

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO**

**ESTUDO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO POR NITROGÊNIO DA LIGA  
DE ALUMÍNIO SAE 306 NA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

**CAXIAS DO SUL  
2014**

**WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO**

**ESTUDO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO POR NITROGÊNIO DA LIGA  
DE ALUMÍNIO SAE 306 NA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

Relatório de conclusão de curso de graduação, apresentado na disciplina de Estágio II MEC0258 ao Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. MSc. Fernanda Bordin

**CAXIAS DO SUL  
2014**

WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

**ESTUDO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO POR NITROGÊNIO DA LIGA  
DE ALUMÍNIO SAE 306 NA FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO**

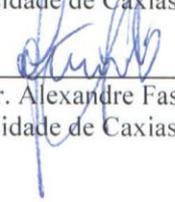
Relatório de conclusão de curso de graduação,  
apresentado na disciplina de Estágio II  
MEC0258 ao Centro de Ciências Exatas e de  
Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul,  
como requisito parcial para a obtenção do grau  
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Aprovado em 26/06/2014**

**Banca Examinadora**

  
\_\_\_\_\_  
Profª. MSc. Engenharia Metalurgista Fernanda Bordin  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

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

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alexandre Fassini Michels  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

## RESUMO

O objetivo deste estudo é reduzir ou eliminar a quantidade de porosidade presente nos componentes fundidos da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA, definindo os parâmetros a serem utilizados no processo de desgaseificação por nitrogênio para a liga de alumínio SAE 306, posteriormente injetado sob pressão em moldes metálicos. Para tal, foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre a liga de alumínio SAE 306, o processo de fundição sob pressão, o processo de fusão do alumínio, o processo de desgaseificação e sobre o ensaio MEV/EDS. Ferramentas de qualidade foram utilizadas para a identificação de possíveis causas do defeito porosidade e possíveis soluções. Foram definidos parâmetros do processo de desgaseificação como vazão de nitrogênio, tempo de desgaseificação e temperatura do alumínio na panela de transferência, cujos valores foram agrupados em diversas combinações e variados em testes, que definiram qual das combinações mostrou-se mais efetiva na redução da porosidade. Observou-se melhores resultados com 25 l/min de nitrogênio, 14 min de desgaseificação e alumínio a 650 °C na panela de transferência, sendo também definida uma temperatura de fusão de aproximadamente 700 °C e utilização de matéria-prima sem a presença de óleo. Estas informações foram agrupadas em instruções de trabalho, a fim de padronizar os processos de desgaseificação e fusão, além de servir de base para treinamento dos colaboradores.

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

## ABSTRACT

The purpose of this study is to reduce or eliminate porosity presented in casted components in Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA company. Parameters, used in the degassing process with nitrogen in the aluminum bath of alloy SAE 306 were defined before die casting process. To accomplish this purpose, literature searches were done about the aluminum alloy SAE 306, die casting process, aluminum melting process, degassing process and about the SEM/EDS analysis. Quality tools were used to identify the possible causes of porosity and their possible solutions. Degassing process parameters such as flow rate of nitrogen, degassing time and temperature of aluminum in the transfer crucible were defined, whose values were grouped in many combinations and varied in tests, and then defined which one of the combinations was more effective in reducing porosity. Best results were observed with 25 l/min of nitrogen, 14 minutes of degassing and aluminum at 650 °C in the crucible transfer, melting temperature around 700 °C and the use of raw materials without oil. These informations were grouped into work instructions in order to standardize the melting and degassing process, being useful to employee training.

**Key-words:** aluminium, degassing, die casting, melting, porosity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama de fases das ligas Al-Si.....	15
Figura 2 – Representação da formação da microestrutura da liga SAE 306 .....	15
Figura 3 – Fundição sob pressão em câmara fria .....	17
Figura 4 – Processo FDU de desgaseificação do alumínio .....	19
Figura 5 – Eficiência da desgaseificação por lança, bloco poroso e rotor.....	20
Figura 6 – Porosidade (a) por contração e (b) por hidrogênio.....	21
Figura 7 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido.....	22
Figura 8 – Formação da porosidade entre grãos (a) e interdendrítica (b).....	23
Figura 9 – Resistência à tração da liga SAE 306 em função da porosidade.....	24
Figura 10 – Equipamento para o teste RPT .....	25
Figura 11 – Amostras normalizadas para avaliação do nível de hidrogênio .....	26
Figura 12 – Forno fusor da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA.....	27
Figura 13 – Carga do forno: (a) lingotes de alumínio e (b) retorno .....	28
Figura 14 – Amostra PA e tipos de defeitos encontrados.....	29
Figura 15 – Equipamento de desgaseificação com rotor giratório .....	30
Figura 16 – Diagrama de Ishikawa para o defeito porosidade .....	31
Figura 17 – Comportamento da temperatura do alumínio durante desgaseificação.....	39
Figura 18 – Equipamento utilizado no Ensaio Straube-Pfeiffer.....	41
Figura 19 – Amostras seccionadas para análise qualitativa .....	44
Figura 19 – Imagem microscópica das amostras (a) A, (b) E, (c) F e (d) H .....	45
Figura 21 – Fases e precipitados da liga SAE 306, com ampliação de 1000x .....	46
Figura 22 – Ensaio EDS da matriz de alumínio $\alpha$ .....	47
Figura 23 – Ensaio EDS da fase AlSi.....	47
Figura 24 – Ensaio EDS do precipitado $Al_2Cu$ .....	48
Figura 25 – Ensaio EDS do precipitado complexo.....	48
Figura 26 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 200x.....	49
Figura 27 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 1000x.....	50
Figura 28 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 3000x.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ligas de alumínio para fundição .....	12
Tabela 2 – Composição química da liga SAE 306 .....	13
Tabela 3 – Propriedades da liga SAE 306 fundidas sob pressão.....	13
Tabela 4 – Efeitos dos elementos de liga no alumínio SAE 306.....	14
Tabela 5 – Parâmetros indicados para o processo de fundição sob pressão.....	16
Tabela 6 – Temperaturas de fusão medidas no processo atual.....	28
Tabela 7 – Relação entre nota e critério para utilização da matriz GUT.....	32
Tabela 8 – Matriz GUT das possíveis causas do defeito porosidade .....	33
Tabela 9 – Matriz 5W1H das possíveis causas do defeito porosidade .....	35
Tabela 10 – Níveis dos parâmetros variados durante a coleta de amostras.....	36
Tabela 11 – Identificação das amostras de acordo com os parâmetros escolhidos .....	37
Tabela 12 – Coleta de temperaturas do alumínio durante processo de desgaseificação .....	38
Tabela 13 – Média das taxas de variação da temperatura do banho metálico.....	39
Tabela 14 – Valores de temperatura inicial $T_i$ para cada combinação de parâmetros.....	40

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	10
1.2	OBJETIVOS .....	10
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>10</b>
1.3	DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO .....	11
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
2.1	ALUMÍNIO E SUAS LIGAS .....	12
<b>2.1.1</b>	<b>Nomenclatura das Ligas de Alumínio para Fundição</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Liga SAE 306</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Solidificação e Microestrutura das Ligas Al-Si</b> .....	<b>14</b>
2.2	PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO .....	16
<b>2.2.1</b>	<b>Processo de Fusão</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Etapas do Processo de Injeção na Fundição Sob Pressão</b> .....	<b>17</b>
2.3	PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO .....	18
<b>2.3.1</b>	<b>Desgaseificação por Gases Inertes</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Fluxos Escorificantes</b> .....	<b>20</b>
2.4	DEFEITOS DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO .....	21
<b>2.4.1</b>	<b>Porosidade e Suas Causas, Efeitos e Soluções</b> .....	<b>21</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Inclusões e Suas Causas, Efeitos e Soluções</b> .....	<b>24</b>
2.5	ENSAIOS NORMALIZADOS .....	25
<b>2.5.1</b>	<b>Ensaio Straube-Pffeifer</b> .....	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>27</b>
3.1	SITUAÇÃO ATUAL.....	27
3.2	EQUIPAMENTO UTILIZADO .....	29
3.3	DEFINIÇÃO DAS CAUSAS DO DEFEITO POROSIDADE .....	30
3.4	METODOLOGIA DE EXPERIMENTOS .....	36
<b>3.4.1</b>	<b>Planejamento de Experimentos</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Definição dos Parâmetros</b> .....	<b>36</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Comportamento da Temperatura X Tempo de Desgaseificação</b> .....	<b>38</b>
3.5	METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	40
<b>3.5.1</b>	<b>Avaliação Qualitativa</b> .....	<b>40</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Análise por Microscópio Óptico</b> .....	<b>41</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Ensaio MEV/EDS</b> .....	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>43</b>

4.1	AVALIAÇÃO VISUAL E QUALITATIVA .....	43
4.2	RESULTADO DO ENSAIO MEV/EDS.....	46
4.3	ELABORAÇÃO DAS INSTRUÇÕES DE TRABALHO .....	52
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A – INSTRUÇÃO DE TRABALHO DO PROCESSO DE FUSÃO .....</b>	<b>58</b>
	<b>APÊNDICE B – INSTRUÇÃO DE TRABALHO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO .....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este estudo abrange o processo de desgaseificação em conjunto com o processo de fusão, aplicado à liga de alumínio-silício SAE 306 utilizada no processo de fundição sob pressão da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA. Abrange a área de processos de fabricação da Engenharia Mecânica, na subárea de processos metalúrgicos.

Segundo NADCA (2012), o processo de fundição sob pressão permite a produção em massa de formatos complexos e paredes finas, com excelente acabamento superficial e precisão dimensional. Por outro lado, segundo ASM Handbook (1998, p. 629) “este processo, quando não controlado adequadamente, pode acarretar em diversos defeitos no produto, como por exemplo, porosidades, inclusões e rechupes”.

Segundo Gomes (1976, p. 56), “o alumínio líquido tende a absorver gases, hidrogênio principalmente, e a presença do hidrogênio procedente da atmosfera, retorno dos canais ou dos gases de combustão do forno causam porosidades”. Para Torre (2004), o nível de hidrogênio no metal líquido pode ser reduzido pelo processo de desgaseificação por gás inerte.

Este processo, segundo Corradi

[...] consiste na injeção de um gás inerte (argônio ou nitrogênio) no fundo do cadinho. O gás inerte irá funcionar formando bolhas, que irão retirar o  $H_2$  dissolvido por arraste para a superfície do banho, onde serão liberadas posteriormente para a atmosfera (CORRADI (2001, p. 71)).

Propõe-se o processo de desgaseificação como solução do defeito de porosidade, o que reduz a quantidade de peças não conformes fabricados de alumínio SAE 306 pelo processo de fundição em moldes permanentes sob pressão da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA.

Para isso, faz-se necessário uma investigação do defeito porosidade encontrado no fundido e de possíveis soluções para tal. Uma desgaseificação ineficiente, assim como matéria-prima contaminada e um processo de fusão inadequado podem gerar fundidos de baixa qualidade. Portanto, faz-se necessário um estudo sobre os processos envolvidos. Também é necessário um estudo da liga utilizada, a fim de verificar os elementos químicos e os efeitos que causam à liga.

Para a análise do tipo e quantidade dos defeitos, o uso de microscópio óptico faz-se necessário, além do ensaio MEV/EDS, a fim de identificar quais defeitos ocorrem na liga de alumínio e como proceder para a redução ou eliminação destes.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Defeitos de fundição, como porosidades, são percebidos somente após a produção e inspeção visual do fundido. Isso acarreta em aumento no tempo de entrega dos produtos e custos adicionais com processos.

O processo de desgaseificação por gases inertes não é realizado atualmente na empresa, que pretende implantá-lo com o objetivo de reduzir a quantidade de porosidade nos fundidos, já que este processo atende a necessidade de remoção de fontes de poros, como hidrogênio e inclusões. Como a empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA busca produzir peças mais resistentes e duráveis, entregando ao cliente produtos de qualidade e baixo custo, justifica-se assim este trabalho, partindo-se primeiramente de estudos detalhados para então implantar o processo de modo correto.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo é reduzir ou eliminar a porosidade presente nos componentes fundidos, utilizando o processo de desgaseificação por nitrogênio para a liga de alumínio SAE 306 fundido.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- i. Realizar uma pesquisa bibliográfica sobre a liga de alumínio SAE 306, o processo de fundição sob pressão focado na etapa de fusão do alumínio, o processo de desgaseificação e o ensaio MEV/EDS;
- ii. Identificar os fatores que geram porosidade no processo de fusão atual através de ferramentas da qualidade, como o Diagrama de Ishikawa, Matriz de Decisão e 5W1H, indicando possíveis soluções do defeito porosidade de acordo com a pesquisa bibliográfica;
- iii. Coletar dados do processo de fusão atual, identificando os parâmetros e matéria-prima utilizados;

- iv. Realizar testes práticos variando parâmetros de processo: temperatura da panela de transferência, tempo de desgaseificação e vazão de nitrogênio, tendo como base a pesquisa bibliográfica;
- v. Realizar análise em microscópio óptico, com o objetivo de observar o tipo e o formato de microporosidades;
- vi. Realizar análise MEV/EDS para identificar prováveis óxidos e microporosidades;
- vii. Comparar os resultados obtidos a fim de verificar se os parâmetros definidos como ideais correspondem ao esperado;
- viii. Definir a temperatura de fusão ideal para o processo de desgaseificação, com base nos resultados obtidos, analisando o comportamento da temperatura durante o tempo decorrido durante a desgaseificação;
- ix. Definir os parâmetros ideais do processo de desgaseificação através da análise dos resultados obtidos, elaborando uma instrução de trabalho para o processo de desgaseificação, a fim de padronizar o processo;
- x. Definir a matéria-prima adequada para a carga do forno fusor através de uma instrução de trabalho, indicando a temperatura de fusão ideal encontrada;

### 1.3 DESCRIÇÃO DA EMPRESA E AMBIENTE DE ESTÁGIO

Constituída no início do ano de 1996, a Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA, localizada na Rua Gérson Andreis, número 415, no bairro Cidade Nova em Caxias do Sul, é uma empresa especializada na prestação de serviços em injeção de alumínio em fundição sob pressão. Atualmente, a empresa dispõe de uma ampla faixa de capacidade de injeção no sistema de câmara fria, fornecendo peças a partir de 20 g até peças de 8 kg, sendo que o setor de injetoras é composto por uma central de fusão a gás natural e seis injetoras que variam de 180 a 1000 ton. Cada injetora possui um forno de manutenção, alimentados por uma panela de transferência de 500 kg de capacidade.

Atende empresas como Marcopolo, Acessórios Bepo, Continental, Festo Pneumática e Geremia Redutores, por exemplo. Sua visão é ser referência no mercado nacional por sua produtividade, competitividade e qualidade.

O ambiente de estágio compreendeu o setor de injetoras da empresa, sendo envolvidos os colaboradores que trabalham neste setor.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Conforme ABAL (2007), o alumínio é um metal leve (peso específico de 2,7 g/cm<sup>3</sup>), versátil e resistente, obtido do minério bauxita. Quando o alumínio é exposto a oxidantes, forma-se rapidamente na sua superfície uma película fina e protetora de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), conferindo-lhe alta resistência à corrosão. Além disto, o alumínio é um excelente condutor de calor e eletricidade, e possui boa maleabilidade. Para Gomes (1976, pg. 9), com adições de metais como silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco e ferro, o alumínio puro adquire uma série de vantagens como por exemplo fluidez, soldabilidade e usinabilidade.

#### 2.1.1 Nomenclatura das Ligas de Alumínio para Fundição

Pelo sistema de classificação da *International Alloy Designation System* (IADS), os alumínios estão divididos em duas classes: os alumínios para deformação plástica e os alumínios para fundição.

A nomenclatura das ligas de alumínio para fundição é designada pela norma internacional da *Aluminium Association* (AA). É composta por quatro dígitos, sendo que o primeiro indica o elemento principal da liga (tabela 1). De acordo com Fuoco (2005), o segundo e o terceiro dígitos indicam o teor de alumínio. O último dígito, separado dos demais por um ponto, indica a forma do produto: o número zero indica peças fundidas e o número um indica lingotes.

Tabela 1 – Ligas de alumínio para fundição

Série	Elemento de liga principal	Outros elementos de liga	Principais Vantagens
1XX.X	Alumínio puro	-	Maleabilidade
2XX.X	Cu	-	Usinabilidade
3XX.X	Si	Mg, Cu	fluidez, resistência
4XX.X	Si	-	Soldabilidade
5XX.X	Mg	-	resistência à corrosão
6XX.X	Não utilizada	-	-
7XX.X	Zn	Cu, Mg, Cr, Mn	similar à liga 5XX.X
8XX.X	Sn	-	usinabilidade, desgaste
9XX.X	Não utilizada	-	-

Fonte: Adaptado de NADCA, 2009.

### 2.1.2 Liga SAE 306

A liga SAE 306 é considerada uma liga de alumínio-silício-cobre hipoeutética. A composição química desta liga encontra-se na tabela 2, e as propriedades estão indicadas na tabela 3. Tais especificações técnicas são fornecidas pela norma ASTM B85.

Tabela 2 – Composição química da liga SAE 306

Porcentagem de Elementos (%)					
Si	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
7,5 a 9,5	3,0 a 4,0	1,0 a 1,3	0,1	0,5	3,0

Fonte: Adaptado de Norma ASTM B85, 2010 e de Gowri, 1994.

De acordo com Lumley (2011, p. 15) “aproximadamente 85% das ligas de alumínio para fundição são ligas secundárias (feitas com uma parte de retorno além do lingote)”. Conforme ASM Handbook (1998), a liga SAE 306 (equivalente à liga A380 da norma AA, equivalente à liga LM24 do Reino Unido e similar à liga EN AC-46500 da norma DIN), fornece uma ótima combinação de custo e resistência mecânica, além de alta fluidez.

Tabela 3 – Propriedades da liga SAE 306 fundidas sob pressão

Intervalo de Solidificação	520 °C – 580 °C
Módulo de Elasticidade	71 GPa
Resistência à Tração	325 MPa
Tensão de Escoamento	160 MPa
Dureza	80 HB
Tensão de Cisalhamento	185 MPa
Resistência à Fadiga	140 MPa

Fonte: Adaptado de Norma ASTM B85, 2010 e De Moura, 2006.

A tabela 4 indica as mudanças de propriedades que a liga SAE 306 adquire com os elementos de liga especificados.

Quanto aos teores admitidos pela especificação, segundo Samuel (1995, p. 11), “o teor de manganês não deve exceder metade da concentração de ferro na liga, devido à contribuição do manganês para formação de compostos intermetálicos que causam inclusões no fundido”.

Segundo ASM Handbook (1998), teores de ferro acima de 0,7% são desejáveis na fundição sob pressão, já que a partir deste teor, o ferro facilita a ejeção da peça e minimiza a

solda fria que ocorre entre a peça e o molde. Todavia, teores acima de 1,5% podem tornar o produto frágil.

A tabela 4 mostra que os efeitos dos elementos de liga são em grande parte benéficos, quando utilizados em teores adequados, para ligas de alumínio fundidas sob pressão.

Tabela 4 – Efeitos dos elementos de liga no alumínio SAE 306

Silício	Aumenta resistência e fluidez e reduz a contração do metal
Cobre	Aumenta resistência à tração, mas reduz ductilidade
Magnésio	Aumenta resistência, mas reduz fluidez em teores elevados
Manganês	Refina microestrutura, mas gera inclusões em teores elevados
Zinco	Aumenta fluidez da liga em teores até 3%
Ferro	Aumenta resistência à tração e dureza em teores reduzidos

Fonte: Fonseca, 2001; NADCA, 2012; Samuel, 1995; Corradi, 2001.

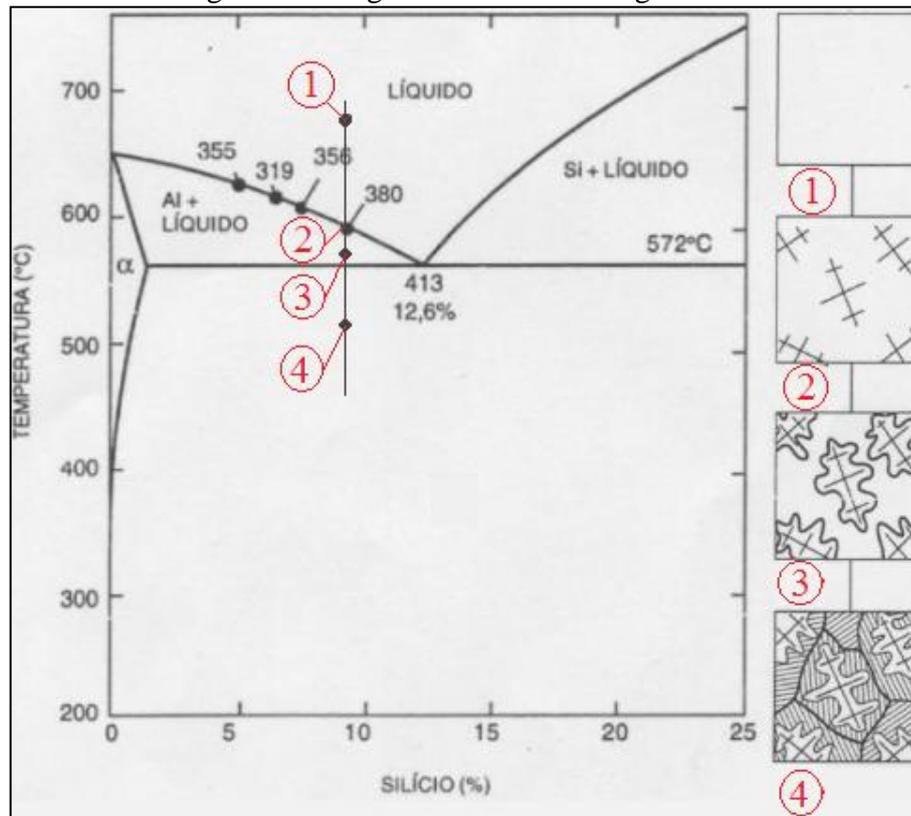
### 2.1.3 Solidificação e Microestrutura das Ligas Al-Si

A figura 1 apresenta o diagrama de fases para ligas de alumínio-silício, destacando a microestrutura da liga A380, equivalente à liga SAE 306, durante a solidificação. Segundo Corradi (2001, p. 28), “ligas eutéticas caracterizam-se pela presença de um ponto eutético para valores de aproximadamente 12,6% de silício a 572 °C”.

Ainda, de acordo com Corradi (2001), durante a solidificação de ligas hipoeutéticas (com teores de silício abaixo do ponto eutético), há formação de dendritas de fase  $\alpha$  (matriz de alumínio) logo abaixo da linha *liquidus*. As dendritas continuam a crescer durante a solidificação, deslocando as impurezas para o contorno de grão, ou retendo-as entre os braços dendríticos secundários. Portanto, após a matriz de fase  $\alpha$  estar estruturada, há formação de precipitados (óxidos e gases, por exemplo) nas regiões interdendríticas e entre grãos.

Por conta do deslocamento das impurezas, defeitos de fundição tendem a formar-se na última região de solidificação, sendo esta a região central do fundido. Portanto, deve-se observar a região do núcleo dos fundidos de alumínio para uma análise correta dos defeitos presentes.

Figura 1 – Diagrama de fases das ligas Al-Si



Fonte: Adaptado de Corradi, 2001.

As demais fases e precipitados presentes na liga SAE 306 estão descritas na figura 2, assim como uma ilustração do formato de cada fase ou precipitado. Observa-se a formação de fases de silício antes, durante e após a formação da matriz de alumínio  $\alpha$ . Precipitados de alumínio-cobre e alumínio-magnésio formam-se após a consolidação das fases da liga, sendo que compostos complexos formados por mais de dois elementos são os últimos precipitados a formarem-se. Para a liga em questão, o momento da formação eutética refere-se à temperatura de 572 °C.

Figura 2 – Representação da formação da microestrutura da liga SAE 306

Temperatura (°C)	Fase	Momento da formação
650	$Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ (primário)	Pré-dendrítico
600	Dendritas de alumínio- $\alpha$ , $Al_{15}(Fe, Mn)_3Si_2$ e/ou $Al_5FeSi$	Dendrítico
		Pós-dendrítico
		Pré-dendrítico
550	Eutético (Al+Si) e $Al_5FeSi$	Eutético
		Coeutético
540	$Mg_2Si$ ( $Mg > 0,2\%$ )	Pós-eutético
520-540	$Al_2Cu$	Pós-eutético
480-500	Fases complexas com vários materiais (Si, Fe, Mg, Cu e Zn)	Pós-eutético

Fonte: Adaptado de Kleine, et al, 2013.

## 2.2 PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

Entre os estudiosos da área, existem diversos conceitos para o processo de fundição sob pressão. De acordo com Fregulia,

[...] consiste na injeção de um metal líquido contido em um recipiente (câmara de injeção) para o interior da cavidade de um molde fabricado em aço, por meio de um pistão, sendo que na primeira fase, o ar é eliminado da câmara de injeção. Depois, há um rápido preenchimento da cavidade do molde pelo metal fundido. A última etapa é a compactação do metal para diminuir o volume das microporosidades [...] (FREGULIA (2006, p. 7)).

Pela definição da ASM Handbook (1998, p.611), “a fundição sob pressão é caracterizada por uma fonte de energia hidráulica que confere alta velocidade para o metal fundido, proporcionando o enchimento rápido de um molde de metal”. O molde absorve as tensões da injeção, dissipa o calor contido no metal e facilita a remoção da parte moldada.

De acordo com De Moura (2006, p. 17), “o processo de fundição sob pressão apresenta vantagens como elevada produtividade, baixo custo de produção, excelente acabamento superficial e precisão dimensional e obtenção de peças com espessuras finas”. Por outro lado, segundo DEMEC (2007, p. 31), “apresenta algumas desvantagens, como elevado custo dos equipamentos, limitações nas dimensões e geometria das peças e tendência à formação de porosidades”.

De acordo com Tsoukalas (2008), são indicados parâmetros na fundição sob pressão para obtenção de níveis reduzidos de porosidade no fundido, cujos valores podem ser observados na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros indicados para o processo de fundição sob pressão

Temperatura do forno de fusão	730 °C
Temperatura do molde	270 °C
Velocidade do pistão na primeira etapa	0,336 m/s
Velocidade do pistão na segunda etapa	1,2 m/s
Pressão na terceira etapa	275,7 bar

Fonte: Tsoukalas, 2008.

### 2.2.1 Processo de Fusão

Os lingotes de alumínio e o retorno são adicionados aos fornos de fusão e na fase líquida é feita a transferência para um cadinho refratário, também chamado de panela de

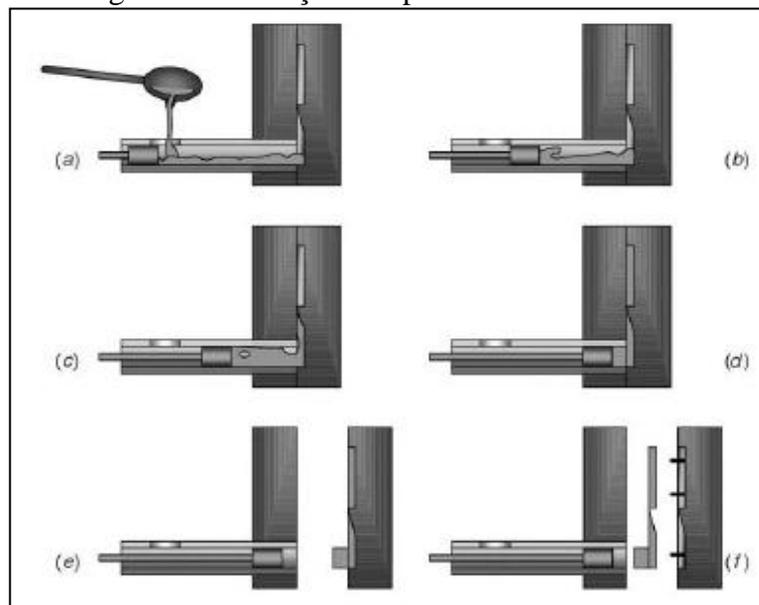
transferência. Prossegue-se então com a aplicação do fluxo escorificante e posterior retirada da escória aglomerada na superfície do banho. A panela de transferência transporta o metal líquido até os fornos de manutenção ou fornos de espera, onde o alumínio é vertido. Segundo Lumley (2011, p. 33), “o forno de manutenção localizado ao lado da injetora é responsável por manter a liga fundida a uma temperatura ideal para injeção, entre 650 e 700 °C”. Inicia-se então o processo de injeção.

### 2.2.2 Etapas do Processo de Injeção na Fundição Sob Pressão

De acordo com Lumley (2011), a primeira fase é a denominada “fase de aproximação”, e começa com o vazamento do metal líquido (por meio de conchas) retirado do forno de manutenção para uma câmara, chamada de camisa do pistão (figura 3a).

O pistão é acionado ao longo desta câmara (figura 3b) e injeta o metal líquido no molde através de um cilindro hidráulico controlado por computador, que conforme DEMEC (2007) sincroniza a pressão de injeção na ordem de 100 a 200 atm, e conforme Fuoco (2005), a velocidade de injeção inicial em aproximadamente 0,5 m/s. No interior da camisa do pistão, evita-se absorção de gases pelo contato prolongado do metal líquido com o ar (figura 3c). Nesta etapa, o metal pode começar a solidificar na superfície da camisa do pistão, formando flocos (dendritas) que afetam negativamente o fundido. Ainda, segundo Lumley (2011), evita-se esta solidificação precoce pré-aquecendo-se a camisa do pistão acima de 300 °C.

Figura 3 – Fundição sob pressão em câmara fria



Fonte: Viana, 2012.

Segundo Lumley (2011), a segunda fase denomina-se “fase de enchimento”, e é a fase mais crítica da injeção (figura 3d). De acordo com DEMEC (2007), a velocidade do pistão varia entre 1 e 1,5 m/s. Conforme Campos (2008, p. 29), “em injetoras que trabalham com pressões reduzidas, deve-se elevar a velocidade de injeção para compensar a falta de pressão”. Preferencialmente deve-se optar por pressões de trabalho elevadas, utilizando velocidades de injeção baixas, garantindo que o fluxo de metal líquido seja suficientemente lento para permitir a expulsão do ar do interior do molde através dos orifícios de ventilação.

De acordo com Campos (2008), quando a cavidade do molde está totalmente preenchida, a liga encontra-se em rápido estágio de solidificação. O pistão aplica um aumento extra de pressão com o objetivo de compactar a liga, compensando a contração do metal e diminuindo o tamanho de eventuais poros internos. Segundo Lumley (2011), esta terceira fase denomina-se “fase de compactação”, onde pressões de 40 a 160 MPa são aplicadas. O produto fundido é arrefecido pela alta transferência de calor com o molde até que a peça atinja uma temperatura ideal para a abertura do molde (figura 3e) e a desmoldagem do fundido por pinos ejetores (figura 3f).

Paralelamente a estas etapas, conforme Lumley (2011), o molde é pré-aquecido a uma temperatura entre 120 e 280 °C e lubrificado com a aplicação do desmoldante (uma emulsão de água e óleo). Os moldes são fabricados de ferro fundido cinzento ou aço-ferramenta tratado termicamente, e podem suportar as altas velocidades e pressões do processo sob pressão.

Conforme Fregulia (2006), o alumínio é processado em injetoras de câmara fria, onde o processo de injeção é horizontal e introduz-se na camisa do pistão apenas a quantidade necessária de alumínio. Pode-se utilizar o alumínio em temperaturas menores, reduzindo a absorção de gases e o desgaste das matrizes.

### 2.3 PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO

Anteriormente ao processo de injeção e logo após o processo de fusão, é necessário remover o hidrogênio presente no metal líquido. Segundo Fuoco (2005), a remoção do hidrogênio dissolvido pode ser realizada a vácuo, por meio de pastilhas de hexacloretano inseridas no banho ou pelo borbulhamento de gás inerte (geralmente argônio ou nitrogênio, que possuem solubilidade quase nula no alumínio). Os dois primeiros processos apresentam alta eficiência na remoção do hidrogênio, entretanto apresentam como desvantagem o custo do equipamento e a toxicidade do gás cloro, respectivamente.

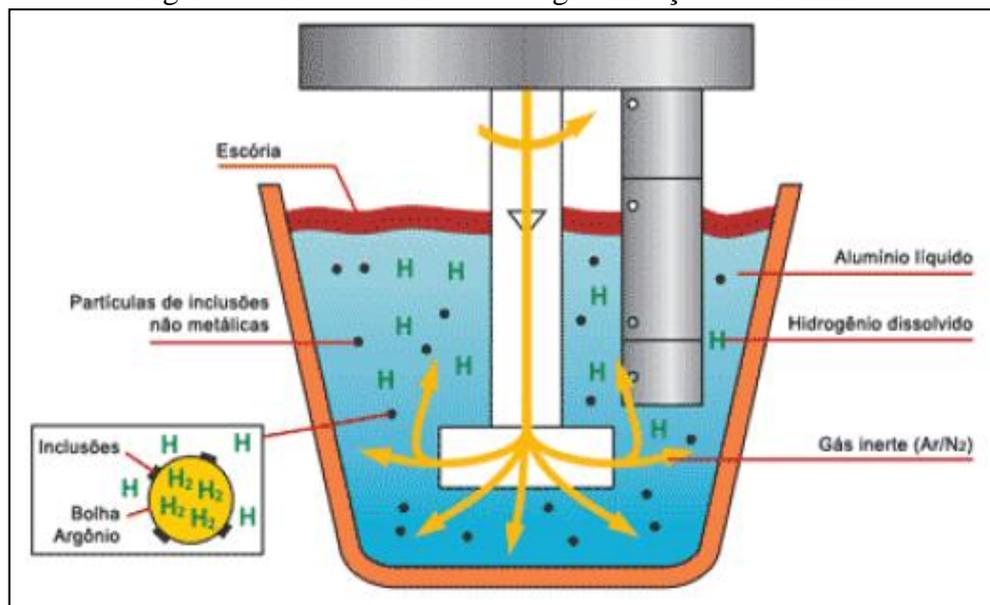
### 2.3.1 Desgaseificação por Gases Inertes

O borbulhamento de argônio ou nitrogênio no alumínio líquido, segundo Menegon (2012, p. 38) “promove a remoção do hidrogênio dissolvido no banho metálico, pois há um equilíbrio de concentração de hidrogênio entre o banho e a bolha enquanto as bolhas flutuam para a superfície e são posteriormente eliminadas na atmosfera”. Há ainda uma limpeza de inclusões do banho de metal líquido promovido por arraste, gerado pela agitação do rotor.

Dentre os equipamentos de desgaseificação existentes, o FDU (*Foundry Degassing Unit*) é um dos mais utilizados atualmente (figura 4). Segundo Campbell (1994, p. 7), “neste processo, um rotor central introduz um gás inerte no centro do metal fundido, onde as bolhas emergentes são fragmentadas e dispersas pela rápida rotação do rotor. A área total das bolhas e sua ampla dispersão proporcionam uma desgaseificação rápida”. Neste equipamento, há ainda uma placa metálica que possui um revestimento refratário, localizada ao lado do rotor, que tem por função auxiliar a aglomeração da escória durante o processo de desgaseificação.

A rápida desgaseificação citada por Campbell (1994) ocorre devido ao tamanho e quantidade das bolhas geradas, sendo suficientemente pequenas para uma boa desgaseificação (com diâmetros de 3 a 10 mm). Bolhas pequenas sobem lentamente e assim possuem um tempo de contato maior com o banho metálico. Segundo Menegon (2012), um elevado número de pequenas bolhas permite maior área de contato com o hidrogênio, que se saturam rapidamente, tornando o processo mais eficaz.

Figura 4 – Processo FDU de desgaseificação do alumínio

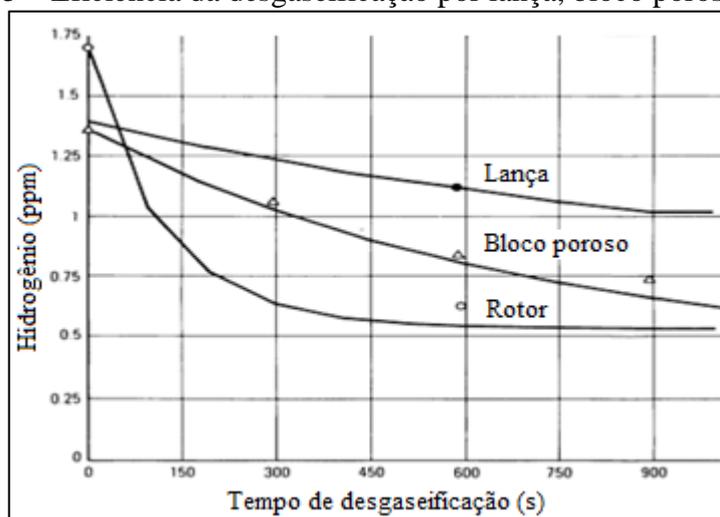


Fonte: Menegon, 2012.

O tempo de desgaseificação depende da liga de alumínio e da quantidade de hidrogênio dissolvido que a liga possui. Segundo Dispinar (2005, p. 26), “geralmente é de 5 a 10 minutos para cada 300 kg de alumínio”. A vazão do gás injetado deve ser controlada de modo que não cause distúrbios na superfície do metal líquido (o que gera inclusões de alumina no fundido), nem suficientemente baixa ao ponto de não gerar um número de bolhas adequado para a desgaseificação. De acordo com Menegon (2012), para um correto funcionamento do processo, o cilindro de nitrogênio deve ter uma pressão superior aos 5 bar e a vazão de nitrogênio deve variar de 15 a 25 l/min.

Dentre os meios possíveis de borbulhamento, o rotor apresenta melhor desgaseificação em menor tempo, como mostra a figura 5.

Figura 5 – Eficiência da desgaseificação por lança, bloco poroso e rotor



Fonte: Adaptado de ASM International, 1993.

### 2.3.2 Fluxos Escorificantes

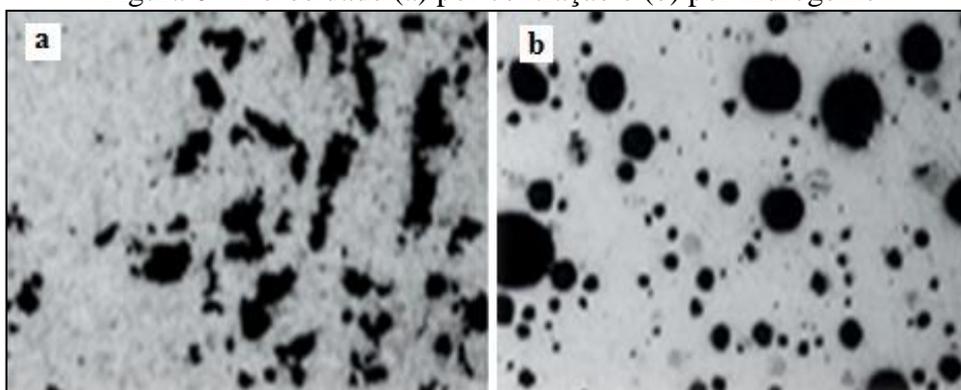
Os fluxos escorificantes são adicionados à superfície do metal líquido anteriormente ao processo de injeção para formar uma escória de impurezas que flota na superfície do banho metálico, facilitando a remoção desta. Segundo Dispinar (2008, p. 30), é um ótimo meio para evitar o excesso de óxidos e inclusões não metálicas das paredes dos fornos e do próprio banho metálico. Segundo Campos (2008, p. 12), “a quantidade necessária de escorificante deverá ser de 0,05 a 0,1% do peso de metal fundido a ser desgaseificado”.

## 2.4 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO SOB PRESSÃO

### 2.4.1 Porosidade e Suas Causas, Efeitos e Soluções

Porosidades são vazios de aparência arredondada (causada por gases) ou irregular (causada por inclusões ou contração), que se apresentam dispersos pelo fundido, como mostra a figura 6. A contração e a porosidade por presença de gases requerem ações de correção diferentes, por isso deve-se certificar do tipo de porosidade existente, de modo a agilizar o processo de correção.

Figura 6 – Porosidade (a) por contração e (b) por hidrogênio

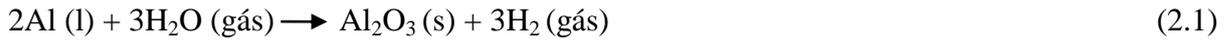


Fonte: Viana, 2012.

A porosidade pode ser provocada na fundição sob pressão principalmente por:

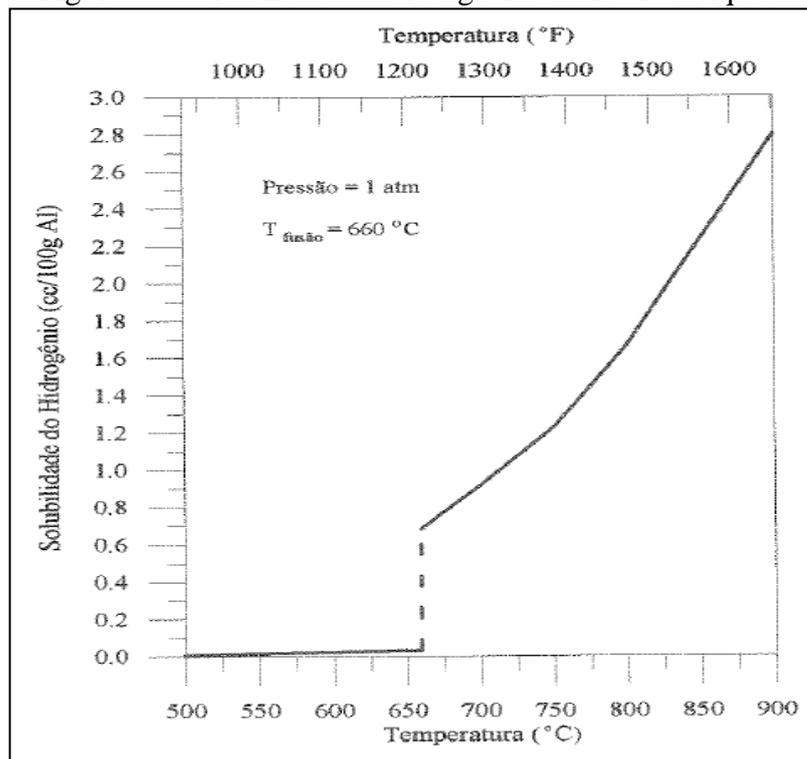
- i. Impurezas: segundo Wang (2011), o óleo utilizado para lubrificar o pistão pode adicionar impurezas e hidrogênio (vapor d'água) ao fundido. Impurezas provocam um fluxo e resfriamento desigual do material, resultando em bolsas de ar que formam poros no fundido;
- ii. Velocidade de injeção: segundo Lumley (2011), a alta pressão do processo tende a reduzir os poros a tamanhos extremamente pequenos; porém, a alta velocidade causa turbulência do metal, aprisionando gases durante o preenchimento do molde;
- iii. Taxa de solidificação: de acordo com Lumley (2011), em moldes metálicos que possuem um correto sistema de arrefecimento, a quantidade dos poros é reduzida durante a solidificação rápida pelo refinamento de grão e curto tempo para aglomeração das bolhas. Já fundidos lentamente resfriados em moldes com arrefecimentos deficientes, facilmente formam poros;

- iv. Hidrogênio: conforme Torre (2004, p. 31), “a presença do hidrogênio incorporado ao alumínio procedente da atmosfera, retorno dos canais ou dos gases de combustão do forno causa porosidades”. O alumínio absorve hidrogênio e forma-se alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na superfície do banho, como mostra a reação 2.1:



O alumínio a temperaturas acima de  $660^\circ\text{C}$  tende a absorver hidrogênio por conta da alta solubilidade do gás (figura 7). Entretanto, no alumínio sólido, portanto, a temperaturas reduzidas, a solubilidade diminui drasticamente.

Figura 7 – Solubilidade do hidrogênio no alumínio líquido



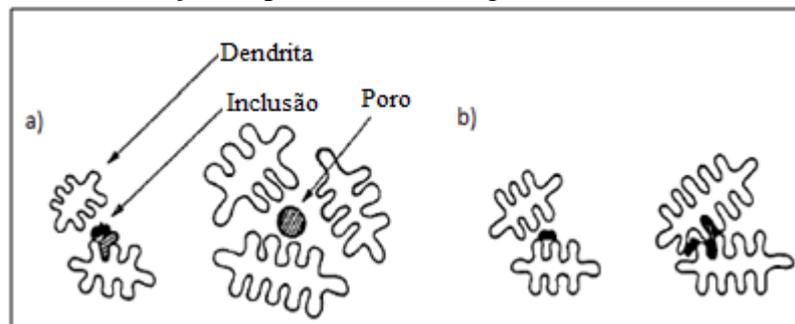
Fonte: Melo, 1996.

Segundo Orchan (1994), a porosidade por gás possui um formato esférico, com paredes internas dos poros levemente lisas e brilhantes em relação às paredes internas de rechupes, e se forma quando o hidrogênio dissolvido excede o limite máximo de solubilidade, e a pressão interna da bolha é maior que a pressão externa que atua sobre o gás. Do contrário, o hidrogênio permanece dissolvido na fase sólida. Se há formação precoce de bolhas, elas irão destacar-se do braço dendrítico e prender-se-ão entre os grãos (figura 8a), resultando em

poros maiores. Os poros que se formam numa fase posterior de solidificação (figura 8b) serão presos entre os braços secundários.

A supersaturação de hidrogênio cria a condição necessária para nucleação da bolha. De acordo com Melo (1996, p. 24), “a porosidade evolui enquanto o metal solidifica, até a bolha de gás obter um raio suficiente para desprender-se da dendrita, e termina quando o metal é completamente solidificado”. Quanto maior a quantidade inicial de hidrogênio, mais cedo o gás excederá o limite de solubilidade, mais rapidamente a pressão interna da bolha aumentará, e maior a facilidade na formação e crescimento da porosidade.

Figura 8 – Formação da porosidade entre grãos (a) e interdendrítica (b)



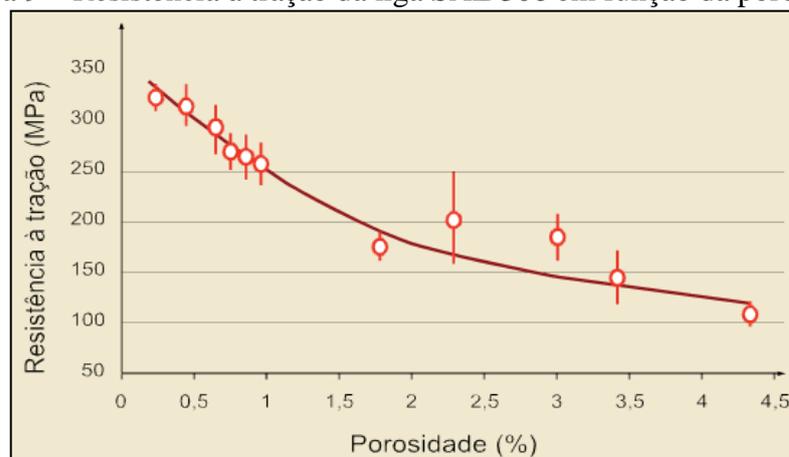
Fonte: Adaptado de Orchan, 1994.

Diferentemente da porosidade por aprisionamento de gases, a porosidade por contração caracteriza-se pela forma irregular e superfície interna áspera (figura 6a). Conforme Orchan (1994), isto se deve ao campo de forças formadas pela contração durante a solidificação do metal, formando vazios irregulares e de coloração própria, que evoluem à medida que há acúmulo de tensões residuais ao redor dos poros formados. Ocorrem geralmente na última região do fundido a solidificar. Há também a possibilidade de ocorrer porosidades por contrações em regiões onde havia concentrações de gases, mesclando os dois defeitos.

Segundo Melo (1996), para evitar a formação de porosidades, deve-se observar a umidade do ambiente, da matéria-prima e dos equipamentos que entram em contato com o banho metálico, evitar superaquecimento do alumínio ao fundi-lo, evitar agitação excessiva do banho, e sempre proceder à degaseificação do alumínio fundido.

A porosidade causa perda de estanqueidade, aumenta a tendência a trincas e diminui a resistência mecânica do alumínio, como mostra a figura 9.

Figura 9 – Resistência à tração da liga SAE 306 em função da porosidade



Fonte: Simon, et al., 2013.

#### 2.4.2 Inclusões e Suas Causas, Efeitos e Soluções

Inclusões são óxidos ou outras impurezas introduzidas ao metal líquido, retidas entre as dendritas e grãos do alumínio solidificado.

Segundo Lumley (2011, p. 35), “o óxido mais comum presente no alumínio líquido é a alumina, que forma-se na superfície do metal líquido como uma fina película, tão logo o alumínio entra em contato com o ar”. De acordo com Fuoco (2005), se houver qualquer turbulência no banho, a película de alumina é dobrada e misturada ao metal fundido, onde pode criar pontos propícios para porosidade durante a solidificação. A turbulência do fluxo metálico durante a injeção também é uma fonte de inclusões por óxidos. Canais de retorno contaminados, material oriundo dos equipamentos e desmoldante em excesso causam incorporação de outras impurezas, como óleos e graxas, por exemplo.

Conforme Fonseca (2001), quando o ferro, manganês e cromo apresentam-se em quantidades elevadas no banho acima de 700 °C originam um composto intermetálico característico, considerado uma impureza. Este composto apresenta ponto de fusão acima ao das ligas AlSi, e por isso não ocorre sua dissolução, devendo ser retirado frequentemente do banho metálico. De acordo com Fregulia (2006), para evitar a formação de tal impureza é necessário controlar os teores dos elementos que causam este composto, a constante limpeza do banho, além do rígido controle da temperatura do forno.

Inclusões reduzem a fluidez do metal e produzem descontinuidade na estrutura da liga. Também atuam como auxiliares de nucleação, bloqueando a alimentação de metal líquido entre as dendritas e facilitando o crescimento dos poros (figura 8a).

Segundo Fuoco (2005, p. 40), “para reduzir a quantidade de inclusões, indica-se o uso de fornos e conchas adequadas para operações de vazamento e transferência do alumínio líquido, sem que ocorra turbulência do metal”. Para Campos (2008), uma fonte de proteção contra a oxidação é a própria película de alumina, que impede que oxidantes e gases penetrem no metal líquido.

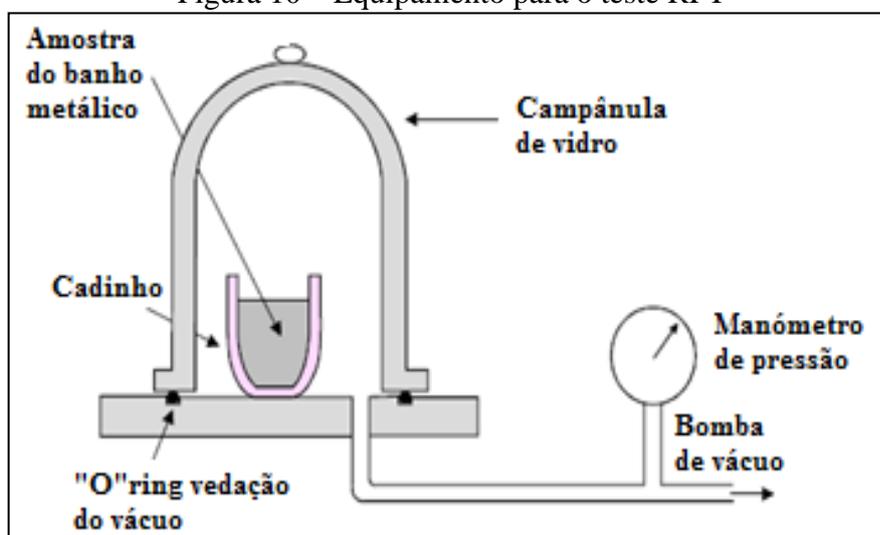
## 2.5 ENSAIOS NORMALIZADOS

### 2.5.1 Ensaio Straube-Pfeiffer

O ensaio de *Straube-Pfeiffer*, ou *Reduced Pressure Test* (RPT) é um teste utilizado para avaliação de amostras de alumínio solidificadas a vácuo.

Segundo Campbell (1994), o ensaio compreende a obtenção de uma amostra do metal líquido em um cadinho de aço pré-aquecido (geralmente com 100 a 200 g de capacidade) e subsequente solidificação da amostra dentro de uma câmara, onde vácuo é criado enquanto a amostra solidifica-se, como indica a figura 10.

Figura 10 – Equipamento para o teste RPT



Fonte: Oliveira, 2010.

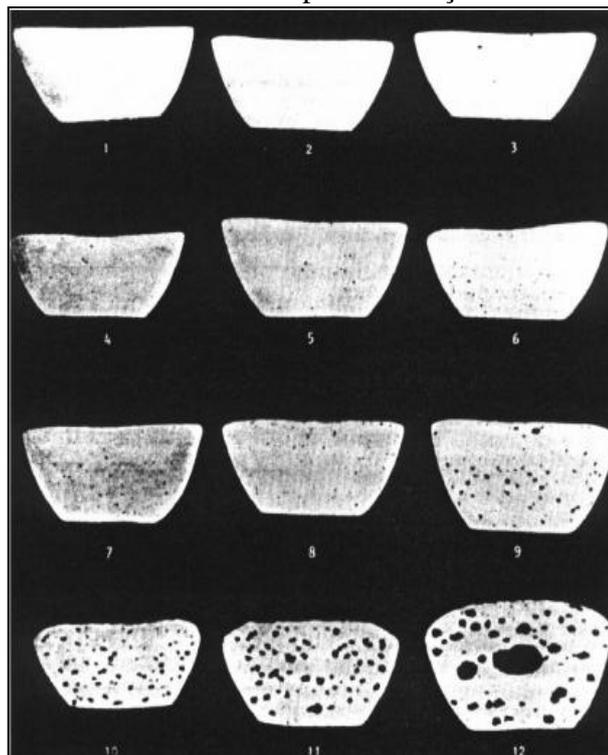
De acordo com NADCA (2012, p. 28), “o vácuo durante a solidificação aumenta a nucleação e crescimento das bolhas de hidrogênio, exagerando o tamanho dos poros para uma melhor visualização macroscópica”.

Para Oliveira (2010), deve-se observar a amostra durante o teste, pois o aparecimento de bolhas na superfície superior da amostra pode indicar um alto teor de gás. Além disto, uma

superfície convexa pode indicar um alto grau de porosidade causada pela nucleação do gás. Por outro lado, uma superfície côncava indica uma baixa concentração de gás, devido ao rechupe criado pela rejeição do hidrogênio.

Pode-se seccionar a amostra para comparação com imagens padrão normalizadas que apresentam diferentes teores de hidrogênio, conforme figura 11.

Figura 11 – Amostras normalizadas para avaliação do nível de hidrogênio



Fonte: Fuoco, 2005.

Conforme Oliveira (2010) é essencial que os resultados obtidos sejam comparados com amostras em condições idênticas de pressão (o vácuo deve ser feito o mais rápido possível e ser constante) e a taxas de solidificação semelhantes com o cadinho pré-aquecido (o arrefecimento lento pode causar desgasificação e levar a resultados falsos) para que os ensaios sejam válidos.

O ensaio Straube-Pfeiffer é útil para observar o potencial do fundido em desenvolver porosidades, tornando possível identificar o tamanho, forma e distribuição das porosidades e inclusões de uma forma qualitativa. Para Oliveira (2010, p. 46), “embora apresente resultados apenas de forma qualitativa, este teste torna-se útil pela rapidez, baixo custo e fácil manuseio do equipamento. Além disto, as pressões de vácuo necessárias para os testes são facilmente obtidas”.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 SITUAÇÃO ATUAL

A empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA utiliza o processo de fundição sob pressão em moldes metálicos para a fabricação de peças em alumínio SAE 306. Porém, não utiliza processo de degaseificação para reduzir o nível de porosidades dos fundidos.

Previamente ao processo de injeção, a fusão do alumínio é feita em um forno fusor como mostra a figura 12. Este forno é do tipo basculante, e utiliza gás como fonte de energia.

Figura 12 – Forno fusor da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA



Fonte: Autor, 2014.

Como matéria-prima, são utilizados lingotes e retorno contaminado (peças não conformes e canais de alimentação) da liga SAE 306, geralmente na proporção de 50% cada (figura 13). Os lingotes são mantidos envoltos em plástico para evitar contaminação por impurezas e contato com a umidade do ar, em local próximo ao forno. O retorno é separado das peças conformes e mantido em caixas de metal para posterior utilização. A carga é colocada em uma cesta de metal, que por processo automatizado, abastece o forno fusor.

Figura 13 – Carga do forno: (a) lingotes de alumínio e (b) retorno



Fonte: Autor, 2014.

A matéria-prima entra em contato com o alumínio líquido restante da fusão anterior. A temperatura média de fusão é de aproximadamente 683 °C. A tabela 6 mostra a temperatura de fusão utilizada na empresa e medida em diferentes cargas.

Tabela 6 – Temperaturas de fusão medidas no processo atual

Data de Leitura	Temperatura (°C)
11/03/2014	688
18/03/2014	677
25/03/2014	682
07/04/2014	687
14/04/2014	681

Fonte: Autor, 2014.

O vazamento do alumínio do forno fusor para a panela de transferência ocorre em intervalos de trinta minutos à uma hora, tempo estimado para o consumo do metal líquido existente nos fornos de espera situados ao lado de cada injetora. Tal vazamento é feito basculando-se o forno fusor que transfere o metal líquido para a panela até aproximadamente 90% de sua capacidade. A utilização de escorificante ocorre na panela de transferência, onde o operador despeja aproximadamente 300g do produto na superfície do banho metálico. A escória sobrenadante é aglomerada para uma melhor remoção e descartada em um tonel próximo utilizando-se uma escumadeira.

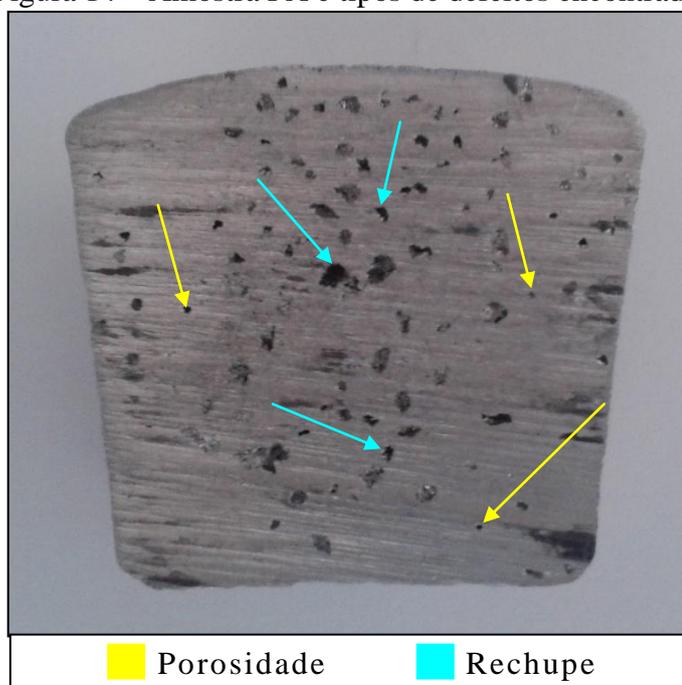
Uma talha auxilia no transporte da panela de transferência até o forno de espera. O processo de vazamento e de alimentação dos fornos de espera leva em torno de dez minutos,

sendo que o volume de metal de uma panela de transferência abastece aproximadamente três fornos de espera.

Os componentes produzidos na empresa possuem alto nível de porosidade, conforme figura 14, que apresenta uma amostra solidificada retirada do processo atual, ou seja, sem desgaseificação. Esta amostra recebeu a identificação PA, referente ao processo atual.

Há a ocorrência de vazios de formatos variados na amostra, sendo o defeito de porosidade causado por hidrogênio caracterizado por vazios arredondados, como indicado pelas setas amarelas na figura 14. Os demais defeitos de aparência irregular dendrítica são classificados como rechupes, ou a combinação de ambos os defeitos, indicados pelas setas azuis.

Figura 14 – Amostra PA e tipos de defeitos encontrados



Fonte: Autor, 2014.

### 3.2 EQUIPAMENTO UTILIZADO

A figura 15 apresenta o equipamento de desgaseificação por rotor giratório utilizado nos testes. Este equipamento possui uma base circular, que facilita o apoio na superfície superior da panela de transferência. Esta base possui regulagem de altura, a fim de adequar-se a diferentes medidas de profundidade do cadinho refratário.

A introdução do rotor ao banho metálico deve ser feita lentamente, pois o rotor em temperatura ambiente, quando em contato com o alumínio fundido, pode gerar a projeção do alumínio líquido em forma de respingos, o que representa risco de ferimentos.

Após o término do processo de degaseificação, deve-se remover o alumínio solidificado na superfície do rotor e da placa refratária. Tal remoção deve ocorrer após o resfriamento do alumínio, a fim de evitar acidentes provenientes do trabalho com metal a temperaturas elevadas.

Figura 15 – Equipamento de degaseificação com rotor giratório



Fonte: Autor, 2014.

### 3.3 DEFINIÇÃO DAS CAUSAS DO DEFEITO POROSIDADE

O uso de ferramentas da qualidade torna-se útil no levantamento dos fatores que geram o defeito porosidade no processo de fusão atual, identificando possíveis causas e indicando possíveis soluções de tal defeito.

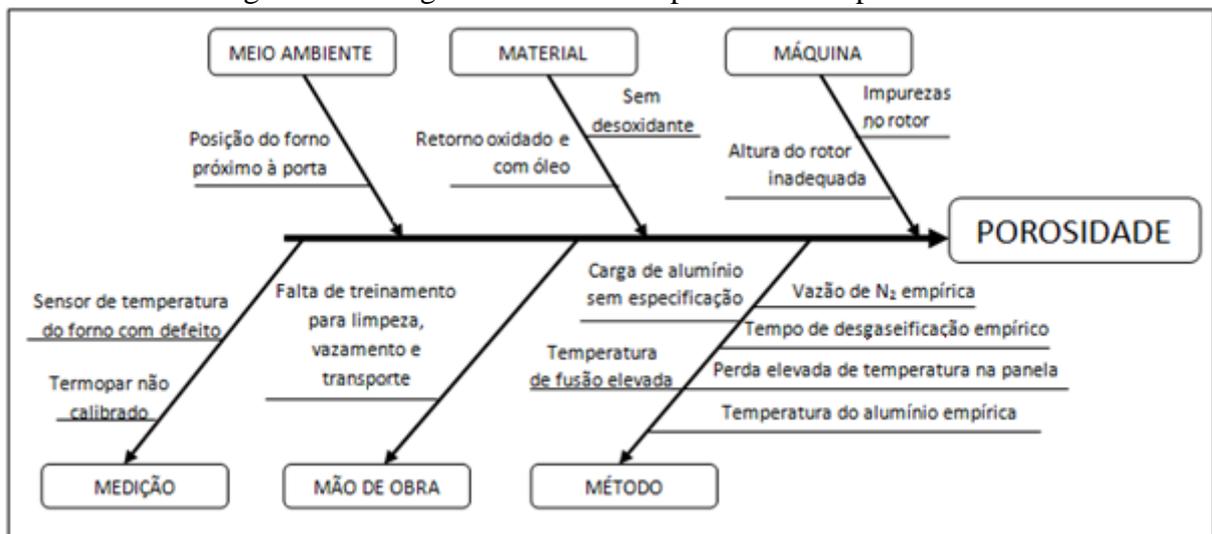
Por meio de um diagrama de Ishikawa, onde o problema é a porosidade, foram listadas as possíveis causas deste defeito, tendo como base fatores oriundos do método, material, máquina e mão de obra utilizada, o meio em que o processo de fusão ocorre e erros

provenientes de medição. A figura 16 ilustra este levantamento, considerando o processo de fusão, o processo de desgaseificação e transporte do metal líquido às injetoras.

Em relação aos fatores gerados pelo equipamento, destacaram-se as impurezas e a altura inadequada do rotor. O alumínio que solidifica no rotor após o processo de desgaseificação prende-se à estrutura e deve ser retirado.

A altura do rotor deve coincidir com a metade da altura da panela de transferência para que o nitrogênio insuflado atue em todo o banho metálico, retirando de modo eficiente o hidrogênio dissolvido e inclusões presentes no alumínio líquido.

Figura 16 – Diagrama de Ishikawa para o defeito porosidade



Fonte: Autor, 2014.

A matéria-prima também pode gerar porosidade quando apresenta contaminação por óleo, pois este contém elementos que se tornam inclusões no alumínio fundido. O uso de desoxidantes durante a fusão ou vazamento do alumínio torna-se importante para a redução de óxidos no fundido.

A curta distância entre o forno de fusão e o portão de acesso ao setor pode contribuir para a absorção de umidade pelo metal, o que causa o aumento da quantidade de hidrogênio dissolvido no alumínio.

Problemas de medição, como erros de calibração e mau funcionamento dos sensores de temperatura do forno também contribuem para a geração de porosidade, pois temperaturas elevadas contribuem para a absorção de gases pelo metal fundido.

A falta de treinamento dos colaboradores influencia negativamente para a prevenção da porosidade, pois sem treinamento não há o conhecimento das ações que evitam este

defeito. Além destes fatores, parâmetros empíricos, como a vazão de nitrogênio, tempo de desgaseificação e temperatura do alumínio no forno e na panela de transferência também favorecem o aparecimento de poros, pelo fato destes parâmetros não possuírem valores padronizados e, portanto, não existir um processo de desgaseificação adequado para redução de porosidade.

Por meio de uma matriz GUT, foram elencadas as possíveis causas em nível de gravidade do problema, urgência de solução e tendência de mudança em relação ao tempo. As possíveis causas encontradas no diagrama de Ishikawa foram inseridas na matriz, sendo que cada uma destas recebeu uma nota em função da relação que possui com os critérios estabelecidos. A relação dos critérios estabelecidos pode ser visto na tabela 7.

Tabela 7 – Relação entre nota e critério para utilização da matriz GUT

Nota	Gravidade (G)	Urgência (U)	Tendência (T)
5	extremamente grave	extremamente urgente	irá piorar imediatamente
4	muito grave	muito urgente	irá piorar rapidamente
3	grave	urgente	irá piorar a curto prazo
2	pouco grave	pouco urgente	irá piorar a longo prazo
1	não é grave	pode esperar	não irá mudar

Fonte: Autor, 2014.

Para cada possível causa, as notas atribuídas nos três critérios foram multiplicadas entre si, obtendo-se uma pontuação total para cada item. Estas informações podem ser vistas na tabela 8.

A falta de treinamento mostrou-se um fator de extrema gravidade, pois o operador tem relação direta com o processo de fusão, desgaseificação e transporte do alumínio e, portanto, com a redução da porosidade. Além disto, sem o correto treinamento do processo, o operador torna-se mais propício a acidentes de trabalho graves envolvendo alumínio líquido.

Os parâmetros de vazão do nitrogênio, tempo de desgaseificação, temperatura de fusão e temperatura na panela de transferência não possuem valores definidos, sendo extremamente urgente a definição destes para a redução do defeito de porosidade, pois há relação direta dos parâmetros com o defeito.

No processo de fusão, o uso de retorno contaminado com óleo do pistão aumenta a quantidade de inclusões e o nível de hidrogênio no alumínio fundido. Em alguns casos, além

do retorno e lingotes, são utilizados parte do alumínio que vaza acidentalmente no piso do setor durante o vazamento e transporte do metal líquido. Este alumínio contamina-se não só pelas impurezas presentes no piso, mas também pelo contato com o ar, que oxida o alumínio. Estes fatores criam uma tendência de produtos defeituosos.

Tabela 8 – Matriz GUT das possíveis causas do defeito porosidade

Possíveis causas do defeito porosidade	G	U	T	TOTAL
Vazão de N <sub>2</sub> empírica	4	5	4	80
Tempo de degaseificação empírico	4	5	4	80
Temperatura do alumínio empírica	4	5	4	80
Alta variação de temperatura na panela de transferência	4	4	4	64
Temperatura de fusão elevada	4	5	4	80
Carga de alumínio no forno fusor sem especificação	4	4	4	68
Falta de treinamento para limpeza, vazamento e transporte	5	4	4	80
Sensor de temperatura do forno com defeito	2	3	3	18
Termopar não calibrado	2	3	3	18
Posição do forno próximo à porta	4	2	4	32
Retorno oxidado e com óleo	4	4	5	80
Alumínio fundido sem desoxidante	4	2	4	32
Impurezas no rotor	3	3	2	18
Altura do rotor inadequada	3	2	3	18

Fonte: Autor, 2014.

A partir da Matriz GUT foi criada uma matriz 5W1H para solucionar o problema das causas que obtiveram uma pontuação maior ou igual a 80. Esta pontuação foi estabelecida como valor de corte na matriz, pois as demais causas listadas não obtiveram notas de extrema gravidade, extrema urgência ou de tendência imediata, ou seja, nenhuma nota 5.

Através da matriz 5W1H, apresentada na tabela 9, foi possível registrar de maneira organizada e planejada as ações de correção dos defeitos, listando quando, por quem, onde, por que e como as ações podem ser feitas.

Tabela 9 – Matriz 5W1H das possíveis causas do defeito porosidade

CAUSAS	O QUÊ	POR QUÊ	ONDE	QUEM	QUANDO	COMO
FALTA DE TREINAMENTO	Realizar treinamento para implementação do processo de desgaseificação	Padronizar o processo de desgaseificação, reduzindo as causas que geram porosidade	Sala de treinamento	Willian	Junho de 2014	Elaborando uma instrução de trabalho a partir dos parâmetros definidos nos testes e ensaios, para posterior treinamento dos operadores
VAZÃO DE N <sub>2</sub> EMPÍRICA	Definir o valor ideal de vazão do nitrogênio utilizado no processo de desgaseificação	Encontrar um valor de vazão ideal que reduza a quantidade de porosidade no fundido	Panela de transferência	Willian	Mai de 2014	Variando a vazão de nitrogênio e coletar amostras com diferentes valores, avaliando os resultados através da análise das amostras
TEMPO DE DESGASEIFICAÇÃO EMPÍRICO	Definir o tempo de desgaseificação ideal utilizado no processo de desgaseificação	Encontrar um valor de vazão ideal que reduza a quantidade de porosidade no fundido	Panela de transferência	Willian	Mai de 2014	Variando o tempo de desgaseificação e coletar amostras com diferentes valores, avaliando os resultados através da análise das amostras
TEMPERATURA DO ALUMÍNIO EMPÍRICA	Definir a temperatura ideal do alumínio na panela de transferência durante o processo de desgaseificação	Encontrar um valor de vazão ideal que reduza a quantidade de porosidade no fundido	Panela de transferência e forno fusor	Willian	Mai de 2014	Variando o tempo de desgaseificação e coletar amostras com diferentes valores, avaliando os resultados através da análise das amostras
RETORNO OXIDADO E COM ÓLEO	Selecionar uma matéria-prima sem impurezas para o processo de fusão do alumínio	Evitar a contaminação por óleo ou óxidos agentes de porosidade	Área de estoque de matéria-prima	Willian	Abril de 2014	Mantendo os lingotes de SAE 306 protegidos e em local adequado, separando o retorno sem contaminação por óleo ou graxa do retorno adequado

Fonte: Autor, 2014.

### 3.4 METODOLOGIA DE EXPERIMENTOS

#### 3.4.1 Planejamento de Experimentos

Durante o estudo do efeito das variações de parâmetros em um processo, deve-se previamente realizar um planejamento de experimentos adequado ao tipo de estudo. Deste modo, define-se o número de amostras e corpos de prova necessários para os ensaios, assim como a de réplicas para a execução da tarefa, sem que sejam confeccionadas amostras e corpos de prova em quantidades elevadas ou insuficientes.

O planejamento experimental depende da quantidade de variáveis envolvidas nos experimentos. No caso deste estudo, as variáveis escolhidas para posteriormente serem analisadas para o processo de desgaseificação com nitrogênio na panela de transferência foram: o tempo de borbulhamento, a vazão de nitrogênio e a temperatura do banho fundido.

O planejamento experimental escolhido foi o planejamento fatorial  $2^3$ , onde cada uma das três variáveis assumem dois valores distintos, ou dois níveis. A combinação das variáveis e níveis gerou oito amostras diferentes.

#### 3.4.2 Definição dos Parâmetros

A tabela 10 informa os níveis dos parâmetros selecionados, escolhidos de acordo com o indicado na bibliografia estudada.

Tabela 10 – Níveis dos parâmetros variados durante a coleta de amostras

Variáveis	Valor mínimo	Valor máximo
Tempo de Desgaseificação $t$	7 min	14 min
Vazão de Nitrogênio $v$	15 l/min	25 l/min
Temperatura do alumínio na panela de transferência $T$	600 °C	650 °C

Fonte: Autor, 2014.

Segundo Dispinar (2006) e Menegon (2012), o tempo de desgaseificação depende da liga de alumínio e da quantidade de hidrogênio que a liga possua. Geralmente, o tempo varia entre 5 a 10 minutos para cada 300 kg de alumínio em situações onde não há contaminação em excesso. Todavia, a panela de transferência da empresa possui capacidade de 500 kg, além do fato de que a carga utilizada na empresa para fusão do alumínio SAE 306 apresenta altos

níveis de impurezas, como óxidos e hidrogênio. Portanto, um tempo maior em comparação à literatura foi definido, sendo tais valores 7 e 14 minutos.

Segundo Orchan (1994), a temperatura do banho fundido durante o processo de desgaseificação não deve ultrapassar o valor de 660 °C, pois a solubilidade do hidrogênio no alumínio fundido cresce exponencialmente como indicado na figura 6. Porém, a temperatura deve ser maior que a temperatura de fusão da liga, ou seja, 580 °C como indicado na tabela 3. Foram adotadas deste modo temperaturas de 600 °C e 650 °C para os ensaios.

Segundo Dispinar (2006), para um correto funcionamento do processo de desgaseificação, a vazão de nitrogênio deve variar de 15 a 25 l/min, o que proporciona uma interação satisfatória entre o nitrogênio insuflado e o hidrogênio presente no alumínio.

Para a realização dos testes de variação de parâmetros, primeiramente foi definido um local para o processo de desgaseificação, sendo escolhida a área disponível ao lado do forno fusor. O mesmo local foi escolhido para armazenar o equipamento de desgaseificação quando este não for utilizado. O regulador do cilindro de nitrogênio foi utilizado como instrumento de medição da vazão. Um cronômetro foi utilizado para a contagem dos minutos. Para mensurar o valor de temperatura do banho metálico durante o processo de desgaseificação, foi utilizado um termopar digital.

A tabela 11 mostra a identificação das amostras obtidas, utilizando-se os parâmetros da tabela 6, com todas as possíveis combinações destes parâmetros. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

Tabela 11 – Identificação das amostras de acordo com os parâmetros escolhidos

Identificação da Amostra	Tempo de Desgaseificação $t$ (min)	Temperatura do Banho Fundido $T$ (°C)	Vazão de Nitrogênio $v$ (l/min)
A	7	600	15
B	7	600	25
C	7	650	15
D	7	650	25
E	14	600	15
F	14	600	25
G	14	650	15
H	14	650	25

Fonte: Autor, 2014.

### 3.4.3 Comportamento da Temperatura X Tempo de Desgaseificação

O processo de desgaseificação ocorre na panela de transferência, cuja parede refratária não é suficiente para manter a temperatura constante ao longo do tempo. Portanto, tornou-se necessário um estudo do comportamento da temperatura do alumínio submetido à desgaseificação durante o processo, a fim de prever através de uma equação em qual momento a temperatura terá os valores definidos na tabela 10.

A tabela 12 apresenta três coletas de temperatura realizadas com diferentes temperaturas iniciais de vazamento. O comportamento da temperatura em forma de gráfico pode ser visto na figura 17.

Tabela 12 – Coleta de temperaturas do alumínio durante processo de desgaseificação

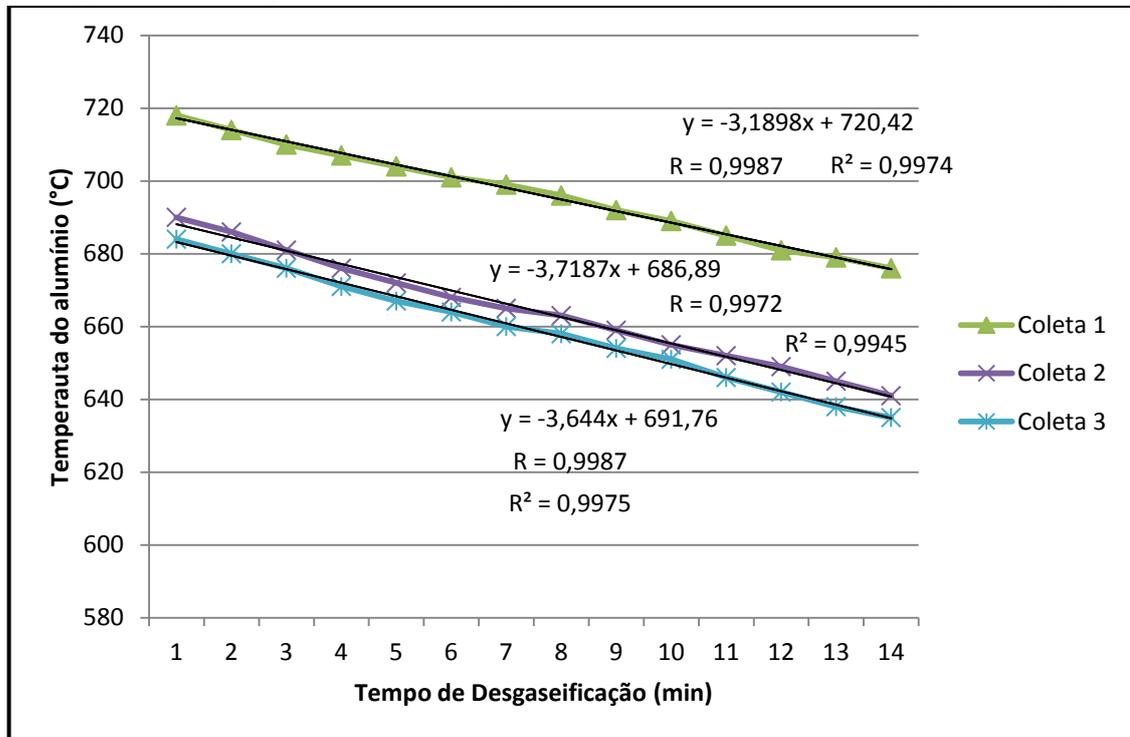
Tempo de Desgaseificação (min)	Coleta de temperatura 1 (°C)	Coleta de temperatura 2 (°C)	Coleta de temperatura 3 (°C)
1	718	690	684
2	714	686	680
3	710	681	676
4	707	676	671
5	704	672	667
6	701	668	664
7	699	665	660
8	696	663	658
9	692	659	654
10	689	655	651
11	685	652	646
12	681	649	642
13	679	645	638
14	676	641	635

Fonte: Autor, 2014.

As equações da reta foram encontradas através da linha de tendência de cada gráfico e os valores apresentados representam, respectivamente, a taxa de variação da temperatura em função do tempo de desgaseificação e a temperatura de vazamento, ou seja, a temperatura instantes antes de iniciar-se o processo de desgaseificação. A diferença entre a temperatura da equação e da temperatura descrita como inicial na tabela 12 dá-se pelo fato de haver pequena perda de calor entre o vazamento do alumínio e início do processo.

Os três gráficos apresentam similaridades entre si, pois apresentam comportamento linear e possuem taxas de variação de temperatura em função do tempo próximas, como observado nas equações da reta.

Figura 17 – Comportamento da temperatura do alumínio durante desgaseificação



Fonte: Autor, 2014.

Foi definida uma taxa média de variação da temperatura calculando-se a média dos valores das equações de cada coleta, cujo valor está apresentado na tabela 13.

Tabela 13 – Média das taxas de variação da temperatura do banho metálico

Ordem das Coletas de Temperatura	Taxa de Variação da Temperatura (° C/min)
1	-3,1898
2	-3,7187
3	-3,644
<b>MÉDIA</b>	<b>-3,518</b>

Fonte: Autor, 2014.

Conhecendo-se a taxa média de variação, foi possível estipular um comportamento médio da temperatura durante a desgaseificação através da equação 3.1, onde  $T_f$  representa a temperatura final após decorrido o tempo de desgaseificação (em graus centígrados),  $t$  representa o valor do tempo decorrido durante a desgaseificação (em minutos) e  $T_i$  representa

o valor da temperatura inicial de vazamento do forno fusor para a panela de transferência (em graus centígrados). A equação pode ser ajustada de forma a facilitar o cálculo da temperatura inicial  $T_i$ , razão deste estudo do comportamento da temperatura, conforme a equação 3.2.

$$T_f = -3,51 t + T_i \quad (3.1)$$

$$T_i = T_f + 3,51 t \quad (3.2)$$

Sabendo-se que as temperaturas finais  $T_f$  desejáveis são 600 °C e 650 °C, é possível calcular a temperatura inicial  $T_i$  para cada um dos casos, cujos resultados encontram-se na tabela 14. Desta forma, foi possível prever a temperatura final desejável com base na temperatura de fusão.

Tabela 14 – Valores de temperatura inicial  $T_i$  para cada combinação de parâmetros

Tempo de Desgaseificação $t$ (min)	Temperatura Final de Desgaseificação $T_f$ (°C)	Temperatura de Vazamento Inicial Prevista no Forno Fusor $T_i$ (°C)
7	600	$T_i = 600 - 3,5(7) = \mathbf{624,5}$
7	650	$T_i = 650 - 3,5(7) = \mathbf{674,5}$
14	600	$T_i = 600 - 3,5(14) = \mathbf{649}$
14	650	$T_i = 650 - 3,5(14) = \mathbf{699}$

Fonte: Autor, 2014.

### 3.5 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DAS AMOSTRAS

#### 3.5.1 Avaliação Qualitativa

As amostras foram vazadas em cadinhos padronizados pré-aquecidos e solidificadas através do ensaio Strauber-Pfeiffer, cujo equipamento está apresentado na figura 18. Segundo Oliveira (2010), é essencial que as amostras sejam preparadas em condições idênticas de pressão e a taxas de solidificação semelhantes para que os testes sejam válidos. Tan (2011) sugere que o valor de pressão esteja entre 50 mbar e 200 mbar, pois valores fora deste intervalo resultam em migração do hidrogênio para a superfície da amostra ou insuficientes condições para a expansão dos poros. Um valor constante de 100 mbar mostrou-se satisfatório na literatura, portanto, sendo este valor adotado nos testes deste estudo.

As amostras foram coletadas seguindo uma ordem aleatória, ou seja, não foram coletadas na sequência em que foram apresentadas na tabela 11, a fim de evitar erros

sistemáticos oriundos do processo de desgaseificação ou fusão, que por ventura alterariam ou mascarariam os resultados.

Figura 18 – Equipamento utilizado no Ensaio Straube-Pfeiffer



Fonte: Autor, 2014

As amostras solidificadas foram seccionadas na região central, no sentido longitudinal, obtendo-se duas partes similares, cujas superfícies internas foram comparadas visualmente. A secção foi feita com o auxílio de um fluído refrigerante, pois o corte das amostras sem fluído poderia deformar a superfície interna da amostra e ocultar possíveis poros. O objetivo da comparação é avaliar de modo qualitativo o nível de macroporosidade da região central interna das amostras, onde o hidrogênio localiza-se ao final da solidificação. Deste modo, mantiveram-se apenas as combinações de parâmetros que obtiveram um maior nível de eficiência reduzindo ou eliminando o defeito porosidade, descartando os demais valores testados.

### 3.5.2 Análise por Microscópio Óptico

Das amostras analisadas visualmente, foram selecionadas as duas melhores em nível qualitativo, sendo necessária uma análise em microscópio óptico para uma avaliação mais abalizada dos defeitos encontrados. As amostras selecionadas foram preparadas através de lixamento e polimento, sendo posteriormente submetidas ao microscópio. O objetivo é

comparar as imagens microscópicas avaliando o formato dos vazios presentes nas amostras e classificando-os de maneira adequada quanto às características dos defeitos.

### **3.5.3 Ensaio MEV/EDS**

A amostra que apresentou a superfície com menor quantidade de defeitos, comparada às demais na análise por microscópio óptico, foi submetida ao ensaio MEV/EDS.

Com o intuito de identificar possíveis agentes auxiliares na nucleação da porosidade, como óxidos de alumínio e óxidos de cobre por exemplo, foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raio X (EDS). Sendo identificada a presença de tais óxidos, torna-se possível determinar outras formas de remoção como a desoxidação do banho, por exemplo. A amostra utilizada no ensaio MEV/EDS foi retirada da região central das amostras analisadas em microscópio óptico, recebendo posterior ataque químico com ácido fluorídrico 0,5%, com o intuito de gerar o contraste necessário para o funcionamento adequado do equipamento, assim como facilitar a análise das imagens geradas no ensaio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 AVALIAÇÃO VISUAL E QUALITATIVA

A figura 19 apresenta as amostras seccionadas obtidas através das oito combinações de parâmetros da tabela 11, sendo cada combinação realizada em triplicata.

As réplicas apresentaram similaridade entre si na maior parte dos casos. De forma geral, as amostras apresentaram redução significativa na quantidade e tamanho de vazios internos em comparação com a amostra PA.

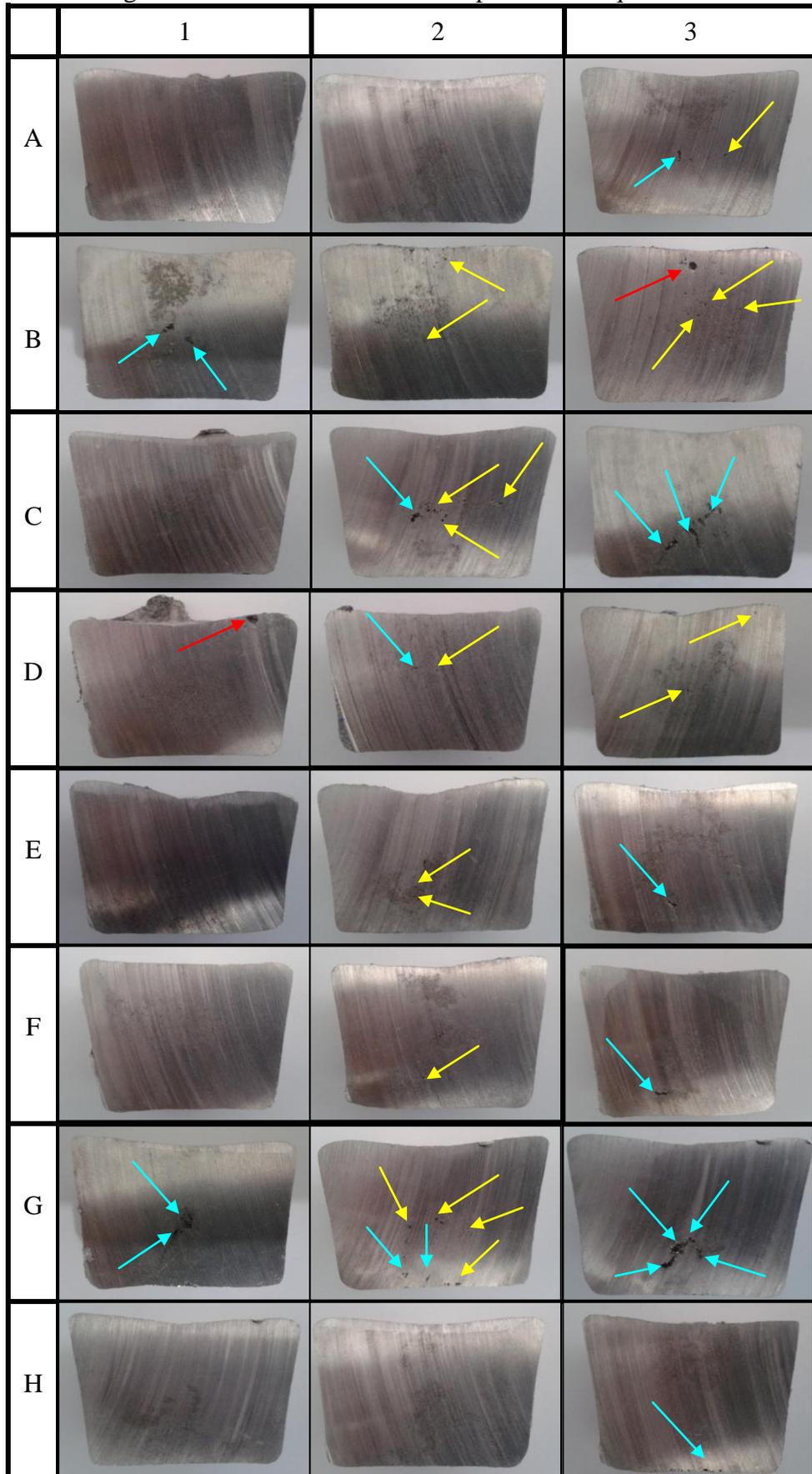
Constatou-se a presença de microporosidades e micro-rechupes, destacados na figura 19, durante avaliação visual das amostras, acompanhadas ou não de oxidação proveniente do contato com o fluido refrigerante utilizado durante o processo de corte. Duas combinações de parâmetros apresentaram bolhas de gás, também identificadas na figura 19, localizadas na região superior da amostra.

Pode-se dizer que a presença de micro-rechupes, neste caso, está relacionada à maior quantidade de gás dissolvido no metal líquido durante a solidificação deste. Há formação de dendritas secundárias durante a solidificação do metal. A fase líquida não interage com a região interdendrítica formada, gerando assim minúsculos vazios, conhecidos como micro-rechupes. As amostras que apresentaram menor incidência de microporosidade também apresentaram menor incidência de micro-rechupes.

O defeito bolha de gás ocorre quando gases são aprisionados no interior do metal líquido e permanecem durante a solidificação, localizados próximo à superfície da amostra, cuja aglomeração resulta em um vazio macroscópico esférico, ovalizado ou em forma de gota, caracterizando a bolha de gás. Pode-se dizer que no caso deste estudo, devem-se à turbulência gerada pela combinação de alta vazão de nitrogênio unido ao baixo tempo de desgaseificação. Esse fator causa aprisionamento de ar, elevando o nível de hidrogênio dissolvido no alumínio. Gases aprisionados são retirados pelo nitrogênio durante o processo de desgaseificação, todavia o curto tempo do processo não foi suficiente para a flotação e eliminação destes gases. Tal defeito pode ser observado nas amostras B e D, que foram coletadas após a desgaseificação utilizando vazão de 25 l/min e 7 min.

Devido à presença de bolhas de gás como indicado na figura 19, as amostras B e D não foram classificadas qualitativamente como adequadas, descartando-se então estas combinações de parâmetros. Também ocorreu o descarte das combinações das amostras C e

Figura 19 – Amostras seccionadas para análise qualitativa



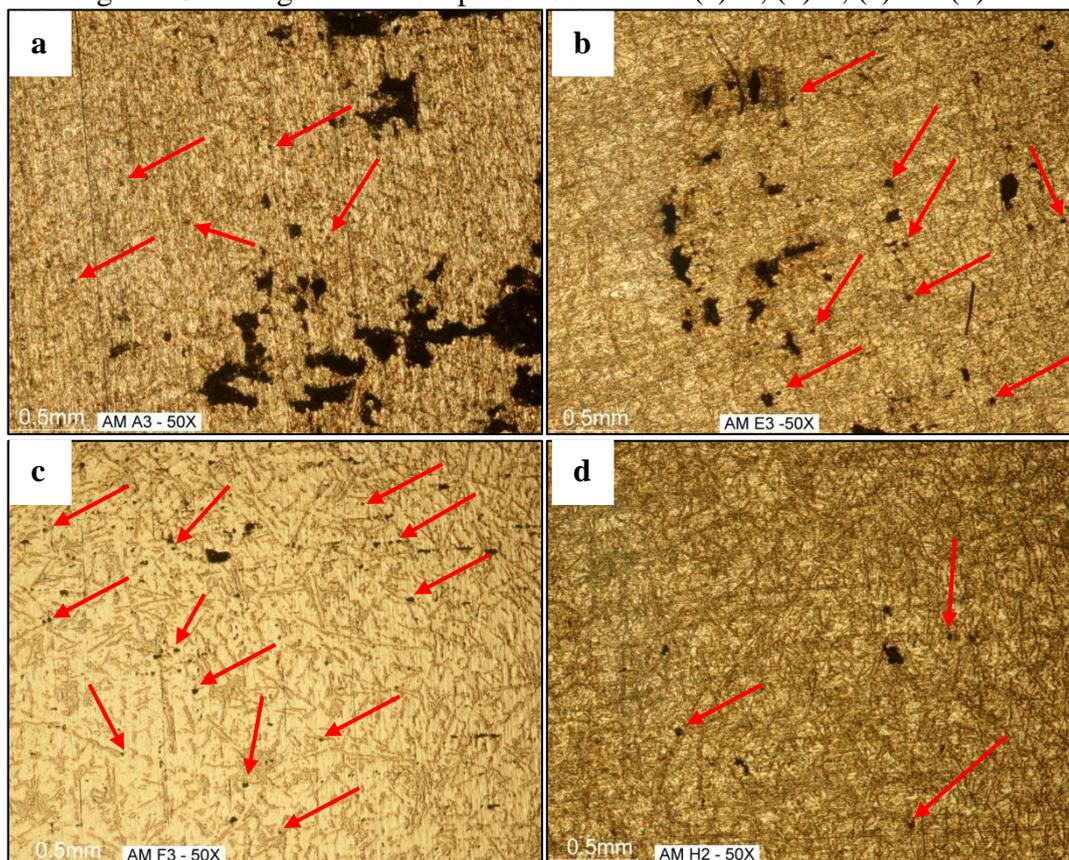
Fonte: Autor, 2014

G, devido ao maior tamanho e quantidade de micro-rechupes e microporosidades em relação às demais amostras.

Verificou-se que as amostras A, E, F e H apresentaram tamanhos e quantidades menores de micro-rechupes e microporosidades em relação às amostras anteriores. Dentre as quatro amostras restantes, o tempo de desgaseificação de 14 min e a temperatura do banho metálico de 600 °C mostraram-se como parâmetros influenciadores na redução da porosidade, pois ambos aparecem em três das quatro combinações. Porém, a união de parâmetros foi o principal responsável pela redução de poros, e não algum dos parâmetros isoladamente.

Somente com a utilização do microscópio óptico foi possível constatar que a amostra H apresentava menor índice de microporosidade, em baixíssima quantidade e tamanho. As micrografias, com ampliação de 50x, estão apresentadas na figura 20, com as microporosidades indicadas por setas.

Figura 20 – Imagem microscópica das amostras (a) A, (b) E, (c) F e (d) H



Fonte: Autor, 2014

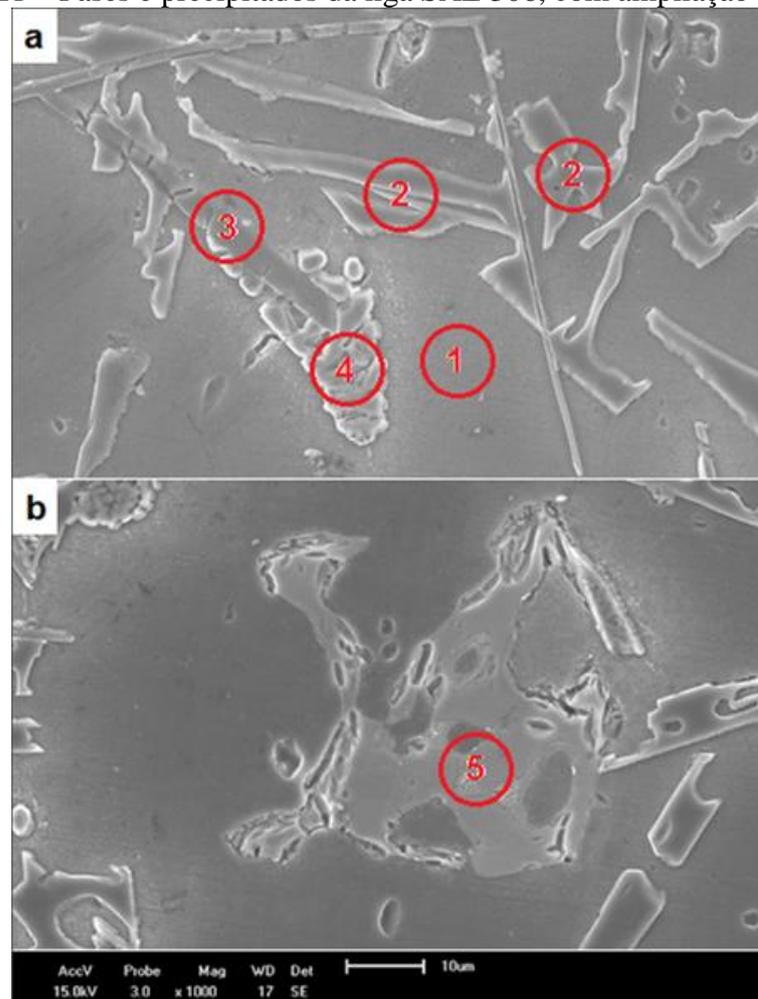
Anteriormente à coleta das micrografias, uma varredura da superfície da amostra foi realizada, com o objetivo de analisar e escolher regiões do fundido que apresentassem a maior parte possível dos defeitos encontrados na amostra. Desta forma, constatou-se que a amostra

H obteve os resultados mais eficientes na redução da quantidade de microporosidades após o processo de desgaseificação, utilizando parâmetros de 25 l/min, 14 min de desgaseificação e temperatura do alumínio a 650 °C. Na sequência, verificou-se que a amostra A obteve o segundo melhor resultado, com parâmetros de 15 l/min, 7 min de desgaseificação e alumínio a 600 °C.

#### 4.2 RESULTADO DO ENSAIO MEV/EDS

Ambas as amostras PA e H foram submetidas ao ensaio MEV/EDS, com o objetivo de avaliar a porcentagem de redução de porosidade. A figura 21 ilustra as fases e precipitados presentes nas amostras analisadas, com resolução de 1000x.

Figura 21 – Fases e precipitados da liga SAE 306, com ampliação de 1000x

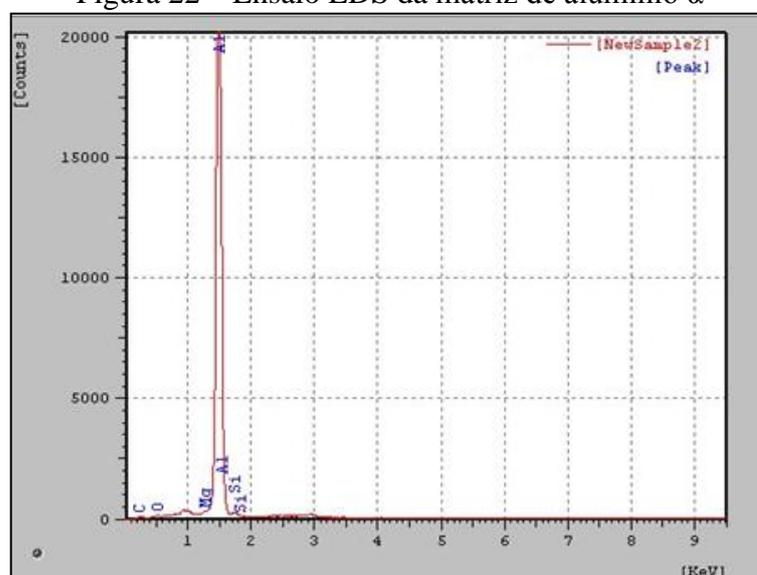


Fonte: Autor, 2014

Identificou-se na figura 21a (1) a matriz de alumínio  $\alpha$ , (2) a fase eutética AlSi, (3) a fase AlSi pré-dendrítica e (4) o precipitado  $\text{Al}_2\text{Cu}$  pós-eutético. Na figura 21b, identificou-se (5) um precipitado que difere em formato das microestruturas observadas durante a revisão bibliográfica. A figura 21 apresenta microestruturas encontradas tanto na amostra PA quanto na amostra H, pois ambas foram solidificadas de modo similar, pelo método Straube-Pfeiffer, com o cadinho pré-aquecido, a uma mesma pressão de 100 mbar.

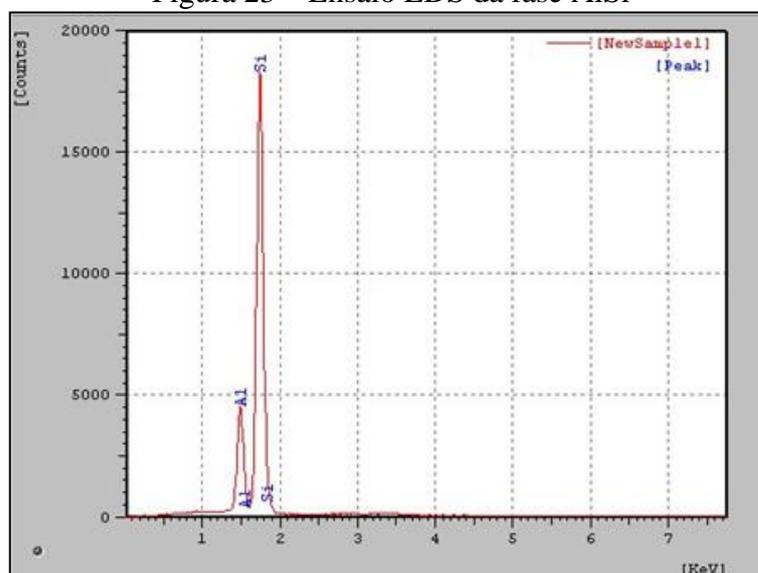
As figuras 22 e 23 apresentam o ensaio EDS para a matriz de alumínio e da fase AlSi, respectivamente.

Figura 22 – Ensaio EDS da matriz de alumínio  $\alpha$



Fonte: Autor, 2014

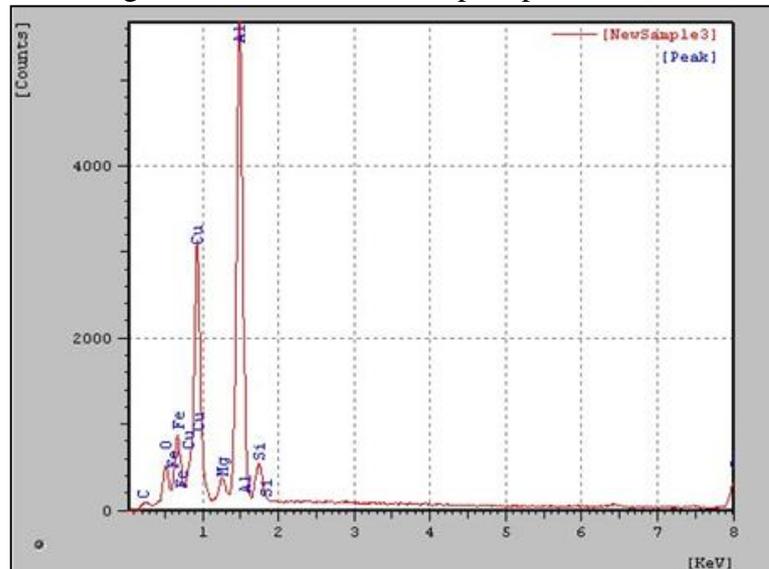
Figura 23 – Ensaio EDS da fase AlSi



Fonte: Autor, 2014

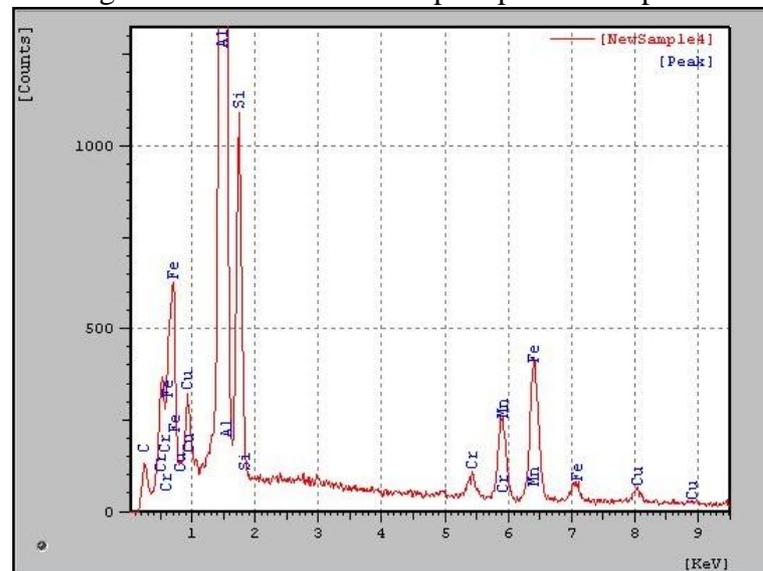
A figura 24 identifica os elementos presentes no precipitado de  $Al_2Cu$ , enquanto a figura 25 apresenta os elementos que compõem o precipitado identificado na figura 21b.

Figura 24 – Ensaio EDS do precipitado  $Al_2Cu$



Fonte: Autor, 2014

Figura 25 – Ensaio EDS do precipitado complexo

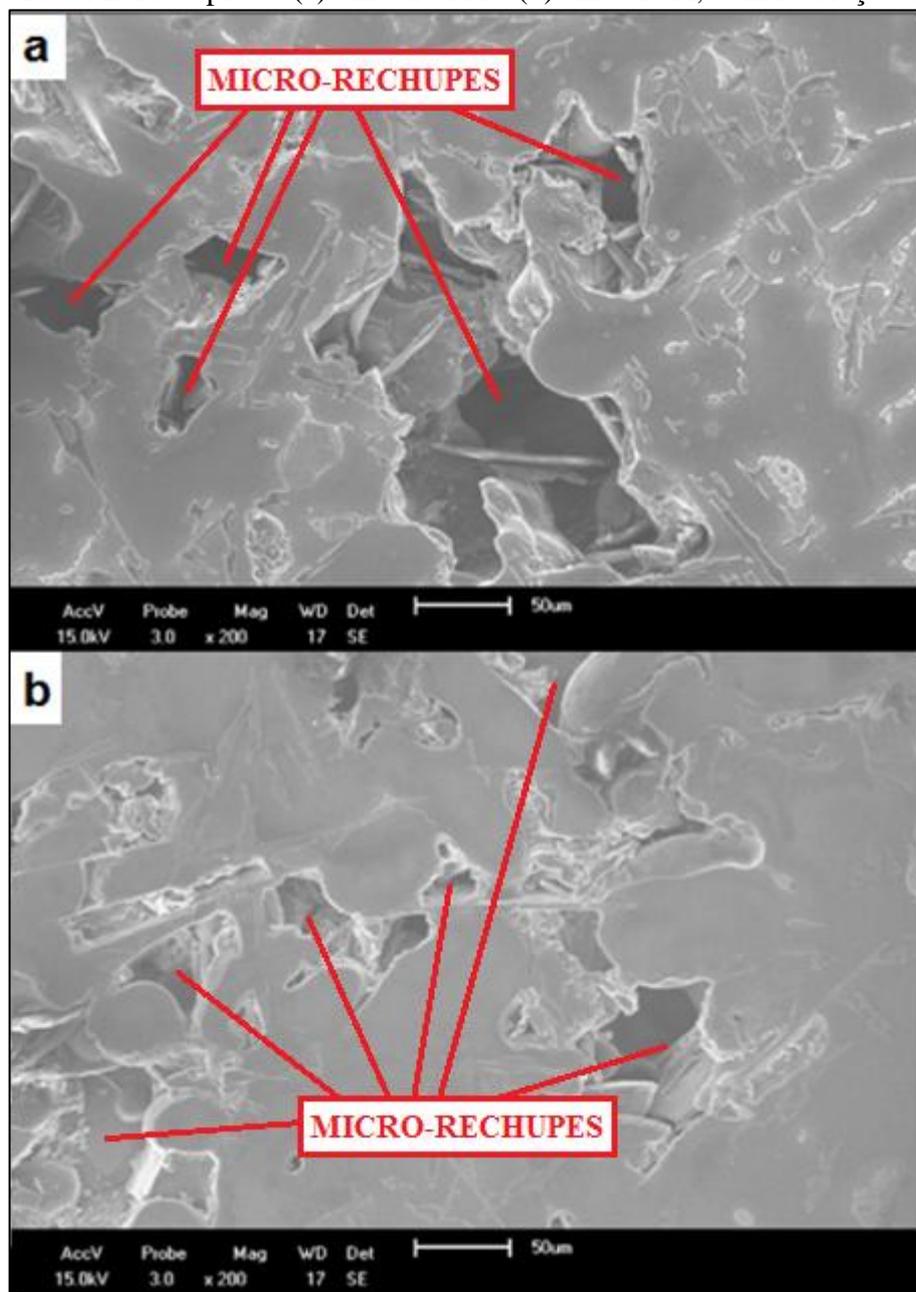


Fonte: Autor, 2014

Através do ensaio MEV foi possível comparar a quantidade de microporos presentes tanto na amostra PA como na amostra H. Primeiramente, as amostras foram comparadas em uma resolução de 200x. Com esta resolução, foram escolhidas regiões da amostra que apresentaram maior ocorrência de defeitos de micro-rechue, com o objetivo de mensurar tal defeito. Esta comparação pode ser vista da figura 26.

Observam-se micro-rechupes de aproximadamente 200  $\mu\text{m}$  na amostra PA, enquanto a amostra H apresenta micro-rechupes de dimensões de aproximadamente 100  $\mu\text{m}$ .

Figura 26 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 200x



Fonte: Autor, 2014

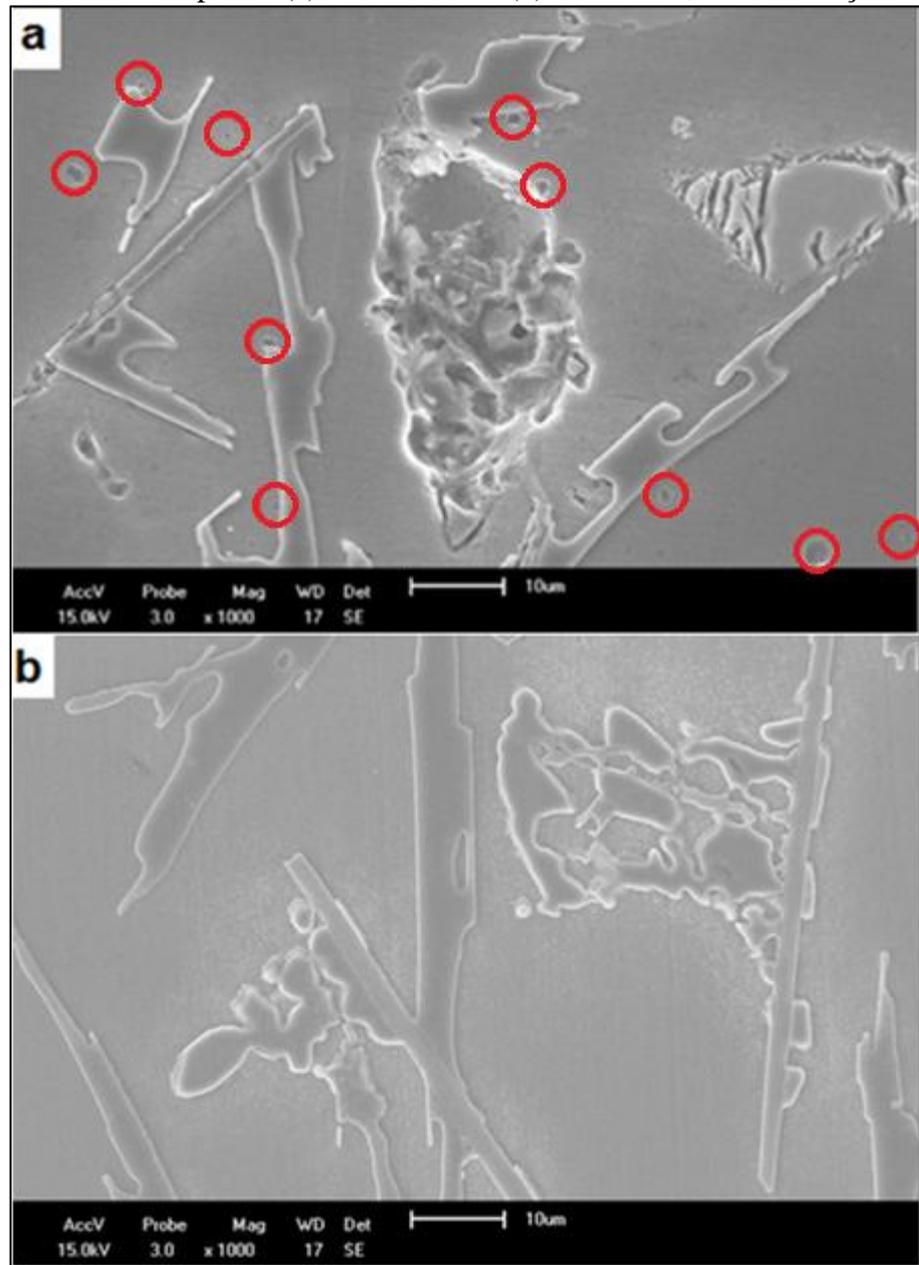
A figura 27 apresenta a imagem em microscópio com resolução de 1000x.

Observa-se elevada quantidade de microporos causadas por gás, ou seja, de aparência arredondada, na amostra PA (figura 27a), em tamanhos que variam de 4  $\mu\text{m}$  a 2,5  $\mu\text{m}$ . Estes microporos formaram-se nos arredores das fases AlSi. Além da grande quantidade de microporosidade, a imagem também se caracteriza pela presença de um vazio com dimensões

de aproximadamente 45  $\mu\text{m}$  por 25  $\mu\text{m}$  no centro da figura. Este vazio apresenta-se como uma combinação dos três defeitos encontrados: bolha de gás, microporosidade e micro-rechufe.

A amostra H (figura 27b) não apresenta nenhum microporo nesta resolução escolhida.

Figura 27 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 1000x



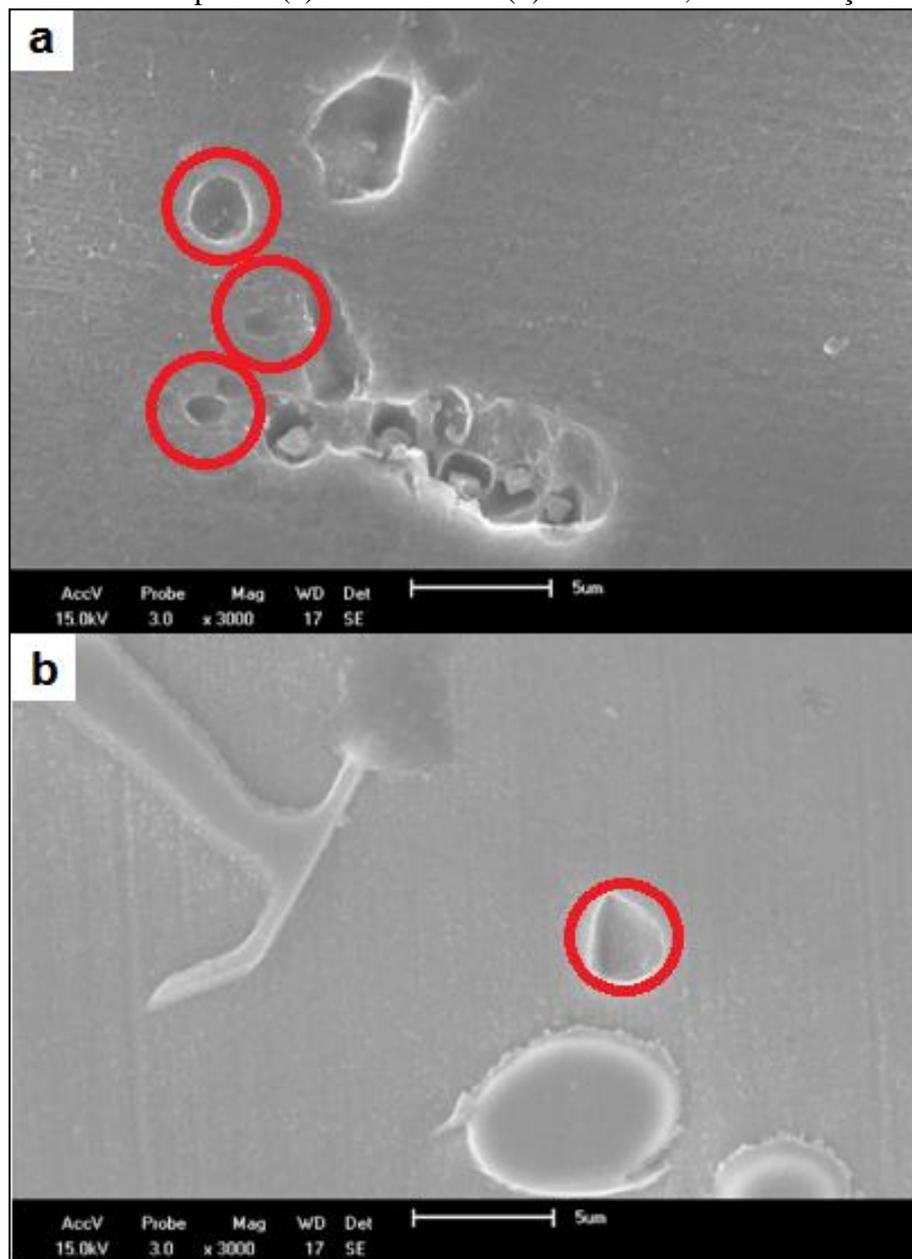
Fonte: Autor, 2014

Na análise da microscopia com resolução de 3000x da amostra PA (figura 28a) percebeu-se a presença de três defeitos: um micro-rechufe combinado com microporosidade,

de aproximadamente 5  $\mu\text{m}$ , uma bolha de gás de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$  e três microporos causados por hidrogênio (destacados na figura), com aproximadamente 2,5  $\mu\text{m}$  cada.

A amostra H (figura 28b) apresentou um microporo causado por hidrogênio, com dimensões de aproximadamente 3  $\mu\text{m}$ . Nesta resolução, pode-se diferenciar a microporosidade de fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$ , tendo a microporosidade uma superfície interna levemente irregular, enquanto a fase  $\text{Al}_2\text{Cu}$  apresenta superfície lisa e regular, em forma de relevo.

Figura 28 – Microscopia da (a) amostra PA e (b) amostra H, com resolução de 3000x



Fonte: Autor, 2014

As regiões escolhidas para análise na figura 28 pertence à região central das amostras, onde ocorreu presença de microporosidade, de forma que fosse possível a avaliação da amostra no que tange o nível de poros.

#### 4.3 ELABORAÇÃO DAS INSTRUÇÕES DE TRABALHO

Conhecendo-se os parâmetros do processo de desgaseificação, os equipamentos e os locais adequados para a realização de tal processo, foi possível elaborar uma instrução de trabalho (apêndice A) de forma a padronizar o processo de desgaseificação por nitrogênio com rotor giratório que reduza ou elimine a quantidade de porosidade causada por hidrogênio nos fundidos da empresa Metal Aço Indústria Metalúrgica LTDA.

Conhecendo-se a temperatura ideal do alumínio na panela de transferência, a vazão ideal de nitrogênio e o tempo ideal de desgaseificação, foi possível indicar a temperatura ideal de fusão, com base no estudo de comportamento da temperatura do alumínio durante o processo de desgaseificação. Através das referências bibliográficas e da coleta de informações sobre a situação anterior à implantação de processo de desgaseificação, foi possível elaborar uma instrução de trabalho (apêndice B) do processo de fusão, indicando a matéria-prima a ser utilizada, bem como os parâmetros adequados.

A matéria-prima foi definida como livre de contaminação por óleos ou graxas, pois estes aumentam o nível de impurezas no metal fundido. A umidade também deve ser evitada, pois esta aumenta o nível de hidrogênio dissolvido no alumínio. O hidrogênio é oriundo do vapor d'água do ar, e a proteção dos lingotes contra o contato com o ar deve ser priorizada. Quanto à carga, foi definida a porcentagem de 50% para lingote e 50% para retorno, pois a empresa reutiliza o retorno proveniente dos refugos gerados.

Ambas as instruções de trabalho foram formatadas segundo padrão e normas adotados pela empresa.

A elaboração de tais instruções de trabalho torna-se útil não apenas para a padronização dos processos, mas também para futuro treinamento dos colaboradores envolvidos, pois o treinamento correto e práticas adequadas fazem-se necessários para garantir o objetivo de eliminar a porosidade dos fundidos produzidos pela empresa.

## 5 CONCLUSÃO

Observando-se os resultados das análises qualitativa e quantitativa, concluiu-se que a desgaseificação por nitrogênio com rotor giratório atingiu o objetivo de redução do defeito porosidade na liga de alumínio utilizada pela empresa. Entretanto, a eficácia de cada combinação de parâmetros no que tange a redução de porosidade apresentou diferentes níveis entre as amostras.

Obteve-se o melhor resultado na união de um alto valor de vazão com um alto valor de tempo de desgaseificação, Observou-se que o melhor valor para a vazão de nitrogênio é de 25 l/min, o tempo de desgaseificação é de 14 min e a temperatura do alumínio na panela de transferência é de 650 °C. Porém, a temperatura do banho mostrou-se como parâmetro secundário nesta combinação, quanto a influência na redução de poros. Sendo tais valores avaliados como ideais, constatou-se que a temperatura de fusão ideal deve ser de aproximadamente 700 °C como demonstrado pelo estudo do comportamento da temperatura do fundido durante a desgaseificação, para que o alumínio tenha uma temperatura próxima de 650 °C aos 14 minutos de desgaseificação.

Através das análises microscópicas, foi possível concluir que a amostra H apresentou quantidades reduzidas de microporosidade em relação à amostra PA, com dimensões de poros na ordem de aproximadamente 3 µm. Através da análise qualitativa da amostra H, observou-se a eliminação da macroporosidade. Na micrografia da amostra H, com ampliação de 1000x, observou-se ausência de microporos na região analisada, enquanto a amostra PA apresentou no mínimo dez microporos na região avaliada. Na análise da micrografia da amostra H, com ampliação de 3000x, foi possível verificar a presença de apenas um microporo, enquanto a amostra PA apresentou três microporos. Portanto, pode-se afirmar que houve uma redução considerável da presença de porosidade através dos parâmetros utilizados durante coleta da amostra H.

Com a correção dos parâmetros atuais de fusão, foi possível padronizar os parâmetros de fusão, desgaseificação e matéria-prima para produção de fundidos com quantidade de porosidade reduzida. Foram elaboradas instruções de trabalho, do processo de fusão e do processo de desgaseificação da liga SAE 306 para futuro treinamento dos colaboradores da empresa, fator essencial para o sucesso do processo após a implantação.

Como sugestão de trabalhos futuros, um software analisador de imagens pode ser utilizado no auxílio da análise dos defeitos encontrados no fundido. Desta forma, é possível quantificar a porosidade, analisando o formato e dimensões do defeito. As amostras podem ser avaliadas estatisticamente, considerando-se os resultados do software, de modo a verificar a influência dos parâmetros de cada combinação em termos de porcentagem, assim como a influência de possíveis erros sistemáticos.

Pode-se realizar a secção das amostras em diversas fatias longitudinais, com o intuito de analisar a ocorrência dos defeitos em diferentes distâncias em relação à região central do fundido.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. São Paulo, 2007, 35 p.
- ASM Handbook. Vol 15. **Casting**. ASM International, Materials Park, OH, 1998. 1991 p.
- ASM International. **Aluminum and aluminum alloys**. Editado por Joseph R. Davis. Materials Park, OH: ASM International, 1993.
- ASTM Standard. **ASTM B85**. Standard Specification for Aluminum-Alloy Die Castings. West Conshohocken, PA. 2010, 3 p.
- CAMPBELL, J.; HARDING, Richard A. **The Liquid Metal**. TALAT – Training in Aluminium Application Technologies. Birmingham, 1994.
- 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 A. L. **Metalurgia das ligas de alumínio e tratamento no metal líquido**. Itáúna: SENAI MG, 2001. 122 p.
- DE MOURA, Carlos F. A. **Implementação da Liga SAE 306 Para Redução de Custo na Injeção de Alumínio**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2006. 50 p.
- DEMEC - Departamento de Engenharia Mecânica. **Fundição sob pressão**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007. 15 p. Disponível em <<ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM233/Press%20o/Introdu%20o%20FUNDI%20C30%20SOB%20PRESS%20C30.pdf>> Acesso em 3 out. 2013.
- DISPINAR, Derya. **Determination of Metal Quality of Aluminium and Its Alloys**. Trabalho de Conclusão do Curso da Universidade de Birmingham, 2005.
- FREGULIA, J.; GAVRONSKI, I. **Otimização do Processo de Abastecimento de Células Injetoras, de Fundição Sob Pressão, com Alumínio Líquido**. Curso de Gestão da Produção do Centro Universitário FEEVALE. 2006. Disponível em <<http://ged.feevale.br/bibvirtual/Artigo/ArtigoJoarezFregulia.pdf>> Acesso em 3 out. 2013.
- FUOCO, R.; MOREIRA, Marcelo F. **Ligas de Alumínio Fundidas**. 2005. Disponível em <<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/aluminiofund.pdf>> Acesso em 4 out. 2013
- FONSECA, Mario T. **Teoria Fundamental do Processo de Fundição Sob Pressão**. SENAI-DR, Itáúna, Minas Gerais, 2001.
- GOMES, Mario R.; FILHO, Ettore B. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. ABM: Associação Brasileira de Metais, São Paulo, Édile Serviços Gráficos e Editora LTDA, 1976. 280 p.

GOWRI S.; SAMUEL F.H.. **Effect of Alloying Elements on the Solidification Characteristics and Microstructure of Al-Si-Cu-Mg-Fe 380 Alloy**. Metallurgical and Materials Transactions A Volume 25a, Quebec, Canadá, 1994.

KLEINE, A.; GARTHOFF, C.; PRIES, H; DELLEMANN, J; HOFFMANN, F.  
**Caracterização das Propriedades da Liga EN AC-ALSi9Cu3(Fe) para Fundição Sob Pressão**. Traduzido por Themistocles Rodrigues Júnior. Revista Fundição e Serviços, Aranda Editora, nº252, dezembro 2013, p. 52-61.

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

MELO, Mírian L. N. M. M. **Análise Numérico/Experimental da Formação de Microporosidades Durante a Solidificação de Ligas de Alumínio**. Tese de doutorado do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, 1996.

MENEGON, Danusa R. **Estudo da Eficiência da Gaseificação e desoxidação com Nitrogênio na Fusão de Ligas de Alumínio SAE 305**. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Química da Universidade de Caxias do Sul, 2012.

NADCA - North American Die Casting Association. **FAQ – About Die Casting**. Illinois, 2012. Disponível em <<http://www.diecasting.org/faq/>> Acesso em 31 ago. 2013.

OLIVEIRA, André F. **Redução Controlada do Teor de Hidrogênio em Ligas de Alumínio**. Dissertação de Mestrado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

ORCHAN, Wittaya. **Quantification of the Reduced Pressure Test**. Trabalho de Conclusão do Curso de Mineração e Engenharia Metalúrgica do Canadá, 1994.

SAMUEL, A. M.; SAMUEL, F. H. **Effect of alloying elements and dendrite arm spacing on the microstructure and hardness of an Al-Si-Cu-Mg-Fe-Mn (380) aluminium die-casting alloy**. Journal Of Materials Science 30, Quebec, Canadá, 1995.

SIMON, R.; FRÖSCHER, A.; KENDRICK, R.; EVANS, P.  
**Influência do Projeto do Rotor Sobre a Desgaseificação de Banhos Fundidos de Al**. Traduzido por Themistocles Rodrigues Júnior. Revista Fundição e Serviços, Aranda Editora, nº243, março 2013, p. 44-50.

TAN, E; TARAKCILAR, A. R.; DIŞPINAR, D.; ÇOLAK, M; KAYIKC, R. **Reproducibility of Reduced Pressure Test Results in Testing of Liquid Aluminum Gas Levels**. 6th International Advanced Technologies Symposium, Turquia, 2011.

TORRE, J. **Manual Prático de Fundição**. Traduzido de Manual Moderno de Fundicion. Editora Hemus, São Paulo, 2004. 243 p.

TSOUKALAS, V.D. **Optimization of porosity formation in AlSi9Cu3 pressure die castings using genetic algorithm analysis**. Materials and Design Atenas, Grécia, 2008.

VIANA, Denilson J. **Aplicação do Método de Taguchi para Redução de Porosidade de Peças Fundidas Sob Pressão.** Dissertação do Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, São Paulo, 2012.

WANG, L.; TURNLEY, P.; SAVAGE, G. **Gas content in high pressure die castings.** Journal of Materials Processing Technology 211, Australia, 2011.

## APÊNDICE A – INSTRUÇÃO DE TRABALHO DO PROCESSO DE FUSÃO

	<b>INSTRUÇÃO DE TRABALHO</b>	CÓDIGO: <b>IT00001</b>	DATA DE EMISSÃO: <b>03/06/14</b>
<b>TÍTULO: PROCESSO DE FUSÃO DA LIGA SAE 306</b>		REVISÃO: <b>0</b>	PÁGINA: <b>1 de 4</b>
	<p>1. OBJETIVO</p>		
<p>Este documento tem por objetivo instruir e orientar os colaboradores ligados ao processo de fundição do alumínio quanto à seleção da carga metálica, fusão e vazamento, padronizando o processo de fusão.</p>			
<p>2. ABRANGÊNCIA</p>			
<p>Esta instrução de trabalho se aplica aos colaboradores do setor de injetoras da empresa.</p>			
<p>3. RECURSOS</p>			
<p>Para o processo de fusão, é necessário: matéria-prima selecionada e termômetro digital, além do forno fusor.</p>			
<p>4. SEGURANÇA</p>			
<p>Para evitar acidentes, o transporte do equipamento deve ser feito pelo colaborador que estiver apto ao manuseio da talha. O processo deve ser realizado nos locais adequados, seguindo a ordem das instruções.</p>			
EMITENTE: <b>WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO</b>		APROVADOR: <b>RONALD ELY</b>	



## INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00001

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

**TÍTULO: PROCESSO DE FUSÃO DA LIGA SAE  
306**

REVISÃO:

0

PÁGINA:

2 de 4

### 5. INSTRUÇÕES

- 1) Retirar o plástico que cobre os lingotes de alumínio da liga SAE 306. Selecionar a quantidade de lingotes adequada para preencher todo o volume da cesta do forno fusor;



- 2) Selecionar somente retorno limpo, sem óleo ou graxa. Nunca utilizar o alumínio descartado, como sobras e respingos do chão.



EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY



## INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00001

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

### TÍTULO: PROCESSO DE FUSÃO DA LIGA SAE 306

REVISÃO:

0

PÁGINA:

3 de 4

- 3) Colocar o retorno limpo proveniente de peças sucateadas e canais de alimentação para preencher todo o volume da cesta do forno fusor;
- 4) Depositar no cesto os lingotes e o retorno na proporção de 50% (cinquenta por cento) cada um. Acionar o botão de elevação do cesto de carga do forno fusor;
- 5) Em potência máxima, fundir a carga sólida presente no interior do fundido;
- 6) Medir a temperatura com o termômetro digital, inserindo-o no banho fundido como mostra a imagem abaixo;



- 7) Aguardar a temperatura estabilizar no visor do termômetro;

EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY



## INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00001

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

### TÍTULO: PROCESSO DE FUSÃO DA LIGA SAE 306

REVISÃO:

0

PÁGINA:

4 de 4

- 8) Se a temperatura for menor que 700 °C, aumentar a temperatura do forno até que esta alcance 700 °C ( $\pm 10$ ), medindo a temperatura novamente;
- 9) Vazar o alumínio para a panela de transferência após confirmar o valor de temperatura como 700 °c ( $\pm 10$ ).



EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY

## APÊNDICE B – INSTRUÇÃO DE TRABALHO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO



### INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00002

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

### TÍTULO: PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO DA LIGA SAE 306

REVISÃO:

0

PÁGINA:

1 de 5

#### 1. OBJETIVO

Este documento tem por objetivo instruir e orientar os colaboradores ligados ao processo de fundição de alumínio quanto ao processo de degaseificação por nitrogênio, padronizando o processo.

#### 2. ABRANGÊNCIA

Esta instrução de trabalho se aplica aos colaboradores do setor de injetoras da empresa.

#### 3. RECURSOS

Para o processo de degaseificação, é utilizado o equipamento de degaseificação, nitrogênio gasoso, escorificante, termômetro digital, escumadeira, talha para transporte, assim como a panela de transferência para o alumínio.

#### 4. SEGURANÇA

Para evitar acidentes, o transporte do equipamento de degaseificação deve ser feito pelo colaborador treinado e apto ao manuseio da talha. O transporte da panela de transferência, assim como a introdução do equipamento de degaseificação no alumínio líquido devem ser feitos lentamente, para evitar respingos de alumínio que ocorrem ao entrar em contato com o rotor, que está em temperatura ambiente. O processo deve ser realizado nos locais adequados, de acordo com esta instrução de trabalho.

EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY



## INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00002

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

### TÍTULO: PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO DA LIGA SAE 306

REVISÃO:

0

PÁGINA:

2 de 5

#### 5. OPERAÇÃO DO PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO NA PANELA DE TRANSFERÊNCIA

- 1) Com o alumínio fundido na panela de transferência, colocar 300g de escorificante sobre o alumínio líquido;
- 2) Com uma escumadeira, retirar a escória da superfície do banho e depositá-la no tonel que se encontra ao lado do forno fusor; como mostram as imagens abaixo;



- 3) Com a talha, posicionar o rotor sobre a panela de transferência, apoiando lentamente a estrutura do rotor sobre a panela;



EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY



## INSTRUÇÃO DE TRABALHO

CÓDIGO:

IT00002

DATA DE EMISSÃO:

03/06/14

### TÍTULO: PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO DA LIGA SAE 306

REVISÃO:

0

PÁGINA:

3 de 5

- 4) Abrir válvula do cilindro de nitrogênio e regular a vazão do cilindro para 25 litros/minuto, como mostra a imagem abaixo;



- 5) Programar o temporizador para 14 minutos. Ligar o rotor primeiramente na chave geral e após no botão verde do painel de controle do rotor. O rotor começará a girar;
- 6) Aguardar os 14 minutos, observando o tempo no temporizador do equipamento. Após o tempo esgotado, o rotor para de girar automaticamente;

EMITENTE:  
WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO

APROVADOR:  
RONALD ELY



**INSTRUÇÃO DE  
TRABALHO**

CÓDIGO:

**IT00002**

DATA DE EMISSÃO:

**03/06/14**

**TÍTULO: PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO  
DA LIGA SAE 306**

REVISÃO:

**0**

PÁGINA:

**4 de 5**

- 7) Fechar imediatamente a válvula do cilindro de gás;



- 8) Retirar lentamente o rotor da panela com a talha, colocando-o na área de armazenamento do equipamento;



EMITENTE:  
**WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO**

APROVADOR:  
**RONALD ELY**

**INSTRUÇÃO DE  
TRABALHO**

CÓDIGO:

**IT00002**

DATA DE EMISSÃO:

**03/06/14****TÍTULO: PROCESSO DE DESGASEIFICAÇÃO  
DA LIGA SAE 306**

REVISÃO:

**0**

PÁGINA:

**5 de 5**

- 9) Com a escumadeira, retirar o resto da escória da superfície do banho de alumínio;
- 10) Levar panela de transferência para o forno de manutenção com a talha e vaziar o alumínio fundido no forno de manutenção ao lado da injetora;



EMITENTE:  
**WILLIAN FERREIRA DE CAMARGO**

APROVADOR:  
**RONALD ELY**