio sobre a formação microestrutural das amostras.

Em sequência são apresentados os resultados dos ensaios mecânicos realizados nas diferentes ligas fundidas, analisando a influência do estrôncio nos diferentes teores já citados.

4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE MORFOLÓGICA

A fundição das ligas do alumínio A380 foi realizada com quatro diferentes condições. Sendo uma refinada com 0,2% do refinador TiBAI e as outras três adicionando o Sr como modificador em 30, 200 e 600 ppm de Sr como modificador de grão, sempre respeitando a capacidade do cadinho do forno de 2,4kg.

Após o procedimento de obtenção das diferentes ligas, elas foram analisadas conforme a metodologia descrita no capítulo 3 deste trabalho. As imagens obtidas via microscopia ótica com 50x e 200x, respectivamente, de aumento podem ser observadas na Figura 11.

Figura 11 - Microscopia Ótica

Fonte: Autoria Própria

Como se observa na figura 11 com a adição de 0ppm de estrôncio, a microestrutura da liga é formada por regiões mais claras, predominantemente fase Al- α , envoltas de partículas aciculares com tons mais escuros, com maior parte a fase eutética Al-Si.

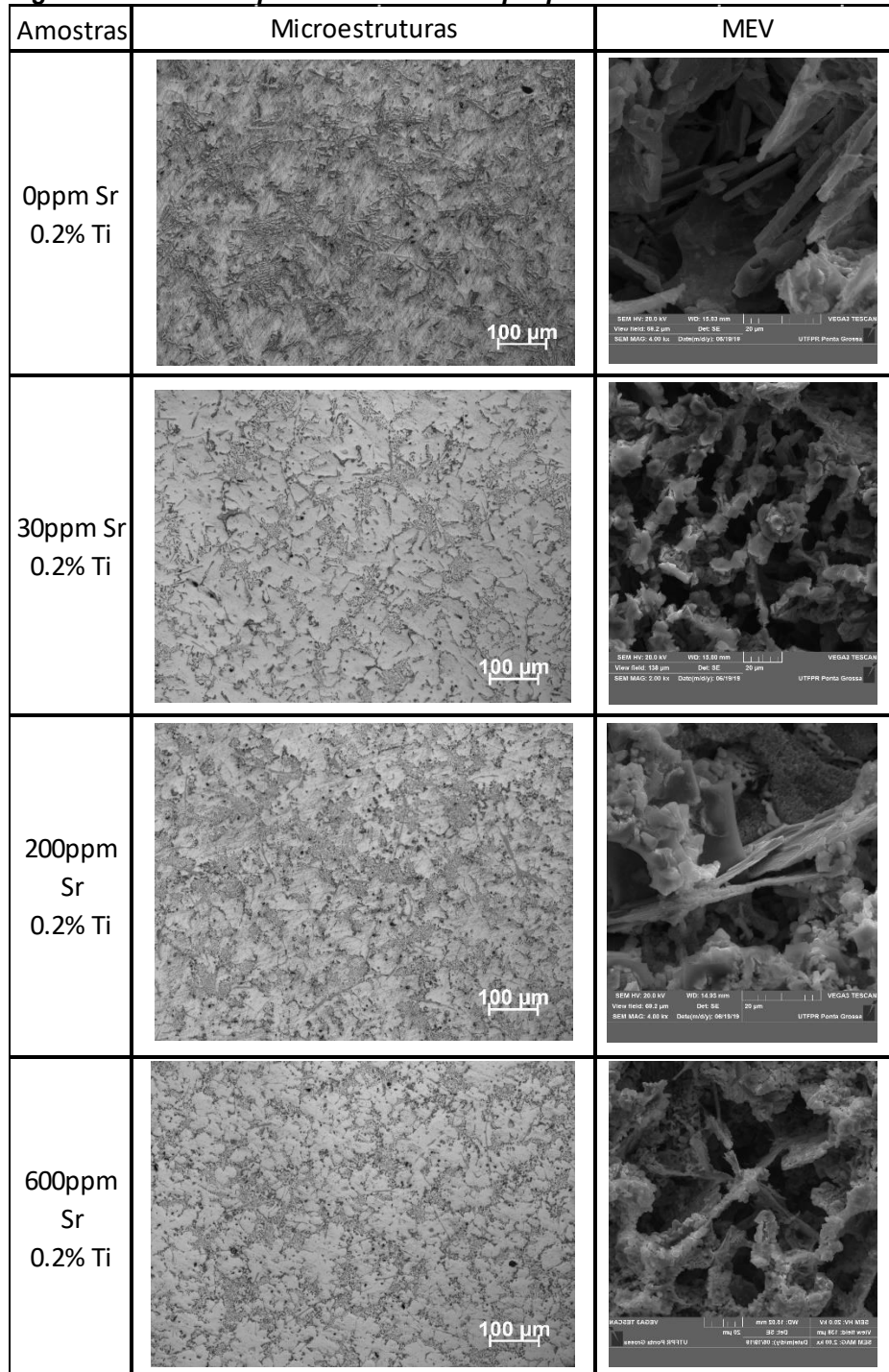
Nas ligas refinadas com 0,2% de TiBAI se observam mudanças microestruturais com indícios de formação de rosetas equiaxiais da fase de Al- α , no entanto existem dificuldades em identificar a fase de alumínio eutético.

Nas imagens subsequentes da Figura 11, que foram adicionadas na liga A380 o modificador estrôncio com 30ppm, 200ppm e 600ppm respectivamente, pode-se notar a diferenciação do método de nucleação e crescimento da fase

eutética, onde o estrôncio é incorporado. Detalhando um eutético mais afinado e fibroso.

Para uma análise mais detalhada da influência do estrôncio, foram realizadas imagens através de microscopia eletrônica de varredura, onde podemos identificar as microestruturas em seu estado tridimensional, logo após o ataque químico profundo por ácido clorídrico por 4 horas que corroeu a fase α , deixando exposta a fase eutética do alumínio.

Na figura 12, foram levantadas as imagens de microscopia ótica e microscopia eletrônica por varredura para melhor visualização das diferenças das modificações em função da quantidade de modificador de grão em cada vazamento.

Figura 12 - Microscopia ótica e Microscopia por varredura eletrônica

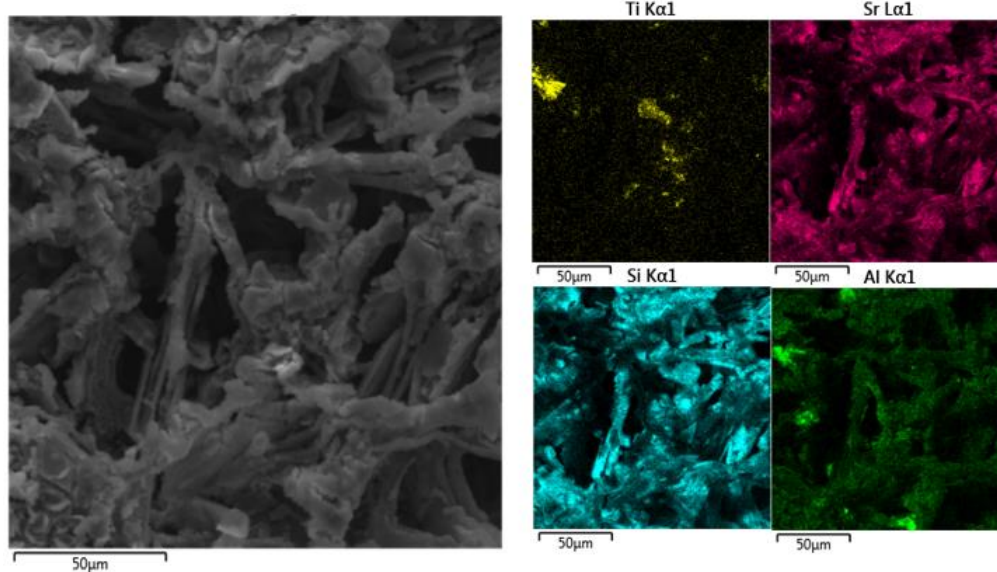
Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar na Figura 12, que a fase eutética, apresentada na microscopia ótica em forma de agulhas, são placas quando observadas em 3 dimensões.

Com o aumento do teor do modificador estrôncio, observa-se que a microestrutura em forma de placas sofre alterações para forma complexa e fibrosa, formando uma rede da fase eutética muito fina.

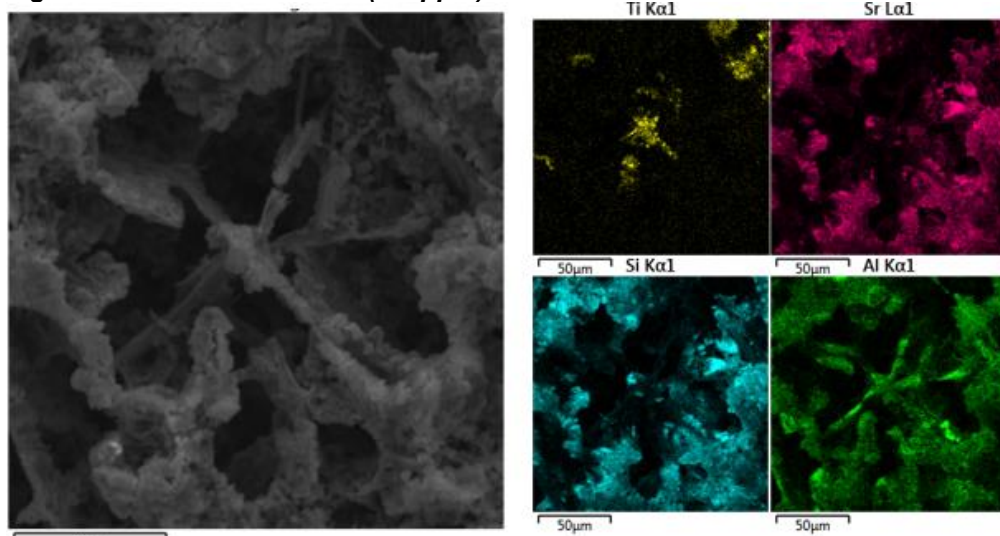
Com o objetivo de identificar qual é a relação de modificação do estrôncio na liga A380, foi utilizada a técnica de espectroscopia de energia dispersiva com aumento de 1000 vezes comparação dos dois extremos de concentração de estrôncio, 0 ppm e 600 ppm, figuras 13 e 14 respectivamente.

Figura 13 - MEV - Amostra 1 (0ppm)



Fonte: Autoria Própria

Figura 14 - MEV - Amostra 4 (600ppm)



Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar o mecanismo de modificação do estrôncio, pois nas imagens por dispersão de energia, ele sobrepõe o silício, evidenciando a mudança da forma de placas para mais complexa e fibrosa.

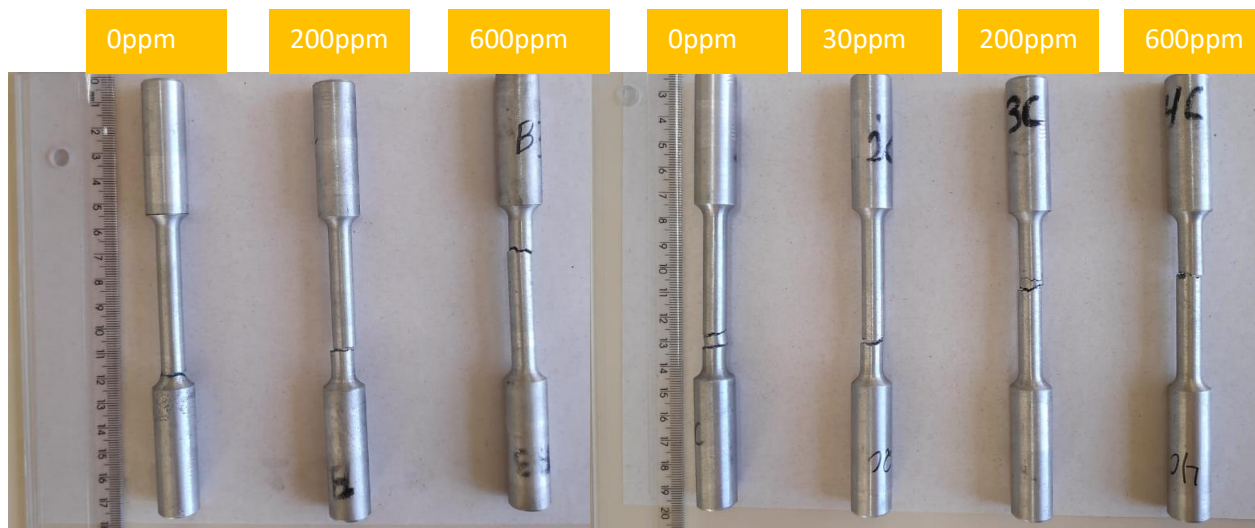
4.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

Após a fundição por molde metálico, foi realizada a usinagem nos tarugos dos vazamentos B e C, utilizando as quatro variações de estrôncio.

A usinagem dos tarugos foi realizada para a obtenção dos corpos de prova para os ensaios de tração, segundo a norma ASTM B557 M. Devido ao alto número de porosidade, a amostra com 30ppm de estrôncio do segundo molde não suportou a usinagem e acabou fraturando, sendo descartada.

Na figura 15 se ilustra os corpos de prova de tração após os ensaios. As fraturas aconteceram, de forma geral, na zona útil dos corpos de prova. Na análise das fraturas, comprovou-se que as fraturas foram do tipo frágeis, com propagação próxima dos 45° e quase nenhuma alongação, sem formação do pescoço ou zona de estrição do corpo de prova, sendo confirmado pelos dados de alongação cálculos e obtidos pelo software da máquina de ensaios.

Figura 15 - Corpos de prova após Ensaio



Fonte: Autoria própria

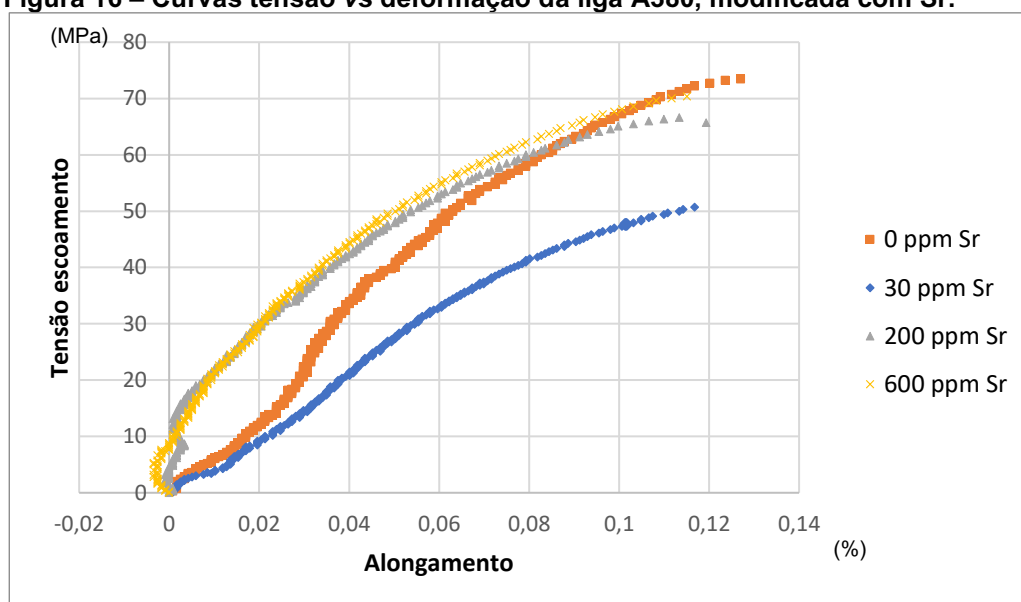
Pode-se verificar que em uma das amostras (0% de Sr) a fratura ficou próxima ao raio do filete, com isso os dados obtidos pelo extensômetro não

podem ser considerados, pois a fratura ficou fora do alcance do equipamento afetando a medição. Por este motivo essas medições foram descartadas para manter a confiabilidade dos dados.

Na figura 16, mostram-se graficamente a relação entre tensão (MPa) e a deformação (%), para cada uma das condições de modificação da liga A380.

Nela, se constata a influência da modificação com diferentes concentrações de Sr na liga de alumínio, na resistência a tração e na tabela 6 se expõem os valores das propriedades mecânicas obtidas pelo ensaio.

Figura 16 – Curvas tensão vs deformação da liga A380, modificada com Sr.



Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 - Dados obtidos pelo ensaio de tração

	Tensão escoamento (MPa)	Tensão máxima (MPa)	Alongamento até Ruptura (%)	Módulo de Elasticidade (MPa)
0 ppm Sr	69.5	73.5	0.25	70019
30ppm Sr	40.7	50.7	0.23	33723
200ppm Sr	38.0	46.6	0.16	74035
600ppm Sr	67.6	70.4	0.22	54324

Fonte: Autoria Própria

Na figura 16, pode-se observar que no início dos gráficos, em algumas amostras ocorreram valores negativos de deslocamento, consequência de má

fixação do extensômetro nas amostras, proporcionando um ajuste do dispositivo na execução do ensaio.

Pode ser verificado nas curvas da figura 16, que independentemente do teor de Sr usado como modificante da liga, o comportamento do material foi frágil, como já tinha sido argumentado na análises visual dos corpos de prova de tração fraturados.

A liga A380 modificada com Sr, nas condições de processamento deste trabalho, mostrou baixas propriedades mecânica (tabela 6) independentemente do teor de Sr adicionado, apesar do refinamento da fase eutética, constatado nas análises microestruturais. Os valores de resistência última a tração destas ligas fundidas e modificadas com Sr mostraram um decréscimo de aproximadamente 75% no valor da tensão máxima da liga A380 comprada comercialmente.

Provavelmente as baixas propriedades mecânicas estiveram associadas principalmente à formação de poros no processo de fusão e obtenção das ligas.

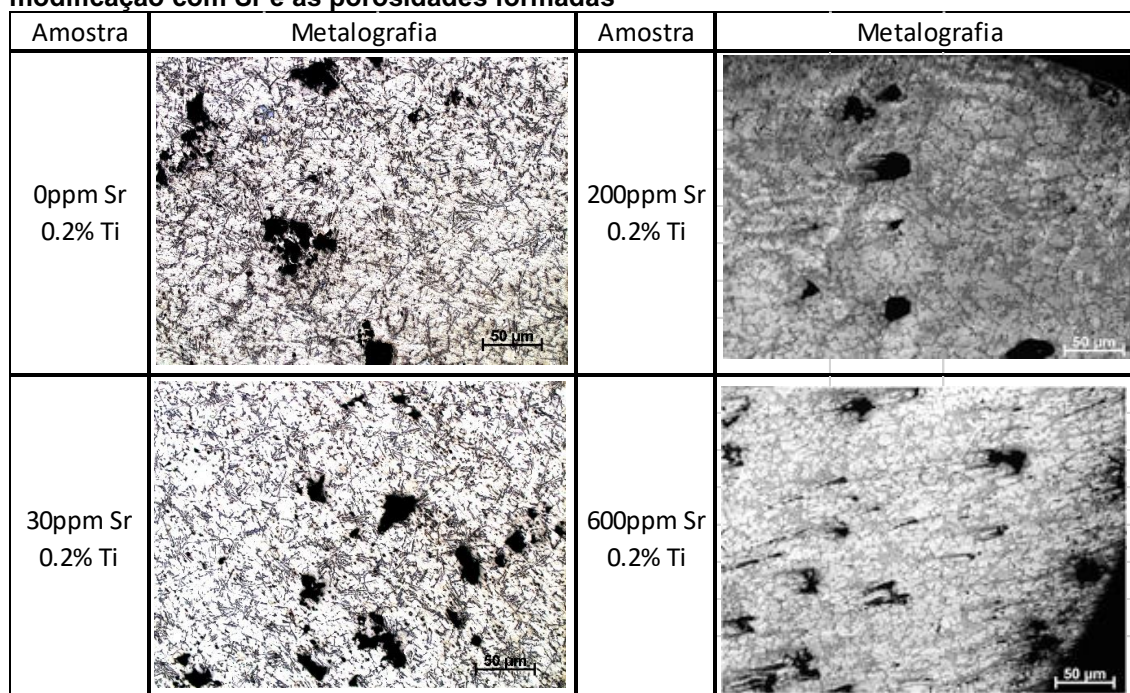
4.3 ANÁLISE DA POROSIDADE

A análise da porosidade foi realizada na seção transversal dos corpos de prova de tração na zona de maior estrição das amostras. Foi realizado a preparação metalográfica necessária para contabilizar a quantidade de poros e relacionou-se com as propriedades mecânicas e as diferenciações dos teores de estrôncio.

Após o polimento das amostras, foram realizadas 8 imagens de cada amostra abrangendo toda a área da amostra, para que o cálculo de porcentagem seja o mais próximo da realidade.

Na figura 17, mostram-se imagens realizadas por microscopia ótica das seções transversais das amostras e porosidades formadas, em cada uma das condições de modificação com Sr aplicadas no trabalho.

Figura 17 - Imagens de microscopia ótica que representam cada condição de modificação com Sr e as porosidades formadas



Fonte: Autoria Própria.

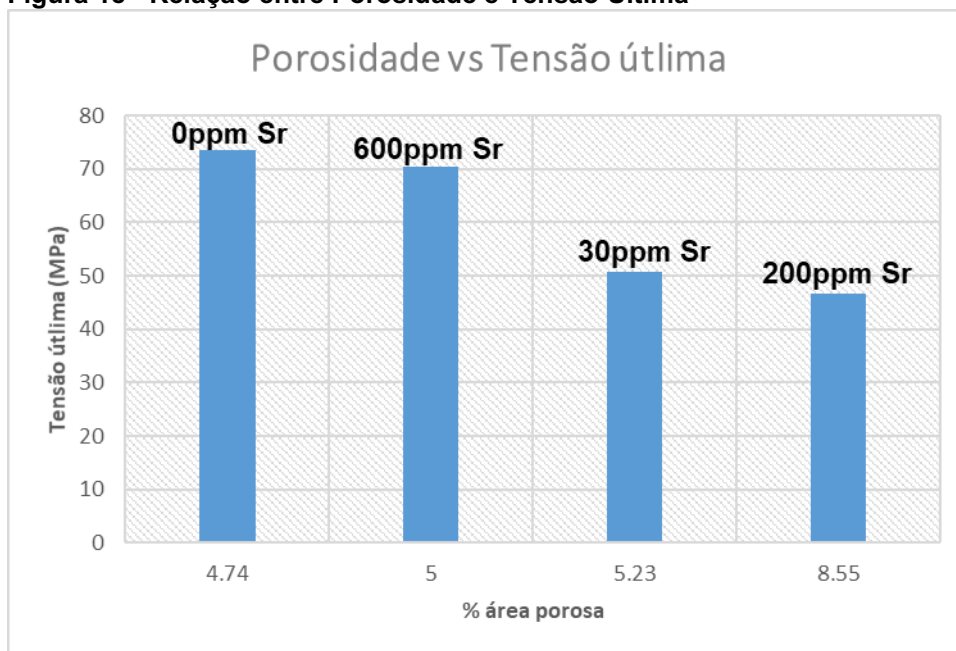
Na sequência, é possível verificar na tabela 7, os resultados da análise de imagens das seções transversais, em função das condições de modificação com Sr. Estes resultados foram obtidos a partir do cálculo das áreas de cada poro e área total da amostra, visando a determinação da percentagem da área porosa das imagens metalográficas.

Tabela 7 - Resultado da análise de porosidade

	Somatória das áreas porosas (μm^2)	Área total da amostra (μm^2)	% área porosa
0 ppm Sr	$2,1 \times 10^6$	$4,4 \times 10^7$	4.74
30ppm Sr	$2,3 \times 10^6$	$4,4 \times 10^7$	5.23
200ppm Sr	$3,7 \times 10^6$	$4,4 \times 10^7$	8.55
600ppm Sr	$2,2 \times 10^6$	$4,4 \times 10^7$	5.00

Fonte: Autoria própria.

A porosidade influencia diretamente nas propriedades mecânicas comopode-se verificar no figura 18, onde se relaciona a tensão última de tração com a percentagem da area de porosidade encontrada.

Figura 18 - Relação entre Porosidade e Tensão Última

Fonte: Autoria Própria

A partir da análise da figura 18, pode-se notar que os menores valores de porosidade foram obtidos na liga sem adição de Sr, e conseqüentemente atinge-o a maior resistência última a tração. A adição de Sr aumentou os valores de porosidade da liga fundida, influenciando negativamente na resistência última a tração, pois constituem vazios no material e pontos de concentração de tensões e formação de trincas e falhas.

Constatou-se ainda no trabalho que não existe uma relação direta entre os valores dos teores de adição de Sr, e as áreas percentuais dos poros, porém na resistência última a tração da liga A380. Nesse sentido, a porosidade aumentou quando o Sr foi de 30ppm para 200 ppm e logo decresceu quando o Sr foi para 600 ppm.

Apesar desta análise, pela importância e sensibilidade dos resultados, maiores quantidades e replicas dos experimentos deveriam ser realizados para confirmar estes resultados.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos, podemos concluir que com a alteração do teor de estrôncio tem-se uma variação significativa na morfologia das amostras, alterando a fase eutética Al-Si da forma de placas para fibrosa.

Observou-se nas imagens obtidas pelo EDS que o estrôncio predomina na região onde se tem silício, comprovando a alteração morfológica vista pela imagem obtida pelo microscópio ótico e por varredura.

Os resultados do ensaio de tração das ligas estudadas tiveram um decréscimo de aproximadamente 75% no valor da tensão máxima da liga A380 comprada comercialmente.

Uma das possíveis causas deste resultado negativo pode decorrer pela quantidade de poros encontrados nos lingotes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, Gianni Ferreira. **DESENVOLVIMENTO DE NOVAS LIGAS PARA PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO NO ESTADO SEMI-SÓLIDO A PARTIR DE ALUMÍNIO RECICLADO**. 2011, 112p. Dissertação (Mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo. Vitória.

American Society for Testing and Materials. **B557M 16a: Standard Tests Methods of Tension of Tension Testing Wrought and Cast Aluminium – And Magnesium-Alloy Products**, 2019.

AMMAR, H.R., SAMUEL, A.M., SAMUEL, F.H. **Porosity and the fatigue behavior of hypoeutectic and hypereutectic aluminum-silicon casting alloys**. International Journal of Fatigue, 2007.

BONIFACIO, M. C. R. **QUALIDADE NA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE FUNDIÇÃO DE ALUMÍNIO – SETOR AUTOMOTIVO**. 2000,146p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BRADASCHIA, Clóvis. **Técnicas de Fundição do Alumínio e suas Ligas**, São Paulo: Abm, 1998^a.

BREVICK, J. **Die casting porosity guidebook**. Wheeling: North American Die Casting Association, 2009.

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

CARDOSO, J. G. da R. ; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. BNDES Setorial 33, p. 43-88.

CHIAVENARI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de fabricação e tratamento**. Vol. 2, 2 ed. p.2. São Paulo, 1996.

DEDAVID, B. A. ; GOMES, C. I; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: Aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores.** Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007

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.

FERREIRA, J. P. G. **ESTUDO MICROESTRUTURAL E REOLÓGICO DA LIGA RECICLADA DE ALUMÍNIO A380 MODIFICADA PELA ADIÇÃO DE ESTRÔNCIO.** 2017. 106p. Dissertação (mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

KIM, J, H.; KWON I. S.; KIM, K. M.; LEE, C. H.; YOON, E. P.; **Effect Of Phosphorous On Modification Of Eutectic Silicon In Al-7Si-0,3Mg Alloy.** Materials Sience and Technology, v.16, p.243-248, 2000.

KIRKMAN, S. **Shinkage porosity: a guide correcting the problems.** Wheeling: North American Die Casting Association, 2006.

LIU,L; SAMUEL, A.M; SAMUEL, F.H.; **Influence of oxides on porosity formation in Sr-treated Al-Si casting alloys.** Journal of Materials Science, v. 38. p. 1255-1267, 2003.

Mendes, Vitor T. U. ; **Comportamento em fadiga da liga A356 tixoforjada.** 2018. 91p. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Metals Handbook, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International 10th Ed. 1990.

S. P. Midson, L. E. Thornhill, K. P. Young, “ **Influence of key process parameters on the quality of semi-solid metal cast aluminum components**”, 5th International Conference on Semi – Solid Processing of Alloys and Composites, 1998, pp 181-187

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

TELECURSO 2000. **Processos de fabricação**. Vol 1. Apostila do Curso Técnico em Mecânica.