

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**LUCAS PASQUINI
TAMIRES RUSSO GIACOIA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE 3 DIFERENTES REFINADORES COMERCIAIS
(TI-B) NA LIGA DE ALUMÍNIO A332**

**PONTA GROSSA
2021**

**LUCAS PASQUINI
TAMIRES RUSSO GIACOIA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE 3 DIFERENTES REFINADORES COMERCIAIS
(TI-B) NA LIGA DE ALUMÍNIO A332**

**EVALUATION OF THE EFFECT OF 3 DIFFERENT COMMERCIAL REFINERS
(TI-B) ON THE A332 ALUMINUM ALLOY**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para à obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCAS PASQUINI
TAMIRES RUSSO GIACOIA**

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE 3 DIFERENTES REFINADORES COMERCIAIS
(Ti-B) NA LIGA DE ALUMÍNIO A332**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10 de dezembro de 2021

Luciano Augusto Lourençato
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Sandra Mara Kaminski Tramontim
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hipólito Domingo Carvajal Fals
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**PONTA GROSSA
2021**

AGRADECIMENTOS

Eu, Lucas, agradeço primeiramente aos meus pais, Rogério e Janaína, por proporcionar toda estrutura durante a minha jornada acadêmica, sem vocês essa caminhada não seria possível. Serei eternamente grato a minha namorada Lilian por ser meu porto seguro e me motivar a ser uma pessoa melhor até nas situações mais difíceis. Agradeço a todos os amigos que fiz durante essa caminhada e que hoje, levo para a vida toda, em especial a Tamires, por ter sido a minha dupla e ter me auxiliado inúmeras vezes em situações que quis desistir. Agradeço ao professor Luciano pela oportunidade que me foi dada, por acreditar no trabalho e por todo suporte que proporcionou como professor, orientador, educador e, principalmente, amigo. Agradeço também ao Professor Hipólito pela paciência e dedicação contribuída neste trabalho. Por último, agradeço a Deus por iluminar minhas escolhas, sem você nada seria simples.

Eu, Tamires, agradeço aos meus pais por terem me dado todo o apoio e suporte para que fosse possível chegar até aqui. Também agradeço ao meu namorado Vitor por ter me amparado nos momentos de dificuldade. Agradeço ao Lucas por ter sido minha dupla durante toda a graduação e que não me deixou enlouquecer e desistir de tudo inúmeras vezes. Agradeço ao professor Luciano que ter dado a oportunidade de ser sua orientanda e por não ter me deixado desistir nos momentos difíceis. Agradeço também o professor Hipólito por todo suporte e ajuda durante a realização desse trabalho.

Nós agradecemos ao Bruno por todo o apoio na análise das amostras e pelo tempo e paciência dedicado durante a realização deste trabalho. Agradecemos aos amigos que adquirimos aos longos destes anos, Rafael, Bruno, William, José, Bernardo, Elisson, Maria e Nara pelos momentos de estudos e descontração. Em especial, agradecemos ao Elias, pelo auxílio na fundição das peças de alumínio aqui presentes. Agradecemos também, as professoras Heliety e Sandra por disponibilizarem sua ajuda, sempre de bom grado, e também seus laboratórios para a realização deste trabalho. Agradecemos ao Professor Ivanir, por auxiliar com a caracterização química da liga A332. Por fim, agradecemos a todos os servidores da UTFPR, colegas e professores, pelo tempo que passamos juntos mesmo que momentaneamente.

RESUMO

O alumínio é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e seu uso em processos metalúrgicos é recorrente, porém é um material que apresenta alta ductilidade e baixa dureza que torna a trabalhabilidade difícil. Pensando em melhorar suas características mecânicas utiliza-se o processo de refinamento do alumínio com a adição de outros materiais, tais como boro e titânio. Os refinadores agem de forma a inibir a formação de grandes grãos colunares, tornando a estrutura do material mais uniforme e provoca uma melhora nas suas propriedades mecânicas. Buscando entender o comportamento da liga de alumínio A332 de origem reciclada com a adição de refinadores, submeteu-se ao processo de fundição com três diferentes porcentagens dos refinadores Ti-B (titânio e boro) e uma amostra sem refino para fins de comparação. Assim foi possível realizar as seguintes análises: composição química do material, metalografia, imagens de MEV e análises EDS, tamanho de fase α -Al e microdureza. Dessa forma foi possível analisar e entender como o uso de refinadores Ti-B afetaram a microestrutura e a microdureza das ligas de alumínio A332 refinadas de forma que pudemos observar uma estrutura granulada, fina, uniforme e uma diminuição do tamanho da fase α -Al, que por consequência ocasiona uma melhora na microdureza das amostras refinadas.

Palavras – chave: refinadores; alumínio; microdureza; metalografia; MEV; EDS; liga A332

ABSTRACT

Aluminum is one of the most abundant elements in the earth's crust and its use in metallurgical processes is recurrent, but it is a material that has high ductility and low hardness that makes workability difficult. Thinking about improving its mechanical characteristics using the aluminum refinement process with the addition of other materials, such as boron and titanium. Refiners act to inhibit the formation of large columnar grains, making the material structure more uniform and improving its mechanical properties. Seeking to understand the behavior of the recycled aluminum A332 alloy with the addition of refiners, it was submitted to the casting process with three different percentages of Ti-B refiners (titanium and boron) and an unrefined sample for comparison purposes. Thus, it was possible to carry out the following analyses: chemical composition of the material, metallography, SEM images and EDS analysis, α -Al phase size and microhardness. Thus, it was possible to analyze and understand how the use of Ti-B refiners affected the microstructure and microhardness of refined A332 aluminum alloys so that we could observe a granular, fine, uniform structure and a decrease in the size of the α -Al phase, which consequently leads to an improvement in the microhardness of refined samples.

Keywords: refiners; aluminum; microhardness; metallography, MEV, EDS; A332 Alloy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma simplificado dos processos aplicados	15
Figura 2 – Processo de fundição da liga A332 com variação de refinador e modificador.....	17
Figura 3 – Molde cilíndrico para o vazamento das ligas A332.....	18
Figura 4 – Imagem ilustrativa de uma policorte de bancada	19
Figura 5 – Embutidora	19
Figura 6 – Lixadeira e Politriz PANTEC POLIPAN-2.....	21
Figura 7 – Politriz BUEHLER VibroMet 2.....	21
Figura 8 - Processo de polimento.....	22
Figura 9 – Equipamento de suspensão de impurezas.....	22
Figura 10 – Amostras preparadas	23
Figura 11 – Microscópio ZEISS de modelo Axiolmager A2m	24
Figura 12 – Imagens das metalografias das amostras fundidas com aumento de 100X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C – A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)	28
Figura 13 – Imagens das metalografias das amostras fundidas com aumento de 200X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C – A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)	30
Figura 14 – Imagens do MEV para as amostras fundidas com aumento de 200X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C- A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)	31
Figura 15 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra A (A332 sem refinador e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.....	32
Figura 16 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra B (A332 com 3% de Ti e 1% de B e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.....	33
Figura 17 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra C(A332 com 5% de Ti e 2% de B e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.....	34
Figura 18 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra D(A332 com 5% de Ti e 1% de B) com aumento de 200x.	35
Figura 19 – Exemplo das linhas traçadas sobre a imagem da amostra A.....	36
Figura 20 – Resultado da contagem do tamanho da fase α -Al	37
Figura 21 – Resultado do ensaio de microdureza HV.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição das ligas preparadas em função do percentual dos refinadores.....	16
Tabela 2 – Composição das ligas preparadas em função da parcela mássica dos refinadores.....	17
Tabela 3 – Composição Química da Liga A332.....	27
Tabela 4 – Resultado da contagem do tamanho da fase alfa.	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Objetivo Geral.....	7
1.2	Objetivo Específico.....	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Ligas de Alumínio	9
2.2	Refino de grão	11
2.2.1	Refino com agente Boro	12
2.2.2	Refino com agente Titânio	13
2.2.3	Refino com TiBAI	13
2.2.4	Influência do Estrôncio (Sr).....	14
3	METODOLOGIA	15
3.1	Preparação das ligas de alumínio	16
3.2	Caracterização química	20
3.3	Preparação das amostras	20
3.4	Análises metalográficas por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV).....	23
3.5	Tamanho da fase alfa.....	24
3.6	Ensaio de microdureza.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1	Resultados das análises química e microestrutural.....	26
4.2	Análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	30
4.3	Influência do tipo de refinador no tamanho da fase α -Al.....	35
4.4	Resultados do ensaio de microdureza	37
5	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Descoberto no ano de 1825, o alumínio é o terceiro elemento de maior abundância na crosta terrestre, apesar disso, há evidências de que as civilizações antigas já o utilizavam, sem possuir conhecimento do metal, visto que sua produção comercial se iniciou há apenas 150 anos.

O uso de alumínio em processos metalúrgicos de fabricação são práticas recorrentes. O alumínio apresenta uma característica de alta ductilidade e baixa dureza, tornando difícil sua trabalhabilidade mecânica. Pensando na necessidade de aprimorar gradativamente sua microestrutura, utiliza-se o processo de refinamento da estrutura, através da adição de outros elementos durante o processo de fundição do alumínio, tais como: Boro, Titânio, Silício, Magnésio e outros.

Nas ligas de alumínio, a adição de refinadores de grão no metal fundido tem como objetivo suprimir a formação de grandes grãos colunares, oriundos do processo de solidificação do material. Como resultado de um refino de grão bem-sucedido, as partículas de refinadores agem como substrato durante a nucleação do alumínio primário, dessa forma o material final apresenta uma estrutura granular fina e uniforme, e, uma melhoria em suas propriedades mecânicas.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar o comportamento microestrutural e de microdureza da liga de alumínio A332, após a utilização de três diferentes concentrações de refinadores comerciais do tipo Ti-B.

1.2 Objetivo Específico

Os objetivos específicos deste trabalho se apresentam nos itens que se seguem:

- Caracterizar o efeito do uso dos refinadores na microestrutura da liga A332 como fundida.
- Determinar o tamanho da fase α -Al da liga A332, para cada tipo de refinador utilizado.

- Determinar os valores médios de microdureza da seção transversal da liga A332, para cada tipo de refinador utilizado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão abordadas as características da liga de alumínio A332 e a alteração de suas propriedades mecânicas na presença de refinadores, possibilitando uma avaliação mais precisa dos dados dos refinadores a serem citados.

2.1 Ligas de Alumínio

O alumínio é, atualmente, um dos metais mais utilizados comercialmente pela indústria, isso se dá ao fato das ligas de alumínio apresentarem excelentes propriedades mecânicas. Segundo a ABAL (Associação Brasileira do Alumínio), o alumínio fundido dissolve os outros metais e substâncias metaloides e, durante o processo de solidificação, faz com que algum dos constituintes da liga fiquem retidos em solução sólida, tornando a estrutura atômica do metal mais rígida. Assim, as ligas de alumínio têm como função tornar o material mais resistente mecanicamente, porém pode haver alteração de outras propriedades mecânicas.

Além da significativa melhoria na trabalhabilidade do material, as ligas de alumínio possuem as maiores classificações de vazabilidade, como materiais de fundição, isso se dá devido a algumas características favoráveis, tais como (Kearney, 1990):

- Boa fluidez, permitindo o preenchimento de seções finas;
- Baixo ponto de fusão em relação aos requeridos para outros metais;
- Transferência de calor rápida do alumínio fundido para o molde, proporcionando ciclos de fundição;
- Estabilidade química;
- Bom acabamento superficial e pouca ou nenhuma mácula;
- Ter o hidrogênio como único gás com solubilidade apreciável em alumínio e suas ligas. A sua solubilidade em hidrogênio pode ser controlada por métodos de processamento.

É conveniente dividir, as ligas de alumínio, em duas grandes categorias: ligas trabalhadas e ligas fundidas. As ligas trabalhadas são destinadas aos processos de trabalho mecânico (forjamento, laminação, extrusão, entre outros), e as ligas fundidas são destinadas a produção de material via processos de fundição. A diferenciação de

cada categoria e suas subdivisões são baseadas no mecanismo primário de desenvolvimento de propriedades, mudando de acordo com sua composição (ROOY, 1992).

A razão predominante para utilização de ligas de fundição de alumínio é aumentar a força, a dureza, a resistência ao desgaste, a fluência, o alívio de tensões e a fadiga. Os efeitos sobre estas propriedades são específicos para cada elemento de liga e são relacionados com seus diagramas de fase da liga e, às microestruturas e subestruturas que eles formam como resultado da solidificação e, também, do seu tratamento térmico (ROOY, 1992).

Os elementos de liga mais utilizados comercialmente, por fornecerem resistência aumentada quando combinados com endurecimento por deformação a frio ou tratamento térmico, ou ambos, são cobre, magnésio, manganês, silício e zinco. Esses elementos de liga apresentam elevada solubilidade sólida em alumínio e, em todos os casos, a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura (ROOY, 1992).

Para elementos que formam soluções sólidas, o efeito fortalecedor tende a aumentar quando o elemento que está em solução apresenta um aumento na diferença entre os raios atômicos dos átomos do solvente (Al) e do soluto (elementos de liga) (ROOY, 1992).

As principais ligas, que são reforçadas por elementos de liga em solução sólida, são as da série de alumínio e magnésio, que variam de 0,5% a 6% em peso de Mg. Essas ligas apresentam pequenas adições de elementos de transição como manganês e cromo, e menos frequentemente, zircônio, para controlar a microestrutura dos grãos e subgrãos. Além disso, apresenta impurezas de ferro e silício na forma de partículas intermetálicas (ROOY, 1992).

Ligas de fundição de alumínio são baseadas no mesmo sistema das ligas trabalhadas, são reforçadas pelos mesmos mecanismos (com exceção do endurecimento por tensão) e são classificados em tipos tratáveis termicamente e não tratáveis termicamente. A principal diferença é que ligas de fundição apresentam excesso, geralmente, de silício, para ter fluidez adequada para alimentar a contração que ocorre em todos os fundidos, exceto os mais simples (Kearney, 1990).

Os sistemas utilizados para identificar e agrupar as ligas de fundição de alumínio são diferentes para cada nação e, algumas empresas individuais. Desses vários métodos, o agrupamento de ligas de fundição de alumínio em termos de

composição será O Sistema de Designação da Associação de Alumínio (Kearney, 1990).

O sistema de associação de alumínio emprega diferentes nomenclaturas para ligas forjadas e ligas de fundição (Kearney, 1990). Para fins acadêmicos, será abordado apenas algumas nomenclaturas das ligas de fundição.

As composições de fundição são descritas por um sistema de três dígitos seguido por valor decimal. O decimal .0 em todos os casos se refere aos limites da liga de fundição, e os decimais .1 e .2 dizem respeito às composições do lingote que, após fusão e o processamento, devem resultar em produtos químicos de acordo com as especificações de lingotamento. As famílias de ligas para composição de fundição incluem (Kearney, 1990):

Ligas de alumínio série:

- 1xx.x: Composições não ligadas (puro) controladas, utilizadas para fabricação de rotores.
- 2xx.x: Cobre como principal elemento de liga, outros elementos podem ser especificados.
- 3xx.x: Silício como principal elemento de liga, outros elementos de liga como cobre e magnésio são especificados. Compreende quase 90% de todas as peças modeladas produzidas.

Assim, a liga abordada neste trabalho será a liga de alumínio 332, sendo caracterizada por ter o silício como principal elementos de liga com porcentagens de cobre e magnésio.

2.2 Refino de grão

Em alumínio fundidos, grãos finos e equiaxiais são normalmente a estrutura desejada, pois oferecem uma melhor combinação de resistência e ductilidade. O tipo e o tamanho dos grãos formados variam e são determinados pela composição da liga, taxa de solidificação e, a adição de ligas mestras (refinadores de grãos) contendo partículas de fase intermetálica, que fornecem locais para a nucleação de grãos heterogêneos (Kearney, 1990).

O tamanho dos grãos é refinado ao se aumentar a taxa de solidificação, contudo, também depende da presença de elementos de refino de grãos (principalmente titânio e boro) na liga (Kearney, 1990).

Todas as ligas de alumínio podem ser feitas para se solidificar com uma estrutura de grão fino totalmente equiaxial, através do uso de refinadores de grãos adequados (Kearney, 1990).

Refinadores de alumínio-titânio, em geral, contém de 3% a 10% de Ti. A mesma faixa de concentrações de titânio pode ser encontrada em refinadores de Ti-B-Al, com teores de boro de 0,2% a 2,5% e, razões de titânio-boro variando de cerca de 5:1 a 50:1 (Davis, 2001).

Embora os refinadores de grãos destes tipos possam ser considerados endurecedores convencionais ou ligas principais, eles diferem das ligas principais adicionadas ao fundido apenas para fins de liga. Os refinadores de grão devem introduzir quantidades controladas, previsíveis e operacionais de aluminetos (e boretos) na forma, tamanho e distribuição corretos para que a nucleação de grãos se torne eficaz (Davis, 2001).

O refinador forjado em barra, desenvolvido para tratamento contínuo de alumínio em operações primárias, está disponível em comprimentos cortados para uso em fundição. Além das ligas principais de refino de grãos, sais (geralmente na forma compacta) que reagem com o alumínio fundido para formar combinações de $TiAl_3$ e TiB_2 também estão disponíveis (Davis, 2001).

Apesar do uso bem-sucedido do titânio como refinador de grãos para fundição de ligas, descobriu-se, recentemente, que o boro sozinho pode ser um refinador mais eficaz do que o titânio em ligas de alumínio-silício (Davis, 2001).

2.2.1 Refino com agente Boro

O Boro é utilizado no alumínio e suas ligas como refinador de grão, pode ser utilizado sozinho como refinador durante a solidificação, mas se torna mais eficaz quando usado com adição de titânio (Davis, 2001).

Além disso, o boro é usado no alumínio e suas ligas por melhorar a condutividade através da precipitação de vanádio, titânio, cromo e molibdênio,

elementos que nas suas impurezas usuais são prejudiciais a condutividade (Davis, 2001).

Em alguns casos, o boro pode ser usado sozinho (em níveis de 0,005% a 0,1%) como refinador de grãos durante a solidificação, entretanto, se torna eficaz quando usado com excesso de titânio. Por esse motivo, os refinadores comerciais de grãos, comumente, contêm titânio e boro em uma proporção de 5 para 1.

O boro ainda tem uma seção transversal de captura de nêutrons, e é usado em ligas de alumínio para certas aplicações de energia atômica, mas seu conteúdo tem que ser limitado a níveis muito baixos em ligas usadas nas áreas de reatores, onde essa propriedade se torna indesejável (Davis, 2001).

2.2.2 Refino com agente Titânio

O Titânio é o principal refinador de grão utilizado em lingotes e ligas de alumínio. Quando utilizado sozinho, seu tempo de retenção e seu efeito diminuem com o alumínio no estado fundido. O efeito de refinamento é melhorado se o Boro estiver presente no fundido ou se for adicionado em conjunto com o titânio (Davis, 2001).

Comercialmente, quantidades de 10 a 100 ppm de Ti são encontradas no alumínio de pureza comercial. O titânio tem como característica deprimir a condutividade elétrica do alumínio, mas seu nível pode ser reduzido pela adição de boro ao fundido, formando o TiB_2 insolúvel (Davis, 2001).

O titânio é usado principalmente como um refinador de fundidos e lingotes de ligas de alumínio. O efeito de refinamento de grãos é melhorado se o boro estiver presente no fundido ou se for adicionado como liga-mestre contendo boro amplamente combinado como TiB_2 . Entretanto, se usado sozinho, o efeito do titânio diminui com o tempo de retenção no estado fundido e com a refusão repetida (Davis, 2001).

2.2.3 Refino com TiBAI

Segundo Quadro, o método de refino de grão mais utilizado mundialmente é o refino do grão através da adição de ligas refinadoras a base de alumínio, titânio e boro.

Quando é utilizado o composto TiB_2 muitas partículas são encontradas dispersas no metal fundido, funcionando como centros ativos de nucleação durante a solidificação (Quadro, 2016).

2.2.4 Influência do Estrôncio (Sr)

Segundo Furlan (2008), o estrôncio (Sr) é o elemento modificador mais utilizado pelo seu efeito prolongado, facilidade de controle de adição e facilidade de estocagem.

O estrôncio (Sr) é adicionado como modificador nas ligas de fundição para fins de modificar a morfologia do silício precipitado, de plaquetas poligonais para plaquetas arredondadas, fazendo com que ocorra uma melhora nas características mecânicas das peças fundidas (Guimarães, Arruda e Lourençato, 2016).

3 METODOLOGIA

Será abordado neste capítulo, de forma sucinta, os processos utilizados para a realização do trabalho, exemplificando cada passo no decorrer dele. Na figura a seguir pode ser observado o fluxograma.

Figura 1 – Fluxograma simplificado dos processos aplicados



Fonte: Autoria própria

3.1 Preparação das ligas de alumínio

Na preparação dos lingotes de alumínio, foram utilizadas barras da liga A332, das quais foram compradas comercialmente. Para realizar o processo de vazamento do metal e a formação dos lingotes, as barras foram cortadas em pedaços menores com o auxílio de uma serra fita, encontrada no laboratório de usinagem da UTFPR-PG. Foram feitos cortes uniformes e com comprimento médio de 2 polegadas que posteriormente foram pesados e fracionados quanto ao percentual de refinadores e modificadores presentes em cada amostra, mantendo uma uniformidade entre as quatro amostras de lingotes fundidas.

Após a pesagem, foram selecionadas as barras de alumínio A332 mais próximas da massa de 2Kg, sendo que em três amostras, concentrações de acordo com a tabela 1 de titânio (Ti) e Boro (B), foi adicionada por meio de uma liga refinadora com a seguinte composição 94wt%Al-5wt%Ti-1wt%B. Além disso, todas as amostras receberam a adição de um agente modificante Estrôncio (Sr) que foi incorporado durante o processo de fundição.

Após fracionado e pesado os refinadores e modificadores, com auxílio de uma balança de precisão, em cada uma das quatro amostras, resultando nas proporções ilustrada na tabela 1, para uma massa de, aproximadamente, 2Kg de barra de alumínio A332.

Tabela 1 – Composição das ligas preparadas em função do percentual dos refinadores

Vazamentos	Liga	Refinadores		Modificador
Amostras	A332 (Kg)	Ti (%)	B (%)	Sr (ppm)
A	1,946	0	0	5
B	2,035	3	1	5
C	2,011	5	2	5
D	2,052	5	1	5

Fonte: Autoria Própria

Como observado na tabela 1, a amostra A apresenta as características do alumínio sem a influência do refinador de grão. As amostras B, C e D apresentam a presença do refinador com percentuais variados de Titânio (Ti) e Boro (B). Todas as amostras apresentam modificador de Estrôncio (Sr). Com isso, determinamos a

Tabela 2 em função de suas parcelas mássicas esperadas, auxiliando na etapa de preparação das amostras para o vazamento.

Tabela 2 – Composição das ligas preparadas em função da parcela mássica dos refinadores

Vazamentos	Liga	Refinadores		Modificador
Amostras	A332 (Kg)	Ti (g)	B (g)	Sr (ppm)
A	1,946	0	0	5
B	2,035	61,05	20,35	5
C	2,011	105,5	40,22	5
D	2,052	102,6	25,2	5

Fonte: Autoria Própria

Os materiais para vazamento (refinadores, modificadores e liga A332) foram dispostos dentro do forno de fusão por indução de 35kW de potência, da marca GRION. O forno utilizado no laboratório de conformação da UTFPR-PG gerou 4 amostras, sendo que nas amostras B, C e D houve a presença do refinador Ti e B, enquanto, a amostra A não possuiu a presença do refinador. A Figura 2 demonstra o processo do vazamento.

Figura 2 – Processo de fundição da liga A332 com variação de refinador e modificador



Fonte: Autoria Própria

Antes de realizar o vazamento, os moldes metálicos que deram forma aos lingotes, foram borrifados com desmoldante SERAPOL 94 e, posteriormente, permaneceram 10 minutos na estufa de secagem. Essa etapa teve o intuito de facilitar a retirada dos lingotes, após o processo de vazamento.

O processo de vazamento se repetiu quatro vezes, fazendo-se uso dos moldes no formato cilíndrico, com dimensões de comprimento 250mm e diâmetro interno de 31mm, conforme ilustrado na Figura 3. Ao final de cada vazamento, se repetiu a etapa de limpeza dos moldes e aplicação do desmoldante SERAPOL 94, para garantir uma uniformidade do processo em cada uma das quatro amostras.

Figura 3 – Molde cilíndrico para o vazamento das ligas A332



Fonte: Autoria Própria

As amostras resultantes foram levadas para o laboratório de Caracterização de Materiais da UTFPR – PG, onde passaram pelo processo de policorte, na Figura 4 temos uma imagem ilustrativa de uma policorte da bancada. O processo teve como objetivo adequar o tamanho das amostras para o processo de embutimento.

Figura 4 – Imagem ilustrativa de uma policorte de bancada



Fonte: micronscientific.com.br

Com o auxílio de uma embutidora BUEHLER SimpliMet XPS1, foi realizado o embutimento à quente, tendo baquelite como molde. O processo se fez uso de uma pressão de 42000 psi a uma temperatura média de 180°C, durante um tempo de 10 minutos para cada uma das amostras. A máquina utilizada para o processo de embutimento pode ser observada na Figura 5.

Figura 5 – Embutidora



Fonte: <https://portal.utfpr.edu.br/pesquisa-e-pos-graduacao/laboratorios-multiusuarios/laboratorios/centro-de-caracterizacao-multiusuario-em-pesquisa-e-desenvolvimento-de-materiais-c2mma/equipamentos>

3.2 Caracterização química

Também foi realizada a caracterização da composição química das amostras por espectrometria de emissão ótica no equipamento SHIMADZU PDA 7000 que está no laboratório CETEM da UTFPR-PG. O objetivo da caracterização química foi entender a real composição do material, para que pudéssemos prosseguir com as próximas análises a fim de buscar um resultado confiável.

Através da análise qualitativa por espectrometria, é possível identificar a composição química de diversas ligas de alumínio. Assim, uma vez determinado os componentes da liga, podem ser quantificados os teores de cada elemento e verificar se eles atendem a especificação técnica.

3.3 Preparação das amostras

Após o processo de policorte e embutimento dos quatro diferentes tipos de amostras, elas passaram por um processo de lixamento, usando lixas cuja granulometria foram, em sequência 300, 600, 800 e 1200 *mesh*.

Na sequência foi realizado o polimento, primeiro com suspensão de diamante de 3 μm , em seguida, com suspensão de diamante de 1 μm e, por fim, com sílica coloidal de 0,04 μm . Isso foi um facilitador da visualização das etapas que seguiram com o uso do microscópio ZEISS.

O processo de lixamento foi realizado em uma lixadeira e politriz metalográfica PANTEC POLIPAN-2, conforme observado na Figura 6.

Figura 6 – Lixadeira e Politriz PANTEC POLIPAN-2



Fonte: pacontrol.com.br

Antes de dar início ao processo de análise metalográfica no microscópio, submetemos as amostras a um processo de polimento vibratório, se fazendo uso de uma politriz vibratória da marca BUEHLER VibroMet 2, observada na Figura 7.

Figura 7 – Politriz BUEHLER VibroMet 2



Fonte: Autoria própria

Após o polimento na politriz BUEHLER VibroMet 2, as amostras foram analisadas no microscópio ótico quanto à análise de riscos. Após observado algumas inconsistências, as quais foram levadas, novamente, para o processo de polimento observado na Figura 8.

Figura 8 - Processo de polimento

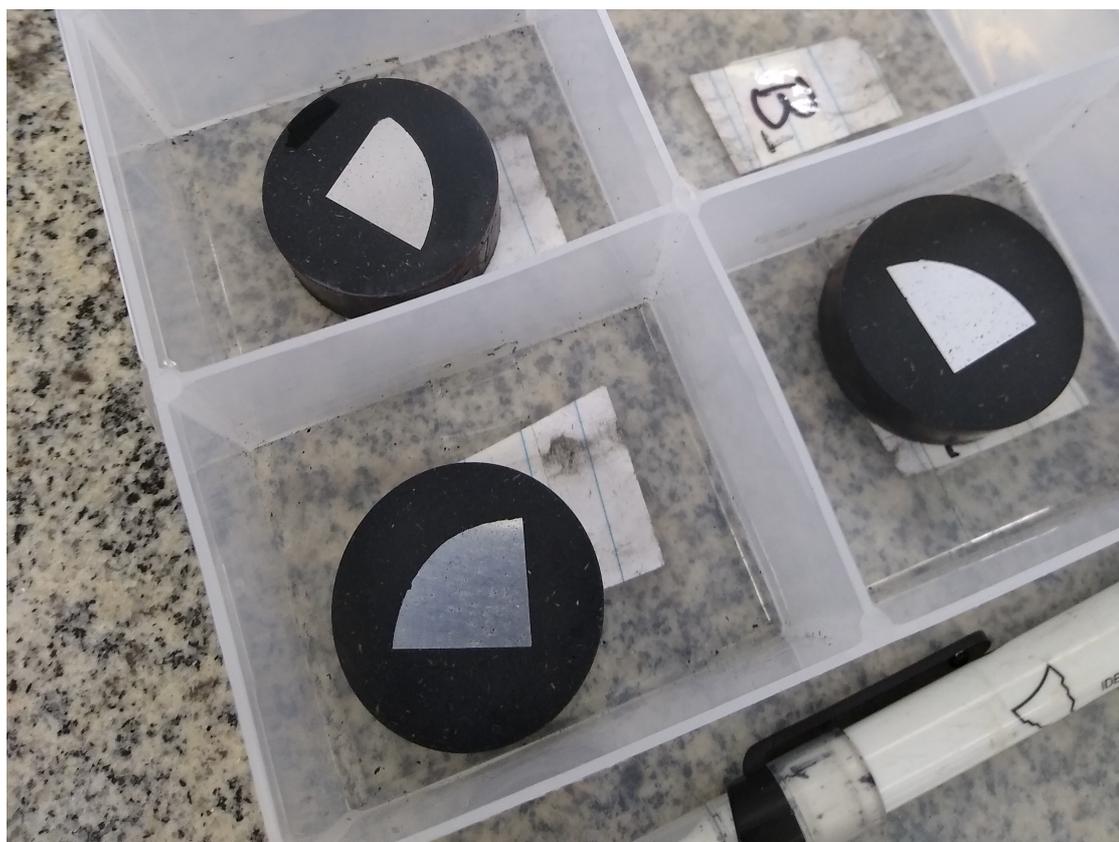
Fonte: Autoria Própria

Após essa etapa, as amostras foram dispostas em um equipamento de suspensão de impurezas por ultrassom, com a finalidade de eliminar o restante que ficou do processo da politriz, conforme observado na Figura 9.

Figura 9 – Equipamento de suspensão de impurezas

Fonte: Autoria Própria

Por fim, as amostras foram separadas e limpas em água corrente e, após, se fez uso de álcool etílico para o processo de secagem.

Figura 10 – Amostras preparadas

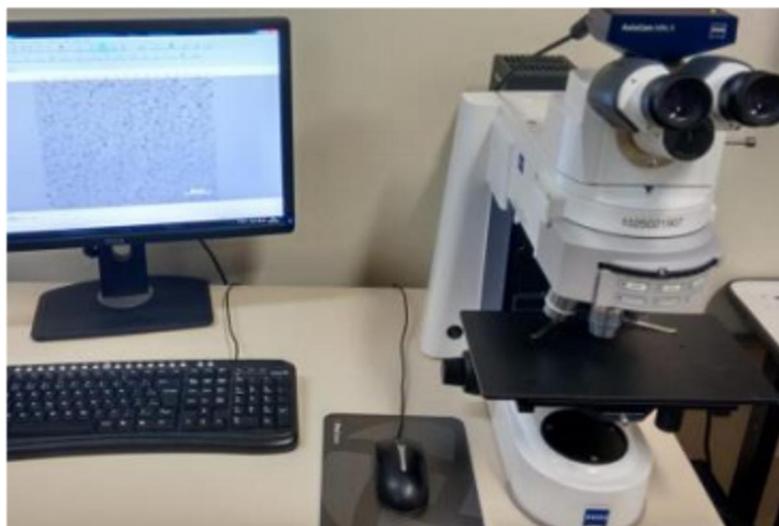
Fonte: Autoria Própria

3.4 Análises metalográficas por microscopia ótica (MO) e eletrônica de varredura (MEV)

Após concluir a etapa de preparação das amostras, elas foram levadas para a análise de microscopia ótica, que foi feita com o microscópio ZEISS de modelo Axiolmager A2m no laboratório de metalografia da UTFPR – PG, observado na Figura 11.

O intuito da análise foi estudar as características do material, como tamanho de grão e formato do grão, para comparação das amostras entre si e, entender qual o efeito da adição de refinadores de grão, em diferentes concentrações na liga de alumínio. Para tal, as fotos foram retratadas com um aumento de 100X e 200X.

Figura 11 – Microscópio ZEISS de modelo Axiolmager A2m



Fonte: Autoria Própria

Também foram obtidas imagens através do MEV (microscópio eletrônico de varredura) Tescan Vega3 com o intuito de identificar com precisão os microconstituintes presentes na liga de alumínio A332.

3.5 Tamanho da fase alfa

Após obter as imagens através do microscópio óptico foi realizado a medição do tamanho da fase α -Al das amostras através do método dos interceptos de Heyn que é regido pela norma ASTM E112.

Para determinar o tamanho médio da fase α -Al foram traçadas linhas retas de comprimento 3 vezes a escala das imagens e obedecendo os ângulos de 0° , 45° e 90° sobre a imagem.

Foram realizadas medições de 3 imagens por amostra e 8 medições triplas por imagem, totalizando em 72 medições aleatórias por amostra.

3.6 Ensaio de microdureza

Segundo Garcia, o ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica e se utiliza de penetradores de diamante e cargas menores que 9,8 N (1 kgf). Os métodos mais utilizados são a microdureza Vickers e a microdureza Knoop

(ASTM E384:2008). O ensaio de microdureza que consiste em determinar em pequenas áreas e de forma pontual a dureza do material, foi realizado a fim de determinar a microdureza das quatro amostras e compará-la.

Porém para que seja possível realizar o ensaio, é necessária uma série de procedimentos, tais como lixamento e polimento, a fim de deixar a superfície paralela e espelhada, para que seja possível a visualização da endentação no microdurômetro.

Depois de concluir a análise metalográfica, foi realizado o ensaio de microdureza utilizando o microdurômetro SHIMADZU HMV-G20ST do laboratório de preparação metalográfica da UTFPR – PG. Foram feitas 10 medições com 100gf durante 15s por amostra, totalizando 40 medições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, se apresentam e analisam os principais resultados obtidos no desenvolvimento experimental e, sua disposição, se dá forma em 4 subcapítulos.

O primeiro subcapítulo é apresentado os resultados das análises química realizados via espectrometria de emissão ótica, determinando o peso dos principais elementos químicos das amostras de acordo com as condições de processamento do presente trabalho. Também se apresentam os resultados das análises metalográficas utilizando o microscópio ótico (MO), demonstrando os tipos de fases e a morfologia da microestrutura apresentada para os diferentes tipos de refinadores.

O segundo, dedicado aos resultados obtidos no microscópio eletrônico de varredura (MEV) nas diferentes amostras, para um aumento de 100X e 200X. Também neste subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos através das análises de espectroscopia de raios X por energia dispersiva (EDS), que permite analisar e caracterizar as informações elementares das fases presentes no material.

O terceiro subcapitulo apresenta os resultados encontrados na medição do tamanho da fase alfa das amostras através do método dos interceptos.

O quarto e último subcapítulo são apresentados os valores médios obtidos na análise de microdureza de seção transversal, em cada uma das amostras utilizadas no desenvolvimento experimentam.

4.1 Resultados das análises química e microestrutural

Com o objetivo de avaliar a influência dos diferentes tipos de refinadores na composição química e conseqüentemente na microestrutura da liga A332 com as condições presentes neste trabalho, realizou-se inicialmente a caracterização química do material, para analisar a influência do processo de fundição na composição final das ligas.

Como já foi explicado neste trabalho foram utilizados, 4 diferentes condições de processamento por fundição, a primeira sem a presença de qualquer refinador (Ti e B), e outras variando as concentrações dos refinadores, disposto na segunda condição com a proporção de 3% de Ti e 1% de B, na terceira com 5% de Ti e 2% de B e, na quarta com 5% de Ti e 1% de B. Todas as condições apresentaram a presença do modificador de estrôncio (Sr) na proporção de 5 ppm.

Após o processo de vazamento dos lingotes de A332, pequenas amostras foram cortadas de cada condição e conduzidas para a análise química via espectrometria de emissão ótica. Cada amostra foi submetida ao mesmo processo quatro vezes e os dados estão dispostos a seguir baseados nas médias obtidas. Na Tabela 3, se observam os resultados das análises químicas, do material da liga A332, após o processo de fundição nas condições, já descritas.

Tabela 3 – Composição Química da Liga A332

Amostras	Cu %	Si %	Mg %	Zn %	Fe %	Mn %	Ni %	Ti %	Cr %	Sn %	Pb %	V %	P %	Ca %	Allnt %	Al %
A	2,56	8,74	0,33	1,11	1,13	0,28	0,10	0,22	0,09	0,14	0,35	0	0	0,03	1,97	85
B	2,71	8,58	0,31	1,08	1,08	0,57	0,10	0,69	0,03	0,26	0	0,01	0,03	0,08	0,69	84,47
C	2,27	8,40	0,25	0,98	1,05	0,63	0,08	0,65	0,02	0,22	0	0,01	0,02	0,08	0,59	85,34
D	2,50	8,37	0,31	1,01	0,97	0,16	0,08	0,59	0,02	0,03	0,70	0,01	0	0	4,17	85,88

Fonte: Autoria Própria

Nota-se na Tabela 3, que essa liga, para as diferentes concentrações de modificadores, apresentou valores similares de composição química. Se destacam elementos importantes na liga, como Si, Cu, Fe e Mg da liga, este último pelo efeito favorável nas propriedades como maior resistência à corrosão e na soldabilidade do material.

Embora o espectrômetro de emissão ótica não comprovasse as concentrações químicas do elemento estrôncio (Sr) adicionadas nas amostras, provavelmente pela baixa concentração (250 ppm), vale ressaltar que sua adição em ligas de alumínio tem como objetivo inibir a nucleação da fase eutética do silício (Al-Si), diminuindo a espessura da fase na microestrutura.

Em comparativo, outro dado importante são os teores de fósforo (P), pois afetam diretamente o crescimento do silício eutético e a eficácia do modificador de estrôncio.

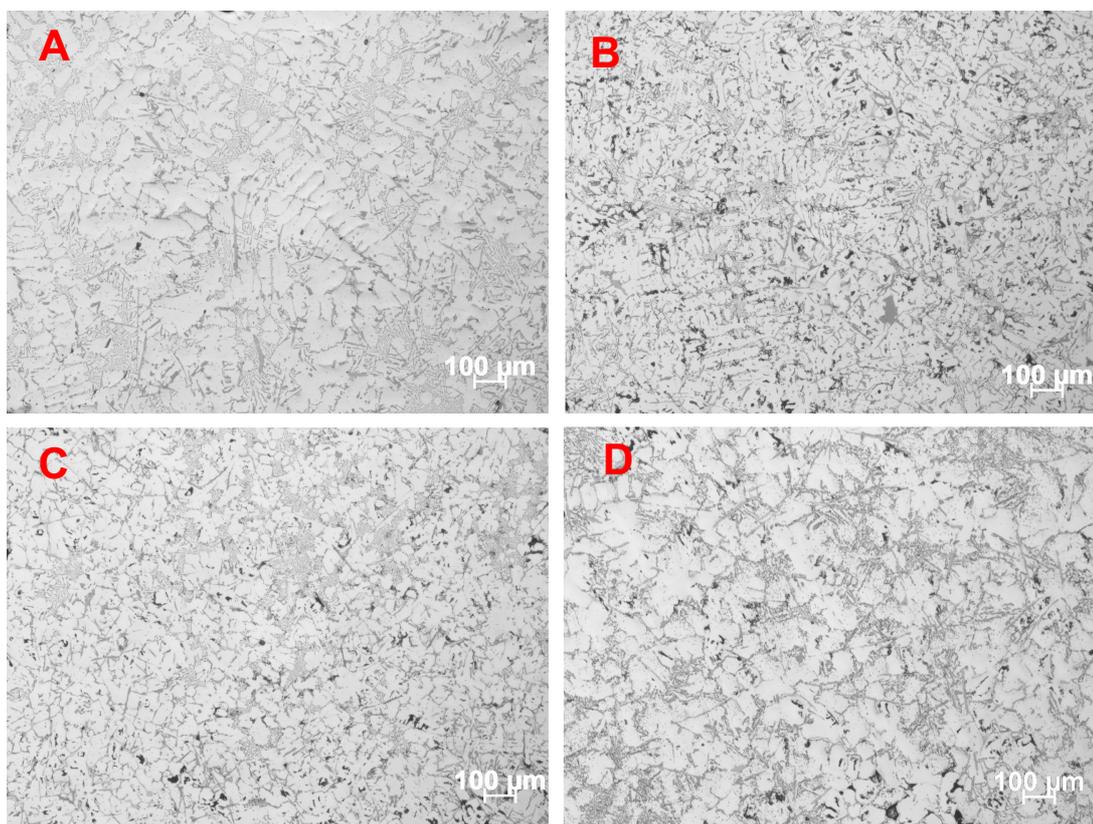
Por outro lado, se constata a presença do Zn, em valores elevados, típico de ligas recicladas.

Uma vez realizado as análises químicas por espectrometria de emissão ótica, as ligas foram submetidas a uma análise metalográfica por MO, conforme a metodologia do Capítulo 3 METODOLOGIA.

As imagens obtidas permitem comprovar a influência dos refinadores e/ou modificador em diferenças concentrações e sua influência nas microestruturas formadas.

As imagens obtidas através do microscópio ótico ZEISS de modelo AxioImager A2m, com aumento de 100X, podem ser visualizadas na figura 12.

Figura 12 – Imagens das metalografias das amostras fundidas com aumento de 100X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C – A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)



Fonte: Autoria própria

Na figura 12, é possível constatar em todas as amostras a microestrutura típica de fusão, resultado do processo de solidificação da liga A332, com baixo percentual de poros.

Na Figura 12(A), se observa a microestrutura do material na condição que foi vazada sem o uso dos refinadores e se constata uma estrutura com grandes braços tipicamente dendríticos. Nas Figuras 12(B, C e D), se verifica que como resultado do uso dos refinadores, ocorreu o esperado refinamento da microestrutura, mas de forma parcial. Na Figura 12(B), é evidente que existem algumas dendritas, mas de menor tamanho, e uma fase α -Al de menor tamanho.

Na Figura 12(C), se mostra a imagem por MO da microestrutura da liga A332 refinada com 5% de Ti e 2% de B. Pode ser constatado que existe uma estrutura de fusão aparentemente com um refinamento mais completo, sem presença de dendritas evidentes e a fase α -Al, mais fina e equiaxial. Por outro lado, as amostras refinadas com 5% de Ti e 1% de B (Figura 12D), mostraram uma microestrutura também refinada sem presença de dendritas, mas se constatou glóbulos maiores da fase α -Al.

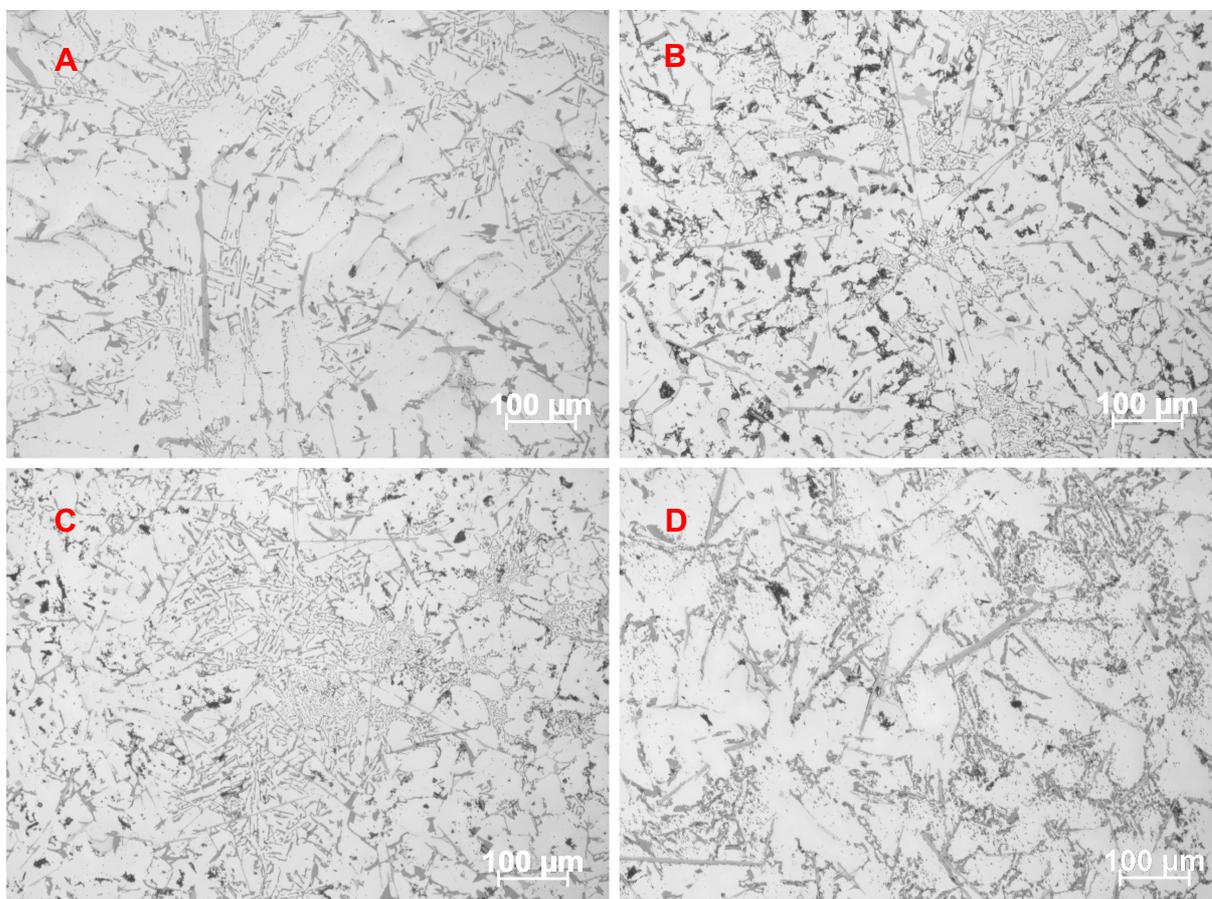
Em sentido geral, a microestrutura em todas as condições esta composta principalmente por alta concentração da fase α -Al com diferentes formas e tamanhos, acompanhada a fase eutética de Al-Si, que se forma adjacente às estruturas dendríticas de Al-primário, também variando a espessura e tamanho. Por esta causa, em muitas regiões não é possível diferenciar com clareza as estruturas de α -Al, segundo Ferreira [3]. Também foram constatadas fases em formatos aciculares de tonalidade mais clara, provavelmente do intermetálico Fe- β (Al₅FeSi).

Nas Figura 12(A) e 12(D) podemos notar que maior presença de Si em forma de placas, de tons mais escuros.

Na figura 13 se mostram imagens de MO com ampliação de 200x, da microestrutura da liga A332, nas condições de processamento deste trabalho.

Nesse caso, podemos confirmar na figura 13(B), dendritas refinadas em contraste com a figura 13(A) que não apresenta refinador, indicando o papel do Titânio (Ti) em conjunto com o Boro (B) na mudança microestrutural. Na figura 13(C) é possível constatar o maior refino de grão dentre as imagens apresentadas e uma morfologia distinta com maiores quantidades eutético Al-Si. Também se constata que a presença e o tamanho das estruturas aciculares de Fe- β são menores em relação à microestrutura mostrada na figura 13(D), que apresenta a maior quantidade dessa fase intermetálica, mas com maior relação de aspecto, ou seja, maior espessura.

Figura 13 – Imagens das metalografias das amostras fundidas com aumento de 200X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C – A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)



Fonte: Autoria Própria

4.2 Análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

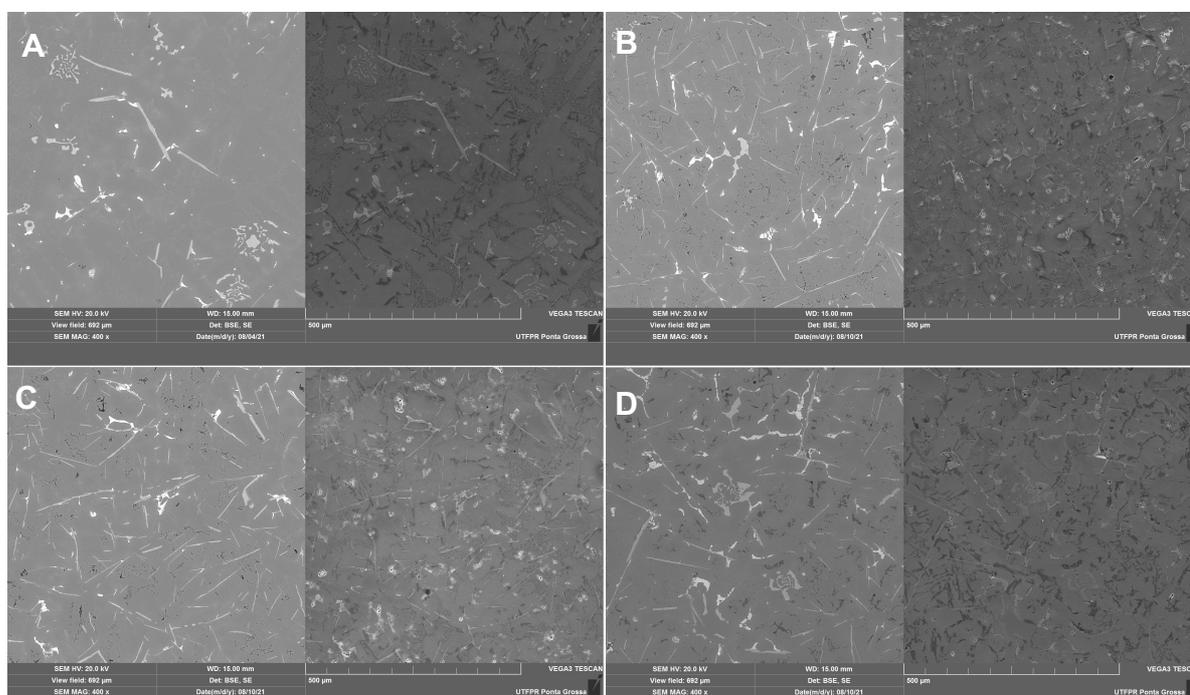
Com o intuito de aprofundar na caracterização e análise microestrutural das amostras da liga A332, visando o efeito do refinador, foi utilizada a técnica de microscopia eletrônica varredura (MEV), e ainda análises químicas por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) de algumas regiões da seção transversal.

Na Figura 14 se observam imagens MEV de elétrons secundários (SE) e elétrons retro espalhados (BSE) que possibilitam caracterizar as fases e constituintes da liga fundida A332, em todas as condições de processamento.

Conforme a Figura 14(A), é possível observar fases intermetálicas ricas em Fe, como estruturas aciculares da fase Fe- β , assim como, a fase intermetálica de Fe- α (Al₈Fe₂Si), reconhecida na literatura como “*escrita chinesa*” pela morfologia

apresentada. Esta fase não é desejável nas ligas de alumínio, porque aumenta a fragilidade do material. Já na imagem obtida pela técnica BSD, se constata a fase eutética do silício (Al-Si) bem refinada, uma vez que a amostra (A) não contém presença do fósforo, principal contribuinte para a inibição da nucleação dessa fase. Ao lado da fase eutética de Al-Si e das estruturas de Fe- β é possível notar fases mais claras e arredondadas, que, segundo Saklakoglu (2014) podem indicar as fases intermetálicas de θ -Al/Cu.

Figura 14 – Imagens do MEV para as amostras fundidas com aumento de 200X e 5ppm de Sr (A – A332 sem refinadores / B – A332 com 3% de Ti e 1% de B / C- A332 com 5% de Ti e 2% de B / D – A332 com 5% de Ti e 1% de B)



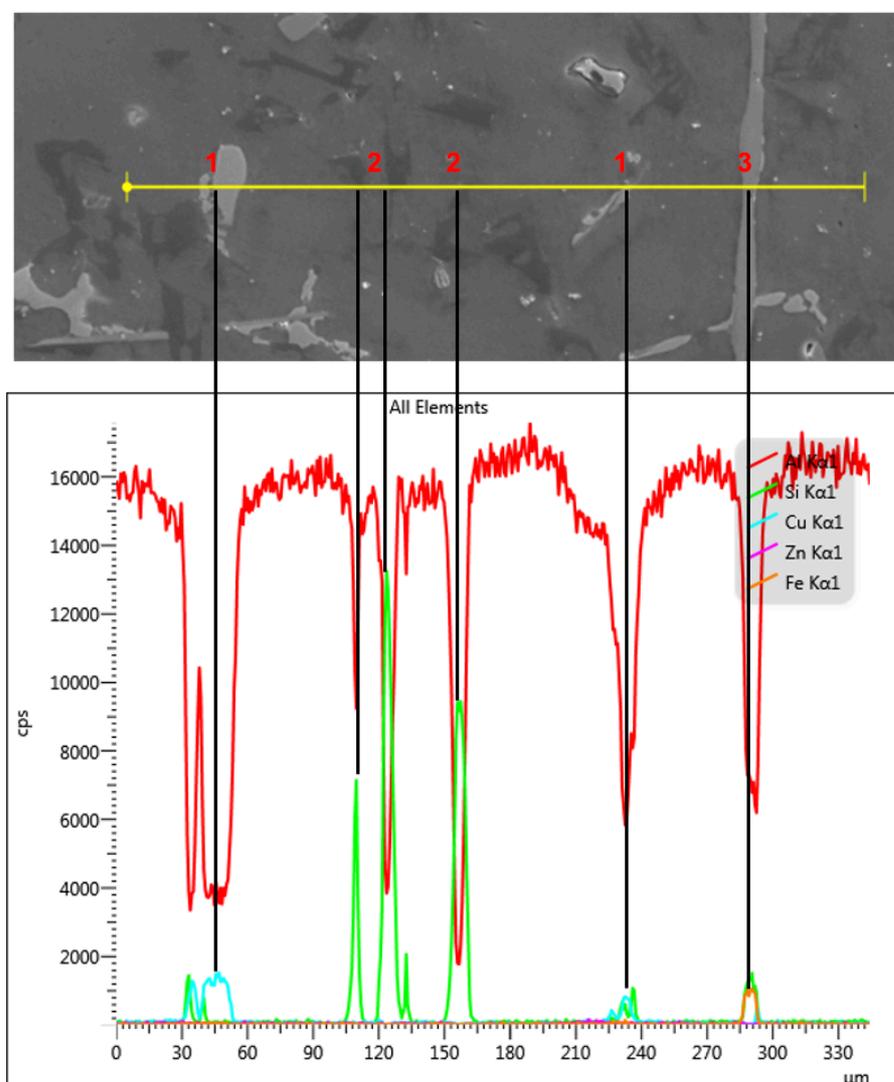
Fonte: Autoria Própria

Na Figura 14(B) pode-se notar que as estruturas de Fe- β apresentam uma estrutura fina e acicular, demonstrando a influência dos refinadores de Ti e B na morfologia final da amostra. As Figura 14(C e D), apresentam estruturas aciculares de Fe- β em maiores quantidades e de caráter mais refinado, indicando que o aumento percentual dos refinadores nas amostras contribuiu para a formação dessa fase. Além disso, é possível notar uma maior formação de estruturas de coloração mais escura que podem indicar placas de silício eutético.

A seguir são apresentadas as análises das fases presentes nas secções transversais das amostras fundidas com diferentes níveis de refinadores, através da técnica de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) por análises em forma de linha (*Line scan*).

Na Figura 15 pode observar-se fases intermetálicas de θ -Al/Cu (1), fase eutética do silício (Al-Si) (2) e o que pode ser uma estrutura acicular da fase Fe- β (3), corroborando com o que foi encontrado na Figura 14(A).

Figura 15 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra A (A332 sem refinador e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.

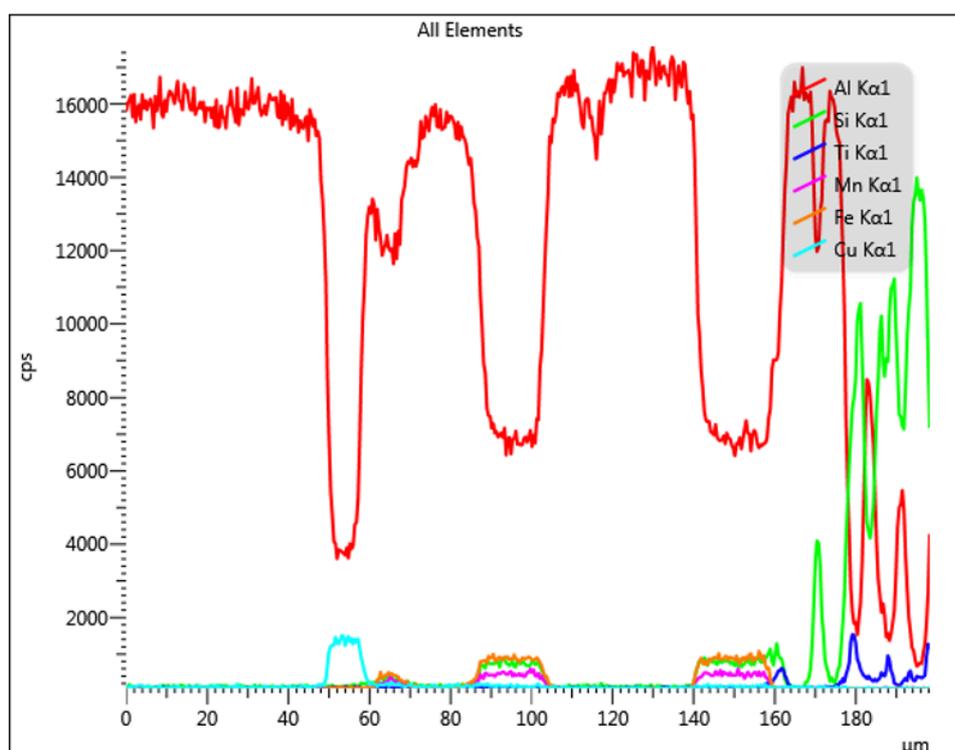
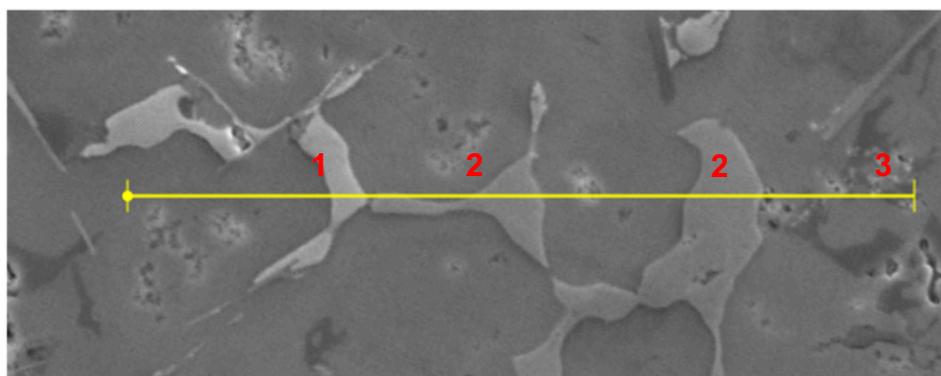


Fonte: Autoria Própria

Na Figura 16, observam-se fases intermetálicas de θ -Al/Cu (1) com uma coloração cinza mais claro e em seguida observamos parte de uma fase intermetálica

Fe- α (Al₈Fe₂Si) (2) apresentando uma estrutura que aparenta ser de escrita chinesa, também observamos num tom mais escuro o que possivelmente seja uma fase eutética do silício (3).

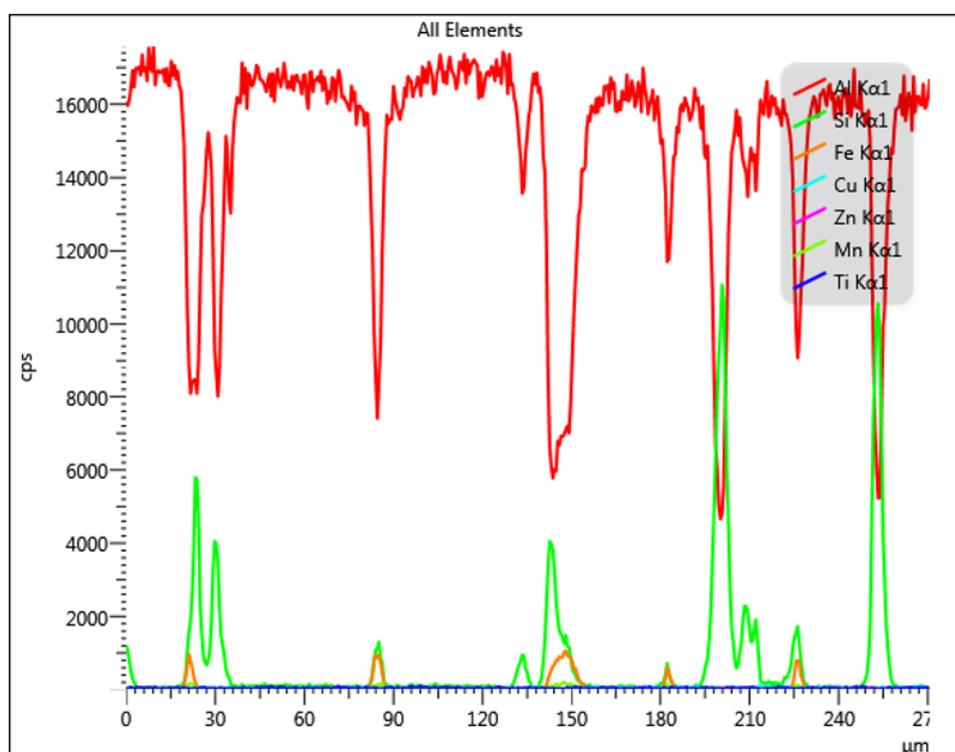
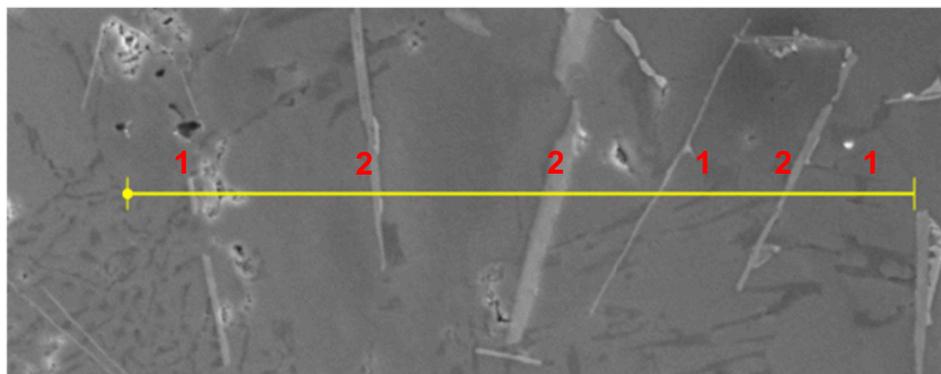
Figura 16 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra B (A332 com 3% de Ti e 1% de B e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 17, observa-se num tom de cinza escuro as formações de silício eutético (1), como constato no item 4.1, também podemos observar as formações aciculares de Fe- β , bastante presente na amostra C.

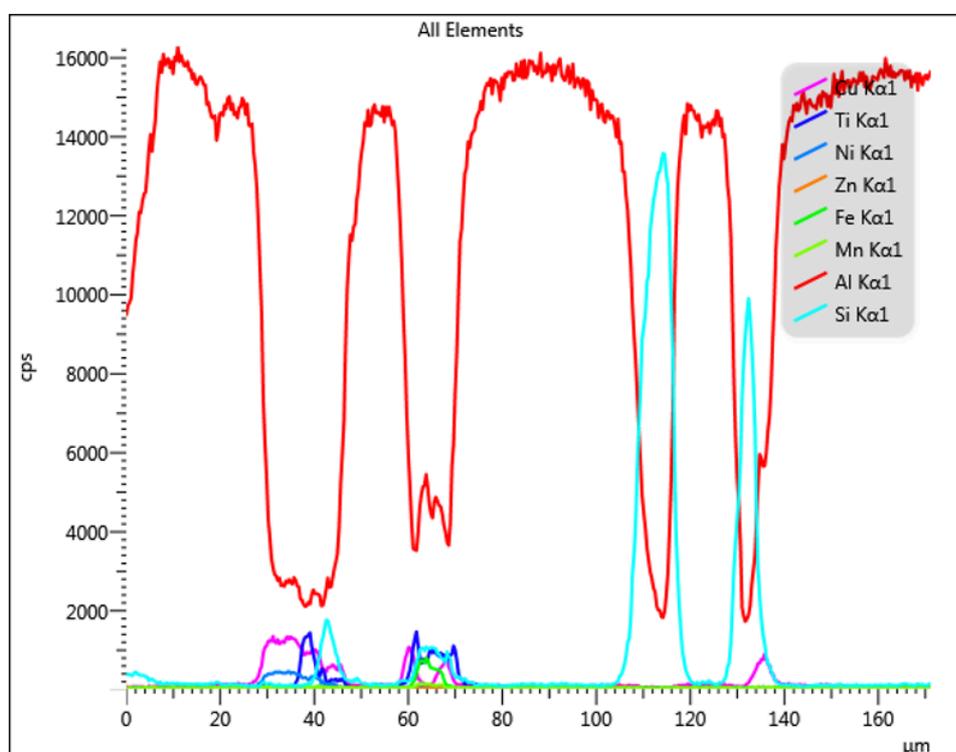
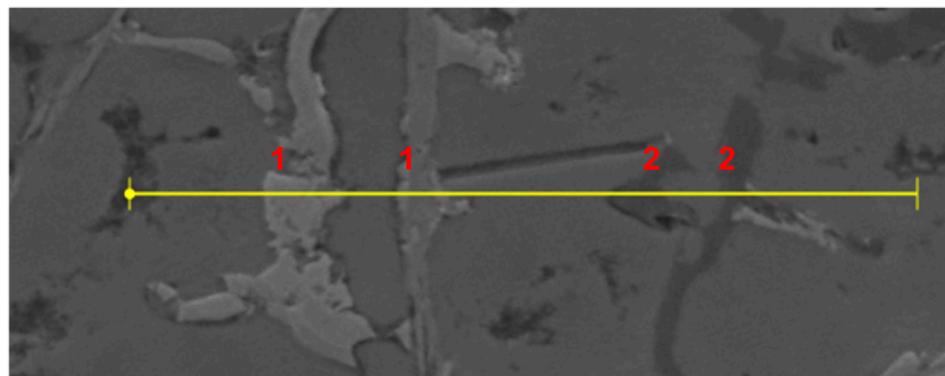
Figura 17 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra C(A332 com 5% de Ti e 2% de B e 5ppm de Sr) com aumento de 200x.



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 18, pode ser observado com uma coloração mais claro o que supostamente pode ser intermetálico de θ -Al/Cu (1), conjuntamente com parte do intermetálico de Fe- α ($\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$) e numa coloração escura o que pode ser placas de silício eutético.

Figura 18 – Imagem da espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da amostra D(A332 com 5% de Ti e 1% de B) com aumento de 200x.



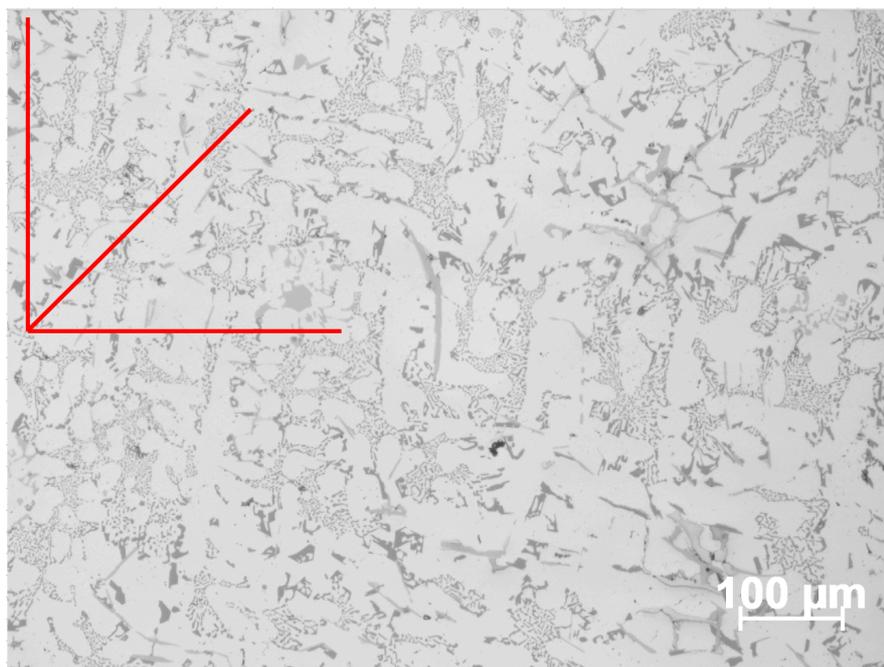
Fonte: Autoria Própria

4.3 Influência do tipo de refinador no tamanho da fase α -Al

Com a finalidade de entender se houve influência dos refinadores e modificador no tamanho da fase α -Al, realizou-se a contagem da fase através do método dos interceptos como descrito no item 3.5.

Na Figura 19 é possível observar um exemplo das linhas traçadas para realizar a contagem.

Figura 19 – Exemplo das linhas traçadas sobre a imagem da amostra A.



Fonte: Autoria Própria

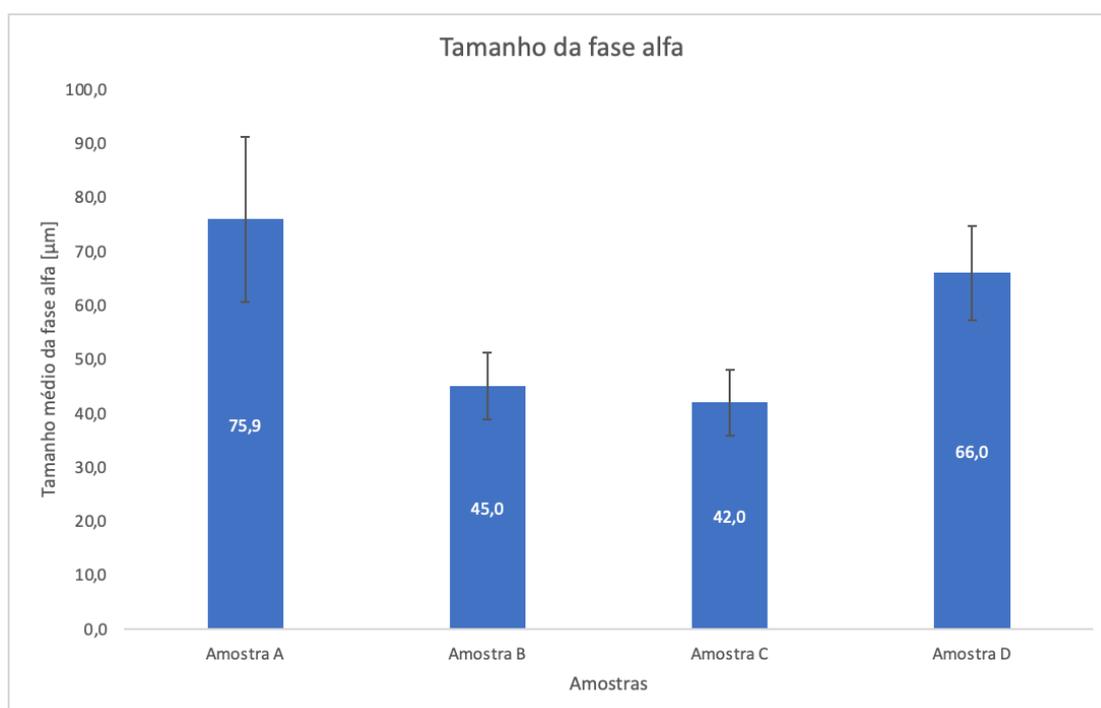
Na Tabela 4 demonstra os valores medidos de fase alfa para cada uma das amostras.

Tabela 4 – Resultado da contagem do tamanho da fase alfa.

	Amostra A		Amostra B		Amostra C		Amostra D	
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Centro	77,5	17,0	46,0	6,9	45,2	6,6	64,9	11,6
Direita	76,5	13,3	43,4	6,6	48,0	5,3	65,7	4,3
Esquerda	73,8	15,4	45,7	5,2	32,8	6,2	67,6	10,3
Média	75,9	15,2	45,0	6,2	42,0	6,0	66,0	8,7

Fonte: Autoria Própria

Com o intuito de tornar os resultados mais visuais, um gráfico comparativo dos resultados segue na Figura 20.

Figura 20 – Resultado da contagem do tamanho da fase α -Al

Fonte: Autoria Própria

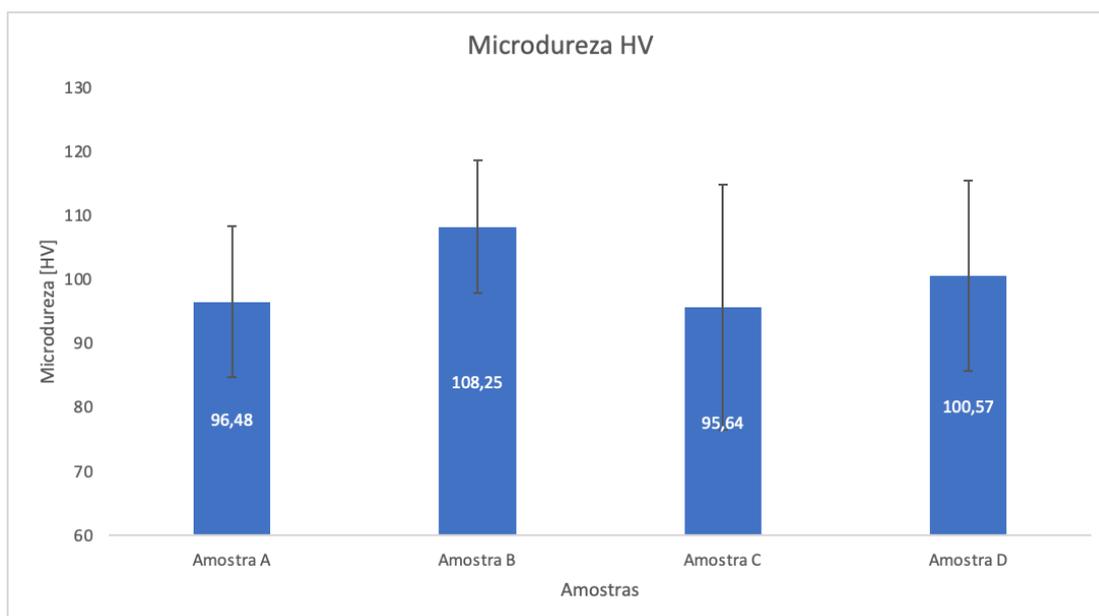
Nota-se que nas amostras A e D observa-se um tamanho de fase α -Al maior que nas amostras B e C, esse resultado confirma o que foi apresentado no item 4.1, onde as amostras A e D apresentam a fase eutética do silício reduzida tornando a fase α -Al maior.

Como citado no item 4.1 o crescimento e nucleação do Al-eutético ocorre adjacente às estruturas dendríticas de Al-primário, com isso se torna difícil diferenciar a fase α -Al, podendo ser uma justificativa para um desvio padrão relativamente alto na amostra A.

4.4 Resultados do ensaio de microdureza

Foram realizados ensaios de microdureza com carga de 100gf por 15s nos materiais fundidos e refinados.

Os resultados são apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Resultado do ensaio de microdureza HV.

Fonte: Autoria Própria

Os valores de microdureza apresentam uma pequena variação, porém a amostra B que também apresentou um tamanho de fase α -Al menor, resultado da adição de refinadores e modificador, também apresentou um aumento na microdureza, corroborando assim com o que já era esperado na literatura apresentada no trabalho de Arendarchuck; *et al* (2021).

Em contrapartida a amostra C, que também apresentou uma fase α -Al menor em comparação as outras, não apresenta uma variação de microdureza em relação à amostra A que não possui refinador, mas possui um desvio padrão maior que as outras amostras, podendo significar que existem outros fatores influenciando no resultado, como o indentador de diamante ter sido posicionado sobre as fases intermetálicas de Fe- β , que possui uma microdureza superior a do alumínio.

A amostra D também corrobora com o que é esperado na literatura, um aumento da microdureza e diminuição do tamanho da fase α -Al em decorrência da utilização de refinadores e modificador.

5 CONCLUSÕES

As principais conclusões do trabalho são:

- Todos os refinadores usados neste trabalho (3Ti1B, 5Ti2B e 5Ti1B) mostraram efeito positivo no refinamento da fase α -Al presente na microestrutura de ligas A332 fundidas.
- Dependendo do uso e concentração do refinador, foram observadas e constatadas diversas fases com tamanhos e morfologias variáveis na liga A332 como fundida e refinada. As principais fases foram: Al- α , eutético de Al-Si, fase intermetálica θ -Al/Cu e intermetálicos Fe- β . Na liga A332 fundida e sem refino, comprovou-se ainda, a formação da fase intermetálica frágil Fe- α (Al₈Fe₂Si).
- A contagem de tamanho de fase α -Al, através do método dos interceptos de Heyn (ASTM E112) possibilitou corroborar o efeito do refinamento da fase Al- α .
- O material refinado com 5Ti2B (amostra C), apresentou os melhores resultados de refinamento da fase α -Al, e ainda o eutectico Al-Si mais refinado e evidencias de uma diminuição do tamanho das agulhas da fase Fe- β . Esta fase intermetálica e em forma acicular fina possui grande importância porque pode ser concentradora de tensões e aumentar a fragilização do material.
- Os valores médios de microdureza apresentam pequenas diferenças, no entanto se observa tendência de que a liga refinada com 3Ti1B (amostra B) mostrou o maior aumento na microdureza. O material nesta condição, também apresentou alto refinamento da fase α -Al e ainda grande quantidade de agulhas da fase Fe- β .
- As baixas diferenças dos valores de microdureza estão condicionados aos altos valores de desvios padrões apresentados. Nesse sentido, deve ser considerado que as medições de microdureza foram realizadas na seção transversal das amostras, que mostraram uma microestrutura heterogênea, composta por intermetálicos de cobre e ferro, duros, e uma matriz dúctil de α -Al.

REFERÊNCIAS

ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Características físico-químicas. 1. ed. São Paulo, 2006. ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Tratamento Térmico. 1. ed. São Paulo, 2003.

ABAL (Associação Brasileira do Alumínio). Características físico-químicas. 1. ed. São Paulo, 2006.

ARENDARCHUCK, B. E; DE CAMPOS, J. R.; LOURENÇATO, L. A.; FALS, H. D. C. **Obtenção de compósitos das ligas de alumínio A380 e A332 reforçadas com NBC e Cr₂C₃ pelo método StirCasting**. Em: A Engenharia Mecânica na UTFPR – Volume 3, 2021, p. 62.

BAPTÍSTA, André Luís de Brito; SOARES, Ângelo Rosestolato; NASCIMENTO, Ivaldo Assis do. **O Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade**. Disponível em: . Acesso em: 20 ago. 2007

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

DAVIS, J.R. **Alloying: Understanding the basics**. In: Casting. ASM International, 2001, pp.351-416.

FERREIRA, J. P. G. **Estudo microestrutural e reológico da liga reciclada de alumínio A380 modificada pela adição de estrôncio**. 106 f. Dissertação - Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

FURLAN, T. F. **Influência do teor de estrôncio na modificação da liga A356**. 215 f. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaios dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GUIMARÃES, B. L.; DE ARRUDA, E. J.; LOURENÇATO, L.A. **Análise da microestrutura e da dureza da liga de alumínio A. 380 sob diferentes teores de estrôncio.** Em: Engenharia no Século XXI Volume 5, p. 47.

KEARNEY, A.; ROOY, E.L. **Aluminum Foundry Products.**In: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v.2, ASM Handbook Committee, ASM International, 1992. p. 123-151.

QUADRO, A.L.; SABARIZ, A.L.R. **Refino de grão de ligas alumínio-silício com ante ligas Al-B.** Em: Revista Matéria, 2016 pp. 807-816.