

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

GUILHERME MEURER MENDES

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO  
DA LIGA AlSi10Mg APLICÁVEL NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTE  
AUTOMOTIVO

Joinville

2019

GUILHERME MEURER MENDES

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO  
DA LIGA AlSi10Mg APLICÁVEL NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTE  
AUTOMOTIVO

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Automotiva do  
Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Modesto Hurtado Ferrer

Joinville

2019

GUILHERME MEURER MENDES

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO  
DA LIGA AISi10Mg APLICÁVEL NA FABRICAÇÃO DE COMPONENTE  
AUTOMOTIVO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. Modesto Hurtado Ferrer  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dra. Janaína Renata Garcia  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Lilian Caroline Ziehe  
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Humberto e Edmara, por toda dedicação e amor incondicional, por sempre me apoiar e incentivar, possibilitando que essa conquista e muitas outras se concretizassem. Sem vocês eu não teria chegado até aqui.

Gostaria de agradecer também aos amigos e colegas que estiveram presente ao longo desses anos de graduação, em especial ao meu grande amigo Alexandre M. Giraldi, que esteve ao meu lado desde o início dessa trajetória.

Ao meu orientador Prof. Modesto H. Ferrer, por todo apoio durante o desenvolvimento deste trabalho, e ao colaborador Jacson A. S. da Silva, pelo suporte durante as atividades necessárias para a realização deste estudo.

A empresa onde este estudo foi conduzido, na qual também realizei meu estágio e obtive minha primeira experiencia profissional.

Por fim agradeço a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de estudar engenharia, principalmente aos professores do Centro Tecnológico de Joinville.

## RESUMO

O processo de Fundição sob Baixa Pressão (FBP) vem se destacando na fabricação de diversos produtos, principalmente para o setor automotivo, onde na maioria das aplicações padrões elevados de qualidade são exigidos. Entretanto, por ser um método relativamente recente, existem poucos estudos sobre esse processo de fabricação, e com isso muitas vezes para solucionar problemas precisa-se obter informações de forma empírica. O estudo apresentado neste trabalho foi realizado numa empresa do ramo metalúrgico, onde um determinado produto tem apresentando um índice elevado de rejeição, devido a presença de pequenos vazios na superfície do mesmo, caracterizando assim o defeito conhecido como porosidade. Visando investigar as possíveis causas para o surgimento desse problema, foi proposto a realização uma análise experimental, utilizando o método de Planejamento de Experimentos (DOE, do inglês: *Design of Experiments*). Dessa forma, optou-se por realizar um experimento fatorial  $2^3$ , onde foram analisados três fatores variando entre dois níveis. Com a realização dos testes do experimento proposto, e posteriormente, com a análise estatística das respostas, foi possível verificar que dois dos fatores estudados apresentaram efeitos significativos. O sistema de refrigeração foi o fator mais relevante, que mostrou uma redução de aproximadamente 47% na resposta média observada nos diferentes níveis de ajuste, comprovando assim a relação dessa variável com o surgimento do defeito em questão. A temperatura do molde foi o segundo fator que apresentou significância, onde pode-se verificar uma diferença de aproximadamente 37% no valor médio da resposta analisa entre seus níveis.

**Palavras-chave:** Fundição de Alumínio. Porosidade. Planejamento de Experimentos. Experimento Fatorial.

## ABSTRACT

The Low Pressure Die Casting (LPDC) process has been excelling in the manufacture of various products, especially for the automotive sector, where in most applications, high quality standards are required. However, as it is a relatively recent method, there are few studies on this manufacturing process, and often to solve problems, it is necessary to obtain information empirically. The study presented in this work was carried out in a company of the metallurgical industry, where a certain product has a high rejection rate, due to the presence of small voids on its surface, thus characterizing the defect know as porosity. In order to investigate the possible causes for the emergence of this problem, is was proposed to perform an experimental analysis using the Design of Experiments (DOE) method. Therefore, it was decided to hold a factorial experiment, where three factors ranging from two levels were analyzed. With the tests of the proposed experiment, and later, with the statistical analysis of the answers, it was possible to verify that two of the studied factors had significant effects. The cooling system was the most relevant factor, which showed a reduction of approximately 47% in the average response observed at different adjustment levels, thus proving the relationship of this variable with the emergence of the defect in question. The temperature of the mold was the second factor that showed significance, where it can be verified a difference of approximately 37% in the average value of the analyzes answer between its levels.

**Keywords:** Aluminum Casting. Porosity. Design of Experiments. Factorial Experiment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção da quantidade de alumínio nos automóveis norte-americanos.....	17
Figura 2 – Diagrama de fases Al-Si.....	20
Figura 3 – Solidificação de uma liga hipoeutética (AlSi10Mg).....	21
Figura 4 – Máquina de fundição por baixa pressão.....	23
Figura 5 – Processo de fundição por baixa pressão.....	24
Figura 6 – Variação da pressão durante o preenchimento do molde no processo de FBP.....	25
Figura 7 – Porosidade (a) por contração e (b) por gases.....	29
Figura 8 – Modelo geral de um processo.....	30
Figura 9 – Planejamento fatorial $2^3$ .....	33
Figura 10 – Efeitos principais e interações do planejamento experimental $2^3$ .....	34
Figura 11 – Gráficos de efeitos de interação.....	35
Figura 12 – Região de rejeição de $H_0$ para uma distribuição F.....	37
Figura 13 – Gráficos de superfície de resposta para um experimento $2^3$ .....	40
Figura 14 – Gráficos: (a) probabilidade normal (b) resíduos <i>versus</i> níveis do fator.....	42
Figura 15 – Gráfico de resíduos <i>versus</i> ordem de observação.....	42
Figura 16 – Roteiro utilizado para condução dos experimentos.....	43
Figura 17 – Produto em análise: carcaça de embreagem.....	44
Figura 18 – Diagrama de Pareto dos defeitos.....	45
Figura 19 – Exemplos de porosidade no produto.....	46
Figura 20 – Análise metalográfica.....	46
Figura 21 – Diagrama de Ishikawa (causa e efeito).....	48
Figura 22 – (a) Aquecimento do molde (b) Aferição da temperatura.....	49
Figura 23 – (a) Canais de refrigeração (b) Sistema de controle.....	50
Figura 24 – Análise utilizando a câmera termográfica.....	51
Figura 25 – Tela para controle do tempo de recalque da máquina.....	52
Figura 26 – Regiões de peça onde será medida a variável-resposta.....	53
Figura 27 – Régua utilizada para medir o diâmetro dos poros.....	55
Figura 28 – Medição da variável-resposta (porosidade).....	59
Figura 29 – Porosidade na Região 2.....	60
Figura 30 – DOE fatorial analisado no Minitab.....	61
Figura 31 – Pareto dos efeitos padronizados.....	63
Figura 32 – Gráficos dos efeitos principais.....	64

Figura 33 – Gráficos dos efeitos de interação .....	65
Figura 34 – Gráficos de superfície para a resposta.....	66
Figura 35 – Resíduos da variável-resposta .....	67
Figura 36 – Pareto dos efeitos padronizados da Região 1 .....	69
Figura 37 – Pareto dos efeitos padronizados da Região 2.....	70
Figura 38 – Gráficos dos efeitos principais para as Regiões 1 e 2 .....	71
Figura 39 – Solidificação do diâmetro central com diferentes tempos de recalque .....	72
Figura 40 – Porosidade na Região 2.....	73

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Classificação das ligas de alumínio de acordo com a nomenclatura da AA .....	19
Quadro 2 – Classificação do nível de porosidade resultante .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades da Liga A360 (AlSi10Mg).....	21
Tabela 2 – Sinais para os efeitos no planejamento $2^3$ .....	34
Tabela 3 – ANOVA para um experimento com planejamento fatorial $2^3$ .....	39
Tabela 4 – Níveis do Fator A (Temperatura do molde) .....	49
Tabela 5 – Níveis do Fator B (Sistema de refrigeração) .....	51
Tabela 6 – Níveis do Fator C (Tempo de recalque) .....	52
Tabela 7 – Fatores e níveis dos parâmetros analisados nos experimentos .....	53
Tabela 8 – Matriz experimental.....	57
Tabela 9 – Respostas do experimento .....	58
Tabela 10 – Estimativa dos efeitos .....	62
Tabela 11 – ANOVA da resposta total do experimento.....	64
Tabela 12 – Sumário do modelo (estatísticas de qualidade do ajuste) .....	67
Tabela 13 – Valor-p dos termos do experimento para as regiões 1 e 2.....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA – Aluminum Association

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio

Al – Alumínio

ANOVA – Analysis of Variance

ASTM – American Society of Testing and Materials

DOE – Design of Experiments

FBP – Fundição sob Baixa Pressão

FDU – Foundry Degassing Unit

GL – Graus de Liberdade

IC – Intervalo de Confiança

LPDC – Low Pressure Die Casting

MQ – Média Quadrática

SAE – Society of Automotive Engineers

Si – Silício

SQ – Soma dos Quadrados

VIF – Fator de Inflação de Variância

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\tau_1$	Intervalo de tempo corresponde a primeira etapa do ciclo do processo de FBP
$P_1$	Pressão necessária durante a primeira etapa do ciclo do processo de FBP
$\rho$	Densidade da liga de alumínio
$g$	Aceleração da gravidade
$H_1$	Altura (distância) entre o metal fundido no forno e a superfície da coquilha
$Re$	Número de Reynolds
$v$	Velocidade média do metal no tubo
$D$	Diâmetro do tubo de alimentação
$\mu$	Viscosidade dinâmica
$\tau_2$	Intervalo de tempo corresponde a segunda etapa do ciclo do processo de FBP
$P_2$	Pressão necessária durante a segunda etapa do ciclo do processo de FBP
$\tau_3$	Intervalo de tempo corresponde a terceira etapa do ciclo do processo de FBP
$P_3$	Pressão necessária durante a terceira etapa do ciclo do processo de FBP
$\tau_4$	Intervalo de tempo corresponde a quarta etapa do ciclo do processo de FBP
$\tau_5$	Intervalo de tempo corresponde a última etapa do ciclo do processo de FBP
$k$	Número de fatores
$y$	Resposta do experimento
$\mu$	Média geral das respostas
$\varepsilon$	Erro experimental
$n$	Número de réplicas
$H_0$	Hipótese nula
$H_1$	Hipótese alternativa
$\alpha$	Nível de significância
$\beta_n$	Coefficientes do polinômio do modelo de regressão
$x_n$	Fatores do experimento
$e_i$	Resíduos das rodadas do experimento
$y_i$	Observação real da resposta
$\bar{y}_i$	Valor ajustado para resposta
$S$	Desvio padrão
$R^2$	Varição na resposta explicada pelo modelo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVOS .....	15
1.1.1 Objetivo geral.....	15
1.1.2 Objetivos específicos.....	16
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>17</b>
2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS.....	17
2.1.1 Ligas de alumínio e silício .....	19
2.2 FUNDIÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO .....	22
2.2.1 Descrição do processo.....	23
2.3 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO .....	28
2.4 EXPERIMENTOS PLANEJADOS .....	30
2.4.1 Conceitos gerais .....	31
2.4.2 Planejamentos fatoriais.....	32
2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	36
2.5.1 Análise de variância .....	36
2.5.2 Superfície de resposta.....	40
2.5.3 Análise dos resíduos .....	41
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>43</b>
3.1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO .....	44
3.1.1 Abordagem inicial do problema.....	45
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	47
3.2.1 Definição dos fatores e dos níveis .....	47
3.2.2 Seleção da variável-resposta .....	53
3.2.3 Escolha do planejamento e matriz experimental.....	56
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>58</b>
4.1 RESPOSTAS DO EXPERIMENTO .....	58
4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESPOSTAS .....	61
4.2.1 Resposta total.....	61
4.2.2 Resposta parcial (por região) .....	69
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>75</b>
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	77
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>78</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As grandes vantagens associadas ao uso de ligas de alumínio, principalmente na indústria automotiva, como baixo peso, boas propriedades mecânicas e elevada resistência a corrosão, representam uma força impulsionadora para o desenvolvimento de novas aplicações, assim como de novos processos de fabricação. Diversos processos concorrem entre si na produção de peças fundidas em ligas de alumínio, entretanto o processo de Fundição sob Baixa Pressão (FBP) vem se destacando nos últimos anos devido suas características, pois permite em grande parte dos casos um excelente compromisso entre qualidade, custo, produtividade e complexidade geométrica (DUARTE, 2014).

No atual contexto do mundo industrial, onde a concorrência cresce de maneira exponencial, as empresas estão cada vez mais atentas aos processos que permitam a melhoria contínua, para que possam atender as exigências cada vez mais crescentes dos seus clientes. A qualidade de um processo ou produto, é sempre um fator muito relevante quando se fala de competitividade, e de acordo com Slack et al. (2008) existe uma evolução na conscientização de que bens e serviços de alta qualidade fornecem para a organização uma considerável vantagem competitiva.

A relação entre qualidade e custo é muito importante atualmente, e segundo Carvalho et al. (2012) a literatura utiliza a expressão “custos da qualidade” para designar os dispêndios financeiros com a qualidade, os quais podem ser classificados (divididos) em prevenção, análise e falhas. Os custos com falhas estão relacionados a incidência de produtos defeituosos, sendo que os mais frequentemente controlados estão relacionados ao refugo e retrabalho, que acontecem justamente por os produtos não atenderem padrões de qualidade previamente estabelecidos.

Uma ferramenta muito utilizada na indústria, é o planejamento de experimentos, também conhecido por DOE (do inglês: *Design of Experiments*), que de acordo com Montgomery (2015) é uma técnica utilizada para realizar um teste, ou uma série de testes, nos quais são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada, de modo que seja possível observar e identificar mudanças correspondentes nas variáveis de saída. Segundo Galdamez (2002), as técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processos de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos etc.).

Com base nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo, utilizando técnicas de planejamento de experimentos, para observar como alguns parâmetros do processo influenciam na qualidade do produto resultante. O estudo será conduzido em uma empresa de grande porte, localizada no norte do estado de Santa Catarina, na qual um determinado produto tem apresentado um percentual de refugo elevado, devido a problemas de qualidade que são resultantes da ocorrência de falhas durante o processo de fabricação.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento desta pesquisa, é baseada no modelo proposto por Coleman e Montgomery (1993), que fornecem um roteiro para a condução de planejamento de experimentos industriais. Para isso, realiza-se uma abordagem inicial do problema, com a caracterização e identificação das possíveis causas para o defeito em questão, seguido pela seleção dos fatores que serão controlados durante os testes do experimento, assim como a definição da variável-resposta e como ela será mensurada.

Para realizar a análise das respostas encontradas com a execução dos testes do experimento, técnicas estatísticas devem ser empregadas, pois permitem obter uma melhor compreensão dos dados. Portanto, o *software* Minitab será utilizado, e com isso os resultados serão apresentados através das análises e dos gráficos desenvolvidos com o auxílio do mesmo. Após esse processo, são apresentadas as conclusões sobre os resultados alcançados através deste estudo, de como os fatores investigados influenciaram na qualidade do produto, indicando se o resultado foi satisfatório ou não, e conseqüentemente se alguma alteração pode ser sugerida para o processo de fabricação, com o intuito de reduzir a incidência deste defeito.

## 1.1 OBJETIVOS

Visando reduzir a quantidade de itens refugados de um determinado produto, devido a problemas de qualidade, é proposto neste trabalho os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar de forma experimental a influência de determinados parâmetros do processo de fundição sob baixa pressão, sobre a incidência de porosidade num produto para fins da indústria automotiva.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Identificar o principal problema de qualidade apresentado pelo componente em questão e caracterizar o defeito associado;
- Selecionar as variáveis do processo que possam estar relacionadas com o problema para estabelecer a matriz experimental;
- Executar os testes do experimento proposto e determinar de modo quantitativo a variação nas respostas;
- Analisar os resultados de forma estatística, com o auxílio do *software* Minitab e determinar quais fatores apresentaram significância nas respostas do experimento.

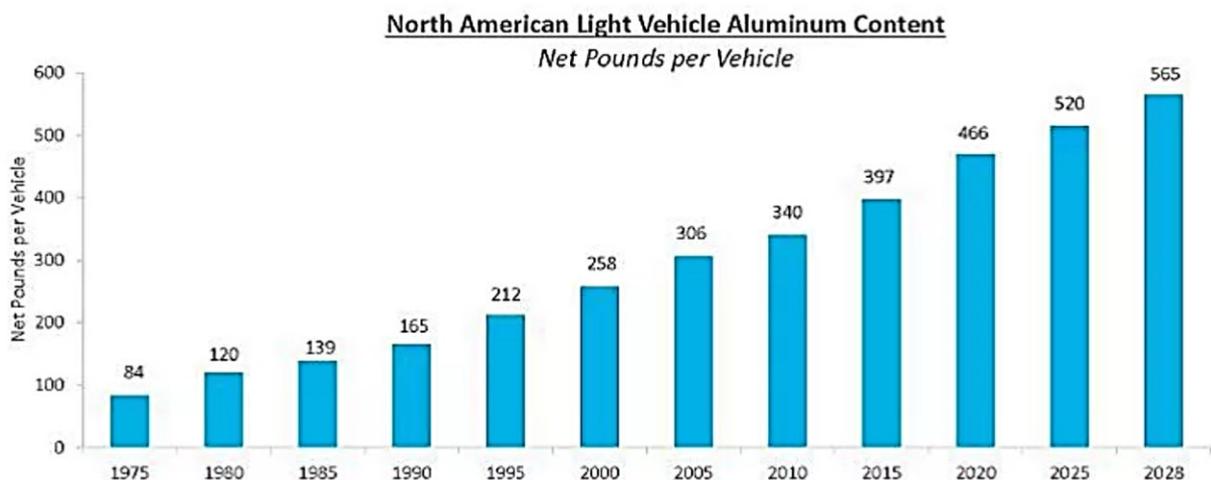
## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos importantes para o desenvolvimento do presente trabalho, iniciando com a caracterização das ligas de alumínio, seguido por uma abordagem do método de fundição por baixa pressão e alguns defeitos resultantes desse processo. Por fim, será apresentado o planejamento de experimentos, assim como as técnicas estatísticas utilizadas para análise.

### 2.1 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

A utilização do alumínio na indústria automotiva é uma tendência global, pois contribui para a redução de massa dos veículos, e desta forma colabora significativamente para uma produção veicular sustentável, de alta eficiência energética e baixa emissão de poluentes. Esse cenário, de acordo com Djukanovic (2018), pode ser visto na projeção da quantidade de alumínio empregado na construção de veículos leves fabricados nos Estados Unidos, conforme demonstra o gráfico da Figura 1, onde é indicado como essa tendência continuará mostrando um crescimento ininterrupto na próxima década.

Figura 1 – Projeção da quantidade de alumínio nos automóveis norte-americanos



Fonte: Djukanovic (2018).

Segundo dados da Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2019), o alumínio é o elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, sendo que o Brasil constitui a segunda maior reserva de bauxita do mundo, e assim destaca-se no cenário mundial na produção deste metal, o qual tem um papel importante no cenário econômico e ambiental do país. Além disso, o alumínio atualmente é o metal não ferroso mais consumido do mundo, devido principalmente as suas propriedades físico-químicas, que possibilitam uma ampla variedade de utilização (BRITO; QUEIROGA; MACEDO, 2010).

Entretanto, de acordo com Duarte (2014), inicialmente a utilização do alumínio na indústria não apresentou grande interesse prático, devido principalmente as baixas propriedades mecânicas desse material, desta forma a sua aplicação acabou se tornando restrita. Para solucionar esse problema, diversos elementos de liga foram adicionados ao alumínio para melhorar suas características, resultando no surgimento de uma ampla variedade de ligas, possibilitando assim a utilização para as mais diversas aplicações, incluindo aquelas que necessitam de elevadas resistências mecânicas.

Segundo Callister (2008), em geral, as ligas de alumínio são classificadas como fundidas ou forjadas, e de acordo com Duarte (2007) as ligas utilizadas para fundição são classificadas conforme seus principais elementos de liga, e a nomenclatura mais utilizada é a estabelecida pela *Aluminum Association* (AA), a qual é também empregada pela maioria das entidades normativas, como a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a *Society of Automotive Engineers* (SAE).

Nesse sistema, cada série recebe um código composto por quatro dígitos, como pode ser verificado no Quadro 1, sendo que o primeiro número indica o elemento de liga principal. Os dois dígitos seguintes ao primeiro, identificam a liga dentro da série, exceto na primeira classe, onde indicam a pureza do alumínio. O último dígito (após o ponto) é utilizado para descrever a forma de fornecimento do produto, onde o número 0 indica peças fundidas, e os números 1 e 2 indicam, respectivamente, lingotes fundidos a partir de peças e retornos e lingotes cuja composição química é controlada (fundidos a partir de alumínio primário com elevada pureza).

Quadro 1 – Classificação das ligas de alumínio de acordo com a nomenclatura da AA

Série	Elemento de liga principal	Outros elementos de liga
1xx.x	Alumínio puro (99%)	–
2xx.x	Cobre (Cu)	–
3xx.x	Silício (Si)	Magnésio (Mg) e Cobre (Cu)
4xx.x	Silício (Si)	–
5xx.x	Magnésio (Mg)	–
7xx.x	Zinco (Zn)	Cobre (Cu), Magnésio (Mg) e Cromo (Cr)
8xx.x	Estanho (Sn)	–

Fonte: Adaptado de Aluminum Association (2019).

Duarte (2014) ressalta ainda que algumas variações na especificação das composições químicas são identificadas através de uma letra colocada antes da numeração, e serve para definir as diferenças quanto às porcentagens de impurezas. Embora a nomenclatura e designação para as ligas de alumínio sejam padronizadas na América do Norte, existem diferentes classificações ao redor do mundo (ASM INTERNATIONAL, 2004).

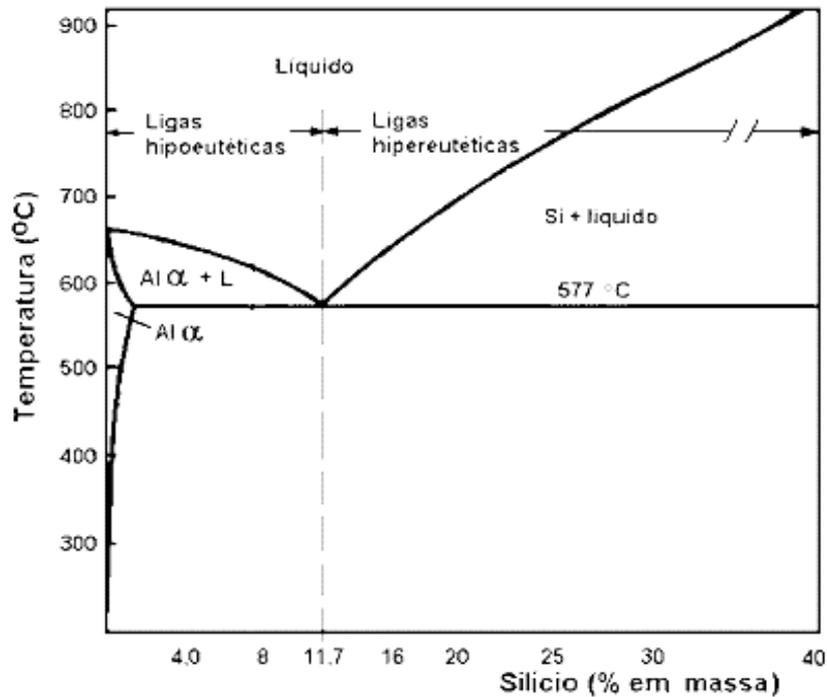
### 2.1.1 Ligas de alumínio e silício

De acordo com Fuoco (2001), as ligas das famílias 3xx e 4xx, que apresentam o silício como principal elemento de liga, são, indubitavelmente, as de maior importância comercial, devido à boa combinação de propriedades mecânicas, de fundição e usinabilidade que exibem. Segundo Brito, Queiroga e Macedo (2010), essas ligas correspondem por aproximadamente 90% de todos os produtos fundidos em alumínio. A razão para essa ampla utilização, principalmente em aplicações nas quais a qualidade da estrutura resultante da solidificação é muito importante, está relacionada com as características que o Si fornece.

Duarte (2007) diz que o principal efeito na adição de silício em ligas de alumínio, está no aumento das propriedades de fundição, melhorando a fluidez, a resistência às trincas a quente e a redução na contração da liga no estado líquido. O teor de Si presente na liga, geralmente é definido de acordo com o processo de fundição utilizado, variando de acordo com a taxa de resfriamento, a fluidez necessária para o preenchimento das cavidades do molde e pela contração volumétrica da liga (ASM INTERNATIONAL, 2004).

Isso se deve principalmente ao fato de que as ligas de alumínio e silício apresentam diferentes propriedades de solidificação conforme o teor de silício da mesma, como pode ser visto no diagrama de fases apresentado na Figura 2, onde esse sistema forma um ponto eutético simples à 580°C para um teor de 11,7% de silício.

Figura 2 – Diagrama de fases Al-Si



Fonte: Duarte (2007).

A estrutura que se forma imediatamente após a solidificação determina as propriedades resultantes do produto, e a microestrutura obtida durante essa etapa é caracterizada pela formação de um arranjo policristalino de grãos, que por sua vez são formados por ramificações dendríticas em variadas orientações (FERREIRA, 2014).

De acordo com Bonollo et al. (2005), a liga A360.0, também conhecida por AlSi10Mg, tem sido bastante utilizada para o processo de FBP, pois apresenta uma boa combinação de propriedades mecânicas e de fundição, sendo normalmente empregada para peças com geometrias complexas e que estão sujeitas a elevadas solicitações mecânicas. A Tabela 1 apresenta a composição química e algumas propriedades dessa liga.

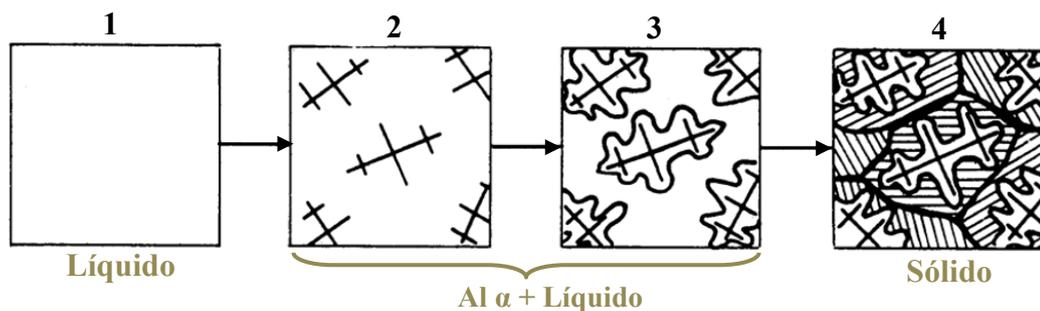
Tabela 1 – Propriedades da Liga A360 (AlSi10Mg)

<b>Composição Química</b>	Al (85,8 – 90,6%) Si (9,0 – 10,0%) Fe ( $\leq$ 1,30%) Cu ( $\leq$ 0,60%) Mn ( $\leq$ 0,45%) Mg (0,40 – 0,60%) Ni ( $\leq$ 0,05%) Zn ( $\leq$ 0,10%) Sn ( $\leq$ 0,05%) Outros ( $\leq$ 0,25%)
<b>Intervalo de Fusão</b>	557 - 596°C
<b>Densidade</b>	2,63g/cm <sup>3</sup>
<b>Limite de Resistência</b>	317 MPa
<b>Limite de Escoamento</b>	165 MPa
<b>Alongamento</b>	3,5%
<b>Dureza</b>	75 HB

Fonte: NADCA Product Standards (2015).

De acordo com Santos (2014), essa liga hipoeutética é formada por uma fase primária de alumínio com microestrutura dendrítica, e desta forma, a solidificação acontece através da formação de dendritos, que crescem durante o intervalo de solidificação, como pode ser visto na Figura 3. Os dendritos de solução sólida (fase  $\alpha$ ) apresentam em seu contorno a fase eutética do silício, sendo que os cristais ou grãos da microestrutura, variam em tamanho, forma e distribuição, de acordo com a composição química e condições de solidificação.

Figura 3 – Solidificação de uma liga hipoeutética (AlSi10Mg)



Fonte: Adaptado de Duarte e Oliveira (2009).

## 2.2 FUNDIÇÃO SOB BAIXA PRESSÃO

A fundição é o processo que visa transformar metais em peças de uso industrial, tendo como ponto de partida o metal líquido ou fundido que é vazado no interior de um molde cuja cavidade é conformada de acordo com o produto desejado (CHIAVERINI, 2005).

O processo de Fundição sob Baixa Pressão (FBP), também conhecido em inglês como *Low Pressure Die Casting* (LPDC), teve sua primeira patente registrada na Inglaterra no início do Século XX, entretanto sua aplicação em grande escala na indústria aconteceu apenas nas últimas décadas. Segundo Duarte (2014), a fundição através de baixa pressão foi inicialmente desenvolvida como alternativa ao processo de fundição por gravidade, de modo a corrigir alguns problemas relacionados com o vazamento manual do metal líquido, melhorando desta forma a produtividade e reprodutibilidade inerentes ao processo, e minimizando os defeitos de fundição.

De acordo com Merlin et al. (2009), a maior parte da fundição de baixa pressão tem sido dedicada para projetos simétricos radiais, um exemplo consolidado da utilização deste método de fabricação, são as rodas automotivas, onde quase todas são moldadas por este processo, pois garante um bom compromisso entre propriedades mecânicas elevadas, produtividade, custo-efetividade e demanda de projeto.

Além disso, o processo de FBP permite produzir peças semelhantes às obtidas através do processo de fundição sob gravidade, entretanto, como a alimentação de metal acontece na região central da peça, é possível obter excelentes rendimentos metalúrgicos, entre 85 e 95%, devido principalmente a ausência de canais de alimentação e de massalotes<sup>1</sup>.

Segundo Aremo e Adeoye (2011), esse método é classificado como um processo *near net shape*, ou seja, a peça fundida apresenta seu formato quase final, e para isso faz uso de moldes metálicos permanentes, os quais são preenchidos de baixo para cima, com metal líquido a baixa pressão e com velocidades reduzidas, permitindo controlar precisamente a turbulência durante a injeção. A Figura 4 apresenta o modelo padrão de uma máquina FBP.

---

<sup>1</sup> Massalotes são reservatórios de metal líquido, com o objetivo de conter as contrações do alumínio durante a solidificação.

Figura 4 – Máquina de fundição por baixa pressão



Fonte: CALENDE (2019).

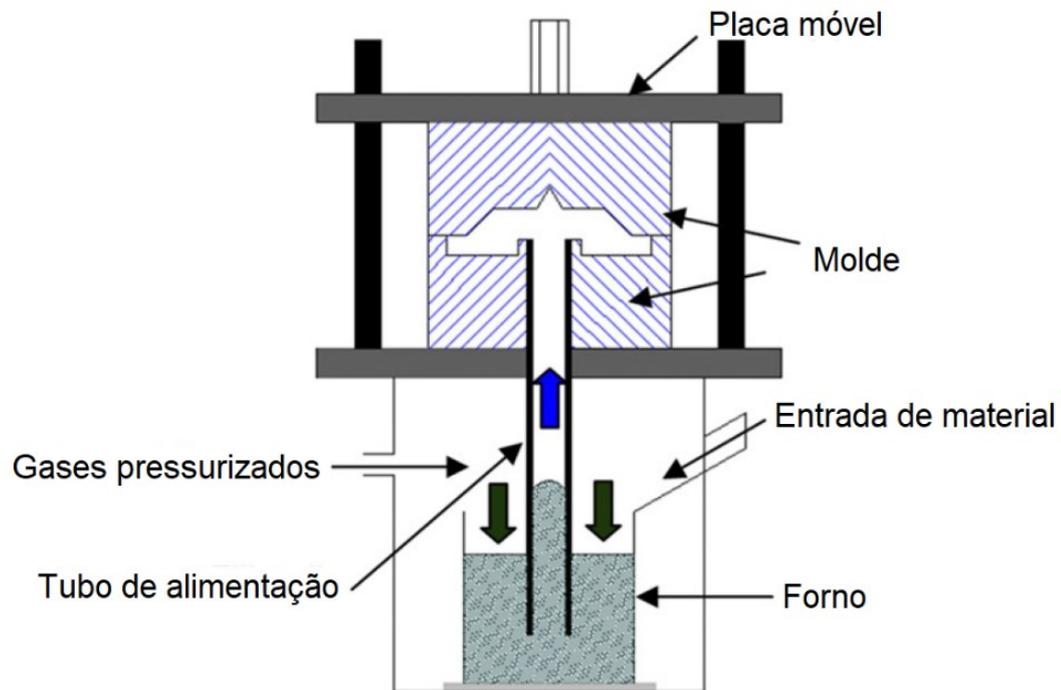
### 2.2.1 Descrição do processo

No processo de FBP o metal líquido é mantido em um forno de espera, que se encontra abaixo da coquilha<sup>2</sup>, os quais são conectados através de um tubo que permite com que o material contido no forno suba e preencha a cavidade do molde. Para esse processo acontecer, o forno precisa funcionar como uma câmara pressurizada, devidamente selada, para que quando o processo de injeção for iniciado, todo o metal fundido no interior do forno se encontre sob pressão. Na Figura 5, é possível observar de forma mais detalhada o funcionamento da máquina de baixa pressão e o conceito fundamental de operação.

---

<sup>2</sup> Coquilha é o nome atribuído para o molde metálico permanente, utilizado para obter o formato desejado do produto fundido.

Figura 5 – Processo de fundição por baixa pressão

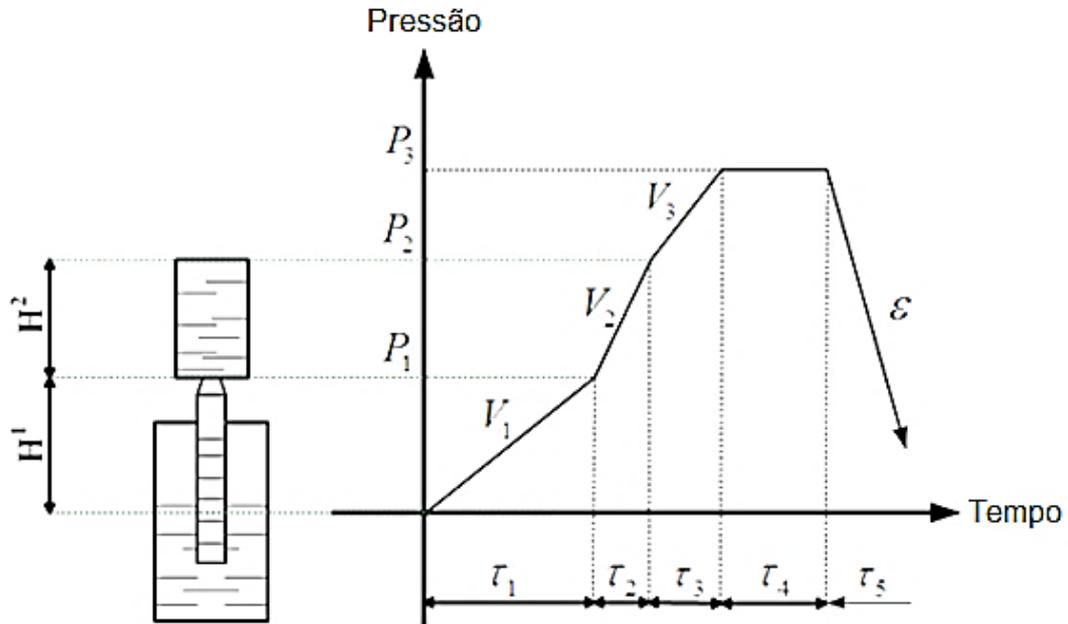


Fonte: Adaptado de Fu et al. (2008).

De acordo com Miller e Maijer (2006) o alumínio toma a forma da cavidade do molde devido a ação de baixa pressão externa, na ordem de  $0,3 \text{ kgf/cm}^2$ , exercida por ar ou nitrogênio injetado no interior do forno de espera, sendo que uma das vantagens mais evidentes desse processo de fundição em relação aos demais, é a grande capacidade de se controlar o preenchimento do molde, e desta forma, a caracterização de como é realizado esse procedimento é de suma importância.

Segundo Duarte (2014) o controle da velocidade de enchimento das peças é feito através da taxa com que a pressão é exercida, e com isso é possível realizar vazamentos com pouca ou até mesmo nenhuma turbulência. Na maioria dos casos, a taxa de aplicação de pressão varia conforme realiza-se o enchimento, isso é feito para garantir as melhores condições de escoamento para cada seção de área durante o processo. Na Figura 6, pode-se verificar a variação da pressão em função do tempo durante um ciclo de injeção de uma peça através do processo de FBP.

Figura 6 – Variação da pressão durante o preenchimento do molde no processo de FBP



Fonte: Adaptado de Fu et al. (2008).

A análise do gráfico com o ciclo de operação do processo de FBP, apresentada na Figura 6, permite identificar algumas etapas distintas durante o procedimento de enchimento da peça. De maneira geral, o processo pode ser dividido nas seguintes fases:

- **Primeira fase:** nessa etapa procura-se aplicar uma pressão que faça com que o metal líquido contido no interior do forno, avance pelo tubo de alimentação até alcançar o topo do mesmo, sem iniciar ainda o enchimento do molde, como pode ser visualizado no intervalo de tempo “ $\tau_1$ ” no gráfico da Figura 6. A pressão mínima necessária para fazer com o metal suba pelo tubo, pode ser calculada diretamente através da Lei de Pascal, que estabelece a relação apresentada na Equação 1.

$$P_1 = \rho g H_1 \quad (1)$$

Onde  $P_1$  representa a pressão,  $\rho$  a densidade do material,  $g$  a aceleração da gravidade e  $H_1$  distância entre a face superior do tubo e a superfície de banho do metal líquido no forno. É importante ressaltar que a cada peça injetada, a altura “ $H_1$ ” aumenta, já que a quantidade de metal fundido no forno é reduzida. Desta forma, teoricamente o ideal seria realizar a medição da altura antes de cada ciclo de injeção, visando garantir sempre as condições ideais de operação.

Entretanto isso não é viável, e durante a operação o sistema é baseado na quantidade de liga abastecida no forno, realizando autocorreções na pressão conforme a quantidade de peças fundidas. Uma vez definida a pressão mínima, deve-se selecionar a velocidade do enchimento, e de acordo com Duarte (2014), nesse primeiro momento a mesma deve ser o mais alto possível, desde que o escoamento não seja turbulento, de modo a minimizar o aprisionamento de ar. Para determinar o regime do escoamento, é utilizado o coeficiente de Reynolds ( $Re$ ), o qual é expressado através da Equação 2.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2)$$

Onde  $v$  representa a velocidade média,  $D$  o diâmetro do tubo e  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido. Por definição, escoamento internos em tubos são caracterizados como turbulentos para números de Reynolds superiores a 2400. Porém, essa condição é baseada numa orientação horizontal, o que não é o caso do escoamento no tubo da máquina de baixa pressão. Duarte (2014) diz que nesses casos, é considerado uma boa prática que o enchimento de um tubo com 500mm de comprimento e 90 mm de diâmetro, aconteça em 5 segundos. Desta forma, a velocidade de enchimento é de aproximadamente 100 mm/s, o que resultaria em um número de Reynolds na faixa de  $21 \times 10^3$ .

- **Segunda fase:** corresponde ao momento onde acontece o enchimento da peça, e pode ser visualizada na Figura 6 como o intervalo de tempo “ $\tau_2$ ”. Nessa etapa, é realizado uma pressurização adicional em relação a primeira, fazendo com que o metal líquido que se encontrava na parte superior do tubo, avance e preencha a cavidade da coquilha. Nessa segunda fase do processo, assim como na anterior, também se faz necessário que o escoamento não seja turbulento, de modo a evitar a retenção de gás na liga.

Entretanto, a pressão ideal de enchimento não pode ser calculada de maneira análoga a primeira etapa. Isso se deve ao fato de que, a geometria da peça não apresenta uma seção de área transversal constante, como acontece no tubo de alimentação, e desta forma as condições do escoamento variam de acordo com a geometria da peça a ser fundida. Teoricamente, para que o enchimento da cavidade aconteça de forma suave, a velocidade do escoamento deve ser a mais

baixa possível, mas com isso o processo torna-se pouco produtivo e pontos de solidificação prematura podem acontecer em algumas regiões da peça, possibilitando o surgimento de outros defeitos de fundição (DUARTE, 2014). Portanto, para determinar as condições ideais de operação nessa etapa, geralmente são utilizados softwares de simulação numérica, de forma que seja possível verificar o enchimento de acordo com a geometria da peça, e desta maneira definir a pressão ( $P_2$ ) que apresenta o melhor resultado para o processo.

- **Terceira fase:** ao iniciar essa etapa, o molde já foi completamente preenchido com metal líquido, e assim durante o intervalo de tempo " $\tau_3$ " do gráfico apresentado na Figura 6, realiza-se o último acréscimo de pressão. Isso acontece pois de acordo com Fu et al. (2008), uma determinada pressão deve ser mantida após o preenchimento da cavidade, a fim de fazer com o que a solidificação do produto aconteça com o metal compactado. A variável  $P_3$  é conhecida como pressão de recalque, a qual é responsável por fornecer a compactação ideal durante a etapa de solidificação. Essa pressão é mantida durante o intervalo de tempo " $\tau_4$ ", conhecido como tempo de recalque, que é um importante parâmetro do processo, pois deve-se garantir que durante esse período aconteça a solidificação completa da peça, sem que o metal líquido contido no tubo de alimentação solidifique.
- **Quarta fase:** é a última etapa do ciclo de injeção, a qual corresponde ao momento " $\tau_5$ " do gráfico da Figura 6, onde acontece o alívio da pressão, resultando no retorno do metal em excesso para o forno. Após essa etapa, a parte superior da coquilha é aberta, a peça fundida é extraída, encerrando assim o processo.

Portanto, essas quatro etapas descrevem de modo geral um ciclo do processo de FBP, e como pode ser observado, o mesmo engloba diversos parâmetros de operação que precisam ser definidos de forma assertiva, a fim de garantir uma operação controlada e produtos isentos de problemas de qualidade.

## 2.3 DEFEITOS DE FUNDIÇÃO

Existe uma grande variedade de defeitos de fundição que podem resultar em produtos que não atendem critérios de qualidade, inviabilizando desta forma a comercialização dos mesmos. De acordo com Fuoco (2001), a incidência de defeitos em produtos fundidos, deve-se principalmente as variáveis metalúrgicas e projetos de fundição, associados com as seguintes características das ligas de alumínio:

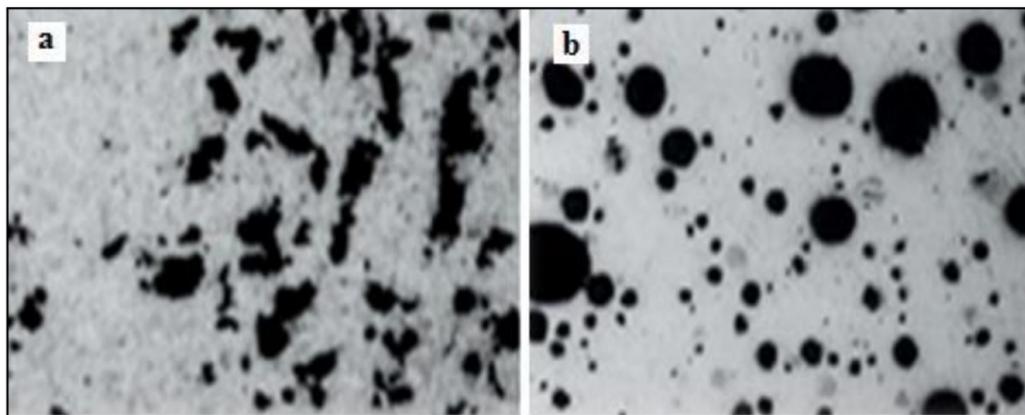
- Elevada porcentagem de contração de solidificação;
- Alta solubilidade de hidrogênio quando no estado líquido;
- Alta reatividade com o oxigênio;
- Baixa densidade.

Segundo Duarte (2014), características como aparência estética do produto, propriedades mecânicas e estanqueidade constituem alguns dos parâmetros utilizados para determinar a qualidade em peças fundidas. Entre os defeitos de fundição mais comuns, destacam-se os rechupes e porosidades, os quais podem estar diretamente relacionados, e, portanto, na sequência serão apresentados algumas características desses defeitos.

Os rechupes são defeitos macroscópicos e localizam-se geralmente nas regiões de maior massa ou pontos quentes da peça (últimas regiões a se solidificarem). De acordo com Duarte (2014), no processo de solidificação da liga, ocorre uma contração volumétrica associada à transformação entre os estados líquidos e sólidos, e caso essa referida contração não seja compensada com metal líquido, haverá a formação de um vazio, definido como rechupe. Fuoco (2001) diz que esses problemas são ocasionados pela falta de solidificação direcional para os massalotes, e para ligas com pequeno intervalo de solidificação, caracterizam-se como grandes vazios de aspecto irregular, e em ligas com grande intervalo de solidificação, rechupes surgem como uma concentração elevada de pequenos vazios irregulares em alguma região da peça.

Segundo Ferreira (2014), a porosidade em um produto fundido é caracterizada pela concentração de pequenos vazios, que podem ser de aparência irregular ou arredondada, como pode ser visto na Figura 7. Segundo Fuoco (2001), esses vazios são formados como resultados: da contração volumétrica na solidificação, resultando na concentração localizada de micro-rechupes, originando assim os vazios de aspecto irregular; da rejeição de hidrogênio para as últimas porções de líquido, favorecendo a criação de micro-bolhas, causadas pela diminuição da solubilidade do hidrogênio no alumínio durante a solidificação.

Figura 7 – Porosidade (a) por contração e (b) por gases



Fonte: Ferreira (2014).

De acordo com Fuoco e Correa (2000) a quantidade resultante de porosidade no produto é influenciada por diversas variáveis, entre os quais pode-se destacar a quantidade de hidrogênio na liga, o intervalo de solidificação, a velocidade de resfriamento e aplicação de pressão durante a solidificação.

Como o hidrogênio apresenta elevada solubilidade no alumínio quando no estado líquido, se a liga utilizada para fundição não for corretamente preparada e manipulada, uma grande quantidade desse gás estará dissolvida no metal. Segundo Ferreira (2014), para prevenir esse problema, processos de degaseificação são empregados, como por exemplo o FDU (do inglês: *Foundry Degassing Unit*), que utiliza um gás inerte (geralmente nitrogênio) para remover o hidrogênio dissolvido na liga.

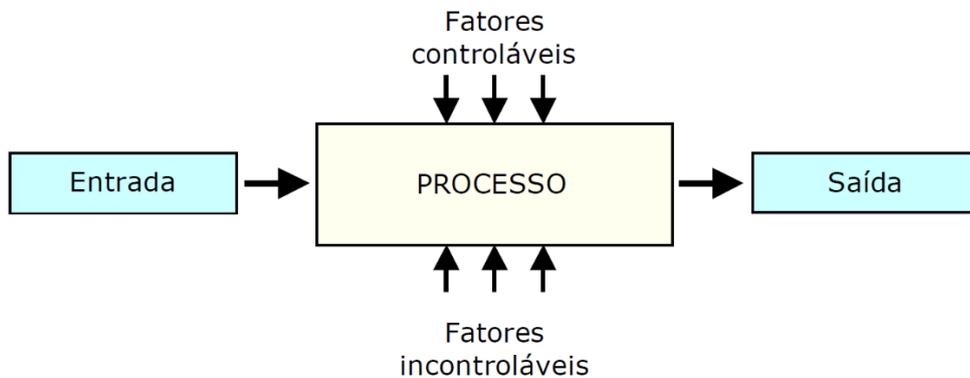
Em ligas de alumínio e silício hipoeutéticas (teor Si de até 10%), a incidência de porosidade é relativamente comum de acordo com Fuoco e Correa (2000), pois nessas ligas a solidificação é do tipo pastosa, caracterizada pela formação de uma rede dendrítica que convive com a fase líquida. Portanto, o intervalo de solidificação, está diretamente relacionado com a composição química da liga, sendo o teor de silício, a principal variável.

Fuoco e Correa (2000) dizem, também, que a velocidade de resfriamento influencia na tendência à formação de porosidades, tendo em vista que sua ação afeta ambos os mecanismos de formação do defeito, ou seja, a solidificação rápida atrasa a nucleação das micro-bolhas, ao mesmo tempo que maiores velocidades de resfriamento diminuem a extensão da zona pastosa, facilitando assim os mecanismos de alimentação da contração. Além disso, os autores ressaltam ainda que a aplicação de pressão em ligas com solidificação pastosa, favorece a movimentação do líquido remanescente através da rede de dendritas.

## 2.4 EXPERIMENTOS PLANEJADOS

O planejamento de experimentos, também conhecido por DOE (do inglês: *Design of Experiments*), pode ser definido como “...um teste, ou uma série de testes, no qual são feitas propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída” (MONTGOMERY, 2015, p. 365). O processo é caracterizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transformam um material de entrada em um produto de saída, sendo que, algumas variáveis do processo são controláveis, enquanto outras não, como observado na Figura 8.

Figura 8 – Modelo geral de um processo



Fonte: Adaptado de Galdamez (2002).

Montgomery (2015) ressalta ainda que os objetivos dos experimentos, contemplam: a determinação de quais fatores são mais influentes na variável de resposta; a definição de quais valores devem ser atribuídos para os fatores controláveis, de modo que a variável de resposta esteja perto da exigência nominal, com pouca variabilidade, ou ainda que os efeitos dos fatores de ruído sejam minimizados.

Dessa forma, é possível utilizar técnicas de planejamento experimental tanto nas etapas do desenvolvimento de um processo (ou produto), quanto na solução de problemas, permitindo melhorar o seu desempenho, reduzindo a sensibilidade do mesmo a fontes externas de variabilidade, e assim uma capacidade de fabricação do produto mais eficiente.

### 2.4.1 Conceitos gerais

Para que seja possível compreender os termos e conceitos gerais utilizados durante o processo de condução de experimentos planejados, serão apresentadas na sequência algumas definições fundamentais e princípios básicos desse método de acordo com Galdamez (2002):

- *Fatores de controle*: são as variáveis independentes ou entradas do processo que serão analisadas nos experimentos, e cujo efeito se deseja estudar. Normalmente são identificados por letras (A, B, C ...).
- *Níveis dos fatores*: são os possíveis valores (quantitativos ou qualitativos) que um fator de controle pode assumir durante os testes experimentais conduzidos. São identificados por nível baixo (-) e nível alto (+).
- *Fatores de ruído*: são variáveis não controláveis (conhecidas ou não) do processo, que influenciam nos resultados do experimento. Deve-se tomar cuidado com esses fatores, pois é importante evitar que os efeitos produzidos pelos fatores controlados se misturem com os efeitos gerado pelos ruídos.
- *Variável-resposta*: é a variável dependente (ou de saída) que representa a variação na resposta causada pela alteração nos níveis dos fatores de controle.
- *Tratamento*: corresponde às combinações dos fatores e níveis para as rodadas de testes, ou seja, cada tratamento representa uma possível combinação das variáveis do experimento.
- *Matriz de experimentos*: é o roteiro elaborado para condução dos testes, onde são incluídos os fatores de controle e seus níveis, e desta forma, o tratamento correspondente para cada rodada de teste do experimento.
- *Efeito principal*: é a mudança na resposta produzida por uma mudança no nível do fator, ou seja, é a diferença entre a resposta média do fator no nível alto e a resposta média do fator no nível baixo.
- *Efeito de interação*: de acordo com Galdamez (2002), é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator de controle nos níveis de outro fator.
- *Aleatorização*: é o procedimento para definir de forma aleatória a sequência dos tratamentos da matriz de experimentos, sendo realizada para ponderar os efeitos produzidos pelos fatores ruído na variável-resposta. De acordo com

Drumond (2008), com isso procura-se evitar a ocorrência de distorção estatística nos resultados, impedindo que fatores indesejáveis desconhecidos contaminem os efeitos a serem investigados.

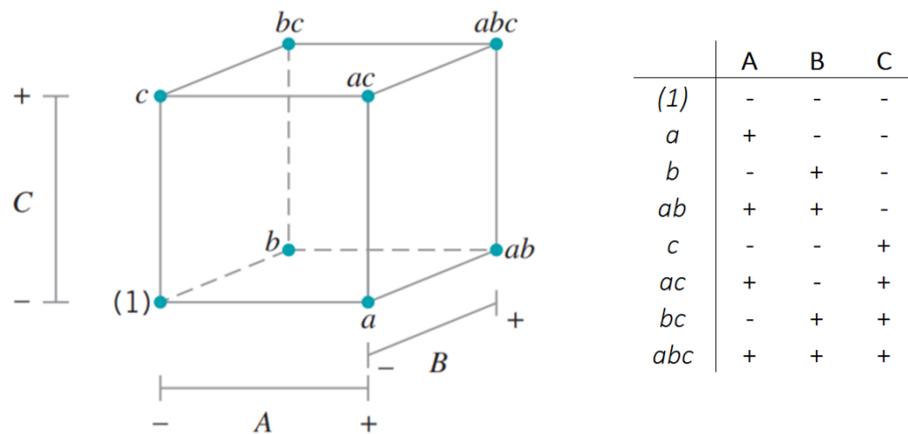
- *Replicação*: corresponde a repetição das rodadas de testes propostas na matriz experimental, e de acordo com Montgomery (2001) este procedimento permite estimar o erro experimental, o qual é utilizado para determinar se as diferenças observadas entre as respostas são estatisticamente significantes.
- *Blocagem*: segundo Galdamez (2002) é a técnica utilizada para controlar e avaliar a variabilidade produzida pelos fatores perturbadores, e na teoria estatística, é o arranjo de unidades experimentais em grupos (blocos) similares.

#### 2.4.2 Planejamentos fatoriais

Quando se deseja analisar a influência de diversos fatores em um experimento, o planejamento fatorial deve ser empregado, pois nesses experimentos os fatores variam juntos. De acordo com Montgomery (2015) por um experimento fatorial, especificamente, pode-se dizer que em cada tentativa completa ou replicação do experimento, são investigadas todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores. Segundo Montgomery (2001), o planejamento fatorial é recomendado para a fase inicial do procedimento experimental, quando há necessidade de se definir os fatores mais importantes e estudar os efeitos sobre a variável resposta escolhida.

De acordo com Galdamez (2002), um experimento fatorial com “k” fatores, cada um deles com dois níveis, é denominado de experimento fatorial  $2^k$ . O procedimento experimental desse modelo, consiste em realizar testes com cada uma das possibilidades de combinação da matriz experimental, para que na sequência seja possível determinar e interpretar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados, e desta forma determinar as melhores condições experimentais do processo de fabricação.

Para ilustrar o procedimento desse modelo de planejamento experimental, foi considerado um experimento com três fatores controlados (A, B e C), o qual é conhecido como planejamento fatorial  $2^3$  e possui oito possíveis combinações de fatores e níveis. Analisando de forma geométrica, esse experimento apresenta-se como um cubo, onde em cada vértice uma combinação de teste é formada, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Planejamento fatorial  $2^3$ 

Fonte: Adaptado de Montgomery (2015).

Esse planejamento permite que três efeitos principais sejam estimados (A, B e C), juntamente com as três interações de dois fatores (AB, AC e BC) e uma interação de três fatores (ABC). Dessa forma, segundo Montgomery (2015), o modelo fatorial completo pode ser expresso conforme a Equação 3.

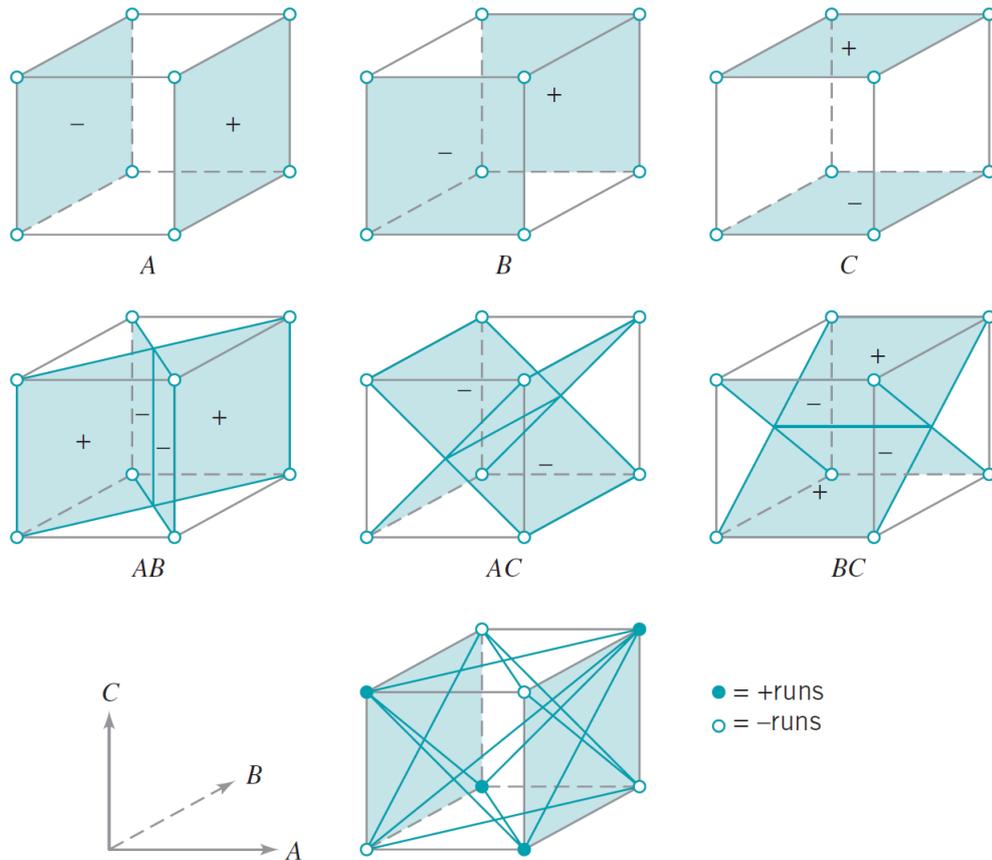
$$y = \mu + A + B + C + AB + AC + BC + ABC + \varepsilon \quad (3)$$

Onde “ $\mu$ ” é uma média geral das repostas e “ $\varepsilon$ ” o erro experimental resultante. Os efeitos principais, as interações de dois e três fatores podem ser estimadas através do cálculo dos contrastes, pela diferença das médias dos resultados dos testes com o fator no nível alto, em relação à média dos resultados com o fator no nível baixo.

Assim, o efeito de A por exemplo, é calculado pela diferença média das quatro rodadas da face direita do cubo (a, ab, ac e abc) e as quatro na face esquerda ((1), b, c, bc), conforme verificado na Figura 9, resultando com isso na Equação 4.

$$A = \bar{y}_{A+} - \bar{y}_{A-} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)] \quad (4)$$

Onde “n” representa o número de replicações. Os demais efeitos principais (B e C), e as interações (AB, AC, BC e ABC), são calculados de maneira análoga, mudando apenas as faces do cubo de acordo com cada fator. A Figura 10, apresenta geometricamente as faces utilizadas para os cálculos dos efeitos principais e de interação.

Figura 10 – Efeitos principais e interações do planejamento experimental  $2^3$ 

Fonte: Montgomery (2015).

Para simplificar esse processo, Montgomery (2015) propõe ainda a utilização de um modelo que possui uma combinação de sinais positivos e negativos, conforme apresentado na Tabela 2, que indicam a operação (soma ou subtração) necessária para cada tratamento, de acordo com o efeito que se deseja determinar.

Tabela 2 – Sinais para os efeitos no planejamento  $2^3$ 

Combinação de tratamento	Efeito fatorial							
	<i>I</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>AB</i>	<i>C</i>	<i>AC</i>	<i>BC</i>	<i>ABC</i>
(1)	+	-	-	+	-	+	+	-
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
ab	+	+	+	+	-	-	-	-
c	+	-	-	+	+	-	-	+
ac	+	+	-	-	+	+	-	-
bc	+	-	+	-	+	-	+	-
abc	+	+	+	+	+	+	+	+

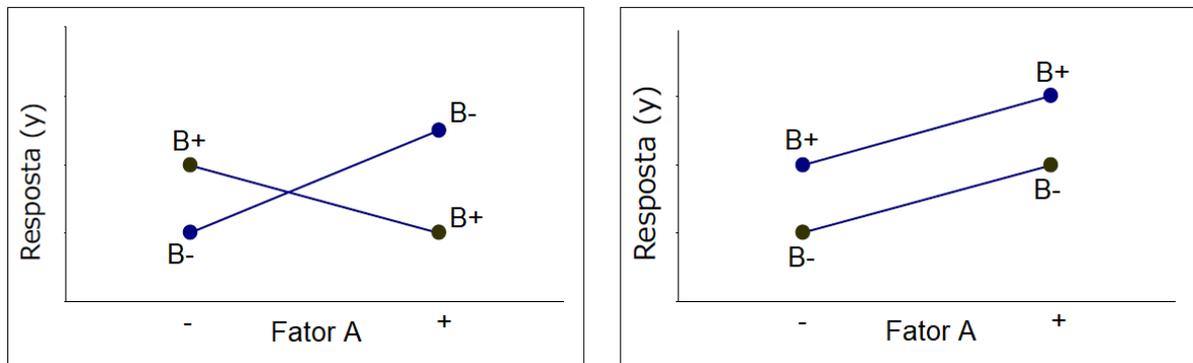
Fonte: Adaptado de Montgomery (2015).

Assim, a estimativa de qualquer efeito pode ser feita a partir da multiplicação das combinações fator-nível na primeira coluna da tabela pelos sinais da coluna correspondente ao efeito principal ou interação que seja encontrar, e então, realiza-se a soma dos resultados para encontrar o *Contraste*. Depois, basta dividir esse valor pela metade do número total de rodadas do experimento para encontrar o efeito, conforme a Equação 5.

$$Efeito = \frac{Contraste}{n 2^{k-1}} \quad (5)$$

De acordo com Galdamez (2002), embora seja relativamente simples estimar esses efeitos, muitas vezes é difícil identificar quais são os fatores de controle que realmente produzem uma diferença significativa na variável-resposta, e por isso, gráficos lineares que representam a variação dos efeitos principais e de interação, são empregados na análise. A Figura 11, apresenta exemplos de gráficos que descrevem os efeitos de interação, os quais representam a variação média de um fator, em função dos níveis de outro fator.

Figura 11 – Gráficos de efeitos de interação



Fonte: Adaptado de Galdamez (2002).

Como pode ser observado na Figura 11, no primeiro gráfico o efeito provocado pela mudança do nível do Fator A é dependente do nível do Fator B, portanto, neste caso existe uma interação entre esses fatores. No segundo gráfico, o efeito causado pela mudança do nível do Fator A é independente do nível do Fator B, sendo assim, não existe interação entre os fatores A e B neste caso.

## 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

De acordo com Drumond (2008), a utilização do planejamento de experimentos baseados em princípios estatísticos, permite com que os pesquisadores consigam extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. Montgomery (2001) diz que o uso de métodos estatísticos no exame dos dados obtidos nos experimentos, resulta na objetividade científica durante as conclusões.

As técnicas estatísticas de experimentos são utilizadas, principalmente, para analisar, interpretar e apresentar os resultados obtidos com experimentos planejados, e desta forma são ferramentas que ajudam a melhorar o desempenho industrial dos produtos e processos de fabricação (GALDAMEZ, 2002). O princípio básico dessa análise está relacionado ao emprego de métodos matemáticos e de estatística, utilizando as informações coletadas com a realização dos testes do experimento, para que desta forma seja possível verificar de maneira quantitativa as relações das variáveis com o problema em questão.

### 2.5.1 Análise de variância

A Análise de Variância – ANOVA (do inglês: *Analysis of Variance*) é utilizada para aceitar ou rejeitar, estatisticamente, as hipóteses investigadas com os experimentos. De acordo com Galdamez (2002), o objetivo dessa técnica é analisar a variação média dos resultados dos testes, e com isso demonstrar quais fatores produzem efeitos significativos na resposta do sistema. Montgomery (2001) propõe uma metodologia que pode ser utilizada para conduzir testes de hipóteses em experimentos, sendo assim, são abordados na sequência os princípios básicos sugeridos pelo autor.

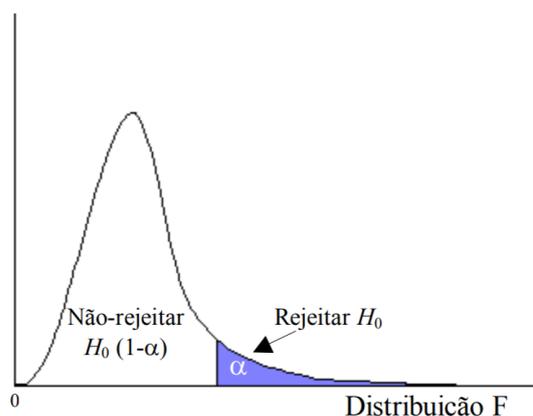
- *Formulação das hipóteses:* ao se realizar um experimento, duas hipóteses sobre os parâmetros devem ser consideradas. A hipótese nula ( $H_0$ ), que caso seja considerada verdadeira, indica que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados e será sempre a hipótese testada no experimento. Caso a hipótese nula seja rejeitada, a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é considerada verdadeira, indicando assim que existe alguma diferença significativa nos dados analisados.

- *Determinar o valor crítico da estatística de teste:* de acordo com Galdamez (2002), ao desenvolver as hipóteses dos experimentos, é necessário que seja calculada uma estatística específica, com base em um determinado resultado da amostra. Montgomery (2001) apresenta algumas distribuições estatísticas (t-student, F-Fischer, Z-standart, etc.) que podem ser usadas para se determinar a probabilidade de uma hipótese ser nula ou verdadeira.

Entretanto, ao se utilizar a metodologia do teste de hipóteses para tomar decisões baseadas nos resultados da análise, existem riscos envolvidos e dois tipos de erros podem ser cometidos. O primeiro erro (tipo I) acontece quando se rejeita a hipótese nula, sendo essa verdadeira, e o segundo erro (tipo II) ocorre quando não se rejeita a hipótese nula, sendo essa falsa. Para reduzir a probabilidade desses erros acontecerem, alguns parâmetros são estimados, como os apresentado a seguir.

- *Nível de significância ( $\alpha$ ):* de acordo com Galdamez (2002), a probabilidade de se cometer o erro tipo I, é identificada como nível de significância do teste estatístico. Portanto, ao se controlar esse parâmetro, é definido o risco que o experimento está correndo, em relação a rejeição de  $H_0$  quando ela for verdadeira, e diversos autores na literatura de planejamento de experimentos, recomendam se utilizar  $\alpha \leq 0,05$ . Desta forma, com o valor de “ $\alpha$ ”, é possível determinar o tamanho da região de rejeição da hipótese nula do experimento, assim como os valores críticos que dividem as regiões de aceitação e rejeição da hipótese nula, conforme apresentado na Figura 12, para a estatística F.

Figura 12 – Região de rejeição de  $H_0$  para uma distribuição F



Fonte: Galdamez (2002).

- *Intervalo de confiança (IC)*: é o complemento do nível de significância, e representa a probabilidade de se concluir que o resultado de um fator que está sendo testado para a hipótese nula seja plausível (GALDAMEZ, 2002). Pode ser calculado como  $(1 - \alpha)$  multiplicado por 100. Montgomery (2001) aponta que, com esse procedimento garante-se um valor pequeno para a probabilidade do erro tipo II.

Portanto, com base nas considerações apresentadas, pode-se agora descrever a técnica estatística ANOVA, utilizada para analisar as respostas dos experimentos planejados. Para ilustrar esse método, será considerado o mesmo planejamento fatorial  $2^3$  apresentado anteriormente, onde o modelo matemático que define a resposta em função dos fatores de controle, foi definido pela Equação 3. De acordo com Galdamez (2002), a análise de variância, tem como objetivo identificar se alguns coeficientes desse modelo matemático são reflexos do erro experimental, ou se realmente são efeitos significativos, e para isso, é utilizado o valor da Soma de Quadrados (SQ), calculado de acordo com a Equação 6.

$$SQ_{Efeito} = \frac{(Efeito)^2}{4n} \quad (6)$$

Na sequência, calcula-se a então o valor da Média Quadrática (MQ) para o efeito, o qual é basicamente a razão entre o valor da soma de quadrados (SQ) pela quantidade de Graus de Liberdade (GL) do termo correspondente. A partir disso, segundo Montgomery (2015), para testar a ausência de efeito dos fatores, deve-se dividir a média quadrática de cada termo pela média quadrática do erro, obtendo assim a estatística de teste  $F_0$ .

Os resultados da ANOVA geralmente são apresentados através de uma tabela, com colunas que incluem as fontes de variação, a soma de quadrados, os graus de liberdade, a média quadrática, assim como o valor-F. A Tabela 3, apresenta o modelo utilizado para realizar a análise de variância de um experimento com planejamento fatorial  $2^3$ .

Tabela 3 – ANOVA para um experimento com planejamento fatorial 2<sup>3</sup>

Fonte de Variação	Soma de Quadrados	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F <sub>0</sub>
A	SQ <sub>A</sub>	1	$MQ_A = \frac{SQ_A}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_A}{MQ_E}$
B	SQ <sub>B</sub>	1	$MQ_B = \frac{SQ_B}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_B}{MQ_E}$
C	SQ <sub>C</sub>	1	$MQ_C = \frac{SQ_C}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_C}{MQ_E}$
AB	SQ <sub>AB</sub>	1	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
AC	SQ <sub>AC</sub>	1	$MQ_{AC} = \frac{SQ_{AC}}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_{AC}}{MQ_E}$
BC	SQ <sub>BC</sub>	1	$MQ_{BC} = \frac{SQ_{BC}}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_{BC}}{MQ_E}$
ABC	SQ <sub>ABC</sub>	1	$MQ_{ABC} = \frac{SQ_{ABC}}{1}$	$F_0 = \frac{MQ_{ABC}}{MQ_E}$
Erro	SQ <sub>E</sub>	8	$MQ_E = \frac{SQ_E}{8}$	
Total	SQ <sub>T</sub>	15		

Fonte: Adaptado de Montgomery (2015).

A interpretação dos resultados da ANOVA, pode ser realizada da seguinte maneira:

- Os parâmetros que possuem razão F<sub>0</sub> maior que a estatística F crítica, são os fatores que exercem influência sobre o valor da média de resultados, e desta forma a hipótese nula é rejeitada;
- Os parâmetros que possuem razão F<sub>0</sub> menor que a estatística F crítica, não causam efeitos significativos sobre a média, portanto, hipótese nula é verdadeira.

A análise de variância das respostas de experimentos, geralmente são desenvolvidas com auxílio de softwares estatísticos, como o Minitab por exemplo, que fazem uso de uma variável estatística chamada de *valor-p*. Essa variável, é definida por Ferreira e Patino (2015) como a probabilidade de se observar um valor da estatística de teste maior ou igual ao encontrado. Sendo assim, com esse parâmetro é possível concluir sobre as hipóteses nulas sem precisar consultar uma tabela de valores críticos da distribuição F. Portanto, se o *valor-p* for menor que o nível de significância ( $\alpha$ ), rejeita-se a hipótese nula.

### 2.5.2 Superfície de resposta

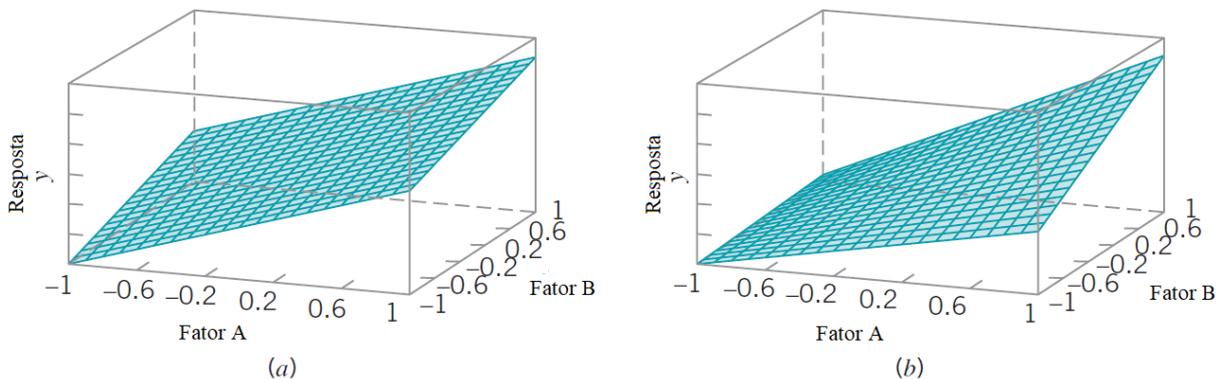
De acordo com Rodrigues (2012), o termo “análise de regressão” define um amplo conjunto de técnicas estatísticas utilizadas para modelar as relações existentes entre as variáveis, e prever o valor de uma ou mais variáveis dependentes ou variável-resposta ( $y$ ) a partir de um conjunto de variáveis independentes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ). Essa relação é representada através de um modelo matemático, ou seja, por uma equação que associa a variável dependente com as variáveis independentes. Segundo Galdamez (2002) a determinação dessa função matemática que modela a variação da resposta em função dos fatores investigados no experimento, é a etapa inicial dessa análise, e geralmente, a função utilizada para se aproximar o conjunto dos resultados, são os polinômios de primeira ordem, conforme o modelo apresentado na Equação 7.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (7)$$

Onde “ $y$ ” representa a variável-resposta, “ $\beta_0, \beta_1, \beta_2 \dots \beta_k$ ” os coeficientes do polinômio, “ $x_1, x_2 \dots x_k$ ” são os fatores experimentais e “ $\varepsilon$ ” o erro experimental.

De acordo com Montgomery (2015), a Equação 7 é conhecida como **modelo de regressão**, e os coeficientes do mesmo são estimados pelo método dos mínimos quadrados. O autor ressalta ainda que, no caso específico de um planejamento fatorial  $2^k$ , é muito simples encontrar as estimativas de mínimos quadrados dos  $\beta$ 's, sendo basicamente a metade do efeito do fator correspondente. Na Figura 13 é apresentado os gráficos tridimensionais que mostram o plano de valores da resposta predita gerados com base no modelo de regressão.

Figura 13 – Gráficos de superfície de resposta para um experimento  $2^3$



Fonte: Adaptado de Montgomery (2015).

Esses gráficos são conhecidos como superfície de resposta, pois representam os valores preditos para a variável-resposta ( $y$ ) em função dos fatores analisados, e com isso torna a interpretação dos resultados do experimento muito mais simples. Dessa forma, os modelos de superfície de resposta tem muitos usos, Montgomery (2015) ressalta que elas podem ser usadas para melhoria e otimização do processo e são muito úteis mesmo nos exemplos mais simples, pois o objetivo de todo experimento planejado é um modelo quantitativo do processo, o que pode ser obtido com esses gráficos.

### 2.5.3 Análise dos resíduos

Dentro de um modelo de regressão linear, a realização de um teste estatístico de hipóteses em relação aos parâmetros do modelo, torna-se necessária, pois segundo Montgomery (2015), a análise de variância supõe que os erros do modelo são independentes e normalmente distribuídos, com a mesma variância em cada nível do fator.

Portanto, de acordo com Drumond (2008) para fazer a verificação de que as observações do experimento sejam normal e independentemente distribuídas, com a mesma variância para cada tratamento ou nível do fator, deve-se realizar a análise dos resíduos. Como pode ser visto na Equação 8 a seguir, um resíduo é definido como a diferença entre um valor observado e seu valor ajustado correspondente.

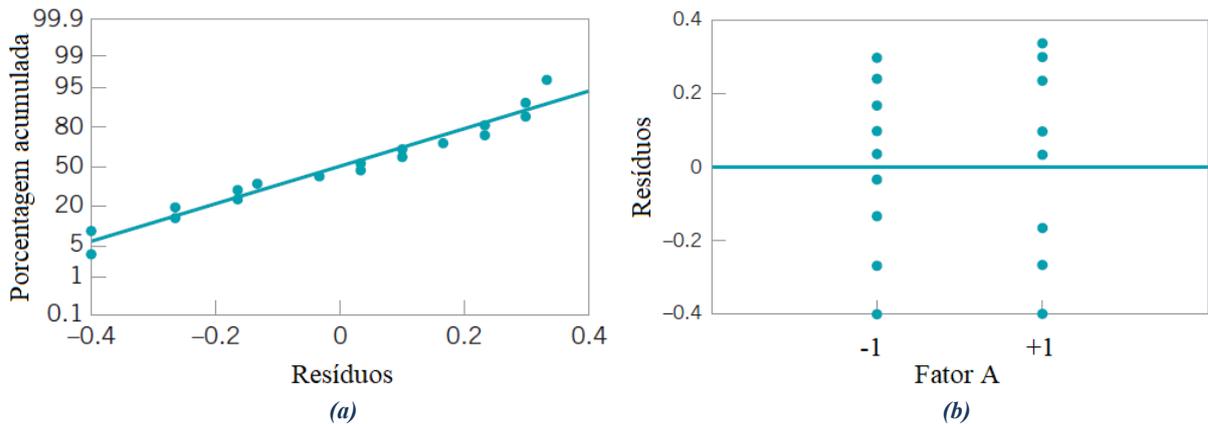
$$e_i = y_i - \bar{y}_i \quad (8)$$

Onde “ $e_i$ ” representa o resíduo, “ $y_i$ ” a observação real e “ $\bar{y}_i$ ” o valor ajustado correspondente. Sendo assim, os resíduos de um experimento fatorial desempenham um papel importante na garantia da adequação do modelo.

Geralmente, são desenvolvidos gráficos para representar os resíduos e com isso determinar se o modelo é adequado e atende os pressupostos da regressão. A análise dos resíduos fornece informações sobre o quão bem o modelo ajusta os dados, tendo em vista que os resíduos devem ser aleatoriamente distribuídos, sem padrões e valores incomuns.

Para testar a hipótese de normalidade, é utilizado um gráfico da probabilidade normal para os resíduos, como pode ser visto no exemplo da Figura 14 (a), e para verificar a hipótese de igualdade das variâncias para os diferentes níveis do fator, a dispersão dos resíduos é analisada através de um gráfico dos resíduos *versus* os níveis do fator, conforme o exemplo da Figura 14 (b).

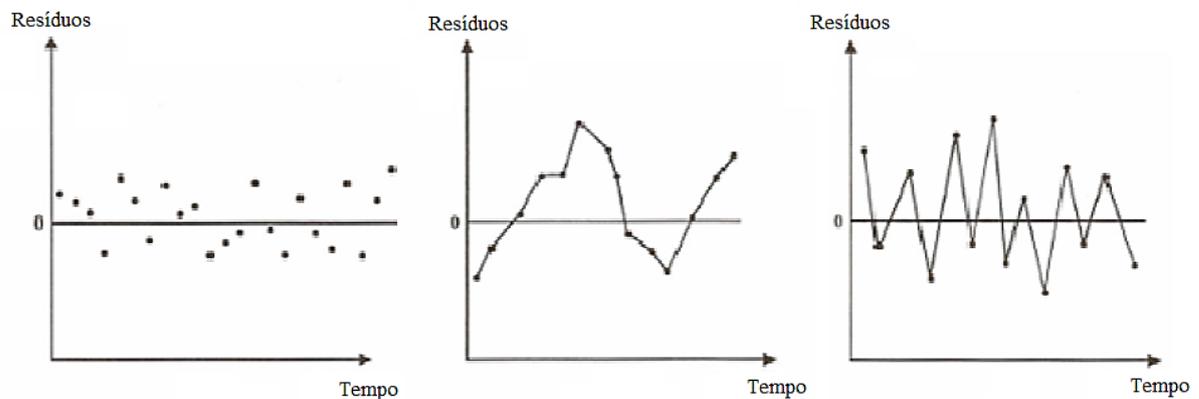
Figura 14 – Gráficos: (a) probabilidade normal (b) resíduos *versus* níveis do fator



Fonte: Adaptado de Montgomery (2015).

Para validar o modelo, deve-se também verificar a suposição de independência, onde utiliza-se um gráfico dos resíduos pela ordem de coleta das observações, conforme os exemplos da Figura 15. Caso os resíduos estejam dispersos como no primeiro gráfico valida-se a essa condição, entretanto, caso os valores apresentem padrões, como no segundo e terceiro gráfico, indícios de observações não independentes podem ser constatados.

Figura 15 – Gráfico de resíduos *versus* ordem de observação



Fonte: Adaptado de Drumond (2008).

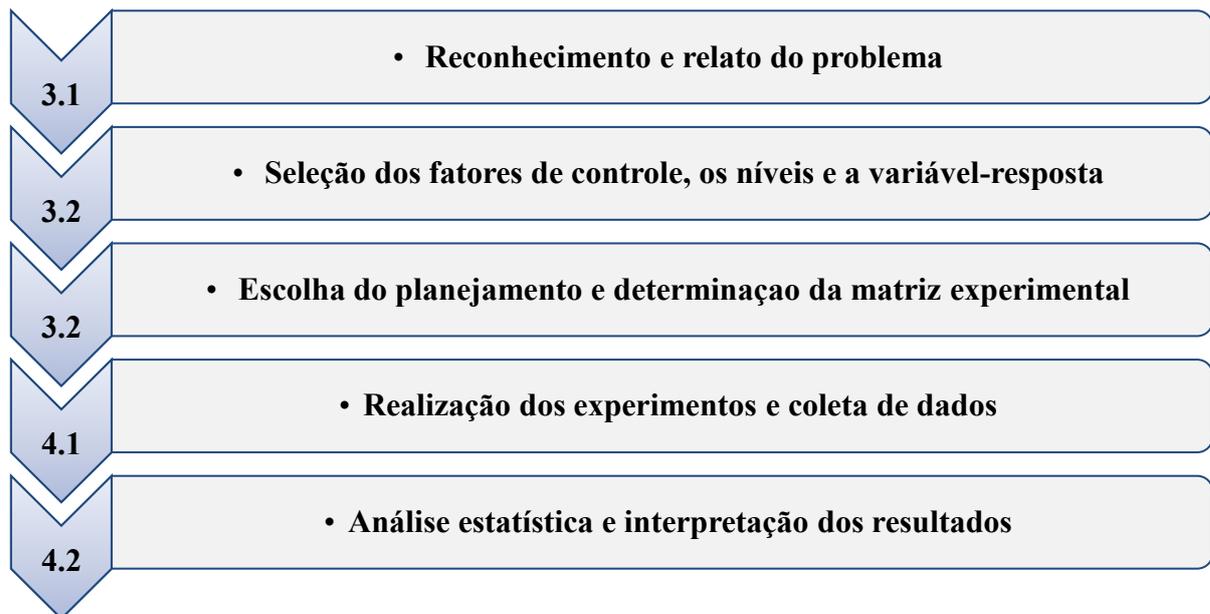
A análise dos resíduos é muito importante para validar o modelo, mas como percebido, é uma análise gráfica. Com base nisso, Drumond (2008) diz que como complemento, pode-se testar a pressuposição de normalidade através de testes de hipóteses, onde os mais conhecidos são o Kolmogorov-Smirnov, Shapiro-Wilk e Anderson-Darling.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas do planejamento pré-experimental, onde realiza-se a identificação do problema que se deseja solucionar, a seleção das variáveis que serão analisados, a definição de como o experimento será conduzido e de como será realizada a compreensão qualitativa das respostas.

A metodologia experimental deste trabalho é baseada no modelo proposto por Coleman e Montgomery (1993), que fornecem um procedimento recomendado para o planejamento e condução de experimentos industriais. O fluxograma da Figura 16, apresenta a sequência das principais atividades desenvolvidas no decorrer deste trabalho.

Figura 16 – Roteiro utilizado para condução dos experimentos



Fonte: Autor (2019).

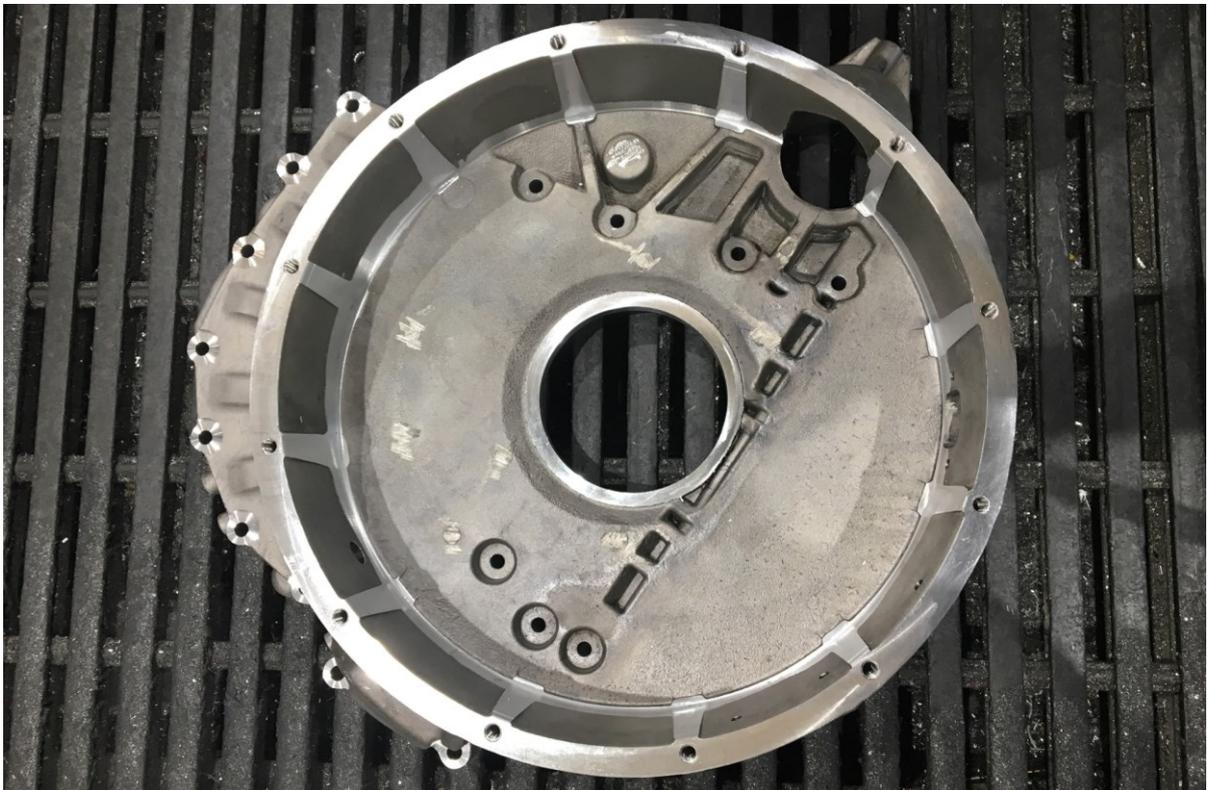
As três primeiras etapas fazem parte do planejamento prévio a execução do experimento e são apresentadas neste capítulo, sendo que os números das setas do fluxograma, correspondem as seções onde essas atividades estão apresentadas. As etapas 4.1 e 4.2 estão relacionadas com a realização dos testes do experimento e análise dos resultados, e desta forma são apresentadas no capítulo seguinte.

### 3.1 INTRODUÇÃO AO ESTUDO DE CASO

O estudo desenvolvido neste trabalho, foi conduzido em uma empresa do ramo metalúrgico localizada no norte do estado de Santa Catarina, que tem como foco a fabricação de componentes automotivos em alumínio. A motivação para realizar o presente estudo, partiu do fato de que um determinado produto tem apresentado um percentual de refugo elevado. Com base nisso, foi proposto a realização de uma análise em cima deste item, visando estudar o principal defeito que este componente tem apresentado, através de uma abordagem experimental, com o intuito de identificar quais variáveis do processo de fabricação tem maior influência e podem resultar nesse problema de qualidade.

O produto em questão é uma carcaça de embreagem de um veículo da linha pesada de uma grande montadora alemã, o qual é ilustrado na Figura 17. Este componente é fabricado através do processo de fundição sob baixa pressão, utilizando a liga de alumínio A360.0 (AlSi10Mg), seguido de tratamento térmico e usinagem. O produto acabado pesa aproximadamente 15 kg.

Figura 17 – Produto em análise: carcaça de embreagem



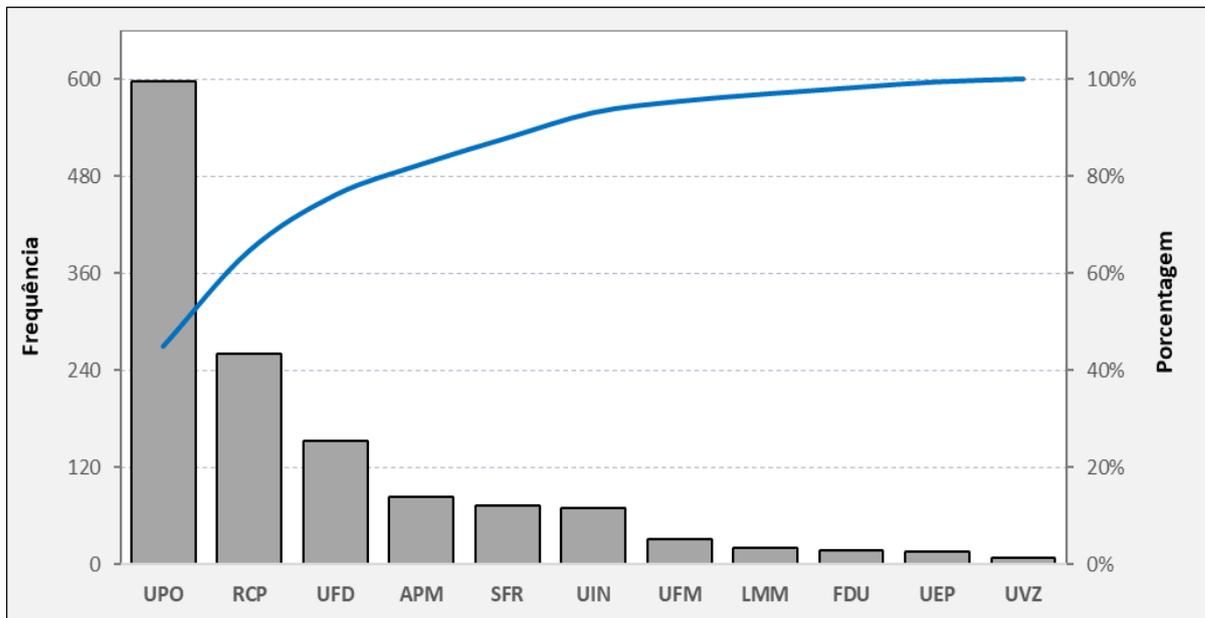
Fonte: Autor (2019).

### 3.1.1 Abordagem inicial do problema

Nessa etapa inicial do planejamento, é fundamental realizar uma identificação clara e precisa do que se deseja solucionar, assim como os objetivos do experimento, pois de acordo com Montgomery (2015) isso contribuirá substancialmente para uma melhor compreensão do processo e para uma eventual solução do problema.

Desta forma, com o intuito de visualizar o cenário completo sobre os problemas de qualidade que esse produto tem apresentado nos últimos seis meses, e desta forma criar uma estratégia mais assertiva para a redução da quantidade de itens refugados, é apresentado na Figura 18 a seguir, um diagrama de Pareto com os principais defeitos registrados.

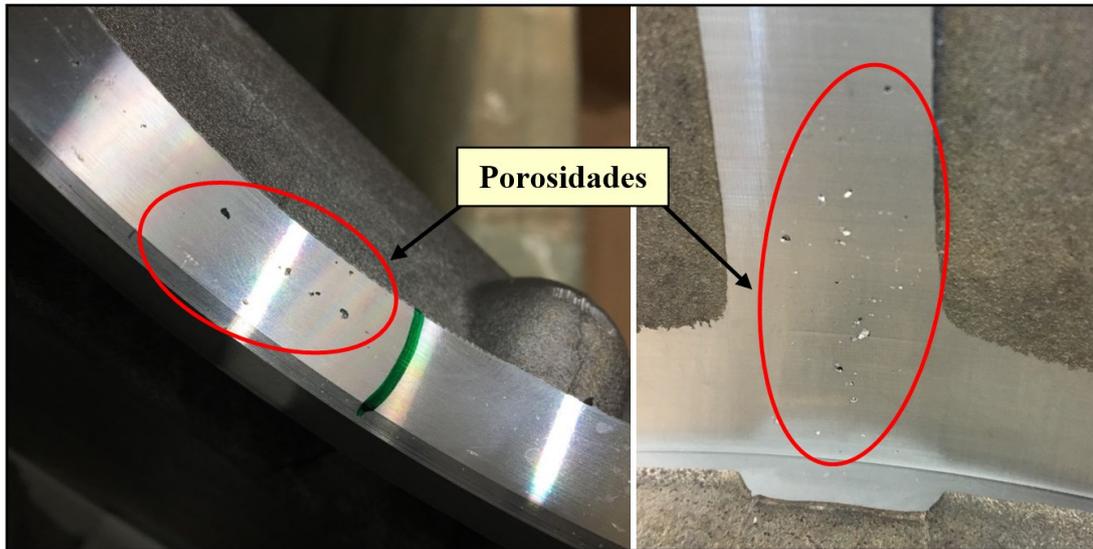
Figura 18 – Diagrama de Pareto dos defeitos



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado no gráfico acima, um defeito em específico corresponde por quase metade das ocorrências de peças com problemas de qualidade, e, portanto, deve ser priorizado para reduzir o índice de rejeição deste produto. O defeito em questão, reportado através da sigla “UPO”, corresponde a porosidade revelada após o processo de usinagem, conforme ilustrado nos exemplos da Figura 19.

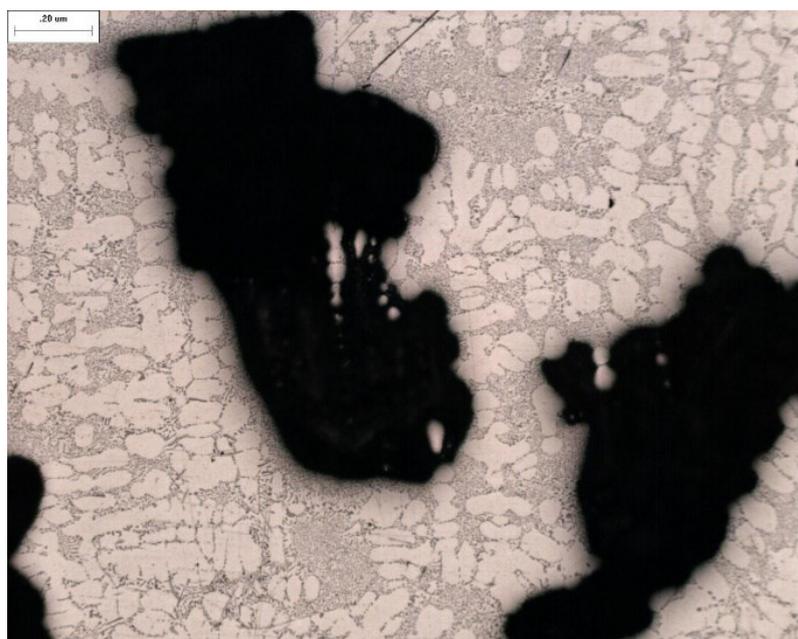
Figura 19 – Exemplos de porosidade no produto



Fonte: Autor (2019).

Como visto anteriormente, a porosidade em produtos fundidos em ligas de alumínio pode ser causada por diferentes fatores. Com base nisso, Ferreira (2014) ressalta que a identificação do tipo de porosidade presente no produto, é fundamental para agilizar o processo de correção. Portanto, para analisar as características dos vazios (poros) retratados na figura anterior, realizou-se uma micrografia na região da peça que continha esse defeito, o resultado pode ser observado na Figura 20.

Figura 20 – Análise metalográfica



Fonte: Autor (2019).

Com essa análise, foi possível observar e definir o formato geométrico dos poros, que como pode ser visto na Figura 20, são irregulares. Quando os vazios apresentam essa característica, são definidos como pequenos rechupes, que surgem como resultado da contração inadequada do material durante o processo de solidificação.

Sendo assim, foram estabelecidos nessa etapa inicial do desenvolvimento, informações importantes que serão essenciais para a sequência do planejamento experimental proposto, como a identificação e caracterização do principal defeito do produto, fornecendo desta forma diretrizes importantes para essa pesquisa.

## 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

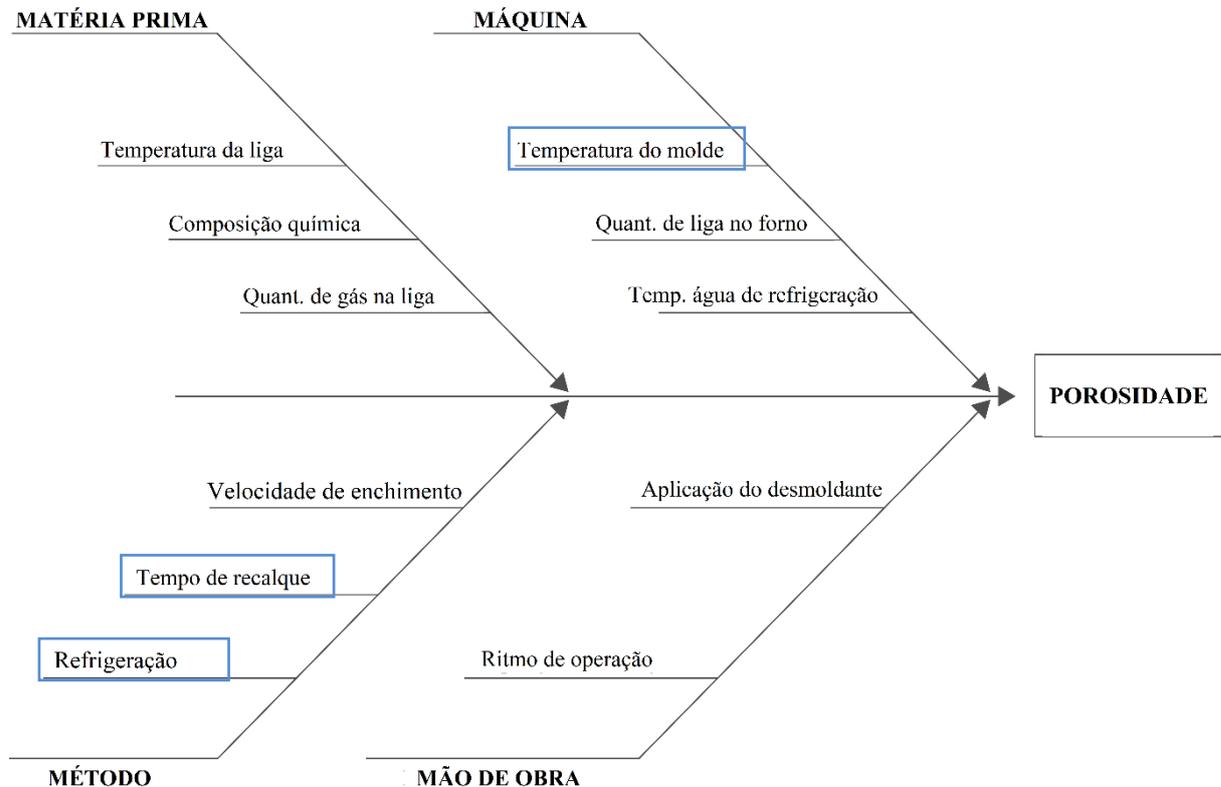
No tópico anterior foi realizado a primeira etapa do planejamento experimental, que se trata de um reconhecimento e relato do problema. A partir de agora, uma análise das causas que geram esse defeito será realizada, com a seleção dos fatores de controle e os níveis de variação, seguido da escolha do planejamento, onde será definida a matriz experimental.

### 3.2.1 Definição dos fatores e dos níveis

A seleção dos fatores de controle, é uma etapa que envolve uma investigação das possíveis causas para o problema que se deseja solucionar, e assim, é fundamental para que o planejamento de experimentos seja bem-sucedido. Coleman e Montgomery (1993) sugerem que nessa etapa os parâmetros do processo sejam classificados por categorias, permitindo assim identificar quais tem maior influência na resposta. Portanto, para definir as variáveis que serão analisadas no experimento, é necessário determinar os diversos fatores que englobam o processo e que podem resultar no defeito em questão.

Para isso, optou-se pela utilização de uma ferramenta da qualidade, o Diagrama de Ishikawa, também conhecido como Diagrama de Causa e Efeito, pois o mesmo ajuda a levantar as causas-raízes de um problema, analisando todos os fatores que envolvem a execução do processo. De acordo com Trivellato (2010), esse diagrama fornece a relação existente entre o resultado indesejado de um processo (efeito) e os diversos fatores (causas) que podem contribuir para que o problema tenha ocorrido. A Figura 21, apresenta o diagrama elaborado para analisar as possíveis causas para o surgimento do defeito.

Figura 21 – Diagrama de Ishikawa (causa e efeito)



Fonte: Autor (2019).

Diversas causas foram listadas no diagrama acima, pois de alguma forma elas afetam o processo de fabricação, e podem favorecer o surgimento do defeito em questão. Como verificado durante a abordagem inicial do problema, os vazios que caracterizam a porosidade nos produtos, apresentam formato irregular (pequenos rechupes), que surgem devido a mudança volumétrica que ocorre durante a solidificação do alumínio.

Entre as variáveis do processo que mais influenciam nesse problema de qualidade, estão aquelas relacionadas com a fase de solidificação. De acordo com Viana e Faria Neto (2013), a ocorrência deste tipo de porosidade pode estar associada com a transferência de calor do molde e ao sistema de alimentação da cavidade, e segundo Fuoco e Correa (2000), a velocidade de resfriamento é um importante parâmetro do processo, quando se deseja reduzir a tendência de formação de porosidades no produto.

Com base nessas considerações e por se tratar de um estudo em fase inicial, optou-se pela seleção das variáveis que apresentam relação direta com o processo solidificação do componente fundido. Desta forma, foram escolhidos os seguintes parâmetros para serem analisados durante este planejamento experimental:

- **Temperatura do molde:** o processo atualmente define que o molde deve estar numa temperatura entre 320 e 490°C, sendo uma faixa de operação relativamente grande. Para analisar como a variação deste fator impacta no surgimento do defeito em questão, foram selecionados dois níveis de temperatura para o molde, os quais estão apresentados na Tabela 4 a seguir. Por ser um fator complicado de ser controlado com precisão, definiu-se uma tolerância de  $\pm 15^\circ\text{C}$  para ambos os níveis.

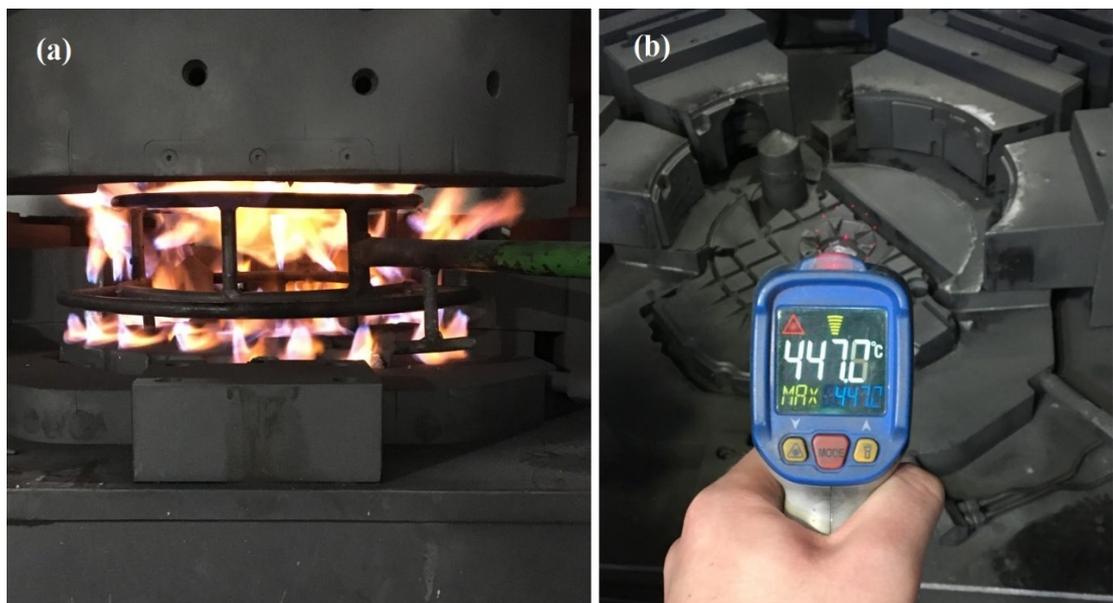
Tabela 4 – Níveis do Fator A (Temperatura do molde)

Nível baixo (-)	Nível alto (+)
350°C ( $\pm 15^\circ\text{C}$ )	450°C ( $\pm 15^\circ\text{C}$ )

Fonte: Autor (2019).

Para fazer com que a ferramenta atinja essas temperaturas no início da produção, o método disponível é através da utilização de um maçarico, onde posiciona-se o mesmo no interior do molde, fazendo com que chamas sejam distribuídas por toda a superfície da cavidade, como pode ser visto na Figura 22 (a). Para aferir a temperatura, será utilizado um termômetro infravermelho digital, conforme demonstrado na Figura 22 (b).

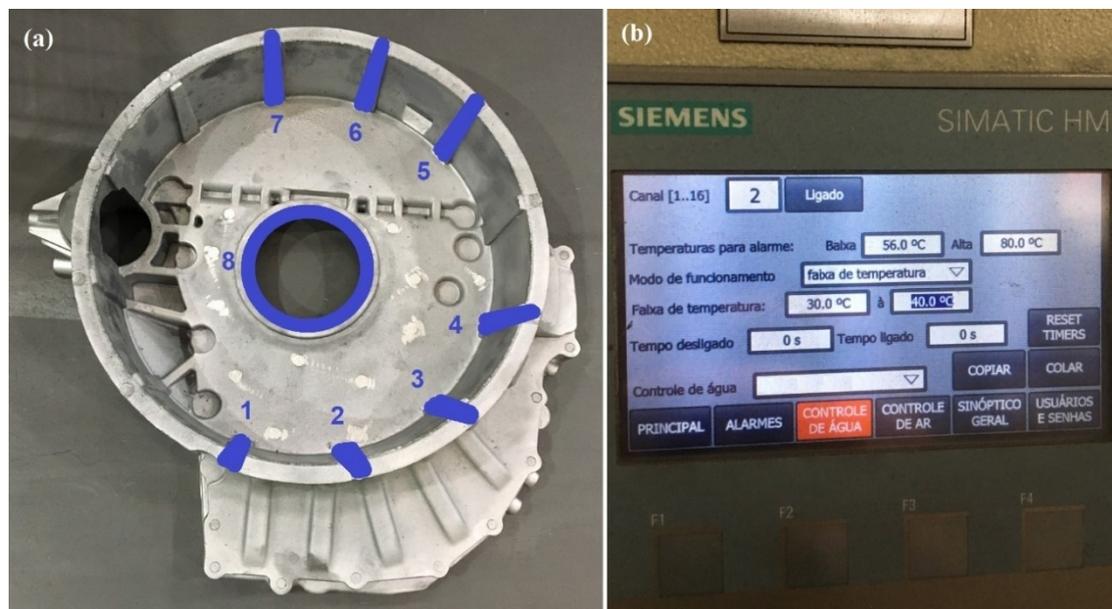
Figura 22 – (a) Aquecimento do molde (b) Aferição da temperatura



Fonte: Autor (2019).

- **Sistema de refrigeração:** durante a operação da máquina, o processo de fundição faz com a temperatura do molde aumente, pois a cada ciclo de injeção a cavidade é preenchida com metal líquido em uma temperatura acima dos 700°C. Para realizar a solidificação da peça de forma ideal, evitando o surgimento de pontos quentes, é utilizado um sistema de refrigeração à água, composto por 8 canais que realizam a troca térmica em determinadas regiões do molde, conforme apresenta a Figura 23 (a). O controle do funcionamento de cada canal de refrigeração é realizado através do sistema apresentado na Figura 23 (b), onde é possível controlar os tempos de acionamento e a faixa de temperatura da água no sistema.

Figura 23 – (a) Canais de refrigeração (b) Sistema de controle

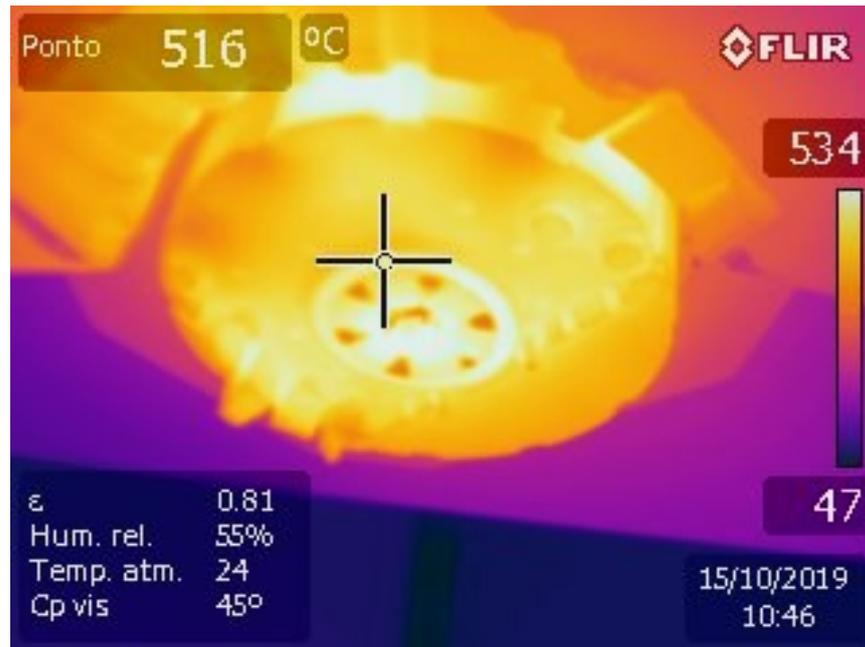


Fonte: Autor (2019).

Para analisar a influência desse fator no processo de solidificação do componente, foram selecionadas duas configurações para o sistema refrigeração. A primeira, chamada de *setup 1*, corresponde ao modelo utilizado atualmente para a operação da máquina, no qual os canais de refrigeração 1 ao 7 são controlados através da faixa de temperatura da água, que no caso é definida entre 40 a 60°C, e o canal 8, que é ativado apenas durante o recalque, por um tempo de 35 segundos, com uma faixa de temperatura entre 40 a 50°C. Para manter a temperatura nesses intervalos de operação, o próprio sistema ajusta automaticamente a vazão de água em cada canal.

A segunda configuração, chamada de *setup 2*, foi definida com base em uma análise de temperatura da ferramenta, realizada com o auxílio de uma câmera termográfica, onde foi possível verificar que algumas regiões apresentavam temperaturas mais elevadas durante a operação, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Análise utilizando a câmera termográfica



Fonte: Autor (2019).

As regiões mais claras da termografia apresentada na Figura 24, indicam os pontos com maior temperatura na ferramenta, e com base nisso, optou-se por utilizar nessas regiões parâmetros que fornecem uma maior troca térmica. Desse modo, definiu-se que no *setup 2*, os canais de refrigeração 1, 2, 3 e 4 irão operar numa faixa de temperatura entre 30 e 40°C, e no canal 8 o tempo de operação será de 50 segundos (ativados somente durante o recalque). Sendo assim, os dois níveis de ajuste desse fator foram selecionados, os quais estão apresentados na Tabela 5, e apesar de não representarem o valor quantitativo do referido parâmetro, indicam o funcionamento das configurações do sistema de refrigeração.

Tabela 5 – Níveis do Fator B (Sistema de refrigeração)

Nível baixo (-)	Nível alto (+)
setup1	setup2

Fonte: Autor (2019).

- **Tempo de recalque:** o recalque é a última fase do ciclo de injeção do processo de FBP, a qual tem como objetivo principal a solidificação do metal dentro da coquilha. Durante essa etapa, a pressão de injeção é mantida, de forma que a solidificação do produto aconteça com determinada compactação. Para verificar como a variação do tempo de recalque tem influência sobre a resposta analisada, foram definidos dois níveis de regulagem para este fator, os quais pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6 – Níveis do Fator C (Tempo de recalque)

Nível baixo (-)	Nível alto (+)
130s	190s

Fonte: Autor (2019).

Como pode-se perceber, a diferença entre os tempos nos níveis alto e baixo, é de 60 segundos, e isso se deve ao fato de que os mesmos foram determinados a partir do tempo padrão utilizado pelo processo, de 160 segundos. Portanto, essa variação de  $\pm 30$  segundos, permitirá analisar como esse parâmetro interfere nas propriedades dos produtos, sem causar grandes alterações no processo de fundição. Para realizar o ajuste dos níveis desse fator, utiliza-se o painel de controle da máquina, onde é possível definir o tempo dessa etapa do processo, como apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Tela para controle do tempo de recalque da máquina



Fonte: Autor (2019).

Portanto, com base nas definições apresentadas nessa seção, foram definidos os fatores de controle que serão utilizados para a realização do DOE proposto neste trabalho, os quais estão apresentados novamente na Tabela 7.

Tabela 7 – Fatores e níveis dos parâmetros analisados nos experimentos

Fatores de Controle	Níveis	
	(-)	(+)
Fator A – Temperatura do molde	350°C	450°C
Fator B – Sistema de refrigeração	setup1	setup2
Fator C – Tempo de recalque	130s	190s

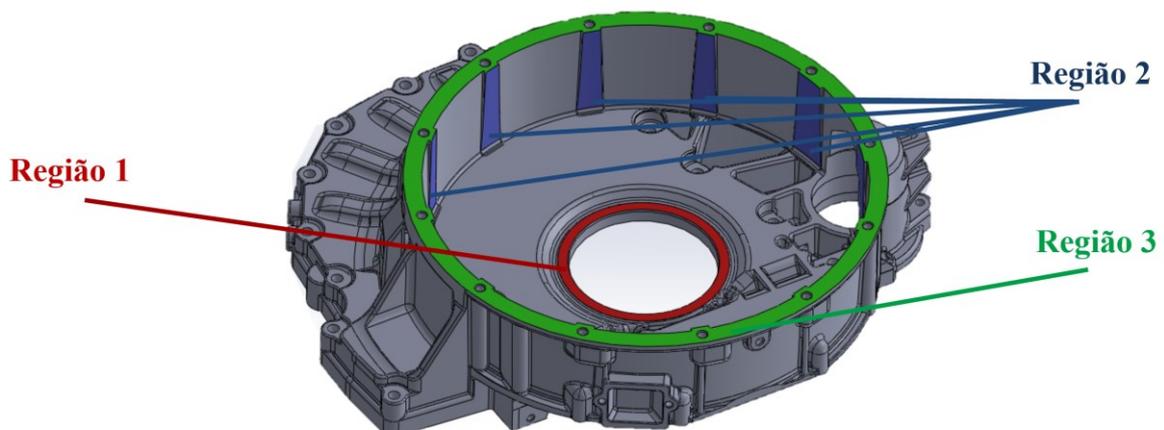
Fonte: Autor (2019).

Como pode-se notar na Tabela 7, os fatores de controle selecionados, foram respectivamente chamados de Fator A, B e C, assim como os níveis baixo e alto, de “-” e “+”. Isso foi feito para simplificar e principalmente para padronizar com a nomenclatura adotada pelo software que será utilizado para realizar a análise das respostas do experimento.

### 3.2.2 Seleção da variável-resposta

Para avaliar as respostas do experimento, a característica medida será o nível de porosidade resultante no produto, analisada em três regiões usinadas da peça, conforme mostrado na Figura 26. A primeira região é diâmetro central da peça, na qual é montada uma vedação do eixo, a segunda e terceira regiões são, respectivamente, as aletas e a flange utilizada para montagem do sistema de transmissão.

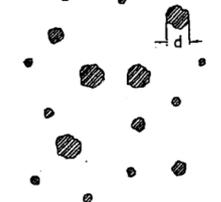
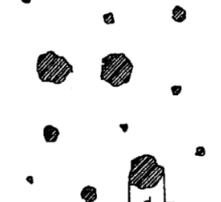
Figura 26 – Regiões de peça onde será medida a variável-resposta



Fonte: Autor (2019).

Para mensurar o nível de porosidade nessas áreas, será utilizado a classificação apresentada no Quadro 2, onde atribuiu-se notas de 0 a 5 de acordo com o diâmetro dos poros.

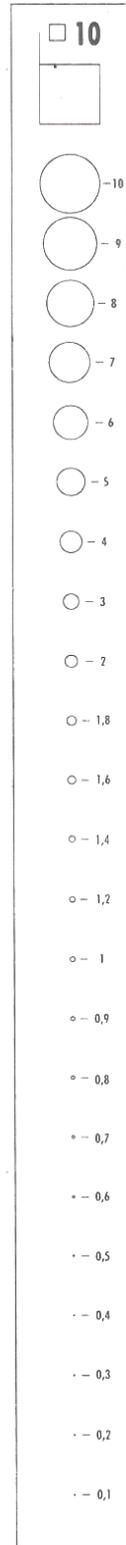
Quadro 2 – Classificação do nível de porosidade resultante

Padrão	Características	Classificação
	<i>Isento de poros</i> (tamanho e quantidade insignificantes)	<b>0</b>
	<i>Diâmetro dos poros (d):</i> máx. 0,4 mm	<b>1</b>
	<i>Diâmetro dos poros (d):</i> máx. 0,8 mm	<b>2</b>
	<i>Diâmetro dos poros (d):</i> máx. 1,2 mm	<b>3</b>
	<i>Diâmetro dos poros (d):</i> máx. 1,6 mm	<b>4</b>
	<i>Diâmetro dos poros (d):</i> > 1,6 mm	<b>5</b>

Fonte: Autor (2019).

Para mensurar as respostas, utilizou-se uma régua padronizada para medir diâmetros, que apresenta uma resolução de 0,1 mm para valores de até 1 mm, e uma resolução de 0,2 mm para valores entre 1 e 2 mm. Na Figura 27 pode-se observar esse dispositivo.

Figura 27 – Régua utilizada para medir o diâmetro dos poros



Fonte: Ferramenta fornecida pela empresa (2019).

Portanto, com base na classificação apresentada no Quadro 2 e através da utilização do dispositivo apresentado na Figura 27, as respostas dos experimentos serão estimadas. Dessa forma, este método será utilizado para realizar a medição do nível de porosidade presente nos produtos, e assim obter uma compreensão quantitativa dos resultados obtidos com as rodadas de testes do planejamento experimental proposto.

### **3.2.3 Escolha do planejamento e matriz experimental**

A escolha do planejamento experimental, segundo Montgomery (2015), é relativamente simples de ser executada se as etapas anteriores foram realizadas corretamente, e deve envolver considerações sobre o tamanho da amostra (número de replicações) e a seleção de uma ordem adequada para as rodadas dos testes do experimento proposto. De acordo com Galdamez (2002) os experimentos industriais devem ser planejados através de uma matriz experimental, a qual corresponde a terceira etapa do roteiro sugerido para o desenvolvimento, onde o objetivo dessa atividade é garantir que os dados obtidos com os testes sejam confiáveis e que os recursos (equipamentos, pessoas, materiais e informações) disponíveis para experimentação sejam bem utilizados.

Entre os métodos de planejamento experimental disponíveis na literatura, o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. O processo experimental desse método é baseado na realização de testes com cada uma das combinações da matriz experimental, para que na sequência, seja possível determinar os efeitos principais e de interação dos fatores investigados, e assim determinar as melhores condições do processo em análise.

Como observado na etapa anterior, foram selecionados três fatores de controle, variando entre dois níveis, desta forma um planejamento fatorial  $2^3$  foi empregado. Para definir a sequência das rodadas de testes, a aleatorização tornaria o experimento impraticável, devido ao tempo demandado para regulagem de cada fator. Portanto, definiu-se uma ordem que permite seguir um roteiro experimental mais simples de ser executada. Outro problema enfrentado, devido aos custos de fabricação do produto, foi a quantidade repetições das rodadas do experimento, que pode ser replicado apenas uma vez. Com base nessas considerações, definiu-se a matriz experimental apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 – Matriz experimental

<b>Tratamento (Rodada)</b>	<b>Temp. do molde (Fator A)</b>	<b>Sist. de refrigeração (Fator B)</b>	<b>Tempo de recalque (Fator C)</b>
1	350°C (-)	setup1 (-)	130s (-)
2	350°C (-)	setup1 (-)	190s (+)
3	350°C (-)	setup2 (+)	130s (-)
4	350°C (-)	setup2 (+)	190s (+)
5	450°C (+)	setup1 (-)	130s (-)
6	450°C (+)	setup1 (-)	190s (+)
7	450°C (+)	setup2 (+)	130s (-)
8	450°C (+)	setup2 (+)	190s (+)

Fonte: Autor (2019).

Os números de cada rodada, indicam um tratamento (combinação) corresponde dos fatores e níveis, e como pode ser verificado, definiu-se a sequência a partir do Fator A (temperatura do molde), onde os 4 primeiros testes serão realizados com o nível baixo deste, e os 4 últimos com o nível alto. Os fatores B e C foram ajustados de forma que todas as combinações fator-nível fossem realizadas, e desta forma, a matriz experimental foi desenvolvida, definindo assim a sequência para realização dos testes do experimento. Vale ressaltar ainda que, como o experimento contará com duas replicações, o ensaio de cada tratamento será realizado duas vezes, e assim 16 rodadas serão conduzidas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos durante o desenvolvimento deste trabalho, iniciando com as respostas encontradas durante a condução dos testes do experimento proposto, seguido por uma análise estatística desses resultados.

### 4.1 RESPOSTAS DO EXPERIMENTO

Com base na matriz apresentada no capítulo anterior, foram conduzidos os testes do planejamento experimental proposto neste trabalho. Os valores encontrados para a variável-resposta estão apresentados na Tabela 9, e representam a medição do nível do defeito resultante em cada rodada do experimento realizado.

Tabela 9 – Respostas do experimento

<b>Rodada</b>	<b>Região 1</b>	<b>Região 2</b>	<b>Região 3</b>	<b>Total</b>
1	0	3	0	3
2	0	3	0	3
3	0	2	0	2
4	0	2	0	2
5	2	4	0	6
6	0	4	0	4
7	0	2	0	2
8	0	3	0	3
9	0	4	0	4
10	0	3	0	3
11	0	1	0	1
12	0	3	0	3
13	2	3	0	5
14	1	5	0	6
15	0	4	0	4
16	0	2	0	2

Fonte: Autor (2019).

As oito primeiras rodadas (1 a 8), correspondem a primeira réplica do experimento, enquanto as oito últimas (9 a 16), correspondem a segunda réplica do experimento, onde foram seguidos os tratamentos indicados na matriz experimental. A Figura 28, demonstra o defeito e o método de aferição da resposta, exemplificando o procedimento utilizado para obter os valores apresentados na tabela anterior.

Figura 28 – Medição da variável-resposta (porosidade)

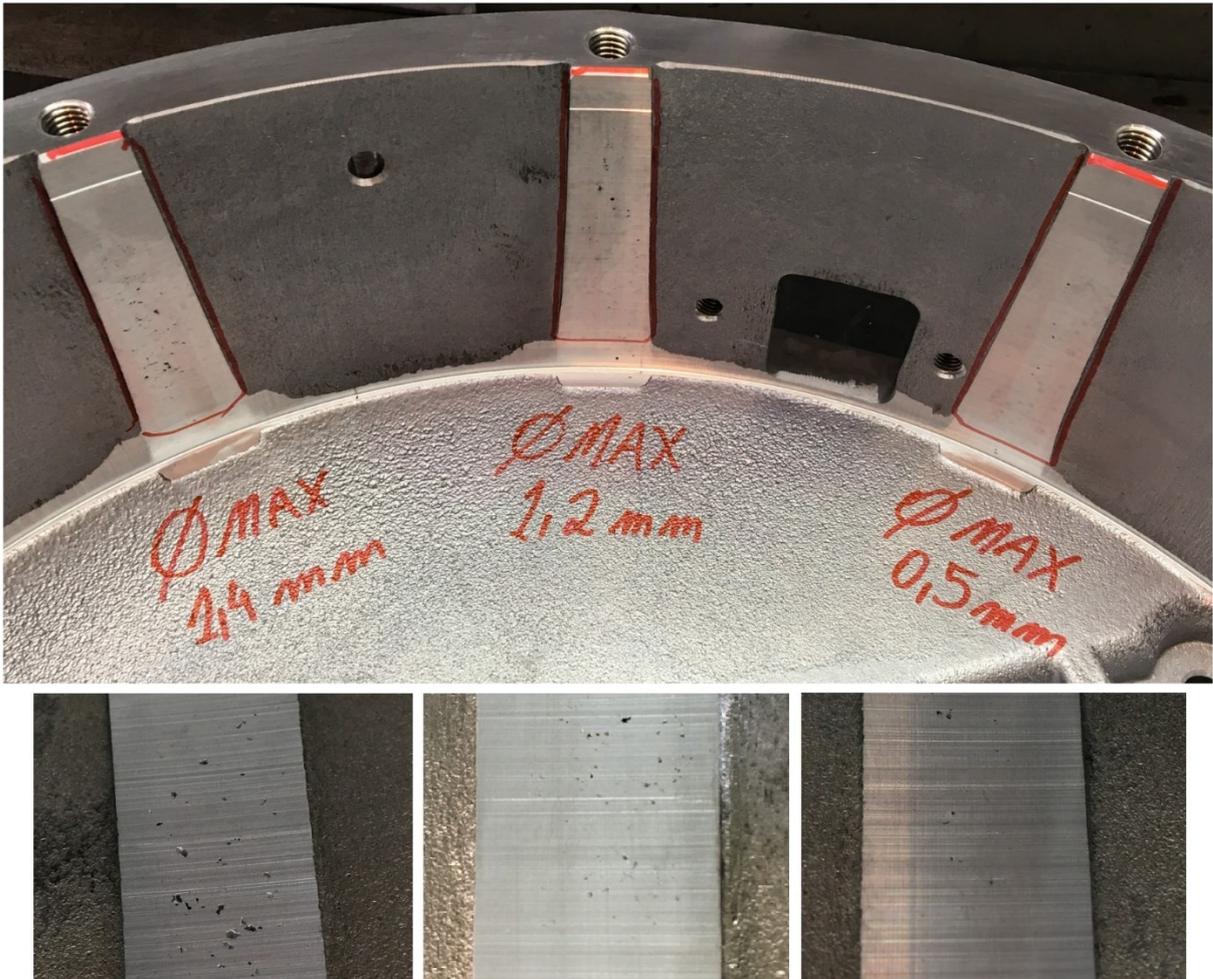


Fonte: Autor (2019).

Como pode ser percebido nos valores apresentados anteriormente na Tabela 9, algumas rodadas resultaram em uma medição mais elevada da resposta, enquanto outras rodadas em valores menores, ou até mesmo com respostas nulas. Isso se deve ao fato de que, apesar da medição ter sido realizada em três regiões usinadas do produto, em apenas duas dessas o defeito foi constatado. Sendo que a Região 3 da peça não apresentou nenhum defeito nos 16 itens que foram fabricados, e, portanto, não foi possível avaliar a resposta nessa região.

A Região 2 do produto foi a mais afetada, onde todas as amostras apresentaram alguma porosidade, principalmente nas áreas próximas as refrigerações 6 e 7. Para medir a resposta nessa região, considerando que a superfície da mesma não é contínua, tomou-se como base o maior resultado encontrado, conforme pode ser visto no exemplo da Figura 29.

Figura 29 – Porosidade na Região 2



Fonte: Autor (2019).

Como também pode ser observado na tabela com as respostas do experimento, a Região 1 do produto apresentou pouca variação, sendo que na maioria das rodadas nenhuma porosidade foi evidenciada no diâmetro central da peça.

Para compreender como os fatores que foram analisados nesse experimento influenciaram no surgimento do defeito nessas regiões do produto, assim como quais efeitos foram mais significantes para a variação da resposta, é realizado na sequência deste trabalho uma análise estatística dos resultados apresentados nessa seção.

## 4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DAS RESPOSTAS

Com o intuito de verificar a variação da resposta do experimento mais detalhadamente, serão realizadas duas análises das respostas, a primeira utilizando o resultado total da Tabela 9 (soma das medições das três regiões), e outra análise, onde as respostas de cada região foi examinada individualmente. Desta forma, apresenta-se a seguir as análises para a resposta total e parcial para as medições de porosidade resultante no produto.

### 4.2.1 Resposta total

Para analisar de forma geral o nível de porosidade resultante nos produtos com os testes que foram realizados, utilizou-se como base os valores da última coluna da Tabela 9, que representam a soma das medições da porosidade realizada nas três regiões das peças. O planejamento experimental foi implementado no Minitab, conforme as configurações apresentadas na Figura 30, onde os números nas arestas do cubo, correspondem ao valor médio das respostas em cada ponto do planejamento.

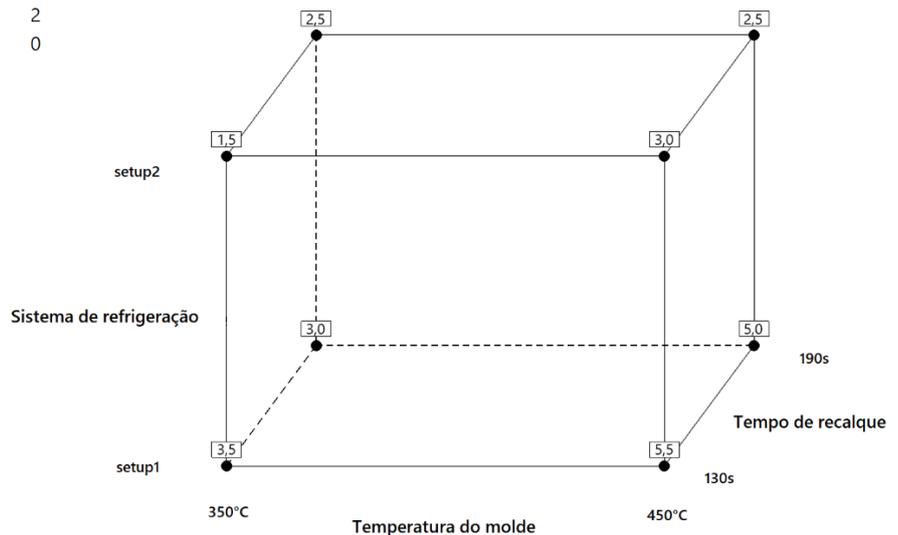
Figura 30 – DOE fatorial analisado no Minitab

#### Resumo do experimento

Fatores: 3 Experimento Base: 3; 8  
 Ensaios: 16 Réplicas: 2  
 Blocos: 1 Pts centrais (total): 0

#### Tabela do Experimento

Ensaio	Blc	A	B	C
1	1	-	-	-
2	1	-	-	+
3	1	-	+	-
4	1	-	+	+
5	1	+	-	-
6	1	+	-	+
7	1	+	+	-
8	1	+	+	+
9	1	-	-	-
10	1	-	-	+
11	1	-	+	-
12	1	-	+	+
13	1	+	-	-
14	1	+	-	+
15	1	+	+	-
16	1	+	+	+



Fonte: Autor (2019).

O efeito principal de cada variável, ou seja, a mudança na resposta produzida pela alteração no nível do fator, assim como os efeitos das interações dos fatores, foram determinados e podem ser visualizados na Tabela 10.

Tabela 10 – Estimativa dos efeitos

<b>Termo</b>	<b>Efeito</b>	<b>Coef.</b>	<b>EP de Coef.</b>	<b>VIF</b>
A	1,375	0,688	0,225	1,00
B	- 1,875	- 0,937	0,225	1,00
C	- 0,125	- 0,062	0,225	1,00
AB	- 0,625	- 0,313	0,225	1,00
AC	- 0,375	- 0,187	0,225	1,00
BC	0,375	0,187	0,225	1,00
ABC	- 0,375	- 0,188	0,225	1,00

Fonte: Autor (2019).

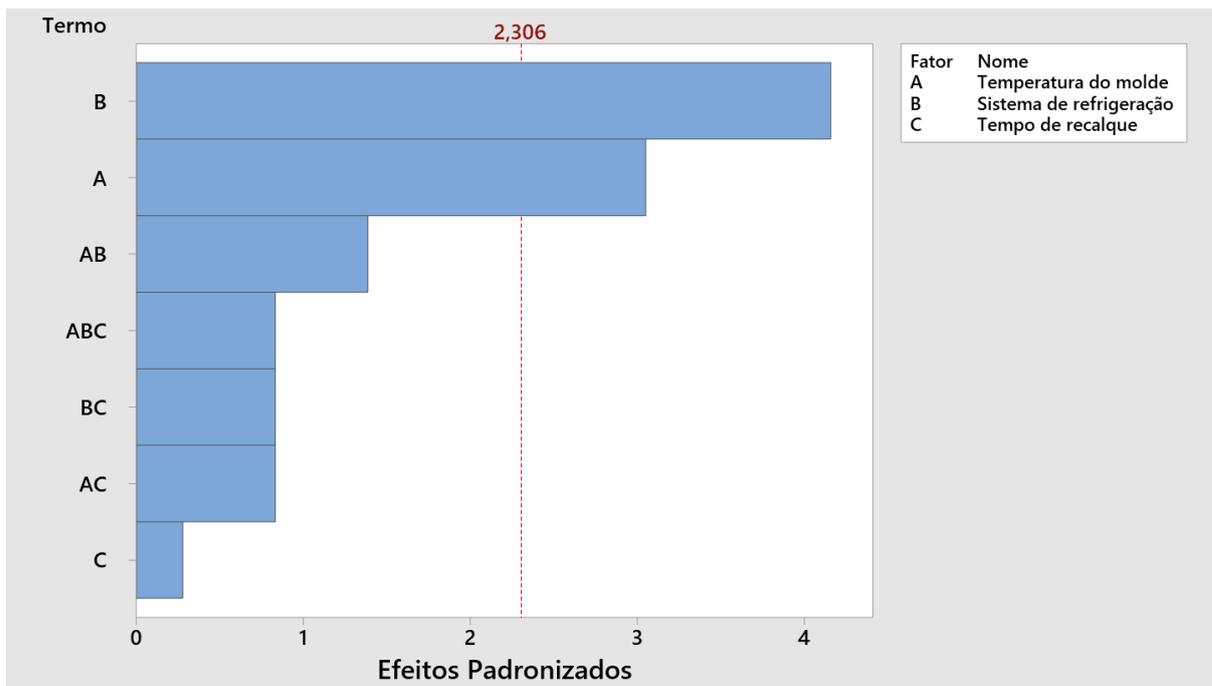
Os valores apresentados na tabela acima, são as saídas do Minitab para a análise do experimento fatorial, sendo que os termos “Coef.” e “EP de Coef.” representam, respectivamente, o coeficiente (que indica a alteração média na resposta prevista quando o fator muda do nível baixo para o nível alto) e o erro padrão do coeficiente (que indica a variabilidade entre a estimativa do coeficiente que seria obtida caso o experimento fosse replicado mais vezes). Por fim, o valor “VIF” (Fator de Inflação de Variância) indica o quanto a variação de um coeficiente é inflada devido a correlações entre os preditores no modelo, e como todos os valores são 1, indicam assim que os preditores não estão correlacionados.

A primeira etapa desta análise visa determinar quais termos apresentaram maior significância para a variabilidade da resposta, e como pode-se perceber pelo exame da magnitude dos efeitos apresentado na Tabela 10, os fatores A e B, que correspondem, respectivamente, a temperatura do molde e ao sistema de refrigeração, foram os que apresentaram maior relevância. Enquanto os demais efeitos não apresentaram magnitudes consideráveis, e a princípio não resultaram em grandes variações na resposta analisada. O sinal negativo de alguns efeitos, indicam a direção do mesmo, ou seja, demonstram que a resposta diminui com a variação do nível baixo (–) para o nível alto (+) do fator.

Para auxiliar nesta análise, o Minitab fornece um gráfico de Pareto dos efeitos padronizados, o qual pode ser visto na Figura 31, com o intuito de comparar a magnitude relativa e a significância estatística dos efeitos. Esse gráfico, apresenta os efeitos em ordem

decrecente de seus valores absolutos, sendo que a linha de referência indica quais efeitos são significativos, considerando um intervalo de confiança de 95%. Como pode ser verificado neste gráfico, justamente os fatores A e B apresentaram relevância, aprovando assim a verificação realizadas através da magnitude dos efeitos.

Figura 31 – Pareto dos efeitos padronizados



Fonte: Autor (2019).

Na sequência, para confirmar a significância dos efeitos, deve-se realizar a análise de variância, onde com isso procura-se determinar quais termos exercem efeitos estatisticamente significativos sobre a resposta. Como visto, para determinar se a associação entre as respostas e os termos correspondentes do modelo são significativos, deve-se comparar o valor-p de cada efeito com o nível de significância considerado na análise, a fim de avaliar a hipótese nula.

Com base nisso, é apresentado na Tabela 11, os valores obtidos para a análise de variância do experimento fatorial realizado, que foi desenvolvida com o auxílio do Minitab. Nesta tabela estão contemplados os graus de liberdade, a soma dos quadrados e as médias quadráticas para cada efeito. Além disso, é apresentado também o valor-F, que como verificado anteriormente é uma estatística de teste usada para determinar se o termo está associado com a resposta, determinada através da razão da média quadrática do fator correspondente, pela média quadrática do erro.

Tabela 11 – ANOVA da resposta total do experimento

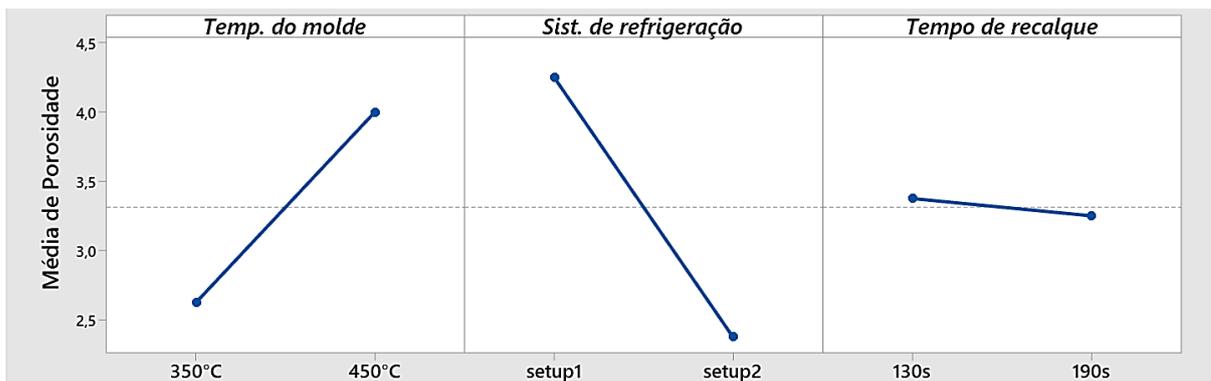
Fonte	GL	SQ (Aj.)	MQ (Aj.)	Valor F	Valor-p
Modelo	7	24,9375	3,5625	4,38	0,027
Linear	3	21,6875	7,2292	8,90	0,006
A	1	7,5625	7,5625	9,31	0,016
B	1	14,0625	14,0625	17,31	0,003
C	1	0,0625	0,0625	0,08	0,789
Interação de 2 fatores	3	2,6875	0,8958	1,10	0,403
AB	1	1,5625	0,5625	1,92	0,203
AC	1	0,5625	0,5625	0,69	0,430
BC	1	0,5625	0,5625	0,69	0,430
Interação de 3 fatores	1	0,5625	0,5625	0,69	0,430
ABC	1	0,5625	0,5625	0,69	0,430
Erro	8	6,5000	0,8125		
Total	15	31,4375			

Fonte: Autor (2019).

Portanto, através da análise dos valores apresentados na tabela anterior, e considerando o nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ), pode-se concluir que apenas os termos A e B apresentaram resultados estatisticamente significativos, pois o valor-p de cada um desses é menor do que o nível de significância, e desta forma a hipótese nula ( $H_0$ ), que supõe que não existe relação do termo analisado com a variação da resposta, é rejeitada.

Para auxiliar na compreensão desses resultados, a Figura 32 apresenta os gráficos dos efeitos principais, que descrevem como a variável-resposta (porosidade) se comporta quando os fatores mudam do nível baixo (-) para o nível alto (+), ou vice-versa.

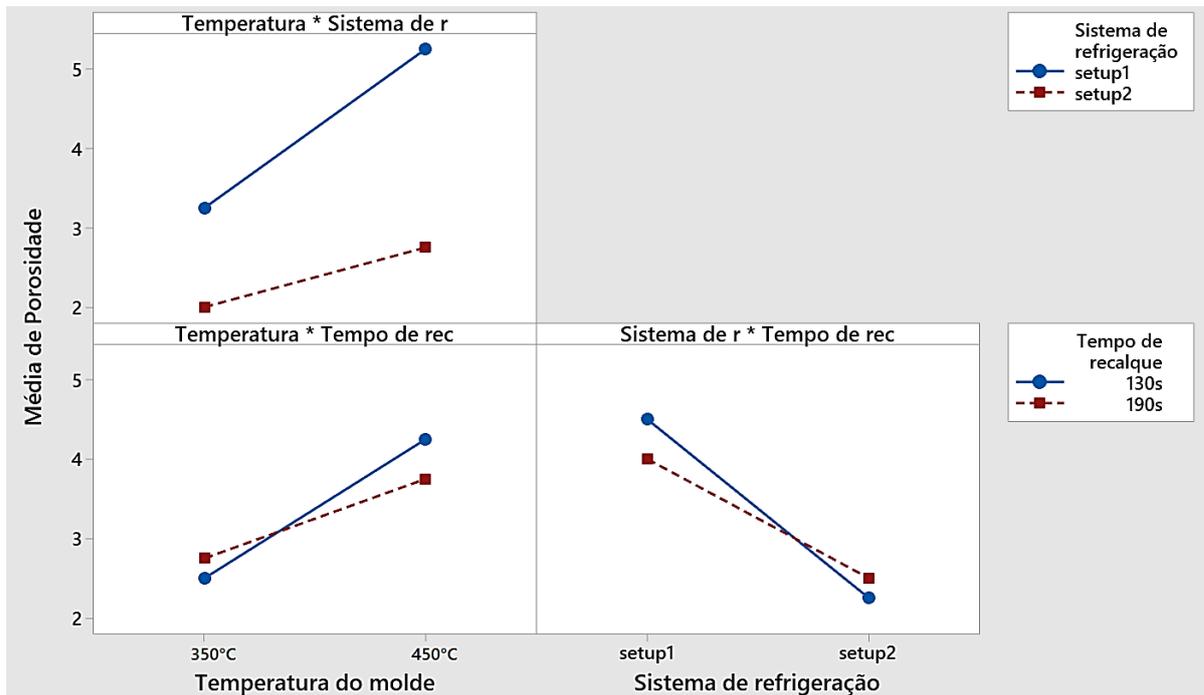
Figura 32 – Gráficos dos efeitos principais



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto nesses gráficos, os fatores considerados estatisticamente significativos na etapa anterior (sistema de refrigeração e temperatura do molde), apresentam uma variação relevante na variável-resposta (média de porosidade) entre os níveis que foram analisados, enquanto a mudança do nível do tempo de recalque praticamente não produz alteração na resposta. De maneira análoga, apresenta-se na Figura 33, os gráficos para as interações de dois fatores, permitindo assim analisar a relação entre esses.

Figura 33 – Gráficos dos efeitos de interação



Fonte: Autor (2019).

Com esses gráficos, os efeitos de interação são compreendidos mais facilmente, pois através dos mesmos é possível verificar a relação existente entre os fatores e se existe alguma interação, ou seja, se a resposta de algum fator é dependente do nível de outro fator.

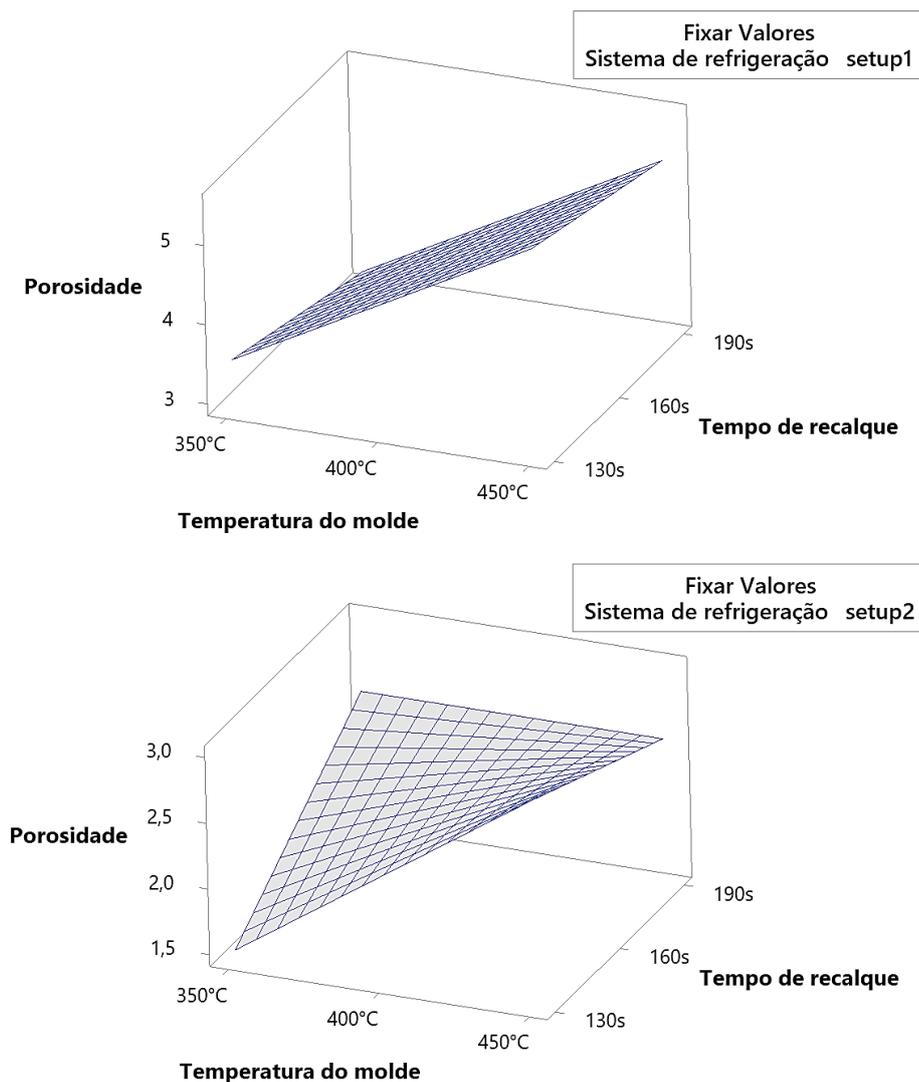
Como pode ser observado no primeiro gráfico, a variação da temperatura do molde torna-se um fator menos influente quando o sistema de refrigeração está no nível alto (*setup2*), evidenciando assim a importância do sistema de refrigeração. Entretanto, essa verificação é baseada apenas na interpretação visual desse gráfico, pois a interação desses fatores, assim como as demais, não apresentaram significância estatística na análise realizada.

O modelo de regressão que representa a respostas desse experimento, é descrito pela Equação 9, e pode ser usado para prever a porosidade resultante no produto em qualquer ponto da região experimental original.

$$\begin{aligned} \text{Porosidade} = & 3,313 + 0,688A - 0,937B - 0,062C - 0,313AB - 0,187AC \\ & + 0,187BC - 0,188ABC \end{aligned} \quad (9)$$

Através deste modelo, o Minitab fornece os gráficos de superfície para a resposta, como os que estão apresentados na Figura 34, representando a resposta calculada para diversos pontos entre os níveis de cada fator, e com isso é possível verificar mais precisamente como a variável-resposta se comporta com a variação dos níveis dos fatores.

Figura 34 – Gráficos de superfície para a resposta



Fonte: Autor (2019).

Para conferir se o modelo ajusta bem os dados, o Minitab fornece algumas estatísticas de qualidade do ajuste no sumário do modelo, entre as quais, pode-se destacar as duas que estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Sumário do modelo (estatísticas de qualidade do ajuste)

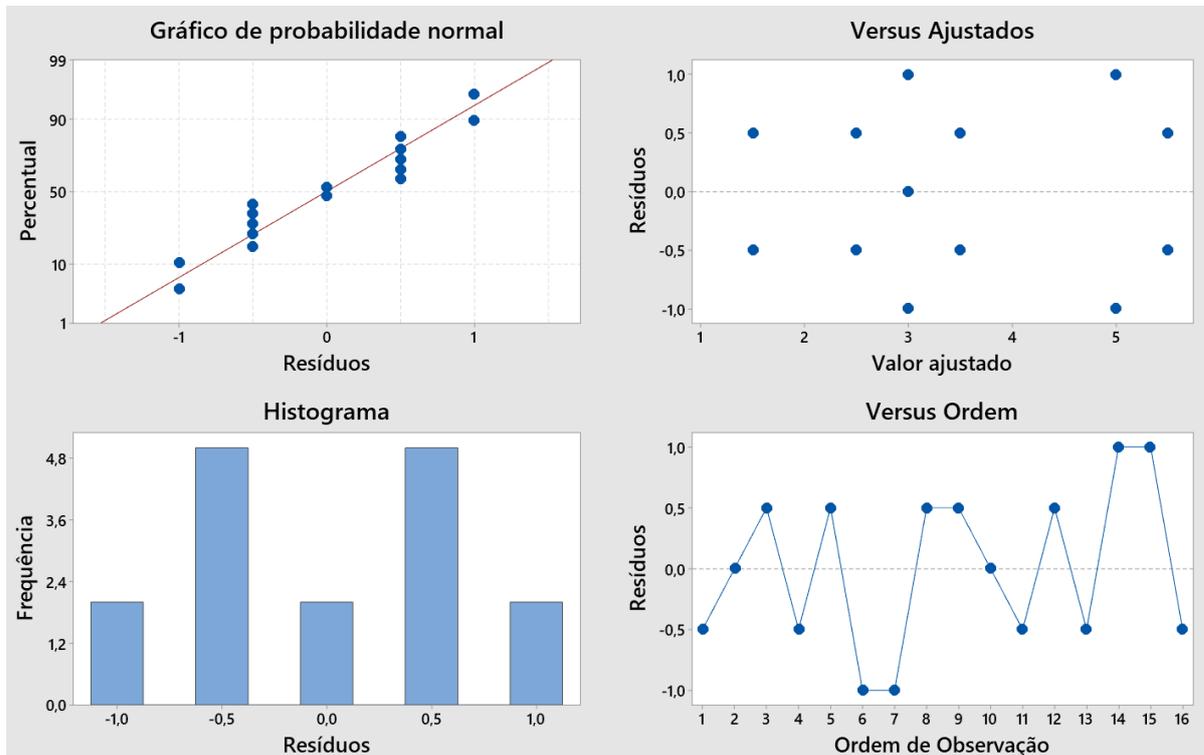
<i>S</i>	<i>R2</i>
0,901388	79,32%

Fonte: Autor (2019).

A variável “S” indica o desvio padrão entre os dados e os valores ajustados, e a variável “R2” representa a porcentagem de variação na resposta que é explicado pelo modelo. Como pode ser observado, esse modelo é capaz de explicar proximamente 80% das variações resultantes na resposta, e desta forma é considerado adequado para a análise proposta.

A análise dos resíduos também é utilizada para ajudar a determinar se o modelo é adequado e satisfaz os pressupostos da análise. Como verificado, os resíduos são definidos como a diferença entre os valores observados e os preditos para a variável resposta em cada ponto do planejamento. Na Figura 35 são apresentados os gráficos empregados nessa análise.

Figura 35 – Resíduos da variável-resposta



Fonte: Autor (2019).

Através do gráfico de probabilidade normal, pode-se verificar a pressuposição de que os resíduos são normalmente distribuídos, pois seguem aproximadamente uma linha reta, e assim qualquer não-normalidade graves nas respostas é descartada. O gráfico “Valor Ajustado” é usado para averiguar a aleatoriedade dos resíduos, e como observado, os pontos estão distribuídos em ambos os lados de 0, sem padrões reconhecíveis. Por fim, utiliza-se o gráfico “Ordem de Observação” para analisar a hipótese de que os resíduos são independentes uns dos outros, e conforme pode ser visto, os valores não apresentaram padrões, nem tendências quando exibidos em ordem temporal.

Desta forma, com a realização de todas essas etapas, realizou-se a análise estatística das respostas do experimento, considerando a medição total da variável de saída (porosidade) em cada rodada de teste. Com isso, foi possível verificar que dois fatores resultaram em efeitos considerados estatisticamente significantes, os quais foram:

- **Sistema de refrigeração:** foi o parâmetro que apresentou maior significância para a variação da resposta analisada, onde foi possível verificar uma redução de aproximadamente 47% no nível de porosidade resultante no produto com a alteração do nível baixo (*setup 1*) para o nível alto (*setup 2*) deste fator. Dessa forma, pode-se constatar a importância da configuração do sistema de refrigeração no processo de fabricação, apesar de que as condições não são ainda as adequadas para a operação, tendo em vista que a maioria dos testes realizados apresentou porosidades nas regiões próximas aos canais de refrigeração 6 e 7, indicando uma ineficiência do sistema nessa área
- **Temperatura do molde:** embora tenha apresentado menor influência que o sistema de refrigeração, este fator também foi considerado estatisticamente significativo com relação a variável-resposta através da análise realizada. Pode-se perceber com a elevação da temperatura do molde, uma tendência de aumento da classificação da porosidade presente no componente, sendo que uma diferença de 37,5% foi observada nas respostas entre os níveis alto (450°C) e baixo (350°C) deste fator.

Portanto, através da análise apresentada nesta seção do trabalho, pode-se obter uma compreensão de como os fatores controlados no planejamento experimental proposto, tiveram impacto sobre a variável-resposta investigada, permitindo com isso determinar os parâmetros com maior influência no processo.

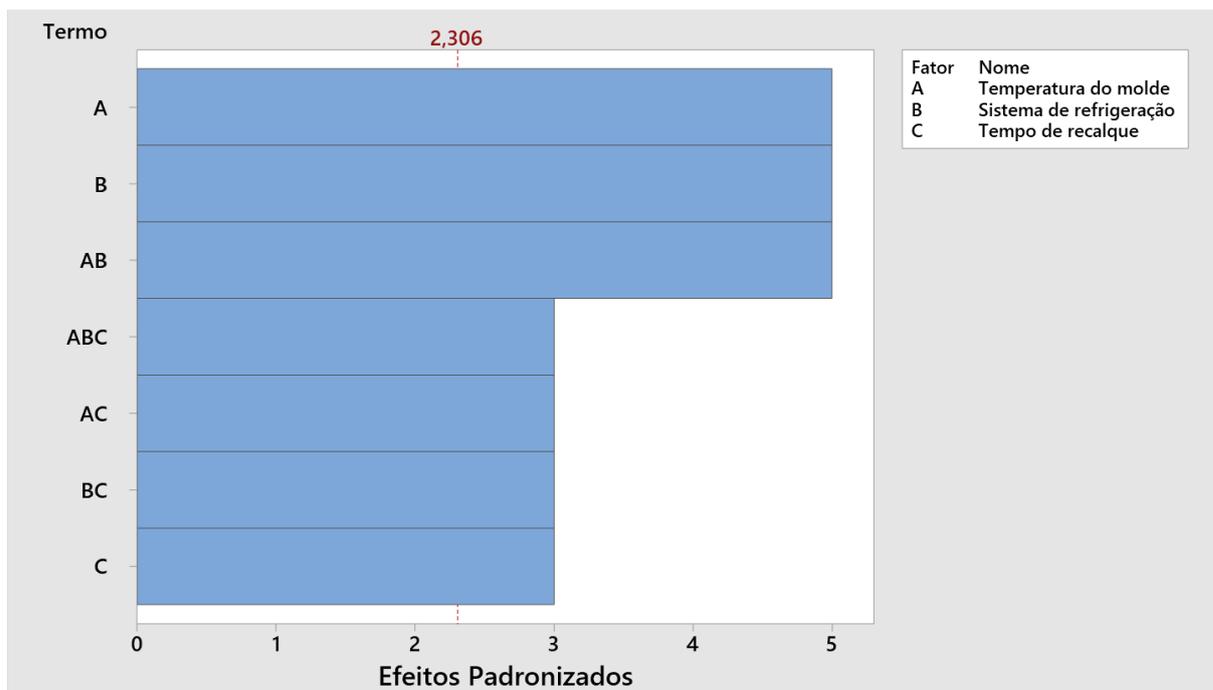
#### 4.2.2 Resposta parcial (por região)

A análise parcial (ou por região) das respostas do experimento, tem como objetivo a investigação de como os fatores influenciaram na variação da resposta de cada região da peça, e com isso obter uma melhor compreensão dos resultados deste estudo. Como apresentado previamente, as respostas foram analisadas em três regiões do produto, no entanto, o defeito foi verificado em apenas duas dessas, as quais serão abordadas nessa seção do trabalho.

De maneira análoga ao tópico anterior, o mesmo procedimento será seguido nesta etapa para realizar a análise das respostas por região. Entretanto, como as considerações necessárias sobre esse método já foram introduzidas previamente, algumas simplificações serão adotadas no processo, e com isso os resultados desta análise parcial serão apresentados de maneira mais sucinta e direta.

Portanto, para realizar essa análise parcial da variável-resposta, utilizou-se com base os valores das colunas 2 e 3 da Tabela 9, apresentada no início deste capítulo, que correspondem, respectivamente, as medições da porosidade resultante nas regiões 1 e 2 do produto. Para determinar quais fatores tiveram maior significância nessas respostas, apresenta-se nas Figuras 36 e 37, os gráficos de Pareto dos efeitos.

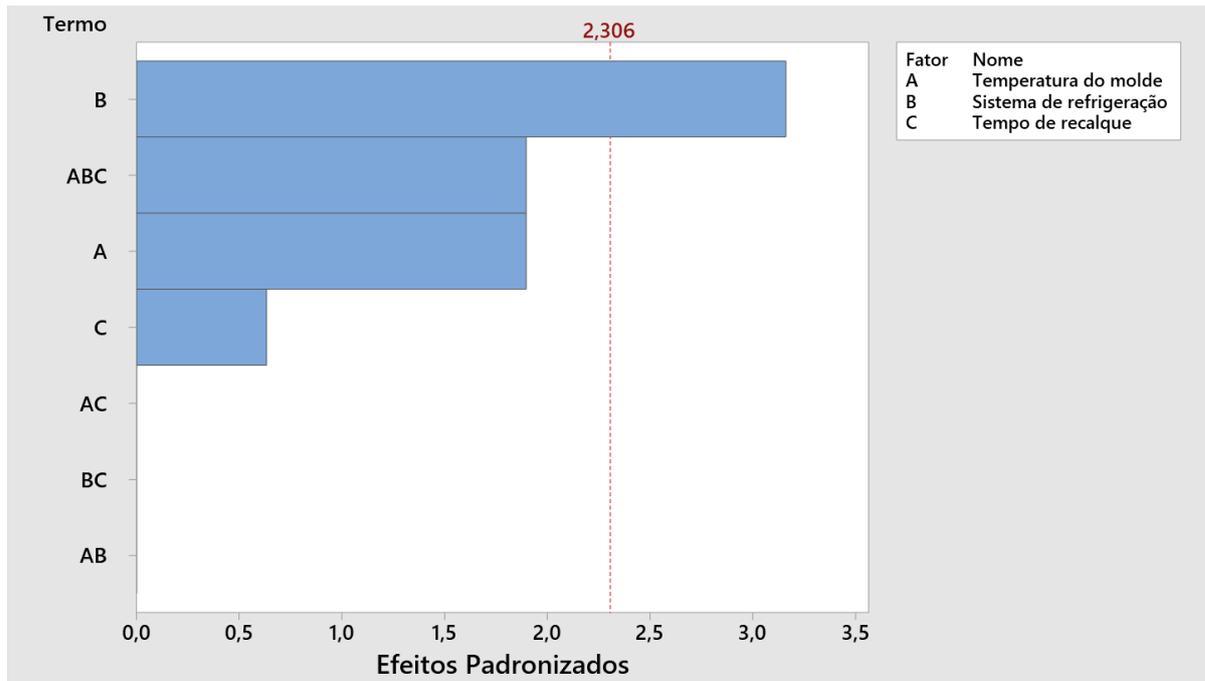
Figura 36 – Pareto dos efeitos padronizados da Região 1



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser verificado no gráfico da Figura 36, que representa os efeitos padronizados encontrados para as respostas da Região 1 em ordem decrescente, todos os termos ultrapassam a linha de referência, e desta forma, são considerados significativos com um intervalo de confiança de 95%.

Figura 37 – Pareto dos efeitos padronizados da Região 2



Fonte: Autor (2019).

Através da verificação do gráfico de Pareto para as respostas da Região 2, é possível observar que apenas o termo B cruza a linha de referência, e assim, somente o efeito principal do fator associado com o sistema de refrigeração apresentou relevância nessa análise.

Para confirmar esses resultados, da mesma forma como foi feito no tópico anterior, é realizado a seguir a análise de variância das respostas dessas duas regiões. Na Tabela 13 são apresentados os valores-p encontrados para os termos de cada região, os demais termos do quadro ANOVA foram omitidos para simplificar o processo de análise.

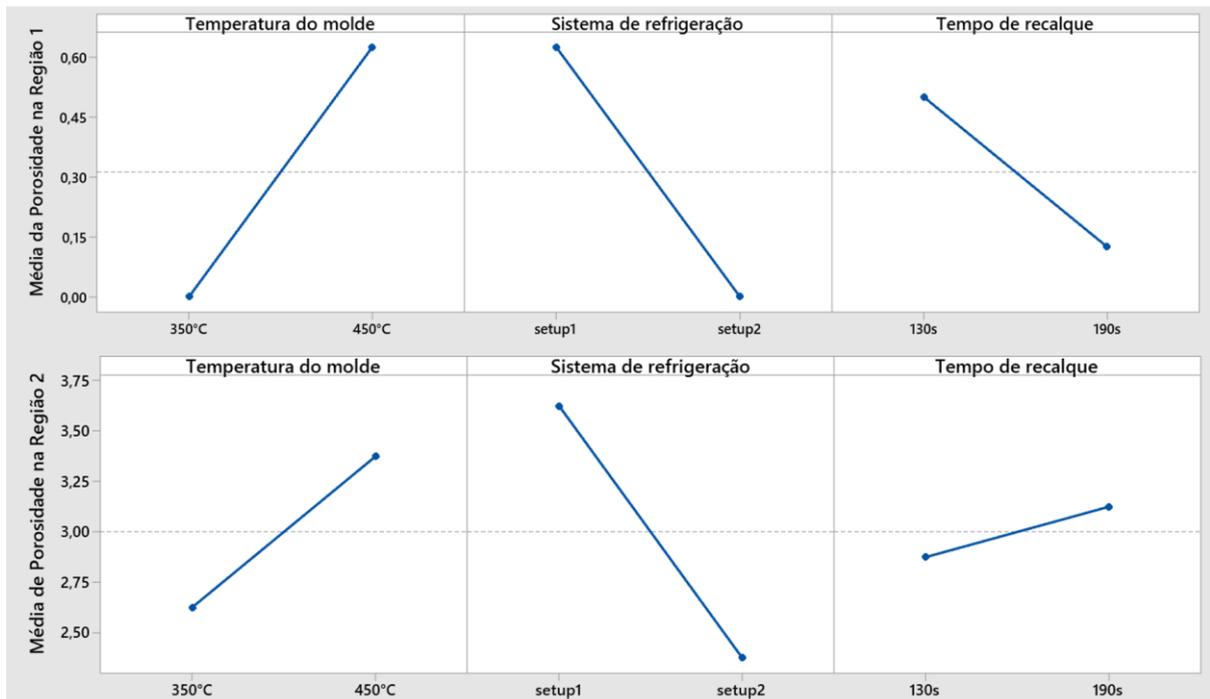
Tabela 13 – Valor-p dos termos do experimento para as regiões 1 e 2

Termo	Região 1	Região 2
A	0,001	0,094
B	0,001	0,013
C	0,017	0,545
AB	0,001	1,000
AC	0,017	1,000
BC	0,017	1,000
ABC	0,017	0,094

Fonte: Autor (2019).

Como pode ser observado nos valores apresentados nessa tabela, a análise da resposta para a Região 1 indica que todos os termos são estatisticamente significantes ( $\text{valor-p} < \alpha$ ), enquanto na Região 2, apenas o termo B apresenta significância estatística. Para uma melhor visualização desses resultados, e possível compreensão dos mesmos, é apresentado na Figura 38 os gráficos dos efeitos principais dessas regiões.

Figura 38 – Gráficos dos efeitos principais para as Regiões 1 e 2



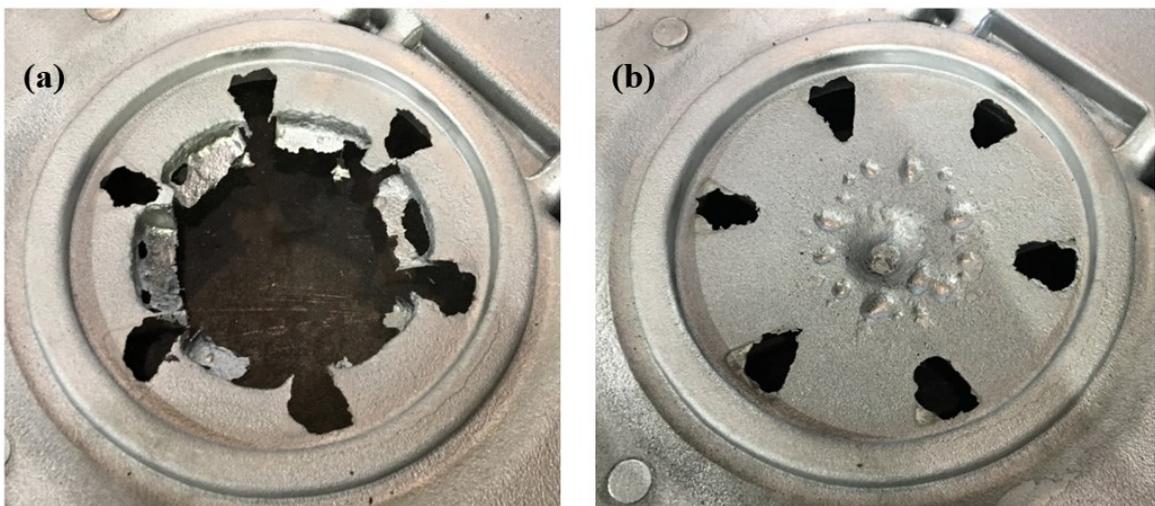
Fonte: Autor (2019).

A partir da interpretação dos gráficos apresentados na Figura 38, pode-se verificar que nas Regiões 1 e 2, os Fatores A e B, que correspondem, respectivamente, a temperatura do molde e ao sistema de refrigeração, resultaram em linhas relativamente inclinadas, indicando que a alteração dos níveis desses fatores influenciaram na variação da resposta analisada. Assim como observado na análise da resposta geral do experimento, quando a temperatura do molde aumenta, verifica-se que o nível de porosidade resultante no produto também aumenta, enquanto, quando o sistema de refrigeração está no nível alto (*setup 2*) uma diminuição no valor da variável-resposta é verificada.

Como os resultados apresentados para essa análise parcial já fornecem um bom entendimento da variação das respostas nas regiões avaliadas, as últimas etapas do processo (modelo de regressão, superfície de resposta e análise dos resíduos) não serão abordadas. Sendo assim, como encerramento dessa análise, pode-se concluir que:

- **Região 1:** apesar dos resultados da análise para a Região 1 indicarem que todos os fatores são significantes, as respostas obtidas no experimento para essa região apresentaram pouca variação, sendo que mais de 80% dos testes realizados não continham defeito (apenas 3 rodadas exibiram porosidade) e assim os resultados são pouco conclusivos. Um fato que pode ser considerado relevante, é que com a variação dos níveis do Fator C (tempo de recalque), foi possível verificar em algumas rodadas do experimento, uma alteração na solidificação no diâmetro central da peça, por onde acontece a alimentação do metal líquido, como pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Solidificação do diâmetro central com diferentes tempos de recalque

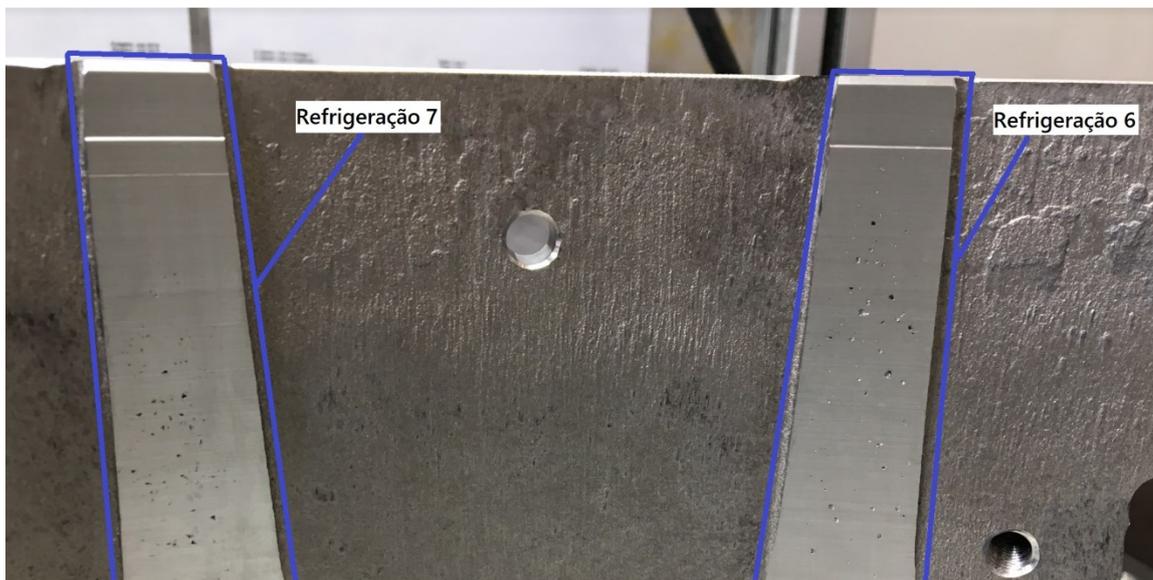


Fonte: Autor (2019).

Apesar de que na maioria das rodadas dos testes realizadas com o tempo de recalque no nível baixo (130s), a solidificação da peça ocorreu conforme o exemplo da Figura 39 (a), não foi possível relacionar diretamente esse fator com a incidência do defeito na Região 1. Na Figura 39 (b) é possível verificar a solidificação do componente com o tempo de recalque no nível alto (160s), onde aparentemente acontece de maneira mais adequada.

- **Região 2:** por ter sido a mais afetada pelo defeito em questão, com os resultados da análise parcial das respostas dessa região, percebe-se que a refrigeração foi o fator que apresentou maior influência sobre a variável-resposta analisada. Como todas as rodadas de testes do experimento apresentaram porosidade nessa região, é possível verificar que ela é a mais susceptível a presença deste defeito, principalmente nas áreas próximas aos canais de refrigeração 6 e 7, conforme retrata a Figura 40, onde verificou-se a maioria dos defeitos resultantes nos produtos.

Figura 40 – Porosidade na Região 2



Fonte: Autor (2019).

Essa verificação é um indício de que a configuração do sistema de refrigeração utilizada não está fornecendo as condições ideais para realizar o resfriamento dessas regiões, e provavelmente por isso, os problemas exibidos na Figura 40 aconteceram na maior parte dos experimentos realizados.

Portanto, através da análise apresentada nesta seção do trabalho, foi possível verificar de forma mais detalhada como essas duas regiões do produto foram afetadas pelos fatores investigados no experimento proposto. Com isso, pode-se obter uma melhor compreensão de como a variável-resposta é influenciada por essas variáveis, fornecendo assim, resultados que complementam os que foram obtidos na análise da resposta geral do experimento.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para solucionar problemas de um produto ou processo de fabricação, principalmente no setor industrial, muitas vezes torna-se necessário obter informações de forma empírica, e através da realização deste trabalho foi possível verificar a importância do planejamento de experimentos nessas situações. O projeto de experimentos mostrou-se uma ferramenta muito útil para planejar e selecionar estratégias para condução dos testes, que são capazes de ampliar o conhecimento sobre os fatores mais relevantes do processo.

O objetivo principal do presente estudo foi realizar uma análise experimental, com o intuito melhorar a qualidade de um produto que tem apresentado um índice elevado de refugo, devido principalmente a problemas relacionados com o processo de fabricação. Para isso, determinou-se o principal problema de qualidade apresentado por este componente, e então foi proposto a realização de experimentos para verificar como determinados parâmetros do processo influenciam no produto e podem causar o defeito em questão.

Diante dos objetivos específicos propostos no início deste trabalho, pode-se dizer que todos foram alcançados, tendo em vista que o defeito mais relevante do produto foi identificado e caracterizado, o desenvolvimento do planejamento experimental proposto foi devidamente conduzindo e apresentado, os experimentos executados e os resultados analisados de forma estatística com o auxílio do *software* Minitab.

Sendo assim, com a realização dos testes, e posteriormente, com a análise estatística das respostas, foi possível compreender como as variáveis controladas no experimento influenciaram no surgimento do defeito. Dessa forma, pode-se verificar como a alteração dos níveis dos fatores resultaram na variação da resposta analisada, permitindo assim identificar quais efeitos apresentaram maior significância.

Entre os resultados mais relevantes, destaca-se a comprovação da capacidade do sistema de refrigeração em reduzir o nível de porosidade resultante nos produtos, pois em todas as análises realizadas esse resultado foi verificado e esse fator considerado estatisticamente significativo. Desta forma, pode-se comprovar então que o Fator B (sistema de refrigeração), apresenta relação direta com a incidência do defeito, onde foi possível observar uma redução de aproximadamente 47% no valor médio da variável-resposta com a alteração do nível baixo (*setup 1*) para o nível alto (*setup 2*) desse fator.

O Fator A (temperatura do molde), embora menos expressiva, apresentou também relação com a variável-resposta, a qual foi verificada principalmente na análise das respostas totais das rodadas do experimento, onde com a temperatura no nível baixo (350°C) pode-se verificar uma redução de 37,5% no valor médio da resposta em relação ao nível alto (450°C). Essa evidencia pode ser verificada também na análise das respostas por região, contudo, devido a menor variação, foi considerada estatisticamente significativa apenas para a Região 1, enquanto na Região 2 o efeito desse fator não expressou significância.

O Fator C (tempo de recalque) não foi considerado relevante, pois na maioria das análises realizadas esse parâmetro não apresentou ligação com a presença dos defeitos, e assim pode-se concluir que o mesmo não tem influência sobre a resposta analisada.

Porém, mesmo com a comprovação de que dois fatores apresentaram relação direta com a variação da resposta, os resultados não foram ainda completamente satisfatórios, tendo em vista que praticamente em todos os testes realizados, peças com a presença do defeito foram produzidas. Como pode ser verificado, a Região 2 do produto foi a que apresentou a maior incidência de porosidade, principalmente nas áreas próximas aos canais de refrigeração 6 e 7, indicando assim uma possível ineficiência no resfriamento nessa parte do ferramental.

Com isso, pode-se concluir que os resultados encontrados através desta pesquisa não são os únicos fatores que devem ser considerados para realizar as mudanças necessárias no processo de fabricação deste componente, com a intenção de melhorar a qualidade do produto e reduzir a quantidade de itens defeituosos produzidos. No entanto, os resultados desta análise fornecem informações importantes sobre as variáveis que foram investigadas com o experimento realizado, e desta forma, podem auxiliar a fábrica nas decisões que devem tomadas para aumentar a eficiência do processo.

Por fim, é válido destacar as dificuldades enfrentadas para a realização deste estudo, que por se tratar de um processo experimental em um ambiente industrial, envolve a disponibilidade de equipamentos, matéria-prima e mão-de-obra para a realização dos testes necessários, e com isso um custo relativamente elevado. Considerando que foi empregado um planejamento fatorial para investigar parâmetros de um processo de fundição, onde algumas variáveis não podem ser ajustadas rapidamente, o tempo despendido para a regulagem dos níveis dos fatores foi um dos maiores agravantes, pois um ambiente como o chão de fábrica não é o cenário mais favorável para a realização de experimentos, e algumas vezes as coisas não acontecem conforme o planejado.

## 5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a intuito de dar continuidade a este estudo, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de um novo planejamento experimental, porém desta vez, considerando outras possíveis causas para o surgimento do defeito em questão.

Por ter apresentado um resultado relevante na variação da resposta analisada, é sugerido que o sistema de refrigeração seja novamente analisado, entretanto com uma nova configuração desse parâmetro, visando melhorar a eficiência do conjunto principalmente nas regiões dos canais de refrigeração 6 e 7, onde foi verificado a maioria dos defeitos no produto.

Sugere-se também que as variáveis relacionadas com as propriedades da liga, como temperatura e densidade sejam analisadas, para que se possível verificar como esses fatores têm relação com o surgimento de porosidade nos produtos, e com isso identificar possíveis melhorias a ser realizadas no processo.

## REFERÊNCIAS

- ABAL, Associação Brasileiro do Alumínio. **Perfil da Indústria Brasileira do Alumínio**. 2019. Disponível em: <<http://abal.org.br/estatisticas/nacionais/perfil-da-industria/>>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- ALUMINUM ASSOCIATION. **Aluminum Alloys**. 2019. Disponível em: <<https://www.aluminum.org/resources/industry-standards/aluminum-alloys-101>>. Acesso em: 20 jul. 2019.
- AREMO, Bolaji; ADEOYE, Mosobalaje O. Aluminium Countergravity Casting – Potentials and Challenges. **Recent Trends in Processing and Degradation of Aluminium Alloy**. Nigéria, p. 1-18. 21 nov. 2011.
- ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook Volume 15: Casting**. 5. ed. 2004. 1256 p.
- BONOLLO, Franco et al. **Gravity and low pressure die casting of aluminium alloys: A technical and economical benchmark**. La Metallurgia Italiana. Milão, p. 23-32. jun. 2005.
- BRITO, Raphaelson; QUEIROGA, Sando; MACEDO, José. **Caracterização microestrutural e microdureza de uma liga de Al-Si processada por fundição sob alta e baixa pressão**. V Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica - CONNEPI. Maceió, 2010.
- CALENDE. **Máquinas de baixa pressão**. 2019. Disponível em: <<http://www.calende.com.br/fundicao-maquinas-baixa-pressao.htm>>. Acesso em: 26 maio 2019.
- CALLISTER, Willian D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 705 p.
- CARVALHO, Marly Monteiro de et al. **Gestão da Qualidade: Teoria e Casos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 456 p.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Metais - ABM, 2005.
- COLEMAN, David E.; MONTGOMERY, Douglas. **Systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. Technometrics. p. 1-12. fev. 1993.
- DJUKANOVIC, Goran. **Latest Trends for Aluminium Demand in Automotive Industry**. 2018. Disponível em: <<https://www.spotlightmetal.com/latest-trends-for-aluminium-demand-in-automotive-industry-a-736213/>>. Acesso em: 11 jul. 2019.
- DRUMOND, Juliovany. **Aplicação do planejamento de experimentos na indústria siderúrgica**. 2008. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção e Sistemas, Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2008.

- DUARTE, Iberê Roberto. **Estudo da liga AlSi7Mg após fundição e tratamento térmico de solubilização e envelhecimento**. 2007. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- DUARTE, Iberê Roberto; OLIVEIRA, Carlos Augusto Silva de. **Processamento de ligas de alumínio silício fundidas**. Florianópolis: Nova Letra, 2009. 200 p.
- DUARTE, Rúben Miguel Monteiro. **Desenvolvimento do processo de fundição por baixa pressão para a obtenção de puxadores em ligas de alumínio**. 2014. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Porto, 2014.
- FERREIRA, Juliana C.; PATINO, Cecilia M. **O que realmente significa o valor-p?** Jornal Brasileiro de Pneumologia. São Paulo, p. 485-485. out. 2015.
- FERREIRA, Renan Mineiro. **Correlação entre parâmetros de solidificação e microestrutura da liga Al-7%Si-0,5%Mg solidificada unidirecionalmente**. 2014. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Marabá, 2014.
- FU, Penghuai et al. **Low-pressure die casting of magnesium alloy AM50: Response to process parameters**. Journal of Materials Processing Technology 205. Amsterdam, p. 224-234. fev. 2008.
- FUOCO, Ricardo. **Fundição de ligas de alumínio**. ITP - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (curso de fundição de ligas de alumínio). São Paulo: Novembro 2001.
- FUOCO, Ricardo; CORREA, Edison Roberto. **O problema de microporosidades em peças fundidas em ligas de alumínio**. Laboratório de Fundição da Divisão de Metalurgia do Insitituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo: 2000.
- GALDAMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- MERLIN, Mattia et al. **Impact behavior of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels**. Journal of Materials Processing Technology 209. Amsterdam, p. 1060-1073. jan. 2009.
- MILLER, A. E.; MAIJER, D. M. Investigation of erosive-corrosive wear in the low pressure die casting of aluminum A356. **Materials Science and Engineering: A** Vol. 435-436, p.100-111, 5 nov. 2006.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. 697 p.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. 513 p.

NADCA Product Standards. **Aluminum Alloys Data**. 2015. Disponível em: <<http://www.caldiecast.com/docs/Aluminum-Alloy-Data.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2019.

RODRIGUES, Sandra Cristina Antunes. **Modelo de regressão linear e suas aplicações**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Matemática, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2012.

SANTOS, David Mendes dos. **Caracterização mecânica da liga AlSi10Mg obtida por SLM para aplicação em componentes automóveis**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Automóvel, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Leiria, 2014.

SLACK, Nigel et al. **Gerenciamento de Operações e de Processos: Princípios e Práticas de Impacto Estratégico**. Porto Alegre: Bookman, 2008. 552 p.

TRIVELLATO, Arthur Antunes. **Aplicação das sete ferramentas básicas da qualidade no ciclo PDCA para melhoria contínua: Estudo de caso numa empresa de autopeças**. 2010. 73 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

VIANA, Denilson José; FARIA NETO, Antônio. Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método de Taguchi. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 4, n. 13, p.1435-1465, dez. 2013.