

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

VICTOR HUGO KUMMER TRICHEZ

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO EM LIGA DE ALUMÍNIO PARA
COMPONENTES INJETADOS DE MOTORES ELÉTRICOS**

Florianópolis

2022

VICTOR HUGO KUMMER TRICHEZ

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO EM LIGA DE ALUMÍNIO PARA COMPONENTES INJETADOS DE MOTORES ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Área de concentração: Metalurgia

Orientadora: MSc. Kátia Elisa de Castro

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Trichez, Victor Hugo
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO EM LIGA DE ALUMÍNIO PARA
COMPONENTES INJETADOS DE MOTORES ELÉTRICOS / Victor Hugo
Trichez ; orientadora, Kátia Elisa de Castro, 2022.
66 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Alumínio. 3. Nióbio. 4.
Injeção. I. de Castro, Kátia Elisa. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de
Materiais. III. Título.

VICTOR HUGO KUMMER TRICHEZ

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NIÓBIO EM LIGA DE ALUMÍNIO PARA COMPONENTES INJETADOS DE MOTORES ELÉTRICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo curso de Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 19 de dezembro de 2022

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora

Kátia Elisa de Castro, MSc.
Orientadora

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Daniel Schmitz, MSc.
WEG Equipamentos Elétricos

Florianópolis, 2022.

“Success occurs when opportunity meets preparation.”

(Zig Ziglar)

Agradecimentos

À Universidade Federal de Santa Catarina e todos os colaboradores envolvidos de forma direta e indiretamente na difusão do conhecimento na forma de um ensino gratuito e de qualidade.

Agradeço à WEG Equipamentos Elétricos primeiramente, pela oportunidade de estágio aos graduandos do curso de Engenharia de Materiais, e também por absorver os recém graduados, fornecendo a oportunidade de entrada no mercado de trabalho com estrutura de ponta e infinitas possibilidades de segmento da carreira profissional.

À minha orientadora e gestora na WEG, Kátia Elisa de Castro, pela confiança, atenção e ensinamentos durante toda esta trajetória.

À toda a equipe de Tecnologia de Materiais do departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto por todo o suporte.

A todos os colaboradores WEG que tive algum contato, que não hesitaram em ajudar quando necessário.

Agradeço, em especial, à minha família e namorada por todo o incentivo.

RESUMO

A baixa densidade, resistência à oxidação, aspecto visual, assim como suas propriedades térmicas e elétricas justificam o uso do alumínio em diversos segmentos da indústria nos dias atuais. A substituição de materiais como ferro fundido e aço pelo alumínio é cada vez mais comum em componentes para motores elétricos. Desde pequenas partes em componentes de controle e automação, até as carcaças fundidas dos motores já são fabricadas com este material. Outro metal muito versátil, porém relativamente pouco explorado em relação à aplicação industrial, é o nióbio. O nióbio é visto como uma alternativa promissora para diversas linhas de tecnologia, com mais de 90% das reservas mundiais de nióbio, empresas e institutos de pesquisa no Brasil estudam a aplicação deste minério na cadeia produtiva a fim de obter melhores propriedades em ligas ou até ganhos de processo com menor quantidade de resíduos gerados e maiores taxas de aproveitamento de material. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a avaliação do impacto do nióbio como refinador de grão em uma liga de alumínio injetada para fabricação de um componente do motor elétrico. O principal requisito para a aplicação deste componente é a condutividade elétrica final na peça. A partir da entrega de uma condutividade aceitável para o projeto do motor, foram avaliados possíveis ganhos no processo a partir de peças com menores quantidades de defeitos. A metodologia adotada para os testes se baseou no processo de produção padrão do componente, via fundição sob pressão (injeção) da liga utilizada pela WEG. O comparativo foi realizado com duas alternativas de percentual de nióbio adicionados à esta liga, totalizando 0,05% e 0,075% de massa de nióbio no componente. Posteriormente à fabricação dos componentes, análises de fluidez, percentual de nióbio solubilizado na liga, condutividade elétrica, densidade, metalografia, dureza e microscopia eletrônica de varredura foram conduzidas para as três condições da liga (liga atual como referência em comparativo com as duas condições de adição do nióbio). Ao fim das análises, todas as amostras testadas satisfazem a condição necessária de condutividade elétrica para o componente. A partir das análises por imagem, e da densidade das peças, foi possível constatar indícios de refino da estrutura, porém não de maneira expressiva para justificar as adições de nióbio. Não foi possível avaliar os corpos de prova de fluidez devido à variação no vazamento dos moldes após preparação das ligas. Há indícios de precipitação do nióbio para o percentual de adição de 0,075%, o que pode prejudicar o mecanismo de refino da microestrutura assim como a melhora na fluidez e na densidade.

Palavras-chave: Liga de alumínio; Nióbio; Injeção; Refino de grão; Condutividade elétrica.

ABSTRACT

Aluminum is one of the most commonly used metals nowadays due to its low density, high oxidation resistance, visual aspect and good thermal and electrical conductivity. The substitution of materials like cast iron and steel by aluminum in electric machines is getting more frequent. Small components of automation and control systems and cast motor frames are already been manufactured in aluminum. Another material that is known to be versatile but relatively not explored in its full potential is the niobium. Niobium is known in the industry as a promising alternative for different applications. With more than 90% of the world reserves, companies and research institutes from Brazil study the application of this material on the production chain in order to improve the properties or even to achieve gains in the production process with less residue generation and a better performance in the alloy preparation. The present study has the objective to evaluate the impact of the niobium addition as grain refiner in an aluminum-based alloy for a component of an electric motor manufactured by die casting process. The main requirement for the application of the component is the electric conductivity. As this requirement is achieved, the gain in the process is evaluated by the analysis of the integrity of the components and if there is any presence of defects. The methodology adopted for the tests was based on the standard manufacturing process of the component, by die casting at WEG. The comparison was conducted with two conditions of niobium addition to the base alloy, 0,05% and 0,075% of weight percentage. After manufacturing the component, analysis of fluidity, weight percentage of niobium that was incorporated in the alloy, electric conductivity, density, metallography, hardness and scanning electron microscopy were conducted in order to compare the results in all the three conditions of the alloy (base alloy and with 0,05 and 0,075% of niobium addition, respectively). At the end of the tests, all samples reached the electric conductivity needed. With the image analysis and the density of the components, it was possible to verify signs of the grain refinement, but not expressive enough to justify the niobium addition. The samples of the fluidity test were not considered in the evaluation due to the variation in the temperature and time when pouring the molten alloy. There were signs of precipitation of the niobium in the 0,075% addition samples, that can damage the grain refining mechanism, the fluidity and the density of the samples.

Keywords: Aluminum alloy; Niobium; Die casting; Grain refinement; Electric conductivity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Tipos de motores elétricos.	19
Figura 2. Esquema representativo de um motor de indução trifásico.	20
Figura 3: Esquema de componentes do rotor gaiola de esquilo.	21
Figura 4. Gráfico Torque x Velocidade nas classes de motores 22	22
Figura 5. Comparativo do preço atual em tonelada de alumínio e cobre baseado no índice Dow Jones para commodities.	24
Figura 6. Corte transversal de um tarugo de mais de uma tonelada de nióbio puro polido.	26
Figura 7. Movimento do elétron (a) pela rede cristalina ideal, (b) pela rede cristalina sob elevada temperatura, e (c) pela rede cristalina contendo defeitos.	27
Figura 8. Gráfico da influência dos elementos em percentual de massa na condutividade do alumínio puro.	28
Figura 9. Diagrama predominante de Al para Al-X binário (percentual do soluto em “a” = 0,15%Ti ou 0,15%Nb e em “b” = 1,15%Ti ou 0,22%Nb.	31
Figura 10. Liga de nióbio para adição em forma de vergalhões.	32
Figura 11. Processo de adição do nióbio na panela de transferência.	33
Figura 12. Metodologia de avaliação adotada.	33
Figura 13. Procedimento para controle de processo e aferição de condutividade elétrica.	34
Figura 14. Modelo para análise de fluidez em fundição.	35
Figura 15. Máquina de jateamento por granalha de aço.	37
Figura 16. Corpos de prova após corte e jateamento.	37
Figura 17. Politriz rotativa para preparação metalográfica modelo PLF do fabricante Fortel.	38
Figura 18. Soluções para ataque químico utilizadas nas análises metalográficas. ...	38
Figura 19. Procedimento para ensaio de densidade.	39
Figura 20. Microscópio ótico Reichert Polyvar 2 do fabricante Leica 40	40
Figura 21. Ilustração da graduação de imagem para análise por método dos interceptos.	41
Figura 22. Equipamento para medição de condutividade elétrica.	42
Figura 23. Ilustração do procedimento de ensaio de dureza.	43
Figura 24. Durômetro Otto Wolpert.	44
Figura 25. Aplicação da carga nas amostras do presente estudo.	44
Figura 26. Microscópio eletrônico de varredura Tescan do fabricante Vega.	45
Figura 27. Exemplo de equipamento para avaliação de composição química via espectroscopia de emissão ótica.	46
Figura 28. Árvore de amostragem para condição das peças ensaiadas.	47
Figura 29. Corpo de prova de fluidez para a liga padrão 306M.	48
Figura 30. Corpos de prova de fluidez para a liga com adição de 0,05% de nióbio. 48	48
Figura 31. Corpos de prova de fluidez para a liga com adição de 0,075% de nióbio.	48
Figura 32. Imagens das amostras 1 e 2, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.	51
Figura 33. Imagens das amostras 3 e 4, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.	51

Figura 34. Imagens das amostras 5 e 6, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.	52
Figura 35. Porosidade nas amostras (a) Amostra 1 – 80X (b) Amostra 1 – 1000X (c) Amostra 6 – 500X.....	53
Figura 36. Estrutura dos grãos em amostras das 3 condições de teste.....	54
Figura 37. Análise via EDS da amostra 1- Sem ataque- Ampliação de 1760x.....	55
Figura 38. Amostra 1 -Indicativo de arrancamento com geometria regular– 5000X. 55	
Figura 39. Amostra 1- Sem ataque – 1000X.	56
Figura 40. Amostra 3- Ponto de análise 30– Sem ataque – 1000X.	56
Figura 41. Amostra 3- Ponto de análise 31– Sem ataque – 1000X	57
Figura 42. Amostra 5 – Sem ataque – 2000X	57
Figura 43. Amostra 5- Ponto 50 – Sem ataque – 7700X.....	58
Figura 44. Amostra 5- Ponto 52 – Sem ataque – 7700X.....	59
Figura 45. Amostra 5- BSE - Contraste moderado - 1000X	60
Figura 46. Amostra 5- BSE - Contraste elevado - 500X.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da liga SAE 306 segundo padrão SAE.	24
Tabela 2. Comparativo entre propriedades de cobre e alumínio puros.....	28
Tabela 3. Composição para preparação da liga.....	34
Tabela 4. Resultado das análises para percentual de nióbio.	49
Tabela 5. Resultados de densidade calculada.....	50
Tabela 6. Comparativo entre a variação de densidade nos extremos dos componentes.....	50
Tabela 7. Média de densidade por percentual de nióbio adicionado.	50
Tabela 8. Dados do ensaio de medição de tamanho médio de grão pelo método dos interceptos.....	52
Tabela 9. Tamanho médio de grão calculado para as condições de amostragem. .	52
Tabela 10. Dureza Brinell das amostras avaliadas.	61
Tabela 11. Condutividade elétrica das amostras avaliadas.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NEMA	National Electrical Manufacturers Association
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
SAE	Society of Automotive Engineers
ANSI	American National Standards Institute
Al	Alumínio
Nb	Nióbio
Ti	Titânio
Si	Silício
B	Boro
C	Carbono
H	Hidrogênio
F	Flúor
Cl	Cloro
Cu	Cobre
Et. Al	E outros
SI	Sistema Internacional de unidades
Ω.m	Ohm-metro
S/m	Siemens por metro
Al-α	Alumínio alfa
Wt %	<i>Weight percent</i> (fração mássica)
Ton	Tonelada
Kg	Quilograma
IACS	International Annealed Copper Standard
μm	Micrometro
mm	Milímetro
Ø	Diâmetro
°C	Graus Celsius
ASTM	American Society of Testing Methods
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
EDS	Análise de espectroscopia por energia dispersiva

BSE

Análise por elétrons retroespalhados

ICP-OES
acoplado

Espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente

HB

Hardness Brinell (Dureza Brinell)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	OBJETIVO.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1	MOTORES ELÉTRICOS.....	18
3.1.1	Motor elétrico de indução trifásico.....	19
3.2	PROCESSO DE FABRICAÇÃO - INJEÇÃO DE ALUMÍNIO.....	22
3.2.1	Ligas de alumínio para o componente do estudo.....	23
3.2.2	Elementos de liga.....	24
3.2.3	Nióbio.....	26
3.3	PROPRIEDADES.....	26
3.3.1	Resistividade.....	27
3.3.2	Fluidez.....	29
3.4	EFEITO DO NIÓBIO NAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	29
3.4.1	Comparativo Al-Ti e Al-Nb.....	30
3.4.2	Adição do nióbio.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	32
4.1	MATERIAIS.....	34
4.1.1	Produção dos componentes.....	34
4.1.2	Análise de fluidez.....	35
4.1.3	Montagem dos motores para testes de desempenho.....	36
4.1.4	Preparação dos componentes para análise de densidade.....	36
4.1.5	Preparação metalográfica.....	37
4.2	MÉTODOS.....	38
4.2.1	Avaliação de densidade.....	38
4.2.2	Análise por microscopia ótica.....	40
4.2.3	Condutividade elétrica.....	42
4.2.4	Ensaio de dureza Brinell.....	42
4.2.5	Análise via MEV/ EDS.....	45
4.2.6	Composição química via espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).....	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	ANÁLISE DE FLUIDEZ.....	47

5.2	PERCENTUAL DE NIÓBIO NA LIGA VIA ICP	49
5.3	ANÁLISE DE DENSIDADE	50
5.4	MICROSCOPIA ÓPTICA	51
5.5	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	53
5.5.1	Porosidades.....	53
5.5.2	Tamanho de grão	54
5.5.3	Matriz via EDS.....	54
5.5.4	Análise em modo BSE.....	59
5.6	ENSAIO DE DUREZA BRINELL.....	61
5.7	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....	61
6	CONCLUSÃO.....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais utilizados no mundo nos dias atuais. As características do alumínio permitem sua aplicação em diversas áreas da indústria. A baixa densidade, resistência à oxidação, aspecto visual, assim como suas propriedades térmicas e elétricas justificam a utilização do alumínio em aplicações como aeronáutica, naval e automobilística. Além de todas estas características, o alumínio pode ser reciclado de forma infinita, sem perder suas propriedades físico-químicas.

As ligas de alumínio utilizadas atualmente são provenientes da adição de elementos a uma matriz de alumínio, onde a principal função é o aumento da resistência mecânica. Com a necessidade de cada aplicação, elementos como silício, cobre, manganês, titânio, ente outros têm sido adicionados ao alumínio para atender outras propriedades específicas.

O nióbio é uma alternativa relativamente nova como elemento de liga no alumínio. Este metal de transição é conhecido por aumentar propriedades em materiais, tornando-os mais eficientes. Por conta disso, o nióbio é incorporado nos aços para construção civil, em componentes de aeronaves, em telescópios espaciais, foguetes, e vários outros.

Visto isto, no presente trabalho o objetivo é avaliar o impacto da utilização do nióbio como refinador de grão, a fim de obter melhores níveis de fluidez, propriedade muito importante no processo de injeção para garantir preenchimento de molde, redução de defeitos e maior rendimento da liga.

A partir de análises laboratoriais será possível comparar as propriedades obtidas em diferentes composições para o mesmo componente de alumínio fabricado pelo método de injeção.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente estudo é avaliar a adição do nióbio em uma liga de alumínio na fabricação de um componente injetado para motores elétricos, a fim de verificar possíveis vantagens de desempenho e processo.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos pretendem, de maneira quantitativa e qualitativa, comparar a liga padrão utilizada atualmente com dois proponentes percentuais de nióbio.

Espera-se um refino da microestrutura com a adição de nióbio, de forma quantidade-dependente, ou seja, atingindo o maior percentual ótimo de adição, uma microestrutura com grãos mais refinados deve ser encontrada. Consequências do refino da microestrutura são: maior fluidez, maior densidade do componente (proveniente do preenchimento do molde) e menor quantidade de defeitos no produto final.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

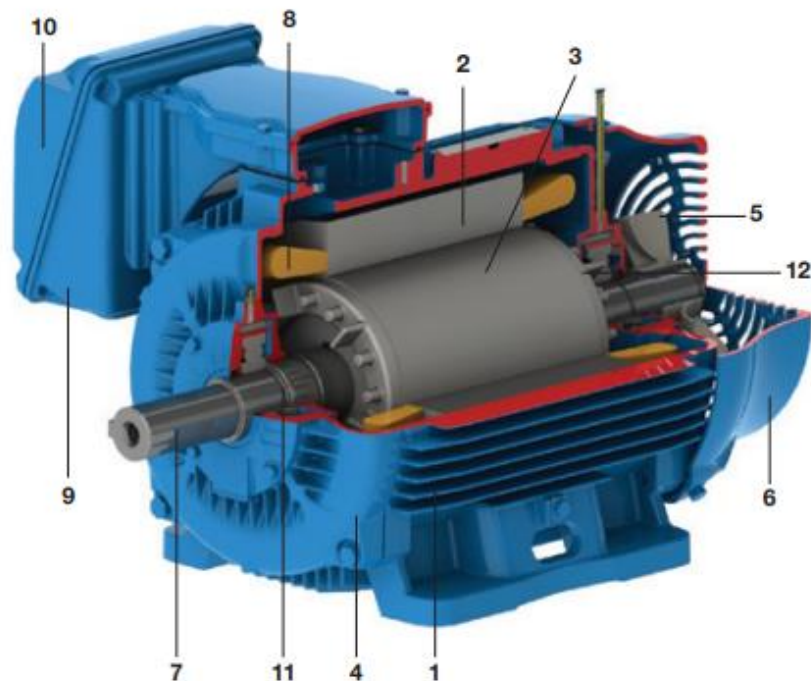
3.1 MOTORES ELÉTRICOS

Atualmente estima-se que aproximadamente metade do consumo de energia elétrica no mundo esteja ligado ao funcionamento de motores elétricos. [1]

Motor elétrico se trata de uma classe de dispositivos que converte energia elétrica em energia mecânica, usualmente a partir de um fenômeno eletromagnético.

A maioria dos motores elétricos desenvolve o seu torque mecânico a partir da interação dos condutores que possibilitam a passagem de corrente em uma direção formando ângulos retos com um campo magnético. Os tipos de motores elétricos se diferenciam pela maneira em que os condutores e o campo magnético estão dispostos assim como o controle em relação ao torque, velocidade e posição.

Figura 2. Esquema representativo de um motor de indução trifásico.



Fonte: Adaptado de [2].

Segundo a Figura 2, para o estator temos:

- (1) Carcaça: É a estrutura responsável pelo suporte do sistema, construída de forma robusta em ferro fundido, aço ou alumínio, proporcionando resistência mecânica e à corrosão;
- (2) Núcleo de chapas: Chapas de aço magnético;
- (8) Enrolamento trifásico: Três conjuntos de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado ligado à rede trifásica de alimentação.

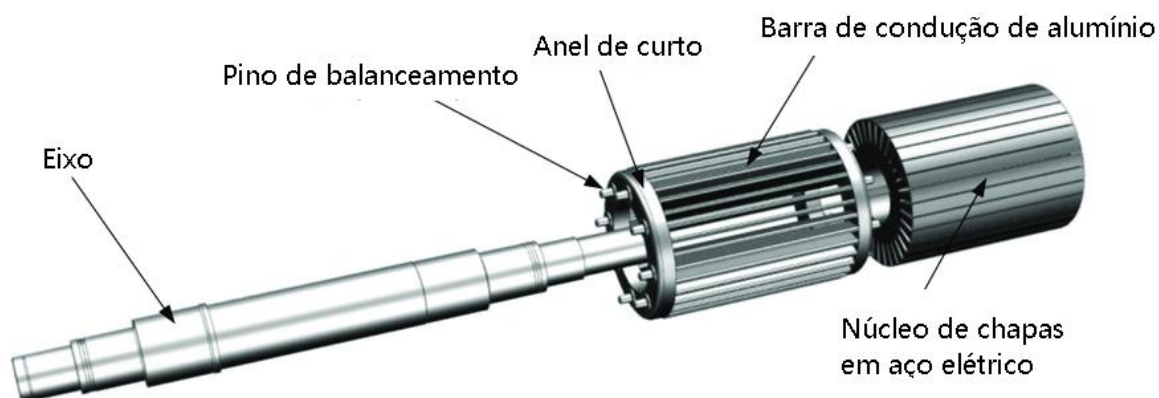
Já o rotor é composto por:

- (7) Eixo: Responsável por transmitir o esforço mecânico gerado pelo motor;
- (3) Núcleo de chapas: segue a mesma característica do estator;
- (12) Barras de anéis de curto-circuito: Material de alumínio injetado sob pressão em uma única peça.

O restante dos materiais que compõem o sistema do motor são: tampa (4), ventilador (5), tampa defletora (6), caixa de ligação (9), terminais (10) e os rolamentos (11).

Com diferentes tipos e aplicações específicas para os motores elétricos existentes, tanto no âmbito industrial, como no doméstico, o motor mais utilizado é o motor elétrico de indução com o rotor em gaiola de esquilo. Apesar dos diferentes processos de fabricação e alimentação, estes motores funcionam baseados no princípio do eletromagnetismo, logo, quanto menores as perdas no núcleo magnético, mais próximo do ideal será o rendimento dos mesmos.

Figura 3: Esquema de componentes do rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Adaptado de [2].

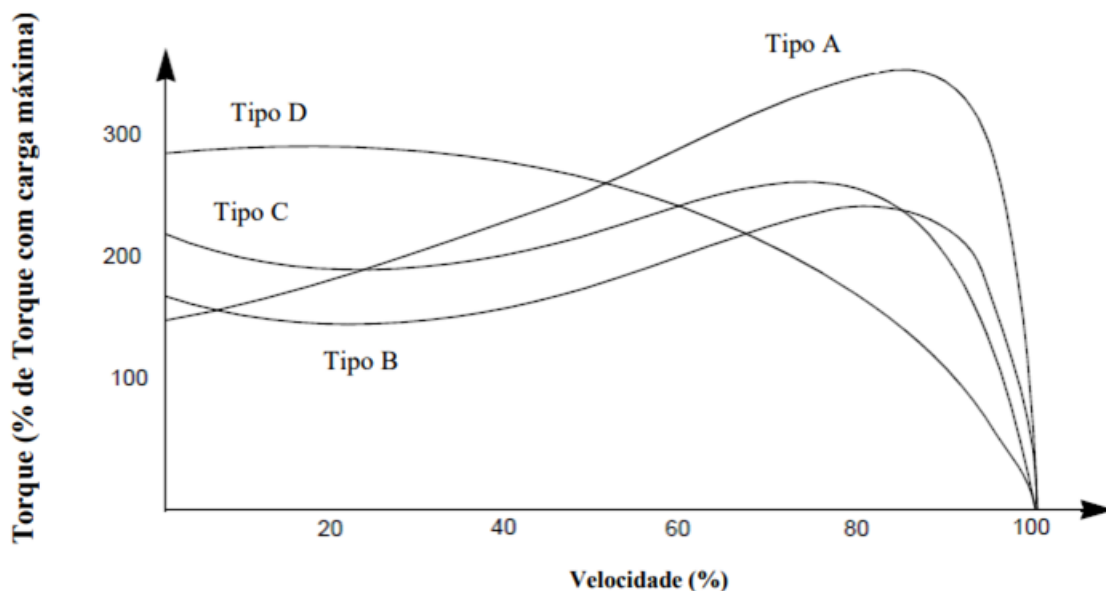
Como visto na Figura 3, o rotor não é composto por bobinas, mas sim por barras de metal condutor unidas por anéis também condutores, inseridas dentro de um núcleo magnético através de um processo conhecido como injeção.

Quando o estator é alimentado por uma corrente, as linhas de campo magnético cortam o rotor, induzindo uma diferença de potencial nas barras. Segundo a Lei da Indução de Faraday, ao induzir esta diferença de potencial entre as barras do material condutor, uma corrente elétrica começa a fluir pelas mesmas. Como o rotor está em curto-circuito, a corrente elétrica cresce de modo a torná-lo também um eletroímã. Na tentativa de acompanhar o movimento do campo girante e alinhar os polos magnéticos, a velocidade do rotor aumenta. Devido ao fato de o rotor suportar

uma carga no eixo, mesmo que seu próprio peso, estes polos nunca se alinham. Essa diferença de alinhamento e velocidades é conhecida como escorregamento.

Os motores de indução são classificados conforme a variação do torque em relação à velocidade pela NEMA (National Electrical Manufacturers Association). Os motores referenciados no presente trabalho pertencem à classe D, ou seja, possuem como característica o alto escorregamento (de 5 a 13%).[3] Este elevado escorregamento faz com que os motores sejam utilizados em aplicações para assegurar frequentes *starts* e *stops* com trocas de cargas subsequentes e mudanças de velocidade de giro acentuadas. Estes motores são vistos na prática em elevadores, sistema de bombeamentos de óleos, prensas e punções.

Figura 4. Gráfico Torque x Velocidade nas classes de motores



Fonte: [3].

3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO - INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

A fundição sob pressão, ou injeção, possibilita um produto final com maior taxa de produção, tolerâncias dimensionais mais estreitas com menor usinagem posterior, ótimo acabamento superficial, melhores propriedades mecânicas e maior facilidade de automatização do processo. Em contrapartida, existe o elevado custo ferramental e para modificações assim como a possibilidade de apresentar problemas de porosidades, este último resultando em redução nas propriedades, redução dos índices de qualidade e limitações de tratamento térmico. [4]

O processo de injeção se baseia no preenchimento de um molde metálico com um metal fundido, em alta velocidade, a partir de uma fonte de energia hidráulica.

Existem parâmetros de extrema relevância no processo que impactam diretamente na qualidade do produto final. Variáveis como posição, velocidades e fases de injeção, assim como a dosagem do metal líquido a ser adicionado no ciclo de injeção podem garantir uma peça sem defeitos ou necessidade de retrabalho.

Devido ao presente estudo ser direcionado ao impacto do uso do nióbio na liga já estabelecida com procedimentos padrão na produção, não serão abordados de forma aprofundada os parâmetros de processo ou a alteração dos mesmos.

3.2.1 Ligas de alumínio para o componente do estudo

A combinação de propriedades diferenciadas proporcionada pelo alumínio e suas ligas fazem deste material metálico um dos mais versáteis, econômicos e atrativos do mercado. Atualmente, as ligas de alumínio perdem apenas para os aços no quadro de consumo de metais estruturais mundial. O alumínio puro apresenta uma densidade de apenas $2,7 \text{ g/cm}^3$ (aproximadamente um terço dos aços) em conjunto com relativamente alta resistência mecânica, resistência à oxidação e possibilidade de tratamentos superficiais com formação de óxidos protetivos e efeitos estéticos desejados. [5]

O alumínio geralmente apresenta excelente condutividade elétrica e térmica, porém ligas específicas foram desenvolvidas com elevados níveis de resistividade elétrica, quando comparado ao padrão do material puro. Estas ligas são utilizadas, como exemplo, nos motores elétricos de indução. [5]

O alumínio é responsável por proporcionar um peso final da peça mais leve que se utilizado o cobre, como por exemplo, visto que uma parte do gasto energético do motor é proveniente da força para deslocar o peso do próprio rotor. Logo, entre bons condutores, o alumínio apresenta também baixa densidade como ponto positivo, resultando em uma maior relação de peso/ potência, onde um motor mais leve poderá entregar uma mesma potência. Além de mais leve, o alumínio é mais barato que as outras opções de material condutor. [7,8]

Figura 5. Comparativo do preço atual em tonelada de alumínio e cobre baseado no índice Dow Jones para commodities.



Fonte: [7,8]

Atualmente utiliza-se a liga SAE 306, ou ANSI A380.0, modificada para a fabricação dos componentes injetados que demandam uma condutividade elétrica mais baixa. Outra alternativa produzida em larga escala para estes componentes é com alumínio praticamente puro (99,7), porém esta condição entrega elevada condutividade e não supre as necessidades desta classe de motor com alto torque de partida.

A liga SAE 306 é conhecida por possuir condutividade normalizada em 24 %IACS, com relativamente boa fluidez, boa resistência à corrosão, boa usinabilidade, dureza Brinell de mínimo 80 HB e temperatura de vazão variando de 630 e 710 °C. [9]

Tabela 1. Composição química da liga SAE 306 segundo padrão SAE.

	Silício	Ferro	Cobre	Manganês	Magnésio	Níquel	Zinco	Alumínio
Limite tolerância (%)	7,5 - 9,5	Até 1,3	3 - 4	Até 0,5	Até 0,1	Até 0,5	Até 3	Restante

Fonte: Adaptado de [9].

3.2.2 Elementos de liga

Existem inúmeras possibilidades e combinações disponíveis de elementos químicos com o alumínio. As ligas de alumínio que são utilizadas comercialmente têm na sua composição diferentes tipos de elementos, são estes:

- Elementos principais – Exemplo: silício, cobre, magnésio, zinco e manganês. São responsáveis pela alteração das propriedades mecânicas de forma significativa.[10]
- Elementos secundários – Exemplo: níquel, chumbo, estanho. Adicionados em percentuais menores com o objetivo de uma ação específica para aplicação ou processabilidade (fundição).[10]

- Elementos modificadores e refinadores – Exemplo: boro, titânio, estrôncio, sódio e fósforo. Usados em pequenos percentuais para alteração de solubilidade e refino na microestrutura.[10]
- Impurezas – Exemplo: nitrogênio e hidrogênio. Devem ser controlados de maneira cautelosa, evitando problemas de fundição redução das propriedades mecânicas finais da peça.[10]

É conhecido que melhores propriedades mecânicas e estruturais são obtidas a partir de uma estrutura monofásica, onde a maior solubilidade dos elementos é desejável. Para o alumínio e suas ligas isto não é possível pois a solubilidade dos elementos é extremamente limitada. A maioria das ligas de alumínio é polifásica, isto é, formada por uma matriz (solução sólida) e as fases precipitadas. [11]

Os elementos com maior impacto nas propriedades da liga de alumínio 306, conforme composição apresentada na tabela 1, apresentam as seguintes características:

- Silício: É um elemento de considerada relevância em ligas de alumínio. Proporciona aumento da resistência mecânica, conseqüentemente diminuindo o alongamento. No processo de injeção, é responsável por auxiliar no aumento da fluidez, garantindo maior preenchimento das cavidades, evitando defeitos. [11]
- Cobre: tem como mecanismo de ação o aumento da resistência mecânica e dureza em peças tratadas termicamente. Porém, reduz a resistência à corrosão e torna a liga suscetível à fissuração (*hot tear crack*) durante o processo de fundição. [11]
- Ferro: Auxilia na desmoldagem no processo de injeção em teores de até 1,5%. Ao reagir com outros elementos da liga, forma compostos intermetálicos que prejudicam a usinagem (formação de pontos duros) e provocam desgaste nos moldes. Em contrapartida, estas reações podem auxiliar na estabilidade dimensional, na dureza, na resistência em elevadas temperaturas e à fissuração a quente. [11]
- Manganês: Atua como refinador de grão em baixas concentrações pela formação de precipitado, conseqüentemente proporciona maior ductilidade para o material. [11]

3.2.3 Nióbio

O nióbio foi descoberto em 1801, é um elemento metálico dúctil e com elevada resistência à corrosão encontrado na natureza em forma de minério. Os estudos sobre o elemento se iniciaram na década de 60 pelo programa tecnológico no Brasil. Diferente do que muito foi difundido, o minério não é raro e pode ser encontrado largamente em solo brasileiro.[12]

Em Araxá, hoje, se encontra a maior planta comercial do mundo. Onde o nióbio é minerado, formulado e processado para elevar a performance de diversos materiais utilizados atualmente. O nióbio tem como principais aplicações: lentes especiais, na indústria automotiva, aeroespacial e em componentes eletrônicos. [13]

O processo de obtenção das ligas e refinados de nióbio é complexo, exige em alguns casos o uso de fornos à vácuo para garantir a atmosfera neutra, pois ao entrar em contato com o ar, ocorre a formação do óxido de nióbio, reduzindo a capacidade de difusão na matriz e a formação de fases indesejáveis. [13]

Figura 6. Corte transversal de um tarugo de mais de uma tonelada de nióbio puro polido.



Fonte: [14].

3.3 PROPRIEDADES

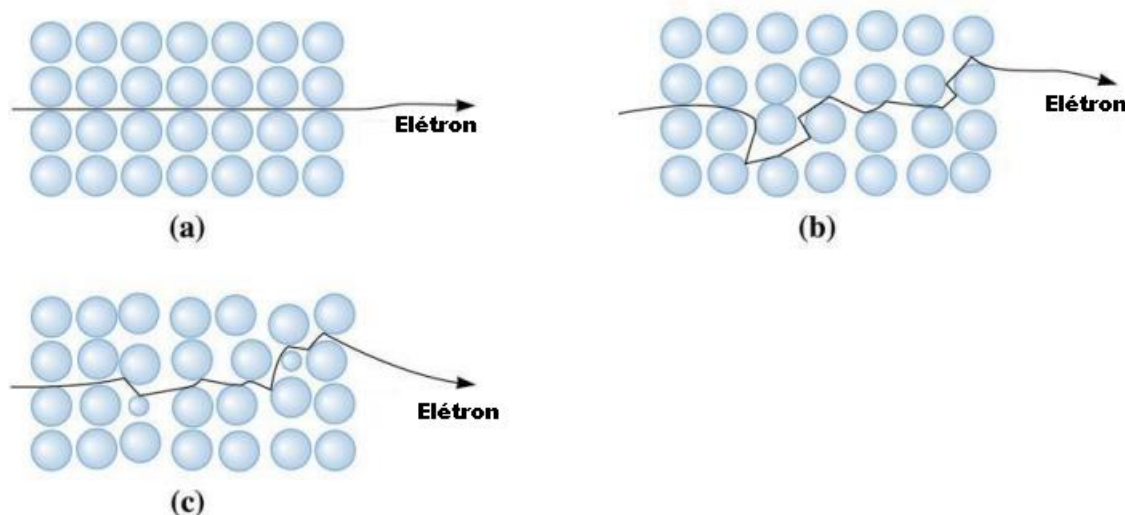
A principal propriedade necessária para a liga injetada utilizada no presente trabalho é a elevada resistividade. Elevada quando comparada ao alumínio puro, que também pode ser utilizado para a fabricação do componente, porém para suprir categorias diferentes de motores elétricos.

A fim de garantir processabilidade e qualidade da peça final, além de possibilitar comparar as ligas de alumínio disponíveis, outras características também foram avaliadas, como a fluidez e a densidade pós processo.

3.3.1 Resistividade

A resistividade é medida pela capacidade do material de permitir a passagem de corrente elétrica pelo seu volume. O espalhamento dos elétrons pela rede cristalina e suas imperfeições resulta em colisões, também ocasionadas pela vibração térmica dos átomos presentes na rede. Como os defeitos na rede cristalina servem como pontos de concentração de elétrons condutores nos metais, estes aumentam a resistividade (ou diminuem a condutividade). A concentração destes defeitos é dependente da temperatura, composição e o grau de encruamento do metal em questão. De fato, é conhecido que a resistividade total de um metal é representada pela soma da contribuição das vibrações térmicas, impurezas e grau de deformação plástica. O espalhamento do elétron reduz a mobilidade e a condutividade do material, este mecanismo está ilustrado na figura a seguir. [15, 16]

Figura 7. Movimento do elétron (a) pela rede cristalina ideal, (b) pela rede cristalina sob elevada temperatura, e (c) pela rede cristalina contendo defeitos.



Fonte: Adaptado de [15].

A resistividade é representada no Sistema Internacional de unidades (SI) em ohm-metro, ou seja, $\Omega \cdot m$. A condutividade nada mais é que o inverso da resistividade, e é expressa em Siemens por metro (S/m). Ao classificar metais pela resistividade, é comum utilizar o nanoohm-metro $n\Omega \cdot m$, visto que estes são materiais condutores (para condutividade em Mega Siemens por metro, MS/m).

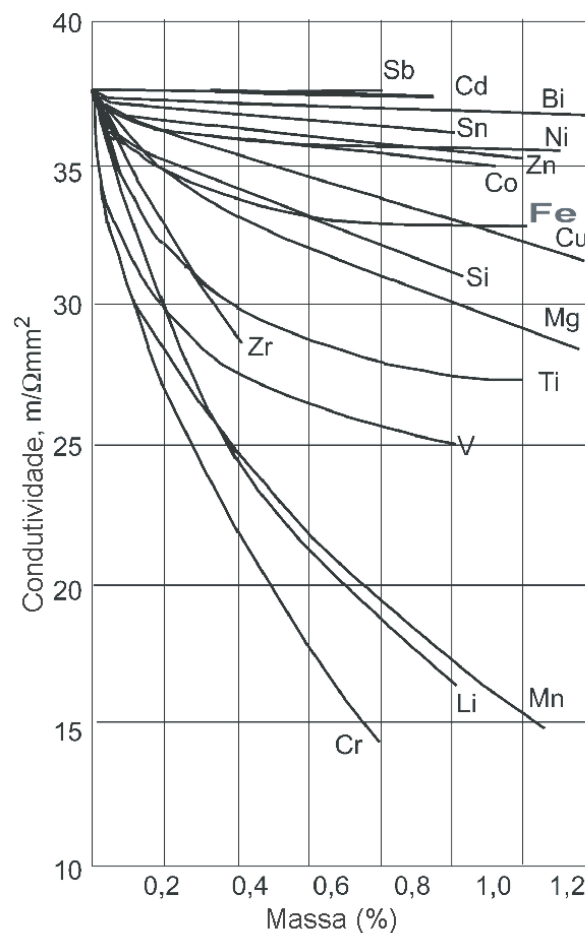
A partir da larga utilização do cobre em aplicações que exigem elevada condutividade, mantendo suas propriedades mecânicas, resistência e confiabilidade, o material foi utilizado como padrão de condutividade. Definiu-se como 100% a condutividade para o cobre “puro” recozido como padrão da sigla IACS: International Annealed Copper Standard – Padrão Internacional do Cobre Recozido. Assim, adota-se o padrão IACS para maior praticidade em relações comerciais e assuntos técnicos.

Tabela 2. Comparativo entre propriedades de cobre e alumínio puros

Propriedade	Cobre	Alumínio
Condutividade (%IACS)	100	61
Resistividade ($\Omega.m$)	$1,724 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-8}$
Densidade (g/cm^3)	8,89	2,7
Ponto de fusão ($^{\circ}C$)	1083	659

Fonte: Adaptado de [17].

Figura 8. Gráfico da influência dos elementos em percentual de massa na condutividade do alumínio puro.



Fonte: [10]

Para a liga SAE 306, espera-se uma condutividade de 23,7 à 27,6 %IACS. [6]

3.3.2 Fluidez

A fluidez é uma propriedade intrínseca das ligas de alumínio de extrema importância, principalmente, nos processos de injeção, garantindo o preenchimento das ranhuras em diferentes geometrias dos componentes.

A viscosidade de um material está inversamente proporcional à fluidez do mesmo. É conhecido que a viscosidade nada mais é do que a resistência do fluido ao movimento. Deste modo, a fluidez pode ser vista como a tendência do fluido ao movimento, quando existe a diminuição ou ausência da resistência ao escorregamento entre partículas do fluido.

3.4 EFEITO DO NIÓBIO NAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Foi constatado por Wells [18] que o efeito ótimo do nióbio de até 10 ordens de grandeza para o tamanho de grão é obtido com a variação mássica do nióbio de 0–1%. No entanto, Eborall [19] observou que o nióbio apresentava pouca influência no alumínio puro. Contudo, com a presença de elementos de liga o refinamento dos grãos era elevado.

O refino da microestrutura é uma prática comum no processamento das ligas de alumínio ao adicionar refinadores como AlTiB ou AlTiC. Infelizmente, estes refinadores de grão comerciais não são eficientes ao se tratar de ligas baseadas em Al-Si. Esta ineficiência se deve ao fato da interação entre o silício e o titânio, onde ocorre a formação de silicatos de titânio que prejudicam a fusão do Ti. [20]

O fenômeno conhecido como *poisoning* é visto em teores acima de aproximadamente 3% de Si. Uma teoria indica que a interface dos compostos de TiB₂ são sítios energeticamente mais favoráveis para os átomos de silício, quando comparados aos contornos de grãos da matriz de alumínio. Outro fator relevante é que a solubilidade do titânio no alumínio sólido diminui com a presença do silício. A afinidade química da superfície e a energia superficial são barreiras difíceis de serem superadas para que ocorra a nucleação dos grãos pelo TiB₂. [21] Foi constatado por Sigworth and Guzowaski [22] que, no processo de refinamento da microestrutura das ligas Al-Si, o silicato de titânio formado cobre a superfície do composto TiAl₃, causando o *poisoning* e tornando a nucleação ineficiente ao acrescentar a liga refinadora de grão de Al-Ti.

Tem-se como *master alloy* a liga responsável por adicionar os elementos na liga principal. Pode ser vista, por exemplo, em pós ou vergalhões que são adicionados ao material puro fundido.

Como a liga do presente estudo possui fração mássica do silício acima de 7,5 %, não é desejável a utilização do titânio como elemento refinador. Como citado anteriormente, o efeito *poisoning* exige então a utilização de uma alternativa para a melhora da propriedade.

Segundo estudos prévios da empresa parceira e fornecedora da matéria-prima de nióbio, com a adição do refinador AlNbB, obtém-se uma microestrutura eficiente e confiável para as ligas de Al-Si. Em conjunto, não foi constatada a interação dos inoculantes de NbB com os elementos da liga Al-Si, confirmando a estabilidade dos compostos à base de nióbio para adição. [13]

As partículas intermetálicas formadas de Al₃Nb e NbB₂ são responsáveis pelo mecanismo de nucleação heterogênea dos grãos de alumínio primário (Al- α). Quando o refinamento de grão é bem-sucedido, finos grãos de Al- α se formam, resultando em melhores propriedades de forma geral. Resultado deste mecanismo, o tamanho de grão final da estrutura da liga de Al-Si se torna ainda menos dependente das taxas de resfriamento do processo. Isto garante maior flexibilidade para aplicação da liga em métodos de fusão por gravidade ou sob pressão (injeção).

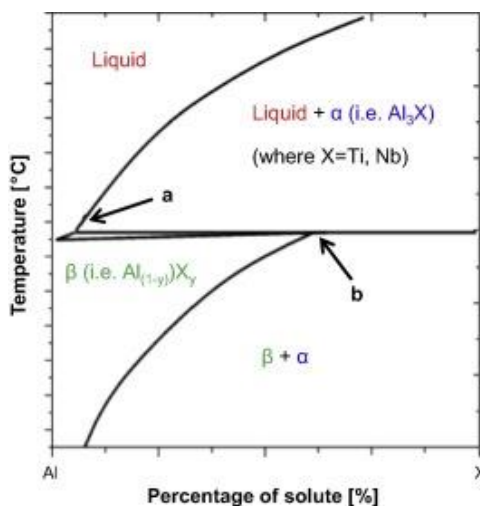
Esta estabilidade da liga de adição AlNbB proporciona a fundição de componentes com distribuição uniforme do tamanho de grão até em maiores espessuras, também aumentando a resposta a tratamentos térmicos para melhoria nas propriedades mecânicas. Um adicional da liga é a interação com o ferro intermetálico, onde o composto promove a diminuição do elemento Fe e proporciona uma melhor reciclagem do refugo de alumínio.[13]

3.4.1 Comparativo Al-Ti e Al-Nb

A eficiência do nióbio para refinar a microestrutura do alumínio e suas ligas pode ser afirmada pois, como o titânio, o nióbio caracteriza uma reação peritética com o Al (reação na qual uma fase sólida em conjunto com uma solução líquida forma uma outra única fase sólida com o resfriamento). Adicionalmente, o nióbio forma uma fase com mesma estrutura atômica da fase formada pelo titânio com o alumínio, mais especificamente Al₃Ti e Al₃Nb.[11] O diagrama a seguir mostra a reação peritética

em que a fase com predominância de alumínio é Al-X (X= Ti ou Nb). No diagrama para Al-Ti, os elementos reagem para formar o Al₃Ti intermetálico em 665°C. Este composto apresenta estrutura tetragonal (Ti de 0,12-1,15%). O nióbio possui comportamento muito semelhante, pois o diagrama Al-Nb também apresenta a reação peritética, mas em aproximadamente 661°C (Nb de 0,15-0,22).[23]

Figura 9. Diagrama predominante de Al para Al-X binário (percentual do soluto em “a” = 0,15%Ti ou 0,15%Nb e em “b” = 1,15%Ti ou 0,22%Nb).



Fonte: [20].

3.4.2 Adição do nióbio

Clyne et al. [24] firmaram a superioridade da utilização do método de adição das ligas em vergalhões em relação ao pó onde o composto de Al₃Nb estaria disperso em partículas intermetálicas para o alumínio puro.

A liga fornecida pela empresa parceira para os estudos da relação Al x Nb possui partículas de Al₃Nb e NbB₂ dispersas em uma matriz de alumínio de elevada pureza. O composto refinador de grão é fornecido em vergalhões. O processo de adição durante a fundição requer alguns cuidados para garantir uma melhor difusão dos compostos na liga. Os vergalhões podem ser adicionados na panela de fundição, antes de vazar o metal fundido retirado do forno. Adicionar os vergalhões diretamente no forno pode fornecer alguns riscos, assim como possibilitar reações químicas e dificuldade pelo tamanho do recipiente.

Quanto mais elevadas as temperaturas de vazamento, melhor para a dissolução da liga de adição, usualmente entre 700 a 760°C. Em alguns casos, é aconselhável o pré-aquecimento da liga de adição, dependendo do armazenamento

e manuseamento dos vergalhões. Não é necessária alteração no processo após a adição da liga, podendo seguir para etapas regulares como degaseificação, modificação, até o vazamento. Um mínimo de temperatura de fusão de 720°C é recomendado para adições acima de 0,05% *wt* (fração mássica) de Nb.

Figura 10. Liga de nióbio para adição em forma de vergalhões.



Fonte: Autoria própria.

Visto que o material de adição possui 3,5% de nióbio em sua composição, recomenda-se para adição na liga as seguintes proporções:

- 0,05% Nb
 $(0,05\%/100\%) * 100 \text{ kg de liga} = 0,05 \text{ kg de Nb} (*100\%/3,5\% \text{Nb}) = 1,43 \text{ kg de liga AlNbB}$

Características físicas de um vergalhão: 1m x 9,5mm Ø = 200g

Assim 0,05% Nb = 7 vergalhões para 100kg.

Para completar a adição com 0,025%, com objetivo de atingir 0,075% de nióbio na liga são adicionados mais 7 vergalhões.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi planejado, executado e testado nas dependências da empresa WEG Equipamentos Elétricos, em Jaraguá do Sul.

A confecção dos componentes se deu na estrutura fabril de Injeção de alumínio, com a adição de cobre, chapa de aço, manganês e silício aos lingotes de alumínio puro, seguindo procedimento padrão. Para a adição do nióbio na liga, foi utilizada a anteliga de AlNbB em formato de vergalhão.

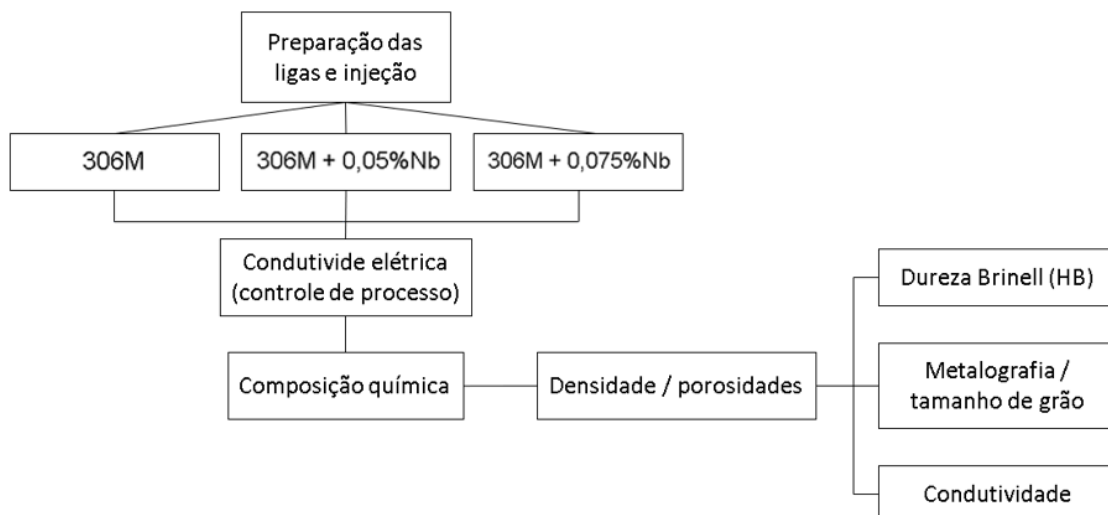
Figura 11. Processo de adição do nióbio na panela de transferência.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 12, tem-se o fluxograma ilustrando os métodos presentes no desenvolvimento do projeto.

Figura 12. Metodologia de avaliação adotada.



Fonte: Autoria própria.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Produção dos componentes

Foram produzidos seis componentes pelo método de fundição sob pressão da liga 306M, dois com a liga padrão, utilizada na linha de produção atualmente, e quatro com adição de dois percentuais diferentes de nióbio. Os componentes foram injetados utilizando o mesmo molde, a mesma injetora, com os mesmos parâmetros de processo.

Estes componentes foram fabricados em sequência, a partir de lingotes de alumínio comercialmente puro (99,7% de pureza), com a adição de cobre, ferro proveniente de chapas de aço 1006 e anteliga de silício.

Tabela 3. Composição para preparação da liga.

Elemento	Quantidade (kg)	Quantidade (%)
Silício	19,32	9,66
Aço 1006	1,82	0,91
Manganês	1,04	0,52
Cobre	8,62	4,31
Alumínio 99,7 (Barra / retorno)	169,2	84,6
Peso total da carga	200	100

Fonte: Adaptado de [2].

Seguindo o procedimento padrão de controle do processo, a condutividade da liga é medida antes da injeção. Desta forma, a condutividade da liga “mãe” foi aferida após fusão completa. Condutividade medida de 26,2 %IACS.

Figura 13. Procedimento para controle de processo e aferição de condutividade elétrica.



Fonte: Adaptado de [2].

2,8kg do material de AlNbB foram adicionados ao banho metálico a fim de obter, inicialmente, 0,05% de nióbio solubilizado na liga de forma homogênea. Para a

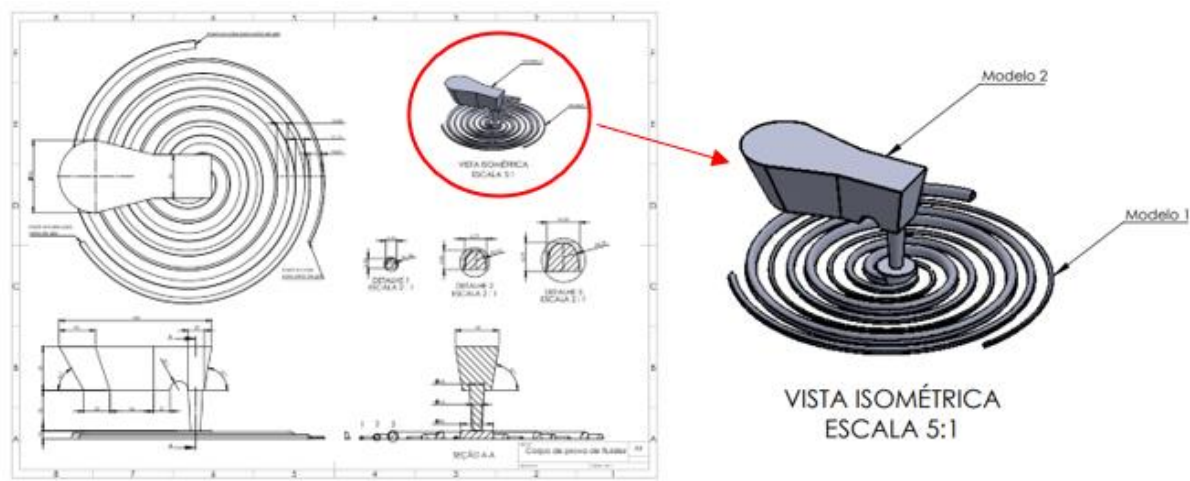
segunda condição, foram adicionados mais 1,4kg de material suficiente para complementar a liga até 0,075% do elemento solubilizado.

Para as três condições do experimento, liga padrão 306M, com 0,05% e com 0,075% de nióbio, foram vazados por gravidade corpos de prova para teste de fluidez, em moldes de areia, a partir da panela de transferência.

4.1.2 Análise de fluidez

A análise comparativa da fluidez de cada condição de liga pode ser realizada a partir de moldes padronizados em formato de espiral. Os moldes são preparados em areia e a liga fundida é vazada nas mesmas condições estabelecidas para o processo.

Figura 14. Modelo para análise de fluidez em fundição.



Fonte: Adaptado de [2].

O metal fundido, antes de ser levado à injetora, é vazado na parte superior do molde, o massalote. A partir do preenchimento do metal líquido nos três canais de diferentes diâmetros, é possível quantificar o comprimento final destes canais após solidificação. Quanto maior o comprimento final do canal, maior fluidez do metal líquido e, conseqüentemente, maior preenchimento das cavidades do molde para aquela geometria.

4.1.3 Montagem dos motores para testes de desempenho

A fim de eliminar o maior número de variáveis e focar a avaliação no que pode ser fruto das alterações nos componentes, é utilizada a mesma configuração de motor, alternando apenas os componentes injetados para os testes de desempenho.

O objetivo destes ensaios é avaliar fatores como eficiência, potência, torque de partida, rotação, aquecimento e perdas e comparar com o projeto do motor final.

4.1.4 Preparação dos componentes para análise de densidade

Ao fim dos ensaios de desempenho, os componentes foram encaminhados aos laboratórios de P&D, onde foi possível caracterizar as ligas.

Devido às características físicas do componente injetado, com diferentes materiais, densidades e geometrias, não foi possível quantificar as porosidades advindas do processo pelos métodos de raio-x e ultrassom.

Desta forma, o ensaio de densidade foi estruturado com finalidade de comparar o preenchimento do molde injetado entre as diferentes composições, assim como com a densidade da liga pura.

Foram usinadas as seções superiores e inferiores de cada componente para a análise de densidade. O corpo de prova “A” é definido como o ponto de injeção de material no molde, onde é esperado maior preenchimento das cavidades. Já o corpo de prova “B” representa a peça do lado oposto ao ponto de injeção, no qual o alumínio fundido é forçado a transitar por canais estreitos, com extremamente baixas espessuras, para formar a parte inferior do componente. Neste lado espera-se uma densidade menor quando comparado com o volume onde o material é injetado.

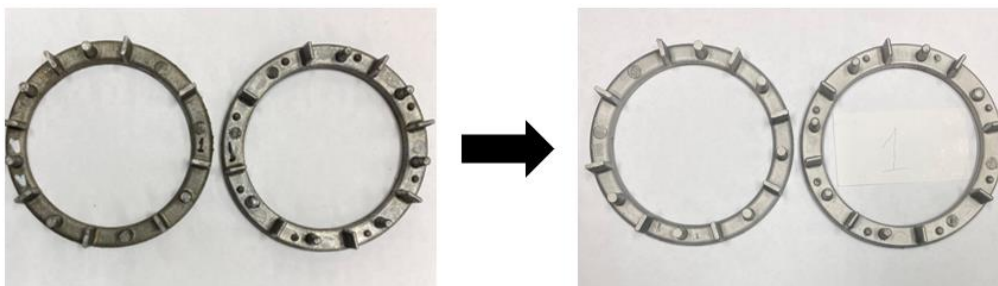
Após o corte das extremidades, as peças foram submetidas ao jateamento por granalhas de aço. Este processo é responsável por eliminar qualquer tipo de contaminante superficial que pode influenciar nos ensaios posteriores.

Figura 15. Máquina de jateamento por granalha de aço.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16. Corpos de prova após corte e jateamento.



Fonte: Autoria própria.

4.1.5 Preparação metalográfica

Procurou-se retirar as amostras das mesmas regiões de cada componente. A face inferior foi definida para ser avaliada.

A preparação metalográfica consiste no embutimento à frio das amostras, onde uma mistura bicomponente de resina acrílica é preparada e vazada no envolto da superfície a ser analisada. Posteriormente, estas amostras passam pelas etapas de lixamento e polimento, em politriz automática Fortel modelo PLF (Figura 17), de forma que o objetivo final é uma superfície plana e livre de imperfeições que pudessem impedir a avaliação microscópica.

Na etapa de lixamento, foram utilizadas lixas d'água com granulometrias de 80, 240 e 1200. Para o polimento, utilizou-se pano aveludado com pasta de diamante de 0,05 μm e álcool como veículo refrigerante.

Figura 17. Politriz rotativa para preparação metalográfica modelo PLF do fabricante Fortel.



Fonte: Autoria própria.

O ataque químico para revelação dos contornos de grão e compostos formados foi realizado através da imersão das amostras em solução ácida de Poulton (60% HCl a 37%; 30% HNO₃ a 65%; 5% HF a 50% e 5% de água), e clareadas com a solução: 67% de HNO₃ a 65%; 20% de HF a 50% e 13% de água. O tempo de imersão foi controlado entre 10 e 15 segundos para evitar ataque excessivo da solução. A solução 5% HF também foi utilizada como alternativa para avaliar a microestrutura da liga, visto que esta solução é amplamente utilizada na indústria.

Figura 18. Soluções para ataque químico utilizadas nas análises metalográficas.



Fonte: Autoria própria.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Avaliação de densidade

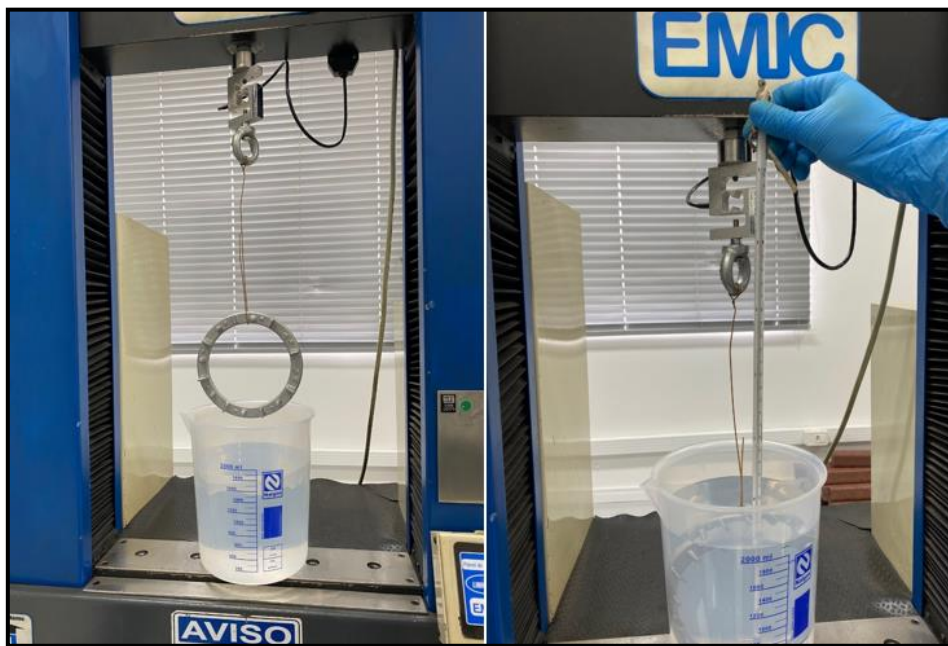
O método de avaliação de densidade das peças do presente estudo foi desenvolvido como procedimento interno para materiais sólidos que apresentam peso específico maior que 1g/cm³.

A análise compara a relação entre a massa de um corpo e seu volume com o igual volume de água pura.

Devido à massa das amostras não ser compatível com a balança disponível no laboratório (superior a 160 gramas), utilizou-se a máquina universal de ensaios EMIC DL 3000 com uma célula de carga de capacidade de 5kg para melhor resolução.

O procedimento é resumido em pesar a amostra suspensa por um fio de cobre na célula de carga e comparar com a massa desta mesma amostra, submersa em água destilada, suspensa pelo mesmo fio. É importante monitorar a temperatura da água visto que há variação da densidade em diferentes temperaturas.

Figura 19. Procedimento para ensaio de densidade.



Fonte: A autoria própria.

O cálculo da densidade é feito a partir da expressão abaixo:

$$\text{Densidade da amostra} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{M1 \cdot \rho A}{M1 - M2} \quad (1)$$

Onde: M1 = Massa da amostra no ar (g)

M2 = Massa da amostra na água (g)

ρA = Densidade da água (g/cm³)

Exemplo da variação da densidade da água pela temperatura:

- Densidade da água a 16,0°C = 0,09989705

- Densidade da água a 26,8°C = 0,9966000

4.2.2 Análise por microscopia ótica

A microscopia ótica é uma técnica aplicada em grande parte dos estudos envolvendo a microestrutura dos materiais. A interação da luz com a superfície da amostra passa por um conjunto de lentes oculares e objetivas, formando imagens de diferentes ampliações.

Através do microscópio ótico modelo Reichert Polyvar 2 do fabricante Leica, foram registradas imagens das amostras após ataque químico. Por meio destas imagens, em diferentes regiões de cada amostra, foi possível calcular o tamanho médio de grão pelo método dos interceptos.

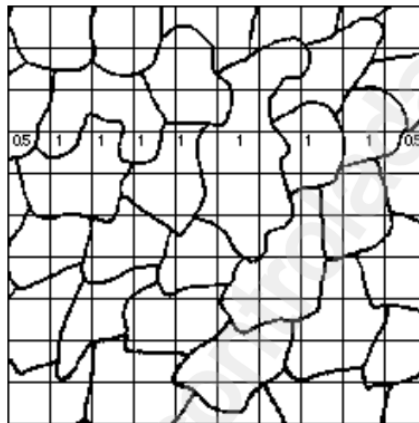
Figura 20. Microscópio ótico Reichert Polyvar 2 do fabricante Leica



Fonte: Autoria própria.

O método dos interceptos é executado conforme norma ASTM E112-13. No microscópio ótico é utilizado o recurso de transmissão de imagem (dispositivo acoplado na parte superior- Figura 20), aplicando retas de comprimentos conhecidos em uma imagem da estrutura dos grãos do material, de modo que o comprimento das retas é dividido pelo número de interceptos contados anteriormente.[25]

Figura 21. Ilustração da gradação de imagem para análise por método dos interceptos.



Fonte: Adaptado de [25].

Durante a contagem é importante observar se as linhas:

- Das extremidades, penetram no grão, contar como meio grão;
- São tangentes a um contorno de grão, contar 1,5 grão;
- Cruzam várias vezes um mesmo grão, contar todas.

O resultado é obtido a partir do cálculo da média aritmética do número de grãos que cortam as linhas, com auxílio da Equação 2 a seguir:

$$Md = \frac{Ng}{N} \quad (2)$$

Onde:

Md = Média aritmética do número de grãos;

Ng = Número total de grãos;

N = Número de linhas analisadas.

Para o comprimento médio do grão, utiliza-se o Md em:

$$Cg = \frac{Cl}{Md \cdot A} \quad (3)$$

Onde:

Cg = Comprimento médio dos grãos (mm);

Cl = Comprimento da linha (130 mm);

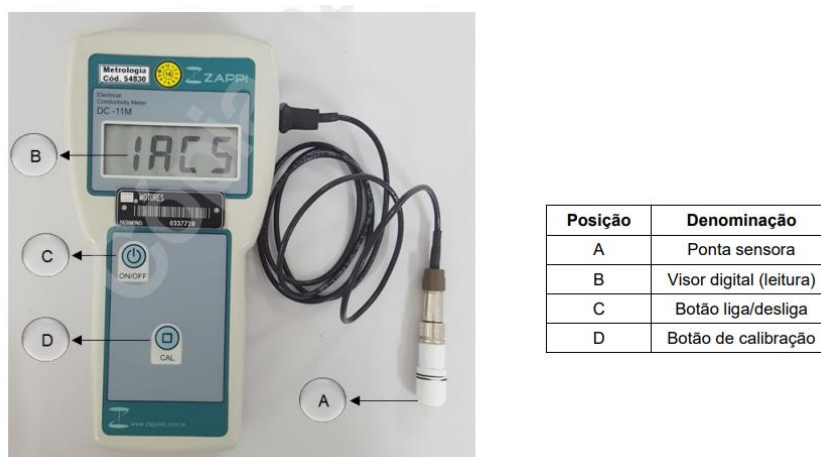
Md = Média aritmética do número de grãos;

A = Aumento usado.

4.2.3 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi aferida na superfície de cada corpo de prova preparado para o ensaio metalográfico, por Eddy current, ou corrente parasita. Com o dispositivo Zappi Tecnologia DC-11M uma corrente é induzida no plano de contato superficial da amostra, resultando em valores de condutividade elétrica baseados na escala % IACS.

Figura 22. Equipamento para medição de condutividade elétrica.



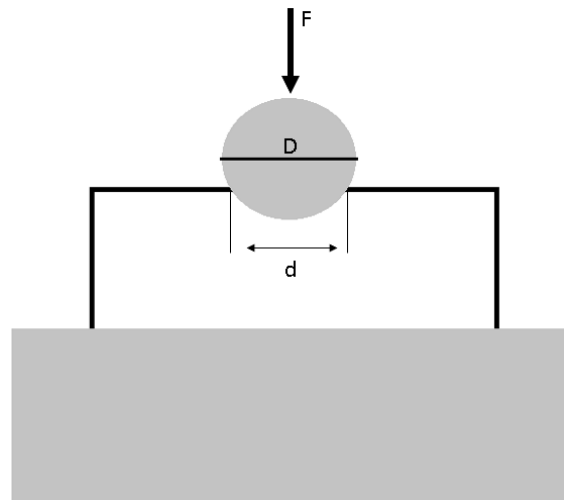
Fonte: Adaptado de [2].

4.2.4 Ensaio de dureza Brinell

Diversas escalas de dureza são utilizadas atualmente, contemplando diferentes classes de resistência dos materiais. A escala mais comum é a escala Brinell devido à sua reprodutibilidade, possibilitando a adaptação do ensaio em máquinas universais, ou durômetros específicos. [26]

No ensaio de dureza Brinell, uma esfera de diâmetro conhecido, geralmente de carbeto de tungstênio, é pressionada sob a superfície do material a ser analisado. Utilizando uma carga controlada, por um período de tempo suficiente para estabilizar a impressão de uma calota na peça, mede-se o diâmetro final desta calota.

Figura 23. Ilustração do procedimento de ensaio de dureza.



Fonte: Autoria própria.

O valor de dureza Brinell é calculado a partir da carga aplicada sobre a esfera (F), o diâmetro da esfera (D) e o diâmetro da endentação (d). A seguir é possível verificar a fórmula utilizada para converter as variáveis do ensaio para o valor de dureza,

$$HB = \frac{2 \cdot F}{3,1416 \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

Para a tese em questão, foi utilizado um durômetro analógico de bancada da marca Otto Wolpert-Werke, no qual é possível variar a carga aplicada, assim como o diâmetro da esfera, possibilitado atender uma elevada gama de classes de materiais.

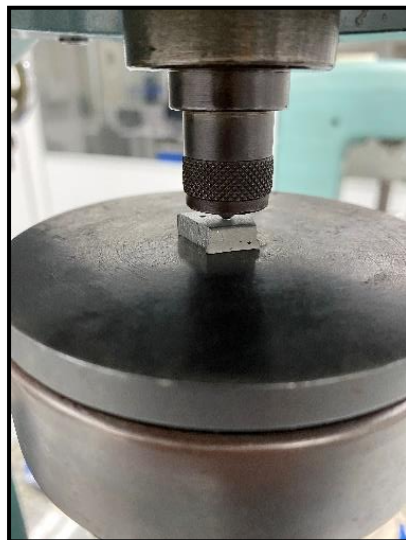
Figura 24. Durômetro Otto Wolpert.



Fonte: Autoria própria.

Após a aplicação da carga com a esfera em contato com a superfície do corpo de prova, cronometra-se 30 segundos para estabilização. Após liberar a carga do ensaio, mede-se o diâmetro da endentação formada com o auxílio de uma lupa graduada. Com as tabelas de conversão normatizadas, é possível converter a dureza do material sem a necessidade do cálculo a cada aferição.

Figura 25. Aplicação da carga nas amostras do presente estudo.



Fonte: Autoria própria.

4.2.5 Análise via MEV/ EDS

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é o equipamento responsável por projetar uma imagem da superfície da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons com diâmetro extremamente pequeno. [26] O MEV possibilita avaliação das características superficiais dos materiais, como a formação de poros, presença de inclusões e diferentes perfis de rugosidade. Este equipamento requer experiência e cuidado ao operar, pois é preciso garantir a representatividade da região a ser analisada, geralmente em ampliações elevadas, assim como é preciso regular e focalizar o feixe de acordo com a necessidade da análise.

A partir das características de absorção e emissão de energia, na análise de espectroscopia por energia dispersiva (EDS) via MEV, os elementos presentes nas amostras podem ser caracterizados de forma qualitativa, reforçando teorias de formações de compostos e sua disposição na matriz.

Um dos modos de detecção disponíveis no MEV é o BSE. Este modo permite visualizar o contraste existente na superfície da amostra devido à diferença de concentração de elementos químicos pelos seus números atômicos. Quanto maior for o número atômico do elemento responsável pela emissão dos elétrons BSE, mais clara é a visualização do mesmo na imagem.

Um microscópio eletrônico de varredura Tescan Vega, apresentado na Figura 26, foi utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 26. Microscópio eletrônico de varredura Tescan do fabricante Vega.



Fonte: Autoria própria.

4.2.6 Composição química via espectrometria de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES)

ICP-OES é uma técnica de análise química na qual é utilizada uma fonte de plasma para excitar os átomos dos elementos presentes na amostra, de forma que fótons de luz de comprimento de onda característicos de cada elemento são emitidos. A quantidade de fótons emitidos está diretamente relacionada com o percentual do elemento presente na amostra.

O laboratório WEG possui o equipamento citado, porém não dispõe de vidraria e metodologia necessárias para a análise de nióbio. Visto isto, as análises foram encaminhadas para laboratórios externos já validados pela WEG.

Figura 27. Exemplo de equipamento para avaliação de composição química via espectroscopia de emissão ótica.



Fonte: A autoria própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Previamente aos ensaios de análise do componente e caracterização do material, foi avaliada a viabilidade de aplicação do componente no motor elétrico.

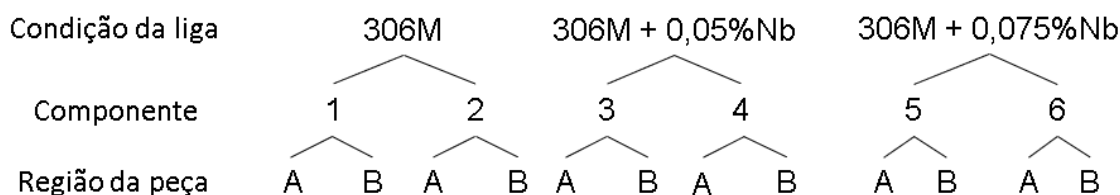
As análises de desempenho de motores e características de operação dos mesmos apresentam dados sensíveis de projeto da WEG. Assim como as mesmas são direcionadas para o âmbito da física com foco na eletricidade e nos fenômenos que explicam o funcionamento do motor, e a proposta do presente trabalho é voltada para metalurgia e materiais, não serão abordadas as metodologias destes ensaios e os resultados numéricos dos mesmos.

Porém, é válido mencionar que as propostas de adição de nióbio nas ligas, em todas as condições, não apresentaram alteração no desempenho elétrico e mecânico do motor.

Para validação dos resultados, todas as amostras foram submetidas às mesmas condições de ensaio, isto é, calibração, *setup*, metodologia e instrumentação.

Para auxiliar a interpretação dos resultados, a Figura 28 apresenta a identificação das amostras e as características das mesmas.

Figura 28. Árvore de amostragem para condição das peças ensaiadas.

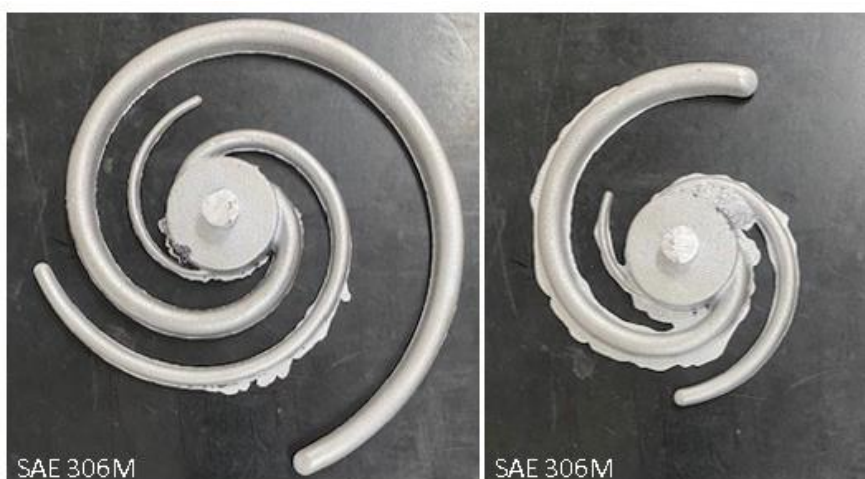


Fonte: Autoria própria.

5.1 ANÁLISE DE FLUIDEZ

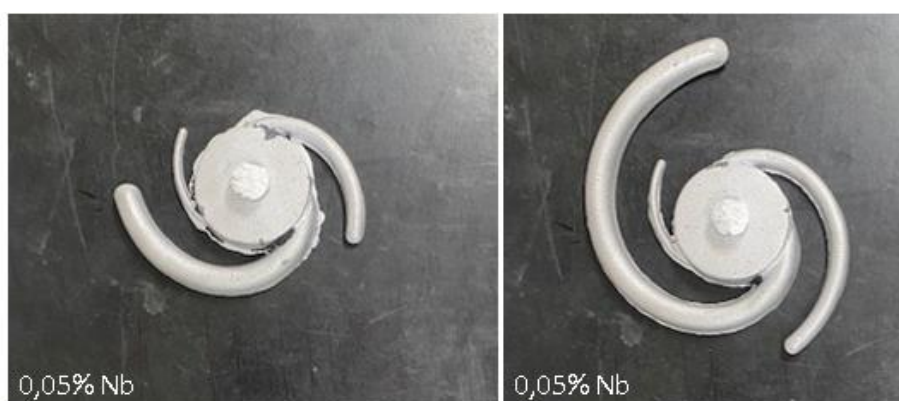
Nas Figuras 29, 30 e 31 é possível avaliar os corpos de prova de fluidez das ligas do estudo já desmoldados e cortados, de maneira que os canais em forma de espiral permitem quantificar o volume percorrido pelo metal líquido até o processo de solidificação.

Figura 29. Corpo de prova de fluidez para a liga padrão 306M.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30. Corpos de prova de fluidez para a liga com adição de 0,05% de nióbio.



Fonte: Autoria própria.

Figura 31. Corpos de prova de fluidez para a liga com adição de 0,075% de nióbio.



Fonte: Autoria própria.

A partir das imagens anteriores não é possível comparar a fluidez característica de cada condição da liga, pois em dois corpos de prova vazados para a mesma condição, no mesmo momento, houve variação clara no preenchimento dos moldes.

Apenas os corpos de prova da liga com adição de 0,075% de nióbio não apresentaram desvio grosseiro no comprimento dos canais de mesmo diâmetro.

Avaliando os apontamentos do procedimento de fabricação, foi possível destacar pontos que indicam as causas das variações nos corpos de prova de fluidez:

- CP 1 e 2 (Liga 306M): Liga fundida em 680°C, corpos de prova vazados 30min após;
- CP 3 e 4 (Liga com 0,05%Nb): Adicionada anteliga AlNbB e vazamento do metal fundido 10min depois da preparação;
- CP 5 e 6 (Liga com 0,075%Nb): Adicionado o restante de anteliga para atingir o percentual mais elevado. Após a adição houve intervalo área produtiva para refeição, indicador de estabilização da temperatura do banho após retomada do processo.

5.2 PERCENTUAL DE NIÓBIO NA LIGA VIA ICP

A tabela 4 apresenta o percentual de massa (%wt) aferido nas amostras de controle de processo. Estas amostras são retiradas da liga fundida, já estabilizada, para controle de condutividade.

Tabela 4. Resultado das análises para percentual de nióbio.

Amostra	Teor de nióbio (%wt)
A210 sem adição de Nb	<0,005
A210 + 0,05% Nb	0,0512
A210 + 0,075% Nb	precipitado

Fonte: Autoria própria.

A partir da Tabela 4 é possível confirmar a ausência do nióbio na liga “mãe”, como também que a adição para 0,05% foi bem sucedida. Já para o maior percentual de adição do nióbio, 0,075%, não foi possível quantificar o elemento.

Este fato pode estar relacionado com a formação de algum composto ou óxido que não é dissolvido pela solução responsável por servir como veículo para a amostra interagir com o plasma do equipamento.

5.3 ANÁLISE DE DENSIDADE

Na tabela 5 são apresentadas as massas aferidas, a temperatura da água no momento e, assim, calculadas as densidades para cada componente injetado.

Tabela 5. Resultados de densidade calculada.

Componente	massa seca (g)	massa úmida (g)	temperatura da água (°C)	densidade calculada (g/cm ³)
1A	112	71	23,1	2,725005
1B	83	52	23,1	2,670851
2A	79	49	23,2	2,62681
2B	93	57	23,2	2,576934
3A	82	52	23,2	2,726562
3B	88	55	23,3	2,659997
4A	88	55	23,3	2,659997
4B	92	57	23,3	2,621997
5A	77	48	23,6	2,648339
5B	49	29	23,6	2,443695
6A	80	51	23,4	2,751654
6B	91	57	23,6	2,669582

Fonte: Aatoria própria.

Analisando os valores de forma geral, é possível confirmar a relação de maior densidade na seção onde ocorre a injeção, lado A, quando comparado ao lado oposto do componente, lado B. É possível constatar aumentos no volume de porosidades de 1,4% (Amostra 4) até 7,7% para a amostra 5. Estes aumentos estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6. Comparativo entre a variação de densidade nos extremos dos componentes.

Componente	Aumento de volume de porosidade de A para B (%)
1	1,99
2	1,90
3	2,44
4	1,43
5	7,73
6	2,98

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 7. Média de densidade por percentual de nióbio adicionado.

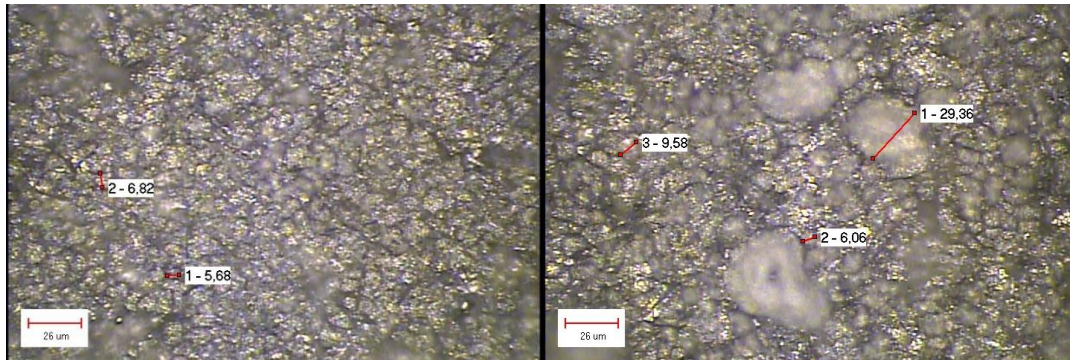
Liga	Densidade média (g/cm ³)
306M	2,6488305
306M + 0,05%Nb	2,659997
306M + 0,075%Nb	2,6589605
SAE 306 –J452	2,71 – 2,72

Fonte: Aatoria própria.

5.4 MICROSCOPIA ÓPTICA

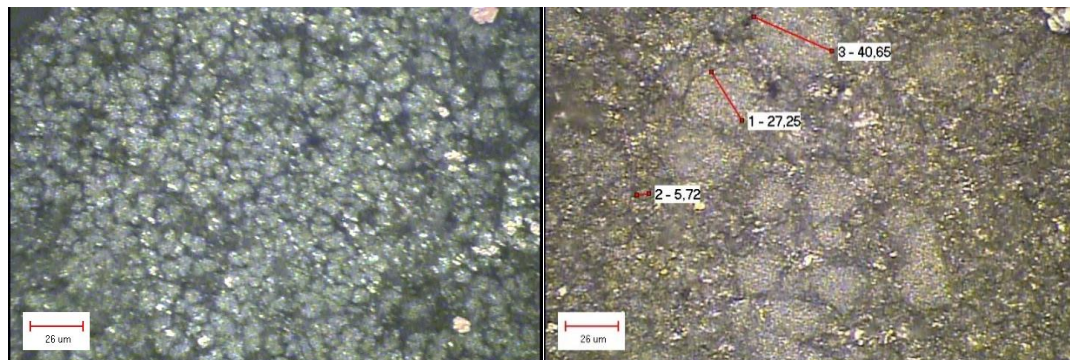
A análise de microscopia óptica foi realizada nas amostras contemplando as 3 condições da liga a fim de mensurar o tamanho médio de grão pelo método dos interceptos.

Figura 32. Imagens das amostras 1 e 2, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.



Fonte: Autoria própria.

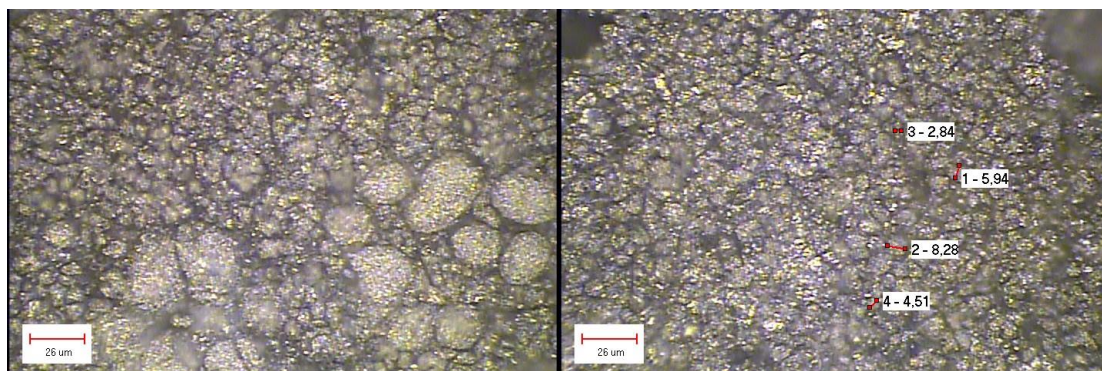
Figura 33. Imagens das amostras 3 e 4, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.



Fonte: Autoria própria.

Devido à grande quantidade de compostos formados e reação da solução de ataque com as amostras, a amostra 3 foi avaliada com luz polarizada, onde a estrutura dos grãos se apresentou de forma mais clara.

Figura 34. Imagens das amostras 5 e 6, respectivamente, com ampliação de 200X e ataque com solução de Poulton.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 8. Dados do ensaio de medição de tamanho médio de grão pelo método dos interceptos.

Condição	Amostra	Contagem de grãos (Ng)	Linhas analisadas (N)	Média aritmética (Md)
0% Nb	1	61	3	20,33
	2	73	4	18,25
0,05% Nb	3	57	3	19,00
	4	70	3	23,33
0,075% Nb	5	53	3	17,67
	6	71	3	23,67

Fonte: Autoria própria.

Tabela 9. Tamanho médio de grão calculado para as condições de amostragem.

Condição	Tamanho médio dos grãos (μm)	Média por condição (μm)
0% Nb	6,39	6,76
	7,12	
0,05% Nb	6,84	6,21
	5,57	
0,075% Nb	7,36	6,43
	5,49	

Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores de tamanho médio dos grãos explicitados na tabela 9, pode-se concluir que o processo de injeção por si só já garante tamanho de grão consideravelmente baixo, principalmente quando comparado com processos como a fundição por gravidade, onde é possível encontrar estrutura, mesmo com agentes refinadores, de até 200 μm . [27]

Mesmo com diferenças relativamente pequenas de tamanho médio de grão, amostras de condição de adição de 0,05% de nióbio apresentaram o valor mais baixo,

seguido das amostras de 0,075% de nióbio, e por fim as amostras sem adição de nióbio com a maior média de tamanho de grão.

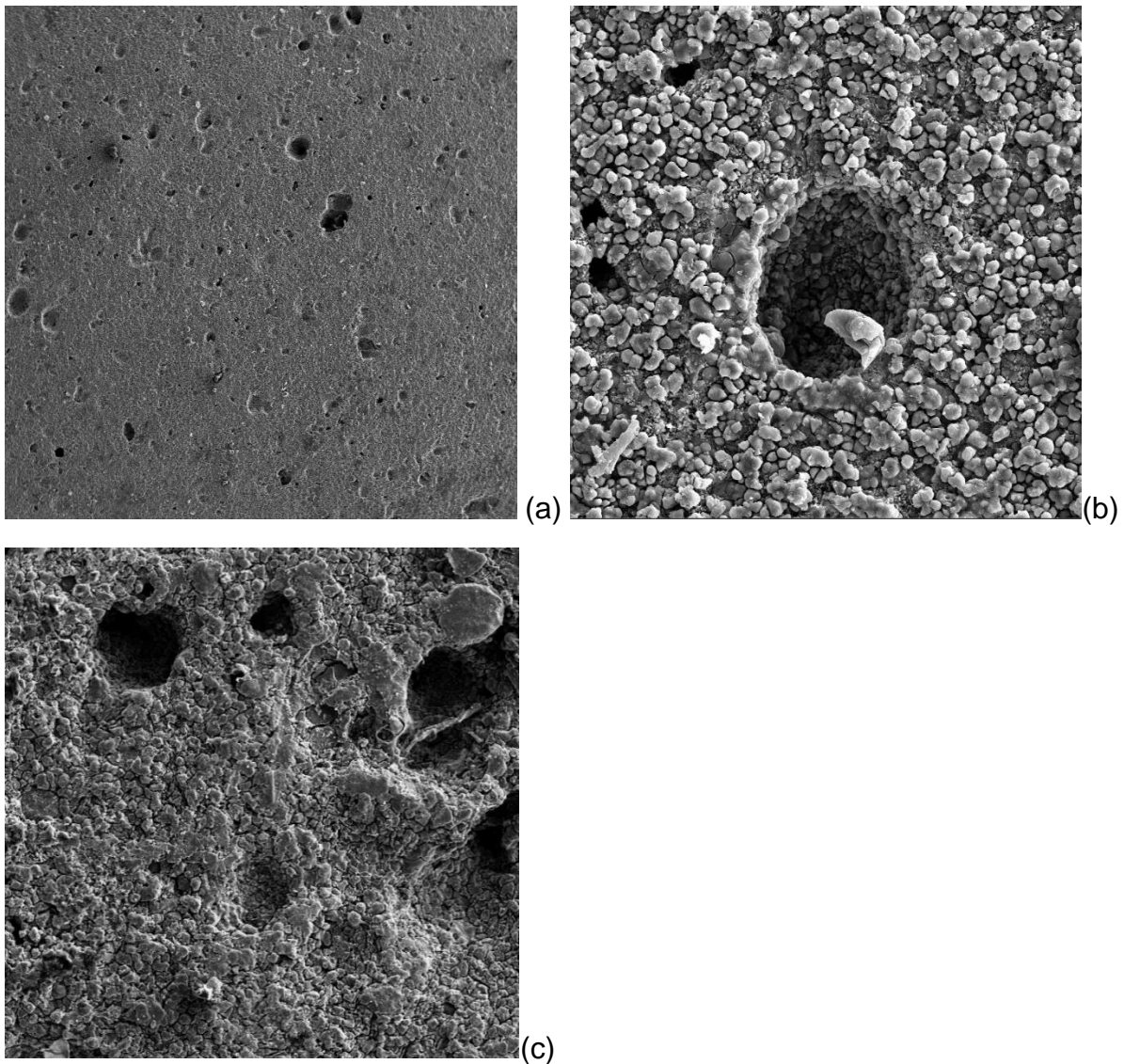
5.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

A microscopia eletrônica de varredura foi adotada com a finalidade de enriquecer as investigações quanto à estrutura formada e o grau de porosidade das amostras.

5.5.1 Porosidades

A Figura 35 expõe as porosidades para diferentes amostras e ampliações.

Figura 35. Porosidade nas amostras (a) Amostra 1 – 80X (b) Amostra 1 – 1000X (c) Amostra 6 – 500X.



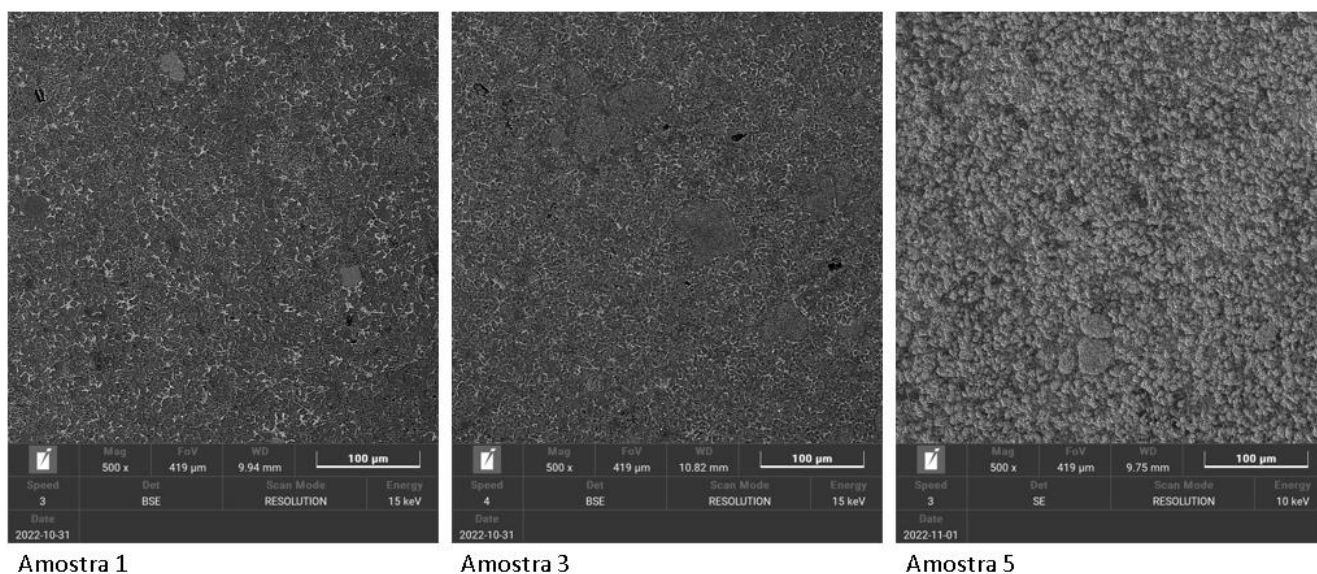
Fonte: Autoria própria.

5.5.2 Tamanho de grão

Devido à grande quantidade de compostos formados, as imagens via MEV apresentam maior dificuldade para análise de tamanho de grão.

Para a Figura 36 foi utilizado o ataque com HF 0,5%, esta solução é comumente utilizada para análise de ligas ou alumínio puro, para avaliação de compostos e presença de impurezas.

Figura 36. Estrutura dos grãos em amostras das 3 condições de teste.



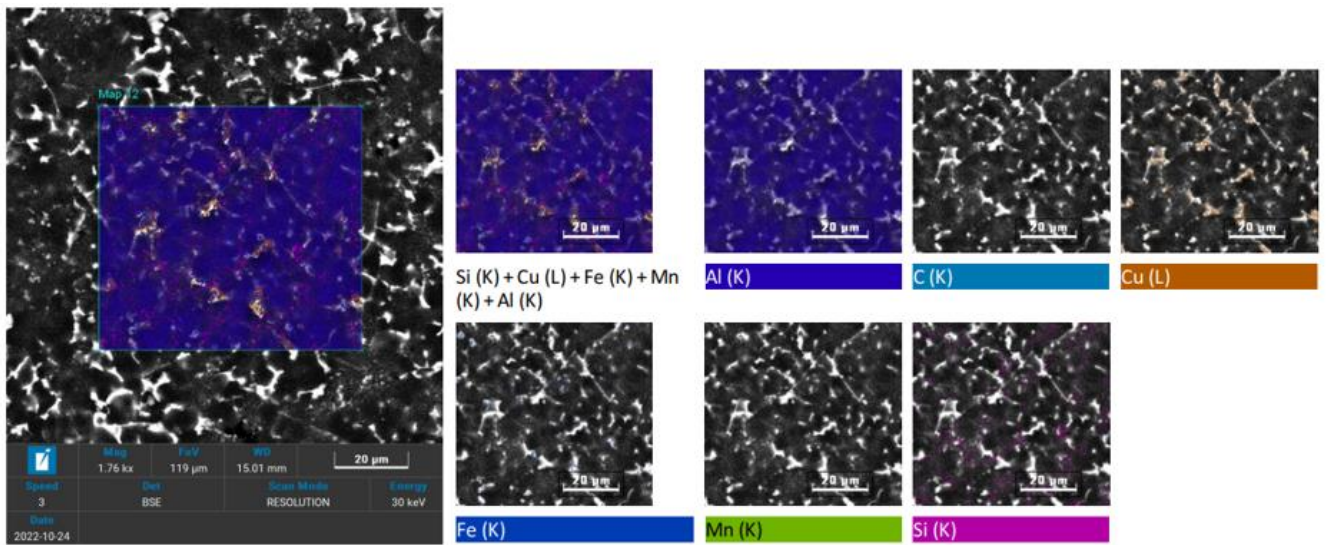
Fonte: Autoria própria.

Como é visto na Figura 36, realizar o comparativo do tamanho de grão formado nas diferentes condições não é a maneira mais eficiente, mesmo que a amostra 3 apresente, visualmente, tamanho de grão levemente menor, seguido da amostra 1, por fim a amostra 5.

5.5.3 Matriz via EDS

Pela difração de raio-x (EDS) é possível constatar a presença dos principais elementos formadores de compostos, como ferro, manganês, silício, cobre e as próprias fases do alumínio como as dendritas de alumínio- α .

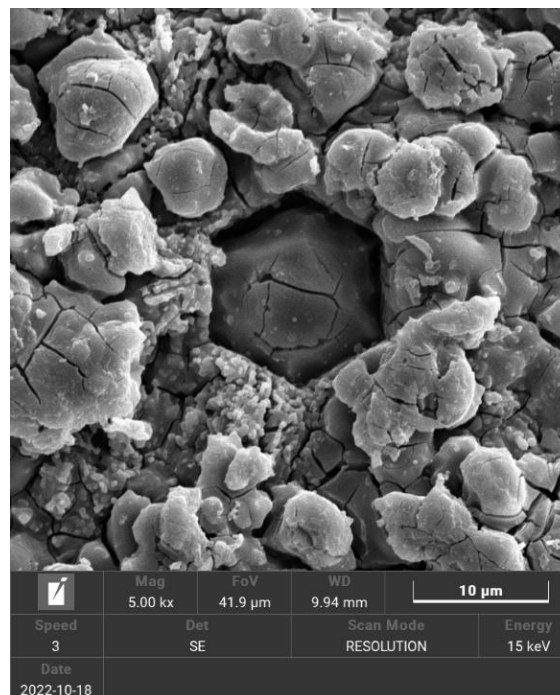
Figura 37. Análise via EDS da amostra 1- Sem ataque- Ampliação de 1760x.



Fonte: Autoria própria.

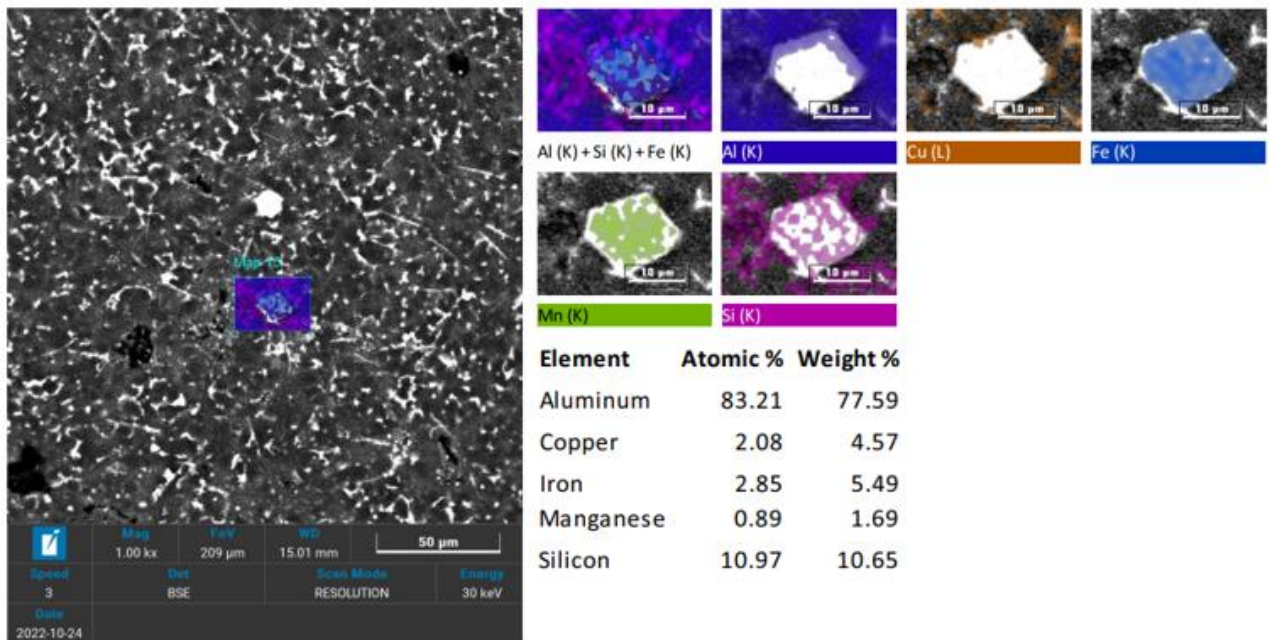
Na Figura 37 é possível verificar a presença dos elementos formadores das fases e precipitados presentes nas amostras analisadas.

Figura 38. Amostra 1 -Indicativo de arrancamento com geometria regular– 5000X.



Fonte: Autoria própria.

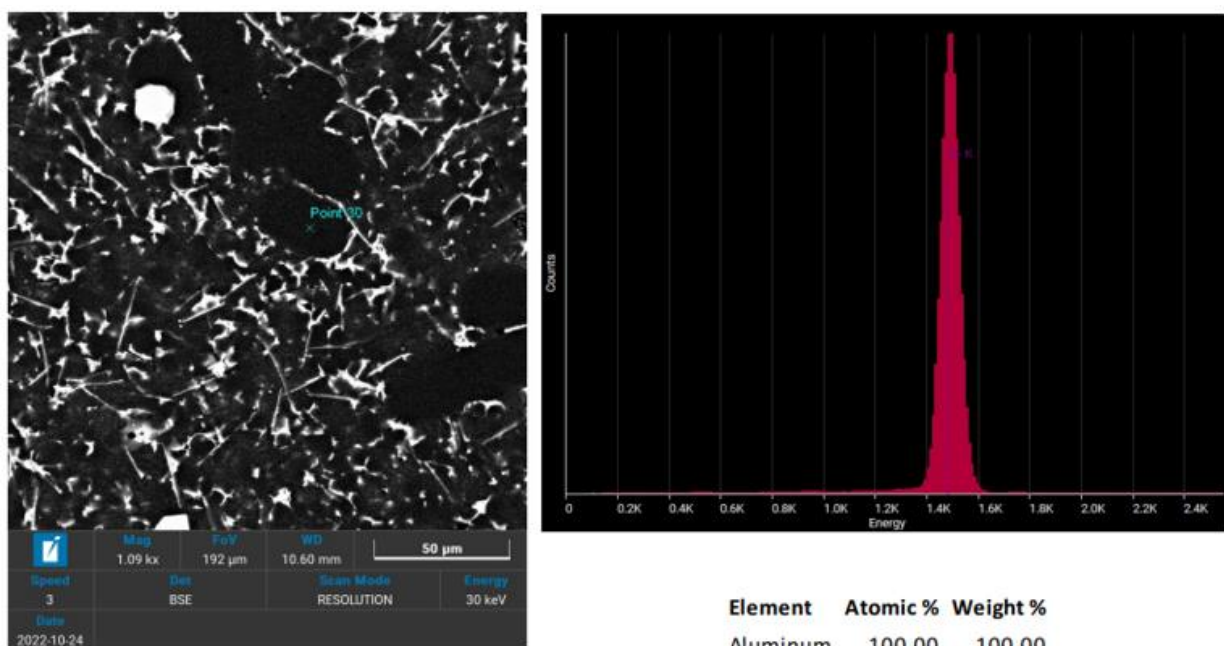
Figura 39. Amostra 1- Sem ataque – 1000X.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 39 verifica-se a presença de composto $\text{Al}(\text{Fe}, \text{Mn})\text{Si}$ primário com formação pré-dendrítica, estes compostos são caracterizados por geometrias regulares, podem ser concentradores de tensão e prejudicar as propriedades mecânicas.

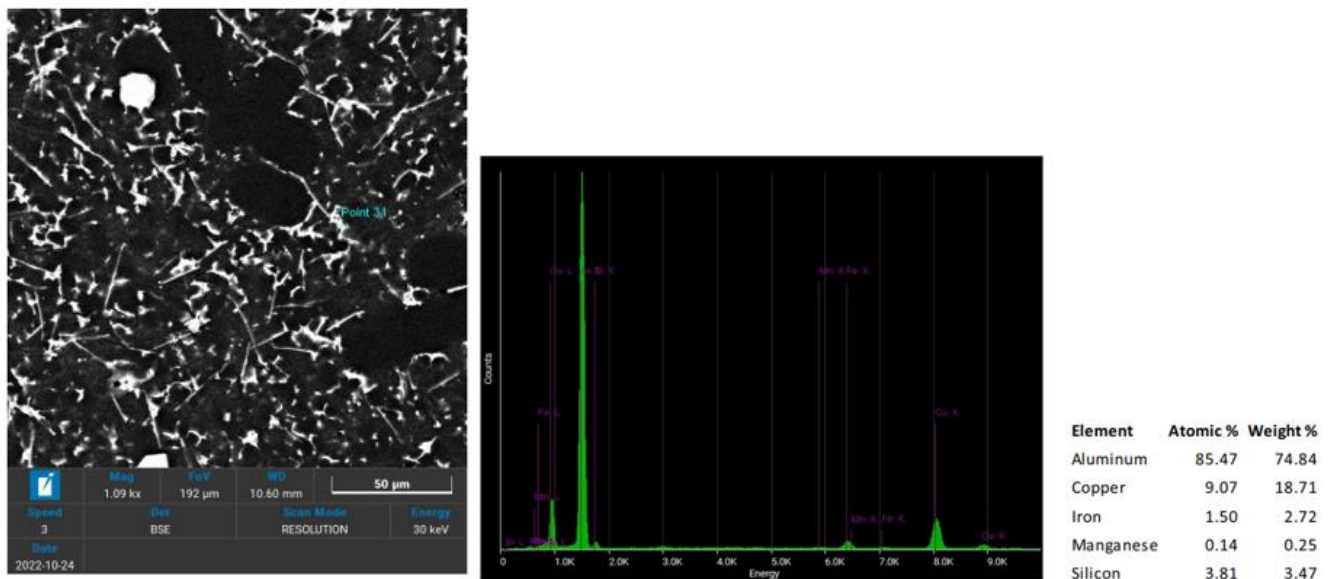
Figura 40. Amostra 3- Ponto de análise 30– Sem ataque – 1000X.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise na Figura 40 foi identificada a matriz de alumínio α bem definida.

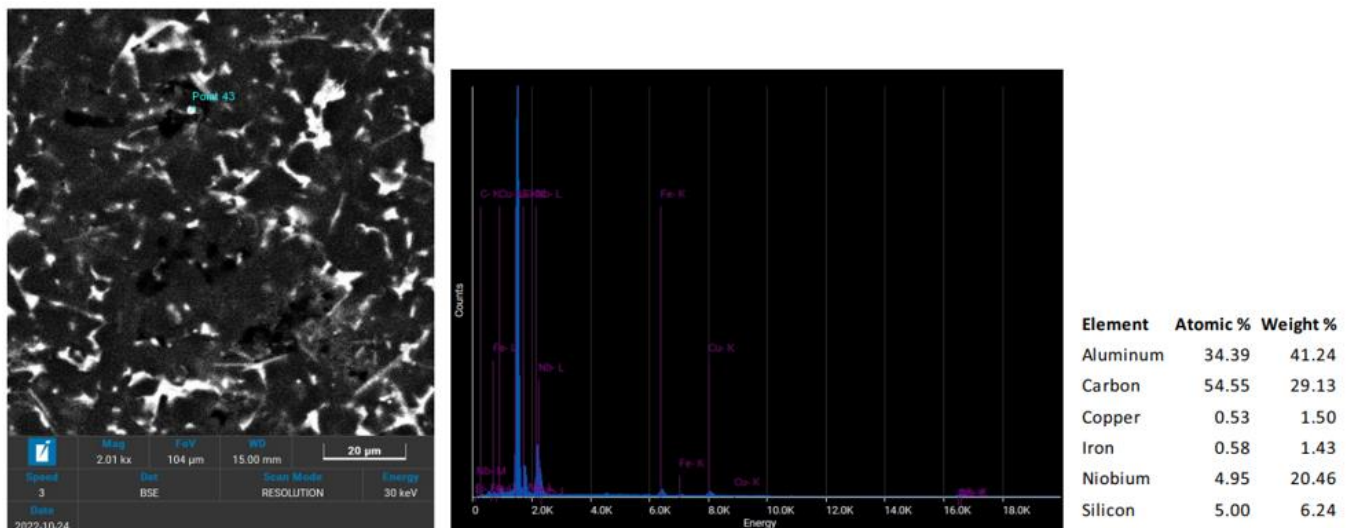
Figura 41. Amostra 3- Ponto de análise 31– Sem ataque – 1000X

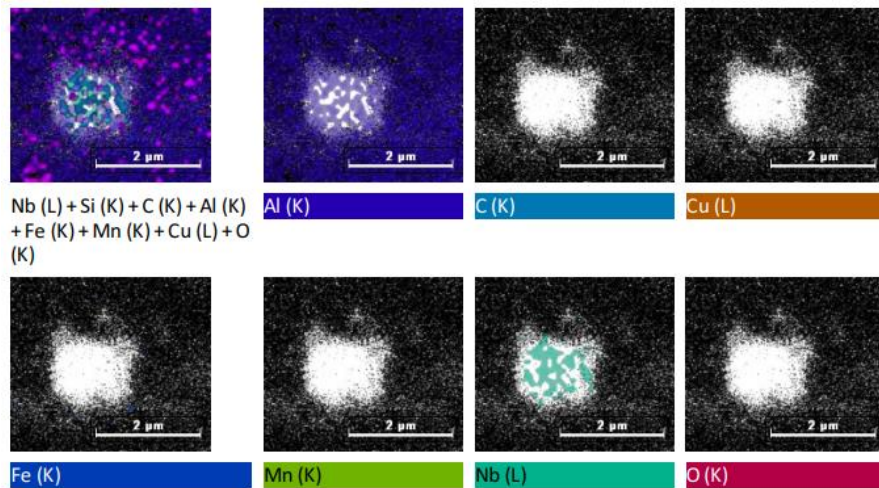


Fonte: Autoria própria.

Presença de Al_2Cu pós dendrítico na Figura 41.

Figura 42. Amostra 5 – Sem ataque – 2000X

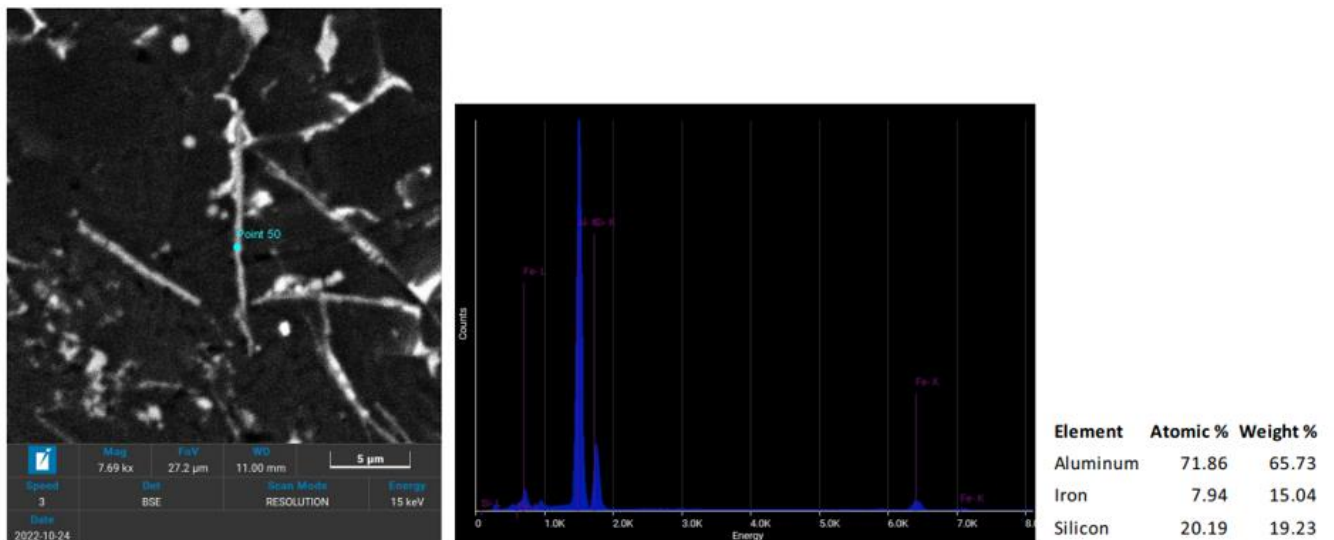




Fonte: Autoria própria.

Constatou-se a presença de precipitados diferentes dos encontrados usualmente na matriz de ligas de alumínio. Com a análise de EDS foi possível confirmar que o precipitado é formado por nióbio não dissolvido na matriz.

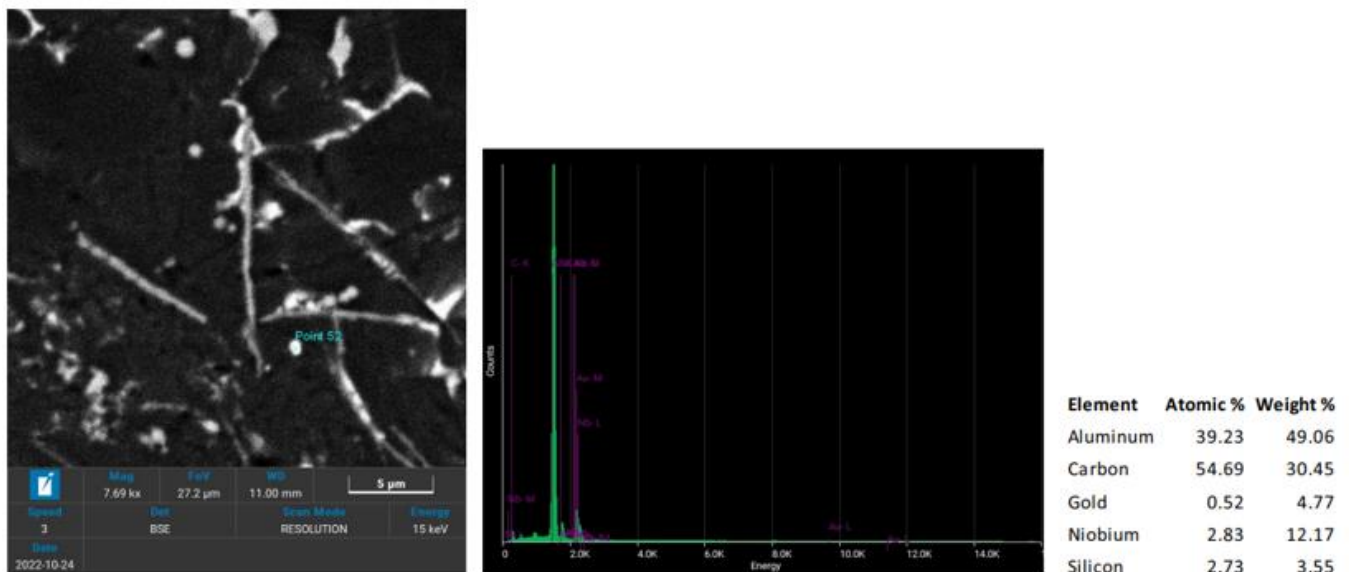
Figura 43. Amostra 5- Ponto 50 – Sem ataque – 7700X



Fonte: Autoria própria.

Composto Al_5FeSi co-eutético, juntamente com $AlSi$ eutético.

Figura 44. Amostra 5- Ponto 52 – Sem ataque – 7700X



Fonte: Autoria própria.

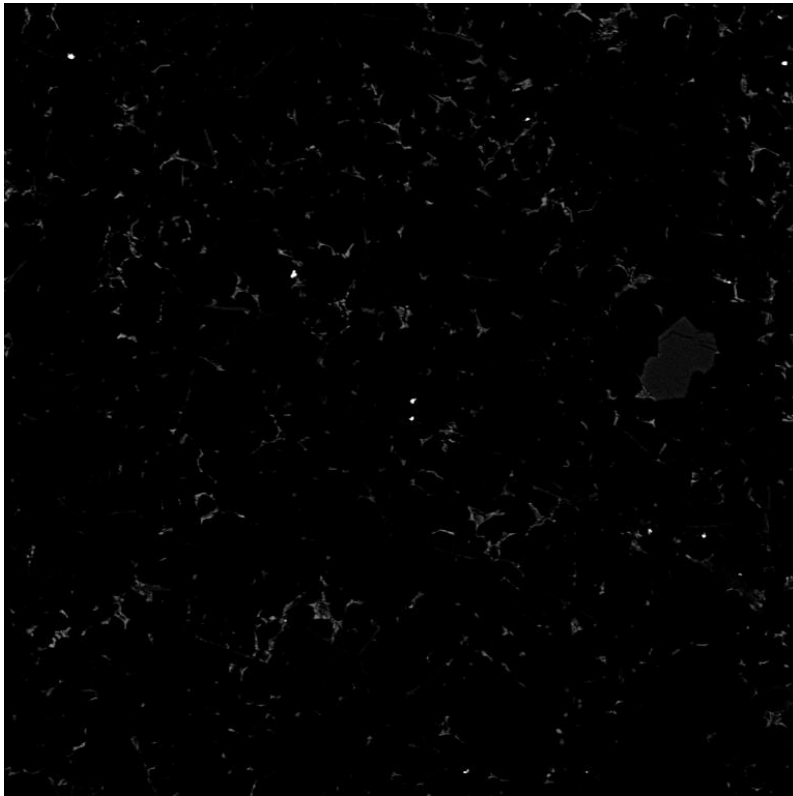
A análise da Figura 44 reforça as características do nióbio precipitado.

5.5.4 Análise em modo BSE

Após constatar a dispersão do que era indicado via EDS como nióbio precipitado, utilizou-se o modo BSE, onde o nióbio apresentaria maior brilho conforme o ajuste de contraste, desta forma pode-se verificar como o elemento está disposto na matriz.

Como o nióbio apresenta maior número atômico, quando comparado aos demais elementos presentes na liga, ele é destacado pelo brilho característico.

Figura 45. Amostra 5- BSE - Contraste moderado - 1000X



Fonte: Autoria própria.

Figura 46. Amostra 5- BSE - Contraste elevado - 500X



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise via BSE é possível verificar que o nióbio está disperso na matriz, não se dispondo de forma aglomerada em uma região específica.

5.6 ENSAIO DE DUREZA BRINELL

Visto que não foi possível avaliar as propriedades mecânicas a partir de corpos de prova padrão devido ao volume restrito de material injetado, o ensaio de dureza Brinell possibilitou o comparativo com o esperado para as ligas injetadas de alumínio.

Tabela 10. Dureza Brinell das amostras avaliadas.

Componente	Dureza (HB)
1A	85
2A	76
3A	80
4A	80
5A	80
6A	87
SAE 306	80

Fonte: Autoria própria.

Os valores de dureza apresentados nas amostras estão de acordo com o esperado para a liga 306 injetada.[9]

5.7 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Tabela 11. Condutividade elétrica das amostras avaliadas.

Componente	Condutividade (%IACS)
1A	28,2
2A	25
3A	24,8
4A	25,8
5A	25,4
6A	25,6
SAE 306M	23,7 a 27,6
SAE 306 J-452	23

Fonte: Autoria própria.

A condutividade elétrica das amostras está de acordo com o esperado para a liga, assim como para as exigências quanto ao componente do presente estudo. [2,9]

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi estudada a influência da adição de diferentes percentuais de nióbio (0,05% e 0,075%) em componentes injetados, avaliando o impacto do nióbio no processo e as variações encontradas entre as propriedades. A principal motivação deriva da escassez de pesquisas envolvendo o nióbio em ligas de alumínio, principalmente em ambiente industrial.

Como o objetivo do estudo se restringiu à avaliação do impacto de adição do nióbio no processo já existente, os procedimentos e parâmetros do processo produtivo se mantiveram os mesmos. Desta forma, foi possível constatar a necessidade de alteração de parâmetros como temperatura e adição dos elementos para obter resultados mais expressivos.

Conclui-se a partir das análises conduzidas que:

- Não houve impacto, negativo ou positivo, no desempenho dos motores elétricos com a adição do nióbio no componente injetado;
- A condição de projeto do motor, que especifica a faixa de condutividade elétrica do componente, se mantém de acordo com o especificado com a adição do nióbio;
- A metodologia para análise de fluidez não foi conclusiva, pois as variações no processo de fundição e de vazamento da liga se mostraram variáveis de maior impacto que as condições de composição das novas ligas.
- Para as amostras do ensaio de fluidez, a temperatura do metal líquido estava levemente acima da temperatura de fusão do alumínio puro (em torno de 660°C), este fato diverge das temperaturas indicadas em literatura de, no mínimo, 720°C para as ligas de alumínio. [4, 9, 13]
- O desvio elevado entre as amostras de fluidez da liga com 0,05% de nióbio pode ser justificado pelo menor tempo até o vazamento dos moldes. Ao se adicionar a massa da liga de adição, a temperatura média do banho cai, devido à energia necessária para fundir e homogeneizar a nova massa, o que prejudica a impacta ainda mais a fluidez do material.
- Em contrapartida ao que foi constatado nos testes de fluidez, tempos maiores entre a fusão do material adicionado no banho, até o vazamento podem resultar na decantação das partículas nucleantes de NbB, na formação de

escória no fundo do forno onde as partículas se concentram, ou na aglomeração de partículas inoculadas. Estes fenômenos também são investigados por Quadro et al. [29] e vão de encontro aos compostos com indicativo de precipitados presentes na liga com 0,075%, que reduzem a capacidade refinadora da liga.

- A liga com 0,05% de nióbio apresentou rendimento satisfatório quanto à incorporação na liga padrão. É necessário avaliar o método de preparo de amostra ou revisar as análises com o percentual de 0,075% de nióbio para concluir se houve realmente incorporação na liga;
- As análises de densidade, tamanho de grão médio e visual via MEV indicam uma estrutura mais refinada para o percentual de adição de 0,05% de nióbio, seguido pela liga com 0,075% de nióbio e, por fim, a liga padrão 306M com o maior tamanho de grão médio.
- A análise BSE via MEV permitiu constatar a presença de um composto, que possui características de nióbio precipitado, disperso na matriz das amostras com adição de 0,075% de nióbio. Este fato coincide com a característica de menor incorporação e aproveitamento do nióbio na liga citada.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HUGHES, A. *Electric Motors and Drives: Fundamentals, Types and Applications*. 3ª Edição. Oxford, Reino Unido: Elsevier Ltd., 2006.
- [2] Arquivo interno- WEG equip. elétricos SA.
- [3] TORQUE CHARACTERISTICS of NEMA DESIGN A, B, C, D & E MOTORS - [nema-abcde-torque-curves.pdf](#)
- [4] MALVAZI, Jefferson. **Injeção de alumínio**. São Paulo: Abal – Associação Brasileira do Alumínio, 2022.
- [5] **FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DO ALUMÍNIO**. São Paulo: Abal – Associação Brasileira do Alumínio, 2007.
- [6] WEG, S. A. *Motores elétricos: Guia de especificação*. WEG, Jaraguá do Sul-SC, 2012.
- [7] INSIDER, Markets. **Commodity Snapshot, Copper**. 2022. Disponível em: <https://markets.businessinsider.com/commodities/copper-price>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- [8] INSIDER, Markets. **Commodity Snapshot, Aluminum**. 2022. Disponível em: <https://markets.businessinsider.com/commodities/aluminum-price>. Acesso em: 27 nov. 2022.
- [9] SAE INTERNATIONAL. **J452: General Information—Chemical Compositions, Mechanical and Physical Properties of SAE Aluminum Casting Alloys**. REV Dec 2003 ed. Us, 2003.
- [10] TOTTEN, George e *et al.* **Handbook of aluminum. Vol. 2, Alloy production and materials manufacturing**. 2. ed. New York: Basel, 2003.
- [11] MONDOLFO, Lucio F., *Aluminum alloys: structure and properties*. London: Butterworths & Co., 1976.
- [12] MINERAÇÃO, Idm - Instituto do Desenvolvimento da. **Nióbio - Entenda um pouco mais sobre esse metal**. Disponível em: <https://idmbrasil.org.br/item/niobio-entenda-um-pouco-mais-sobre-esse-metal-descoberto-no-inicio-de-1800/44/>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- [13] CBMM. **Niobium in Aluminium Cast Parts**. Araxá: Cbmm, 2017.
- [14] COMO é PRODUZIDO O NIÓBIO! #Boravê. Direção de Iberê Thenório. São Paulo: Manual do Mundo, 2020. Color. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=5o6l39uXTTw>. Acesso em: 20 ago. 2021.

- [15] Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani, Electrical Insulation for Rotating Machines – Design, Evaluation, Aging, Testing and Repair – Second Edition, Wiley – IEEE Press, 2014.
- [16] Jabłoński, Michał & Knych, Tadeusz & Smyrak, Beata. (2009). New aluminium alloys for electrical wires of fine diameter for automotive industry. Archives of Metallurgy and Materials. 54. 671–676.
- [17] Burke, J. E. and D. Turnbull. "RECRYSTALLIZATION AND GRAIN GROWTH." Progress in Metal Physics 3 (1952): 220-292.
- [18] S. A. E. WELLS: Proc. Inst. Brit. Foundrymen, 1942-43,36,215.
- [19] M. D. EBORALL: J. Inst. Met., 1949-50,76,295-32.
- [20] EASTON, Mark; STJOHN, David. Grain refinement of aluminum alloys: part I. The nucleant and solute paradigms: A review of the literature. **Metallurgical And Materials Transactions A**, [S.L.], jun. 1999. Springer Science and Business Media LLC.
- [21] LI, Yang; HU, Bin; LIU, Bin; NIE, Anmin; GU, Qinfen; WANG, Jianfeng; LI, Qian. Insight into Si poisoning on grain refinement of Al-Si/Al-5Ti-B system. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 187, p. 51-65, abr. 2020. Elsevier BV.
- [22] METALLURGICAL TRANSACTIONS A, Volume 18A, April 1987, M.M. GUZOWSKI et al., "The Role of Boron in the Grain Refinement of Aluminum with Titanium".
- [23] GREER, A.L; BUNN, A.M; A TRONCHE; EVANS, P.V; BRISTOW, D.J. Modelling of inoculation of metallic melts: application to grain refinement of aluminium by al:ti:b. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 48, n. 11, p. 2823-2835, jun. 2000. Elsevier BV.
- [24] T. W. Clyne, A. M. M. Nazar, M. Prates & G. J. Davies (1978) Grain refinement of aluminium using niobium additions, Metals Technology, 5:1, 302-308.
- [25] ASTM. **ASTM E112-13**: Standard test methods for determining average grain size. Us: Astm, 2013.

- [26] NEWELL, James. **Fundamentos da Moderna Engenharia e Ciência dos Materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2010.
- [27] CHEN, Zongning; WANG, Tongmin; GAO, Lei; FU, Hongwang; LI, Tingju. Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloys by inoculation with Al–B master alloy. **Materials Science and Engineering: A**, [S.L.], v. 553, p. 32-36, set. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.05.088>.
- [28] **USO DO NÍÓBIO COMO REFINADOR DE GRÃO PARA LIGAS DE ALUMÍNIO-SILÍCIO**. Centro Universitário de Volta Redonda: Unifoa, abr. 2016.