



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ANÁLISE DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO DA LIGA DE ALUMÍNIO SAE 309 PELO MÉTODO FDU

ANALYSIS OF THE DEGASSIFICATION PROCESS OF ALUMINUM ALLOY SAE 309 BY THE FDU METHOD

Benedito Lopes Ribeiro Junior¹; Osvaldo Kihana¹; Lucas Eleazar Zabotto¹;
²Daniel Loureiro.

Universidade São Francisco

**junior.ribeiro98@outlook.com; osvaldokihana@yahoo.com.br;
lucaszabotto3@gmail.com.**

¹Estudantes do Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco; Campus Swift
²Docente Orientador Professor, Curso de Engenharia Mecânica, Universidade São Francisco;
Campus Swift.

RESUMO. As ligas de alumínio após o processo de fundição podem apresentar um defeito chamado porosidade, o que gera pequenas bolhas de ar dentro do material comprometendo a estrutura da peça, podendo ocasionar até mesmo o seu descarte. O propósito deste trabalho é apresentar a redução deste defeito por meio do processo de desgaseificação por rotor, especificamente na liga de alumínio SAE 309 e analisar em laboratório quatro amostras do material retiradas após os tempos pré-determinados de dois, quatro e seis minutos. Comparar a porosidade de cada amostra, discutir sobre os resultados observados e discorrer sobre a importância deste processo para a fundição.

Palavras-chave: fundição, alumínio, porosidade, desgaseificação.

ABSTRACT. Aluminum alloys can exhibit a defect known as porosity after the casting process, leading to the formation of small air bubbles within the material, compromising the structural integrity of the component and potentially resulting in its rejection. The purpose of this study is to present the reduction of this defect through the rotor degassing process, specifically in the SAE 309 aluminum alloy. Laboratory analysis was conducted on four material samples extracted at predetermined time intervals of two, four, six, minutes. The porosity of each sample was compared, and the observed results were discussed, emphasizing the significance of this process in the context of casting.

Keywords: casting, aluminum, porosity, degassing.

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um material amplamente utilizado nos mais variados tipos de indústrias, devido às suas ótimas propriedades mecânicas, leveza e condutividade térmica e elétrica. No processo de fundição, o alumínio e suas ligas têm forte tendência a absorção de gases, principalmente o hidrogênio, sendo que esta característica é bem maior do que em outros



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

metais. A absorção destes gases causa um defeito de fundição chamado porosidade, que prejudica as propriedades mecânicas do material e leva a um acabamento superficial defeituoso, o que aumenta o índice de descarte de material. Diante deste defeito, se faz necessário a utilização de métodos que diminuam a sua incidência a fim de reduzir o refugo na indústria. Este estudo abrange o processo de desgaseificação em conjunto com processo de fusão aplicado à liga de alumínio-silício SAE 309 utilizada no processo de fundição por gravidade (coquilha) na empresa Inter Alloy Fundição e Usinagem LTDA. Abrange a área de processos de fabricação da Engenharia Mecânica, na subárea de processos metalúrgicos. Os moldes permanentes, também chamados de coquilhas metálicas, são constituídos por duas ou mais partes, que contém o formato adequado para uma boa extração da peça a ser fundida. Estes moldes são fabricados geralmente em aço, ferro fundido, bronze ou grafite dependendo da liga a ser fundida. Propõe-se o processo de desgaseificação como solução para amenizar o defeito de porosidade nas peças de alumínio SAE 309.

2. LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

2.1. Alumínio

Segundo a Abal (2007), o alumínio foi descoberto por Sir Humphery Davy, em 1809 tendo sido isolado pela primeira vez em 1825 pelo Físico Dinamarquês Hans Christian Oersted, porém, apenas em 1886 foi desenvolvido um processo industrial econômico de redução. Neste ano, dois cientistas trabalhando independentemente, Charles Martin Hall, nos Estados Unidos, e Paul Héroult, na França, inventaram o mesmo procedimento eletrolítico para reduzir a alumina em alumínio.

Apesar de o alumínio ser isolado pela primeira vez em 1809 existem relatos de civilizações antigas que utilizavam barro que continha óxidos de alumínio para a fabricação de vasos, que atualmente conhecemos como alumina. Com o decorrer dos anos os povos egípcios e babilônios passaram a fabricar medicamentos, cosméticos e corantes com esta argila contendo alumina e isso fez com que este material tivesse grande valor perante esses povos, tudo isso porque o metal deixava os artefatos mais atraentes e de certa forma trazia uma certa “modernidade” em relação aos materiais disponíveis na época. (ABAL)

O alumínio é o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre e é obtido a partir da bauxita, minério encontrado pela primeira vez em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier na cidade de Lex Baux, na França. A bauxita é encontrada, em maior parte, em regiões tropicais e subtropicais e apresenta coloração avermelhada, devido ao intemperismo por alumina silicatos e composta pelo elemento óxido de alumínio. (ABAL, 2013)

De acordo com a ABAL (2007), a obtenção do alumínio a partir da bauxita efetua-se em três etapas: Mineração, Refinaria e Redução. A bauxita é extraída, lavada e secada antes de ser enviada à Refinaria onde se produz o alumínio. O processo químico denominado Bayer é o mais utilizado na indústria do alumínio. Neste processo, a alumina é dissolvida em soda cáustica e, posteriormente, filtrada para separar todo o material sólido, concentrando-se o filtrado para a cristalização da alumina. Os cristais são secados e calcinados para eliminar a água, sendo o pó branco de alumina pura enviado à redução para obtenção de alumínio, através de eletrólise, processo conhecido como Hall-Héroul.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

O alumínio é um metal multifacetado e atende desde a indústria da construção civil à aviação, da transmissão de energia e informações aos produtos eletrônicos. Isso porque possui várias características que o torna útil em vários segmentos, é leve, maleável, tem boa condutividade térmica e elétrica, é resistente a corrosão, é altamente reciclável e tem um baixo custo.

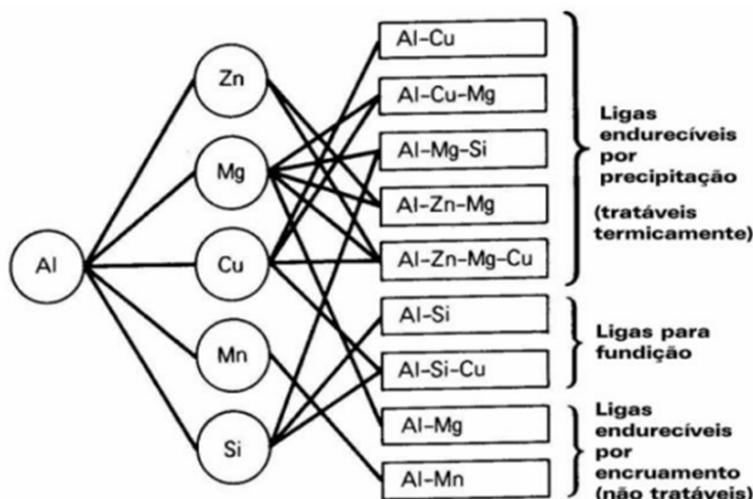
2.1.1. Ligas de Alumínio

De acordo com o Corradi (2010), a adição de elementos ao metal líquido tem um impacto substancial na melhoria das propriedades de fundição e nas características mecânicas do alumínio. Dentre esses elementos, incluem-se o silício (Si), cobre (Cu), magnésio (Mg), zinco (Zn), titânio (Ti), níquel (Ni), manganês (Mn) entre outros (Figura 1). Isso resulta em benefícios notáveis, como redução de peso, resistência satisfatória contra certos tipos de corrosão e boas qualidades para processos de usinagem, entre outros.

As ligas de alumínio fundidas são classificadas conforme a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019) de acordo com as suas composições químicas:

- Al -Si- Alumínio -Silício;
- Al-Cu-Alumínio -Cobre;
- Al-Mn-Alumínio -Manganês;
- Al-Zn-Alumínio -Zinco;
- Al-Mg-Alumínio -Magnésio

Figura 1 - Ligas de alumínio fundidas.



Fonte: Aluminium Guide.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Segundo Zangrandi (2008), pode-se apontar as características dos elementos antes citados;

a) O zinco acentua a resistência mecânica do alumínio ao proporcionar o endurecimento da precipitação natural e artificial da liga.

b) O cobre, além de propiciar o endurecimento por precipitação natural, aumenta a resistência mecânica e diminui a resistência à corrosão, a ductilidade e a soldabilidade da liga.

c) O magnésio age aumentando a resistência da corrosão da liga em água salgada, além de reduzir o endurecimento por deformação e a temperatura de fusão. Se adicionado junto ao Si, propiciam endurecimento por precipitação da liga.

d) O silício melhora a ductilidade, a temperatura e a fusão, além de aumentar a fluidez da liga.

e) O manganês contribui com a melhora da resistência mecânica do alumínio comercialmente puro, bem como da resistência à corrosão e com pequena redução da ductilidade.

2.1.2. Ligas de Alumínio Al-Si

É necessário destacar as propriedades e características das ligas Al-Si. De acordo com Moreira (2012), entre as principais características gerais desta liga, tem se:

- a) Baixa densidade, sendo $2,7\text{g/cm}^3$;
- b) Baixa temperatura de fusão, podendo ser feita em moldes metálicos;
- c) Elevada fluidez, decorrente do Si;
- d) Baixa tendências a trincas de solidificação;
- e) Elevado coeficiente de transmissão de calor;
- f) Resistência moderada após tratamento térmico.

A liga de alumínio destacada neste estudo de caso é a SAE 309, no próximo tópico serão apresentadas as características, propriedades, composição química e aplicação desta liga.

2.1.3. Liga de Alumínio SAE 309

A liga SAE 309 apropriada tanto para fundição de em coquilha como em areia, utilizando-se teores de ferro até 0,60% apresenta boa resistência à corrosão. Para injeção, utiliza-se teores de Fe mais altos (entre 0,70% e 1,10%). Para peças fundidas em coquilha ou areia, recomenda-se a modificação com sódio. Na tabela 1 pode-se verificar a composição química desta liga.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Tabela 1 - Composição Química SAE 309.

Elemento	Mínimo %	Máximo %
Si	9,00	10,00
Fe	0,00	1,30
Cu	0,00	0,60
Mn	0,00	0,35
Mg	0,40	0,60
Ni	0	0,50
Zn	0	0,50
Sn	0	0,15
Outros	0	0,25
Al	0	Restante

Fonte: Elaborado pelo autor.

As propriedades físicas são observadas na tabela 2:

Tabela 2 - Propriedades Físicas e Mecânicas.

Peso específico (g/cm ³)	2,65
Intervalo de solidificação	590-565
Coefficiente de dilatação térmica (20° a 200°)	0,0000216
Resistência à tração (kg/mm ²)	20-26 Injeção 18-24 Coquilha 15 a 19 Areia
Alongamento (%)	2,0/4.0 Injeção 3,0/5.0 Coquilha
Dureza Brinell	70/100 Injeção 60/75 Coquilha 55/65 Areia

Fonte: Elaborado pelo autor.

As características tecnológicas associadas ao alumínio são observadas na tabela 3.

Tabela 3 - Características tecnológicas

Fluidez	Boa
Estanqueidade(resistência a pressão)	Ótima
Resistência à corrosão	Boa
Usinabilidade	Regular
Temperatura de vazamento	690° -730°C

Fonte: Elaborado pelo autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

2.2. Fundição

Na fundição existem alguns tipos aplicáveis ao alumínio, tais como a fundição com uso de areia, por gravidade, sob pressão (alta ou baixa), por cera perdida e tixofundição.

a) A fundição com moldes de areia é uma das mais antigas utilizadas, e são indicadas para pequenas de peças de grande tamanho.

b) A fundição por gravidade, que também é chamada de fundição em coquilha, é basicamente o vazamento do metal líquido em um molde metálico, que faz uso da gravidade para formação da peça.

c) A fundição sob pressão consiste na inserção do metal líquido em uma câmara de injeção do material no molde de aço. Os produtos são obtidos por meio de três fases, sendo a primeira a expulsão do ar da câmara de injeção, a segunda é um rápido preenchimento das cavidades do molde para evitar o resfriamento do metal e a terceira é a compactação do metal, para evitar microporosidades da contração na solidificação

d) Fundição por cera perdida nada mais é que vazamento em moldes de cera.

e) Fundição por tixofundição, que também é chamado de fundição em ligas semi-sólidas de alumínio, que ao invés de usar metal líquido, utiliza em pasta.

A fundição utilizada no estudo de caso é por gravidade (em coquilha). Este método faz uso de moldes metálicos empregando tanto aço quanto ferro fundido, pois tem durabilidade maior e conseguem produzir desde peças grandes a pequenas, e de simples a complexas. Entretanto, o método não faz a peça final, sendo necessário realizar usinagem.

2.3. Porosidade em Ligas de Alumínio

A porosidade em ligas de alumínio é um problema comum na indústria de fundição e pode comprometer a qualidade e a integridade das peças produzidas. A porosidade refere-se à presença de pequenas bolhas de ar ou vazios internos no material (Figura 2), o que pode enfraquecer a estrutura da peça e prejudicar suas propriedades mecânicas. Esse defeito pode surgir devido a alguns motivos, como a existência de gases durante o processo de solidificação do metal, a presença de impurezas na mistura metálica ou a incapacidade do metal líquido de fluir através das áreas entre os grãos sólidos para compensar a contração volumétrica que ocorre durante a solidificação (HANBING, QINGYOU, MEEK, 2008).

Figura 2 - Alumínio com porosidade.



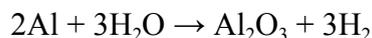
Fonte: Inter Alloy Fundição e Usinagem.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

A presença de hidrogênio dissolvido no metal fundido pode ser atribuída a várias fontes, incluindo a atmosfera do forno, que pode gerar hidrogênio livre, contaminantes nos materiais de carga suscetíveis à oxidação, elementos externos, como utensílios usados durante a fundição, a agitação do material líquido que pode permitir a entrada de ar em cavidades moldantes devido ao fluxo turbulento e o excesso de umidade nos moldes, resultando na vaporização e liberação de hidrogênio. É importante destacar que o hidrogênio é facilmente absorvido pelo alumínio líquido, enquanto o oxigênio, sempre presente em gases oxidantes como o dióxido de carbono, forma óxidos que podem flutuar no banho de metal devido às diferenças de densidade. Além disso, a presença de vapor de água é problemática, uma vez que, em altas temperaturas, ele se decompõe em hidrogênio (no seu estado ativo, que é altamente absorvido pelo metal líquido) e oxigênio, sendo que o hidrogênio é absorvido pelo alumínio, enquanto o oxigênio forma óxidos. Portanto, fica evidente que qualquer forma de umidade, seja na forma de água, vapor de água ou outros componentes relacionados, pode contribuir para a absorção de gases e, conseqüentemente, levar à formação de porosidades nas peças fundidas. Essa umidade pode ser proveniente do ar, de ferramentas como conchas e sinos de imersão que não foram aquecidos, de combustíveis em fornos a óleo ou gás que contenham hidrocarbonetos e até mesmo de produtos de corrosão presentes em lingotes ou sucatas que tenham sido expostos às intempéries.

O hidrogênio é absorvido através da seguinte reação:



2.4. Processo de Desgaseificação

Para Fuoco (2016), o processo de remoção de impurezas do alumínio fundido é de extrema importância para uma boa qualidade do produto final. As inclusões se formam devido a elevada solubilidade do hidrogênio nas ligas de alumínio no estado líquido e também a reação com o oxigênio para formar óxidos de alumínio que podem reduzir a resistência mecânica da peça. O hidrogênio é o único gás que pode se dissolver significativamente no alumínio fundido. A eliminação deste gás dissolvido na liga é de extrema importância para garantir a fabricação de peças de alta qualidade (HANBING, QINGYOU, MEEK, 2008).

O processo de desgaseificação em ligas de alumínio é uma etapa que visa a remoção dos gases dissolvidos no metal líquido, como hidrogênio e outros elementos. O objetivo principal da desgaseificação é diminuir a porosidade no material, melhorando a qualidade das peças fundidas. Este processo é fundamental em diversas aplicações, principalmente naquelas que exigem alta resistência no produto final, como na indústria automobilística e aeronáutica. A desgaseificação é realizada em fornos de fundição e envolve a passagem de gases através do metal líquido. Os métodos mais utilizados na indústria são:

Desgaseificação por pastilhas: De acordo com Triyono (2017), quando blocos porosos de hexacloroetano são introduzidos no banho metálico, eles interagem com o alumínio e desencadeiam uma reação que resulta na formação de bolhas de vácuo contendo os gases cloreto de alumínio e fluoreto de alumínio. Durante esse processo, o hidrogênio é capturado dentro dessas bolhas, que ascendem até a superfície do banho e são posteriormente retiradas pelo sistema de exaustão do forno.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Desgaseificação a vácuo: Neste método, o metal líquido é colocado sob vácuo, o que causa a evaporação dos gases dissolvidos devido à redução da pressão. Os gases evaporados são posteriormente coletados e tratados.

Tratamento com agentes desgaseificantes: Algumas ligas de alumínio são tratadas com agentes químicos desgaseificantes que reagem com os gases dissolvidos, formando compostos não voláteis que podem ser removidos da superfície do metal fundido.

Injeção de gás inerte: Neste método, um gás inerte, como o nitrogênio, é injetado no metal líquido. Os gases dissolvidos, especialmente o hidrogênio, são mais solúveis em gases inertes do que no alumínio líquido. Isso faz com que os gases dissolvidos migrem para o gás injetado e sejam eliminados do metal líquido.

Uso de um rotor de desgaseificação: O processo de desgaseificação por rotor envolve a imersão de um rotor rotativo no metal líquido. O rotor cria um movimento de agitação no metal, promovendo a liberação e a evaporação dos gases dissolvidos. Esses gases são então removidos do forno por um sistema de extração.

Segundo Michalek (2018), a técnica de desgaseificação por meio da introdução de gases inertes no banho de metal líquido é mais eficaz quando um rotor é empregado para agitar o banho. O movimento gerado pelo rotor garante uma completa mistura do gás com o alumínio líquido, possibilitando um contato mais amplo com o hidrogênio dissolvido. Isso resulta na formação de bolhas pequenas, com diâmetros de 3 a 10 mm, que sobem lentamente em direção à superfície do banho, onde são liberadas.

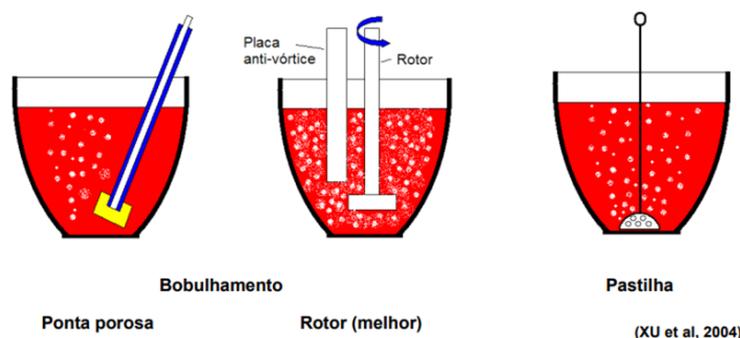
Segundo Campos (2008), o método de desgaseificação utilizando pastilhas de hexacloroetano é eficaz na eliminação do hidrogênio dissolvido na liga de alumínio e tem a vantagem de ser economicamente acessível em termos de equipamento. Porém, é importante observar que esse processo apresenta uma desvantagem significativa, que é a alta toxicidade devido à liberação de cloro na forma de gás. Além disso, o uso desse método pode resultar em uma deterioração mais acentuada do cadinho devido à natureza altamente corrosiva do cloro.

Na figura 3, é possível observar uma comparação entre os métodos mais utilizados.

Figura 3 - Comparação dos métodos de desgaseificação.

Na indústria:

- Borbulhamento com nitrogênio, argônio ou misturas com Cl.
- Pastilhas a base de hexacloroetano (C_2Cl_6).



Fonte: Interlloy Fundação e Usinagem.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

As vantagens do tratamento de desgaseificação são: melhora nas características de acabamento da peça; melhora das propriedades mecânicas pela remoção dos óxidos e inclusões; redução da quebra de ferramenta na usinagem das peças devido a remoção dos óxidos e melhora das propriedades mecânicas através da eliminação do hidrogênio contido na liga.

Este tratamento deve ser efetuado sempre que houver fusão de carga; houver transferência de metal para outro forno ou panela de transferência e quando houver adição de retorno, lingotes ou peças no banho metálico.

2.5. Escorificação

Um sério problema na fundição é a formação de óxidos no metal líquido, o alumínio e suas ligas demonstram uma forte tendência à interação com o oxigênio, tanto no estado sólido quanto líquido. Especificamente, as ligas que incluem quantidades significativas de magnésio apresentam uma maior propensão à oxidação.

O óxido de alumínio tem seu peso específico muito próximo ao do alumínio, diante disto, não aflora facilmente a superfície do metal líquido sendo essencial na fundição de ligas de alumínio que seja evitado ao máximo qualquer oxidação do metal líquido.

A origem dos óxidos às vezes é difícil de estabelecer, por exemplo, ocorre durante o manuseio do metal líquido, com conchas de vazamento, se não forem efetuadas de forma adequada. No momento que o metal líquido é transferido de um forno para outro, ou transportado na concha até o molde é essencial que a agitação sofrida pela massa líquida seja o menor possível.

Uma concentração elevada de óxidos na liga reduzirá sua fluidez, ocasionando um aumento de refugos devido a solda fria e peças incompletas.

A existência de óxidos no alumínio resulta na criação de áreas de maior dureza, causando danos às ferramentas de corte durante o processo de usinagem e às serras durante o corte de peças.

Os escorificantes reagem com os óxidos e outras impurezas, aglomerando-os e através de uma reação exotérmica separando o alumínio contido na escória devolvendo este alumínio ao banho metálico, resultando em uma escória seca, pulverulenta e pobre em alumínio (Figura 4).

Figura 4 - Remoção da escória.



Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Este tratamento consiste na adição de uma quantidade de sal escorificante (em geral 0,5 a 1,0%) na superfície do banho e posteriormente faz-se a mistura deste produto com a barra com o auxílio de uma escumadeira ou rodos (Figura 5), desencadeando uma reação exotérmica característica deste tratamento, após a qual deve-se fazer a remoção da escória seca e isenta de alumínio.

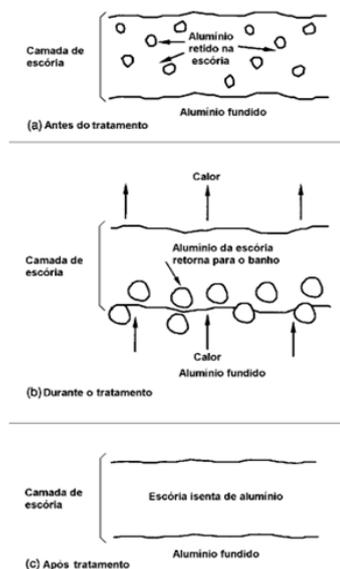
Figura 5 - Sal escorificante.



Fonte: Próprio autor.

Este tratamento consiste na adição de uma quantidade de sal escorificante (em geral 0,5 a 1,0%) na superfície do banho e posteriormente faz-se a mistura deste produto com a barra com o auxílio de uma escumadeira ou rodos, desencadeando uma reação exotérmica característica deste tratamento (Figura 6), após a qual deve-se fazer a remoção da escória seca e isenta de alumínio.

Figura 6 - Processo de limpeza da escória por reação exotérmica.



Fonte: GRUZLESKI; CLOSSET, 1990



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Os fluxos para escorificação são compostos de elementos como: cloretos, que influem diretamente na limpeza do alumínio e protegem contra a absorção de H^2 e da oxidação atmosférica; fluoretos, que em contato com alumínio tem a função de aglomerar os óxidos; e misturas de carbonetos, sulfatos e fluoretos, que promovem a reação exotérmica.

3. METODOLOGIA

Foram conduzidos três ensaios para analisar a redução da porosidade em ligas de alumínio. A liga utilizada foi a SAE 309 e utilizou-se o método de rotor FDU (*Foundry Degassing Unit*). O nitrogênio foi injetado no alumínio líquido através de um eixo de grafite no fundo do forno, promovendo a eliminação das bolhas de hidrogênio. O rotor controlou o tamanho das bolhas de nitrogênio, garantindo uma distribuição uniforme no fundo do forno.

3.1. Coleta da Amostra sem Desgaseificação

A primeira etapa para coleta da amostra SAE 309, se inicia na fusão do alumínio, onde é utilizado um forno cadinho elétrico, com capacidade de 300 kg. A matéria prima de carga do forno é composta de 70% por lingotes da liga SAE 309, demonstrado na figura 7, e 30% de retorno (peças não conforme e canais de alimentação), demonstrado na figura 8. A matéria prima deve estar seca para evitar solubilidade do hidrogênio no alumínio.

Figura 7 - Lingotes.



Fonte: Próprio autor.



Figura 8 - Retorno (Canais de alimentação).



Fonte: Próprio autor.

Após a fusão da matéria prima, foi retirada uma amostra do metal líquido e vazada em uma mini coquilha. Posteriormente, foram analisados os elementos químicos e realizado o ensaio macrográfico para verificação da porosidade na liga, sem o tratamento de desgaseificação.

3.2. Preparação do Rotor FDU com a Injeção do Gás Nitrogênio

O rotor FDU foi colocado na posição central do cadinho do forno de espera, a chave do painel foi acionada no modo automático e em seguida aguardou-se o final do tratamento. O trabalho foi realizado conforme a instrução de tratamento do metal líquido I.T 7.5-03 do sistema de gestão da qualidade da empresa Interally Fundição e Usinagem Ltda, conforme figura 8:

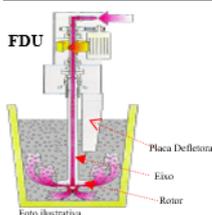
Figura 8 - Tratamento de metal líquido.

	Sistema de Gestão da Qualidade	Revisão: 05
	TRATAMENTO DO METAL LÍQUIDO	Data Emissão: 23/02/07
	I.T 7.5-03	Folha: 01 / 01

1- OBJETIVO: Definir método de tratamento do metal líquido.

2- DESCRIÇÃO

a) DESGASEIFICAÇÃO:



- Posicionar o eixo + rotor sobre o cadinho para pré-aquecimento.
- Imergir o conjunto eixo + rotor no metal líquido.
- Posicionar a chave do painel no **automático** e aguardar o final do tratamento.

- **Tempo de Tratamento: 5 a 8 minutos**
- **Vazão do Nitrogênio: 15 a 25 litros / minuto**

FINALIDADE: Remoção de gases e inclusões do metal.

Fonte: Interally Fundição e Usinagem.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

O eixo e o rotor são posicionados sobre o cadinho e imergidos no metal líquido, onde será injetado o nitrogênio para a remoção das bolhas presentes.

3.3. Coleta da Amostra com Desgaseificação

Após 2 minutos de tratamento, foi coletada uma amostra do metal líquido por meio de uma concha e vazada em uma mini coquilha (Figura 9) para análise macrográfica da porosidade da amostra.

Figura 9 - Mini coquilha para amostra.



Fonte: Próprio autor.

3.3.1. Amostra com 4 Minutos no FDU

Após 4 minutos de ensaio, coletou-se uma nova amostra para análise da porosidade, conforme procedimento citado no item 3.2.

3.3.2. Amostra com 6 Minutos no FDU

Após 6 minutos de ensaio, coletou-se uma nova amostra para análise da porosidade, conforme procedimento citado no item 3.2.

3.4. Preparação da Amostra para Macrografia

As amostras que tiveram inserção de nitrogênio através do FDU foram levadas ao laboratório metalúrgico para análise dos poros. As superfícies foram lixadas em uma politriz com uma lixa 200 antes das análises (Figura 10).



Figura 10 - Lixamento da amostra.



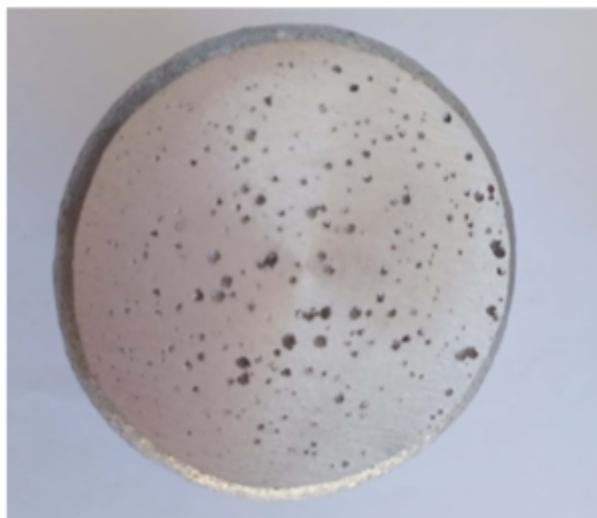
Fonte: Próprio autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

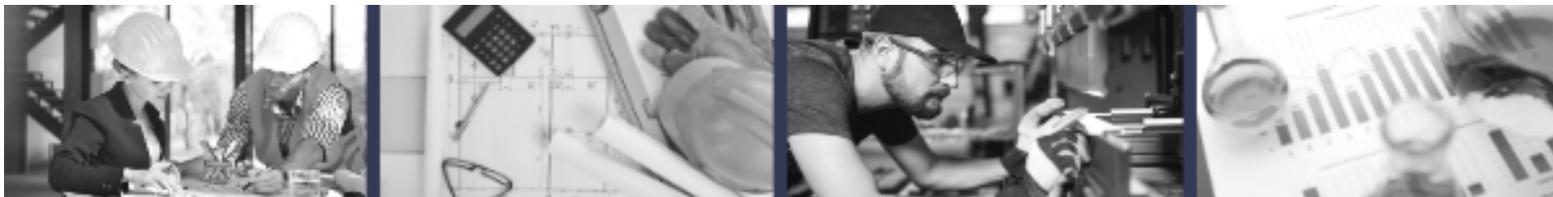
4.1. Amostra sem degaseificação

A amostra retirada sem tratamento encontrou-se com muitos poros (Figura 11), justificando a necessidade do tratamento de degaseificação. Os poros foram medidos por um estereoscópio, apresentado na figura 12.

Figura 11 - Amostra 1 (Poros 0,3 mm a 1 mm).



Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 12 - Estereoscópico para medição de poros.



Fonte: Próprio autor.

4.2. Amostra com 2 Minutos de Rotor

Após 2 minutos de tratamento com o FDU, a amostra apresentou uma redução significativa da quantidade de poros em relação à amostra sem tratamento (Figura 13).

Figura 13 - Amostra 2 (Poros de 0,32 mm a 0,58 mm) com 02 minutos de FDU.



Fonte: Próprio autor.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

4.3. Amostra com 4 Minutos de Rotor

Após 4 minutos de tratamento com o FDU, a amostra apresentou uma redução significativa da quantidade de poros em relação à amostra anterior, com poros na casa de 0,07 mm de diâmetro (Figura 14).

Figura 14 - Amostra 3 (Poros com diâmetro de 0.07 mm) com 4 minutos de FDU.



Fonte: Próprio autor.

4.4. Amostra com 6 Minutos de Rotor

A amostra retirada após 6 minutos de tratamento encontra-se praticamente sem poros (Figura 15), atingindo as especificações conforme a norma do cliente.

Figura 15 - Amostra 4 (com 6 minutos de FDU).

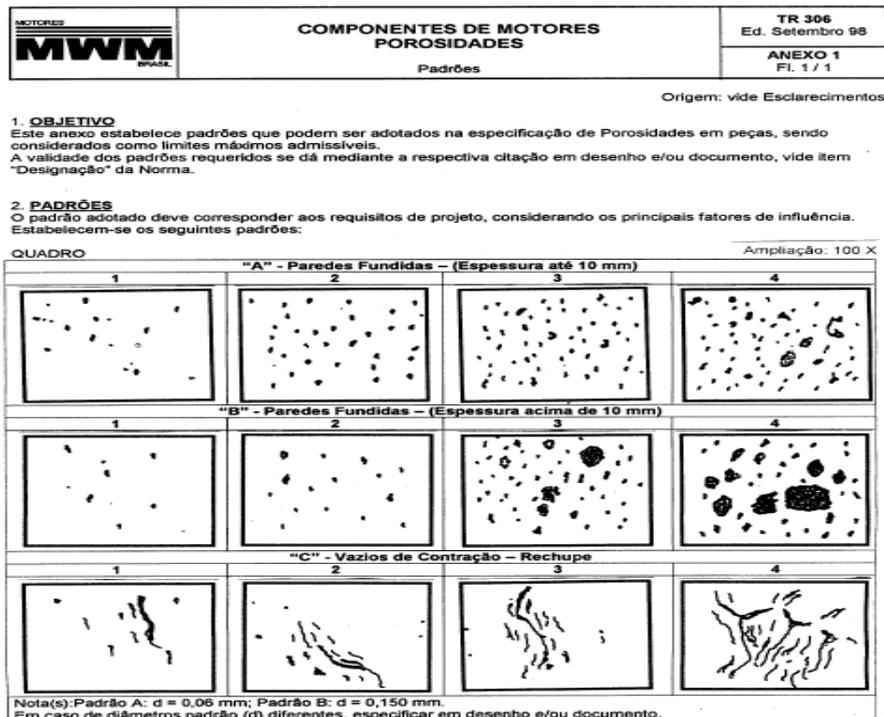


Fonte: Próprio autor.



A norma adotada para a especificação da porosidade nas ligas ensaiadas é a TR 306, padronizada pela MWM Brasil (Figura 16).

Figura 16 - Norma MWM.



Fonte: Motores MWM Brasil.

5. CONCLUSÃO

A realização dos ensaios de análise da redução de porosidade em ligas de alumínio, utilizando o rotor FDU (*Foundry Degassing Unit*) para o processo de degaseificação, gerou resultados conclusivos e notáveis nas amostras utilizadas. Estas amostras compostas pela liga SAE 309 foram submetidas a diferentes períodos de tratamento, e os resultados foram avaliados por meio da análise macrográfica da porosidade nas amostras coletadas.

A amostra sem degaseificação analisada inicialmente apresentou uma quantidade considerável de poros. Com a introdução do rotor FDU e a injeção de nitrogênio no alumínio líquido, observou-se uma redução progressiva da porosidade nas amostras.

A amostra com 2 minutos de tratamento apresentou uma redução significativa na quantidade de poros em comparação com a amostra sem degaseificação. Esse resultado foi ainda mais evidente nas amostras coletadas após 4 e 6 minutos de operação do FDU, onde a porosidade diminuiu consideravelmente, chegando a níveis praticamente imperceptíveis.

Os resultados obtidos atenderam aos objetivos propostos, conforme a norma MWM TR 306, utilizada pelo cliente.

O uso do método de degaseificação com o rotor FDU mostrou-se altamente eficiente na redução da porosidade em ligas de alumínio. Estes resultados são pertinentes para a



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

indústria metalúrgica, contribuindo para a melhoria da qualidade do material fundido e diminuição do refugo na indústria e, conseqüentemente, otimizando os processos de fabricação.

6. REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. São Paulo, 2007, 35. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7696125/mod_resource/content/1/09_1fundamento-s-Aluminio.pdf> Acesso em 23 set. 2023.

ABAL - **Bauxita no Brasil - Mineração Responsável e competitividade**. Disponível em: <<https://abal.org.br/wp-content/uploads/2017/05/ABAL-BAUXITA-NO-BRASIL-MINERACAO-RESPONSAVEL-E-COMPETITIVIDADE.pdf>> Acesso em 24 set. 2023.

ABAL - **História do Alumínio**. Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>> Acesso em 24 set. 2023.

ALUMINIUM GUIDE. **Aluminium and Aluminum Alloys**. Disponível em: <https://aluminium-guide.com/aluminum-and-aluminum-alloys-asm-specialty-handbook/?amp=1>. Acesso em: 22 ago. 2023.

BALDAM, Roquemar de L.; VIEIRA, Estéfano A. **Fundição - Processos e Tecnologias Correlatas**. Editora Saraiva, 2014. *E-book*. ISBN 9788536519746. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519746/>. Acesso em: 19 ago. 2023.

CAMPBELL, John. **Complete casting handbook**: metal casting processes, metallurgy, techniques and design. Waltham: Elsevier, 2011.

CAMPOS, Catarina J. **Redução das perdas de alumínio no processo de fabrico de peças Sonafi**. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2008.

CORRADI, Christiano Alves Lima. **Metalurgia das ligas de alumínio e tratamentos no metal líquido**. Itaúna: SENAI, 2001.

FUOCO, Ricardo. **Importância do tratamento de degaseificação na fundição de peças em ligas de alumínio**. Disponível em: <<https://pt.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-do-tratamento-dedegaseifica%C3%A7%C3%A3o-na-fundi%C3%A7%C3%A3o-fuoco>>. Acesso em: 03 nov. 2023.

FUOCO, Ricardo. **Propriedades Mecânicas de Peças Fundidas em Ligas Al-Si**. 17º CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO, ABIFA, São Paulo, 2017.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

GRUZLESKI, John E.; CLOSSET, Bernard. **Treatment of Liquid Aluminum-Silicon Alloys**. Amer Foundrymens Society, 1990.

HANBING, X.; QINGYOU, H.; MEEK, T. **Effects of ultrasonic vibration on degassing of aluminum alloys**. Materials Science and Engineering: A, Volume 473, Issues 1–2, 25 January 2008, Pages 96–104. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509307006296>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

IRON DISA INDUSTRIAL LTDA. **Noções de tratamento de Alumínio e suas ligas**.

Disponível em:

<<https://old.foundrygate.com/upload/artigos/No%C3%A7%C3%B5es%20de%20tratamento%20de%20Alum%C3%ADnio%20e%20suas%20ligas.pdf>>. Acesso em 10 out. 2023.

LA ALUMÍNIOS. **Ligas de Alumínio**. Disponível em:

<<http://aluminios.la/ligasdealuminio.html>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

MOREIRA, Marcelo F. **Ligas de Alumínio para Fundição**: Relação entre o processo de fundição e a Microestrutura, 2019. Disponível em:

<http://www.pmt.usp.br/pmt3402/material/ligas_aluminio_fundidas.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2023.

PIEPRZYCA, J.; KUDLINSKI, Z.; MICHALEK, K.; GRYC, K.; TKADLECKOVA, M. **Modelling Steel's Homogenization during Argon Purging**. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v. 55, p. 573-577, 2012.

TRIYONO, T.; MUHAYAT, N.; SUPRIYANTO, A.; LUTİYATMI, L.. Effect of Degassing Treatment on the Interfacial Reaction of Molten Aluminum and Solid Steel. **Archives Of Foundry Engineering**, [S.L.], v. 17, n. 2, p. 227-239, 27 jun. 2017. Walter de Gruyter GmbH.

ZANGRANDI, A. **Alumínio e suas ligas**: fundamentos metalúrgicos e tecnológicos. Lorena, SP: GRAFIST - Gráfica & Editora Santa Teresa, 2008. v. 1. 103p.