

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS  
CAMPUS POÇOS DE CALDAS**

**THIAGO FREITAS PIPANO**

**IMPACTO NA CAMADA DE REFUSÃO E SEGREGAÇÃO  
INVERSA DE TARUGOS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 6XXX  
COM MUDANÇAS REALIZADAS NO MOLDE DE  
VAZAMENTO**

Poços de Caldas/MG

2016

THIAGO FREITAS PIPANO

**IMPACTO NA CAMADA DE REFUSÃO E SEGREGAÇÃO  
INVERSA DE TARUGOS DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 6XXX  
COM MUDANÇAS REALIZADAS NO MOLDE DE  
VAZAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais. Linha de Pesquisa: Ligas metálicas para aplicações tecnológicas. Orientadora: Profa. Dra. Erika Coaglia Trindade Ramos  
Co-orientadora: Profa. Dra. Neide Aparecida Mariano

P664i Pipano, Thiago Freitas.

Impacto na camada de refusão e segregação inversa de tarugos de alumínio da série 6xxx com mudanças realizadas no molde de vazamento / Thiago Freitas Pipano. – Poços de Caldas, 2016.  
68 f. –

Orientador(a): Erika Coaglia Trindade Ramos.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) –  
Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2016.  
Bibliografia.

1. Alumínio. 2. Camada de refusão. 3. Segregação inversa. 4.  
Metais – Extrusão. I. Ramos, Erika Coaglia Trindade. II. Título.

CDD: 669.722

THIAGO FREITAS PIPANO5

IMPACTO NA CAMADA DE REFUSÃO E SEGREGAÇÃO INVERSA DE TARUGOS  
DE ALUMÍNIO DA SÉRIE 6XXX COM MUDANÇAS REALIZADAS NO MOLDE DE  
VAZAMENTO

A Banca examinadora abaixo assinada aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Ligas Metálicas para Aplicações Tecnológicas.

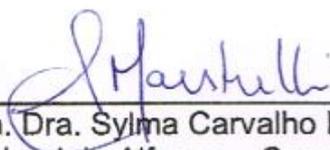
Poços de Caldas, 26 de fevereiro de 2016.

Banca Examinadora:

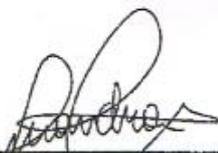


\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Erika Coaglia Trindade Ramos  
Orientadora

Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Sylma Carvalho Maestrelli  
Universidade Federal de Alfenas – Campus Poços de Caldas



\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Sandra Nakamatsu  
Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Doutora Erika Coaglia Trindade Ramos pela enorme orientação prestada na realização deste trabalho fazendo-o possível.

À Alcoa Alumínio S.A. que proporcionou a oportunidade de desenvolver e implementar um trabalho relacionado à minha área de trabalho e pós-graduação.

Ao André Abreu pelo incentivo e orientação quanto às análises e resultados obtidos.

Ao Técnico de Processos e amigo Herbertt Tobias que ajudou com as inúmeras amostras metalográficas realizadas e analisadas, assim como a coleta de dados.

À Professora Doutora Neide Aparecida pelas orientações desde meu ingresso na Universidade para realização do curso.

À namorada e grande incentivadora de meus sonhos Marcela Guimarães pela compreensão nas noites de trabalho ao meu lado para que esta Dissertação fosse possível.

Aos profissionais e colegas de trabalho André Fornaziero, Carmo Perrella, Eider Simielli, Hélio Pina e Herbertt Tobias por todo o aprendizado e experiência técnica no assunto.

À Alcoa Alumínio S.A. pelo tempo de serviço e ajuda no meu desenvolvimento.

## RESUMO

Entre tantas variáveis (especificações) relacionadas à microestrutura dos tarugos a camada de refusão e a segregação inversa estão diretamente relacionadas à produtividade na extrusão, ou seja, quanto menores estas variáveis, maior a produção, e conseqüentemente menor o rejeito. A camada de refusão e a segregação inversa são definidas como a formação de uma área refundida contendo quantidade superior de elementos de liga concentrando-se no perímetro da seção transversal de um tarugo. O objetivo deste trabalho foi apresentar o comportamento destas variáveis quando há um maior controle das variáveis de controle de processos assim como a implementação de mudanças nos moldes usados na fabricação de tarugos sem a necessidade de investimento em novas tecnologias (*Air Slip – Wagstaff*), quebrando atuais paradigmas. Mudanças implementadas nos moldes mostram significativas reduções nas variáveis indesejadas nos tarugos, garantindo a eles níveis altamente competitivos frente aos produtos de mais nova tecnologia encontradas no mercado. Através dos resultados obtidos com as mudanças de moldes realizadas e apresentadas neste trabalho, verifica-se diminuição concreta da segregação inversa e da camada de refusão no interior dos tarugos, atingindo-se níveis na ordem 50% de redução para a segregação inversa e para a camada de refusão.

**Palavras-chave:** Tarugos de alumínio. Camada de refusão. Segregação inversa. Extrusão.

## ABSTRACT

Among many variables (specifications) related to billets' microstructure, the shell zone and the inverse segregation are directly connected to the extrusions' productivity, which means the lower these variables are, the higher the production is, since there is less discard. The shell zone and the inverse segregation are defined as a remelted area formation that contains superior amount of alloy elements concentrated in the billet's transverse portion perimeter. This work's objective was to present the behavior of these variables when there is a better management of process control variables and to show how changes can be implemented to the billets molds with no need for investment in new technologies (*Air Slip – Wagstaff*), breaking paradigms. Slight changes performed to the molds show significant reduction at the billets' undesired variables, assuring them high levels of competitiveness against the most technological products available at the marketplace. Through results achieved with the changes performed to the molds it was possible to verify substantial decrease in order to 50% of both the inverse segregation and the shell zone at the billets; the decrease was higher than the initial proposal.

**Keywords:** Aluminum billet. Shell zone. Inverse segregation. Extrusion.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma básico de uma refinaria de alumina.....	15
Figura 2 – Diagrama de uma célula de redução para alumínio primário .....	16
Figura 3 – Sala de cubas para redução de alumínio primário .....	16
Figura 4 – Fluxograma de obtenção do alumínio e de produtos semi-acabados ....	18
Figura 5 – Diagrama de fases binário Al - Si.....	19
Figura 6 – Formação do grão .....	20
Figura 7 – Rejeito de tarugo na extrusão - talão .....	20
Figura 8 – Camada de refusão representada pela seta .....	21
Figura 9 – Desenho esquemático do molde de tarugos (corte transversal) .....	21
Figura 10 – Segregação inversa ou liquefação indicada pela seta .....	22
Figura 11 – Segregação inversa tipo layer indicada pela seta .....	23
Figura 12 – Segregação inversa tipo meniscus band indicada pela linha vermelha..	24
Figura 13 – Grãos de um lingote de alumínio (a) sem refinamento e (b) refinado....	25
Figura 14 – Desenho esquemático e foto real de uma extrusora.....	26
Figura 15 – Esquema de penetração de óxidos no processo de extrusão.....	27
Figura 16 – Mesa de moldes de tarugos .....	28
Figura 17 – Tarugos após sacados .....	29
Figura 18 – Amostra do tarugo para ataque com água régia .....	30
Figura 19 – Bolachas em ataque de água régia.....	30
Figura 20 – Linhas indicando os quadrantes da bolacha do tarugo para medida da camada de refusão (seta indicando a camada de refusão).....	31
Figura 21 – Desenho esquemático da amostra retirada da bolacha .....	31
Figura 22 – Corte transversal de um molde de tarugos .....	33
Figura 23 – Mudança entre primeira e segunda solidificação do molde.....	34
Figura 24 – Desenho esquemático do overhang do anel de isolamento.....	35
Figura 25 – Desenho esquemático da formação do meniscus band.....	35
Figura 26 – Anel de isolamento com 2 mm e 0 mm de overhang .....	36
Figura 27 – Ângulo do anel de isolamento .....	37
Figura 28 – Desenho esquemático da zona morta e ângulo do anel de isolamento no preenchimento do molde .....	37
Figura 29 – Anel de grafite com 5 mm de largura .....	38
Figura 30 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 1 .....	40

Figura 31 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 1.....	40
Figura 32 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 1 .....	41
Figura 33 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900 $\mu\text{m}$ de especificação etapa 1.....	41
Figura 34 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 2 .....	43
Figura 35 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 2.....	43
Figura 36 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 2 .....	44
Figura 37 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900 $\mu\text{m}$ de especificação etapa 2.....	44
Figura 38 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 2.....	45
Figura 39 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 2 .....	45
Figura 40 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 3 .....	48
Figura 41 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 2.....	48
Figura 42 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 3 .....	49
Figura 43 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900 $\mu\text{m}$ de especificação etapa 3.....	49
Figura 44 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 3.....	50
Figura 45 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 2 .....	50
Figura 46 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 4 .....	52
Figura 47 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 4.....	53
Figura 48 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 4 .....	54
Figura 49 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900 $\mu\text{m}$ de especificação etapa 4.....	54
Figura 50 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 4.....	55
Figura 51 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 4 .....	55
Figura 52 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 5 .....	58
Figura 53 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 5.....	58
Figura 54 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 5 .....	59

Figura 55 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900 $\mu\text{m}$ de especificação etapa 5 .....	59
Figura 56 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 5 .....	60
Figura 57 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 5 .....	60
Figura 58 – Macrografias da camada de refusão indicadas pelas linhas vermelhas (a) da etapa 1 e (b) da etapa 2.....	62
Figura 59 – Medição da camada de refusão de um tarugo com paquímetro. ....	63
Figura 60 – Micrografias da segregação inversa indicadas pelas linhas vermelhas (a) da etapa 1 e (b) da etapa 2 .....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores Iniciais de camada de refusão e segregação inversa .....	39
Tabela 2 - Valores da camada de refusão e segregação inversa após teste com a diminuição da distância entre a primeira e a segunda solidificação do metal - etapa 2 .....	42
Tabela 3 - Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 2 ....	46
Tabela 4 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 2....	46
Tabela 5 - Valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa após mudança do overhang de 2mm para 0 mm etapa 3.....	47
Tabela 6 - Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 3 ....	51
Tabela 7 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 3....	51
Tabela 8 - Valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa para os testes com mudança no molde refratário - etapa 4.....	52
Tabela 9 - Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 4 ....	56
Tabela 10 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 4..	56
Tabela 11 - Valores da camada de refusão e segregação inversa para os testes com a diminuição da espessura do anel de grafite - etapa 5 .....	57
Tabela 12 - Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 5 ..	61
Tabela 13 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 5..	61
Tabela 14 - Valores médios das 5 etapas realizadas da camada de refusão e segregação inversa assim como sua melhoria em relação à etapa 1 ....	62

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	13
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
3.1	ALUMÍNIO .....	14
3.2	SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO .....	19
3.3	CAMADA DE REFUSÃO E SEGREGAÇÃO INVERSA.....	20
3.4	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO .....	24
3.5	EXTRUSÃO DE METAIS.....	25
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
4.1	CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL .....	30
4.2	ETAPA 1: MEDIÇÕES PADRÕES COM MOLDE ATUAL PARA COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM DE REFERÊNCIA .....	32
4.3	ETAPA 2: DIMINUIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A 1º E 2º SOLIDIFICAÇÃO DO TARUGO .....	32
4.4	ETAPA 3: MUDANÇA NO DESIGN DO MOLDE .....	34
4.5	ETAPA 4: MUDANÇA NO MOLDE REFRACTÁRIO COM INTUITO DA MELHORA DO PREENCHIMENTO DE METAL NO MOLDE .....	36
4.6	ETAPA 5: DIMINUIÇÃO DA ESPESSURA DO ANEL DE GRAFITE MAXIMIZANDO A TROCA DE CALOR MOLDE/METAL.....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	39
5.1	ETAPA 1: MEDIÇÕES PADRÕES COM MOLDE ATUAL PARA COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM DE REFERÊNCIA .....	39
5.2	ETAPA 2: DIMINUIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A 1º E 2º SOLIDIFICAÇÃO DO TARUGO .....	42
5.3	ETAPA 3: MUDANÇA NO DESIGN DO MOLDE.....	46
5.4	ETAPA 4: MUDANÇA NO MOLDE REFRACTÁRIO COM INTUITO DA MELHORA DO PREENCHIMENTO DE METAL NO MOLDE .....	51
5.5	ETAPA 5: DIMINUIÇÃO DA ESPESSURA DO ANEL DE GRAFITE MAXIMIZANDO A TROCA DE CALOR MOLDE/METAL.....	56
5.6	RESULTADOS FINAIS .....	61
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	65
<b>7</b>	<b>SUGESTÕES</b> .....	66
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	67

## 1 INTRODUÇÃO

A descoberta do Alumínio ocorreu em 1809 pelo inglês Sir Humphrey fundindo ferro com alumina e foi posteriormente (1825) isolado pelo físico dinamarquês Hans Christian Oersted a partir do cloreto de alumínio. Em 1886 foi desenvolvido o processo de produção do metal, quase que simultaneamente pelo americano Charles Martin Hall e pelo francês Paul L. T. Héroult, ambos com 22 anos, em que a alumina é dissolvida em criolita fundida e decomposta eletroliticamente passando o processo a se chamar por processo Hell-Heroult.<sup>1</sup>

O alumínio, por suas excelentes propriedades físico-químicas, dentre as quais se destacam o baixo peso específico, a resistência à corrosão, a alta condutibilidade térmica e elétrica e a reciclagem, apresenta uma ampla variedade de utilização, que o torna o metal não-ferroso mais utilizado no mundo.<sup>2</sup>

O aumento no consumo de alumínio é prova do que este metal significa na indústria moderna. O alumínio segue o ferro/aço entre os metais de maior consumo anual, sendo o mais importante dos metais não-ferrosos.<sup>3</sup>

Na natureza, o alumínio não existe como um metal por causa de sua alta afinidade com o oxigênio. Compostos de alumínio, principalmente os óxidos em formatos de várias purezas e hidratação, são amplamente distribuídos pela natureza. Desta forma, o alumínio é o segundo maior elemento metálico abundante na Terra – 27,5%. Tem sido estimado que 8% da crosta terrestre é composta de alumínio.<sup>4</sup>

Embora o alumínio seja um dos mais abundantes materiais encontrados na crosta terrestre, qualquer depósito de minério utilizável deve possuir prontamente um sistema de beneficiamento, de modo que o óxido de alumínio possa ser obtido. Entretanto, o beneficiamento físico dos óxidos pode não ser muito eficaz. Conseqüentemente, um processo químico faz-se necessário para extrair a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de outros ingredientes associados com o óxido nos depósitos. A bauxita contém hidratos de óxido de alumínio e é também a fonte mineralógica mais economicamente viável para beneficiar quimicamente a alumina.<sup>5</sup>

O processo químico denominado *Bayer* é o mais utilizado na indústria do alumínio para a obtenção da alumina. Neste processo, a bauxita é dissolvida em

soda cáustica e, posteriormente, filtrada para separar todo o material sólido, concentrando-se o filtrado para a cristalização da alumina. Os cristais são secados e calcinados para eliminar a água, sendo o pó branco de alumina enviado à Redução para a obtenção do alumínio.<sup>5</sup>

Concomitantemente, com a solidificação do alumínio, certas características são também formadas macro e microestruturalmente dentre elas a camada de refusão e a segregação inversa. As duas características são de grande impacto na eficiência da posterior utilização dos tarugos, ou seja, na extrusão. Praticamente pode-se dizer que quanto maior a espessura da camada de refusão e da segregação inversa, maiores serão os descartes de matéria prima nas extrusões.

O que normalmente se define como um tarugo para a extrusão de boa qualidade é sua capacidade de propiciar extrusão de alta velocidade, gerando perfis com bom acabamento superficial, sem afetar negativamente o índice de paradas de ferramenta.<sup>6</sup>

Com a diminuição da camada de refusão e segregação inversa há uma melhoria na eficiência da extrusão de tarugos, minimizando os rejeitos do processo e aumentando a produção de perfis extrudados.

A pesquisa pode levar a grandes impactos na economia de matérias primas às unidades de extrusão de tarugos de alumínio e, conseqüentemente, a uma melhoria do processo do mesmo, assim como maior estabilização do processo.

Este trabalho consiste no estudo da diminuição da camada de refusão e segregação inversa nos tarugos, foi realizado em virtude das demandas, cada vez maiores, de clientes de unidades de extrusão de alumínio, visando cada vez mais o melhor consumo de suas matérias primas, minimizando suas perdas, consumo de energia, aumento da produtividade, sustentabilidade (refusão dos rejeitos) e também ganhos financeiros às indústrias de fundição de tarugos com o aumento do valor agregado do produto.

## 2 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi desenvolver informações necessárias ao assunto já que existem pouco estudos relacionados, devido tecnologia de mesa de tarugos (*Hot-top*) não fabricada mais no mercado, e avaliar a estabilização do processo e a mudança no atual conceito do molde de solidificação de tarugos com o intuito de diminuir a camada de refusão e a segregação inversa no processo de fundição de tarugos, impactando diretamente na eficiência de produção de perfis extrudados com a utilização de tarugos das ligas 6060 e 6063 (Alumínio, Silício e Magnésio).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ALUMÍNIO

O alumínio tem densidade de  $2,7 \text{ g/cm}^3$  (gramas por centímetro cúbico), aproximadamente um terço dos metais como aço ( $7,83 \text{ g/cm}^3$ ), cobre ( $8,93 \text{ g/cm}^3$ ) ou bronze ( $8,53 \text{ g/cm}^3$ ). Possui excelente resistência à corrosão em muitos ambientes, incluindo atmosfera, água (até mesmo água salgada), ambientes petroquímicos e muitos outros.<sup>7</sup>

Além de ser não magnético, uma propriedade de importância nas indústrias elétricas e eletrônicas é que o alumínio não é tóxico e por isso usado rotineiramente em embalagens de alimentos. Algumas ligas de alumínio excedem a resistência do aço estrutural. Entretanto, o alumínio puro e certas ligas apresentam baixa resistência mecânica e dureza.<sup>8</sup>

As principais fases da produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), matéria prima para a produção do alumínio (Al), desde a entrada do minério até a saída do produto, são:

- **Moagem:** melhora a eficiência da extração diminuindo a granulometria da bauxita (minério cuja principal fração é  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) a valores da ordem de #35 *mesh*;
- **Digestão:** local de extração do óxido de alumínio presente na bauxita com utilização de soda cáustica;
- **Clarificação:** onde se separa a lama (soda + impurezas) do licor da digestão (concentrado de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ );
- **Precipitação:** etapa onde se cristaliza a maior quantidade possível de hidrato de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ );
- **Calcinação:** local onde se retira a água de cristalização do hidrato transformando-o em alumina.<sup>9</sup>

As operações de alumina têm certo grau de complexidade que podem ser resumidas através do fluxograma na Figura 1.

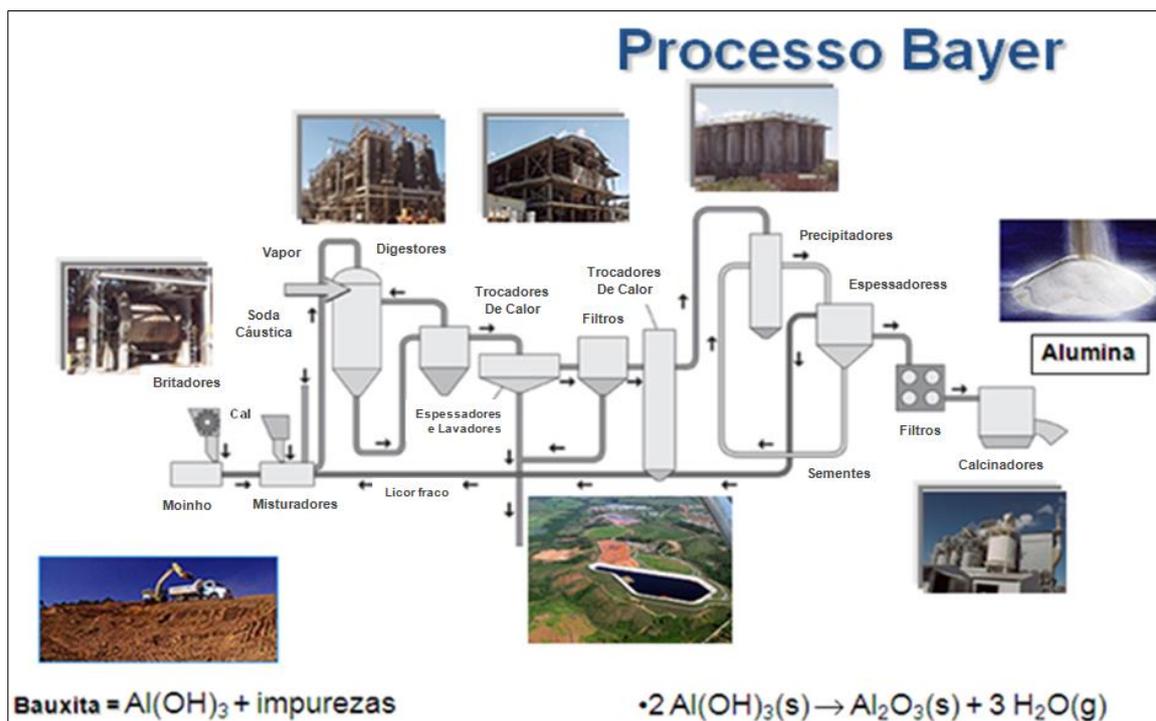
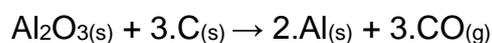
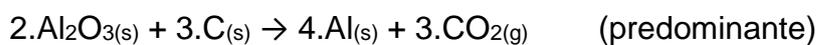


Figura 1 – Fluxograma básico de uma refinaria de alumina.  
 Fonte: MACHADO (2015, p. 11).<sup>9</sup>

No processo de eletrólise, para obtenção do alumínio, a alumina é carregada de forma controlada, em um eletrólito fundido, formado por sais de criolita e fluoreto de alumínio. A passagem de corrente elétrica na célula eletrolítica promove a redução da alumina, decantando o alumínio metálico no fundo da célula e o oxigênio liberado reage com o ânodo de carbono, formando dióxido de carbono como demonstrado nas reações a seguir:

Reações de oxi-redução:



A Figura 2 mostra o diagrama de uma célula eletrolítica de redução e a Figura 3 uma instalação típica da Sala de Cubas de redução.<sup>10</sup>

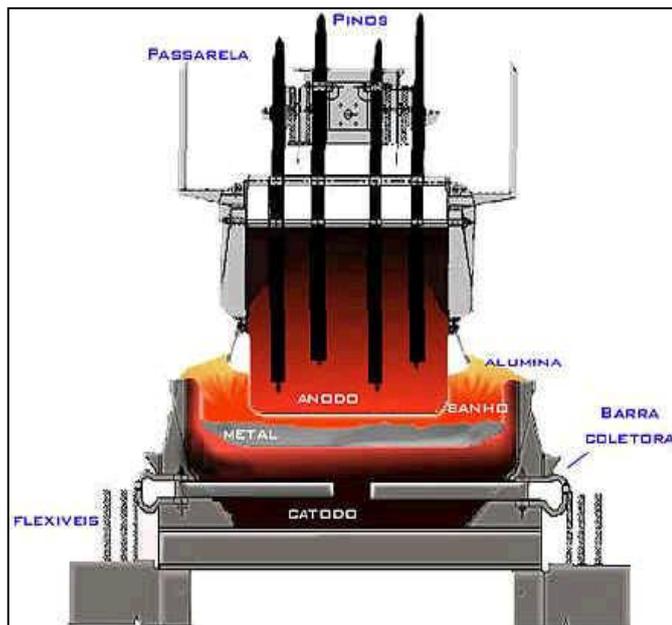


Figura 2 – Diagrama de uma célula de redução para alumínio primário.  
 Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (2007, p. 8)<sup>10</sup>



Figura 3 – Sala de Cubas para redução de alumínio primário.  
 Fonte: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO (2007, p. 9).<sup>10</sup>

O metal reduzido da alumina pelas cubas eletrolíticas nunca é puro e possui principalmente como elementos residuais, o silício e o ferro. O alumínio primário é classificado por uma designação mundial de PXXYY onde o P representa alumínio primário e os decimais XX e YY representam os máximos teores de silício e ferro no produto, por exemplo, o produto P0610 representa um alumínio primário com teor máximo de 0,06% de silício e 0,10% de ferro em sua composição.<sup>11</sup>

O alumínio primário (praticamente puro), assim como todos os metais puros, tem baixa resistência mecânica, e pode não ser prontamente utilizado em aplicações onde resistência à deformação e fratura são essenciais. As propriedades das ligas de alumínio dependem da complexa interação da composição química e da microestrutura desenvolvida no momento da solidificação, tratamentos térmicos, e (para produtos trabalháveis) processos de deformação.<sup>11</sup>

É conveniente dividir as ligas de alumínio em duas grandes categorias: ligas de fundição (usadas como matéria prima para serem refundidas posteriormente) e ligas trabalháveis (usadas em produtos semi-acabados). Outra diferenciação para cada categoria é baseada no mecanismo primário de desenvolvimento das propriedades da liga. Nomenclaturas de ligas trabalháveis e para fundição têm sido desenvolvidas continuamente e diferentemente de outros metais não seguem uma numeração lógica como teores de outros elementos após a primeira casa dos quatro dígitos. Cada sistema de identificação de liga emprega diferentes nomenclaturas para ligas fundidas e trabalháveis, mas divide as ligas em famílias para simplificar.<sup>12</sup>

Para ligas trabalháveis um sistema de 4 dígitos é usado para produzir uma lista de nove famílias como citadas a seguir:<sup>12</sup>

- 1xxx: alumínio Puro;
- 2xxx: cobre (Cu) é o principal elemento de liga embora outros elementos, como o magnésio, podem também estar presentes;
- 3xxx: manganês (Mn) é o principal elemento de liga;
- 4xxx: silício (Si) é o principal elemento de liga;
- 5xxx: magnésio (Mg) é o principal elemento de liga;
- 6xxx: magnésio e silício são os principais elementos de liga;
- 7xxx: zinco (Zn) é o principal elemento de liga, mas outros elementos como o cobre; magnésio, cromo, e zircônio podem também estar presentes;
- 8xxx: ligas contendo elementos tais como estanho (Sn) e lítio (Li);
- 9xxx: ligas reservadas para o futuro.<sup>12</sup>

Ligas de fundição são denominadas por um sistema de três dígitos seguidos de um valor decimal. O decimal 0 em todos os casos destina-se às peças fundidas, o decimal 1 refere-se a lingotes fundidos, geralmente a partir de fusão de peças de retornos e o decimal 2 destina-se a lingotes das ligas cuja composição é controlada.

A seguir seguem as famílias das ligas fundidas.<sup>14</sup>

- 1xx.x: alumínio puro com 99% de pureza mínima;
- 2xx.x: ligas de Al-Cu;
- 3xx.x: ligas de Al-Si-Mg; Al-Si-Cu; Al-Si-Cu-Mg;
- 4xx.x: ligas de Al-Si;
- 5xx.x: ligas de Al-Mg;
- 6xx.x: série não utilizada;
- 7xx.x: Ligas de Al-Zn;
- 8xx.x: Ligas de Al-Sn;
- 9xx.x: Outras ligas menos utilizadas.<sup>14</sup>

A facilidade pela qual o alumínio pode ser fabricado em várias formas é uma de suas mais importantes vantagens. O alumínio pode ser fundido por qualquer método conhecido; pode ser laminado em qualquer espessura até folhas mais finas que as de papel; chapas de alumínio podem se estampadas, cunhadas, repuxadas e corrugadas. O alumínio pode ser extrudado numa infinidade de perfis de seção transversal constante e de grande comprimento. O metal pode ser também forjado ou impactado (Figura 4).<sup>14</sup>



Figura 4 – Fluxograma de obtenção do alumínio e de produtos semi-acabados.

Fonte: PIPANO; FORNAZIERO (2015, p. 9).<sup>13</sup>

### 3.2 SOLIDIFICAÇÃO DO ALUMÍNIO

De acordo com o diagrama de fases binário do Al e Si mostrado na Figura 5, o alumínio líquido começa a se solidificar em torno de 660°C formando uma estrutura cristalina chamada CFC (cúbica de face centrada) que garante várias características de que é dotado o metal.<sup>15</sup>

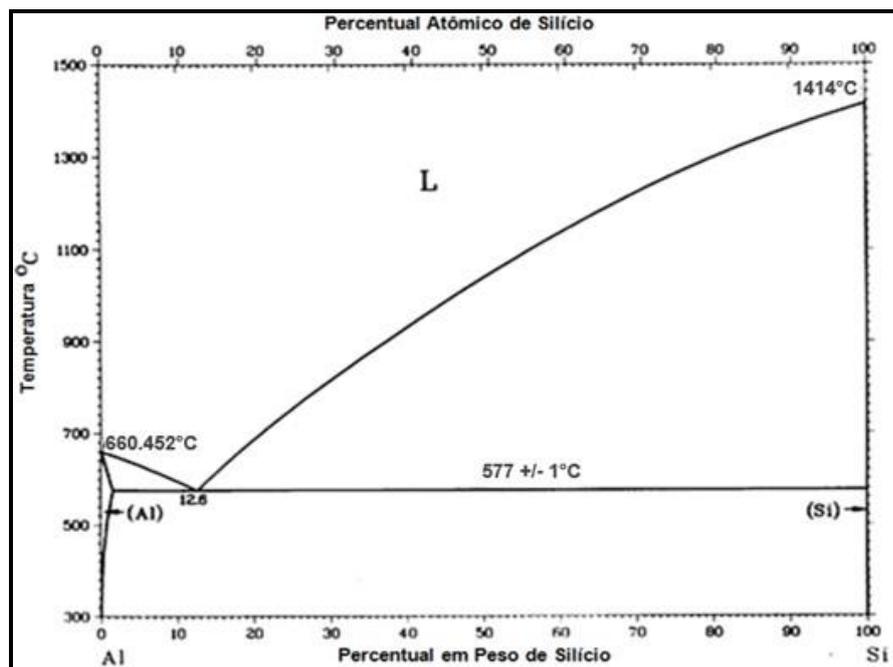


Figura 5 – Diagrama de fases binário Al-Si.  
Fonte: ASM (1992, p. 321).<sup>15</sup>

Conforme o alumínio vai resfriando e ultrapassa a barreira *liquidus*, os átomos de alumínio começam a formar pequenos cristais, chamados dendritas, que darão início ao processo de solidificação. Seguindo o resfriamento, as dendritas continuam crescendo em direção oposta ao resfriamento até que se encontrem uma com a outra formando grãos, sendo assim, formado o sólido por completo ao ultrapassar a curva *solidus*. Como a solubilização de elementos é maior no metal líquido do que o sólido, o material solidificado fica rico em solutos na região entre as dendritas por serem as últimas a se formarem, como pode ser visto na Figura 6.<sup>16</sup>

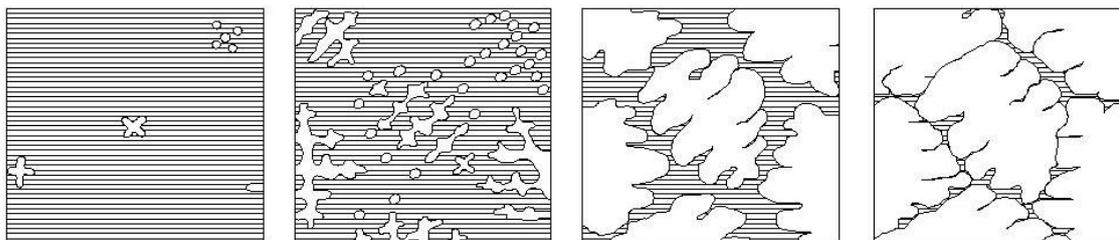


Figura 6 – Formação do grão.  
Fonte: PERRELLA (2008, p. 13).<sup>16</sup>

### 3.3 CAMADA DE REFUSÃO E SEGREGAÇÃO INVERSA

O vazamento de tarugos é realizado através de uma mesa com vários moldes (quantidade de moldes varia de acordo com o tamanho da mesa) onde praticamente existe um *contêiner* para o metal sólido seguido de uma injeção de água para posterior resfriamento.

Entre as variáveis (especificações) relacionadas à microestrutura dos tarugos de alumínio primário, a camada de refusão (*Shell Zone*) e a segregação inversa (*Inverse Segregation*) estão diretamente relacionadas à produtividade na extrusão, ou seja, quanto menor estas variáveis, menor o rejeito ou talão (Figura 7) e maior produção.<sup>17</sup>



Figura 7- Rejeito de tarugo na extrusão (talão).  
Fonte: PIPANO (2014, p. 2).<sup>17</sup>

O talão é a parte final descartada pela extrusão onde se concentra basicamente todos os elementos de liga contidos na camada de refusão e segregação inversa e representa % do peso total do tarugo em média.

A camada de refusão (Figura 8) é a estrutura de grão não uniforme próxima à superfície causada pela ineficiência do resfriamento entre o resfriamento do molde (resfriamento primário) e o resfriamento da água (resfriamento secundário).<sup>17</sup>

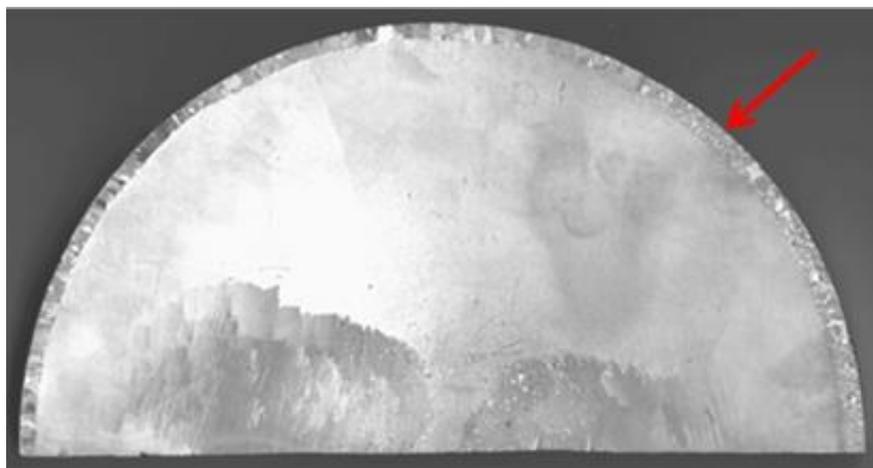


Figura 8 – Camada de refusão representada pela seta.  
Fonte: PIPANO (2014, p. 2).<sup>17</sup>

A Figura 9 mostra o desenho esquemático do molde de tarugos, no qual o metal líquido, ao entrar em contato com o final do anel de grafite sofre a sua primeira solidificação. Neste momento há uma primeira contração do alumínio iniciando a solidificação (formando uma casca), neste mesmo tempo, a parte interna do tarugo, permanece líquida até encontrar o fluxo de água presente no final do molde, sofrendo assim, a sua segunda solidificação.<sup>17</sup>

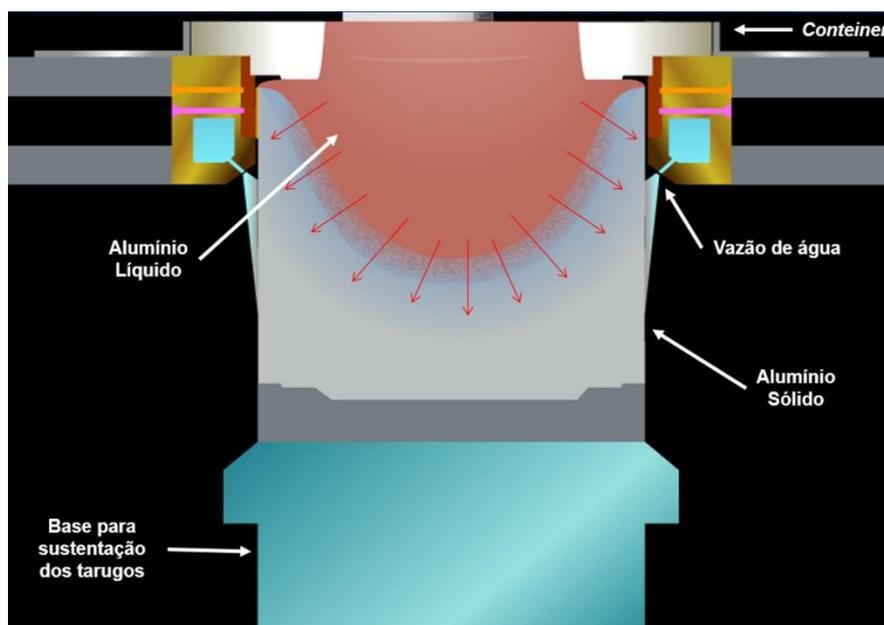


Figura 9 – Desenho esquemático do molde de tarugos (corte transversal)  
Fonte: PIPANO (2014, p. 2).<sup>17</sup>

A camada de refusão é uma “camada” que está diretamente relacionada ao tempo que esta estrutura tem para “crescer”, entre as duas solidificações descritas acima, modificando assim sua estrutura interna, que é diferente da estrutura encontrada no interior do tarugo.<sup>18</sup>

O tempo entre a 1<sup>o</sup> e a 2<sup>o</sup> solidificação (ordem de segundos) também é o tempo necessário para que os elementos de liga presentes na composição química do produto se difundam do sólido da casca para o interior enquanto líquido e se difundam novamente para a casca quando esta começa a se refundir, aumentando assim a concentração destes elementos (chamados de óxidos pelas unidades de extrusão) nesta área do metal, formando assim a segregação inversa.<sup>18</sup>

A segregação inversa ou liquefação (Figura 10) é o enriquecimento da área imediatamente abaixo da superfície do tarugo (50-3000 micrometros) causado pela re-fundição parcial da camada de refusão devido ao aquecimento da mesma pela poça de metal líquido entre o resfriamento primário e o secundário.<sup>19</sup>

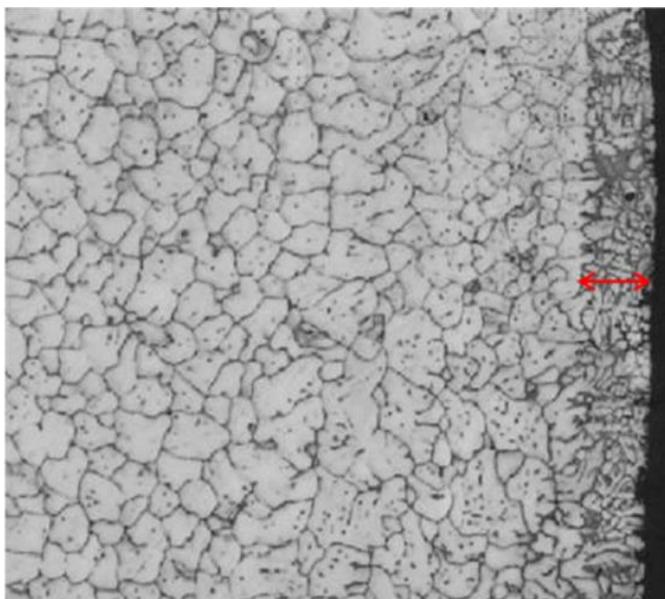


Figura 10 – Segregação inversa ou liquefação indicada pela seta.  
Fonte: BERGMANN (1970, p. 2).<sup>20</sup>

Apesar da camada de refusão e da segregação inversa coexistirem em qualquer tarugo produzido em tecnologias similares, sabe-se que há uma variação no tamanho destas morfologias, de acordo com as características e tecnologia de cada molde.<sup>20</sup>

A tecnologia do lingotamento da Alcoa de Poços de Caldas é denominada *Hot-Top* e é a modernização de um sistema convencional visando à melhoria da qualidade superficial dos tarugos. Desde esta modernização, há registros de camadas de refusão e segregações inversas nas ordens de 5,0 mm (vista macroscopicamente) e 3.000  $\mu\text{m}$  (vista microscopicamente), respectivamente.<sup>20</sup>

Ao se comparar estas variáveis com outras tecnologias, percebe-se diferenças significativas no caso da segregação inversa. A morfologia da segregação inversa pode apresentar características diferentes quando comparadas à utilização de outros moldes, como por exemplo, *AirSlip*, *MaxiCast* e Convencional. A tecnologia *AirSlip* apresenta segregação inversa chamada “*Layer*” (Figura 11).<sup>20</sup>

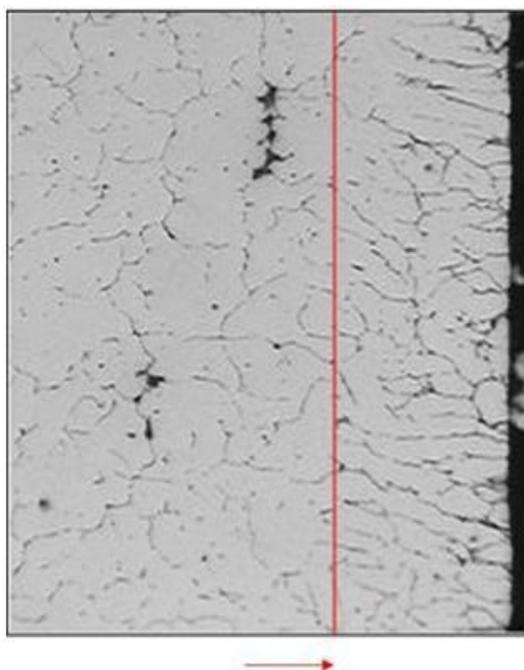


Figura 11 – Segregação inversa tipo *layer* indicada pela seta vermelha.  
Fonte: BERGMANN (1970, p. 2).<sup>20</sup>

Para a tecnologia *Hot-Top*, a segregação inversa passou a ser peculiarmente chamada de “*Bergmman’s Zone*” em homenagem ao seu descobridor e estudioso Werner J. Bergmman<sup>20</sup>, também conhecida como “*Meniscus Band*” pode ser vista na Figura 12.

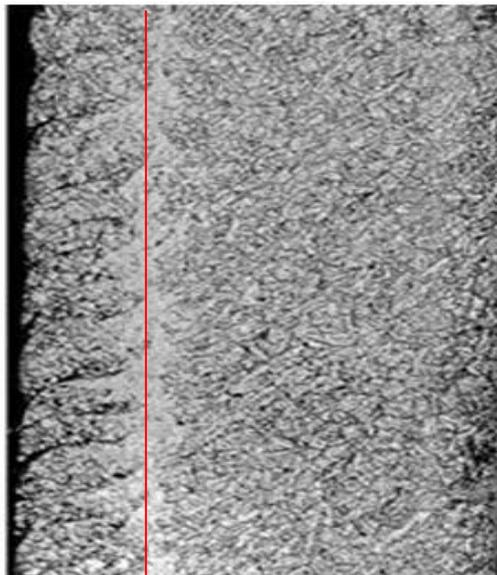


Figura 12 – Segregação inversa tipo *meniscus band* indicada pela linha vermelha.  
Fonte: BERGMANN (1970, p. 3).<sup>20</sup>

Ao contrário da segregação inversa tipo *Layer* (segregação homogênea e uniforme ao longo da superfície) a *Meniscus Band* é caracterizada por apresentar picos com altas concentrações de elementos de liga muitas vezes ultrapassando o valor de 2.500  $\mu\text{m}$ , espaçados uns dos outros, aumentando o talão, que é o rejeito após o processo de extrusão.<sup>20</sup>

Com o advento de novas tecnologias de moldes e requisitos de qualidade para níveis mais restritivos na produção de tarugos, as camadas de refusão com 3,0 mm e picos na segregação inversa de 2.500  $\mu\text{m}$  não são mais aceitáveis na especificação de clientes quanto à qualidade dos tarugos (a demanda atual exige valores menores que 1000  $\mu\text{m}$ ).

### 3.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO

Atualmente é necessário ou desejável examinar a cristalografia e defeitos que influenciam as propriedades dos materiais. A capacidade de realizar tais análises é importante para assegurar que as associações entre as propriedades mecânicas estruturais dos materiais sejam compreendidas de forma apropriada, assim como prever o comportamento dos mesmos, uma vez que essas relações tenham sido estabelecidas.<sup>21</sup>

Alguns elementos estruturais possuem dimensões macroscópicas, isto é, são grandes o suficiente para serem observados a olho nu. A forma e o tamanho/diâmetro médios dos grãos para uma amostra policristalina são elementos estruturais importantes. Grãos relativamente grandes (quando não estão refinados), em diferentes texturas, são claramente visíveis sobre a superfície do lingote de alumínio como representado na Figura 13. Contudo, na maioria dos materiais, os grãos constituintes possuem dimensões microscópicas (assim como defeitos e outros constituintes), com diâmetros que podem ser da ordem de alguns micrometros.<sup>22</sup>

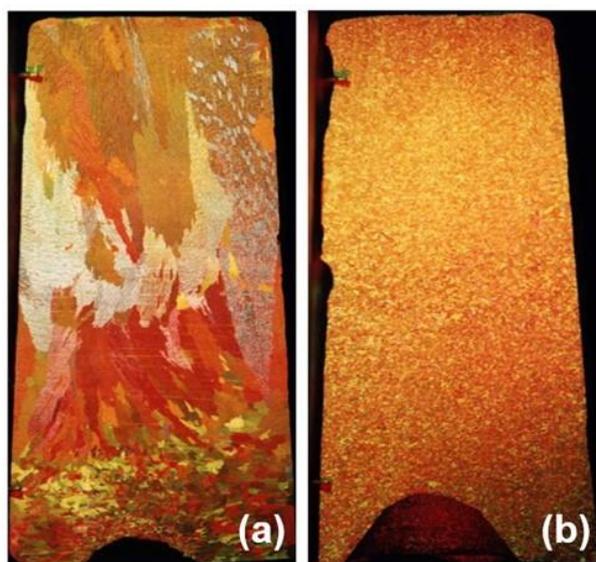


Figura 13 – Grãos de um lingote de alumínio (a) sem refinamento e (b) refinado.  
Fonte: PERRELLA (2008, p. 25).<sup>16</sup>

Para o monitoramento das propriedades mecânicas dos tarugos de alumínio aplicados na extrusão utiliza-se de análises macrográficas, ensaios mecânicos e análises micrográficas. Através dos resultados que são obtidos por estes meios pode-se monitorar a eficiência do processo e suas melhorias.

### 3.5 EXTRUSÃO DE METAIS

Extrusão é um processo de transformação termo-mecânica no qual um tarugo de metal é reduzido em sua seção transversal quando forçado a fluir através do orifício de uma matriz (ferramenta), sob o efeito de altas pressões (Figura 14).<sup>23</sup>

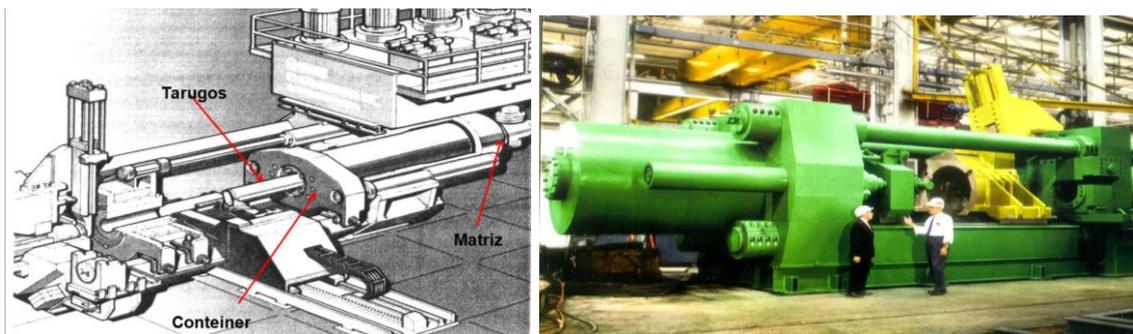


Figura 14 – Desenho esquemático e foto real de uma extrusora.  
Fonte: TOBIAS (2014, p. 30).<sup>24</sup>

Devido às grandes forças envolvidas no processo de extrusão, a maioria dos metais são extrudados a quente (acima da temperatura de recristalização do metal), diminuindo as forças necessárias para pressionar o metal contra a matriz. Os principais tipos de produtos extrudados são: perfis sólidos, tubulares e semi-tubulares.<sup>23</sup>

As características do tarugo vazado que favorecem a extrusão, além do balanceamento da composição química, são o nível de limpeza do metal, tamanho fino e uniformidade de grãos, a quantidade, distribuição e tamanho das fases insolúveis e eutéticos de baixo ponto de fusão. O processo de vazamento semi-contínuo forma uma camada no tarugo que fica em contato com a parede do molde, que é uma região de grãos mais grosseiros (camada de refusão) e com maior concentração de fases insolúveis (segregação inversa). Pelo projeto dos moldes e das técnicas de vazamento, é possível controlar a espessura da camada de refusão e a segregação inversa, porém o processo de extrusão deve ser ajustado para impedir a entrada dessa região do tarugo no perfil extrudado (cálculo do talão) ou até a sua eliminação por usinagem, atendendo aos severos requisitos do controle da qualidade, como os da indústria aeronáutica.<sup>23</sup>

A camada de refusão e a segregação inversa podem acarretar um dos maiores problemas à produtividade e qualidade dos extrudados e é chamada de **Penetração de Óxidos**. A penetração de óxidos é um defeito inerente ao processo de extrusão e a sua presença pode ser mais ou menos evidente dependendo da espessura do perfil a ser extrudado. Perfis com espessura menor ou igual a 3,0 mm possuem uma região de penetração de óxido muito pequena que é descartado como pontoa durante o processo de corte. Perfis com espessura acima de 3,0 mm necessitam de uma análise pormenorizada de descarte, já que o fluxo de metal torna-se mais fácil

carregando juntamente os óxidos da segregação inversa e camada de refusão (Figura 15).<sup>23</sup>

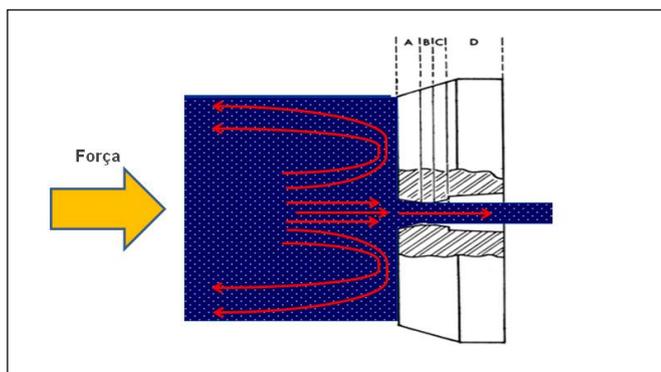


Figura 15 – Esquema de penetração de óxidos no processo de extrusão.  
Fonte: TOBIAS (2014, p. 24)<sup>24</sup>

Desta forma, quanto menor a segregação inversa e a camada de refusão menor será o talão no processo de extrusão, maximizando a produtividade com o aumento do consumo da matéria prima (tarugo).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para investigar o efeito das mudanças realizadas no molde de vazamento, foram fixadas inicialmente as variáveis que influenciam na camada de refusão e segregação inversa de acordo com as práticas atuais:

- Mesa de moldes com 30 tarugos;
- Temperatura do metal na mesa de tarugos em  $670 \pm 5$  °C;
- Velocidade de vazamento dos tarugos de 128 mm/min;
- Vazão de água de 250 m<sup>3</sup>/h para resfriamento do molde.

Após fixação destas variáveis, foi pré-fixada a posição de retirada dos tarugos no molde 1 (tarugos do molde 1 apresentam as piores características das variáveis segregação inversa e camada de refusão em comparação aos outros) a serem avaliados (Figura 16).

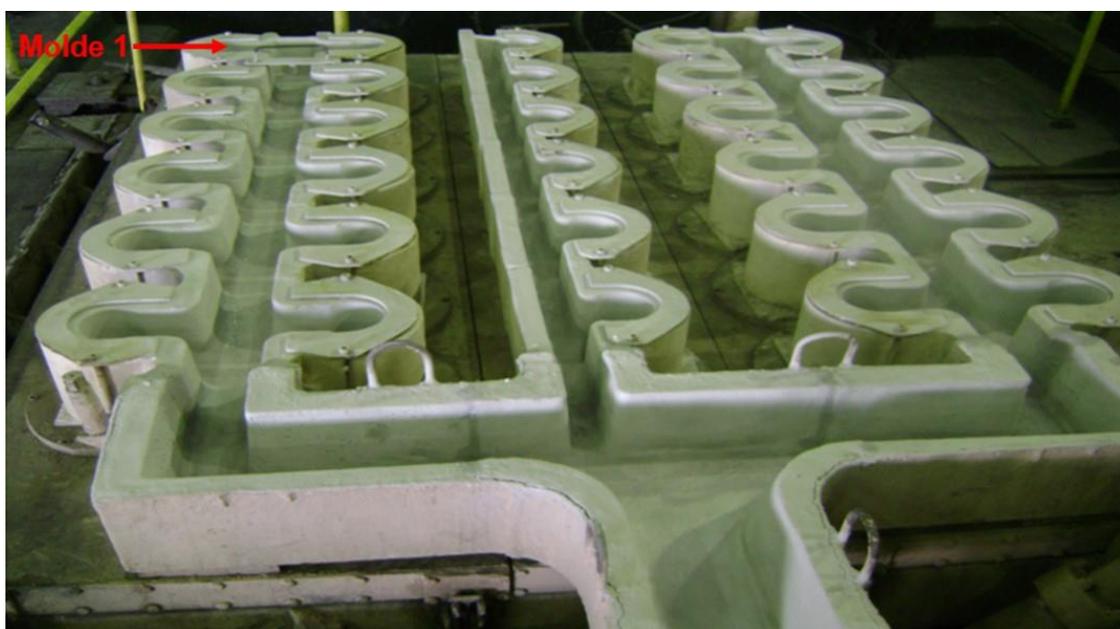


Figura 16 – Mesa de moldes de tarugos.  
Fonte: Do autor.

Com o intuito de diminuir a camada de refusão e a segregação inversa nos tarugos de alumínio da série 6XXX (Al-Si-Mg), foram investigados isoladamente os seguintes fatores:

- Etapa 1: Medições padrões com molde atual para composição da amostragem de referência;
- Etapa 2: Diminuição da distância entre a 1º e 2º Solidificação do Tarugo;
- Etapa 3: Mudança no design do molde;
- Etapa 4: Mudança no molde refratário com intuito da melhora do preenchimento de metal no molde;
- Etapa 5: Diminuição da espessura do anel de grafite maximizando a troca de calor molde/metal;
- Análise de dados.

As etapas foram realizadas uma a uma sempre mantendo as condições iniciais de testes, ou seja, não adotando as mudanças como permanentes após cada modificação do molde.

Depois de vazados os tarugos (Figura 17), com 6050 mm de comprimento e 178 mm de diâmetro, foram serrados, retirando 10 cm do pé do tarugo, parte inferior, rejeitada do tarugo devido quantidade de inclusões arrastadas pelo metal na calha, e cortada uma “bolacha” (Figura 18) entre o pé e o restante do tarugo (região de pior qualidade dos tarugos) para que fossem realizadas as análises macrográfica e micrográfica.



Figura 17 – Tarugos após sacados.  
Fonte: Do autor.



Figura 18 – Amostra do tarugo para ataque com água régia.  
Fonte: Do autor.

#### 4.1 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Após a retirada da bolacha, esta foi preparada a fim de se verificar o tamanho da camada de refusão do tarugo (Figura 8). A camada de refusão é analisada macrograficamente e mensurada com o uso de um paquímetro. A amostra foi atacada com 150 ml de uma solução de água régia (380 ml de água destilada + 370 ml de ácido clorídrico + 250 ml de ácido nítrico) por 8 minutos (Figura 19), realizando-se então uma medição da camada de refusão para cada um dos 4 quadrantes da amostra, conforme Figura 20, de acordo com as normas de preparação de amostras da Alcoa Alumínio S.A.<sup>27</sup>



Figura 19 – Bolachas em ataque de água régia.  
Fonte: Do autor.

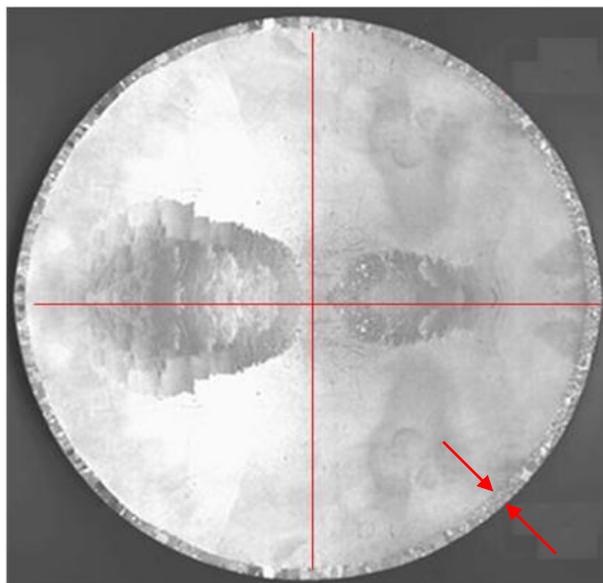


Figura 20 – Linhas indicando os quadrantes da bolacha do tarugo para medida da camada de refusão (setas indicando a camada de refusão).

Fonte: Do autor.

A seguir, foi realizada a análise metalográfica da amostra para a mensuração da segregação inversa. Para isto foi necessário tirar uma amostra da periferia da bolacha, onde se encontra a segregação inversa, como mostrado na Figura 21.

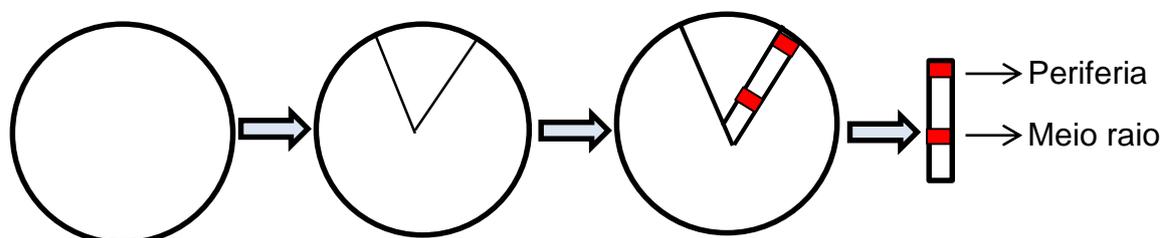


Figura 21 – Desenho esquemático da amostra retirada da bolacha.

Fonte: Do autor.

As amostras foram embutidas com baquelite e lixadas na sequência de lixas #220, #320, #400, #600 e #1200.<sup>26</sup>

Depois de lixadas as amostras foram polidas com o polidor Brasso por 15 minutos, e em seguida, polidas por 15 minutos com sílica coloidal, de acordo com norma Alcoa.

Após polimento, as amostras foram atacadas com solução de 0,5% de ácido fluorídrico (HF) por 10 segundos. Em seguida as amostras foram observadas em microscópio óptico para mensurar o tamanho da segregação inversa (norma Alcoa).

O microscópio ótico usado para a realização das análises foi o modelo Nikon Eclipse E200 (propriedade do laboratório metalográfico da Alcoa Alumínio S.A. de Poços de Caldas – MG).

Para cada amostra realizada foram executadas 4 medições da segregação inversa para compor a amostragem final.

No total de amostras de todo o trabalho foram realizadas 20 medições para cada etapa e todos os dados foram tratados e analisados com base estatística por meio do *software* MiniTab 17.1<sup>27</sup> (*software* de análises estatísticas), utilizando-se como especificação técnica os limites de especificação superiores de 2,0 mm para a camada de refusão e 900 µm para a segregação Inversa.

Foi decidido utilizar gráficos e análises estatísticas, tais como, testes de normalidade, testes de capacidade, gráficos de *box-plot* e testes t. A escolha do teste t estatístico foi devido à facilidade de visualização e definição da diferença estatística das médias entre duas amostragens.

Todas as análises foram realizadas nas dependências da Alcoa Alumínio S.A. de Poços de Caldas – MG.

#### 4.2 ETAPA 1: MEDIÇÕES PADRÕES COM MOLDE ATUAL PARA COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM DE REFERÊNCIA

Nesta etapa, após a estabilização de todo o processo operacional, foi realizada uma amostragem inicial (Camada de refusão e segregação inversa) como referência para a melhoria dos resultados alcançados ao longo do projeto.

#### 4.3 ETAPA 2: DIMINUIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A 1º E 2º SOLIDIFICAÇÃO DO TARUGO

Na segunda etapa foi realizada a modificação do molde de tarugos diminuindo a distância entre a 1° e 2° solidificação do Tarugo. O molde (container do metal líquido) de tarugos é dividido conforme mostrado na Figura 22.

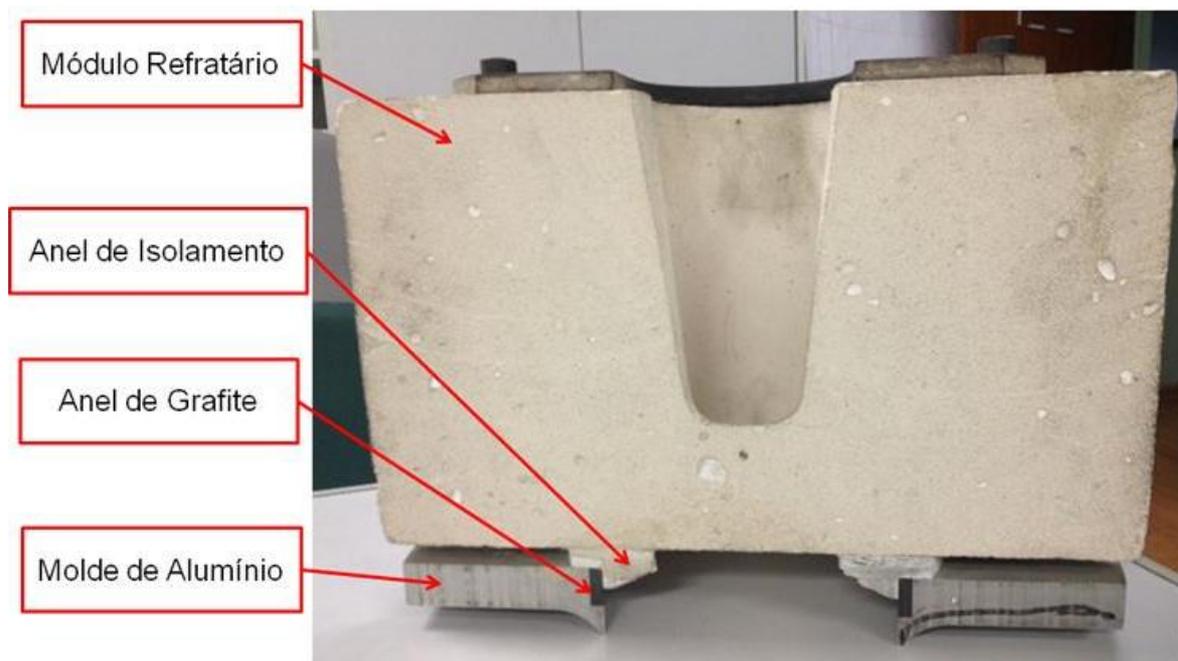


Figura 22 – Corte transversal de um molde de tarugos.  
Fonte: Do autor.

O molde refratário é dividido entre os seguintes itens:

- O módulo refratário: container de recebimento do metal líquido;
- Anel de isolamento: junção do molde refratário e do molde de alumínio (necessitando este ser um refratário isolante para evitar a troca de calor entre o mesmo e o metal);
- Anel de grafite: utilizado apenas como lubrificação para se evitar atrito entre o molde de alumínio e o alumínio solidificado (melhor característica superficial);
- Molde de alumínio: molde final onde recebe o fluxo de água para o resfriamento dos tarugos.

Nesta etapa buscou-se diminuir a distância entre a primeira solidificação do metal (contato do metal com o anel de grafite) e a segunda solidificação (recebimento do fluxo de água) ao final do molde de alumínio. Em contato com o

anel de grafite, o alumínio começa a solidificar, contrai-se e para de trocar calor com o molde e conseqüentemente a trocar calor com o seu interior, passando então novamente a refundir (formação da camada de refusão) até que se solidifique por completo com o recebimento da água do resfriamento (2° Solidificação).

Para isto foi manufaturado um novo anel de isolamento passando de 9,5 mm de altura para 13,5 mm de altura, assim como o mesmo aumento do anel de grafite e a usinagem do molde de alumínio para poder acomodar estas modificações. Desta forma, foi alterada a distância entre a primeira e a segunda solidificação do molde diminuindo a distância em um total de 4 mm, conforme ilustrado na Figura 23.

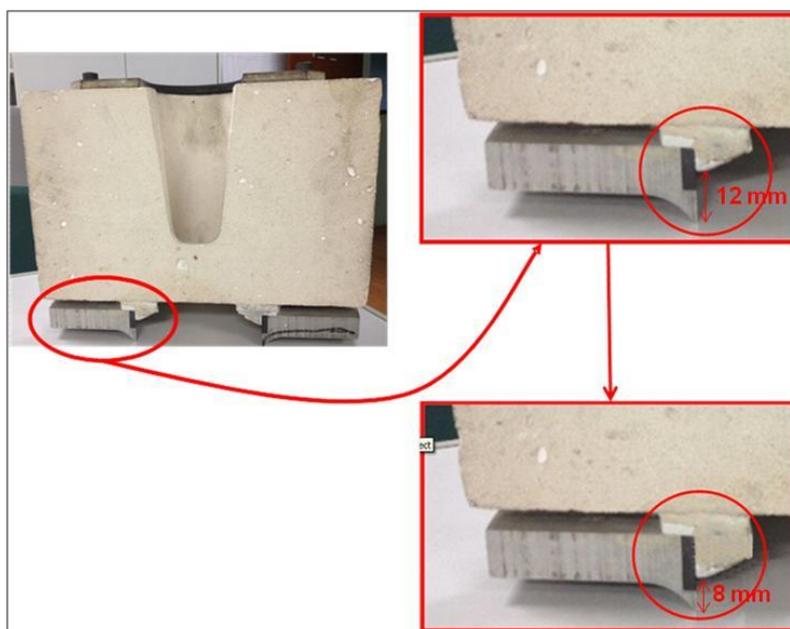


Figura 23 – Mudança entre primeira e segunda solidificação do molde.  
Fonte: Do autor.

O molde diferenciado foi instalado na mesa de tarugos na primeira posição e foram realizadas 20 análises em um total de cinco tarugos.

#### 4.4 ETAPA 3: MUDANÇA NO DESIGN DO MOLDE

Nesta etapa foi realizada a segunda mudança no molde, porém modificando-se apenas o anel de isolamento. Como dito segundo BERGMANN<sup>20</sup> a planicidade do anel de isolamento, chamada de *overhang* (Figura 24), é diretamente proporcional à formação dos *meniscus band* na segregação inversa. No molde convencional, o

*overhang* é de 2 mm e o teste realizado utilizou-se de um anel de isolamento com *overhang* de 0 mm.

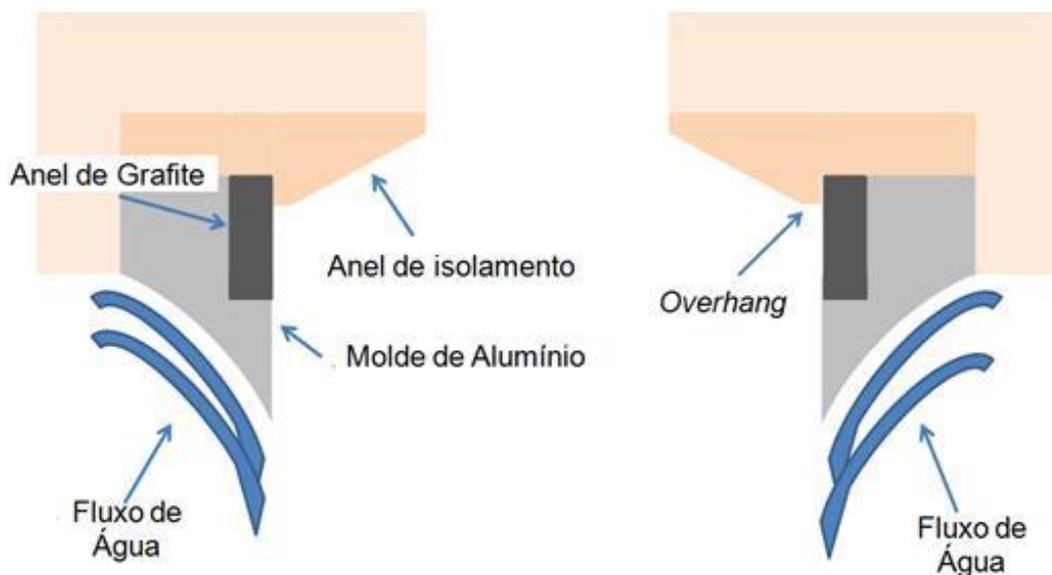


Figura 24 – Desenho esquemático do *overhang* do anel de isolamento.  
Fonte: Do autor.

Ainda segundo BERGMANN<sup>20</sup>, acredita-se que o *overhang* influencia na formação direta dos *meniscus band* assim que a superfície do metal vai se solidificando e a resistência do atrito entre o alumínio com o anel de isolamento vence a resistência superficial do alumínio solidificado (superfície), rompendo sua formação e penetrando assim o alumínio fundido para a extremidade do tarugo formando uma nova superfície de óxidos no produto conforme detalhado na Figura 25.

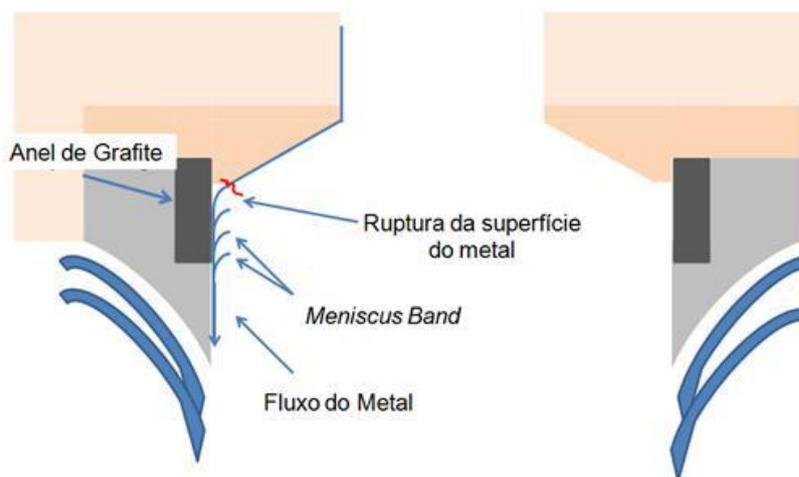


Figura 25 – Desenho esquemático da formação do *meniscus band*.  
Fonte: Do autor.

A Figura 26 mostra a diferença entre um anel de isolamento convencional e o anel de isolamento fabricado com 0 mm de *overhang* para os testes. O anel de isolamento para teste foi instalado na mesa de tarugos na primeira posição e foram realizadas 20 análises em um total de cinco tarugos.

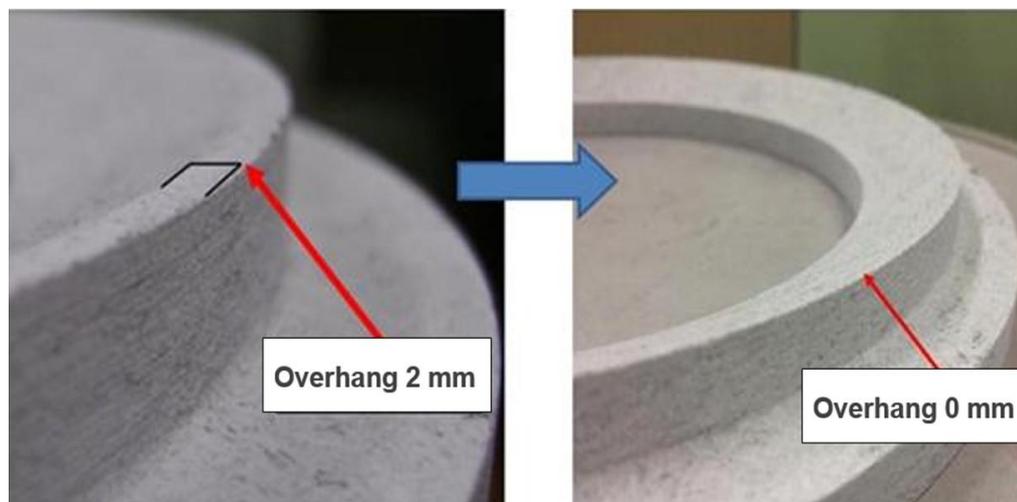


Figura 26 – Anel de isolamento com 2 mm e 0 mm de *overhang*.  
Fonte: Do autor.

#### 4.5 ETAPA 4: MUDANÇA NO MOLDE REFRACTÁRIO COM INTUITO DA MELHORA DO PREENCHIMENTO DE METAL NO MOLDE

No momento do preenchimento do molde com o metal existe uma zona morta (zona com ar) onde esta não é preenchida pelo metal aumentando a formação do *Meniscus Band*. Com o intuito de diminuir esta formação e diminuir o impacto deste na variável segregação inversa, foi realizada a mudança do ângulo de 23° com aumento de 5°, no recebimento do metal pelo anel de isolamento (Figura 27) com o objetivo de melhorar o fluxo de metal para o molde, conforme a Figura 28.

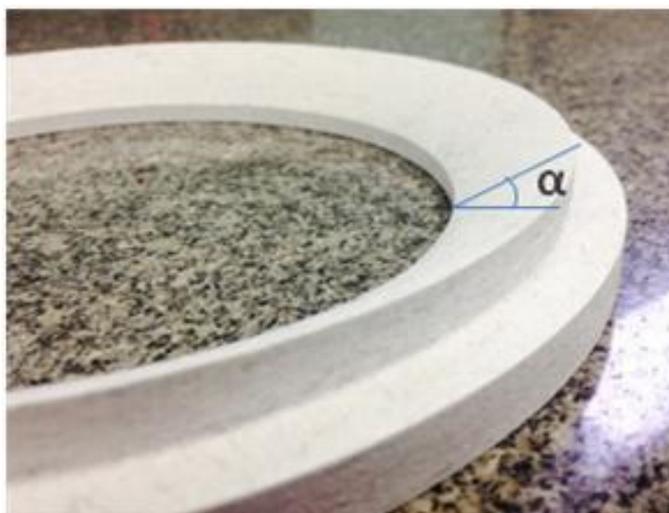


Figura 27 – Ângulo do anel de isolamento.  
Fonte: Do autor.

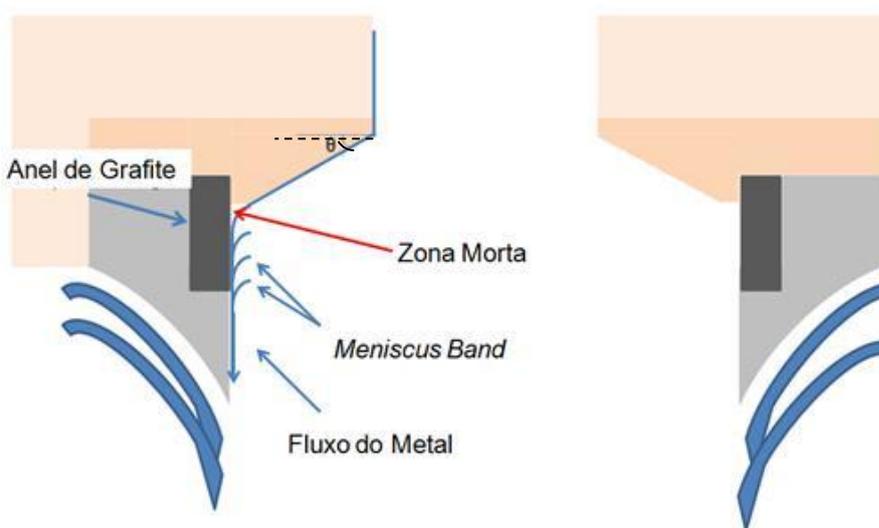


Figura 28 – Desenho esquemático da zona morta e ângulo do anel de isolamento no preenchimento do molde.  
Fonte: Do autor.

O molde diferenciado foi instalado na mesa de tarugos na primeira posição e foram realizadas 20 análises em um total de cinco tarugos.

#### 4.6 ETAPA 5: DIMINUIÇÃO DA ESPESSURA DO ANEL DE GRAFITE MAXIMIZANDO A TROCA DE CALOR MOLDE/METAL

Para maximizar a troca de calor entre o molde de alumínio no intuito de acelerar a solidificação e minimizar o crescimento da camada de refusão e

segregação inversa no tarugo, diminuiu-se a espessura do anel de grafite de 10 mm para 5 mm, conforme anel de grafite desenvolvido e demonstrado na Figura 29.



Figura 29 – Anel de grafite com 5 mm de largura.  
Fonte: Do autor.

O molde diferenciado foi instalado na mesa de tarugos na primeira posição e foram realizadas 20 análises em um total de cinco tarugos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ETAPA 1: MEDIÇÕES PADRÕES COM MOLDE ATUAL PARA COMPOSIÇÃO DA AMOSTRAGEM DE REFERÊNCIA

Nesta etapa foi realizado um levantamento de dados como base de comparação para os testes subsequentes. A Tabela 1 mostra os valores iniciais obtidos da camada de refusão e da segregação inversa. A análise estatística indicou que a camada de refusão e a segregação inversa assumem um modelo de distribuição normal ( $p\text{-value} > 0,05$ ) com 5% de significância, conforme mostrado nas Figuras 30 e 31.

Tabela 1 – Valores iniciais de camada de refusão e segregação inversa.

Amostra (#)	Análise (#)	Quadrante (#)	Camada de Refusão (mm)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )
1	1	1	1,49	1150
1	2	2	1,55	1080
1	3	3	1,37	1200
1	4	4	1,53	1050
2	5	1	1,53	1100
2	6	2	1,33	1112
2	7	3	1,50	1160
2	8	4	1,30	1115
3	9	1	1,50	1400
3	10	2	1,66	1200
3	11	3	1,63	1300
3	12	4	1,51	1205
4	13	1	1,41	1350
4	14	2	1,70	1600
4	15	3	1,74	1800
4	16	4	1,33	1700
5	17	1	1,32	1300
5	18	2	1,40	1500
5	19	3	1,65	1000
5	20	4	1,97	1400

Fonte: Do autor.

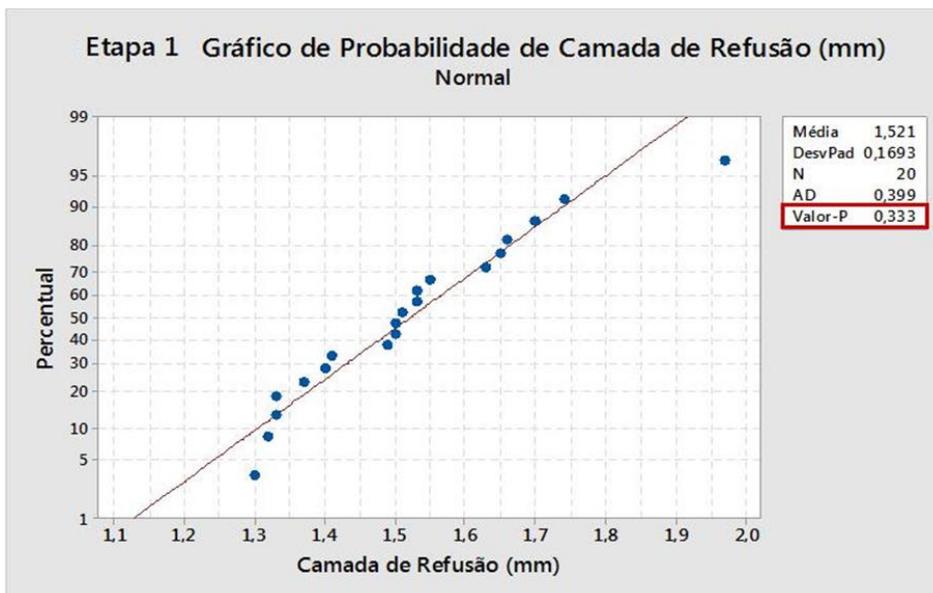


Figura 30 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 1.  
Fonte: Do autor.

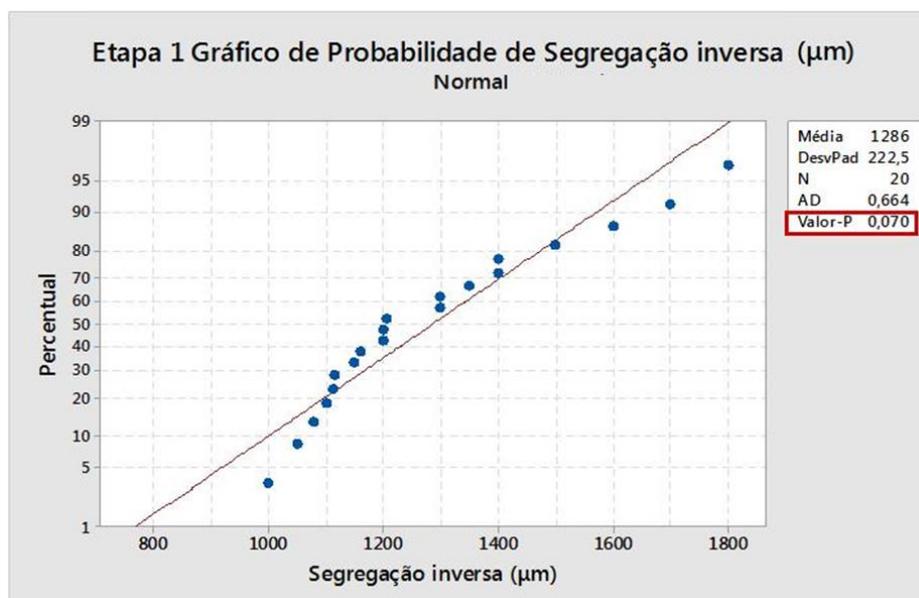


Figura 31 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 1.  
Fonte: Do autor.

Com o processo operacional estabilizado, a camada de refusão já apresenta uma capacidade potencial com valor de  $c_{pk}$  (índice de estabilização do processo dentro das especificações) de 1,15 com uma taxa de erro total em 285,59 ppm (partes por milhão) média de 1,521 mm e desvio padrão de 0,139 mm para o limite superior de especificação (LSE) em 1 mm, como mostrado na Figura 32.

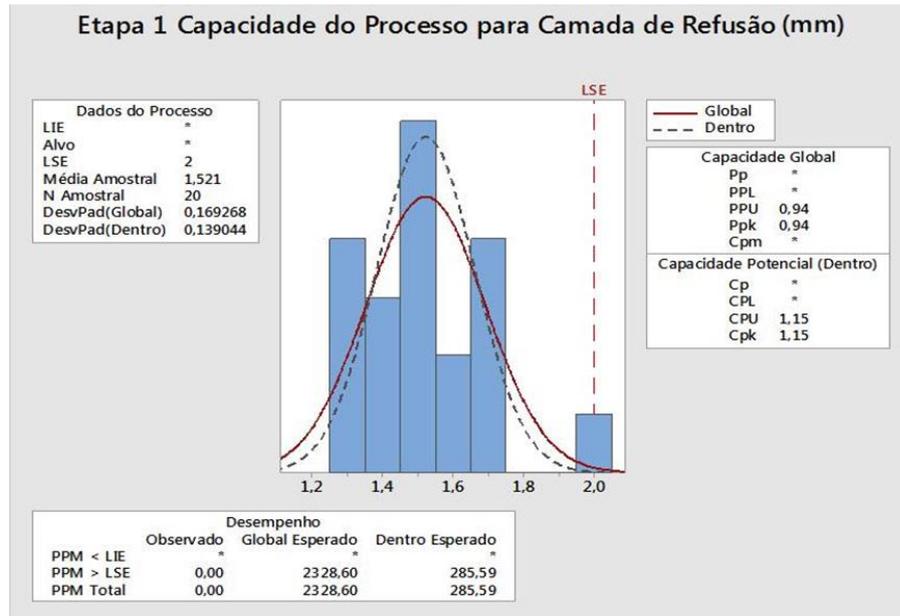


Figura 32 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 1.  
Fonte: Do autor.

Ao contrário da camada de refusão, a segregação inversa, mesmo com a operação estabilizada, apresentou um valor de  $c_{pk}$  em  $-0,82$ , ou seja, não é estatisticamente capaz de atender às especificações dos clientes tendo como valor da média amostral  $1286,1 \mu\text{m}$  e desvio padrão de  $222,5 \mu\text{m}$  (Figura 33). Nestes parâmetros o processo possui uma taxa de erro de  $992965 \text{ ppm}$ , ou seja, não atende às especificações desejadas de  $900 \mu\text{m}$ .

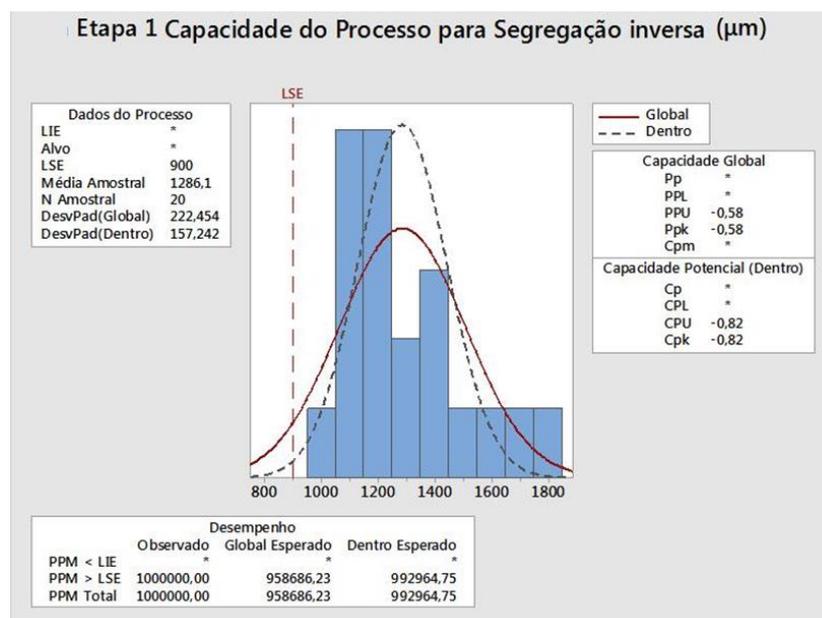


Figura 33 – Teste de capacidade da segregação inversa com  $900 \mu\text{m}$  de especificação etapa 1.  
Fonte: Do autor.

## 5.2 ETAPA 2: DIMINUIÇÃO DA DISTÂNCIA ENTRE A 1<sup>o</sup> e 2<sup>o</sup> SOLIDIFICAÇÃO DO TARUGO

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos da camada de refusão e da segregação inversa, após realização dos testes na mesa, com a diminuição da distância entre a primeira e a segunda solidificação do metal. Os valores da camada de refusão e segregação inversa diminuiram significativamente e observa-se que os mesmos apresentaram comportamento de distribuição normal (significância de 5%) com o teste de normalidade, conforme mostrado nas Figuras 34 e 35, respectivamente.

Tabela 2 – Valores da camada de refusão e segregação inversa após teste com a diminuição da distância entre a primeira e a segunda solidificação do metal - etapa 2.

Amostra (#)	Análise (#)	Quadrante (#)	Camada de Refusão (mm)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )
6	21	1	0,96	567
6	22	2	0,80	551
6	23	3	0,84	482
6	24	4	0,73	586
7	25	1	0,75	682
7	26	2	0,94	744
7	27	3	0,79	734
7	28	4	0,85	610
8	29	1	0,92	644
8	30	2	0,99	728
8	31	3	0,85	486
8	32	4	0,76	482
9	33	1	0,90	660
9	34	2	0,76	580
9	35	3	0,84	630
9	36	4	0,89	740
10	37	1	0,93	680
10	38	2	0,87	550
10	39	3	0,79	510
10	40	4	0,88	610

Fonte: Do autor.

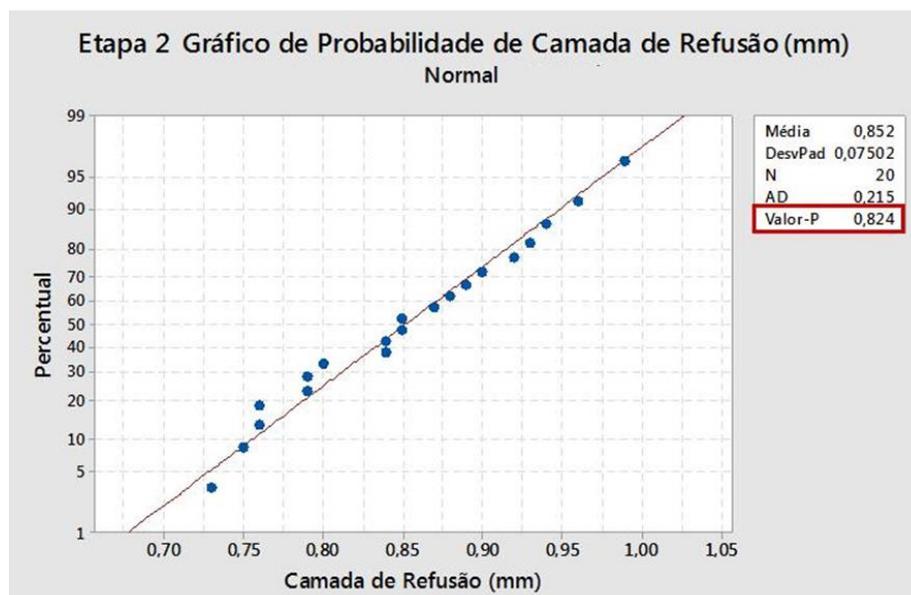


Figura 34 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 2.  
Fonte: Do autor.

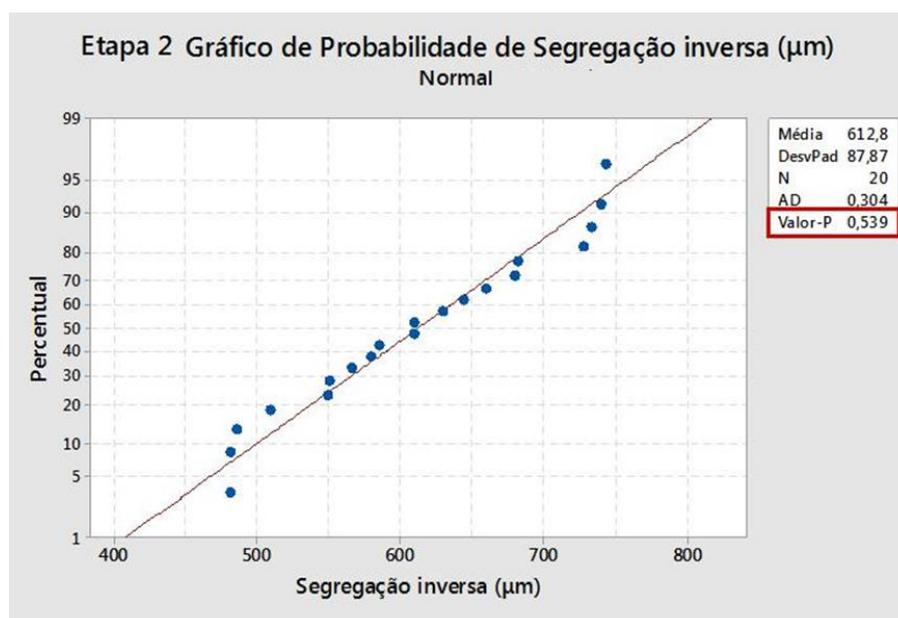


Figura 35 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 2.  
Fonte: Do autor.

Observando a análise da capacidade (Figuras 36 e 37) das camadas de refusão e segregação inversa, da etapa 2, verificou-se que as duas variáveis são totalmente capazes, tendo valores de  $c_{pk}$  4,61 e 1,29, respectivamente. O valor da média amostral da camada de refusão foi 0,852 mm com desvio padrão de 0,075 mm e erro de 0 ppm para a especificação de 2mm. A segregação inversa apresentou valores de média de 612,8  $\mu\text{m}$  e desvio padrão de 87,9  $\mu\text{m}$  com erro de

55,68 ppm para a especificação de 900  $\mu\text{m}$ . As duas variáveis apresentaram resultados significativos quanto aos valores desejados.

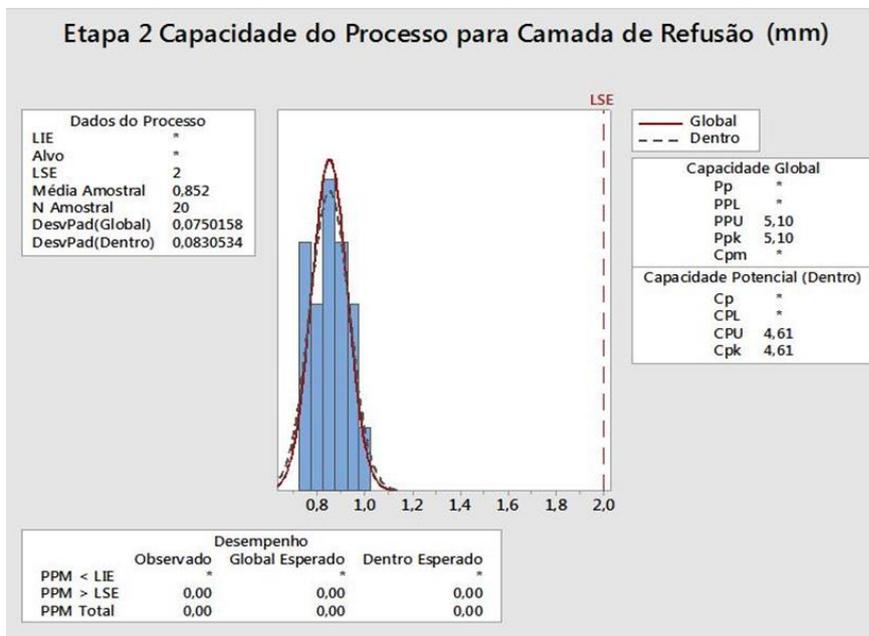


Figura 36 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 2.  
Fonte: Do autor.

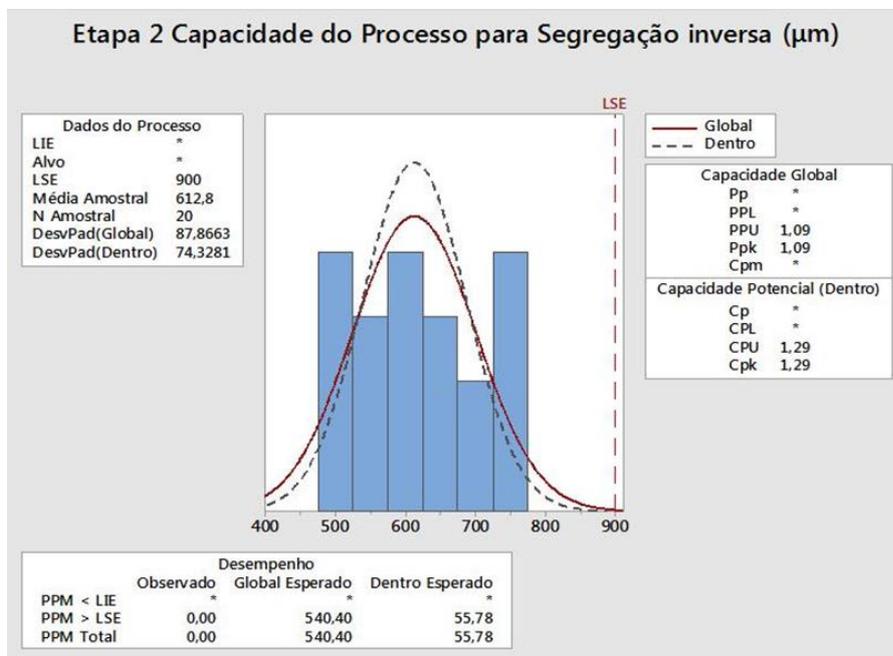


Figura 37 - Teste de capacidade da segregação inversa com 900  $\mu\text{m}$  de especificação etapa 2.  
Fonte: Do autor.

Os resultados das análises de “*boxplot*” geradas pelo *software* MiniTab, mostrados nas Figuras 38 e 39, indicam uma diferença entre os resultados das

Etapas 1 e 2, tanto para a variável da camada de refusão quanto para a variável da Segregação Inversa, respectivamente. O teste t comprova que há uma diferença estatística na média entre as duas amostragens (Tabelas 3 e 4), descartando a primeira hipótese (devido  $\text{Value-P} < 0,05$ ) onde os resultados sugerem que as médias dos dois grupos são estatisticamente iguais para ambas as variáveis.

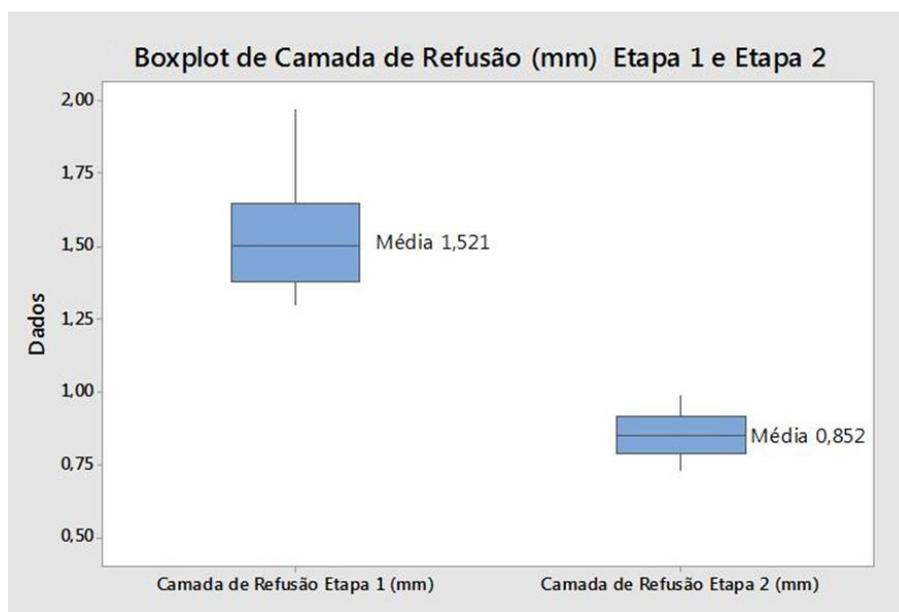


Figura 38 – *Boxplot* da camada de refusão da etapa 1 e etapa 2.  
Fonte: Do autor.

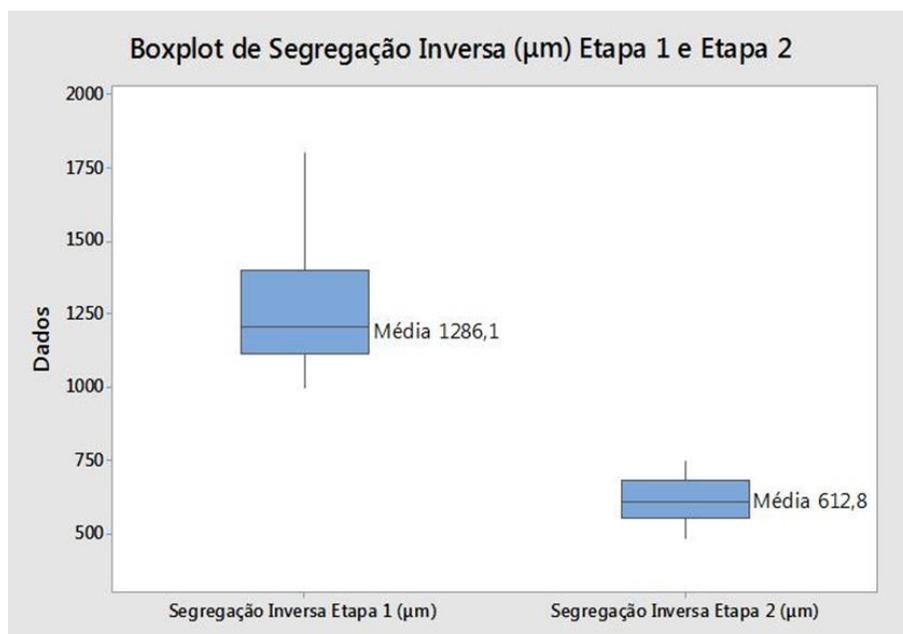


Figura 39 – *Boxplot* da segregação inversa da etapa 1 e etapa 2.  
Fonte: Do autor.

**Tabela 3 – Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 2.**

Teste T para 2 amostras para Camada de Refusão Etapa 1 (mm) vs Camada de Refusão Etapa 2 (mm)

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Camada de Refusão 1 Etapa	20	1,521	0,169		0,038
Camada de Refusão 2 Etapa	20	0,8520	0,0750		0,017

Diferença =  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 1 (mm)) -  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 2 (mm))

Estimativa para a diferença: 0,6690

IC de 95% para a diferença: (0,5839; 0,7541)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 16,16 Valor-P = 0,000 GL = 26

Fonte: Do autor.

**Tabela 4 - Teste t da segregação inversa etapa 1 e etapa 2.**

Teste T para 2 amostras para Segregação Inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ ) vs Segregação Inversa Etapa 2 ( $\mu\text{m}$ )

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Segregação Inversa Etapa 1	20	1286	222		50
Segregação Inversa Etapa 2	20	612,8	87,9		20

Diferença =  $\mu$  (Segregação Inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ )) -  $\mu$  (Segregação Inversa Etapa 2 ( $\mu\text{m}$ ))

Estimativa para a diferença: 673,3

IC de 95% para a diferença: (562,9; 783,7)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 12,59 Valor-P = 0,000 GL = 24

Fonte: Do autor.

### 5.3 ETAPA 3: MUDANÇA NO DESIGN DO MOLDE

Nesta etapa foi realizado a diminuição do *overhang* do anel de isolamento para 0 mm. Os valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa após mudança no design do molde estão mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa após mudança do *overhang* de 2mm para 0 mm etapa 3.

Amostra (#)	Análise (#)	Quadrante (#)	Camada de Refusão (mm)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )
11	41	1	0,96	567
11	42	2	0,80	551
11	43	3	0,84	482
11	44	4	0,73	586
12	45	1	0,75	670
12	46	2	0,94	682
12	47	3	0,79	744
12	48	4	0,85	734
13	49	1	0,92	610
13	50	2	0,99	644
13	51	3	0,85	728
13	52	4	1,16	486
14	53	1	1,11	482
14	54	2	1,15	660
14	55	3	1,05	605
14	56	4	1,02	649
15	57	1	0,97	706
15	58	2	0,85	763
15	59	3	0,92	525
15	60	4	1,02	596

Fonte: Do autor.

Os testes de normalidade realizados (Figuras 40 e 41) por meio do *software* MiniTab 17.1 sugerem que na Etapa 3, os dados também apresentam um comportamento de distribuição normal (significância de 5%).

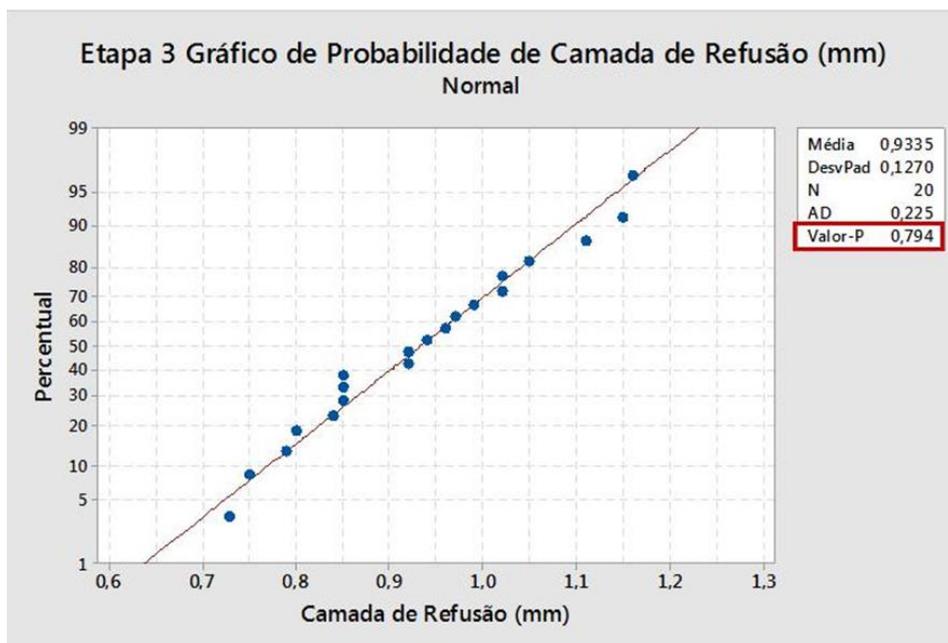


Figura 40 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 3.  
Fonte: Do autor.

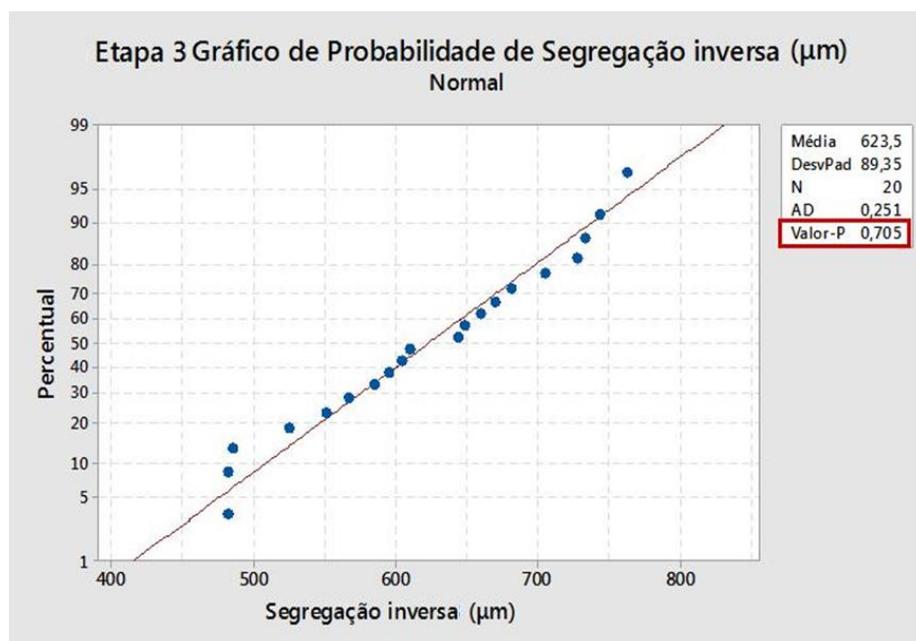


Figura 41 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 3.  
Fonte: Do autor.

Para os testes de capacidade do processo (Figuras 42 e 43) a camada de refusão e a segregação inversa possuem boa capacidade para atender o processo com índices de  $c_{pk}$  de 4,05 e 1,28, respectivamente, apresentando como médias amostrais 0,934 mm com desvio padrão de 0,127 mm e erro de 0 ppm para a

camada de refusão (especificação em 2 mm) e 623,5  $\mu\text{m}$ , desvio padrão de 89,4  $\mu\text{m}$  e erro de 62,64 ppm para a segregação inversa (especificação em 900  $\mu\text{m}$ ).

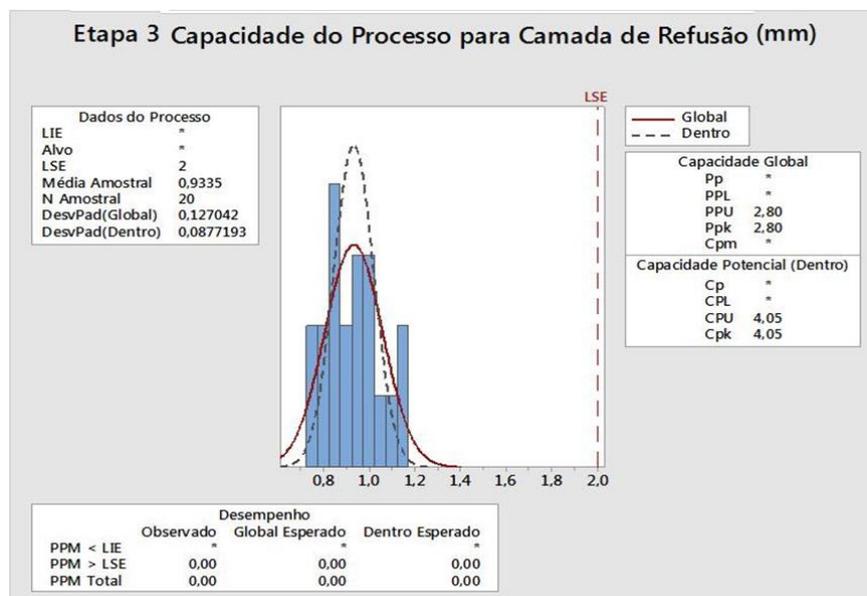


Figura 42 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 3.  
Fonte: Do autor.

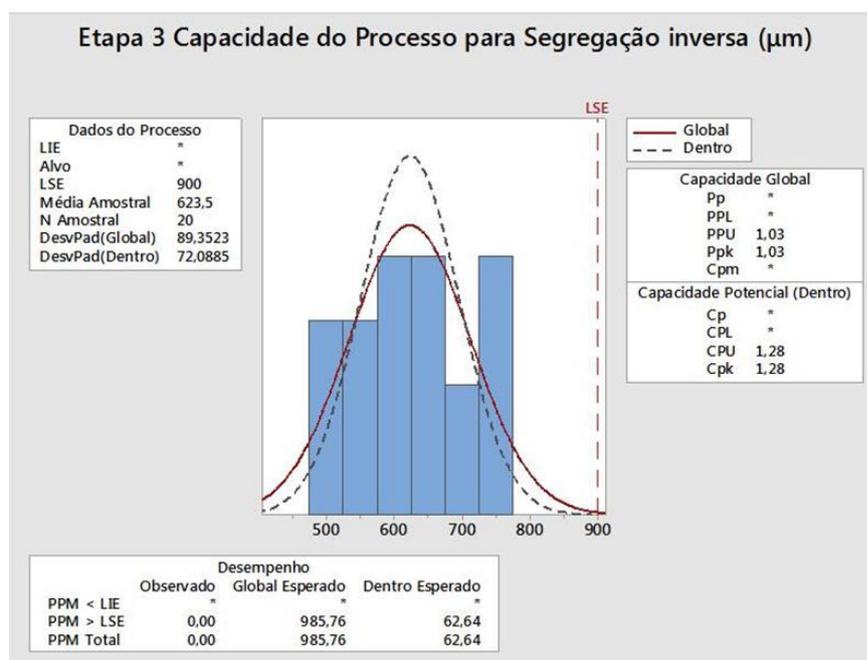


Figura 43 - Teste de capacidade da segregação inversa com 900  $\mu\text{m}$  de especificação etapa 3.  
Fonte: Do autor.

Assim como na etapa 2, a análise dos resultados por meio “*boxplot*” geradas pelo *software* MiniTab - 17.1 (Figuras 44 e 45), também apresenta uma diferença entre as Etapas 1 e 3, tanto para a variável da camada de refusão quanto para a

variável da segregação inversa. O teste t comprova que há uma diferença estatística da média entre as duas amostragens (Tabelas 6 e 7) descartando a primeira hipótese onde assume que as médias dos dois grupos são estatisticamente iguais tanto para a camada de refusão quanto para a segregação inversa.

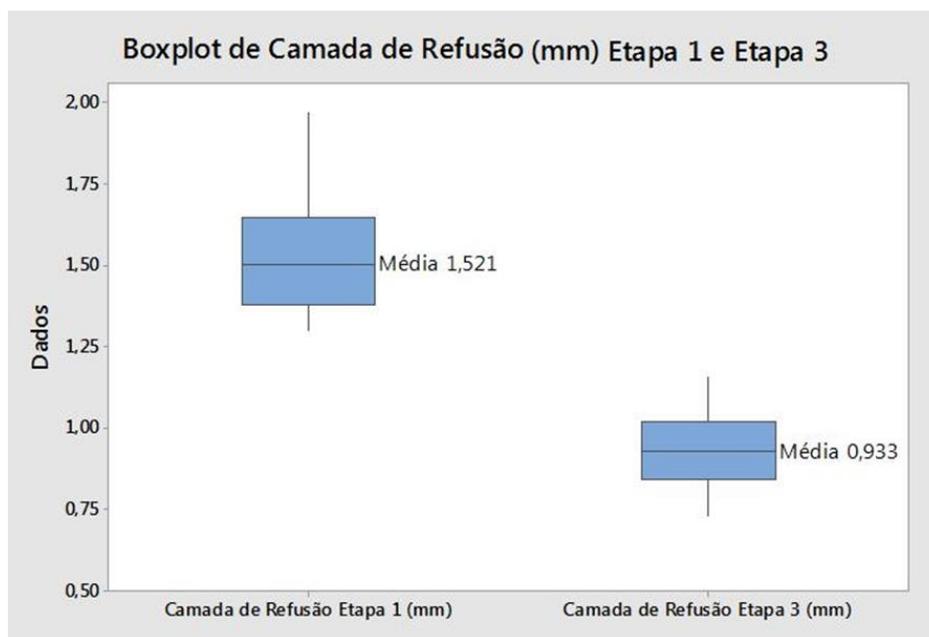


Figura 44 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 3.  
Fonte: Do autor.

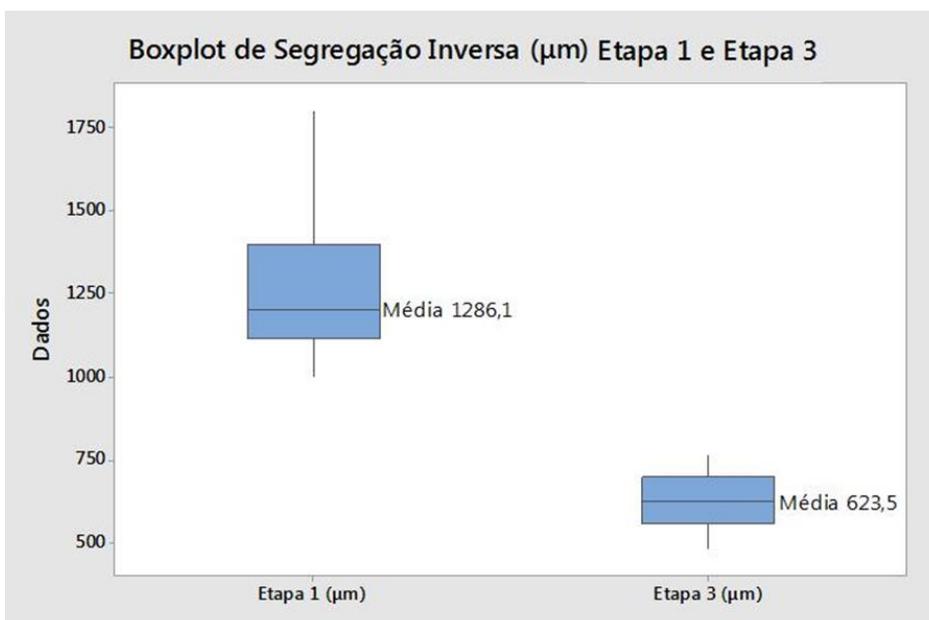


Figura 45 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 3.  
Fonte: Do autor.

**Tabela 6 – Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 3.**

Teste T para 2 amostras para Camada de Refusão Etapa 1 (mm) vs Camada de Refusão Etapa 3 (mm)

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Camada de Refusão Etapa 1	20	1,521	0,169		0,038
Camada de Refusão Etapa 3	20	0,934	0,127		0,028

Diferença =  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 1 (mm)) -  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 3 (mm))

Estimativa para a diferença: 0,5875

IC de 95% para a diferença: (0,4914; 0,6836)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 12,41 Valor-P = 0,000 GL = 35

Fonte: Do autor.

**Tabela 7 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 3.**

Teste T para 2 amostras para Segregação Inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ ) vs Segregação Inversa Etapa 3 ( $\mu\text{m}$ )

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Segregação Inversa Etapa 1	20	1286	222		50
Segregação Inversa Etapa 3	20	623,5	89,4		20

Diferença =  $\mu$  (Segregação Inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ )) -  $\mu$  (Segregação Inversa Etapa 3 ( $\mu\text{m}$ ))

Estimativa para a diferença: 662,6

IC de 95% para a diferença: (552,0; 773,2)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 12,36 Valor-P = 0,000 GL = 24

Fonte: Do autor.

#### 5.4 ETAPA 4: MUDANÇA NO MOLDE REFRAATÁRIO COM INTUITO DA MELHORA DO PREENCHIMENTO DE METAL NO MOLDE

Para melhorar o preenchimento do metal no molde, realizou-se a mudança do ângulo de recebimento do metal pelo anel de isolamento, com aumento de 5°.

Os valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa para os testes com mudança no molde refratário na etapa 4, estão mostrados na Tabela 8. Observa-se que, da mesma forma que as outras etapas, a etapa 4 também apresenta o comportamento de curva normal para a camada de refusão quanto para a segregação inversa, assim como mostrada nas Figuras 46 e 47.

Tabela 8 – Valores obtidos para a camada de refusão e segregação inversa para os testes com mudança no molde refratário - etapa 4.

Amostra (#)	Análise (#)	Quadrante (#)	Camada de Refusão (mm)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )
16	61	1	1,65	1200
16	62	2	1,65	1250
16	63	3	1,70	1200
16	64	4	1,40	1540
17	65	1	1,50	1210
17	66	2	1,50	1200
17	67	3	1,50	1540
17	68	4	2,00	1100
18	69	1	1,70	1300
18	70	2	1,75	1000
18	71	3	2,00	1050
18	72	4	1,15	1165
19	73	1	1,35	1100
19	74	2	1,40	1100
19	75	3	1,40	1150
19	76	4	1,49	1450
20	77	1	1,25	890
20	78	2	1,51	1030
20	79	3	1,20	1300
20	80	4	1,30	1100

Fonte: Do autor.

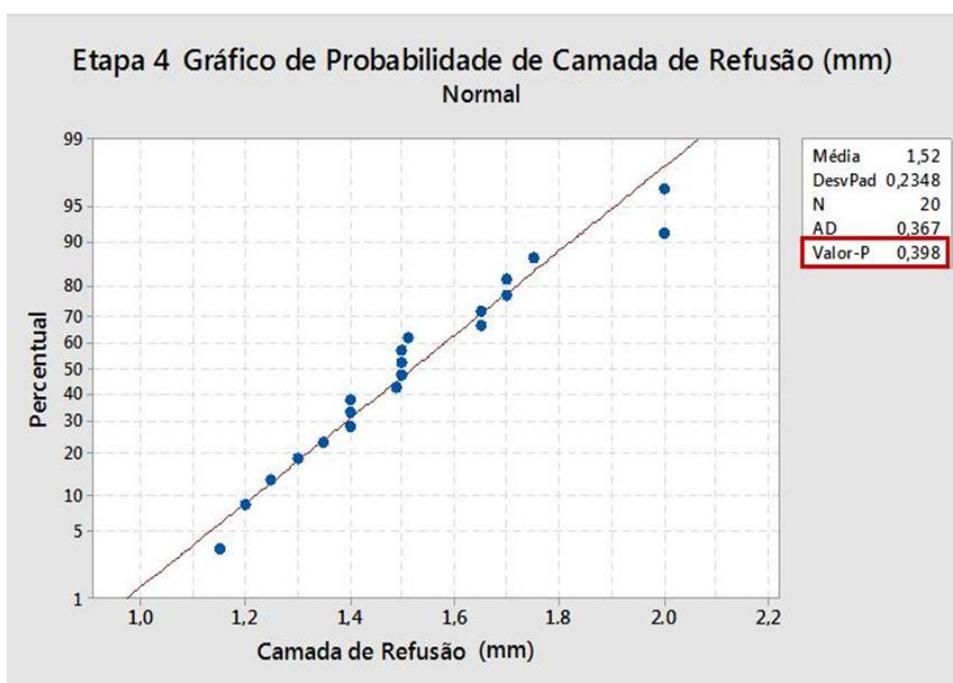


Figura 46 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 4.

Fonte: Do autor.

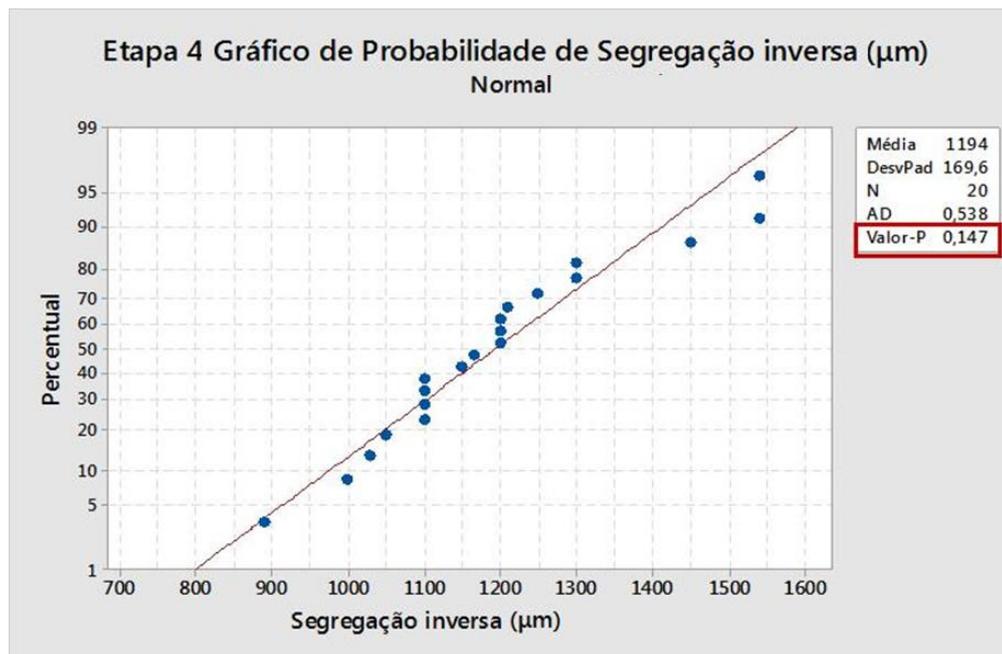


Figura 47 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 4.  
Fonte: Do autor.

Visualizando a Figura 48 percebe-se claramente que a camada de refusão possui um bom controle de capacidade atendendo a especificação desejada com um  $cpk$  de 0,94 com uma média amostral de 1,520 mm, desvio padrão de 0,235 mm e erro de 2412,77 ppm, porém a segregação inversa (Figura 49) não é capaz de atender à especificação de 900  $\mu\text{m}$  uma vez que seu  $cpk$  possui valor -0,55 com uma média amostral acima do especificado de 1193,8  $\mu\text{m}$ , desvio padrão de 169,7  $\mu\text{m}$  e erro de 950773,64 ppm.

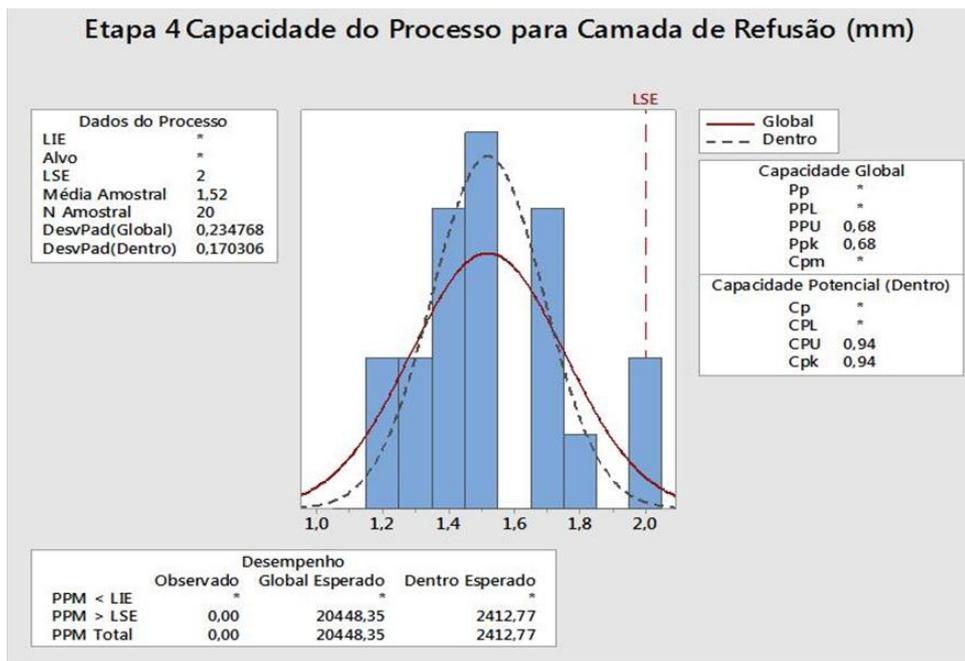


Figura 48 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa.  
Fonte: Do autor.

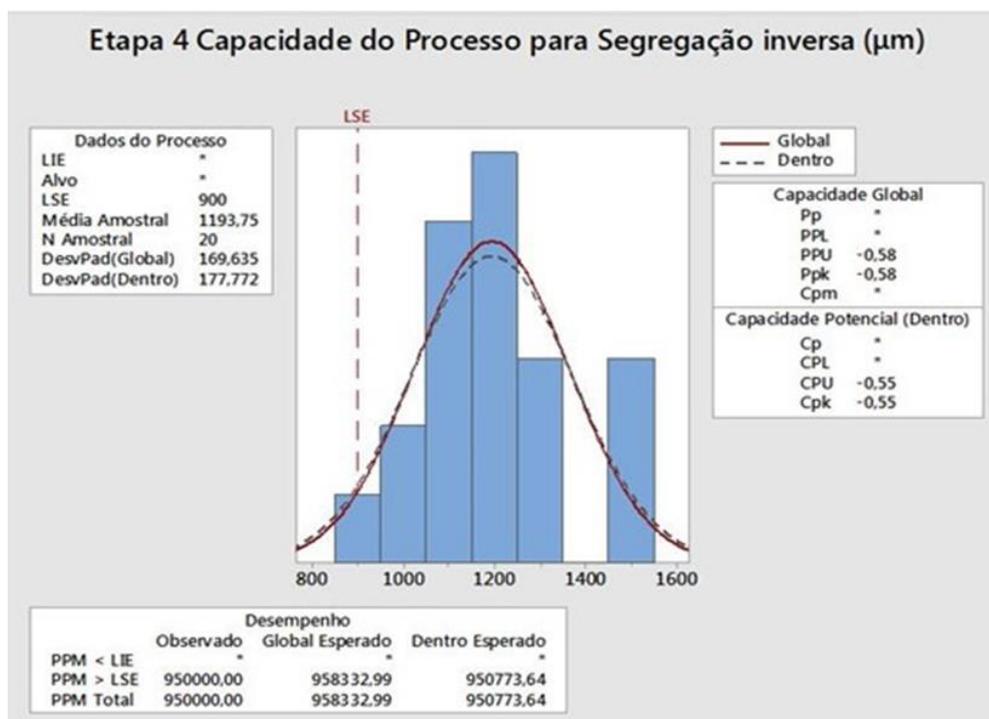


Figura 49 - Teste de capacidade da segregação inversa com 900 µm de especificação etapa 4.  
Fonte: Do autor.

Na etapa 4, nas Figuras 50 e 51 de “boxplot”, verifica-se visualmente que não existe uma diferença entre a etapa 1 e a etapa 4, tanto para a variável da camada de refusão quanto para a variável da segregação inversa, o que é confirmado com o teste t, onde as médias são estatisticamente iguais para duas amostras. O teste t comprova que não há uma diferença estatística da média entre as duas amostragens

(Tabelas 9 e 10) aceitando a primeira hipótese onde assume-se que as médias dos dois grupos são estatisticamente iguais tanto para a camada de refusão quanto para a segregação inversa.

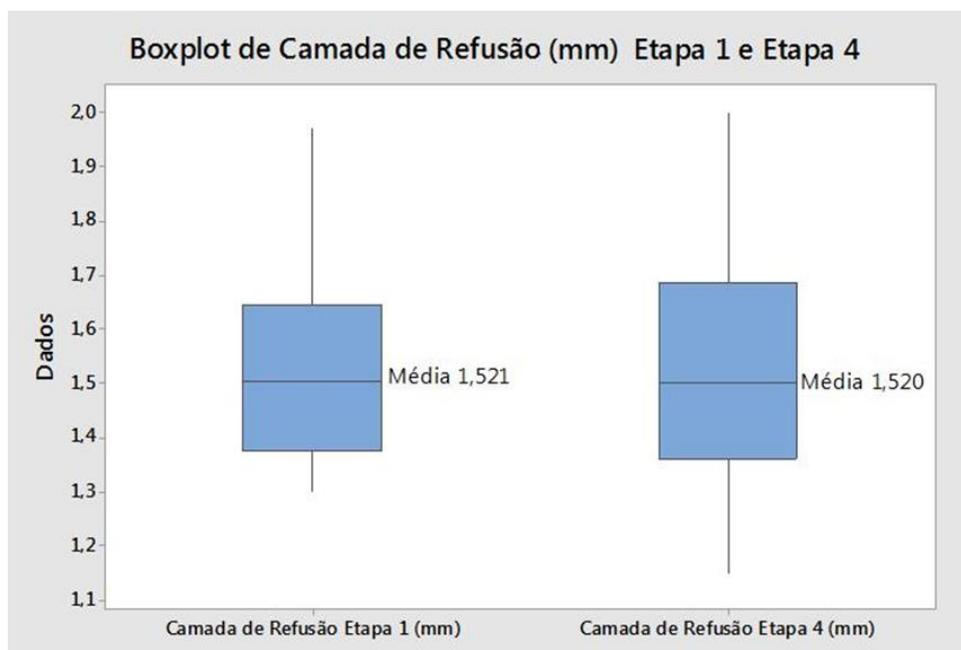


Figura 50 – *Boxplot* da camada de refusão etapa 1 e etapa 4.  
Fonte: Do autor.

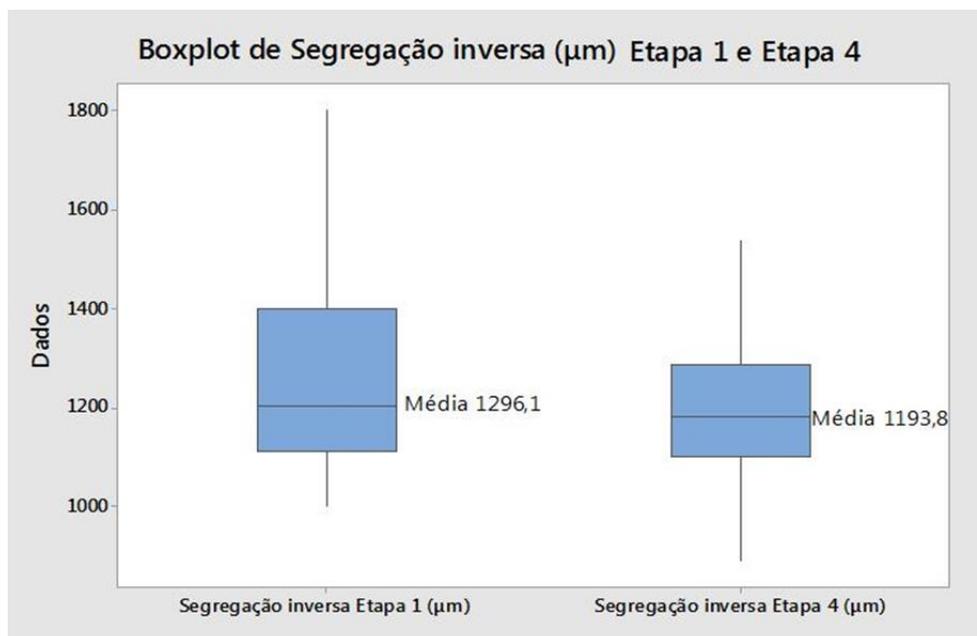


Figura 51 – *Boxplot* da segregação inversa etapa 1 e etapa 4.  
Fonte: Do autor.

Tabela 9 – Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 4.

Teste T para 2 amostras para Camada de Refusão Etapa 1 (mm) vs Camada de Refusão Etapa 4 (mm)

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Camada de Refusão Etapa 1	20	1,521	0,169		0,038
Camada de Refusão Etapa 4	20	1,520	0,235		0,052

Diferença =  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 1 (mm)) -  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 4 (mm))

Estimativa para a diferença: 0,0010

IC de 95% para a diferença: (-0,1305; 0,1325)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 0,02 Valor-P = 0,988 GL = 34

Fonte: Do autor.

Tabela 10 - Teste t da segregação inversa para duas amostras etapa 1 e etapa 4.

Teste T para 2 amostras para Segregação inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ ) vs Segregação inversa Etapa 4 ( $\mu\text{m}$ )

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Segregação inversa Etapa 1	20	1286	222		50
Segregação inversa Etapa 4	20	1194	170		38

Diferença =  $\mu$  (Segregação inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ )) -  $\mu$  (Segregação inversa Etapa 4 ( $\mu\text{m}$ ))

Estimativa para a diferença: 92,3

IC de 95% para a diferença: (-34,6; 219,3)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 1,48 Valor-P = 0,149 GL = 35

Fonte: Do autor.

## 5.5 ETAPA 5: DIMINUIÇÃO DA ESPESSURA DO ANEL DE GRAFITE MAXIMIZANDO A TROCA DE CALOR MOLDE/METAL

Assim como as outras etapas, nesta última onde utilizou-se do anel de grafite com 5 mm de espessura, foi obtido um total de 20 amostras, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores da camada de refusão e segregação inversa para os testes com a diminuição da espessura do anel de grafite - etapa 5.

Amostra (#)	Análise (#)	Quadrante (#)	Camada de Refusão (mm)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )
21	81	1	1,66	1050
21	82	2	1,35	1650
21	83	3	1,43	1450
21	84	4	1,63	1550
22	85	1	1,56	1260
22	86	2	1,61	1150
22	87	3	1,66	1150
22	88	4	1,32	850
23	89	1	1,47	800
23	90	2	1,29	1350
23	91	3	2,12	1250
23	92	4	1,85	1450
24	93	1	1,47	1500
24	94	2	1,39	1550
24	95	3	1,38	1250
24	96	4	1,25	1570
25	97	1	1,79	1150
25	98	2	1,87	1450
25	99	3	1,60	1250
25	100	4	1,43	1450

Fonte: Do autor.

Pelo teste de normalidade percebe-se que os dados mensurados na etapa 5, tanto para camada de refusão quanto para a segregação inversa apresentam o comportamento normal com uma significância de 5% (Figuras 52 e 53).

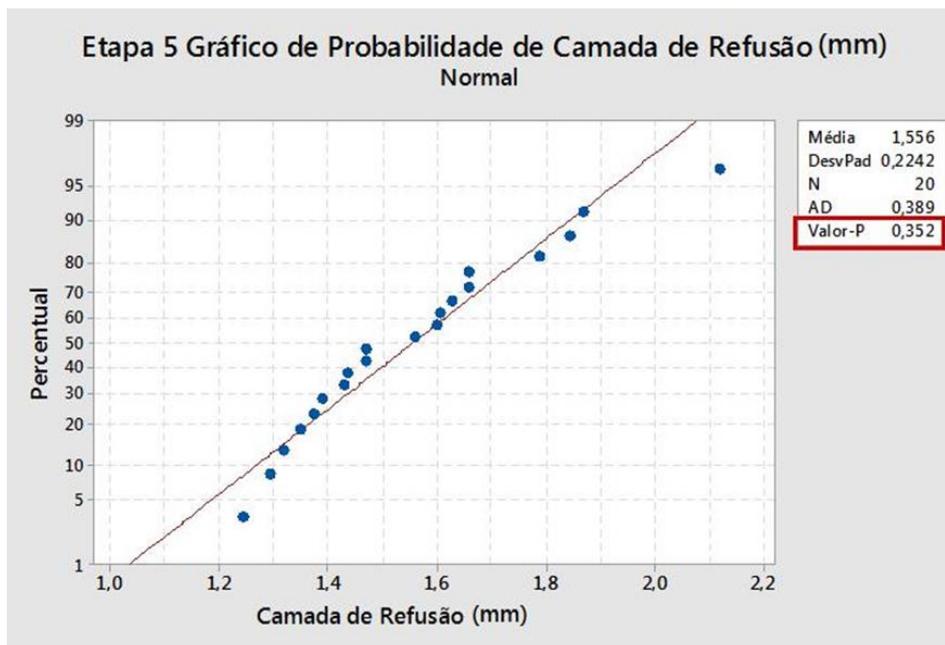


Figura 52 – Teste de normalidade da camada de refusão etapa 5.  
Fonte: Do autor.

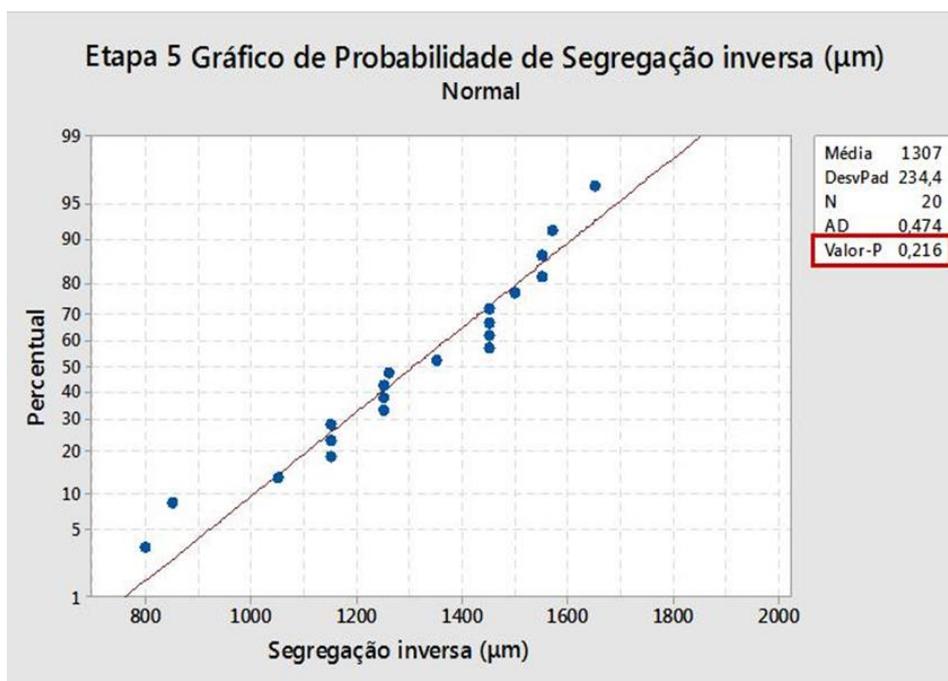


Figura 53 – Teste de normalidade da segregação inversa etapa 5  
Fonte: Do autor.

Quanto à capacidade de controle do processo (Figura 54) observa-se que a camada de refusão não possui um bom controle de capacidade para atender a especificação desejada de 2, mm com um  $c_{pk}$  de 0,76, com uma média amostral de 1,556 mm com desvio padrão de 0,224 mm e erro em 14990,27 ppm. Assim como a segregação inversa, representada pela Figura 55, não atende a especificação de

900  $\mu\text{m}$  uma vez que seu cpk possui valor -0,67 com uma média amostral acima do especificado de 1306,5  $\mu\text{m}$ , desvio padrão de 234,4  $\mu\text{m}$  e erro de 977646,36 ppm.

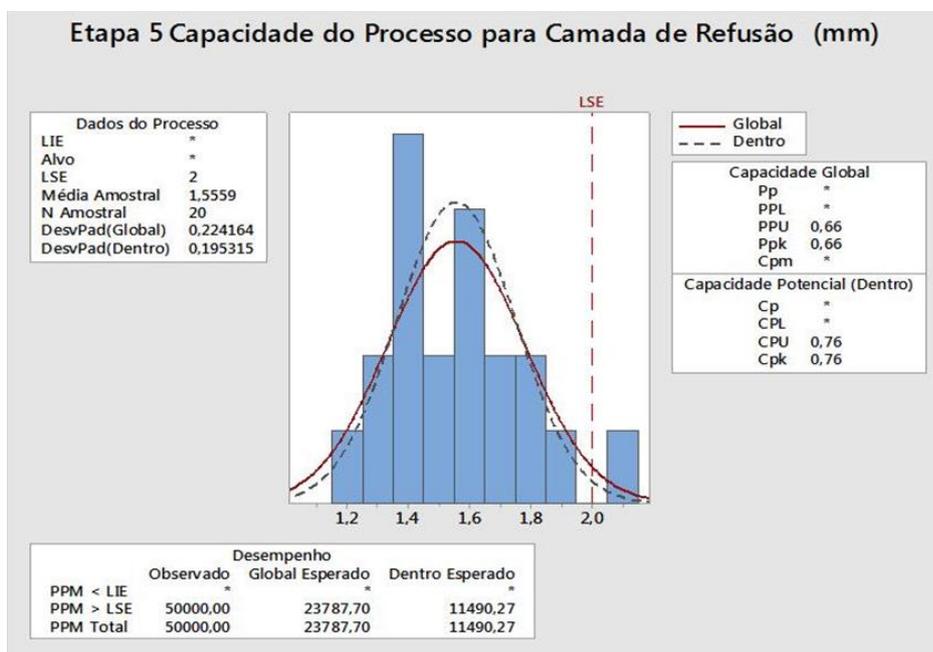


Figura 54 – Teste de capacidade da camada de refusão com 2 mm de especificação etapa 5.  
Fonte: Do autor.

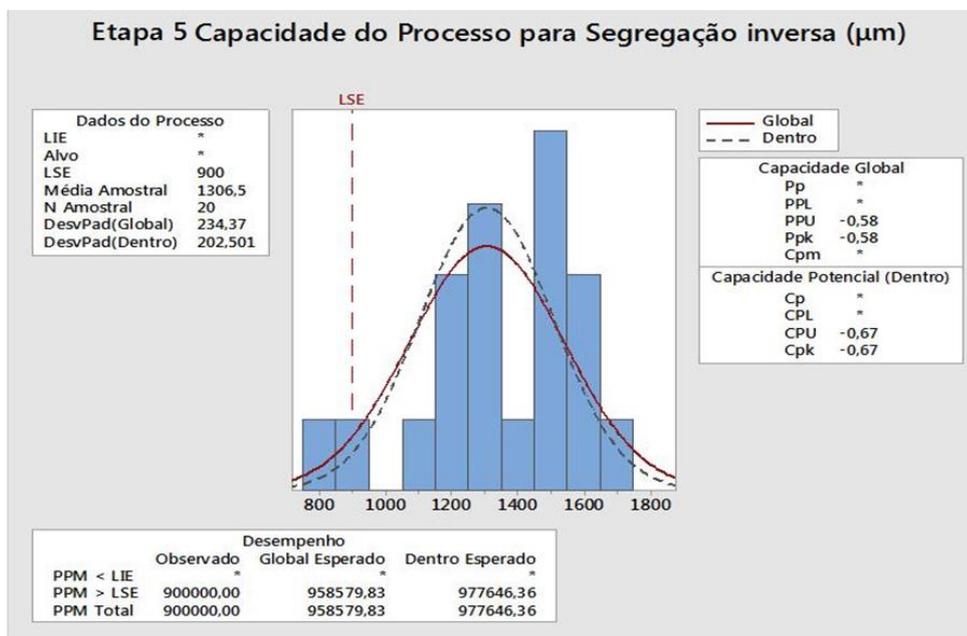


Figura 55 – Teste de capacidade da segregação inversa com 900  $\mu\text{m}$  de especificação etapa 5.  
Fonte: Do autor.

Na etapa 5, assim como na etapa 4, a análise dos resultados mostrados nas Figuras 56 e 57 de “*boxplot*”, verifica-se que a diferença entre as amostras da Etapa 1 e Etapa 5 são pequenas tanto para a variável da camada de refusão quanto para a

variável da segregação inversa, o que é confirmado com o teste t (Tabelas 12 e 13) onde as médias amostrais podem ser comparadas como estatisticamente iguais.

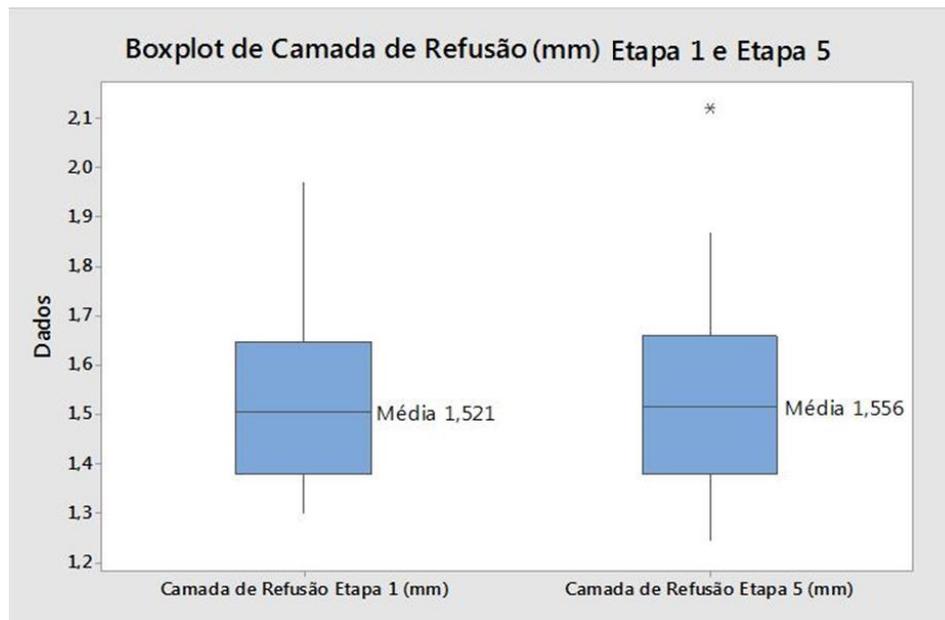


Figura 56 – Boxplot da camada de refusão da etapa 1 e etapa 5.  
Fonte: Do autor.

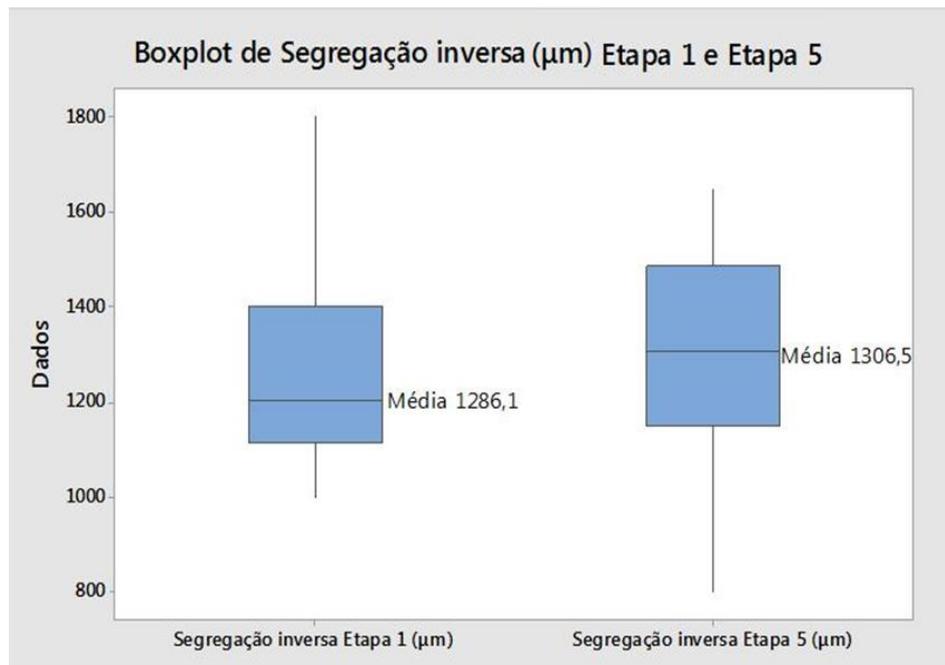


Figura 57 – Boxplot da segregação inversa da etapa 1 e etapa 5.  
Fonte: Do autor.

Tabela 12 – Teste t da camada de refusão para duas amostras etapa 1 e etapa 5.

---

Teste T para 2 amostras para Camada de Refusão Etapa 1 (mm) vs Camada de Refusão Etapa 5 (mm)

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Camada de Refusão Etapa 1	20	1,521	0,169		0,038
Camada de Refusão Etapa 5	20	1,556	0,224		0,050

Diferença =  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 1 (mm)) -  $\mu$  (Camada de Refusão Etapa 5 (mm))

Estimativa para a diferença: -0,0349

IC de 95% para a diferença: (-0,1624; 0,0926)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= -0,56 Valor-P = 0,582 GL = 35

---

Fonte: Do autor.

Tabela 13 – Teste t da segregação inversa para duas amostras gerado pelo *software MiniTab 17.1* entre etapa 1 e etapa 5.

---

Teste T para 2 amostras para Segregação inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ ) vs Segregação inversa Etapa 5 ( $\mu\text{m}$ )

	N	Média	DesvPad	EP	Média
Segregação inversa Etapa 1	20	1286	222		50
Segregação inversa Etapa 5	20	1307	234		52

Diferença =  $\mu$  (Segregação inversa Etapa 1 ( $\mu\text{m}$ )) -  $\mu$  (Segregação inversa Etapa 5 ( $\mu\text{m}$ ))

Estimativa para a diferença: -20,4

IC de 95% para a diferença: (-166,8; 126,0)

Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= -0,28 Valor-P = 0,779 GL = 37

---

Fonte: Do autor.

## 5.6 RESULTADOS FINAIS

A Tabela 14 mostra as médias dos resultados finais de todas as etapas, assim como suas variações em relação a etapa 1.

Tabela 14 – Valores médios das 5 etapas realizadas da camada de refusão e segregação inversa assim como sua melhoria em relação à etapa 1.

Etapa (#)	Camada de Refusão (mm)	Melhoria (%)	Segregação Inversa ( $\mu\text{m}$ )	Melhoria (%)
1	1,521	-	1286,0	-
2	0,852	43,98	612,8	52,35
3	0,934	38,59	623,5	51,52
4	1,520	0,06	1194,0	7,15
5	1,556	-2,30	1307,0	-1,63

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos indicaram que o melhor resultado alcançado com a camada de refusão foi com os testes realizados na etapa 2, seguido pela etapa 3. Os resultados alcançados foram na ordem de uma camada de refusão saindo de valores de um cpk de 1,15 com média de 1,521 mm, desvio padrão de 0,139 mm e taxa de erro total em 285,59 ppm para um cpk de 4,61, média de 0,852 mm com desvio padrão de 0,075 mm e erro de 0 ppm, ou seja, uma melhoria na variável em média de 43,98%, como mostrado na Figura 58.

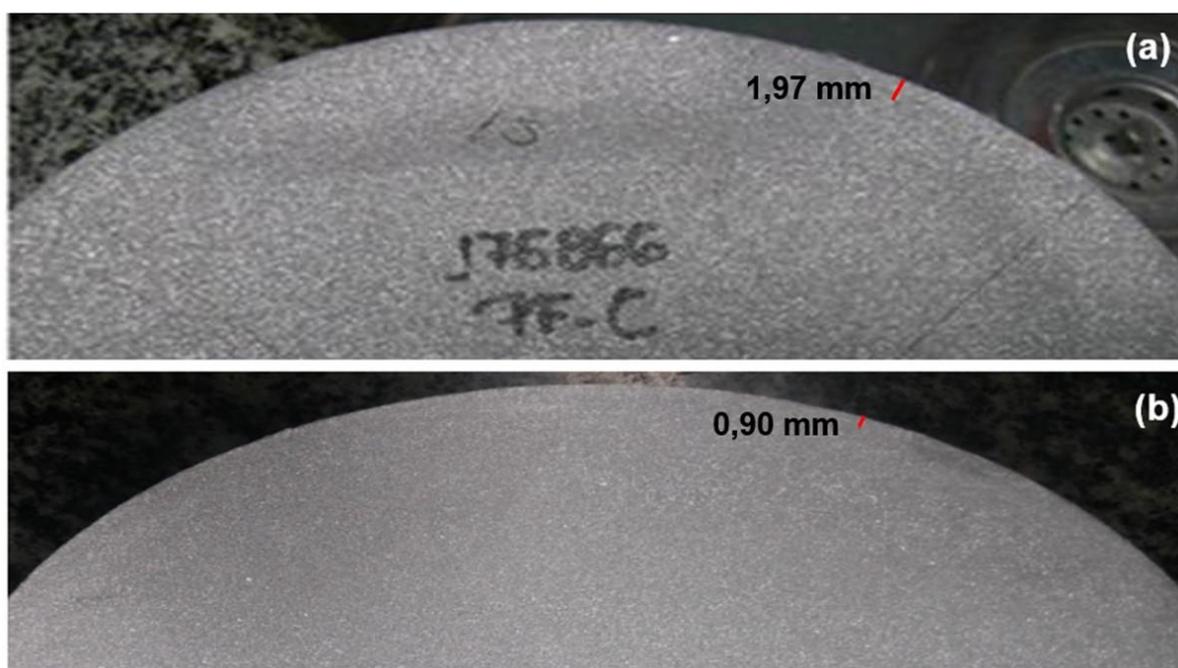


Figura 58 – Macrografias da camada de refusão, indicadas pelas linhas vermelhas (a) da etapa 1 e (b) da etapa 2.

Fonte: Do autor.

A Figura 59 demonstra a medição da camada de refusão com um paquímetro.



Figura 59 – Medição da camada de refusão de um tarugo com paquímetro.  
Fonte: Do autor.

Assim como na camada de refusão, os mesmos ganhos foram atingidos para a segregação inversa, sendo o melhor resultado alcançado na etapa 2, seguido pela etapa 3, e tendo valores de  $cpk$  saindo de -0,82, com média de 1286,1  $\mu\text{m}$ , desvio padrão de 222,5  $\mu\text{m}$  e erro de 992965 ppm, não atingindo a especificação para valores de 1,29 de  $cpk$ , média de 612,8  $\mu\text{m}$ , desvio padrão de 87,9  $\mu\text{m}$  e um erro de 55,68 ppm, atendendo à especificação em uma melhoria na variável de 52,35% (Figura 60).

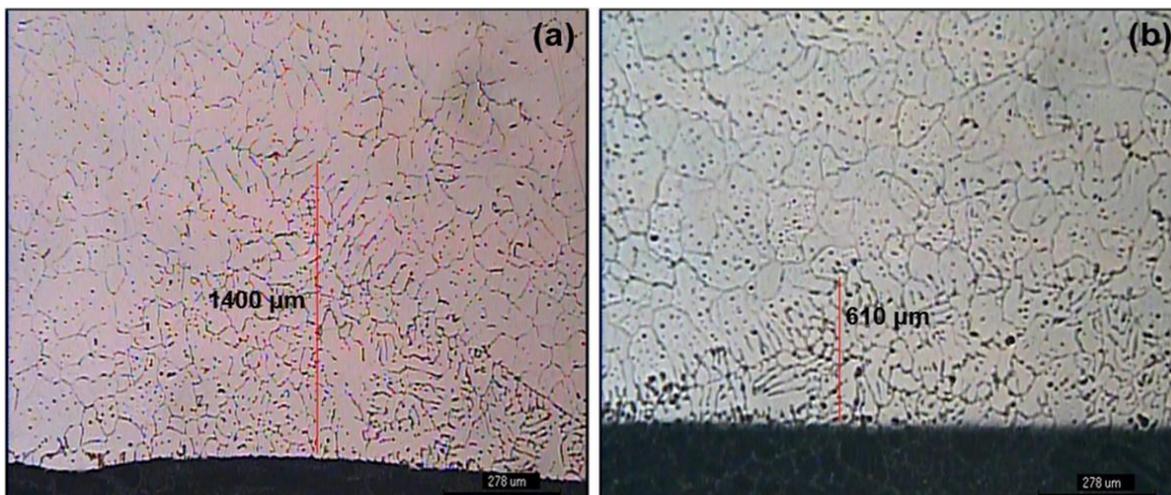


Figura 60 – Micrografias da segregação inversa indicadas pelas linhas vermelhas (a) da etapa 1 e (b) da etapa 2. Fonte: Do autor.

Verificando-se os resultados alcançados nas etapas 4 e 5, pode-se afirmar que os testes realizados nestas etapas não obtiveram sucesso, tendo baixíssimas variações na camada de refusão e segregação inversa, e como na etapa 5 tendo resultados até piores.

Os resultados obtidos com os testes 2 e 3 indicaram também que a variação entre os resultados dos dois testes é mínima, podendo optar pelo teste 3 devido seu baixo custo de investimento. O investimento necessário para executar a etapa 2 em todos os moldes como criação de novos anéis de grafite, anéis de isolamento e usinagem de todos os moldes de alumínio é alto e trabalhoso.

Na etapa 3 do trabalho, os resultados da camada de refusão alcançados saíram de um patamar de cpk de 1,15 com média de 1,521 mm, desvio padrão de 0,139 mm e taxa de erro total em 285,59 ppm para um cpk de 0,934 mm com desvio padrão de 0,127 mm e erro de 0 ppm, uma melhoria na variável de 38,59%, apenas 5,39% de diferença da etapa 2, porém com taxa de erro de 0 ppm atendendo a especificação.

A segregação inversa na etapa 3 continua a ter ganhos significativos e estatisticamente iguais a etapa 2, saindo de um cpk de -0,82, com média de 1286,1 μm, desvio padrão de 222,5 μm e erro de 992965 ppm não atingindo a especificação para valores de 1,28 de cpk, média de 623,5 μm, desvio padrão de 89,4 μm e um erro de 62,64 ppm, atendendo a especificação com uma melhoria na variável de 51,52%.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se no trabalho que o melhor resultado alcançado foi na etapa 2, porém o resultado na etapa 3 apresentou melhorias tão significativas quanto na etapa anterior.

A modificação de moldes para implementar um processo com uso de moldes como na etapa 2 é muito trabalhoso e de alto custo de modificação em comparação com as modificações realizadas na etapa 3 (baixo custo).

As etapas 4 e 5 não apresentaram dados diferentes estatisticamente em comparação à etapa 1.

Conclui-se que a Etapa 3 é a modificação mais viável a se implementar uma vez que seus resultados são iguais estatisticamente para a segregação inversa comprovados pelo teste t de 2 amostras enquanto a camada de refusão apresenta-se dentro da especificação proposta (média de 0,923 mm).

## 7 SUGESTÕES

Sugere-se para próximos trabalhos realizar as etapas 2 e 3 em um só molde e verificar a interação das alterações em conjunto.

Sugere-se ainda aplicar uma pasta à base de um metal condutor térmico (ouro, prata, cobre) na interface entre o anel de isolamento e o anel de grafite minimizando o meio isolante constituído de ar.

## REFERÊNCIAS

- [1] NAUTILUS. Tabela Periódica v2.5. Alumínio. **História**. 2016. Disponível em: <<http://nautilus.fis.uc.pt/st2.5/scenes-p/elem/e01310.html>>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: reciclagem**. São Paulo, v. 12, 2008.
- [3] MCKETTA, J. J. **Encyclopedia of chemical processing and design**. New York: Marcel Dekker, Inc, 1977.
- [4] TOTTEN, G. E.; MACKENZIE, D. S. **Handbook of aluminum: physical metallurgy and processes**. New York: Marcel Dekker, Inc, 2003.
- [5] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: laminação**. 2. ed. São Paulo, v. 2, 2004
- [6] PLYATSKII, V. M. **Extrusion casting**. Tradução de R. E. Hammond. New York: Primary Sources, 1965.
- [7] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: características físico-químicas**. São Paulo, v. 10, 2006.
- [8] ASM Metals Handbook. **Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10. ed. New York: ASM International, v. 2, 1990.
- [9] MACHADO, M. **Processo bayer: extração de óxido de alumina**. Alcoa Alumínio S.A. Poços de Caldas, 2015, 50 p.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: fundamentos e aplicações do alumínio**. São Paulo: Técnica Comunicação, 2007.
- [11] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Designations and chemical composition limits for unalloyed aluminum**. Arlington, 2007.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **International alloy designations and chemical composition limits for wrought aluminum and wrought aluminum alloys**. Arlington, 2015.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Registration record of aluminum association alloy designations and chemical composition limits for aluminum alloys in the form of castings and ingot**. Arlington, 1998.
- [14] PIPANO, T.F; FORNAZIERO, A. L. S. **Treinamento do alumínio**. Alcoa Alumínio S.A. Poços de Caldas, 2015, 101 p.

- [15] ASM Metals Handbook. **Alloy phase diagrams**. 10. ed. New York: ASM International, 1992. v. 3.
- [16] PERRELLA, C. **Solidificação do alumínio**. Alcoa Aluminum Inc. Pittsburgh, 2008, 61 p.
- [17] PIPANO, T. F. **Impactos das mudanças no processo de produção de tarugos sobre a camada de refusão e segregação inversa**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DO ALUMÍNIO, 6., 2014, São Paulo.
- [18] PIPANO, T. P. **Produção de tarugos e qualidade do metal**. Alcoa Alumínio S.A. Poços de Caldas, 2014, 27 p.
- [19] SUGO, H.; KISI, E; CUSKELLY, D. Miscibility gap alloys with inverse microstructures and high thermal conductivity for high energy density thermal storage applications. **Applied Thermal Engineering**, Callaghan, v. 51, n 1-2, p. 1345-1350, Mar. 2013. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/apthermeng](http://www.elsevier.com/locate/apthermeng)>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- [20] BERGMANN, W. J. **Solidification in continuous casting of aluminum**. New York: Metallurgical Transitions, 1970.
- [21] CALISTER, W. D. J.; **Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Salt Lake City: LTC, 1999.
- [22] CUI, X. et al. Effects of grain refinement and boron treatment on electrical conductivity and mechanical properties of AA1070 aluminum. **Materials and Design**, Shandong Jinan, v. 86, p. 397 – 403, Dec. 2015. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/jmad](http://www.elsevier.com/locate/jmad)>. Acesso em: 02 mar. 2016.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia técnico do alumínio: extrusão**. 4. ed. São Paulo: 2008.
- [24] TOBIAS, H. W. T. **Treinamento extrusão**. Alcoa Alumínio S.A. Poços de Caldas, 2014, 30 p.
- [25] PERRELLA, C. **Primary billet quality guidelines**. Alcoa Aluminum Inc. 2. ed. Pittsburgh, 2007, 60 p.
- [26] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13284: preparação de corpos-de-provas para análise metalográfica**. Rio de Janeiro, 1995.
- [27] *SOFTWARE* de análises estatísticas **MiniTab 17.1.0**. Microsoft.