



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“EFEITO DA TAXA DE RESFRIAMENTO E REFINADORES DE
GRÃO TITÂNIO E BORO EM LIGAS DE ALUMÍNIO”**

Mariana Luíza Souza da Silva

Ouro Preto, outubro de 2024

Mariana Luíza Souza da Silva

**Efeito da Taxa de Resfriamento e Refinadores de Grão Titânio e Boro em
Ligas de Alumínio**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheira Metalurgista.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Maria Aparecida Pinto

Ouro Preto, outubro de 2024.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586e Silva, Mariana Luiza Souza da.
Efeito da taxa de resfriamento e refinadores de grão titânio e boro em ligas de alumínio. [manuscrito] / Mariana Luiza Souza da Silva. - 2024.
35 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Maria Aparecida Pinto.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Alumínio - Refino de grãos. 2. Alumínio - Liga 6351. 3. Alumínio. 4. Titânio. 5. Boro. I. Pinto, Maria Aparecida. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 620,1

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mariana Luíza Souza da Silva

Efeito da taxa de resfriamento e refinadores de grão titânio e boro em ligas de alumínio

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Metalurgista

Aprovada em 21 de Outubro de 2024

Membros da banca

Dr.^a Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto
Dr.^a Nayara Aparecida Neres da Silva - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto
Engenheiro André Tavares de Oliveira Endo - AMG Brasil

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 26/11/2024



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/11/2024, às 08:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0816109** e o código CRC **A511FD34**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que, nos momentos mais difíceis, provou-me sua existência e foi o sustento que não me deixou desistir. À minha mãe, Maria Marta, que sempre será minha maior inspiração e por me mostrar que, sem esforço e dedicação, não se obtém o sucesso. Aos meus irmãos, Alex e Eduardo, pelo companheirismo e apoio.

Ao meu noivo, Victor, por sempre me motivar a não desistir, pela compreensão nos momentos de ausência e por me lembrar de confiar no meu potencial. Aos meus professores, por me mostrarem a beleza da metalurgia além das salas de aula, em especial à minha orientadora, Dr^a. Maria Aparecida, por ser atenciosa, paciente e me tranquilizar a cada conversa.

Às amigas que fiz ao longo dessa trajetória e que tornaram essa caminhada mais leve.

Aos funcionários dos laboratórios do DEMET, em especial ao Paulo, Denilson e Sidnei, que foram peças fundamentais para realização deste trabalho. Ao Laboratório de Ensaio Mecânico do IFMG-OP, na pessoa do professor Dr Rhelman Queiroz.

À empresa AMG Brasil, na figura do engenheiro metalurgista André Endo, por ceder o material necessário para a realização deste trabalho.

No mais, sou grata a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O alumínio, sendo o terceiro elemento mais abundante no mundo, apresenta notável eficiência e vantagens em diversas aplicações industriais devido à sua leveza, durabilidade e resistência à corrosão. As ligas de alumínio desempenham um papel crucial ao conferir resistência mecânica, ductilidade e leveza aos produtos sem comprometer outras propriedades. O refino de grãos, um processo chave na metalurgia do alumínio, bem como o efeito da taxa de resfriamento foram analisados neste trabalho para corpos de prova na liga 6351 produzidos em molde de areia e em coquilha de aço, com foco na microestrutura e comportamento mecânico. As amostras foram caracterizadas microestruturalmente por microscopia óptica e eletrônica de varredura, quanto às propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração e microdureza. As amostras produzidas em molde metálico apresentaram uma estrutura bem mais refinada quando comparada às microestruturas das amostras produzidas em molde de areia. Verificou-se a presença da fase Mg_2Si , na forma de escrita chinesa na amostra fundida em molde de areia, e da fase quaternária $Al(FeMn)Si$. Nas amostras fundidas em coquilha ficou mais evidente a formação de precipitados nos contornos das dendritas e maior quantidade de porosidade o que pode ter contribuído de forma negativa para as propriedades mecânicas avaliadas. O comportamento das amostras em tração e microdureza não correspondeu ao que se esperava, visto que as amostras produzidas em areia apresentaram maior resistência mecânica e alongamento, mesmo com estrutura mais grosseiras. Acredita-se que a menor resistência mecânica das amostras fundidas em coquilha foi devido à maior quantidade de porosidade presente.

Palavras-chave: Refino de grão. Liga 6351. Alumínio. Titânio. Boro.

ABSTRACT

Aluminum, being the third most abundant element in the world, presents remarkable efficiency and advantages in several industrial applications due to its lightness, durability and corrosion resistance. Aluminum alloys play a crucial role in conferring greater mechanical strength to products without compromising other properties. Grain refining, a key process in aluminum metallurgy, as well as the effect of the cooling rate were analyzed in this work for specimens in the aluminum alloy 6351 produced in sand mold and in metallic mold, focusing on the microstructure and mechanical behavior. The samples were characterized microstructurally by optical and scanning electron microscopy, regarding the mechanical properties through tensile test and microhardness tests. The samples produced in a metallic mold presented a much more refined structure when compared to the microstructures of the samples produced in a sand mold. The presence of the Mg_2Si phase, in the form of “Chinese script”, and the quaternary phase $Al(FeMn)Si$ were observed. In the samples casting in metallic mold, the formation of precipitates in the contours of the dendrites was more evident. The samples cast in a metallic mold showed a greater amount of porosity, which may have contributed negatively to the mechanical properties evaluated. The behavior of the samples in tensile and microhardness did not correspond to what was expected, since the samples produced in sand mold showed greater mechanical resistance and elongation, even with a coarser structure. It is believed that the lower mechanical resistance of the samples cast in a metallic mold was due to the greater amount of porosity present.

Keyword: Refining. Alloy 6351. Aluminum. Titanium. Boron

LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 -Al-Ti final do diagrama de fase	18
Figura 3. 2 - Tratamento de refino de grão. (esquerda: sem tratamento; direita: com tratamento).....	19
Figura 3. 3 - Forma esquemática do comportamento do tamanho de grão em relação ao tempo após a adição de refinador de grão à liga de alumínio fundido	21
Figura 3. 4 - Eficiências de titânio e boro no refino de ligas de alumínio	21
Figura 5. 1 - Moldes de areia e coquilha.....	25
Figura 5. 2 - Modelo em resina e amostras fundidas em areia.....	25
Figura 5. 3 - Amostra fundida em coquilha.....	25
Figura 5. 4 – Microscopia óptica da estrutura das amostras produzidas em molde de areia (a) e coquilha (b).....	26
Figura 5. 5 - Microscopia eletrônica de varredura da estrutura das amostras produzidas em molde de areia (a) e coquilha (b)	27
Figura 5. 6 - Segundas fases precipitadas: Mg ₂ Si (setas vermelhas) e Al(FeMn)Si (setas azuis)	28
Figura 5. 7 - Análise elementar via MEV/EDS	28
Figura 5. 8 - Detalhe da precipitação de fase nos contornos das dendritas da amostra fundida em coquilha	29
Figura 5. 9 - Corpos de prova para ensaio de tração.....	29
Figura 5. 10 - Resultados dos ensaios de tração das amostras	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 3. 1 - Composição química da liga 6351	17
Tabela 5. 1 - Microdureza Vickers.	31

LISTA DE SIGLAS

ABAL- Associação Brasileira do Alumínio

AMG- Advanced Metalurgical Group

ASTM- American Society for Testing and Materials

CP – Corpo de Prova

DEMET- Departamento de Engenharia Metalúrgica

EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva

EM- Escola de Minas

IFMG- OP – Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto

LTM- Laboratório de Tratamento Térmico e Microscopia Óptica

REDEMAT- Rede Temática em Engenharia de Materiais

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscopia Óptica

UFOP- Universidade Federal de Ouro Preto

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo Geral	10
2.2	Objetivos Específicos.....	10
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1	Alumínio e suas ligas	11
3.1.1	Ligas de alumínio.....	12
3.1.2	Ligas da série 6XXX.....	14
3.2	Refinadores de Grão para Alumínio	17
3.3	Efeito do refino de grão.	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1	Produção das Amostras	25
5.2	Caracterização Microestrutural	26
5.3	Ensaio de tração.....	29
5.4	Microdureza.....	31
6	CONCLUSÕES	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	33

1 INTRODUÇÃO

O alumínio, que é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, tem ganhado bastante destaque na indústria devido às suas características únicas de ser leve, durável e atrativo (Dall Onder, 2015). Essas qualidades têm impulsionado sua utilização em uma variedade de aplicações, tornando os produtos mais competitivos com suas vantagens, como resistência à corrosão, maleabilidade e soldabilidade (ABAL, 2023). A Associação Brasileira de Alumínio (ABAL) destaca sua versatilidade técnica para diversas áreas da engenharia e sua adaptação a vários processos de fabricação (ABAL, 2023).

No que diz respeito às ligas de alumínio, as composições foram desenvolvidas para oferecer maior resistência mecânica sem comprometer as propriedades do alumínio puro. Ao combinar elementos de liga com o alumínio, essas ligas podem alcançar uma resistência até 30 vezes maior do que o alumínio puro (Dall Onder, 2015). A classificação de ligas, como a definida pela *Aluminum Association*, permite a escolha de ligas específicas para aplicações particulares, visando propriedades desejadas (ABAL, 2007).

O processo de refinamento de grãos em ligas de alumínio é um procedimento crucial que envolve a adição de partículas nucleantes para melhorar as propriedades finais do material. A eficácia do uso de elementos, como o titânio, é bem documentada e a otimização desse processo requer um entendimento aprofundado de fatores operacionais e das proporções apropriadas de elementos (Robert, 1979). A introdução cuidadosa de partículas refinadoras no metal líquido é uma abordagem eficaz para promover o desenvolvimento de uma estrutura granular uniforme e de grãos menores (AMG Brasil, 2023).

A busca por refinadores de grãos mais eficientes e sua aplicação adequada são áreas de pesquisa contínua, conforme destacado por Kearns, Thistlethwaite e Cooper (1996). Além disso, as complexas interações entre elementos de liga, como boro e titânio, desempenham um papel fundamental no refinamento de grãos em ligas de alumínio, conforme apontado por Moreira (2011). Este estudo explora a evolução do processo de refinamento de grãos em ligas de alumínio, focando em estratégias de aprimoramento e nas influências dos elementos de liga, contribuindo para um entendimento mais profundo desses processos na indústria metalúrgica.

Neste trabalho foram elaboradas amostras da liga de alumínio 6351 fundidas em molde de areia e em molde metálico com a utilização de refinadores de grão a base de titânio e boro. As amostras foram caracterizadas microestruturalmente por microscopia óptica e eletrônica de varredura e quanto às propriedades mecânicas por meio de ensaios de tração e microdureza.

2 OBJETIVOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram determinados os seguintes objetivos:

2.1 Objetivo Geral

Analisar a ação dos refinadores de grão Ti e B e da taxa de resfriamento no comportamento da liga de alumínio 6351 em amostras produzidas em molde de areia e molde metálico.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar e compreender a ação de refinadores de grão em ligas de alumínio;
- Avaliar a atuação do TiBAl 5/1 no refino de grão da liga de alumínio 6351 em corpos de prova fundidos em molde de areia e molde metálico;
- Analisar e comparar o efeito da taxa de resfriamento nas estruturas e propriedades de corpos de prova da liga 6351 fundidos em molde de areia e molde metálico;

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados aspectos da revisão bibliográfica relacionados às principais características da liga de alumínio 6351, os refinadores de grão mais utilizados na preparação dessa liga e seus efeitos sobre a microestrutura e propriedades mecânicas.

3.1 Alumínio

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante no mundo, mas em escala industrial é o metal mais recente já utilizado (Dall Onder, 2015) sendo relativamente novo no cenário industrial. Apresentando características de leveza, durabilidade e atratividade, o alumínio revela-se notavelmente eficiente e com propriedades superiores em grande parte das aplicações. Produtos que fazem uso do alumínio também se tornam mais competitivos devido à incorporação de suas numerosas qualidades, como sua leveza, durabilidade, resistência à corrosão, maleabilidade, soldabilidade, entre outras (ABAL, 2023).

De acordo com a ABAL, o alumínio é um metal que possui excelente combinação de propriedades que resultam em uma adequabilidade técnica para um campo extraordinário de aplicações na engenharia, além da facilidade de ser conformado por meio de processos metalúrgicos convencionais e, assim sendo, viável à indústria de manufatura em qualquer forma desejável (ABAL, 2023).

O alumínio possui características importantes das quais vale destacar: as características de barreiras à luz, impermeabilidade à ação da umidade e do oxigênio, tornando a folha de alumínio um dos materiais mais versáteis no mercado de embalagens. O mesmo metal também possui características “não-tóxicas” permitindo sua utilização em utensílios domésticos, sem qualquer efeito nocivo ao organismo humano, sendo muito utilizado em equipamentos na indústria alimentícia (ABAL, 2023).

As notáveis propriedades físico-químicas do alumínio, como sua baixa densidade, resistência à corrosão, alta condutividade térmica e elétrica, juntamente com sua capacidade de ser reciclado infinitamente, conferem ao metal uma grande versatilidade. Essa versatilidade possibilita sua aplicação em uma ampla variedade de setores (ABAL, 2023).

O alumínio fundido solubiliza outros metais e elementos metalóides, como, por exemplo, o silício que atua neste aspecto como metal. As ligas de alumínio podem ter vários elementos de liga dissolvidos dentre eles Zn, Mg, Cu, Si, Mn que são os principais causadores

do endurecimento por precipitação, e Mn que é o principal causador do endurecimento por encruamento (ABAL, 2007).

Quando o alumínio solidifica, alguns dos constituintes da liga podem ser retidos em solução sólida. Isso faz com que a estrutura atômica do metal se torne mais rígida (ABAL, 2023). Para as ligas tratáveis termicamente, como é o caso da liga 6351, ocorre o mecanismo de endurecimento por precipitação com a formação principalmente do Mg_2Si que atua melhorando o limite de resistência e a ductilidade do material (Alfonso *et al.*, 2006).

3.1.1 Ligas de alumínio

As ligas de alumínio fazem parte de um grupo específico de ligas metálicas que têm como principal finalidade conferir maior resistência mecânica aos produtos em que são empregadas, sem prejudicar as demais propriedades do metal principal. Nesses tipos de ligas, o elemento principal é o alumínio e, em algumas situações, a liga pode ser composta exclusivamente por esse metal, alcançando um grau de pureza de aproximadamente 99%, apresentando características de engenharia para aplicações como no caso de condutores de eletricidade (ASM Engenharia, 2022).

Após o processo de fusão, as ligas de alumínio adquirem características e propriedades particulares, típicas dos elementos utilizados. As ligas passam a apresentar maior capacidade de condução térmica e elétrica, além de ganhar brilho e resistência mecânica a depender do tipo de elemento de liga adicionado e ao processamento ao qual o material é submetido (ligas da série 6xxx ficam foscas e escurecidas após solubilizadas T4) (ASM Engenharia, 2022).

Uma das razões pelas quais as ligas de alumínio são tão atrativas como materiais para construção mecânica é devido à capacidade do alumínio de se combinar com a maioria dos metais de engenharia, chamados de elementos de liga. Essa combinação resulta em ligas que podem oferecer características tecnológicas ajustadas de acordo com a aplicação do produto final. É importante notar que uma única liga não pode abranger todas as propriedades ideais para cada aplicação específica. Portanto, é necessário entender as vantagens e limitações de cada liga para fazer a melhor seleção de acordo com a necessidade (ABAL, 2007).

As ligas de alumínio podem atingir até 30 vezes a resistência mecânica do alumínio puro, em função dos mecanismos de endurecimento proporcionados pelos elementos de liga apresentando resultados satisfatórios para aplicações específicas (Dall Onder, 2015).

As ligas de alumínio, atualmente, são utilizadas na engenharia de diversas formas, como em utensílios de cozinhas, carros, aviões, entre várias outras aplicações. Tais ligas, são classificadas como trabalháveis ou fundidas que podem ser tratáveis ou não tratáveis termicamente (Freitas, 2014).

Foram desenvolvidas nomenclaturas para as ligas fundidas e trabalhadas. O sistema da *Aluminum Association* é mais reconhecido e seu sistema de identificação de ligas emprega diferentes nomenclaturas para ligas trabalháveis e fundidas, mas divide as ligas em famílias para simplificação. Para ligas trabalháveis, um sistema de quatro dígitos é usado para identificar as famílias de composições como se segue:

Série 1xxx - Composições não ligadas (puras) controladas;

Série 2xxx - Ligas nas quais o cobre é o principal elemento de liga, embora outros elementos, principalmente o magnésio, possam ser especificados;

Série 3xxx – Ligas em que o manganês é o principal elemento de liga;

Série 4xxx – Ligas em que o silício é o principal elemento de liga;

Série 5xxx – Ligas em que o magnésio é o principal elemento de liga;

Série 6xxx – Ligas nas quais o magnésio e o silício são os principais elementos de liga;

Série 7xxx – Ligas nas quais o zinco é o principal elemento de liga, mas outros elementos como cobre, magnésio, cromo e zircônio podem ser especificados;

Série 8xxx – Ligas incluindo estanho e algumas composições com lítio;

Série 9xxx - Reservado para uso futuro.

As composições de ligas para fundição são descritas por um sistema de três dígitos seguido por um valor decimal. O decimal *.0* em todos os casos refere-se aos limites da liga fundida. Os decimais *.1* e *.2* referem-se a composições de lingotes que, após fusão e processamento, devem resultar em produtos químicos em conformidade com os requisitos de especificação de fundição. As famílias de ligas para composições de fundição são:

Série 1xx.x - Composições não ligadas (puras) controladas, especialmente para fabricação de rotores;

Série 2xx.x - Ligas em que o cobre é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga podem ser especificados;

Série 3xx.x – Ligas em que o silício é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga como cobre e magnésio são especificados;

Série 4xx.x – Ligas em que o silício é o principal elemento de liga;

Série 5xx.x – Ligas em que o magnésio é o principal elemento de liga;

Série 6xx.x - não utilizada;

Série 7xx.x - Ligas nas quais o zinco é o principal elemento de liga, mas outros elementos de liga como cobre e magnésio podem ser especificados.

Série 8xx.x - Ligas em que o estanho é o principal elemento de liga;

Para as ligas tratáveis termicamente, adota-se um sistema de codificação que classifica diferentes níveis de endurecimento obtidos por meio de manipulações mecânicas e térmicas. A *Aluminum Association* estabelece as seguintes designações:

- **F** – Conforme Fabricado: Referente a produtos resultantes de processos de conformação mecânica, como laminação e extrusão.
- **O** - Recozido: Aplicado a produtos inicialmente sujeitos a trabalho mecânico e depois submetidos a um processo de recozimento para reduzir a resistência mecânica. Também é empregado em produtos fundidos que passam por um recozimento para aumentar a ductilidade e a estabilidade dimensional. A letra "O" pode ser acompanhada por um número distinto de zero.
- **W** - Solubilizado: Uma têmpera instável utilizada exclusivamente em ligas que envelhecem naturalmente à temperatura ambiente após a solubilização.
- **H** - Endurecida: Aplicada a produtos dúcteis que foram endurecidos por conformação plástica e que possivelmente passarão por tratamento térmico subsequente para controlar o grau de endurecimento.
- **T** - Termicamente tratado para obter têmperas estáveis diferentes de F, O ou H: Aplicado a produtos que passaram por tratamento térmico, com ou sem deformação adicional, para alcançar uma têmpera estável (Bresciani Filho *et al.*, 2011).

3.1.2 Ligas da série 6XXX

Ligas da série 6xxx contêm silício e magnésio aproximadamente nas proporções requeridas para a formação do silicato de magnésio (Mg_2Si), tornando-as tratáveis

termicamente. A série 6xxx é a que possui a maior variedade de ligas. Apesar de não ser tão resistente quanto as ligas das séries 2xxx e 7xxx, ligas da série 6xxx têm boa conformabilidade, soldabilidade, usinabilidade e resistência à corrosão, com média a elevada resistência mecânica (Limite de resistência à tração 290MPa; Limite de escoamento 255MPa; Alongamento 10% para a condição de tratamento T6). Ligas neste grupo podem ser conformadas na condição de tempera T4 (solubilização sem envelhecimento artificial) e endurecidas após a conformação via tratamento térmico T6 (solubilizada e envelhecida artificialmente) (Bray, 1992).

Nas últimas décadas, vários esforços de pesquisa se concentraram no processamento por extrusão de alumínio. O objetivo desses estudos tem sido correlacionar a microestrutura e as condições de processamento para melhorar a extrudabilidade. Para a série de ligas de alumínio 6XXX, o estudo da dispersão de Mg_2Si e das transformações dos intermetálicos de Fe são uma característica crucial (Samaras; Haidemenopoulos, 2007).

O material fundido possui baixa conformabilidade devido às seguintes heterogeneidades na microestrutura (Samaras; Haidemenopoulos, 2007):

- a. Microsegregação, segregação nas fronteiras de grão, eutéticos de baixo ponto de fusão e compostos intermetálicos frágeis;
- b. Soluções supersaturadas de precipitados finamente dispersos dos componentes de liga (por exemplo, Al_6Mn , $AlFeMn$, Mg_2Si , $AlFeSi$, $Al_{13}Fe_4$) aumentam a tensão de fluência a altas temperaturas.
- c. Certos elementos de liga, incluindo manganês, ferro e zircônio, seja em solução sólida ou como precipitados finamente dispersos, retardam a recristalização. Esse efeito é particularmente significativo na extrusão de ligas $AlMgSi(Mn)$ para anodização colorida e também se o efeito de extrusão (inibição da recristalização) for utilizado.

O magnésio e o silício são dois elementos básicos nas ligas da série 6xxx para formar o Mg_2Si que, após tratamento térmico de solubilização e envelhecimento artificial, precipita de forma coerente com a matriz melhorando as propriedades mecânicas das ligas. O manganês é geralmente adicionado às ligas para formar dispersóides contendo manganês, a fim de retardar a recristalização. O ferro é a principal impureza nas ligas e forma fases intermetálicas prejudiciais. A influência dos elementos de liga na microestrutura e nas propriedades mecânicas tem sido amplamente investigada. No entanto, seu efeito no processo de solidificação das ligas recebeu menor atenção.

O comportamento em solidificação das ligas binárias Al-Mg é relativamente simples. Após uma solidificação lenta, as ligas apresentam uma estrutura monofásica α -Al, mesmo quando o teor de magnésio nas ligas é bastante elevado, como pode ser observado no diagrama de equilíbrio do sistema Al-Mg apresentado na Figura 3.1.

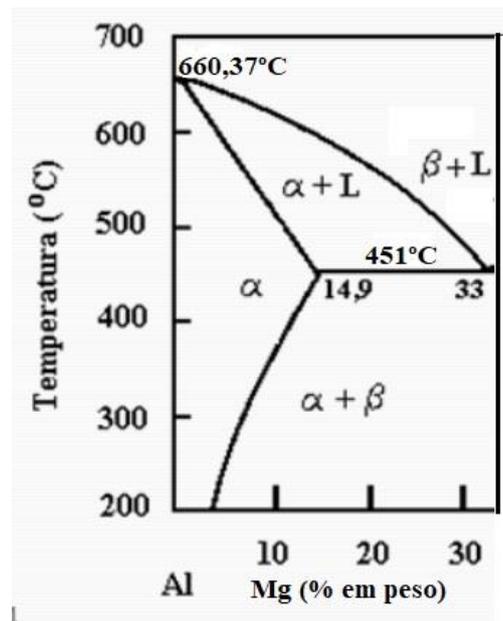


Figura 3. 1 - Diagrama de equilíbrio do sistema Al-Mg
Fonte: Adaptado de INFOMET, 2024

As ligas Al-Mg-Si, com menos de 2% em peso de Mg e menos de 1% em peso de Si, a microestrutura como fundido é bastante complicada. Isso significa que a adição de silício tem grande influência no caminho de solidificação das ligas. É de interesse comercial estudar o processo de solidificação das ligas e a formação dessas fases intermetálicas (Liu; Kang, 1997).

No processo de solidificação de ligas de alumínio trabalhadas, há uma característica comum que é a reação peritética: $L \rightarrow \alpha Al + L_1$ é o principal evento durante a solidificação. No entanto, o comportamento de solidificação da zona solidificada final difere entre si. Para as ligas Al-Mg-Si, a precipitação da fase primária α -Al rejeita os solutos na interface sólido-líquido, o que resulta no aumento das concentrações de solutos (Liu; Kang, 1997).

A microsegregação no alumínio é resultado da baixa solubilidade dos elementos de liga no sólido em relação ao líquido. A baixa solubilidade no estado sólido leva à formação de fases secundárias na microestrutura como fundido. O tamanho e a morfologia dessas fases dependem da composição química, do espaçamento entre os braços dendríticos, do tamanho dos grãos e do tempo local de solidificação (Samaras; Haidemenopoulos, 2007).

O ferro tem uma forte tendência à segregação, de modo que a maioria dos átomos de ferro se concentra no líquido remanescente. Embora o teor de ferro nas ligas de alumínio seja muito baixo, na fase final de solidificação sua concentração pode atingir níveis bastante altos. Assim que a composição eutética é alcançada, uma fase intermetálica contendo ferro precipita. Com a queda da temperatura e quando as concentrações de magnésio e silício no líquido residual atingem o ponto eutético, forma-se a estrutura eutética Mg_2Si . Devido à segregação não homogênea dos solutos, algumas áreas contêm concentrações bastante altas de magnésio, silício, ferro e manganês. Portanto, a liga apresenta uma temperatura final de solidificação mais baixa. Por fim, a reação eutética ternária ocorre e o caminho de solidificação se encerra. A partir do processo de solidificação das ligas, pode-se deduzir que o ferro e o manganês têm uma grande influência no processo de solidificação e na microestrutura como fundido. Embora seu teor seja muito baixo, seu efeito não pode ser ignorado (Liu; Kang, 1997).

A composição química de referência da liga 6351, foco deste trabalho, é apresentada na Tabela 3.1, com destaque para os elementos Si, Mn e Mg.

Tabela 3. 1 - Composição química da liga 6351 (% em peso)

Designação	Densidade (g/cm ³)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros cada	Outros total	Alumínio mínimo
6351	2,71	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-0,8	0,40-0,8	-	0,20	0,20	0,05	0,15	Restante

Fonte: AMG Brasil, 2024

De acordo com Bray (1992), a liga 6351 é amplamente utilizada em diversas aplicações, incluindo estruturas extrudadas para veículos rodoviários e ferroviários, além de tubulações para transporte de água, óleo e gasolina e produção de parafusos e rebites.

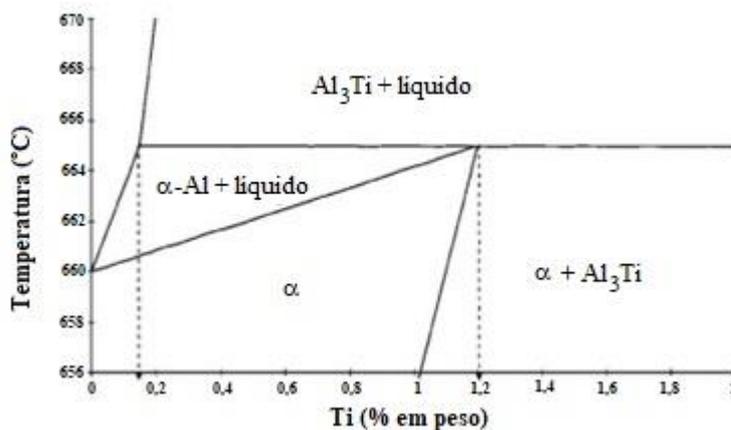
3.2 Refinadores de Grão para Ligas de Alumínio

O processo de refinamento de grãos envolve a obtenção de grãos de tamanho reduzido e orientação mais uniforme por meio da adição controlada de inoculantes na fase líquida do metal antes da sua solidificação, o que promove o fenômeno conhecido como nucleação heterogênea. Esse procedimento visa aprimorar a homogeneidade do material, bem como melhorar suas propriedades mecânicas, diminuindo porosidades, fraturas em altas temperaturas e contribuindo para uma maior usinabilidade das peças. Essa prática, consolidada na indústria do alumínio, é realizada há bastante tempo (Quadro; Sabariz; Raposo, 2016).

Segundo Quadro, Sabariz e Raposo (2016), globalmente, o método predominante para realizar o refinamento de grãos é a utilização de ligas refinadoras à base de alumínio, titânio e boro (TiBAl). Essas ligas contêm duas categorias de partículas. A primeira delas é o diboreto de titânio (TiB_2), uma partícula cerâmica altamente estável e inerte, caracterizado por dimensões variando entre $1\mu m$ e $2\mu m$ e uma estrutura hexagonal que permanece insolúvel no alumínio. O segundo tipo é o alumineto de titânio ($TiAl_3$), com dimensões situadas na faixa de $30\mu m$ a $50\mu m$, e que se dissolve rapidamente no alumínio líquido. Conseqüentemente, uma quantidade significativa de partículas de TiB_2 é dispersa no metal fundido, desempenhando o papel de centros ativos de nucleação durante o processo de solidificação.

Quando a liga mestre TiBAl é adicionada, de modo que o titânio esteja presente em quantidades hipoperitéticas (ou seja, menos de 0,15% de Ti, Figura 3.2), frequentemente partículas de boreto ou, mais comumente aglomerados ou clusters de boreto, são encontrados nos centros dos grãos, com dendritas enriquecidas em titânio crescendo a partir deles. Esta evidência sugere que os boretos nucleiam a fase $Al-\alpha$. No entanto, por outras razões, os boretos eram considerados nucleantes pobres ou, pelo menos, muito menos eficazes que o Al_3Ti (Easton; St.John, 1999).

Figura 3. 2 - Al-Ti final do diagrama de fase

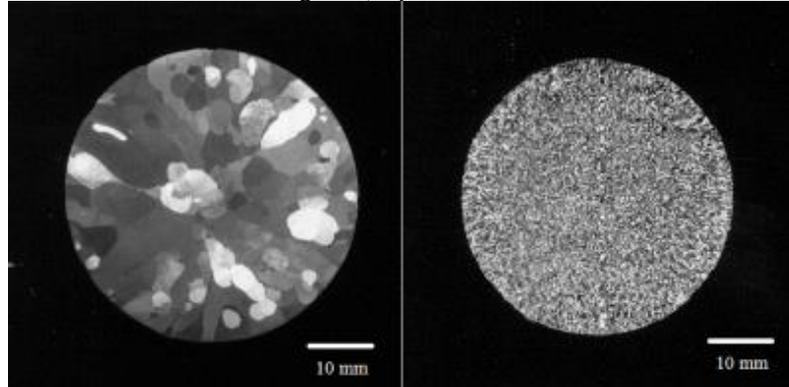


Fonte: (Easton; StJohn, 1999).

O Al_3Ti foi encontrado no centro dos grãos em concentrações onde é estável, e múltiplas relações de orientação eram conhecidas entre Al_3Ti e a matriz $\alpha-Al$. De todas essas evidências, pode-se concluir que Al_3Ti é um nucleante melhor que TiB_2 . Portanto, tornou-se aceito que o refinamento do grão não é devido aos boretos. As teorias do diagrama de fase foram desenvolvidas para explicar como o Al_3Ti poderia ser o nucleante ativo em composições hipoperitéticas (Easton; St.John, 1999).

A Figura 3.3 mostra um componente de alumínio não submetido ao processo de refinamento de grão (à esquerda) contrastado com um componente que passou pelo tratamento de refinamento de grão (à direita) com o uso do TiBAI (Quadro; Sabariz; Raposo, 2016).

Figura 3.3 - Tratamento de refinamento de grão. (esquerda: sem tratamento; direita: com tratamento)



Fonte: (Quadro; Sabariz; Raposo, 2016)

O processo de aprimoramento da granulação do alumínio por meio da introdução de inoculantes artificiais é uma prática amplamente empregada nas operações de fundição. A comprovada eficácia das adições de titânio para potencializar o refinamento do alumínio é um fato amplamente documentado, tanto na literatura especializada quanto nas aplicações industriais. Entretanto, parâmetros operacionais essenciais, como temperatura de inoculação, temperatura de vazamento do metal fundido, período de retenção do banho após a inoculação e antes do vazamento, bem como o tempo de solidificação, são objeto de pesquisas abrangentes, com constante investigação de seus impactos no grau de refinamento granular (Robert, 1979).

O refinamento da granulação ocorre por meio de um processo de nucleação heterogênea, que implica na adição criteriosa de agentes refinadores à fase líquida do metal antes da solidificação. A inclusão desses agentes desencadeia efeitos que provocam alterações nas características físico-químicas dos produtos finais. Essas modificações compreendem a redução da formação de porosidade e da susceptibilidade à fratura, o aprimoramento das propriedades mecânicas, a promoção de características favoráveis à usinagem e a obtenção de uma uniformidade desejável no material resultante. Incorporar agentes nucleantes ao metal em estado líquido por meio da introdução de refinadores de grão é o método mais eficaz para estimular a formação de uma estrutura granular uniforme e de grãos finos (Robert, 1979).

De acordo com informações apresentadas pelo site da AMG Brasil (2023), há diversas combinações de proporções entre titânio e boro, ou titânio e carbono, disponíveis em refinadores de grão. Essas variações podem ser empregadas para atender às especificidades de

cada procedimento. A escolha apropriada do refinador de grão deve considerar fatores como o tipo de liga utilizada, a quantidade de sucata ou alumínio secundário incorporada no processo, a granulacão final desejada, bem como as práticas de fusão e solidificacão, incluindo a taxa de resfriamento.

Conforme destacado por Wang *et al.* (2005), o método mais amplamente adotado para obter um tamanho de grão reduzido envolve a introdução de anteligas contendo titânio no metal líquido antes da fundição propriamente dita. A adição de boro, juntamente com o titânio, pode melhorar a eficácia do processo de refinamento do tamanho do grão. No entanto, para melhorar a eficiência global do processo de refinamento de grãos para diferentes ligas de alumínio, é imperativo realizar uma determinação cuidadosa da proporção adequada de adição de boro, ou relação Ti/B. Os principais refinadores de grão a base de titânio e boro disponíveis no mercado são TiBAI 5/1, TiBAI 3/1 e TiBAI 5/0,2, cujos teores de titânio, boro, partículas TiB_2 e $TiAl_3$ são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2 - Comparativo entre os principais refinadores de grão à base de titânio e boro

Refinador	Ti (% em peso)	B (% em peso)
TiBAI 5/1	4,5 a 5,5	0,8 a 1,2
TiBAI 3/1	2,7 a 3,3	0,7 a 1,3
TiBAI 5/0,2	4,5 a 5,5	0,15 a 0,3

Fonte: AMG Brasil, 2024

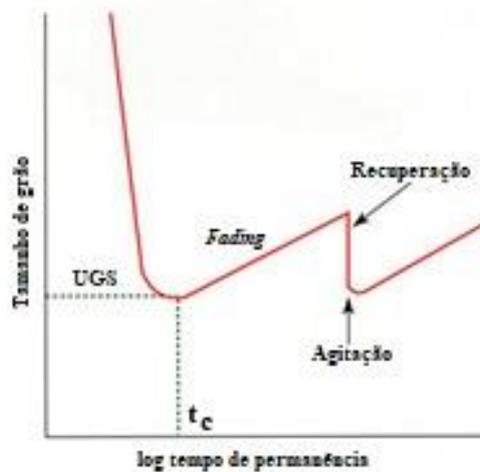
3.3 Efeito do Refino de Grão.

Segundo Kearns, Thistlethwaite e Cooper (1996), as ligas mestres TiBAI têm sido comercialmente utilizadas para o refinamento de alumínio e suas ligas por mais de 25 anos. Houve uma facilidade na introdução do uso dos refinadores devido à expansão rápida da indústria de alumínio, permitindo, assim, que a qualidade do produto fosse mantida em velocidade de processo relativamente alta. Como os padrões de qualidade exigidos pelas indústrias estão cada vez maiores para produtos críticos, a pesquisa em refinadores de grãos continua em um nível prático e fundamental. Com isso, um objetivo que ainda predomina é a produção de refinadores cada vez mais limpos e potentes para produtos cada vez mais sofisticados.

A Figura 3.4 mostra a curva tamanho de grão versus tempo após a adição do refinador de grão. Pode-se notar nessa curva que há um declínio inicial no tamanho de grão até o tamanho de grão limite (Ultimate Grain Size - UGS) para o tempo t_c (tempo de contato), seguido por um

aumento no mesmo em tempos mais longos. Tal “perda” de refinamento é chamada de *Fading* que significa que houve uma diminuição dos efeitos positivos do processo de refino, ou até mesmo, um enfraquecimento gradual dos efeitos benéficos do refino de grão ao longo do tempo, podendo afetar, assim, as propriedades finais do material. O *Fading* pode ser melhorado em parte pela agitação do metal (*Stirring*), embora o grau de recuperação (*Recovery*) dependa da composição do metal (Kearns; Thistlethwaite; Cooper (1996).

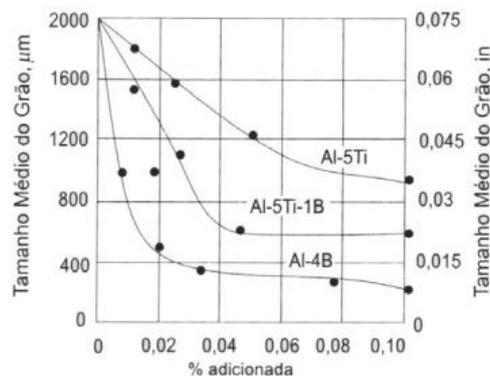
Figura 3. 4 - Forma esquemática do comportamento do tamanho de grão em relação ao tempo após a adição de refinador de grão à liga de alumínio fundido



Fonte: (Kearns; Thistlethwaite; Cooper, 1996)

Segundo Moreira (2011), alguns elementos de liga desempenham papel primordial no refino de grão das ligas Al-Si, podendo-se citar o boro e o titânio. Embora o titânio seja o elemento adotado mundialmente como refinador padrão na fundição de ligas de alumínio, mais recentemente verificou-se que o boro, individualmente, é um refinador muito mais eficiente do que o titânio no refino de ligas alumínio-silício, conforme apresentado na Figura 3.5 (Garcia, 2001).

Figura 3. 5 - Eficiências de titânio e boro no refino de ligas de alumínio



Fonte: (Garcia, 2001).

A distribuição dos agentes inoculantes destinados ao processo de refino deve ser realizada de maneira uniforme no metal em estado líquido, abrangendo toda a amplitude da peça que está sendo fundida. A adição desses inoculantes deve ser feita de forma cuidadosa, seja individualmente ou em combinação, e em quantidades reduzidas, garantindo que não ocorra nenhuma alteração na composição química (Moreira, 2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A liga de alumínio 6351 foi utilizada para a confecção de amostras fundidas em moldes de areia e moldes metálicos (aço) com a adição de refinador de grão à base de titânio e boro (TiBAI 5/1).

Os corpos de prova foram produzidos em moldes de areia, fabricados a partir de uma mistura de silicato de sódio e CO₂. Este método garantiu a obtenção de moldes resistentes e de alta precisão. O molde metálico foi aquecido e mantido à temperatura de 150°C. Durante o processo, a temperatura de vazamento foi cuidadosamente controlada, estabelecendo-se em 750°C para todas as amostras, o que assegurou a homogeneidade do material fundido.

A fusão da liga foi realizada em um forno elétrico de resistência, que proporcionou um aquecimento uniforme e eficiente. Para aprimorar as propriedades do metal fundido, foi incorporado 0,06% de refinador de grão TiBAI 5/1, calculado em relação ao peso total da liga, baseado no trabalho de Garcia (2001) citado na Figura 3.5. O refinador TiBAI 5/1 foi fornecida pela AMG Brasil na forma de vergalhão. Essa adição teve como objetivo refinar e homogeneizar a microestrutura do material, resultando em melhorias nas características mecânicas e na sanidade dos corpos de prova produzidos.

A partir das amostras fundidas foram confeccionados corpos de prova de tração para avaliação das propriedades mecânicas. Para caracterização microestrutural foram cortados corpos de prova na seção transversal das amostras fundidas.

A caracterização microestrutural das amostras foi realizada por microscopia óptica (MO) no Laboratório de Tratamentos Térmicos e Microscopia Óptica (LTM) do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas (EM) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e por microscopia eletrônica de varredura (MEV) com recursos de microanálise via espectroscopia de energia dispersiva (EDS) no Laboratório de Microscopia e Microanálise – NanoLab da Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT – UFOP).

As amostras foram preparadas conforme padrão para análise metalográfica, polidas em com suspensão de alumina 1µm, pasta de diamante 1µm e 0,25µm e sílica coloidal 0,05µm. Para revelar a microestrutura foi utilizado o reagente Keller.

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados utilizando o microdurômetro do LTM/DEMET/EM/UFOP com penetrador de diamante com ângulo de 136° entre as faces e carga de 25gf durante 15s, de acordo com dados da literatura, na região da matriz (Al-α). Os

corpos de prova foram retirados da seção transversal das amostras fundidas em molde de areia e coquilha, preparados conforme procedimento padrão para metalografia e atacados com reagente Keller para possibilitar a medição da microdureza na região da matriz.

As propriedades mecânicas das amostras foram avaliadas por meio de ensaios de tração. Os corpos de prova para os ensaios foram retirados dos lingotes no estado bruto de solidificação sendo fabricados conforme normas ASTM E8M – 2022 (*Small-size specimens proportional to standard – Specimen 2*), para taxa de deformação de 10^{-3}s^{-1} , velocidade de 3,24mm/min. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Coordenadoria do Curso Técnico de Metalurgia do Instituto Federal de Minas Gerais – Campus Ouro Preto (IFMG-OP).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Produção das Amostras

A Figura 5.1 apresenta o molde de areia e a coquilha utilizados para fabricação das amostras. Na Figura 5.2 tem-se o modelo em resina (fabricado pelo processo de impressão 3D) e as amostras fundidas em areia. Na Figura 5.3 tem-se a amostra fundida em coquilha.

Figura 5. 1 - Moldes de areia e coquilha



Fonte: (Própria autora).

Figura 5. 2 - Modelo em resina e amostras fundidas em areia



Fonte: (Própria autora).

Figura 5. 3 - Amostra fundida em coquilha

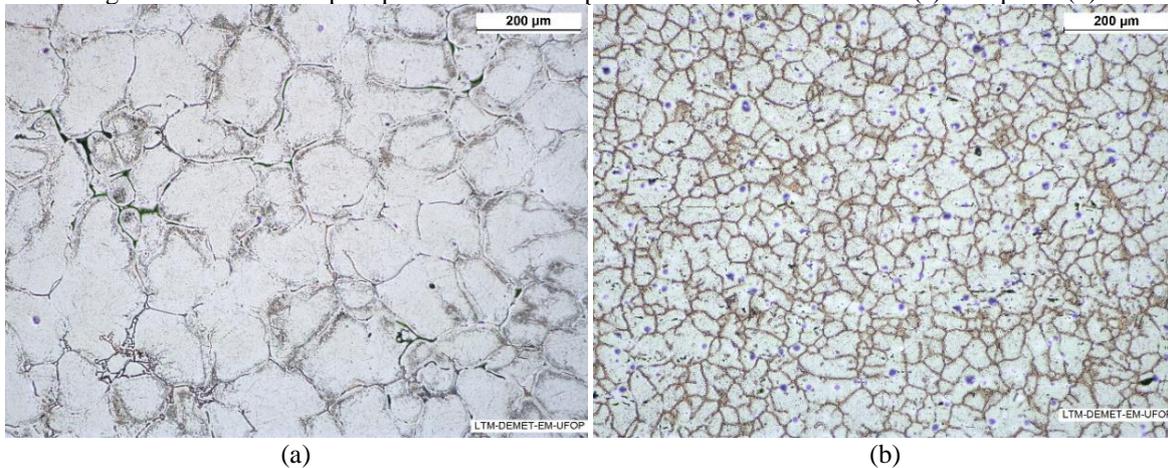


Fonte: (Própria autora).

5.2 Caracterização Microestrutural

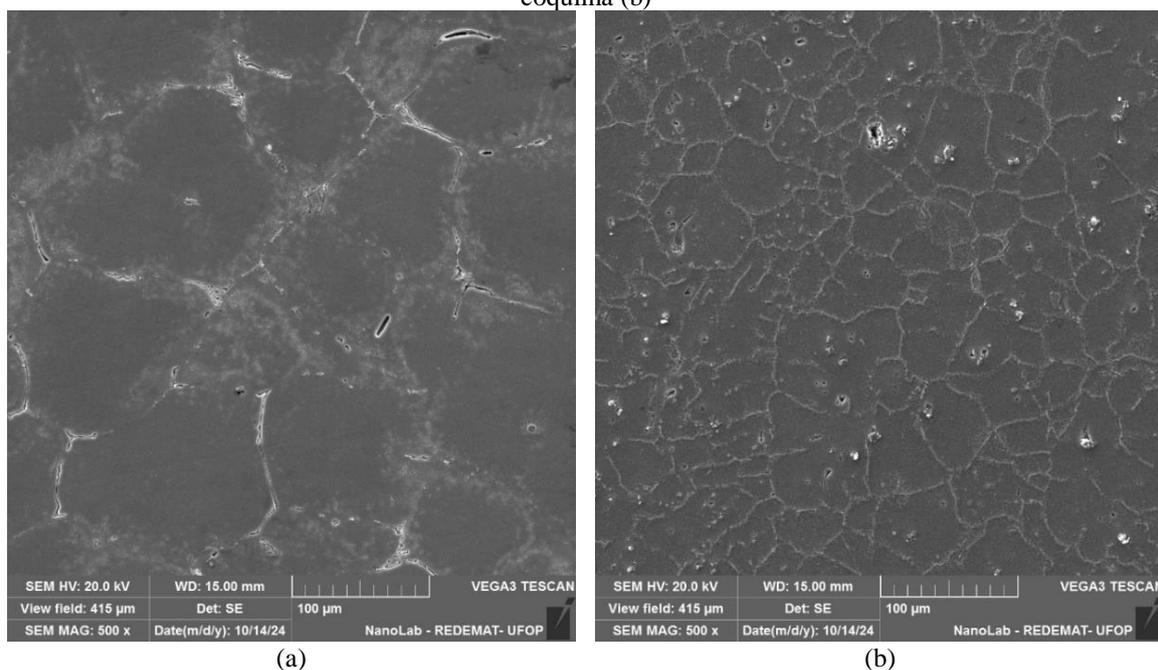
A estrutura do material é composta predominantemente por dendritas de fase α -Al da matriz (fase principal da estrutura desse material). Como esperado, a microestrutura das amostras fundidas em coquilha apresentou um tamanho de grão significativamente menor quando comparada às amostras fundidas em areia. Essa diferença é atribuída à maior taxa de resfriamento proporcionada pelo molde metálico, que favorece a solidificação mais rápida e homogênea do material. A análise realizada por microscopia óptica (Figura 5.4) e microscopia eletrônica de varredura (Figura 5.5) evidenciou de maneira clara essa variação no tamanho dos grãos, destacando as diferenças estruturais entre os dois métodos de fundição.

Figura 5. 4 – Microscopia óptica das amostras produzidas em molde de areia (a) e coquilha (b)



Fonte: (Própria autora).

Figura 5. 5 - Microscopia eletrônica de varredura da estrutura das amostras produzidas em molde de areia (a) e coquilha (b)

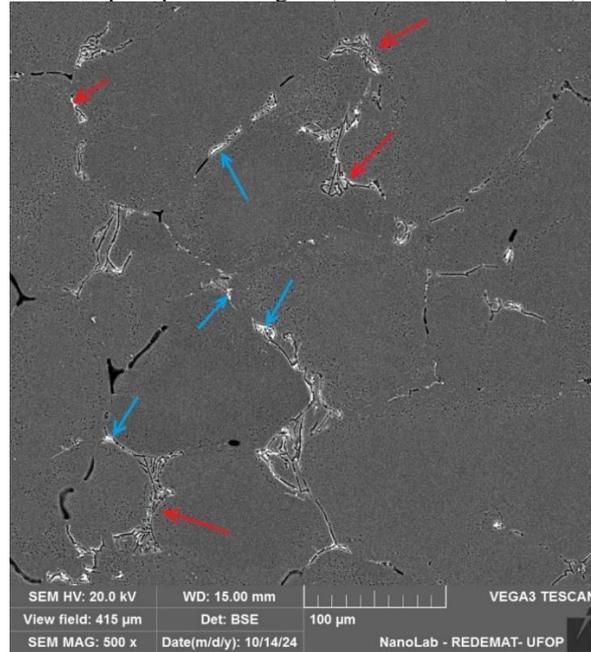


Fonte: (Própria autora).

Nas amostras fundidas em areia, em função da menor taxa de resfriamento, foram observadas segundas fases, como o Mg_2Si (fase β'), que se manifestou na morfologia conhecida como “escrita chinesa”, como pode ser observado na Figura 5.6, indicada pelas setas vermelhas. Além disso, há a presença de partículas que podem ser da fase $Al(FeMn)Si$, identificadas na Figura 5.6 pelas setas azuis, que contribuem para a complexidade da microestrutura. Essas estruturas também foram observadas por Lui e Kang (1996) e Samaras e Haidemenopoulos (2007) utilizando ligas da série 6xxx. Nas amostras fundidas em coquilha não foi observada a presença do Mg_2Si .

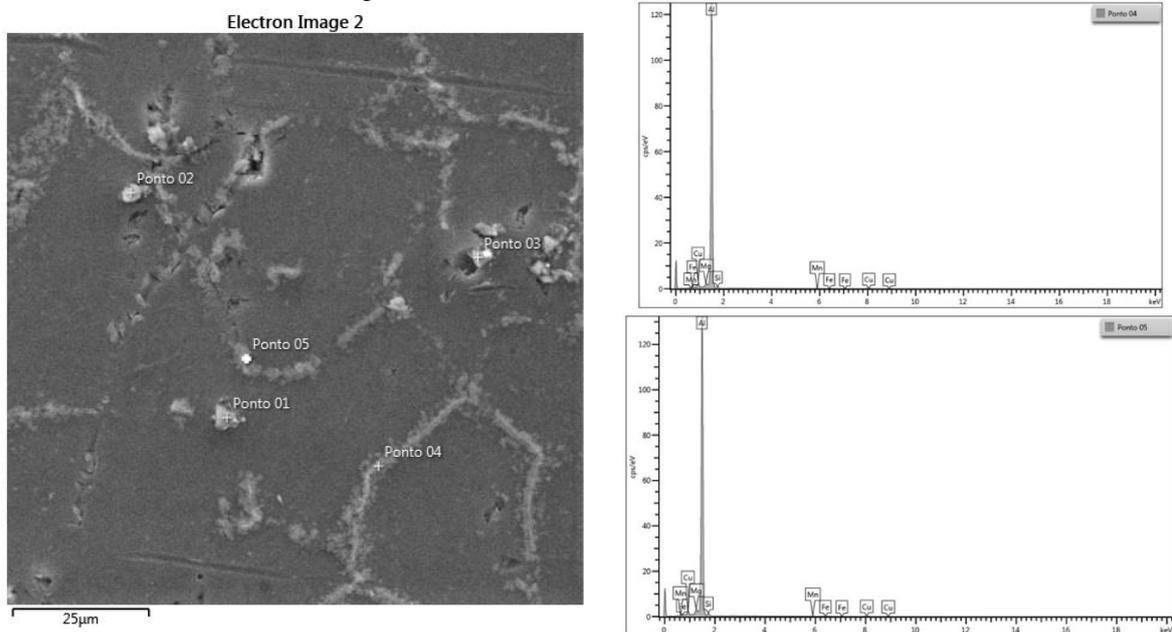
A Figura 5.7 apresenta a análise elementar via MEV/EDS identificando a fase quaternária $Al(FeMn)Si$ na amostra produzida em coquilha. A análise revelou também a existência de poros, que provavelmente se formaram devido à retenção de gases, como o hidrogênio, durante o processo de solidificação, visto que não foi executado o processo de degaseificação do metal fundido. A presença de poros foi mais evidente nas amostras fundidas em coquilha

Figura 5. 6 - Segundas fases precipitadas: Mg₂Si (setas vermelhas) e Al(FeMn)Si (setas azuis)



Fonte: (Própria autora).

Figura 5. 7 - Análise elemental via MEV/EDS

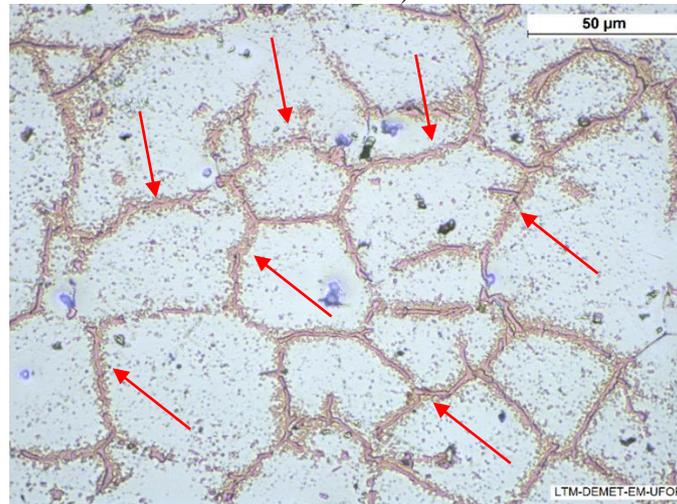


Fonte: (Própria autora).

Foi observada uma maior precipitação de segundas fases nos contornos das dendritas das amostras fundidas em coquilha, como mostrado na Figura 5.8, indicando um efeito positivo do resfriamento rápido sobre a nucleação e crescimento dessas fases secundárias. Essa

precipitação nas bordas das dendritas pode influenciar positivamente as propriedades mecânicas do material, como resistência e dureza.

Figura 5. 8 - Detalhe da precipitação de fase nos contornos das dendritas da amostra fundida em coquilha (setas vermelhas)



Fonte: (Própria autora).

5.3 Ensaio de Tração

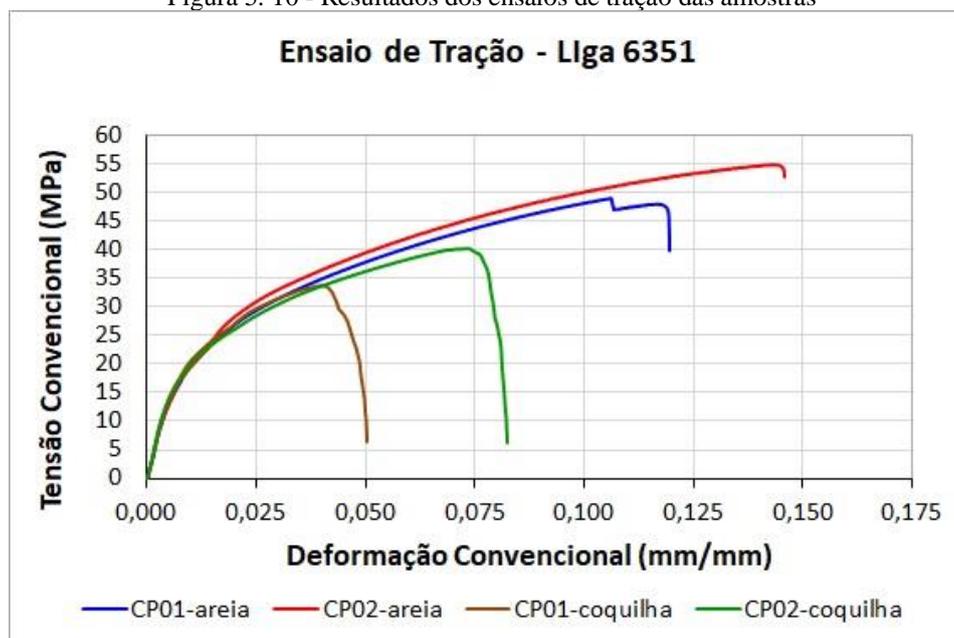
Na Figura 5.9 são apresentados os corpos de prova utilizados para ensaio de tração retirado das amostras fundidas em molde de areia e coquilha. Os resultados do ensaio de tração estão apresentados na Figura 5.10. Esses resultados correspondem à média de dois ensaios realizados para cada condição de solidificação.

Figura 5. 9 - Corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: (Própria autora).

Figura 5. 10 - Resultados dos ensaios de tração das amostras



Fonte: (Própria autora).

Os resultados dos ensaios de tração, apresentados na Figura 5.10 e na Tabela 5.1, evidenciam o impacto das condições de solidificação nos moldes de areia e coquilha no comportamento mecânico. Observou-se que os corpos de prova produzidos em molde de areia apresentaram resultados superiores em comparação aos corpos de prova produzidos em coquilha, o que não era esperado, visto que a microestrutura das amostras em coquilha apresentou-se bem mais refinada, entretanto verificou-se a presença de maior quantidade de poros nessas amostras, o que pode ter contribuído para a queda da resistência.

Tabela 5. 1 - Valores de LE, LRT e Alongamento obtidos nos ensaios de tração

Amostra	n° da amostra	LE (MPa)		LRT (MPa)		Alongamento (%)	
		Indiv.	média	Indiv.	média	Indiv.	média
Molde de areia	1	20	22,5	55	49,5	12	10
	2	25		44		8	
Coquilha	1	20	17,5	35	39	5	6,5
	2	15		43		8	

Fonte: (Própria autora)

5.4 Microdureza

Os resultados da análise de microdureza estão apresentados na Tabela 5.1. Esses dados correspondem à média de dez medições aleatórias, realizadas ao longo de 5 segundos, utilizando uma força de 25gf.

Tabela 5. 2 - Microdureza Vickers.

Molde de areia	Coquilha
69	49
58	48
59	55
61	49
38	46
52	55
47	49
56	47
46	53
58	49
Média = 54	Média = 50
Desvio padrão = 9,63	Desvio padrão = 3,37

O gráfico de barras apresenta a microdureza Vickers para dois tipos de moldes. O eixo vertical, rotulado 'Microdureza Vickers', varia de 0 a 70 em incrementos de 10. O eixo horizontal mostra duas categorias: 'Molde de areia' (representado por uma barra azul) e 'Coquilha' (representado por uma barra amarela). A barra azul para o molde de areia atinge o valor de 54, e a barra amarela para a coquilha atinge o valor de 50. Ambas as barras possuem linhas de erro verticais que indicam a dispersão dos dados.

Fonte: (Própria autora)

Embora a estrutura da liga no molde de areia seja significativamente mais grosseira do que no molde metálico, esperava-se que os resultados de microdureza fossem inferiores aos das amostras da coquilha. Entretanto, com base nos resultados apresentados, observou-se que a microestrutura do molde de areia revelou a presença de formação de segundas fases precipitadas na matriz. Neste caso, as indentações podem ter ocorrido em regiões da matriz com fases de dureza elevada, o que pode ter contribuído para o aumento dos valores da microdureza. Nas amostras fundidas em coquilha as fases precipitadas estavam concentradas nos contornos de grão, como apresentado na Figura 5.8.

6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados das análises executadas neste trabalho, pode-se concluir:

As amostras produzidas em molde metálico apresentaram uma estrutura bem mais refinada quando comparada às microestruturas das amostras produzidas em molde de areia.

Nas amostras fundidas em molde de areia observou-se a formação da fase Mg_2Si , na morfologia “escrita chinesa”, e da fase quaternária $Al(FeMn)Si$.

Nas amostras fundidas em coquilha ficou mais evidente a formação de precipitados nos contornos das dendritas.

Verificou-se uma quantidade maior de porosidade nas amostras produzidas em molde metálico o que pode ter contribuído de forma negativa para as propriedades avaliadas.

O comportamento das amostras em tração e microdureza não correspondeu ao que se esperava, visto que as amostras produzidas em areia apresentaram maior resistência mecânica e alongamento, mesmo com estrutura mais grosseiras. Acredita-se a menor resistência mecânica das amostras fundidas em coquilha foi devido à maior quantidade de porosidade presente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL. Associação Brasileira de Alumínio. **Alumínio**. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/vantagens-do-aluminio/>, acessado em 04/08/2023 às 13:00.

ABAL Associação Brasileira de Alumínio. **Fundamentos e aplicações do Alumínio**. Maio de 2007. 8p.

ALFINO, I.; MALDONADO, C.; GONZALES, G.; BEDOLLA, A. Effect of Mg content and solution treatment on the microstructure of Al-Si-Cu-Mg alloys. **Journal of Materials Science**, v. 41, p. 1945-1952, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM E8/E8M: Standard test methods for tension testing of metallic materials**. West Conshohocken, 2022. 28p.

AMG BRASIL. **Refinadores de Grãos**. Advanced Metalurgical Group. Disponível em: <https://amg-br.com/pt/negocios/materiais-especiais/refinadores-de-graos/>. Acessado em 08/08/2023.

ASM ENGENHARIA. **Saiba tudo sobre ligas de alumínio**. 13/09/2022. Disponível em: <https://blog.asmeng.com.br/saiba-tudo-sobre-ligas-de-aluminio/>. Acessado em 01/08/2023

BRAY, J.W. **Aluminum Mill and Engineered Wrought Products**. In: ASM Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, v.2.10th ed. Ohio: ASM Internacional, 1992.

BRESCIANI FILHO, E.; SILVA, I. B.; BATALHA, G. F.; BUTTON, S. T. **Conformação plástica dos metais**. 6^a ed. São Paulo: Editora LTC, 2011. 254 p.

DALL ONDER, V. **Análise da liga de alumínio AA7050 na condição de tratamento térmico de envelhecimento interrompido**. 2015. 30 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa - PR, 2015.

EASTON, M.; St.JOHN, D. Grain Refinement of Aluminum Alloys: Part I. The Nucleant and Solute Paradigms—A Review of the Literature. **Metallurgical and Materials Transactions A**, v. 30A, p. 1613-1623, jun. 1999.

FREITAS, P. S. **Tratamento térmico dos metais: da teoria à prática**. São Paulo: Editora SENAI-SP. 2014. 200p.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. 1^a ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2001. 399 p.

KEARNS, M. A.; THISTLETHWAITE, S. R.; COOPER, P. S. **Recent Advances in understanding the mechanism of aluminium grain refinement by TiBAl master alloys**. London & Scandinavian Metallurgical Co. Limited, Metallurg Aluminium, Aluminium Division. p. 1-8, February 1996.

LIU, Y. L.; KANG, S.B. The solidification process of Al-Mg-Si alloys. **Journal of Materials Science**, v. 32, p. 1443-1447, 1997

MOREIRA, P. S. **Efeito da taxa de resfriamento e dos tratamentos térmicos sobre as propriedades mecânicas da liga Al-Si-Mg (A356.0) fundida**. 2011. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

QUADRO, A. L.; SABARIZ, A. L. R.; RAPOSO, M. T. Refino de grão de ligas alumínio-silício com ante-ligas Al-B. **Revista Matéria**, n. 11746, p. 807-816, 2016.

ROBERT, M. H. **Comportamento de aluminatos no alumínio líquido e implicações para o refino do alumínio**. 1979. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 1979.

SAMARAS, S.N.; HAIDEMENOPOULOS, G. N. Modelling of microsegregation and homogenization of 6061 extrudable Al-alloy. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 194, p. 63-73, 2007.

WANG, M.; WANG, S.; LIU, Z.; LIU, Z.; SONG, T; ZUO, X. Effect of B/Ti mass ratio on grain refining of low-titanium aluminum produced by electrolysis, **Materials Science and Engineering A**, n. A 416 p. 312–316, 2005.