

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

**ANDRÉ FONTANA**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR  
GRAVIDADE NA QUALIDADE DE BOCAIS PARA TANQUES EM ALUMÍNIO  
SAE 305**

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**ANDRÉ FONTANA**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR  
GRAVIDADE NA QUALIDADE DE BOCAIS PARA TANQUES EM ALUMÍNIO  
SAE 305**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à  
Universidade de Caxias do Sul como requisito  
parcial à obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez  
Acosta

**CAXIAS DO SUL**

**2021**

**ANDRÉ FONTANA**

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR  
GRAVIDADE NA QUALIDADE DE BOCAIS PARA TANQUES EM ALUMÍNIO  
SAE 305**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos de fabricação.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

**Aprovado em 25/11/2021.**

**Banca Examinadora**

Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. María Cristina Moré Farias  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Dr. Alexandre Vieceli  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

*“Quando tudo estiver parecendo ir contra você,  
lembre-se que o avião decola contra o vento,  
e não a favor dele”.*  
*(Henry Ford)*

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado forças para superar as dificuldades.

Aos meus pais, Valcidir Fontana e Rosmeri Magnante Fontana, pelo apoio e pelos ensinamentos passados a mim durante a minha jornada.

À minha noiva, Valéria dos Santos, pela paciência, compreensão e apoio.

Ao orientador, Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta, pela disponibilidade e ensinamentos durante toda a execução do trabalho de conclusão de curso.

Ao técnico de laboratório, Benhur Ismael Padilha pelo auxílio na execução dos ensaios.

À Universidade de Caxias do Sul, pela disponibilização de equipamentos e laboratórios para a execução dos ensaios.

À empresa Fabbof componentes automotivos, pela disponibilidade e auxílio necessários para a realização deste estudo.

E por fim, meu agradecimento a todos que de alguma forma contribuíram para que se tornasse possível a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho analisou o processo de fundição por gravidade de alumínio da liga SAE 305 utilizando molde metálico. A análise em questão foi realizada com a finalidade de reduzir ou eliminar a presença de defeitos internos em bocais para tanques de combustível. Os parâmetros utilizados neste processo, são de difícil determinação sendo comumente definidos pela abordagem do método de tentativa e erro, o que gera custos elevados e alto índice de retrabalho. A principal contribuição deste trabalho, concentrou-se na aplicação do método de Taguchi como uma abordagem de engenharia, por meio da análise da relação sinal-ruído. Foram realizados experimentos modificando três parâmetros do processo, que são, a temperatura do alumínio durante o vazamento, a temperatura do molde metálico e a quantidade de desgaseificante adicionada ao banho. Posteriormente, foram realizados ensaios de líquidos penetrantes, micrografia e dureza para avaliação da região interna das amostras obtidas e verificação da quantidade e tamanho dos poros em cada caso. A partir da análise, foram definidos parâmetros otimizados para este processo, baseando-se no cálculo de sinal-ruído de Taguchi. Por fim, foi realizado um novo experimento utilizando-se os parâmetros definidos como ótimos, para comprovação dos resultados. Ao final da análise dos experimentos constatou-se uma grande redução no percentual de refugos por conta de defeitos internos. O percentual de refugos antes da realização deste estudo era de cerca de 50% e passou a ser de 4% depois da otimização de parâmetros.

**Palavras-chave:** Fundição por gravidade, coquilha metálica, alumínio, porosidade, método de Taguchi.

## ABSTRACT

This job analyzed the gravity casting process of aluminum alloy SAE 305 using a metal mold. The analysis in question was carried out in order to reduce or eliminate the presence of internal defects in fuel tank nozzles. The parameters used in this process are difficult to determine and are commonly defined by the trial and error method approach, which generates high costs and a high rate of rework. The main contribution of this work focused on the application of the Taguchi's method as an engineering approach, through the analysis of the signal-to-noise ratio. Experiments were carried out modifying three process parameters, namely, the aluminum temperature during casting, the metallic mold temperature and the amount of degasser added to the melt. Subsequently, liquid penetrant, micrograph and toughness tests were performed to evaluate the internal region of the samples obtained and verify the quantity and size of pores in each case. From the analysis, optimized parameters were defined for this process, based on the Taguchi's signal-to-noise ratio. Finally, a new experiment was carried out using the parameters defined as optimal, to prove the results. At the end of the analysis of the experiments, a great reduction in the percentage of broke due to internal defects was verified. The percentage of broke before the performance of this study was around 50% and changed to 4% after optimization of parameters.

**Key Words:** Gravity casting, metal mold, aluminum, porosity, Taguchi's method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases da liga alumínio-silício.....	20
Figura 2 – Morfologia da liga A413, aumento de 200 x.....	22
Figura 3 – Forno à cadinho.....	24
Figura 4 – Eficiência de redução do teor de hidrogênio em banhos de alumínio.....	25
Figura 5 – Etapas da fundição por gravidade em molde permanente.....	27
Figura 6 – Porosidades em ligas de alumínio.....	29
Figura 7 – Bocal para tanque de combustível.....	34
Figura 8 – Materiais adicionados ao forno fusor.....	35
Figura 9 – Coquilha metálica e defeitos na peça após usinagem.....	35
Figura 10 – Fluxograma dos procedimentos.....	36
Figura 11 – Diagrama de causa e efeito de porosidades.....	37
Figura 12 – Medição de temperatura por infravermelho.....	39
Figura 13 – Gráfico: Quantidade de defeitos e distância atingida por rechupes.....	44
Figura 14 – Imagens microscópicas, ataque reagente de Keller, aumento 50 X.....	45
Figura 15 – Gráfico: Temperatura do material x defeitos.....	48
Figura 16 – Gráfico: Temperatura do molde x defeitos.....	48
Figura 17 – Gráfico: Quantidade de pastilhas x defeitos.....	49
Figura 18 – Gráfico: Dureza Brinell.....	51
Figura 19 – Gráfico: Sinal ruído da função perda de Taguchi.....	52
Figura 20 – Bocais de tanque usados.....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ligas de alumínio para fundição.....	18
Tabela 2 – Composição química da liga SAE 305.....	19
Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga A413.0.....	19
Tabela 4 – Diversos tipos de AO de Taguchi.....	32
Tabela 5 – Fatores e níveis de experimentos.....	38
Tabela 6 – Arranjo ortogonal de fatores e níveis.....	38
Tabela 7 – Dimensões dos defeitos internos.....	47
Tabela 8 – Teste t de Student.....	50
Tabela 9 – Produção de bocais no ano de 2021.....	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Efeitos de elementos adicionados à liga Al-Si.....	21
Quadro 2 – Amostras seccionadas após serem fundidas.....	41
Quadro 3 – Superfícies após o ensaio de líquidos penetrantes.....	43

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\eta$  Transformação de sinal ruído;
- $r$  Número de combinações;
- $y_i$   $i$ -ésima resposta observada para cada combinação;
- $\bar{y}$  Média das respostas para cada combinação.

## LISTA DE ABREVIATURAS

AA	<i>Aluminum Association</i>
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
ABIFA	Associação Brasileira de Fundição
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
DOE	<i>Design of experiments</i>
GLP	Gás liquefeito de petróleo
LP	Líquidos penetrantes
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>17</b>
1.2.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
2.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	18
2.1.1	<b>Liga SAE 305.....</b>	<b>19</b>
2.1.2	<b>Microestrutura das ligas Al-Si.....</b>	<b>20</b>
2.2	FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE EM MOLDES PERMANENTES.....	22
2.2.1	<b>Fusão do alumínio.....</b>	<b>23</b>
2.2.2	<b>Desgaseificação do alumínio.....</b>	<b>24</b>
2.2.3	<b>Fluxos escorificantes.....</b>	<b>26</b>
2.2.4	<b>Moldes permanentes para fundição.....</b>	<b>26</b>
2.2.5	<b>Etapas do processo de fundição por gravidade.....</b>	<b>27</b>
2.3	DEFEITOS EM PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS POR GRAVIDADE.....	28
2.3.1	<b>Porosidades.....</b>	<b>28</b>
2.3.2	<b>Inclusões.....</b>	<b>30</b>
2.4	METODOLOGIA DE TAGUCHI.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1	SITUAÇÃO ATUAL.....	34
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	36
3.2.2	<b>Definição das variáveis.....</b>	<b>36</b>
3.3	FUNDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	38
3.3.2	<b>Análise das variáveis de resposta.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>41</b>
4.1	AVALIAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS.....	41
4.2	RESULTADOS DO ENSAIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES.....	43
4.3	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	45

4.4	RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA DE DEFEITOS INTERNOS....	46
4.5	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA.....	50
4.6	CÁLCULO DE SINAL RUÍDO.....	51
4.7	EXPERIMENTO DE COMPROVAÇÃO.....	53
4.7.1	<b>Avaliação do experimento de comprovação.....</b>	<b>53</b>
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
6	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>56</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produtividade e o baixo custo de produção são hoje palavras-chaves no ambiente industrial. Devido à necessidade de produzir mais, sem que a qualidade dos produtos seja comprometida, os processos de fabricação são constantemente submetidos a estudos e melhorias.

O processo de fundição é um método de fabricação milenar que surgiu nos primórdios da humanidade e que tornou-se um dos métodos mais versáteis e econômicos da indústria metalmeccânica. Porém, segundo Campbell (2011) à medida que as técnicas de fabricação melhoraram nos últimos anos, houve evidências da presença de defeitos internos nas peças causados por falhas na estrutura interna dos metais líquidos.

Os defeitos presentes em peças fundidas, por sua vez, podem ser provenientes de diversas variáveis do processo. Baldam e Vieira (2014) abordam as propriedades dos metais líquidos, a solidificação, as contrações do metal durante a solidificação e a solubilidade de gases durante o processo como aspectos relevantes à presença de porosidades e rechupes na peça fundida.

A determinação dos parâmetros do processo de fundição no ambiente fabril é comumente obtida por meio da abordagem de tentativa e erro, modificando-se os parâmetros e analisando os resultados obtidos nas peças resultantes. Esta abordagem experimental não estruturada, mesmo feita por profissionais experientes, nem sempre é eficaz, devido ao grande número de fatores envolvidos e as variações decorrentes de parâmetros sem controle (MONTGOMERY, 2009).

Segundo Taguchi (1986), o uso de métodos estatísticos para o planejamento experimental é especialmente importante, pois favorece a obtenção de produtos e processos robustos, insensíveis a fatores que possam influenciar seu desempenho.

Este estudo busca o entendimento das variáveis do processo de fundição por gravidade em molde permanente da liga de alumínio SAE 305 para identificação das causas do surgimento de defeitos internos em bocais para tanques de combustível fabricados pela empresa Fabbof componentes automotivos.

A empresa, fundada no ano de 1997, localizada na cidade de São Marcos, atua no mercado de peças, acessórios e componentes de reposição para o segmento de veículos pesados e semipesados. Dentre a vasta gama de produtos estão tanques de

combustível, espelhos, escapamentos, calotas, suspensões pneumáticas e muitos outros. Atualmente, a Fabbof dispõe de um parque industrial de 25.000 m<sup>2</sup>, contando com diversos processos de fabricação como corte, conformação, soldagem, injeção de alumínio, injeção de polímeros, entre outros. O setor de fabricação de peças em alumínio da empresa, onde é desenvolvido este estudo, conta hoje com uma injetora de alumínio 300 toneladas, um forno a gás com capacidade de fusão de até 300 kg de material e equipamentos para corte e rebarbação de peças.

Inicialmente, foi desenvolvido um planejamento de experimentos baseado na teoria de Taguchi e posteriormente a melhoria da qualidade do produto foi realizada por meio do ajuste dos parâmetros do processo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Alguns defeitos do processo de fundição, como porosidades e rechupes, são percebidos somente em processos posteriores de usinagem ou até mesmo quando ocorre a falha do componente. Com a finalidade de garantir a qualidade das peças produzidas e evitar custos por retrabalho, é fundamental que se realize um estudo aprofundado do processo de fundição, identificando as possíveis causas de falhas.

Atualmente, não é realizado um acompanhamento do processo de fundição por gravidade na empresa, acarretando assim em defeitos na rosca interna de bocais para tanques de alumínio que somente são revelados no processo de usinagem da rosca. Com isso, a empresa sofre uma perda de cerca de 50 % das peças fundidas, além do aumento do custo de fundição e usinagem dos bocais.

Baseado em estudos já realizados anteriormente sobre a formação de porosidades na região interna de peças fundidas, como o desenvolvido por Camargo (2014), surge este trabalho, visando identificar as causas e uma possível solução para este problema. Além disso, levando em conta que a empresa não possui nenhum método de controle de qualidade para este processo, este trabalho poderá contribuir para um futuro desenvolvimento de um método interno para controle de qualidade das peças fundidas, o que tornaria possível uma redução de custos e perdas por refugo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo analisar a influência dos parâmetros do processo de fundição por gravidade na qualidade de bocais para tanques de combustível fabricados com a liga de alumínio SAE 305.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a) utilizar o método proposto por Genichi Taguchi para elaborar um planejamento de experimentos, visando tornar o processo de fundição por gravidade robusto a variações ambientais;
- b) obter amostras da liga SAE 305, fundidas por gravidade variando os parâmetros de temperatura do material, temperatura do molde e quantidade de pastilhas para remoção de gases;
- c) determinar o tamanho e número de defeitos nas regiões internas das amostras fundidas para os diferentes parâmetros do processo;
- d) apresentar uma proposta de melhoria para o processo de fundição por gravidade dos bocais de alumínio;
- e) elaborar um método de controle de qualidade para as peças produzidas;
- f) avaliar os efeitos do método de melhoria proposto em relação à qualidade das peças produzidas;

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Segundo ABAL (2007), o alumínio é um dos metais mais versáteis utilizados na engenharia, arquitetura e indústria em geral. Além de possuir um peso específico de aproximadamente 2,70 g/cm<sup>3</sup>, o que corresponde a 35 % do peso do aço, o alumínio possui boa ductilidade e baixo ponto de fusão, o que o torna de fácil moldagem e conformação.

Além disso, segundo Baldam e Vieira (2014), o alumínio possui uma ótima resistência à corrosão devido à combinação dos átomos de sua superfície com o oxigênio da atmosfera, formando uma camada de óxido protetor que impede o avanço da corrosão. O alumínio também pode apresentar boas características de soldabilidade, maleabilidade e usinabilidade quando são adicionados elementos de liga.

A *Aluminum Association* (AA) estabelece um sistema de classificação para o alumínio e suas ligas no estado fundido. A nomenclatura das ligas (Tabela 1) é composta por quatro dígitos, em que o primeiro indica o elemento de liga principal, o segundo e o terceiro dígitos indicam o teor de alumínio e o último a forma do produto (0-peças fundidas; 1,2-lingotes).

Tabela 1 – Ligas de alumínio para fundição

(continua)

Série	Elemento(s) de liga principal(is)	Principais aplicações
1XX.X	Al comercialmente puro	Contatos elétricos
2XX.X	Al-Cu e Al-Cu-Mg	Indústria aeronáutica
3XX.X	Al-Si-Mg e Al-Si-Cu	Componentes de alta resistência à corrosão
4XX.X	Al-Si	Pistões fundidos de motores
5XX.X	Al-Mg	Aplicações náuticas (navios e barcos)
6XX.X	Não existe este sistema	Não especificado por não existir este sistema
7XX.X	Al-Zn e Al-Zn-Mg	Indústria aeronáutica

(continuação)

8XX.X	Al-Sn	Várias, para ligas com baixo ponto de fusão
9XX.X	Outros elementos	Diversos

Fonte: ASM Handbook (1998).

### 2.1.1 Liga SAE 305

A liga SAE 305, é uma liga de alumínio e silício cuja composição é fornecida pela norma ASTM B85 (Tabela 2). Conforme ASM Handbook (1998), é equivalente a esta, a liga A413.0 da norma da AA.

Tabela 2 – Composição química da liga SAE 305

Percentual de elementos de liga (% em massa)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Sn	Outros
11 a 13	1,3	1	0,35	0,1	0,5	0,5	0,15	0,25

Fonte: Norma ASTM B85 (2010).

ASM Handbook (1998), cita algumas das principais características da liga SAE 305. Dentre elas, a sua baixa densidade, baixa temperatura de fusão, elevada fluidez, baixa tendência à trincas de solidificação e elevado coeficiente de transferência de calor. Esta liga também proporciona ótima resistência à pressão (estanqueidade). As propriedades mecânicas da liga A413.0 (equivalente à SAE 305), de acordo com ASM Handbook (1998), são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas da liga A413.0

(continua)

Resistência à tração	241 MPa
Resistência ao cisalhamento	170 MPa
Alongamento percentual	3,5 %
Dureza	70 HB
Densidade	2,657 g/cm <sup>3</sup>

(continuação)

Intervalo de solidificação	585 – 570 °C
Resistência à fadiga	130 MPa
Temperatura de fusão	650 – 760 °C

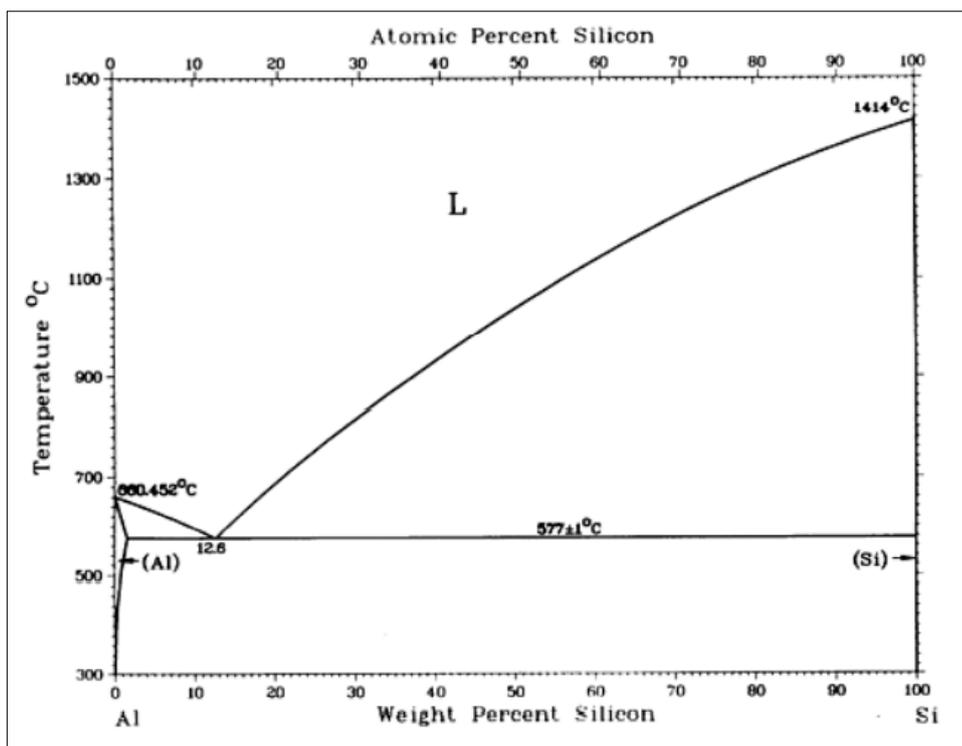
Fonte: ASM Handbook (1998).

A liga SAE 305 é bastante utilizada no processo de fundição principalmente de peças delgadas e com alto nível de detalhes devido à sua ótima fluidez, o que permite que o metal líquido preencha as cavidades de moldes metálicos com mais facilidade (ASM Handbook, 1998).

### 2.1.2 Microestrutura das Ligas Al-Si

De acordo com ASM Handbook (2004), a liga de alumínio A413 pode ser considerada uma liga de alumínio-silício eutética por possuir um teor de silício em torno de 12 %. O gráfico da Figura 1 representa o ponto eutético da liga em um teor de silício de 12,6 % e 577 °C.

Figura 1 – Diagrama de fases da liga alumínio-silício



Fonte: ASM Handbook (1992).

A adição de mais elementos, confere a esta liga melhores propriedades mecânicas e algumas mudanças em suas características. Segundo Fuoco (2017), o magnésio, o ferro e o cobre são os elementos utilizados em maior escala na liga Al-Si. O Quadro 1, apresenta algumas propriedades alcançadas com adição destes elementos de liga.

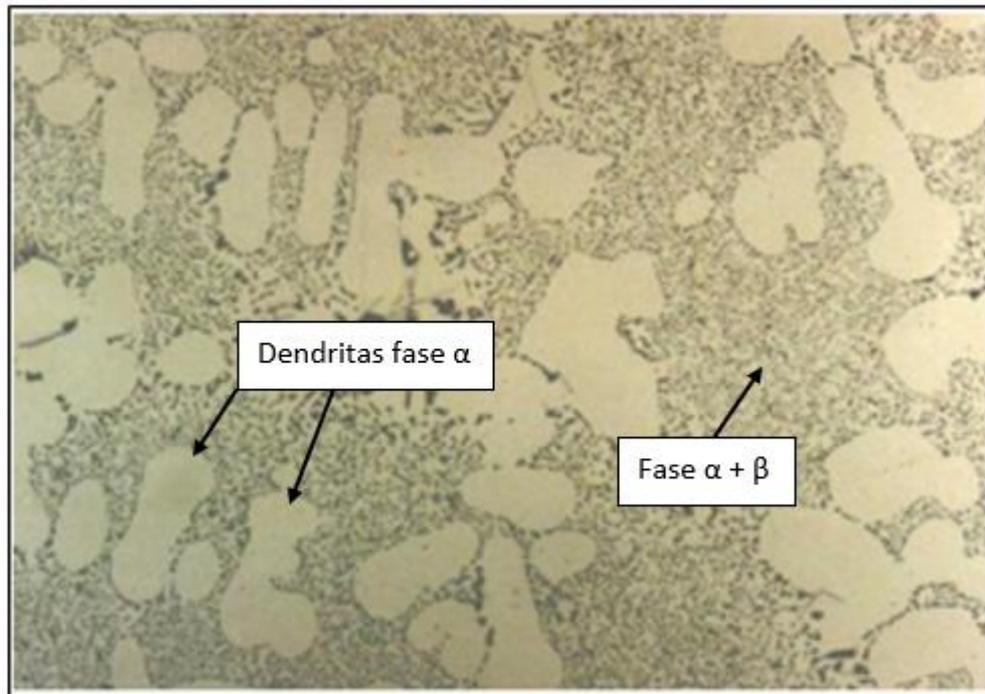
Quadro 1 – Efeitos de elementos adicionados à liga Al-Si.

<b>Elemento de liga</b>	<b>Efeito</b>
<b>Magnésio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilita o tratamento térmico de endurecimento por precipitação;</li> <li>- Não influencia significativamente nas propriedades mecânicas da liga.</li> </ul>
<b>Ferro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimiza a tendência do alumínio soldar-se ao molde metálico;</li> <li>- Pode ser considerado impureza se estiver presente em teores acima de 1,5%.</li> </ul>
<b>Cobre</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Proporciona elevado aumento na resistência mecânica;</li> <li>- Apresenta efeito fragilizante e redução na ductilidade se utilizado em teores superiores a 1%.</li> </ul>

Fonte: Fuoco (2017).

A microestrutura das ligas alumínio-silício é constituída de duas fases, sendo uma fase  $\alpha$  composta por alumínio e aproximadamente 1,5 % de silício, e uma fase  $\beta$  composta praticamente de silício puro (ASM HANDBOOK, 2004). De acordo com Fuoco (2017) e Moreira (2019), a morfologia dos grãos da microestrutura de ligas Al-Si é dendrítica formada pela fase  $\alpha$  e as regiões interdendríticas são constituídas por porções de eutético onde coexistem as fases  $\alpha$  e  $\beta$ . A Figura 2 ilustra a microestrutura da liga A413, com aumento de 200x.

Figura 2 – Morfologia da liga A413, aumento de 200x.



Fonte: Moreira (2019).

## 2.2 FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE EM MOLDES PERMANENTES

Siegel (1985) define como fundição em molde permanente, todo e qualquer processo em que um metal líquido é vertido na cavidade de um molde metálico que possa ser utilizado um grande número de vezes e que garanta o formato e dimensões das peças produzidas por um grande período de tempo.

Os metais que podem ser fundidos em moldes permanentes (também chamados de coquilhas) incluem ligas de alumínio, magnésio, zinco, cobre e ferro cinzento hipereutético. Porém, segundo ASM Handbook (2008), a grande maioria das peças fundidas em coquilhas metálicas são de alumínio.

Ainda segundo ASM Handbook (2008), desde a década de 1990, houve um grande crescimento nas aplicações de ligas fundidas em alumínio para peças automobilísticas como travessas, rodas, juntas de direção e outras. Esse crescimento foi impulsionado pela necessidade de redução no consumo de combustível dos automóveis, ou seja, a utilização de peças em alumínio tornou os veículos mais leves e conseqüentemente mais econômicos.

Segundo Baldam e Vieira (2014), a fundição em moldes metálicos possui várias vantagens, como melhor uniformidade e melhores propriedades mecânicas das

peças, melhor acabamento superficial e manutenção das tolerâncias dimensionais. Porém este processo é limitado à fabricação de peças pequenas e menos complexas, e se caracteriza por um custo elevado para fabricação do molde. De acordo com ABAL (2007), o processo de fundição por gravidade em coquilha metálica torna-se econômico quando é requerido um grande volume de produção de peças, pois o custo de fabricação do ferramental é compensado pela produtividade, economia de mão de obra e qualidade do produto final.

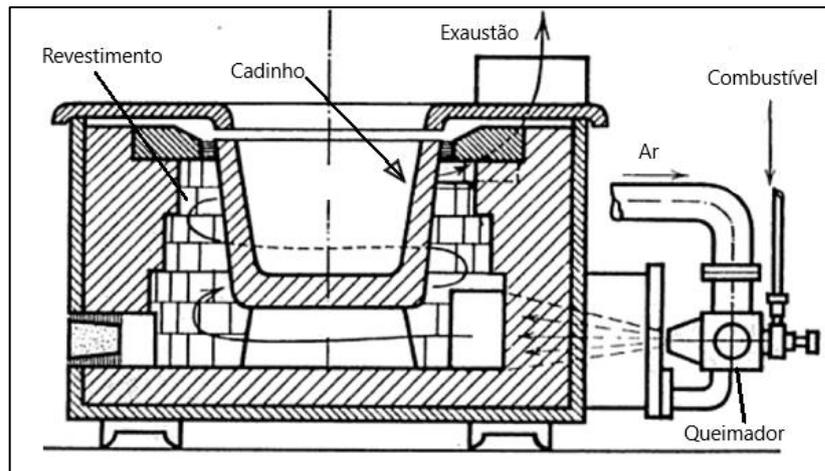
### **2.2.1 Fusão do alumínio**

Atualmente existem diversos tipos de fornos para fusão de metais. Os mais conhecidos e utilizados na indústria são os fornos à cadinho, fornos rotativos, fornos cubilô e fornos elétricos. Segundo Campbell (2011), do ponto de vista da qualidade, todos os modelos de fornos são capazes de produzir fundidos de alta qualidade. Portanto, os fornos para fundição diferenciam-se pela eficiência de cada um e pelo tipo de combustível que consomem. Neste trabalho, será abordado somente o modelo de forno a cadinho com aquecimento por chama, que é o modelo existente na empresa.

Os fornos a cadinho são constituídos de uma carcaça de chapas metálicas em formato cilíndrico e tijolos refratários em seu interior. O cadinho onde ocorre a fusão do material fica no centro do forno e é aquecido por uma chama que o circunda, a chama por sua vez pode ser proveniente da queima de óleo ou gás liquefeito de petróleo (OLIVEIRA, 2013).

Há uma série de cuidados a serem tomados no momento em que o forno é carregado, começando pela qualidade dos lingotes fornecidos. Moraes (2019), salienta a importância do controle de qualidade no recebimento do material, pois os lingotes podem não seguir à risca a composição e porcentagem de impurezas especificadas pelo fabricante. Para tal, é importante verificar o certificado de qualidade do material no momento do recebimento para garantir que o mesmo se encontra na composição correta. A Figura 3 representa esquematicamente a construção do forno à cadinho.

Figura 3 – Forno à cadinho.



Fonte: LESSA (2013).

Deve-se tomar cuidado com a umidade da carga a ser fundida, o que pode causar oxidação e formação de bolhas de gás no metal líquido. O pré-aquecimento da carga antes da fusão contribui significativamente para a remoção de umidade do material a ser fundido (MOREIRA, 2013).

### 2.2.2 Desgaseificação do alumínio

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 à elevada solubilidade do hidrogênio nas ligas de alumínio no estado líquido e também à reação com o oxigênio para formar óxidos de alumínio que podem reduzir a resistência mecânica da peça.

Segundo ASM Handbook (2008), os métodos mais conhecidos em que um banho de alumínio pode ser desgaseificado é por meio da utilização de pastilhas de hexacloroetano ( $C_2Cl_6$ ), ou por borbulhamento de gás inerte.

De acordo com Triyono et. al. (2017), quando os blocos porosos de hexacloroetano são inseridos no banho, reagem com o alumínio e formam bolhas de vácuo com pressão inferior a 1 atm dos gases cloreto de alumínio e fluoreto de alumínio. O hidrogênio é aprisionado nessas bolhas, que sobem até a superfície do banho e são removidas pelo sistema de exaustão do forno.

No processo de desgaseificação por borbulhamento de gases inertes com lança estática, um gás de purga (nitrogênio ou argônio) é injetado no fundo do cadinho

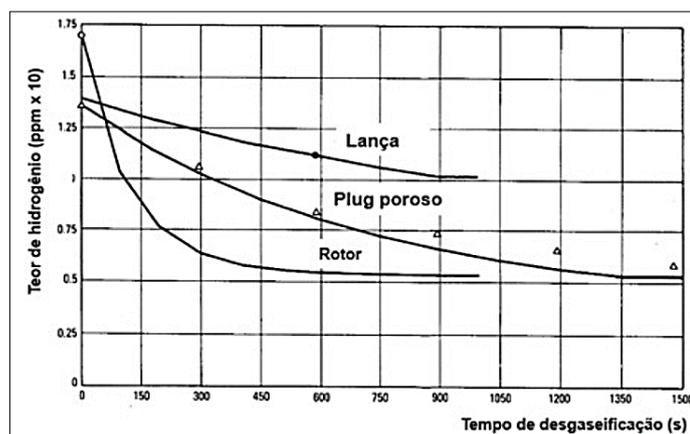
com o auxílio de uma vareta de aço ou grafite. O gás forma uma bolha para onde se difundem as moléculas de hidrogênio que são posteriormente liberadas na superfície do banho (CAMPBELL, 2011).

Segundo Michalek et. al. (2018), o método de desgaseificação por borbulhamento de gases inertes é mais eficiente quando utilizado um rotor para movimentação do banho. O movimento do rotor proporciona uma intensa mistura do gás de purga com o alumínio líquido, permitindo assim maior área de contato com o hidrogênio dissolvido. São formadas bolhas muito finas (3 a 10 mm de diâmetro) que sobem lentamente até a superfície do banho onde são liberadas. Camargo (2014), obteve resultados de porosidade da ordem de 3  $\mu\text{m}$  de diâmetro em peças fabricadas com a liga de alumínio SAE 306 utilizando o processo de borbulhamento com rotor, utilizando uma vazão de nitrogênio de 25 l/min e tempo de desgaseificação de 14 min, o que significa uma eficiência muito boa se comparado aos outros métodos de desgaseificação.

Segundo Campos (2008), o processo de desgaseificação por pastilhas de hexacloroetano apresenta uma boa eficiência na remoção do hidrogênio dissolvido na liga de alumínio fundida e também baixo custo com equipamento, porém apresenta uma elevada toxicidade devido ao cloro que é liberado na forma de gás. Este método também causa uma maior degradação do cadinho devido à alta corrosividade do cloro.

A Figura 4 mostra a eficiência de cada método de desgaseificação, em que percebe-se que os processos mais eficientes são por rotor e por bloco poroso. O processo de desgaseificação por lança, apesar de possuir baixo custo, requer um tempo de execução maior.

Figura 4 – Eficiência de redução do teor de hidrogênio em banhos de alumínio



Fonte: Fuoco (2016).

### 2.2.3 Fluxos escorificantes

Os fluxos escorificantes são produtos à base de sódio, adicionados ao metal líquido antes do vazamento com a finalidade de eliminar a parte indesejada do material. Segundo Dispinar (2005), a função deste produto é de absorver óxidos e inclusões não metálicas presentes no alumínio líquido e formar uma escória de impurezas na superfície do banho metálico facilitando assim a retirada das mesmas com uma escumadeira.

De acordo com Campos (2008), para o correto funcionamento do fluxo escorificante, o mesmo deve ser adicionado em quantidades entre 0,05 a 0,1 % do peso de material presente no cadinho de fusão.

Em estudo realizado por Moraes (2019), foram comparados os diferentes métodos de limpeza e remoção de gases, onde constatou-se uma redução de cerca de 80 % dos defeitos internos de peças fundidas em liga de alumínio SAE 305 com a utilização de fluxos escorificantes. O uso destes produtos também apresentou-se economicamente viável devido ao seu custo ser 60 % mais barato do que o nitrogênio.

### 2.2.4 Moldes permanentes para fundição

Os moldes permanentes, também chamados de coquilhas metálicas, são constituídos por duas ou mais partes que contém o formado adequado para uma boa extração da peça a ser fundida, canais de alimentação e massalotes necessários para o bom funcionamento do processo. Estes moldes são fabricados geralmente em aço H13, ferro fundido, bronze ou grafite dependendo da liga a ser fundida (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Alguns cuidados devem ser tomados na hora de executar o projeto do molde permanente. Deve-se evitar mudanças drásticas de espessura na seção da peça afim de minimizar tensões. Outro ponto importante é projetar as cavidades com um pequeno ângulo de inclinação para que o material flua mais facilmente e a extração da peça fique mais fácil. Massalotes devem ser projetados nos locais de maior espessura da peça a fim de compensar a contração do material durante o resfriamento e evitar a formação de rechupes. O molde também deve ser projetado de maneira à

favorecer o escoamento de ar para fora da cavidade evitando assim a formação de poros (ASM HANDBOOK, 2008).

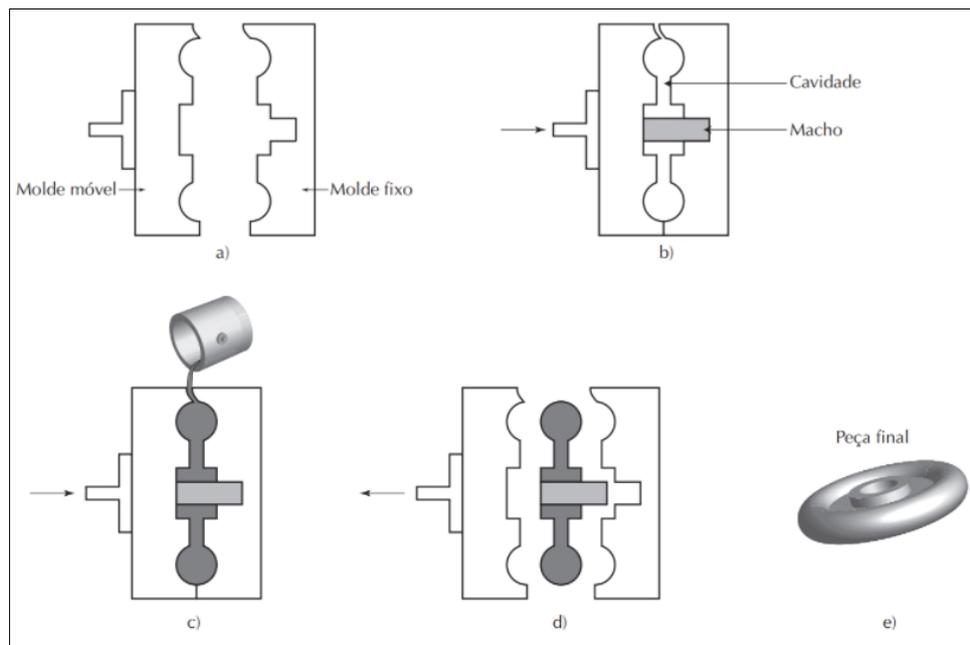
### 2.2.5 Etapas do processo de fundição por gravidade

De acordo com Pinto e Fernandes (2001), a primeira etapa do processo de fundição em molde permanente, consiste na limpeza da cavidade e aplicação de um desmoldante para facilitar a extração da peça (Figura 5a). A segunda etapa consiste no posicionamento de machos (se necessário) e fechamento do molde (Figura 5b).

De acordo com Kiminami, Castro e Oliveira (2013), as etapas seguintes do processo de moldagem consistem no vazamento do metal fundido no molde utilizando uma concha (Figura 5c) e após o resfriamento, a abertura do molde e retirada da peça fundida (Figuras 5d e 5e).

Lumley (2011) enfatiza a importância de evitar ao máximo a geração de turbulências durante o preenchimento da cavidade com o metal líquido, pois o alumínio se oxida rapidamente quando em contato com o ar, formando um filme em sua superfície. Com o fluxo turbulento, os filmes de óxido podem misturar-se ao líquido, dando início à formação de defeitos internos nas peças fundidas.

Figura 5 – Etapas da fundição por gravidade em molde permanente.



a) limpeza e aplicação de desmoldante na cavidade; b) posicionamento de machos e fechamento do molde; c) vazamento do metal líquido no molde; d) abertura do molde; e) extração da peça e rebarbação.

Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013).

De acordo com Pinto e Fernandes (2001), a temperatura do molde também é um parâmetro importante para que sejam produzidas peças de boa qualidade. O controle de temperatura do molde pode ser feito utilizando-se aquecedores ou arrefecedores auxiliares, que consistem em forçar um fluxo de ar ou água nas seções adjacentes dos moldes para que ocorra a troca térmica.

Ainda segundo Pinto e Fernandes (2001), a temperatura de vazamento do metal deve seguir uma gama estabelecida pela composição do material, o tipo de sistema de alimentação do molde e também o formato das peças. Uma temperatura muito baixa, pode causar a solidificação prematura do canal de alimentação, fazendo com que a peça fique incompleta, enquanto uma temperatura muito elevada, pode causar contrações no material e empenamento do molde.

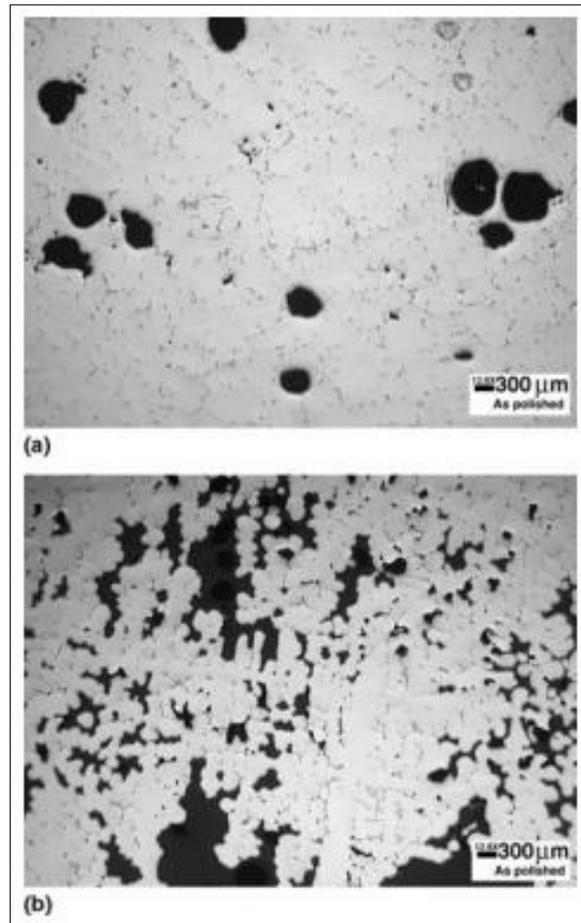
## 2.3 DEFEITOS EM PEÇAS DE ALUMÍNIO FUNDIDAS POR GRAVIDADE

### 2.3.1 Porosidades

De acordo com Fuoco (2017), o sistema de alimentação do molde possui grande influência na formação de defeitos. Se o metal líquido atingir uma velocidade superior a 0,5 m/s durante o vazamento, ou se o material cair diretamente no fundo da cavidade, o preenchimento será considerado turbulento, o que favorece o aparecimento de defeitos como inclusões de reoxidação e bolhas de ar preso. Os defeitos, por sua vez, causam redução da ductilidade do material, tornando-o mais suscetível a fraturas, perda de estanqueidade e aumento da tendência a trincas.

Os defeitos denominados porosidades são vazios de formato arredondado ou irregular dispersos no interior das peças fundidas. Segundo ASM Handbook (2008), existem dois tipos de porosidades, as provenientes de gases (Figura 6a), que ocorre quando o hidrogênio é dissolvido no alumínio líquido devido à alta solubilidade do mesmo, e as provenientes de contrações (Figura 6b), que ocorrem devido à inclusões ou quando a redução de volume do material durante a solidificação não é compensada pela alimentação de metal líquido.

Figura 6 – Porosidades em ligas de alumínio



a) porosidades provenientes de gases; b) porosidades provenientes de contrações

Fonte: ASM Handbook (2008)

De acordo com Dispinar (2005), a formação de porosidades provenientes de gases é impulsionada devido à alta solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido. Durante a solidificação, parte do hidrogênio é rejeitado na solução e difundido nos espaços entre as dendritas em crescimento onde fica aprisionado e dá origem a um vazio de formato geralmente esférico.

Segundo Lumley (2011), a melhor forma de reduzir a formação de porosidades provenientes da contração do metal é fazer com que as regiões de maior espessura da peça solidifiquem antes dos massalotes e canais de injeção, sendo assim, haverá material de preenchimento até que a solidificação se complete. Essa condição é possível desde que seja feito o cálculo correto do módulo térmico (coeficiente de proporção térmica geométrica) para cada região da cavidade do molde, e também, controlando o resfriamento das regiões mais espessas por meio de um sistema de arrefecimento do molde.

Para que a formação de porosidades seja reduzida ou até evitada, deve ser observada a temperatura do banho, para que não haja superaquecimento da liga e evitar ao máximo a presença de umidade nos equipamentos que entram em contato com o alumínio (conchas, cadinho, escumadeiras) para reduzir a inclusão de hidrogênio. Também deve-se proceder corretamente com a desgaseificação e limpeza do alumínio fundido (CAMPBELL, 2011).

### 2.3.2 Inclusões

Inclusões são impurezas ou óxidos que são difundidos na microestrutura do material e ficam retidos entre as dendritas durante a solidificação.

Segundo Lumley (2011), o minério da bauxita, matéria-prima para obtenção do alumínio, contém uma variedade de impurezas tanto orgânicas, quanto de outros elementos como zinco, chumbo, entre outros. Boa parte dessas impurezas são separadas do alumínio durante o processo de refinamento do mesmo, porém ainda não é possível eliminá-las em sua totalidade.

De acordo com Campbell (2011), as inclusões causam redução na fluidez do material, contribuem para a formação de poros e também produzem descontinuidades na estrutura da liga, afetando assim, a resistência mecânica do material.

Segundo Fuoco (2016), a melhor forma de reduzir a quantidade de inclusões se dá durante o processo de fusão e moldagem. A análise da matéria-prima e uso de escorificante no banho metálico é fundamental para a qualidade do fundido. Além disso, evitar ao máximo turbulências durante o vazamento do metal líquido, manter a cavidade do molde e canais de alimentação bem limpos e usar fornos e conchas adequadas são práticas que contribuem para a obtenção de peças com boa sanidade interna.

## 2.4 METODOLOGIA DE TAGUCHI

O DOE (*Design of experiments*) é uma técnica que foi e continua sendo desenvolvida há anos em diversos ramos da indústria. O DOE consiste na investigação para todas as condições possíveis de realização de experimentos com diferentes parâmetros. O planejamento fatorial é uma técnica em que os parâmetros

são variados em todos os seus níveis, o que pode ser um inconveniente quando há um grande número de fatores a serem avaliados. Como alternativa, surge o planejamento fatorial fracionado, na tentativa de economizar tempo e recursos (MONTGOMERY, 2009).

Taguchi (1986) propôs um método para simplificação dos experimentos fatoriais fracionados, para que pudessem ser facilmente aplicados em ambiente industrial e fossem efetivos na obtenção de resultados consistentes para um mesmo experimento realizado por diferentes pessoas.

Com o objetivo de tornar o DOE mais simples e atrativo à indústria, Taguchi propôs:

- a) Projeto Robusto:** o produto ou processo deve suportar os mais diversos níveis de fatores incontroláveis (ruídos);
- b) Função perda:** quantificar de forma monetária por meio de uma fórmula matemática as economias oriundas da aplicação do DOE.
- c) Padronização do DOE:** utilizar arranjos ortogonais que representam o menor experimento fatorial fracionado possível.
- d) Análise de Sinal-Ruído:** combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos, que transformam insumos em uma saída com uma ou mais respostas observáveis.

De acordo com a metodologia de Taguchi, dois planejamentos são empregados para o projeto dos parâmetros, sendo um arranjo ortogonal para as variáveis de influência, e outro arranjo ortogonal para as fontes de variabilidade. A combinação desses arranjos deve ser analisada de acordo com o critério selecionado para a função perda de qualidade, que tem o objetivo de estimar a economia resultante da melhoria da qualidade, considerando todas as fases do ciclo de vida de um produto (MONTGOMERY, 2009).

Os arranjos ortogonais são uma abordagem matemática para o planejamento de experimentos com base na quantidade de fatores e interações que se deseja estudar. Segundo Roy (2010), os arranjos de Taguchi, denominados “AO”, são identificados pela letra “L” e um número que indica a quantidade de experimentos, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Diversos tipos de AO de Taguchi

Arranjo Ortogonal	Número de Ensaios	Número de Níveis	Número Máximo de fatores
L4	4	2	3
L8	8	2	7
L9	9	3	4
L12	12	2	11
L16	16	2	15
L18	18	3	8
L27	27	3	13
L32	32	2	31

Fonte: Ross (1991)

Segundo Ross (1991), a função perda de Taguchi pode ter características e equações para cálculo da razão sinal-ruído, sendo:

- a) Nominal é melhor:** características funcionais que apresentam o valor nominal como o mais desejado pelo cliente.

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^y (y_i - \bar{y})^2 \right] \quad (1)$$

- b) Menor é melhor:** características funcionais que apresentam o valor zero como o mais desejado pelo cliente.

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{r} \sum_{i=1}^y y_i^2 \right] \quad (2)$$

- c) Maior é melhor:** características funcionais que quanto maior, mais desejado pelo cliente.

$$\eta = -10 \log \left[ \frac{1}{r} \sum_{i=1}^y \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (3)$$

Onde:  $\eta$  = Transformação de sinal ruído;

$r$  = número de combinações;

$y_i$  = i-ésima resposta observada para cada combinação;

$\bar{y}$  = Média das respostas para cada combinação.

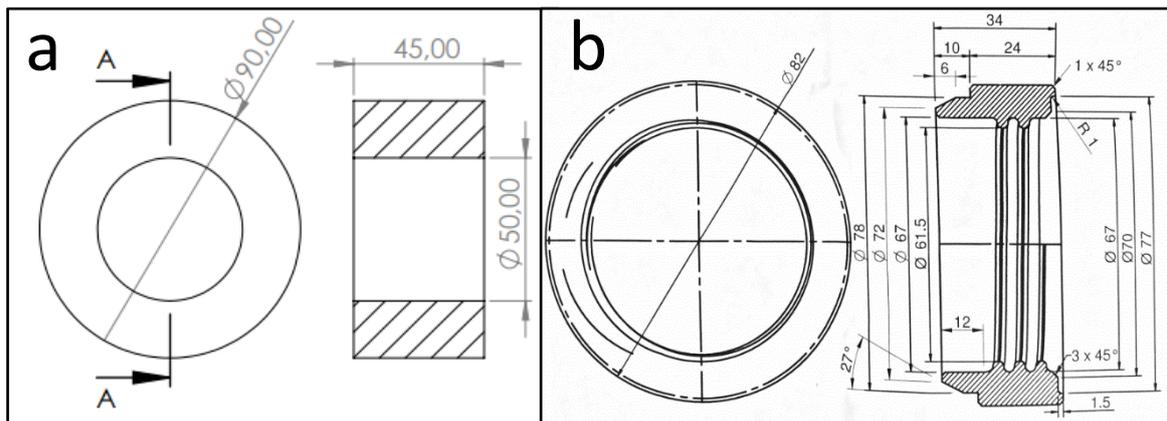
De acordo com Taguchi (1986) após calculados os sinais-ruído, deve-se proceder com a análise dos dados e interpretação dos resultados. Diversos métodos foram apresentados por Taguchi para analisar os dados. Dentre eles, o método de observação, método de classificação, método dos efeitos da coluna, gráficos da média e gráficos da interação. Se a experiência sofreu desequilíbrio em decorrência de algum erro, a análise dos dados deverá levar isto em consideração ou o ensaio deverá ser executado novamente, para que o erro seja reparado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 SITUAÇÃO ATUAL

Atualmente, os bocais para tanques de combustível fundidos por gravidade em alumínio SAE 305 na empresa Fabbof não possuem boa qualidade interna, apresentando porosidades e rechupes que posteriormente vêm a prejudicar a estanqueidade e integridade do produto. A Figura 7a apresenta o blank fundido antes do processo de usinagem da rosca e a Figura 7b apresenta o bocal pronto para ser soldado aos tanques de alumínio.

Figura 7 – Bocal para tanque de combustível.



a) Detalhamento do blank de alumínio fundido para fabricação do bocal; b) Detalhamento do bocal pronto para ser soldado ao tanque.

Fonte: Fabbof (2021)

A primeira etapa do processo inicia na fusão do alumínio, onde é utilizado um forno fusor do tipo cadinho, com capacidade para 300 kg de material que utiliza gás (GLP) como fonte de energia para promover a chama de aquecimento.

A matéria-prima que alimenta o forno é composta por lingotes da liga SAE 305 na proporção de 70 %, e retorno (peças não conformes e canais de alimentação) na proporção de 30 % (Figura 8a). Antes do abastecimento, a matéria-prima é pré-aquecida por cerca de uma hora, na parte superior do forno (Figura 8b), para auxiliar na remoção de umidade presente no material.

Figura 8 – Materiais adicionados ao forno fusor.

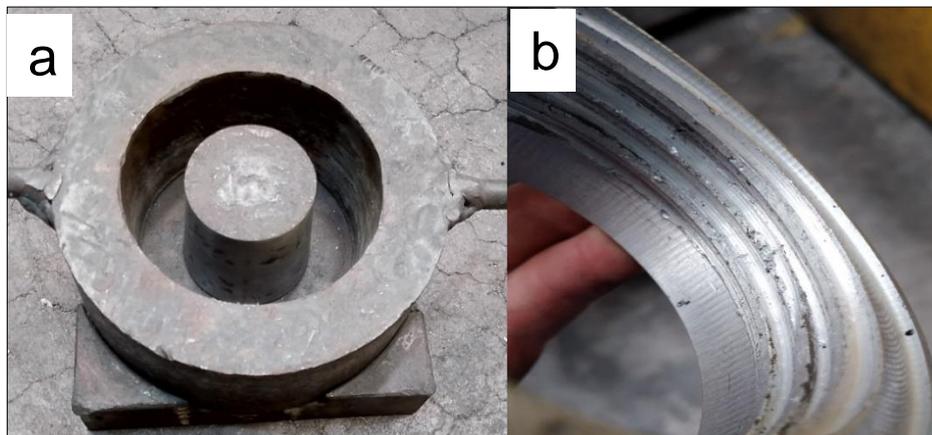


a) Materiais de refugo (retorno) adicionados ao banho; b) Lingotes de alumínio SAE 305 sendo pré-aquecidos na parte superior do forno.

Fonte: O Autor

Após fundido, inicia-se a etapa de degaseificação do alumínio, onde são utilizadas pastilhas à base de hexacloroetano Degalser 201 para a remoção de gases e também um fluxo escorificante da marca Alfa Trend para remoção das impurezas. Após finalizada a limpeza, o alumínio é vazado dentro da coquilha metálica (Figura 9a), com o auxílio de uma concha. O alumínio fundido geralmente é vazado em temperaturas entre 650 à 800 °C. Não é realizado um controle preciso da temperatura do molde e do alumínio durante o vazamento. Após a fundição, as peças passam por um processo de usinagem, onde os defeitos ficam aparentes prejudicando a qualidade do produto (Figura 9b).

Figura 9 – Coquilha metálica e defeitos na peça após usinagem.



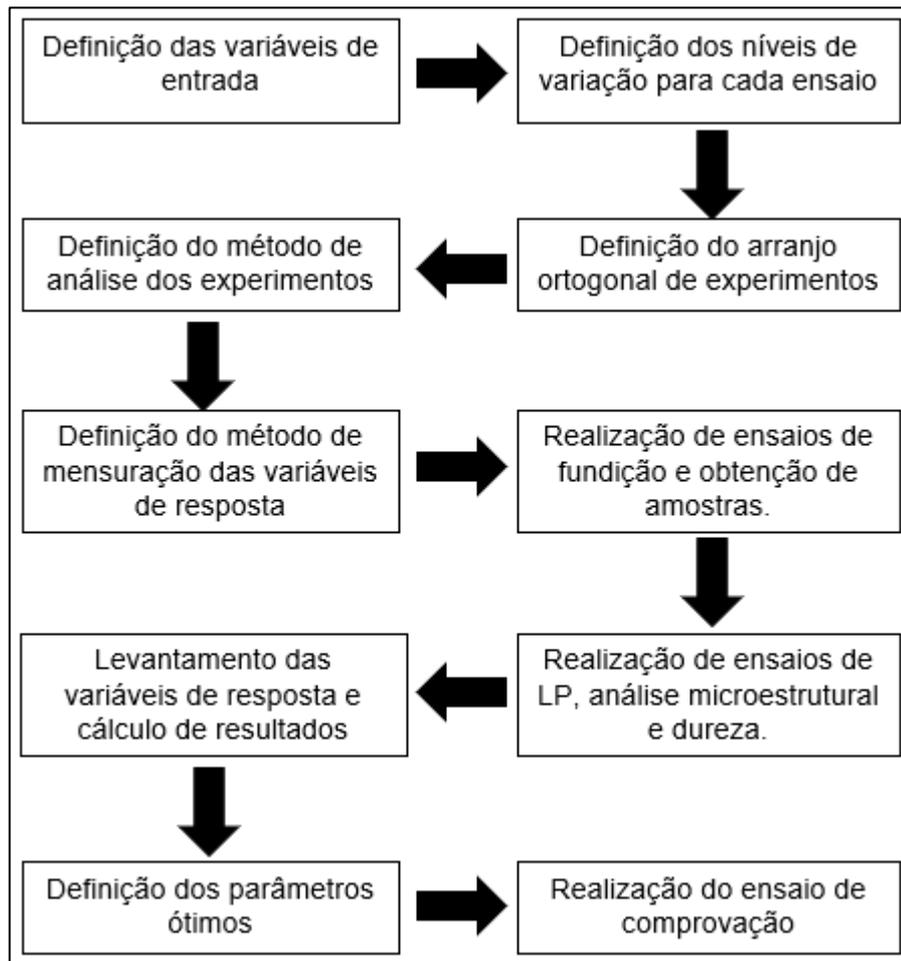
a) Coquilha metálica utilizada no processo de fundição por gravidade; b) Defeitos encontrados após a usinagem do bocal.

Fonte: O Autor.

### 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A Figura 10 apresenta o fluxograma do trabalho, iniciando com a definição das variáveis de entrada, e as demais etapas seguidas até o experimento de confirmação para verificação do resultado da otimização de parâmetros.

Figura 10 – Fluxograma dos procedimentos.

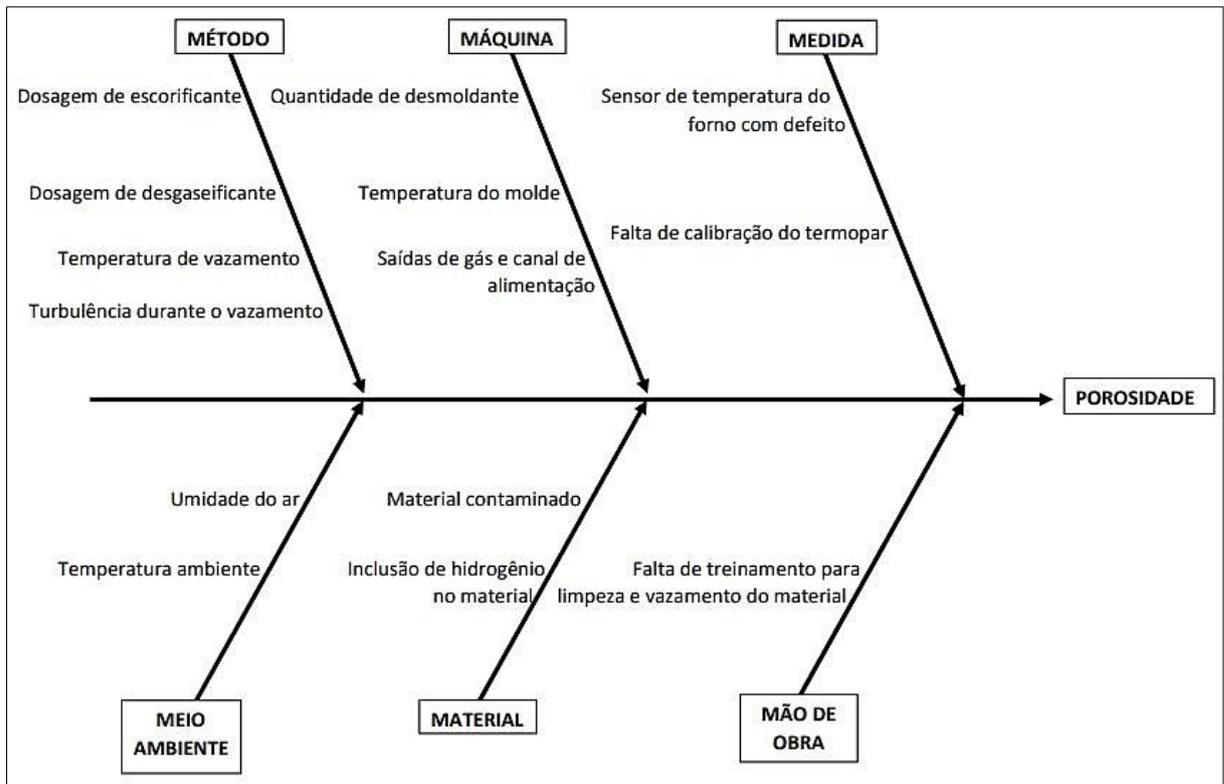


Fonte: O Autor

#### 3.2.2 Definição das variáveis

As ferramentas da qualidade tornam-se muito úteis na definição de fatores causadores de defeitos e também no desenvolvimento de experimentos em busca de soluções para o problema. A Figura 11 ilustra um diagrama de causa e efeito com fatores que poderiam ter influência no surgimento de porosidades.

Figura 11 – Diagrama de causa e efeito de porosidades.



Fonte: O Autor

A partir da análise do diagrama de causa e efeito, foram selecionados três fatores controláveis do processo que não envolvem alterações no molde ou forno de fusão. Para cada fator foram estabelecidos dois níveis de variação de parâmetros, conforme a Tabela 5. A definição dos níveis de variação para cada fator foi baseada na literatura e também no dia-a-dia da indústria.

Segundo Pinto e Fernandes (2001), a temperatura de vazamento do alumínio usualmente varia entre 675 °C e 790 °C, dependendo da espessura e nível de detalhes da peça fundida.

De acordo com Campos (2008), a temperatura em que uma coquilha metálica trabalha na fundição de alumínio é em torno de 250 a 300 °C. Para que sejam produzidas peças com qualidade desde a primeira moldagem, é essencial que o molde seja pré-aquecido até a temperatura de trabalho antes do primeiro vazamento de metal líquido.

Tabela 5 – Fatores e níveis de experimentos

Fator	Descrição	Nível 1	Nível 2
A	Temperatura de vazamento (°C)	680	780
B	Temperatura do molde (°C)	250	300
C	Dosagem de desgaseificante (Pastilhas)	1	2

Fonte: O Autor

Após definidos os fatores e seus níveis de variação, foi elaborada a Tabela 6, em que se apresentam os ensaios com seus diversos fatores e níveis de acordo com o arranjo ortogonal L4 da metodologia de Taguchi. Foram realizadas quatro rodadas de experimentos variando os parâmetros conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Arranjo ortogonal de fatores e níveis

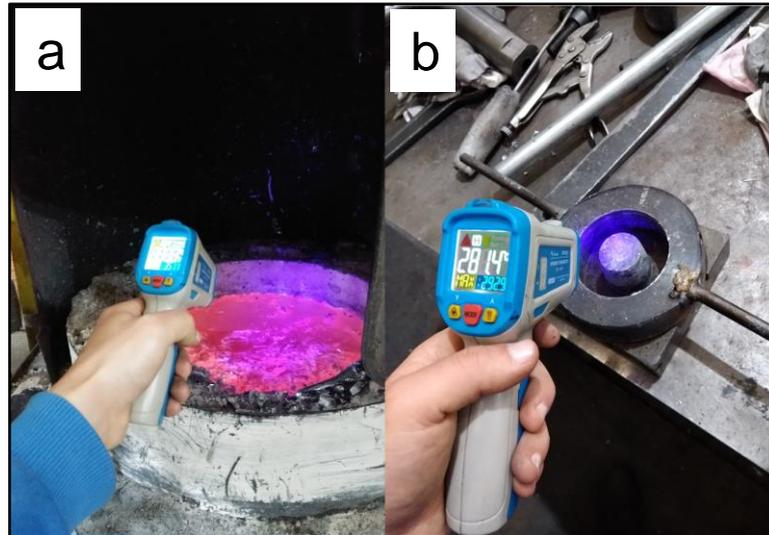
L4	Fatores e níveis		
Ensaio N°	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Fonte: O Autor

### 3.3 FUNDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

O processo de obtenção das amostras fundidas aconteceu tal como descrito no item 3.1, porém com variações na dosagem de desgaseificante, no momento da limpeza, e na temperatura do material e da coquilha metálica, no momento do vazamento, conforme apresentado na Tabela 5. Para a medição da temperatura, tanto do material quanto da coquilha, foi utilizado um termômetro infravermelho modelo MT-350A da marca Minipa (Figuras 12a e 12b), que é capaz de medir a temperatura de superfícies pela energia irradiada pelas mesmas.

Figura 12 – Medição de temperatura por infravermelho.



a) Medição de temperatura do banho; b) Medição de temperatura do molde.

Fonte: O Autor

Os ensaios foram realizados em dias diferentes e o processo foi acompanhado desde a etapa de abastecimento do forno, para evitar a influência de parâmetros utilizados na fundição de peças anteriores. As primeiras duas amostras obtidas foram descartadas para que fosse possível obter uma melhor qualidade e ausência de impurezas provenientes de sujeira no molde. Cada combinação de parâmetros foi realizada em duplicata, dando origem a duas amostras para cada ensaio.

A avaliação da integridade interna das peças foi feita a partir de análise microestrutural, por meio de preparação metalográfica, realizada no Laboratório de Metalografia e Microscopia Óptica da Universidade de Caxias do Sul.

Os corpos de prova foram cortados em sua seção transversal utilizando uma serra fita com sistema de refrigeração, tomando cuidado para evitar o encruamento local, bem como o aquecimento acima de 100 °C. Após o corte, iniciou-se a preparação metalográfica no laboratório da universidade. Primeiramente as amostras foram divididas em duas utilizando uma máquina policorte. Uma parte das amostras foram embutidas a frio onde utilizou-se uma resina sintética de polimerização rápida. A outra parte permaneceu sem embutimento para realização de ensaios de líquidos penetrantes. Posteriormente, foi feito o lixamento das amostras utilizando lixas com granulação de 320, 420, 600, 1000 e 1200, sempre tomando cuidado ao trocar a granulação da lixa, para que a amostra fosse lixada na direção perpendicular à anterior com a finalidade de remover os riscos da lixa anterior. Após lixadas, as amostras foram polidas com o auxílio de uma politriz e pasta diamantada para polimento realizando

movimentos circulares. Finalizado o polimento, as amostras foram lavadas em água corrente e secadas. As amostras não embutidas foram submetidas ao ensaio de líquidos penetrantes que foi realizado nas dependências da empresa, tendo como base a norma ASTM E1417.

Após o ensaio de líquidos penetrantes, as amostras embutidas foram submetidas a um ataque químico para revelação da microestrutura. Para o ataque químico foi utilizado o reagente de Keller (95 ml de água destilada, 2,5 ml de ácido nítrico, 1,5 ml de ácido clorídrico e 1,0 ml de ácido fluorídrico). Posteriormente, estas amostras foram analisadas em microscópio com aumentos de 50 vezes e 100 vezes para visualização da microestrutura e porosidades presentes na região interna.

O último ensaio feito foi a dureza Vickers. Este foi realizado no Laboratório de Ensaio Mecânicos da Universidade, baseado na norma ASTM E92, que estabelece o procedimento para realização do ensaio de dureza Vickers.

### **3.3.2 Análise das variáveis de resposta**

A variável de resposta analisada neste trabalho é a porosidade, portanto, para a análise dos experimentos, as amostras foram classificadas de acordo com a quantidade e tamanho dos poros.

Inicialmente, a superfície foi fotografada após o ensaio de LP, e a partir desta fotografia e com o auxílio de uma lupa foi feita a contagem dos poros presentes em cada amostra. A medição do tamanho dos defeitos foi feita após o ataque químico e com o auxílio do software analisador de imagens disponível no Laboratório de Metalografia e Microscopia Óptica. Posteriormente, foi feito o cálculo de sinal-ruído do método de Taguchi utilizando a Equação 2, que representa a razão menor é melhor.

Após a realização dos cálculos e definição dos parâmetros ótimos para o processo, foi realizado um experimento de comprovação, utilizando estes parâmetros, a fim de validar as melhorias para o processo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

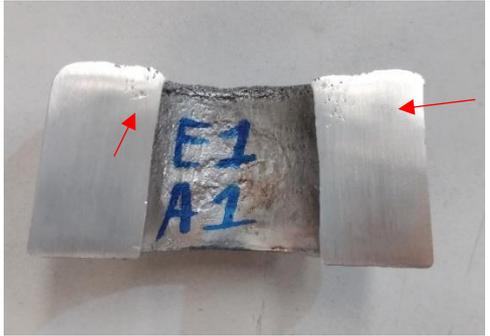
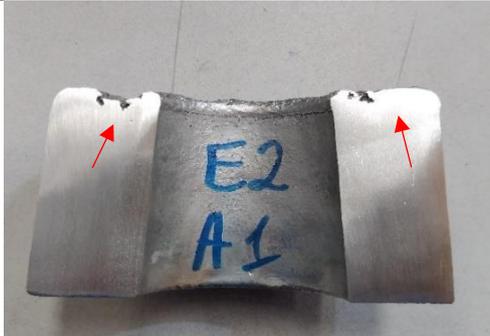
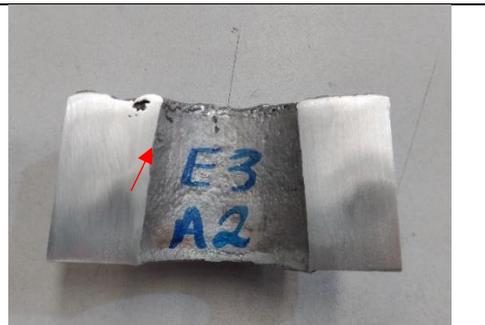
No presente capítulo serão apresentados os resultados encontrados nos ensaios de líquidos penetrantes, análise microestrutural e dureza a partir das amostras obtidas. Os resultados serão analisados e comparados com a literatura a fim de estabelecer a melhor forma de realizar o processo.

### 4.1 AVALIAÇÃO VISUAL DAS AMOSTRAS

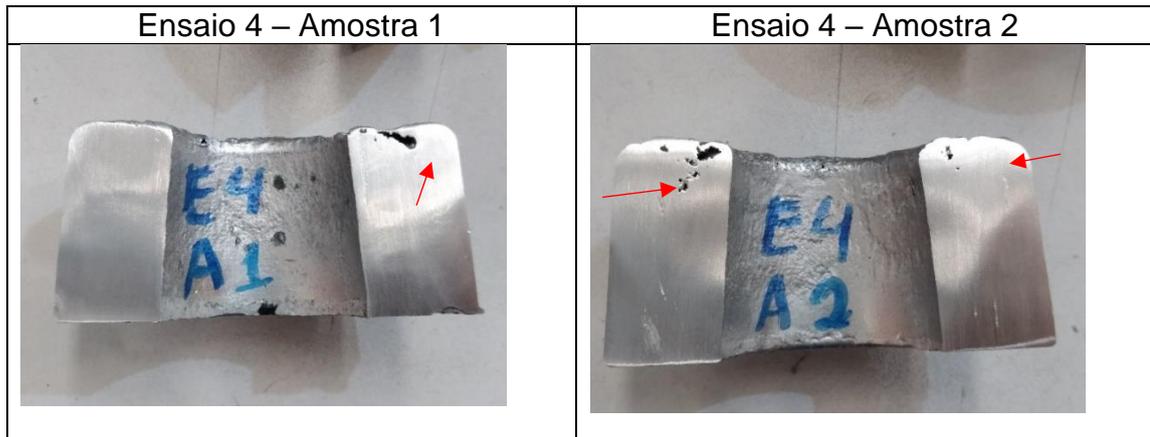
O Quadro 2 apresenta imagens das amostras após fundição e corte das peças obtidas nos quatro ensaios.

Quadro 2 – Amostras seccionadas após serem fundidas.

(continua)

Ensaio 1 – Amostra 1	Ensaio 1 – Amostra 2
	
Ensaio 2 – Amostra 1	Ensaio 2 – Amostra 2
	
Ensaio 3 – Amostra 1	Ensaio 3 – Amostra 2
	

(continuação)



Fonte: O Autor

Em uma primeira análise visual percebeu-se uma maior presença de poros característicos de contração do material do que por inclusão gases. A porosidade proveniente de contração possui um formato irregular, como na amostra 1 do ensaio 2. A formação deste tipo de defeito pode ter sido impulsionada devido ao molde não possuir nenhum massalote para compensação da contração do material durante a solidificação, sendo assim, formam-se os vazios devido à falta de metal líquido para o preenchimento.

Os defeitos do tipo bolha de gás ocorrem devido ao aprisionamento de gases no interior do metal líquido e que permanecem retidos durante a solidificação. Esse tipo de defeito pôde ser observado na amostra 1 do ensaio 1, onde aparecem pequenas bolhas de formato arredondado próximas à parte superior da peça. O fato da utilização de apenas uma pastilha para desgaseificação do banho no ensaio 1, pode ter impulsionado a formação deste tipo de defeito. Outra hipótese a ser observada é de que o molde utilizado é aberto à atmosfera em sua parte superior, deixando o metal em contato com o ar durante a solidificação o que pode causar a difusão do gás para dentro do alumínio.

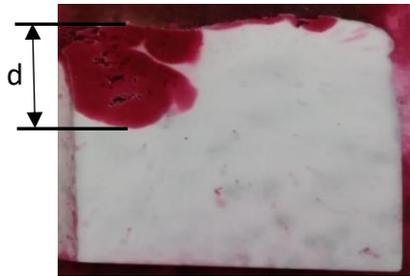
Constatou-se uma maior presença de defeitos nas amostras fundidas à temperaturas mais altas. Devido à maior solubilidade do hidrogênio e gases no alumínio a altas temperaturas, o processo de desgaseificação pode não ter sido suficientemente eficiente para a remoção total dos gases aprisionados. A alta temperatura do molde, por sua vez, ocasionou um tempo de solidificação maior, propiciando maior contração do material e formação de rechupes em alguns casos, como no ensaio 4.

## 4.2 RESULTADOS DO ENSAIO DE LÍQUIDOS PENETRANTES

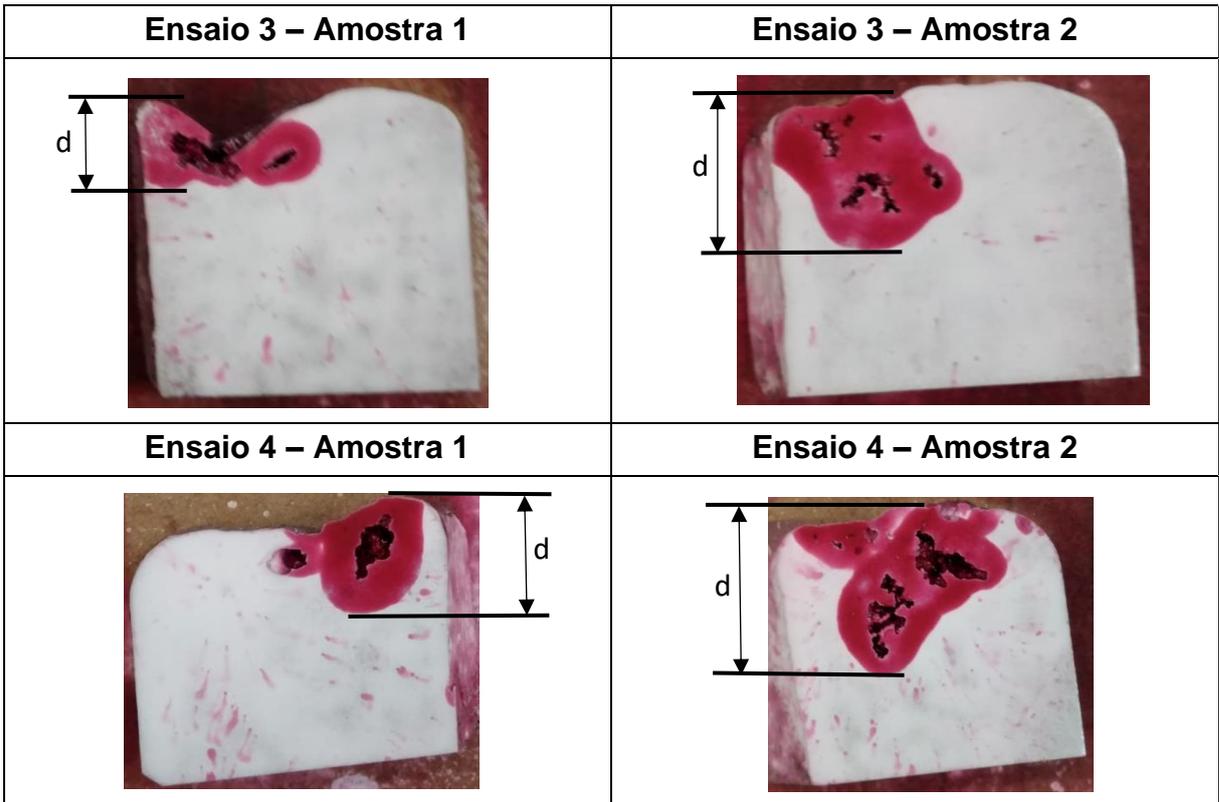
O ensaio de LP foi realizado com o objetivo de verificar a presença de poros de maior tamanho, que são os principais responsáveis pela perda de estanqueidade da peça. Também procurou-se avaliar a distância atingida por rechupes a partir da superfície superior da peça, o que define se o defeito será removido no processo de usinagem ou não. Como a peça final possui altura de 34 mm (conforme a Figura 7) e a peça fundida na coquilha possui altura de 45 mm, é possível que se tenha defeitos em uma distância de até 10 mm abaixo da superfície superior sem que seja prejudicada a qualidade do bocal, pois esta área com defeitos é removida posteriormente no processo de usinagem. O Quadro 3 apresenta as imagens de cada uma das amostras. No gráfico da Figura 13 são relacionadas as quantidades de defeitos encontrados e a distância atingida por rechupes em cada ensaio.

Quadro 3 – Superfícies após o Ensaio de líquidos penetrantes.

(continua)

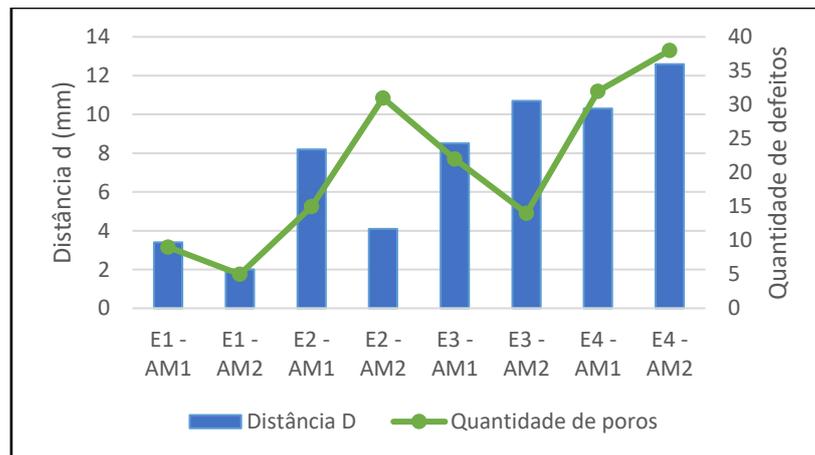
Ensaio 1 – Amostra 1	Ensaio 1 – Amostra 2
	
Ensaio 2 – Amostra 1	Ensaio 2 – Amostra 2
	

(continuação)



Fonte: O Autor

Figura 13 – Gráfico: Quantidade de defeitos e distância atingida por rechupes.



Fonte: O Autor

Com base nestes resultados, percebeu-se a menor quantidade de defeitos no ensaio 1, o que leva à hipótese de que os parâmetros utilizados neste ensaio foram mais eficientes. Também percebeu-se pouca dispersão de valores na quantidade de defeitos em cada amostra para este ensaio, o que indica maior repetibilidade no

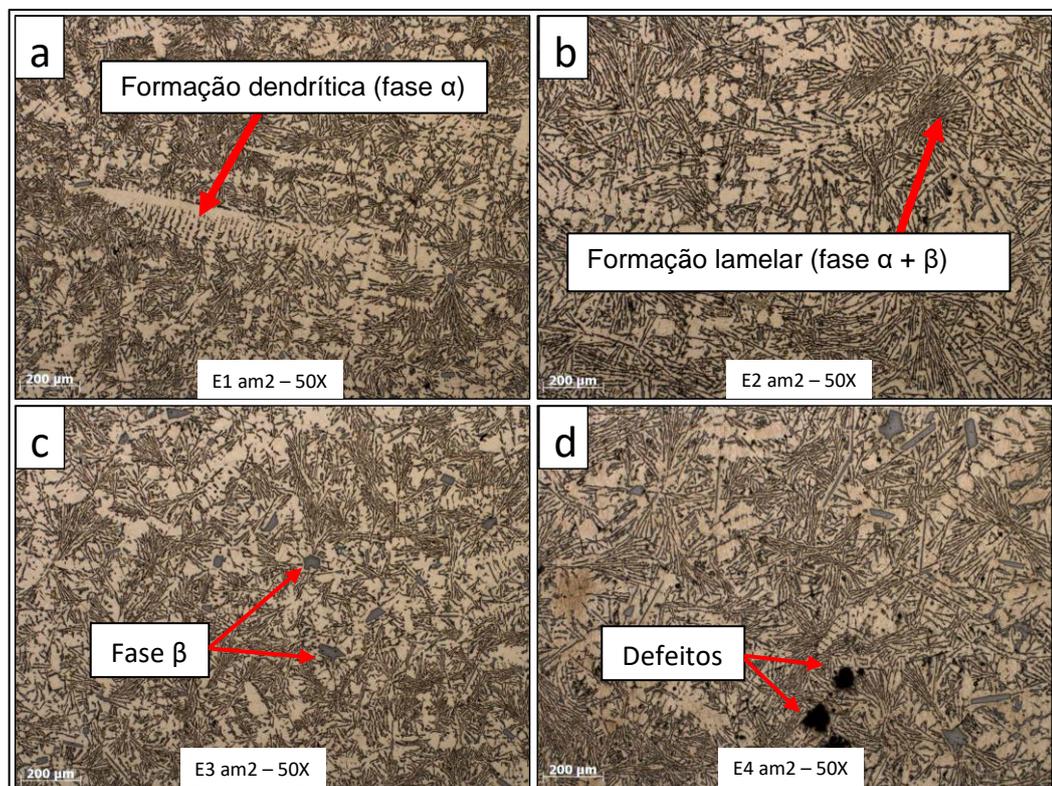
processo. Enquanto isso, grandes variações de quantidade de defeitos internos são percebidas nos ensaios 2 e 3, um indicador de pouca repetibilidade das peças produzidas se forem utilizados os parâmetros destes ensaios.

Analisando as distâncias atingidas por rechupes percebeu-se que no ensaio 4 ambas as amostras apresentaram um valor superior ao limite estabelecido de 10 mm, sendo assim é possível afirmar que os parâmetros utilizados neste ensaio não foram adequados. Em uma das amostras do ensaio 3 também houve a ultrapassagem da distância máxima, fazendo com que os parâmetros do ensaio fossem julgados como parcialmente adequados.

### 4.3 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Após o ensaio de LP, as amostras foram submetidas à um ataque químico e analisadas em microscópio óptico. A Figura 14 apresenta as imagens obtidas com aumento de 50 X.

Figura 14 – Imagens microscópicas, ataque com reagente de Keller, aumento 50 X.



a) amostra 2 do ensaio 1; b) amostra 2 do ensaio 2; c) amostra 2 do ensaio 3; d) amostra 2 do ensaio 4.

Fonte: O Autor.

Nesta etapa do estudo, percebeu-se uma dificuldade para encontrar o reagente ideal para ataque das amostras. Em uma primeira tentativa foi utilizado ácido fluorídrico, o qual não demonstrou resultados satisfatórios, não revelando nitidamente a microestrutura do material. Partiu-se então para o ataque das amostras com o reagente de Keller o qual revelou mais nitidamente a microestrutura.

Analisando as imagens, observou-se nitidamente algumas formações de dendritas da fase  $\alpha$  (Figuras 14a e 14b). Também percebeu-se a formação da fase  $\beta$  no formato de lamelas em meio à matriz de alumínio-silício, microestrutura típica do material no estado bruto de fusão e sem adição de modificadores no banho.

Nas amostras fundidas em temperaturas mais elevadas (Figuras 14c e 14d), notou-se formações da fase  $\beta$  de maior tamanho e formatos irregulares. Nestas amostras, a temperatura de vazamento do material foi de 780° C, diminuindo assim, a velocidade de solidificação do alumínio o que deu origem as formações de precipitados de silício de maior tamanho. A alta temperatura também influenciou no aparecimento de vazios internos de maior tamanho (Figura 14d) que também são consequência da menor velocidade de solidificação.

#### 4.4 RESULTADOS DA ANÁLISE QUANTITATIVA DE DEFEITOS INTERNOS

Em uma análise mais detalhada com a utilização do microscópio percebeu-se que as maiores quantidades de defeitos internos estão presentes onde a diferença de temperatura entre o molde e o material foi maior. No ensaio 3, onde a temperatura do material esteve em 780° C e a temperatura do molde em 250° C, foram encontrados de 50 à 60 microporos por mm<sup>2</sup>, enquanto no ensaio 1 onde a temperatura do material esteve em 680° C e o molde em 250° C, obteve-se de 10 à 20 microporos por mm<sup>2</sup>.

Em situações onde a temperatura utilizada foi alta tanto para o molde, quanto para o material (300° C e 780°C), a presença de microporos não foi tão elevada, o que significa dizer que a maior presença de defeitos internos não está ligada às altas temperaturas, mas sim ao quão distintas estiverem as temperaturas do molde e do material. Ou seja, se for vazado um material com temperatura elevada em um molde muito frio haverá maior contração e conseqüentemente maior formação de defeitos internos. O mesmo acontece se o molde estiver muito quente e o material em baixa temperatura.

A Tabela 7 apresenta os tamanhos encontrados para os defeitos internos utilizando o software analisador de imagens. Foram medidos 4 defeitos em cada amostra tendo como critério para escolha os de maior tamanho.

Tabela 7 – Dimensões dos defeitos internos.

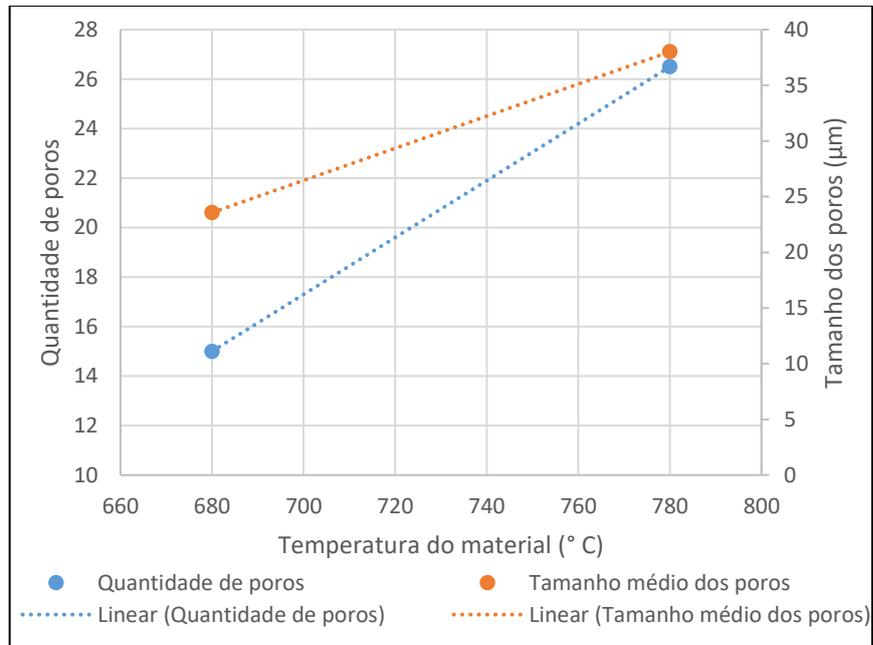
	<b>Tamanho dos defeitos internos</b>			
	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Ensaio 1</b>	19,08 µm	28,03 µm	24,95 µm	12,93 µm
	12,2 µm	33,07 µm		
	26,63 µm	12,57 µm		
	50,97 µm	16,86 µm		
<b>Ensaio 2</b>	33,88 µm	28,62 µm	22,22 µm	8,1 µm
	23,55 µm	24,96 µm		
	11,92 µm	21,72 µm		
	9,37 µm	23,74 µm		
<b>Ensaio 3</b>	51,98 µm	43,63 µm	28,18 µm	15,23 µm
	28,12 µm	13,62 µm		
	30,85 µm	12,21 µm		
	34,36 µm	10,68 µm		
<b>Ensaio 4</b>	32,72 µm	93,53 µm	47,84 µm	32,8 µm
	27,27 µm	72,79 µm		
	30,16 µm	92,14 µm		
	17,27 µm	16,86 µm		

Fonte: O Autor

Um melhor entendimento do efeito de cada variação de parâmetros do processo pôde ser feito a partir da análise dos gráficos apresentados nas Figuras 15, 16 e 17, que correlacionam cada um dos parâmetros modificados com a média de

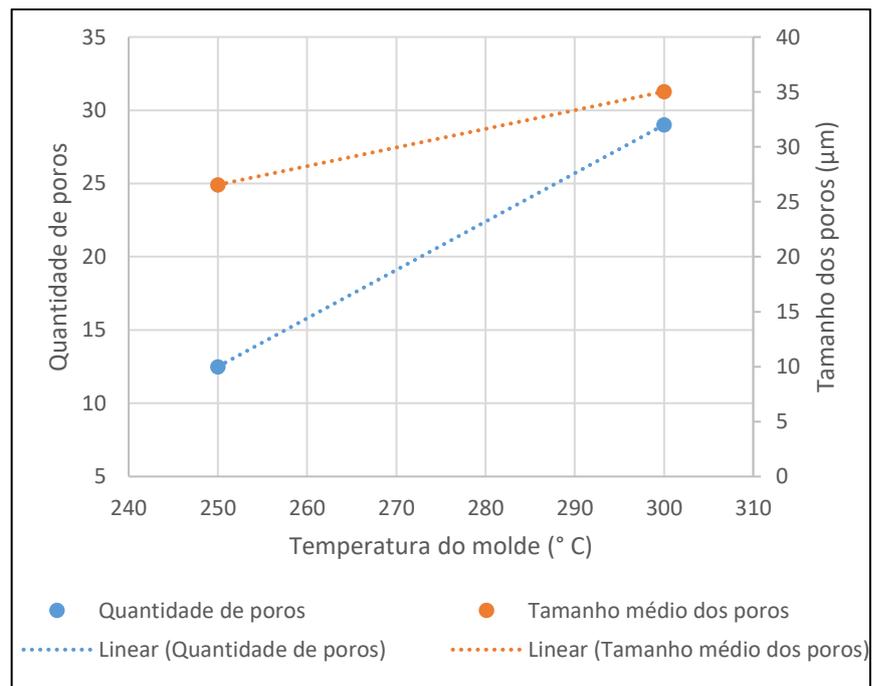
defeitos encontrados e o tamanho de tais defeitos. Os valores apresentados nos gráficos foram calculados por meio de interações no software Excel, utilizando intervalos de critérios.

Figura 15 – Gráfico: Temperatura do material x defeitos.



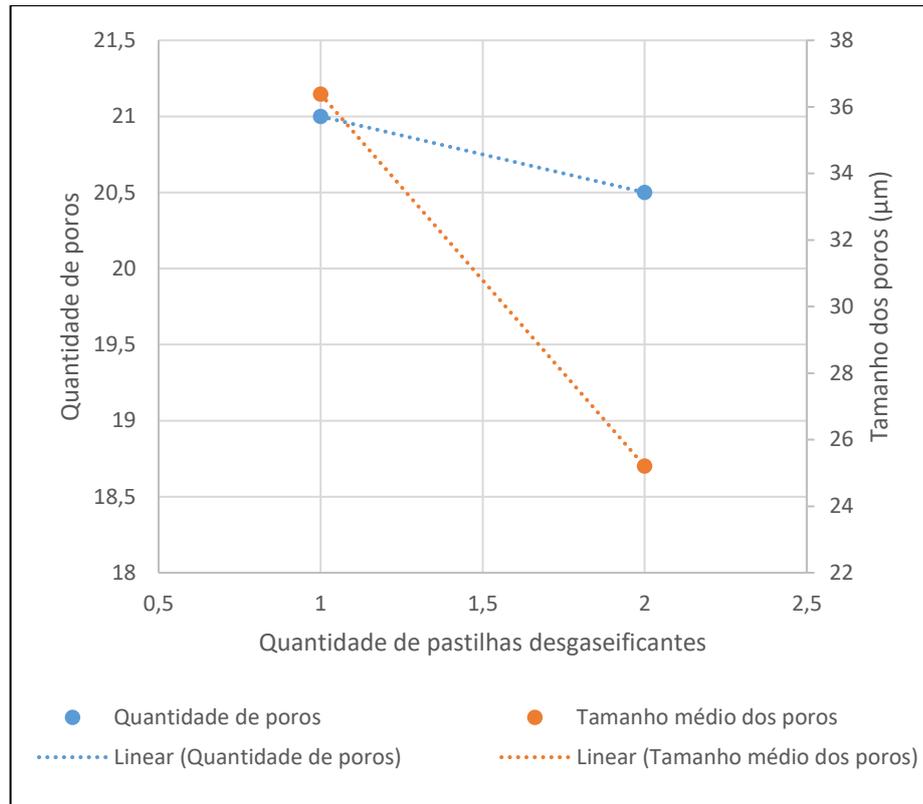
Fonte: O Autor

Figura 16 – Gráfico: Temperatura do molde x defeitos.



Fonte: O autor

Figura 17 – Gráfico: quantidade de pastilhas x defeitos.



Fonte: O Autor

Analisando os gráficos das Figuras 15 e 16 foi notado que as quantidades e tamanhos de defeitos foram menores quando foram utilizadas temperaturas mais baixas, sendo 680° C para o material fundido e 250° C para a coquilha metálica. Percebeu-se também que o aumento de temperatura tanto do material quanto do molde contribuiu para o aumento da quantidade e tamanho dos defeitos internos.

Analisando os resultados tendo como ênfase a quantidade de pastilhas utilizadas para desgaseificação, concluiu-se que esta variável contribuiu significativamente para a redução de defeitos internos. Percebeu-se no gráfico da Figura 16 que com a utilização de duas pastilhas para desgaseificação do banho a quantidade de defeitos diminuiu, comprovando assim a eficácia deste método de remoção de gases. Pela análise da inclinação das linhas de tendência, notou-se que a redução de tamanho dos defeitos foi mais acentuada do que a redução de quantidade dos mesmos, sendo assim, concluiu-se que a variável tamanho de defeitos pode ser associada ao parâmetro da quantidade de pastilhas desgaseificantes, porém o mesmo não pode ser dito para a variável quantidade de defeitos.

Dando continuidade à análise dos gráficos, foram feitos testes de hipótese (teste t de Student) para verificação da existência de diferença significativa entre a quantidade de defeitos e o tamanho dos mesmos. A Tabela 8 apresenta os valores obtidos com auxílio do software Excel para a estatística (t) e valor crítico bicaudal para cada um dos parâmetros em análise.

Tabela 8 – Teste t de Student.

<b>Parâmetro</b>	<b>Estatística (t)</b>	<b>t crítico bicaudal</b>
Temperatura do material	1,807292264	4,30265273
Temperatura do molde	1,63341093	4,30265273
Quantidade de pastilhas desgaseificantes	0,726320138	4,30265273

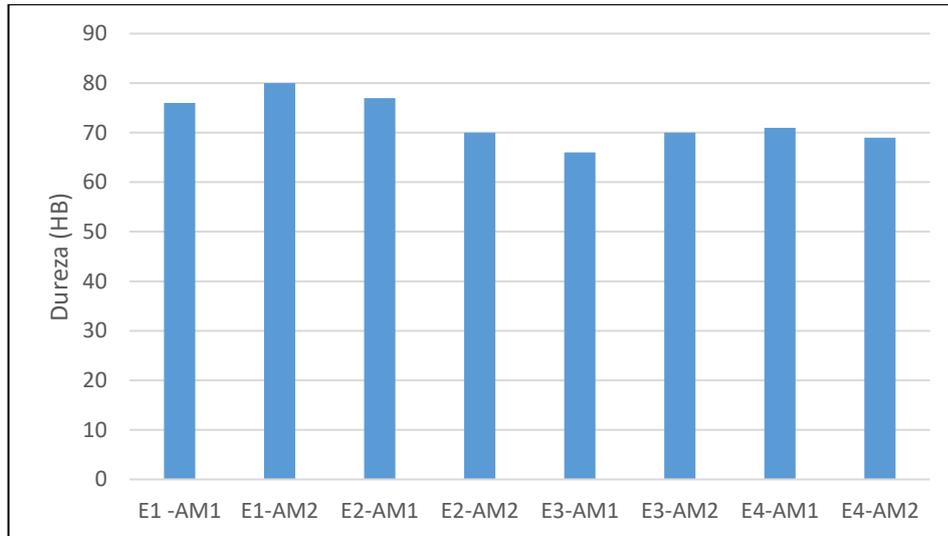
Fonte: O Autor

Na análise do teste t apresentado na Tabela 8, não foi evidenciado valores da estatística (t) maiores do que o t crítico bicaudal em nenhum dos parâmetros avaliados, ou seja, não existe diferença significativa entre a quantidade e tamanho dos defeitos encontrados em nenhum dos casos analisados.

#### 4.5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DUREZA

Na etapa de realização dos ensaios de dureza, optou-se por utilizar um durômetro Vickers para medição da dureza do material e posteriormente fazer a conversão de dureza para a escala Brinell. Os resultados encontrados nos ensaios de dureza Vickers já convertidos para dureza Brinell encontram-se no gráfico da Figura 18.

Figura 18 – Gráfico: Dureza Brinell.



Fonte: O Autor

Os resultados de dureza encontrados estiveram dentro do esperado. De acordo com ASM Handbook (1998), a dureza esperada para a liga A413.0 no estado fundido é de 70 HB. Nas amostras do ensaio número 1 a dureza chegou próxima a 80 HB, sendo assim, comprova-se a melhor eficiência dos parâmetros utilizados neste ensaio, devido a terem sido encontrados maiores níveis de dureza.

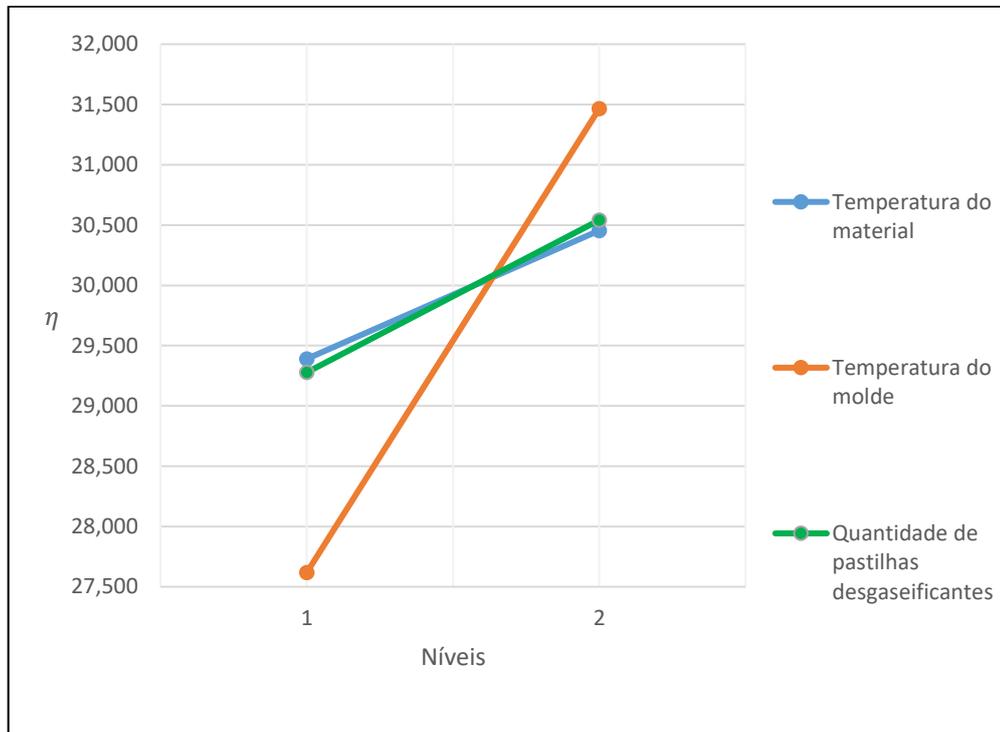
Nos demais ensaios observaram-se durezas levemente mais baixas, constatando-se os menores valores no ensaio 3, porém em nenhum dos ensaios foram observadas durezas características de propriedade mecânica não desejável para esta aplicação por ser um componente que não sofre esforços mecânicos em campo.

#### 4.6 CÁLCULO DE SINAL RUÍDO

Tendo em mãos os resultados apresentados na seção 4.4, foi realizado o cálculo de sinal ruído ( $\eta$ ) pela função perda de Taguchi. Os resultados utilizados para o cálculo, considerados ruídos do processo, foram as médias obtidas para quantidade e tamanho dos defeitos internos. A razão utilizada foi a do tipo menor é melhor (Eq. 2), pois indica o valor 0 como sendo o ideal para a qualidade do produto, ou seja, quanto menor for a quantidade e tamanho dos defeitos, melhor é a qualidade da peça.

No gráfico da Figura 19 são apresentadas as diferenças de sinal ruído dos parâmetros A, B e C de acordo com seus respectivos níveis de variação.

Figura 19 – Gráfico: Sinal ruído da função perda de Taguchi.



Fonte: O Autor

Pelo gráfico da Figura 19, notou-se que os menores valores de sinal ruído se fizeram presentes quando foi utilizado o nível 1 para ambos os três parâmetros do processo, enquanto os maiores valores foram percebidos quando foi utilizado o nível 2 para ambos os parâmetros. Evidenciou-se também que a maior variação de sinal ruído ocorreu para o parâmetro B que é a temperatura do molde, isto indica que este parâmetro é o mais influente para a boa qualidade da peça fundida.

Portanto, tendo como base os resultados acima apresentados, foi definido que as condições ideais para o processo em questão são as previstas em nível 1 do DOE, ou seja, 680° C para temperatura do material, 250° C para a temperatura do molde e 1 pastilha à base de hexacloroetano para desgaseificação do banho. Também foi definido um limite máximo de 10 poros por cm<sup>2</sup> (máximo encontrado com parâmetros nível 1) como requisito de qualidade para bocais. A verificação da quantidade de poros por cm<sup>2</sup> pode ser feita aplicando-se o ensaio de LP, tal como foi feito na Seção 4.2.

#### 4.7 EXPERIMENTO DE COMPROVAÇÃO

Após definidos os parâmetros ótimos para a operação, foi produzido pela empresa um lote de 50 peças realizando um processo idêntico ao do ensaio número 1, onde a temperatura do material deve estar em 680 °C, a temperatura do molde em 250 °C e 1 pastilha desgaseificante para remoção de gases. Depois de fundidas, as peças passaram pelo processo de usinagem do bocal onde foram feitos ensaios de líquidos penetrantes a cada 10 peças usinadas.

Nos ensaios realizados, foram evidenciadas apenas 2 peças com mais de 10 poros por cm<sup>2</sup>, estas foram descartadas como refugo e as demais 48 peças foram consideradas de boa qualidade (Figura 20) e enviadas para o próximo processo que é a soldagem do bocal no tanque e teste de estanqueidade.

Figura 20 – Bocais de tanque usinados.



Fonte: O Autor

No teste de estanqueidade realizado após a soldagem dos bocais nos tanques de combustível nenhuma das 48 peças apresentou vazamento não sendo necessário nenhum tipo de retrabalho na montagem final do tanque.

##### 4.7.1 Avaliação do experimento de comprovação

Após a realização do ensaio de comprovação dos parâmetros ótimos, foi feita uma análise comparativa onde buscaram-se dados da produção e percentual de

refugos de bocais de tanque durante o ano de 2021 na empresa. Os dados encontrados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Produção de bocais no ano de 2021.

	Quantidade requisitada (ordem de produção)	Apontamento do setor de fundição de alumínio	Apontamento do setor de usinagem	Percentual de refugo
Fevereiro/2021	50 pçs	150 pçs	79 pçs	47,33 %
Maio/2021	40 pçs	150 pçs	77 pçs	51,33 %
Agosto/2021	50 pçs	150 pçs	60 pçs	40 %

Fonte: Fabbof (2021).

No experimento de comprovação, realizado no mês de outubro de 2021, apenas duas peças foram refugadas no processo de usinagem por decorrência de porosidades, sendo assim obteve-se um percentual de refugo de apenas 4%.

O baixo percentual de refugos neste experimento, comprova a eficácia dos parâmetros utilizados no ensaio 1 e também ressalta a importância do controle de qualidade pela aplicação do ensaio de líquidos penetrantes, sendo possível evitar perdas em processos posteriores.

Mesmo com a utilização de um número reduzido de amostras para comparação dos experimentos, o que foi limitado devido ao tempo necessário e disponibilidade do equipamento para realização dos ensaios, o resultado final apresentou-se muito satisfatório em relação à qualidade das peças e produtividade do processo.

## 5 CONCLUSÃO

Observando-se os resultados apresentados na seção 4 deste trabalho, percebeu-se a importância do controle dos parâmetros no processo de fundição para a boa qualidade das peças produzidas. Entretanto, cada parâmetro possui uma parcela de contribuição diferente para o resultado final.

Por meio do ensaio de líquidos penetrantes e o uso do microscópio ótico para análise das amostras, foi possível quantificar os defeitos internos das peças fundidas e com isso associá-los a cada parâmetro do processo. O ensaio 4 foi descartado ainda na primeira etapa de análise por ter apresentado rechupes que atingiram uma distância maior do que a tolerável de 10 mm.

Analisando os resultados quantitativos, foi possível concluir que as amostras, quando fundidas em temperaturas mais próximas do mínimo utilizado neste estudo (nível 1 do DOE), apresentam melhor qualidade e menor presença de defeitos chegando a no máximo 10 poros por cm<sup>2</sup>. Também notou-se que quando foram utilizados níveis de temperatura diferentes para o material e para o molde no mesmo ensaio, a presença de defeitos foi maior, sendo assim, é possível concluir que a combinação de temperaturas deve acontecer de forma a evitar grandes diferenças de temperatura entre o molde e o alumínio fundido.

Com a utilização da metodologia de Taguchi para cálculo de sinal ruído de cada parâmetro, percebeu-se que o parâmetro que teve maior influência para a formação de defeitos foi a temperatura do molde metálico. A partir desta análise, também foi possível concluir que o nível 1 dos parâmetros foi o que apresentou menor sinal ruído e, conseqüentemente, menor presença de defeitos nas amostras.

Com o controle das temperaturas do material e do molde metálico e também a utilização do ensaio de líquidos penetrantes para controle de qualidade, foi possível reduzir drasticamente o percentual de refugo de bocais que passou de 50 % para apenas 4%.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se dar sequência à análise deste processo utilizando a mesma metodologia deste trabalho, porém, testando diferentes métodos para desgaseificação do alumínio líquido, como a utilização de nitrogênio por exemplo. A realização dos experimentos com um tamanho maior de amostragem também pode proporcionar resultados mais precisos.

Também pode ser realizado o projeto de um molde protótipo com massalotes e canais de injeção apropriados para que sejam evitadas as formações de rechupes. Também pode ser utilizado um software de simulação para realização de um estudo de preenchimento do molde a fim de prever as formações de defeitos internos.

## REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. São Paulo, 2007.

ASM Handbook. Vol 2. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM International, Materials Park, OH, 1998.

ASM Handbook. Vol 3. **Alloy Phase Diagrams**. ASM International, Materials Park, OH, 1992.

ASM Handbook. Vol 9. **Metallography and Microstructures**. ASM International, Materials Park, OH, 2004.

ASM Handbook. Vol 15. **Casting**. ASM International, Materials Park, OH, 2008.  
ASTM Standard. **ASTM B85**. Standard Specification for Aluminum-Alloy Die Castings. West Conshohocken, PA. 2010.

ASTM Standard. **ASTM E10**. Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, PA. 2015.

ASTM Standard. **ASTM E1417**. Standard Practice for Liquid Penetrant Examination. West Conshohocken, PA. 1999.

BALDAM, Roquemar de Lima; VIEIRA, Estéfano Aparecido. **Fundição: processos e tecnologias correlatas**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2014.

CAMARGO, Willian Ferreira de. **Estudo do processo de desgaseificação por nitrogênio da liga de alumínio SAE 306 na fundição sob pressão**. 2014. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.

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.

DISPINAR, Derya. **Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys**. 2005. 130 f. Tese (Doutorado) - Universidade de Birmingham, Birmingham, 2005.

FUOCO, Ricardo. **Importância do tratamento de desgaseificação na fundição de peças em ligas de alumínio**. Disponível em:  
<<https://pt.linkedin.com/pulse/import%C3%A2ncia-do-tratamento-de-desgaseifica%C3%A7%C3%A3o-na-fundi%C3%A7%C3%A3o-fuoco>>. Acesso em: 29 abr. 2021.

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

INFOMET. **Informações Gerais sobre Ligas Metálicas**. Disponível em: <[www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br)>. Acesso em: 09 abr. 2021.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013.

LESSA, Cleber. **Tecnologia em Processos Metalúrgicos**. IFRS. 2013. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/tecnologiaprocessometalurgico/fundicao-i/2-fornos/1-f-cadinho>>. Acesso em: 22 abr. 2021.

LUMLEY, Roger. **Fundamentals of Aluminium Metallurgy**. Woodhead Publishing in Materials, Cambridge, UK, 2011.

MICHALEK, K.; TKADLECKOVÁ, M.; SOCHA, L.; GRYC, K.; SATERNUS, M.; PIEPRZYCA, J.; MERDER, T.. Physical modelling of degassing process by blowing of inert gas. **Arch Metall Mater**, [S.L.], fev. 2018.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of experiments**. 7th Edition. ed. [S.I.]: John Wiley and Sons, Inc, 2009.

MORAES, Michelle Monticeli. **Análises de melhorias em tampa de caixa de passagem de transformador elétrico de liga de alumínio SAE 305 fundida por gravidade**. 2019. 50 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2019.

MOREIRA, Eduardo. **Dicas ao utilizar o forno para fundir alumínio / chumbo / estanho**. 2013. Disponível em: <[http://www.eduardomoreira.eng.br/metallurgia/dicas/dicas\\_aluminio.html](http://www.eduardomoreira.eng.br/metallurgia/dicas/dicas_aluminio.html)>. Acesso em: 23 abr. 2021.

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](http://www.pmt.usp.br/pmt3402/material/ligas_aluminio_fundidas.pdf)> . Acesso em: 10 Abr. 2021.

OLIVEIRA, Bruno Ferraz de. **Fundição**. Belém, PA: Rede e-Tec Brasil, 2013.

PINTO, Carla; FERNANDES, Ricardo. **Fundição em Coquilha**. 2001. 35 f. Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2001.

ROSS, P. J. **Aplicação das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade**. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.

ROY, R. K. **A primer on the Taguchi Method, 2nd Edition**. New York: Van Nostrand Reinhold, 2010.

SIEGEL, M. **Fundição**. 15. ed. São Paulo: ABM, 1985.

TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

TRİYONO, 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.