

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
CAMPO UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI
ÁREA DE CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

ÁLVARO DE OLIVEIRA MENDES JÚNIOR

**ANÁLISE E SOLUÇÃO DOS DEFEITOS DE FUNDIÇÃO OCORRIDOS EM
TAMBORES DE FREIO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI:
ESTUDO DE CASO**

BENTO GONÇALVES

2024

ÁLVARO DE OLIVEIRA MENDES JÚNIOR

**ANÁLISE E SOLUÇÃO DOS DEFEITOS DE FUNDIÇÃO OCORRIDOS EM
TAMBORES DE FREIO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade de Caxias do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo Velazquez Acosta

BENTO GONÇALVES

2024

ÁLVARO DE OLIVEIRA MENDES JÚNIOR

**ANÁLISE E SOLUÇÃO DOS DEFEITOS DE FUNDIÇÃO OCORRIDOS EM
TAMBORES DE FREIO COM A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI:
ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade de Caxias do
Sul, como requisito parcial à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Victor Hugo
Velazquez Acosta

Aprovado em 27/11/2024.

Banca Examinadora

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

Prof. Me. Dr. Paulo Roberto Linzmaier
Universidade de Caxias do Sul

Me. Samuel Inácio Velho
Membro externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Álvaro de Oliveira Mendes e Ladir Therezinha Bronca, pelo amor, apoio incondicional e pelos valores e ensinamentos que sempre me guiaram durante toda a minha jornada acadêmica e de vida.

Ao meu orientador, Professor Me. Victor Hugo Velazquez Acosta, manifesto minha profunda gratidão pela disponibilidade, pelos ensinamentos valiosos, pela orientação dedicada, e pelo apoio constante ao longo de toda a execução deste trabalho de conclusão de curso.

À empresa Farina Componentes Automotivos, deixo meus sinceros agradecimentos pela colaboração, disponibilidade e pelo auxílio para a realização deste estudo.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Seja pelo incentivo, pelas palavras de apoio ou pela colaboração prática, todos tiveram uma importância significativa na conclusão desta etapa da minha formação.

RESUMO

Este trabalho analisou o processo de fundição em areia verde de tambores de freio produzidos em ferro fundido cinzento. A análise em questão buscou identificar os principais defeitos de fundição ocorridos durante o processo de moldagem que foram bolo quebrado e inclusão de areia respectivamente, e teve como finalidade reduzir ou eliminar a presença destes defeitos. A principal contribuição deste trabalho, concentrou-se na aplicação do método de Taguchi como uma ferramenta da engenharia, por meio da análise da relação sinal-ruído. Foram realizados experimentos variando três parâmetros do processo de fundição: teor de umidade, resistência à compressão a verde e dureza do molde. Essas variações tiveram como o objetivo identificar como cada um desses fatores contribui para o surgimento ou a minimização dos defeitos. A qualidade das peças fundidas e defeitos ocorridos foram analisados através da inspeção visual com o uso de um procedimento criado. As configurações ideais e seus níveis foram definidos com o uso do cálculo de sinal-ruído de Taguchi. O resultado deste trabalho indicou que os parâmetros do processo selecionados, são altamente significativos na melhoria da qualidade dos tambores de freio fundidos. A avaliação dos parâmetros do processo levou a melhorar o desempenho e as características da fundição em areia verde e, assim, minimizar os defeitos de fundição. Onde a média do percentual de refugo que era de 9,13% pode ser reduzida para 4% no experimento em que se utilizou os níveis ótimos de cada parâmetro.

Palavras-chaves: Fundição em areia verde, defeitos de fundição, método de Taguchi, qualidade.

ABSTRACT

This work analyzed the green sand casting process for brake drums made from gray cast iron. The analysis in question sought to identify the main casting defects that occurred during the molding process, which were broken cake and sand inclusion respectively, and aimed to reduce or eliminate the presence of these defects. The main contribution of this work focused on the application of the Taguchi method as an engineering tool, through the analysis of the signal-to-noise ratio. Experiments were carried out varying three parameters of the casting process: moisture content, green compression strength and mold hardness. These variations aimed to identify how each of these factors contributes to the emergence or minimization of defects. The quality of the castings and defects occurred were analyzed through visual inspection using a created procedure. Optimal settings and their levels were defined using Taguchi signal-to-noise calculation. The result of this work indicated that the selected process parameters are highly significant in improving the quality of cast brake drums. The evaluation of process parameters led to improving the performance and characteristics of green sand casting and thus minimizing casting defects. Where the average scrap percentage, which was 9.13%, could be reduced to 4% in the experiment in which the optimal levels of each parameter were used.

Keywords: Green sand casting, casting defects, Taguchi's method, quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microestrutura típica do ferro fundido cinzento.	17
Figura 2 – Fluxograma da produção de peças fundidas.	19
Figura 3 – Martelete e Permeâmetro.....	25
Figura 4 – Equipamento para ensaios de resistência mecânica.	26
Figura 5 – Inclusões de areia.	30
Figura 6 – Bolo quebrado.	31
Figura 7 – Rechupe.....	32
Figura 8 – Bolha de gás.	33
Figura 9 – Materiais utilizados na preparação de carga.....	40
Figura 10 – Modelo, molde e macho do tambor de freio.	41
Figura 11 – Defeitos de bolo quebrado e inclusão de areia respectivamente.	41
Figura 12 – Fluxograma para elaboração do experimento.	42
Figura 13 – Diagrama de causa e efeito.	43
Figura 14 – Matriz GUT.....	43
Figura 15 – Medição com o esclerômetro.	47
Figura 16 – Medição da temperatura com pirômetro de imersão.....	47
Figura 17 – Índice de refugo de tambores de freio nos últimos 10 meses.	50
Figura 18 – Tempo de mistura x Quantidade de peças refugadas.....	53
Figura 19 – Teor de umidade x Quantidade de peças refugadas.....	54
Figura 20 – RCV x Quantidade de peças refugadas.....	54
Figura 21 – Dureza do molde x Quantidade de peças refugadas.	55
Figura 22 – Porcentagem de amostras refugadas em cada experimento.....	56
Figura 23 – Peças separadas para inspeção.....	58
Figura 24 – Defeitos verificados no experimento de comprovação.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição geral dos principais elementos do FoFo Cinzento.....	17
Tabela 2 – Arranjos ortogonais.	35
Tabela 3 – Principal item refugado nos últimos cinco meses.	39
Tabela 4 – Principais defeitos nos tambores de freio.	39
Tabela 5 – Fatores de controle e seus níveis.....	44
Tabela 6 – Arranjo ortogonal e método de ensaios.....	45
Tabela 7 – Composição utilizada.	45
Tabela 8 – Matriz experimental L4.	46
Tabela 9 – Percentual de tambores refugados nos últimos 10 meses.	49
Tabela 10 – Razões S/N calculadas.	57
Tabela 11 – Média S/N para os diferentes níveis de fatores.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS

cm	centímetro
fofo	ferro fundido
g	gramas
kg	quilogramas
l	litros
mm	milímetros
s	segundos

LISTA DE SIGLAS

AFS	<i>American Foundry Society</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
PDB	Pontos de Dureza Escala B - AFS
RCV	Resistência a Compressão a Verde
S/N	Razão Sinal-Ruído de Taguchi
UCS	Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.2.2 Objetivos Específicos	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 FERROS FUNDIDOS	16
2.1.1 Ferros fundidos cinzentos	16
2.2 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO	18
2.2.1 Fundição em areia verde	18
2.2.2 Moldagem	19
2.2.3 Areias de moldação	20
2.2.3.1 Componentes da areia de moldação	20
2.2.3.2 Propriedades das areias de moldação	22
2.2.3.3 Meios de controle para areia de moldação	23
2.2.4 Vazamento	27
2.2.5 Fusão e solidificação dos ferros fundidos cinzentos	28
2.3 DEFEITOS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE	29
2.3.1 Inclusões	29
2.3.2 Bolo quebrado	30
2.3.3 Rechupe	31
2.3.4 Bolhas de gás	32
2.4 METODOLOGIA DE TAGUCHI	33
2.4.1 Padronização do DOE	34
2.4.2 Projeto robusto	35
2.4.3 Função perda de qualidade	36
2.4.4 Relação sinal/ruído	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 CONTEXTO ATUAL	39
3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	42

3.2.1 Definição das variáveis de entrada.....	42
3.2.2 Análises da areia e fundição das amostras	45
3.2.3 Definição das variáveis de resposta.....	48
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1 ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO	49
4.2 ANÁLISE VISUAL DAS AMOSTRAS	50
4.3 CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES	52
4.4 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA.....	56
4.5 CÁLCULO DA RAZÃO SINAL RUÍDO	57
4.6 EXPERIMENTO PARA COMPROVAÇÃO.....	58
4.6.1 Avaliação do experimento de comprovação.....	59
5 CONCLUSÕES	61
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A	66
APÊNDICE B	67

INTRODUÇÃO

A fundição é uma técnica de produção de peças milenar, que remonta aos primeiros estágios da civilização humana e, ao longo do tempo, evoluiu para se tornar um dos processos mais versáteis e econômicos da indústria. Possibilitando a produção de peças únicas ou em séries, abrangendo uma grande diversidade de formas, complexidades e tamanhos. Este processo de fundição se dá pelo despejo de metal líquido ou uma liga metálica dentro de um molde, onde a cavidade do molde tem a forma inversa da peça que se deseja produzir (SIEGEL, 1978).

Contudo, mesmo com a melhoria das técnicas de fundição nos últimos anos, é comum nestes processos o aparecimento de defeitos. Onde em muitos casos, estes defeitos são causados por falhas na estrutura interna dos metais líquidos e podem ser provenientes de diversas variáveis do processo (CAMPBELL, 2011).

Segundo Ferreira (1999), uma identificação precisa do defeito deve ser feita antes de se tomar decisões a respeito de medidas corretivas. A análise de tais fatores é a principal chave para se determinar com precisão as causas e soluções para a maioria dos defeitos em peças de ferro fundido. Este controle de qualidade de peças fundidas corresponde tanto ao processo de construção dos moldes como também aos processos de elaboração de ligas metálicas. Utilizando de testes que permitam determinar propriedades físicas, químicas e mecânicas dos materiais de moldagem, matéria-prima e ligas metálicas, a fim de detectar defeitos nas peças de fundição.

Através desta ideia todas as empresas se esforçam para alcançar o objetivo de "defeito zero" e buscam adotar essa filosofia. Porém, é essencial investigar a origem dos problemas, sempre que ocorrerem eventos inesperados. Na indústria de fundição, especialmente, onde há inúmeras variáveis em jogo, o que aumenta as possibilidades de ocorrência de eventos imprevistos (AFS, 1966).

No entanto no ambiente fabril o que é comumente visto é uma abordagem de tentativa e erro, que mesmo feita por profissionais capacitados, por ser uma abordagem experimental não estruturada, nem sempre funciona bem devido à quantidade de fatores envolvidos e às variações nos parâmetros que não são controladas. Para isso, a observação ativa de um sistema ou processo desempenha um papel crucial de aprendizagem e é fundamental para compreender seu funcionamento. É fundamental realizar experimentos, isso implica em modificar as variáveis de entrada e observar as consequências dessas alterações na saída do

sistema. Ou seja, enquanto a observação pode levar a formulação de teorias, serão estes experimentos que irão validar estas ideias, demonstrando as relações de causa e efeito (MONTGOMERY, 2012).

Seguindo estas premissas pode-se utilizar o conceito de projeto robusto, introduzido por G. Taguchi (1986) que visa criar processos e produtos menos suscetíveis a perturbações ou variações que possam afetar a qualidade. Em outras palavras, busca-se reduzir a sensibilidade do processo e do produto, a ruídos ou interferências externas, garantindo que a produção mantenha sua qualidade mesmo diante de condições variáveis. Isso requer um entendimento profundo das variáveis envolvidas no processo, assim como dos potenciais fatores de ruído e suas interações. Em resumo, o objetivo é criar produtos e processos capazes de manter uma qualidade estável, independentemente das flutuações do ambiente de produção.

O presente trabalho foi realizado na empresa Farina, fundada em 1886, localizada em Bento Gonçalves, e atuante no mercado de componentes automotivos. Seus produtos são direcionados à indústria automotiva pesada, de máquinas agrícolas e para máquinas em geral. Dentre a vasta linha de produtos estão tambores de freio, cubos de roda, volantes de motor, flanges de transmissão, entre muitos outros.

1.1 JUSTIFICATIVA

Muitos defeitos de fundição em tambores de freio são encontrados apenas durante o processo de usinagem. Estas não conformidades que são visualizadas tardiamente acabam ocasionando diversos tipos de problemas, como, retrabalhos, sucateamento de peças, quebra de ferramentas e inclusive podendo ocasionar acidentes de trabalho. Estas interferências prejudicam a qualidade do produto e em alguns casos exigem a fabricação de um novo lote. Isso pode ser visualizado através dos índices de refugos gerados mensalmente e que estão acima dos limites aceitáveis, onde os principais itens refugados são tambores de freio, e seus principais defeitos são inclusões de areia e bolo quebrado.

Estudos realizados anteriormente por Alves (2009) e Fontana (2021) utilizaram a aplicação do Método de Taguchi na área de fundição, e evidenciaram resultados promissores na redução de defeitos e na melhoria da qualidade das peças fundidas, demonstrando assim a eficácia deste método na modelagem e otimização

de parâmetros críticos dos processos. Baseado nestes estudos feitos anteriormente se realizou este trabalho, visando identificar quais são as causas que estão gerando essas não conformidades e a possível solução para controlá-las, através deste método. Tornando possível assim, a redução do índice de refugos e custos desnecessários, aumentando a produtividade deste item na empresa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi de realizar um estudo de caso, com o intuito de analisar os defeitos ocorridos em tambores de freio, para identificar e controlar suas principais causas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Propor o método de Taguchi como uma metodologia para análise e solução de problemas relacionados aos defeitos de fundição, buscando tornar o processo robusto a flutuações do ambiente;
- b) Determinar os parâmetros ideais de processo de fundição em areia verde para a obtenção de um fundido com qualidade isenta de defeitos;
- c) Realizar um experimento de comprovação para verificar a eficácia dos parâmetros ideais determinados para o processo de fundição de tambores de freio;
- d) Avaliar como o método de melhoria proposto impacta na qualidade das peças produzidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FERROS FUNDIDOS

De acordo com Chiaverini (1996), o ferro fundido é uma liga ternária composta por ferro, carbono e silício, com um teor de carbono superior a 2%, que ultrapassa a quantidade retida na solução sólida da austenita. Esta composição é produzida em carbono parcialmente livre, que é vista nas microestruturas do material como veios ou lamelas de grafita. Devido à sua aplicabilidade em uma variedade de setores, os ferros fundidos desempenham um papel importante na indústria. No entanto, é fundamental selecionar corretamente o tipo de ferro fundido para cada aplicação industrial, considerando as propriedades mecânicas ordinárias e as condições de serviço.

Podemos identificar os seguintes tipos de ligas dentro da denominação geral de ferro fundido:

- Ferro fundido cinzento;
- Ferro fundido branco;
- Ferro fundido mesclado;
- Ferro fundido maleável;
- Ferro fundido nodular;
- Ferro fundido de grafita compactada.

2.1.1 Ferros fundidos cinzentos

O ferro fundido cinzento é classificado como uma liga ferro-carbono que se solidifica no sistema estável, caracterizando-se pela presença predominante de carbono na forma de grafita lamelar. Metalograficamente a estrutura deste tipo de ferro fundido é composta principalmente por grafita lamelar dispersa em uma matriz perlítica/ferrítica, com a possibilidade de presença de ferrita e, eventualmente, de cementita (indesejável), esta última em pequenas proporções (SIEGEL, 1978).

Abaixo pode ser visualizado o aspecto característico da microestrutura do ferro fundido cinzento.

Figura 1 – Microestrutura típica do ferro fundido cinzento.



Fonte: Chiaverini (1996).

Os ferros fundidos cinzentos se encontram em uma faixa de composição química ampla que pode ser vista na tabela abaixo.

Tabela 1 – Composição geral dos principais elementos do FoFo Cinzento.

Elemento	Faixa de composição (%)
Carbono	2,5% a 4,00%
Silício	1,00% a 3,00%
Manganês	0,20% a 1,00%
Fósforo	0,02% a 1,00%
Enxofre	0,02% a 0,25%

Fonte: Adaptado de Chiaverini (1996).

A presença de grafita em forma lamelas confere ao ferro fundido cinzento excelente condutividade térmica, boas propriedades mecânicas e propriedades antifricção, tornando-o amplamente utilizado em componentes sujeitos à fadiga térmica, como tambores e discos de freio (GUESSER, 2009).

Pelo fato de os tambores de freio serem suscetíveis à fadiga térmica, com as deformações térmicas não sendo restritas externamente, mas sim pela massa da própria peça. A alta condutividade térmica e o baixo módulo de elasticidade são características cruciais. Assim, empregam-se ferros fundidos cinzentos com teor de carbono não inferior a 3,4% (HENKE, 1974 apud GUESSER, 2009).

2.2 O PROCESSO DE FUNDIÇÃO

Segundo a definição de Siegel (1978), o processo de fundição ocorre através do processo de solidificação de metal líquido dentro de um molde refratário, cujo contorno sofrerá a geometria desejada da peça final. E pode ser resumida nas seguintes operações:

- Preparação do molde (moldagem);
- Preparação dos machos (macharia);
- Fusão do metal base para obter o metal líquido (fusão);
- Enchimento do molde com o metal líquido (vazamento);
- Remoção da peça solidificada do molde (desmoldagem);
- Acabamento com remoção de rebarbas e corte de canais (rebarbação).

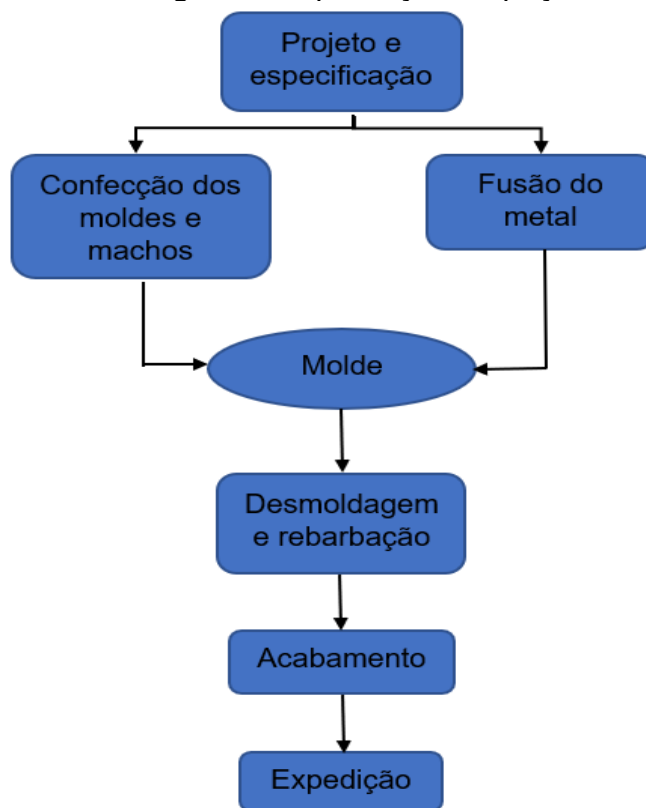
2.2.1 Fundição em areia verde

O processo mais utilizado para a produção de peças em ferro fundido cinzento é a fundição em areia verde. Os processos de fundição implicam no vazamento de ligas metálicas em moldes capazes de suportar temperaturas superiores aos pontos de fusão dos metais. Devido à limitada durabilidade dos moldes metálicos, conhecidos como permanentes, frente ao desgaste erosivo e à fadiga térmica gerada pelas altas temperaturas de vazamento dos fundidos em ligas ferrosas, a maioria das peças é fabricada em moldes de areia verde. O termo "verde" se refere ao processo pelo qual umidade é adicionada à areia e aos aglomerantes. Devido à sua facilidade de aplicação, baixo custo e abundância de matérias-primas, essa técnica é amplamente utilizada. A areia verde é feita de areia de sílica e agentes aglomerantes, geralmente argila, que são componentes baratos (FERREIRA, 1999; SIEGEL, 1978).

De acordo com Moro (2007), o tipo do molde utilizado no processo de fundição tem influência significativa nas propriedades físicas do material resultante. Uma característica importante é a taxa de dissipação de calor através do molde que pode desempenhar um papel crucial na determinação do tamanho final dos grãos no material fundido, o que influencia diretamente características como a resistência mecânica da peça. Destacando assim a importância crítica do tipo de molde na qualidade final da peça fundida.

O fluxograma abaixo mostra o processo prático da confecção de uma peça pelo processo de fundição por areia.

Figura 2 – Fluxograma da produção de peças fundidas.



Fonte: Adaptado de Soares (2000).

2.2.2 Moldagem

Para Siegel (1978), a moldagem compreende todos os requisitos necessários para a elaboração do molde, utilizado para obtenção das peças fundidas. É importante considerar o projeto da peça, visando à sua reprodução eficiente em metal fundido e à criação do negativo do modelo. Peças mal projetadas não apenas dificultam a execução, mas também afetam a qualidade, podendo assim gerar complicações na produção. Portanto, é essencial priorizar a análise do projeto da peça, visando aperfeiçoar suas características de moldabilidade.

Segundo Ferreira (1999) e Soares (2000), o modelo geralmente é confeccionado em madeira, plástico ou metal e deve ser feito em uma escala geométrica superior a forma da peça, para compensar o fator de contração do metal quando ele se solidifica. O molde em areia verde consiste em areia úmida modelada

pelo formato do modelo da peça a ser fundida. E é o método mais empregado na atualidade.

2.2.3 Areias de moldação

A areia utilizada na moldação é composta essencialmente por grãos refratários da areia-base e pelo aglomerante responsável por unir esses grãos. Esta areia é utilizada na fabricação de moldes e machos de fundição. Onde o aglomerante ao ser misturado com a água desempenha o papel de condicionar a estrutura da areia variando o seu volume específico (SIEGEL, 1978).

De acordo com Ferreira (1999), embora haja a possibilidade de utilizar as inúmeras qualidades de minerais na forma de areias, é essencial que cada um apresente, na medida do possível, as seguintes características e propriedades básicas:

- Estabilidade térmica e dimensional a elevadas temperaturas;
- Distribuição de forma e tamanho de partículas adequado;
- Não apresentar reatividade química com o metal fundido;
- Não apresentar uma molhabilidade fácil com o metal em fusão;
- Ser livre de substâncias de partículas de baixo ponto de fusão;
- Ser livre de produtos que gerem gases às altas temperaturas envolvidas;
- Estarem disponíveis a fatores de baixo custo;
- Apresentar uma composição uniforme;
- Ter compatibilidade com aglomerados.

As propriedades das areias de fundição são influenciadas pelas características dos minerais que as compõem e pelos aglomerantes utilizados para unir os grãos de areia, proporcionando resistência mecânica após a compactação para formar o molde. Sua refratariedade, permeabilidade e expansão da moldação são diretamente impactadas pelo tipo de areia e sua distribuição granulométrica.

2.2.3.1 Componentes da areia de moldação

Os componentes básicos para uma areia de moldação são os seguintes: areia-base, argila, aditivos e água. A areia-base utilizada na fundição é normalmente

uma areia refratária de sílica, extraída de barrancos, leitos de rios ou da praia. E antes de ser utilizada no processo de fundição, deve passar por um processo de lavagem para retirada de sais e impurezas, secagem e classificação granulométrica. A composição química da areia afeta a dilatação térmica, a reatividade com o metal fundido e principalmente a refratariedade do molde. Essa última propriedade é muito importante na fundição. Já a granulometria da areia-base tem correlação direta com a permeabilidade da areia e a penetração metálica. A fim de evitar defeitos como bolhas de gás e pinholes, as fundições de ferros fundidos optam por utilizar areias mais grossas, pois quanto maior o diâmetro destes grãos mais permeável é a areia facilitando, assim, o escoamento dos gases. Porém, mesmo diminuindo estes defeitos, através do aumento da permeabilidade, ocorre uma maior penetração metálica, implicando em uma piora no acabamento das peças (FERREIRA, 1999; ROMANUS, 2005; SOARES, 2000).

Existem diversos tipos de argila, sendo a bentonita a mais utilizada na fundição, devido a algumas características como: boas propriedades de escoamento que ajudam a controlar a permeabilidade do molde permitindo a saída de gases durante o vazamento do metal, baixa granulometria conferindo maior plasticidade a areia permitindo moldar formas complexas, além de promover uma melhor distribuição e recobrimento dos grãos de areia aumentando a resistência mecânica dos moldes e machos, abundância natural e custo baixo. É geralmente formada por partículas com dimensões inferiores a 0,02 mm. Essa argila adquire coesão e plasticidade ao absorver a água, ou seja, quando a água é adicionada à mistura de grãos de sílica e argila, a mistura absorve esta água e os grãos de sílica se envolvem mecanicamente, aglomerando-os. Uma areia preparada dessa forma pode ser utilizada na moldação. Além disso, juntamente com a água, a argila fornece ao molde em areia verde à resistência para o mesmo suportar a pressão do metal durante todo o processo de vazamento e solidificação (ROMANUS, 2005; SENAI, 1987a).

Segundo Siegel (1978), esta argila utilizada como aglomerante mineral nas areias sintéticas, requer certas características para que o processo se mostre eficaz. Seu alto poder aglomerante deve permanecer tanto no estado úmido como no seco, menores teores de argila podem beneficiar a mistura ao manter sua alta permeabilidade. Quando misturada com areia de sílica e umedecida, a argila confere moldabilidade ao sistema, proporcionando plasticidade e consistência, que são avaliadas pela resistência à compressão e pela deformação, respectivamente. A

resiliência é resultado da resistência à compressão pela deformação, e é um indicativo indireto do poder aglomerante da argila, relacionado à coesão e à adesão das partículas de argila à superfície da areia-base.

Os aditivos são substâncias que ao serem misturadas com a areia de moldagem, em teores inferiores a 1%, conferem a esta areia modificações em suas propriedades, minimizando assim alguns tipos de defeitos. Se existe uma grande variedade de aditivos para areia de moldação, todos apresentando efeitos colaterais positivos ou não, portanto deve-se ter cuidado em sua utilização. Alguns efeitos positivos através da adição destes produtos são: melhoria no acabamento superficial, melhor facilidade de desagregação da areia na operação de desmoldagem, aumento de resistência a temperaturas elevadas e redução de reações entre o metal e o molde (SENAI, 1987a; SOARES, 2000).

De acordo com Romanus (2005), embora a água pareça ser utilizada apenas para umedecer a areia de moldagem, na prática sua adição deve ser feita de forma controlada para alcançar a umidade e a compactabilidade desejadas da areia verde. Além do mais, a qualidade da água utilizada deve ser excelente, pois certos sais presentes na água podem reduzir a resistência à tração a úmido da areia preparada, por meio de um fenômeno conhecido como desativação ou super ativação da bentonita. Isso pode levar ao surgimento de defeitos de expansão, ou problemas de sinterização de areia nas peças fundidas.

2.2.3.2 Propriedades das areias de moldação

Certas propriedades são fundamentais em uma areia de moldação, e principalmente em uma areia sílico-argilosa, elas são: resistência mecânica, refratariedade, moldabilidade e permeabilidade. A resistência mecânica da areia em fundição se refere a sua capacidade de suportar esforços durante várias etapas do processo, como extração do modelo, manipulação do molde, colocação de machos e fluxo de metal no vazamento. O aglomerante adicionado à areia tem o papel de proporcionar essa resistência mecânica. Durante o processo de moldagem, a areia é compactada para aumentar sua densidade e reforçar os pontos de contato (FERREIRA, 1999; SENAI, 1987a).

A refratariedade de uma areia indica sua capacidade de resistir a altas temperaturas de vazamento dos metais sem se fundir ou amolecer. Quanto maior for o ponto de fusão da areia melhor será sua refratariedade, baixa refratariedade pode gerar uma camada dura de areia soldada na superfície das peças vazadas que dificultam o processo de usinagem, defeito esse, conhecido como cascão (FERREIRA, 1999).

A moldabilidade ou plasticidade é uma propriedade que se refere à facilidade da areia de reproduzir todas as formas do modelo, uma característica desta propriedade é a capacidade da compactação homogênea nas diferentes partes do molde (SENAI, 1987a).

A permeabilidade da areia aglomerada na fundição refere-se à sua capacidade de permitir a passagem de gases pelos poros. Durante o vazamento do metal na cavidade do molde, o ar presente dentro do molde é deslocado para ser substituído pelo metal líquido, formando assim a peça fundida. É essencial que o ar seja totalmente expelido, para evitar defeitos causados pela falta de preenchimento adequado com metal. Areias com grãos grossos, como as utilizadas na fundição de ferro fundido, têm poros mais amplos entre os grãos, ou seja, alta permeabilidade, facilitando a saída dos gases durante o processo de fundição (FERREIRA, 1999).

De acordo com Jail (2009), tanto a permeabilidade quanto a resistência mecânica são duas das propriedades mais importantes na areia e seus valores devem ser os mais elevados possíveis. Embora a permeabilidade e a resistência da areia dependam principalmente do tamanho, da forma dos grãos de areia e do teor de argila. Os valores estipulados não seriam alcançados a menos que a quantidade correta de água fosse misturada com a areia e a própria areia fosse compactada até certo grau de dureza.

2.2.3.3 Meios de controle para areia de moldação

As areias de moldagem utilizadas na fundição precisam apresentar certas características, que são determinadas por meio de ensaios. Essas análises são realizadas com o objetivo de avaliar as qualidades da areia-base, a composição da areia recuperada e as características da areia preparada para a moldação. Para garantir que a areia de moldagem cumpra os requisitos para o processo de fundição,

esses ensaios ajudam na avaliação da adequação da areia-base em relação a propriedades físicas como granulometria, teor de argila, umidade e outros fatores. Os testes também avaliam a resistência, plasticidade e permeabilidade da areia recuperada para moldagem, bem como sua capacidade de ser reutilizada (FERREIRA, 1999; ROMANUS, 2005; SENAI, 1987a).

A compactabilidade atualmente é o parâmetro mais importante na areia de moldagem, este teste verifica a diminuição da areia em relação ao nível original de areia solta, através de uma força de compactação fixa. O teste simula diretamente o comportamento do sistema de areias usado em máquinas de moldagem e mostra a capacidade da areia de se compactar adequadamente durante o processo de moldagem, garantindo que ela mantenha sua forma e integridade quando submetida à pressão. Esta característica afeta diretamente os resultados dos demais ensaios, sendo assim, o ideal é executar este ensaio primeiramente e caso a compactabilidade esteja dentro da faixa solicitada, pode-se executar os demais ensaios (JAIL, 2009; ROMANUS, 2005).

Para Siegel (1978), a umidade tem influência direta na moldagem, tanto pela deficiência como pelo excesso desta característica, resultando em defeitos nas peças fundidas. O excesso de umidade pode gerar bolhas, que se manifestam normalmente como cavidades esféricas brilhantes na superfície da peça. Por outro lado, uma umidade baixa pode resultar em uma superfície de molde e canais pouco resistentes à erosão, levando ao deslocamento de partículas de areia que se depositam na parte superior das peças.

Segundo Romanus (2005), quando se fala em umidade o ideal é realizar no mínimo dois ensaios por turno, executando a média aritmética dos resultados obtidos, se os valores obtidos tiverem uma diferença superior a 0,2%, significa que deve estar acontecendo alguma deficiência na preparação da mistura ou talvez algum manuseio inadequado da amostra na realização do ensaio.

Este ensaio determina a umidade através da perda de massa que ocorre na areia, após sua secagem em uma estufa ou um secador. A diferença de pesos dará o peso da água evaporada. E desta diferença, a porcentagem de umidade pode ser calculada seguindo a equação 1 (JAIL, 2009; SOARES, 2000).

$$U = \frac{mu - ms}{ms} \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

μ é a massa antes da secagem;

m_s é a massa após a secagem.

Para definir a permeabilidade são realizados ensaios em corpos de prova cilíndricos de areia aglomerados, em dimensões de $\varnothing 50 \times 50 \text{ mm}$ se seguir a norma DIN e grau de compressão pré-estabelecido através do equipamento de compactação martetele. Após essa compactação, com o equipamento denominado permeâmetro mede-se a permeabilidade da areia, que é determinada pelo tempo que uma dada quantidade de ar demora a atravessar longitudinalmente um corpo de prova padrão (FERREIRA, 1999; SOARES, 2000).

Na figura 3 podem-se ver os dois equipamentos utilizados para estes ensaios, respectivamente.

Figura 3 – Martetele e Permeâmetro.



Fonte: Tecnofund (2020).

A permeabilidade pode ser expressa pelo índice de permeabilidade, que é definido pelo volume de ar em cm^3 , que passará por minuto através de uma amostra de areia de 1 cm^2 de seção transversal e 1 cm de altura, a uma pressão de 1 g por cm^2 . E pode ser calculada por meio da equação 2 (JAIL, 2009).

$$\text{Índice de permeabilidade} = \frac{v \times h}{p \times a \times t} \quad (2)$$

Nesta equação:

v é o volume do ar em cm³;

h é a altura da amostra em cm;

p é a pressão do ar em g/cm²;

a é a área da seção transversal da amostra;

t é o tempo em minutos.

Segundo Ferreira (1999), a resistência mecânica é uma propriedade essencial nas areias aglomeradas, a qual é avaliada em ensaios de ruptura, normalmente de compressão, e ocasionalmente por ensaios de flexão, corte ou tração. Esses ensaios são feitos em um corpo de prova padronizado de areia aglomerada compactada em um equipamento de eixo horizontal, conforme figura 4 a seguir.

Figura 4 – Equipamento para ensaios de resistência mecânica.



Fonte: Tecnofund (2020).

Neste teste a pressão exercida no corpo de prova é verificada utilizando um manômetro ou visor para registrar a pressão máxima de ruptura. A resistência é calculada como a relação entre a força F aplicada para vencer a coesão da areia e a

área da seção transversal do corpo de prova ($S \cong 20 \text{ cm}^2$), e pode ser verificada através da equação 3 (FERREIRA, 1999).

$$Rp = \frac{F}{S} = \frac{F}{20} = 0,05 \times F \quad (3)$$

Onde:

F é a força exercida sobre o corpo de prova até sua ruptura em kg/cm².

Segundo Romanus (2005), a avaliação da resistência à compressão a verde deve ser realizada no mesmo corpo de prova utilizado para determinar a permeabilidade, imediatamente após sua execução. Porém não existe um nível ideal de resistência à compressão a verde, pois este parâmetro varia de acordo com a liga metálica utilizada, o formato, peso da peça e o sistema de moldagem empregado. Mais relevante do que simplesmente alcançar uma resistência à compressão a verde muito elevada (que muitas vezes é obtida com compactabilidade excessivamente baixa), é essencial obter uma associação adequada entre resistência, fluidez (influenciada pela umidade) e plasticidade (diretamente afetada pela compactabilidade).

O módulo de finura, a distribuição granulométrica e a porcentagem de finos em uma amostra de areia podem ser medidas por meio do ensaio de granulometria. O objetivo deste ensaio é analisar partículas com tamanho superior a 0,02 mm. Isso deve ser feito em uma amostra de areia que tenha sido previamente lavada, ou seja, livre de partículas com tamanho inferior a 0,02 mm e que esteja seca. A amostra é passada por várias peneiras no processo de peneiramento para separar e classificar os grãos de acordo com seu tamanho (FERREIRA, 1999; SENAI, 1987b).

2.2.4 Vazamento

Em processos de fundição, a fase de vazamento requer que o metal preencha completamente as cavidades do molde, reproduzindo sua forma com precisão. Isso está diretamente relacionado ao conceito de fluidez do metal, vários fatores aumentam a fluidez do metal, como o pré-aquecimento das moldações e temperaturas de vazamento mais altas, conhecidas como temperaturas de superaquecimento. Contudo, temperaturas excessivamente altas podem acelerar reações indesejadas,

levando à penetração do metal em pequenos vazios entre as partículas de areia no molde, causando defeitos mecânicos. A técnica de vazamento do metal fundido requer controle adequado das temperaturas e é executada em painéis revestidos com material refratário e equipadas com dispositivos mecânicos que regulam a vazão do metal. Antes do vazamento, devem ser tomadas medidas para eliminar o ar e os gases do molde, bem como os gases produzidos pela parte do metal quente que entra no molde (FERREIRA, 1999; SIEGEL, 1978).

2.2.5 Fusão e solidificação dos ferros fundidos cinzentos

Conforme Kalpakjian (2006), os metais têm uma temperatura de fusão claramente definida, que é caracterizada pelo início e término do processo de solidificação em valores específicos de temperatura, a temperatura de vazamento deve estar sempre acima da temperatura onde o metal esteja totalmente líquido.

Chiaverini (1996), diz que a temperatura mínima para o ferro fundido liquefeito deve ser de 1455 °C, temperatura onde o ferro fundido passa do estado sólido para o líquido, permitindo que seja moldado e manipulado.

A característica de escoamento está ligada a fluidez que é a capacidade do metal líquido de preencher as cavidades do molde. A fluidez depende de características do metal e de parâmetros utilizados na fundição. No que se refere ao metal, à fluidez depende da viscosidade, tensão superficial, inclusões e padrão de solidificação da liga. Quanto aos parâmetros de fundição, a fluidez depende do projeto do molde, material do molde, grau de superaquecimento, taxa de vazamento e transferência de calor (FERREIRA, 1999; KALPAKJIAN, 2006; SIEGEL, 1978).

A solidificação é um fator de extrema importância onde ocorre a transição do estado líquido para o estado sólido da liga. No estado fundido, a liga pode ser considerada como um líquido homogêneo, tendo um comportamento como os demais líquidos. No entanto, em seu estado sólido, têm características muito distintas, que variam de uma liga para outra. Propriedades que dependem principalmente dos fenômenos associados a esta transição, paredes espessas tendem a ter uma velocidade de resfriamento mais lenta, enquanto paredes mais finas tendem a ter uma velocidade de resfriamento menor. Em elevadas taxas de resfriamento como as que ocorrem em paredes finas ou áreas próximas das paredes do molde, tem-se a tendência de formar ferro fundido branco, devido a não se ter tempo suficiente para

decompor a cementita, ocorrendo assim pouca ou nenhuma grafitização. Já em paredes mais grossas onde as velocidades de resfriamento são lentas, tem-se uma boa grafitização, tendo a estrutura constituída principalmente de grafita e perlita (CHIAVERINI, 1996; SIEGEL, 1978).

2.3 DEFEITOS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE

Como afirma Romanus (2005), mais de 50% do refugo e a maioria dos retrabalhos de peças nas fundições, são causados por defeitos de moldagem. Isso se destaca principalmente porque na maioria das vezes as análises são realizadas exclusivamente sob o enfoque metalúrgico, não se dando a devida atenção aos defeitos de moldagem.

Segundo Siegel (1978), os defeitos em peças fundidas podem ser classificados de acordo com o tamanho, localização e causa. Quanto ao tamanho, os defeitos podem ser microscópicos ou macroscópicos. Em relação à localização, podem ser externos ou internos, estes últimos sendo somente observados após algumas operações. Por fim, quanto à causa, os defeitos podem ser derivados do metal, da areia ou do material de moldagem.

Segue uma breve descrição dos defeitos mais comuns encontrados em ferros fundidos cinzentos:

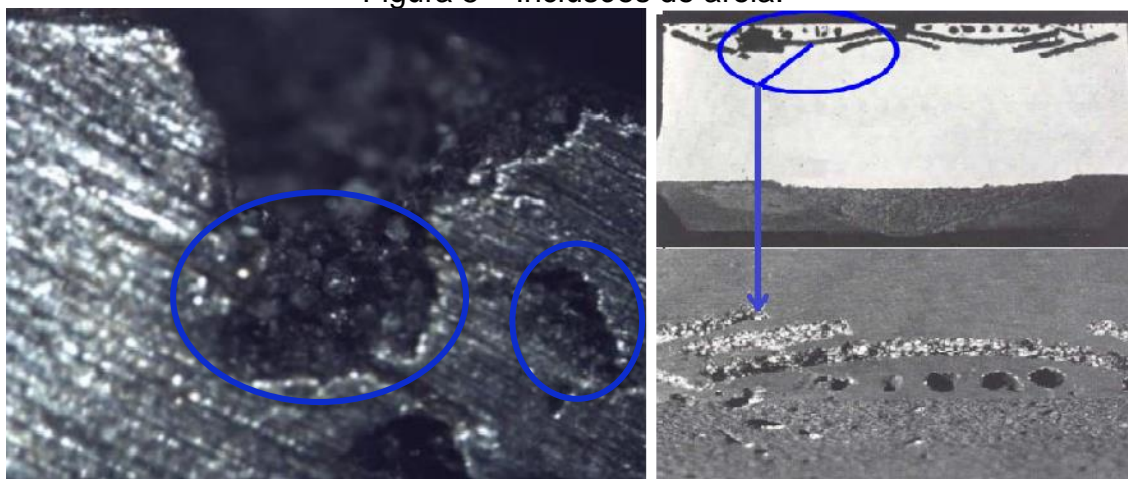
2.3.1 Inclusões

Os defeitos de fundição por inclusão referem-se à presença de materiais indesejados, que são arrastados pelo metal líquido e permanecem aderidos à peça tanto em seu interior como em sua superfície. Podem ser de origem endógena ou exógena, as primeiras se formam dentro do material fundido durante o processo de solidificação como óxidos, silicatos, sulfetos e aluminatos. Já as últimas são provenientes de fontes externas como escória presente no metal e areia vinda da preparação do molde ou macho (FERREIRA, 1999).

A inclusão de areia é um dos defeitos de fundição que ocorre com maior frequência, e com poucas possibilidades de ser reduzido totalmente, pois são de difícil correlação e muitas vezes são provenientes de outros defeitos. As inclusões de areia geralmente estão associadas a cavidades na peça e podem também estar ligadas a

inclusões de escória devido ao efeito erosivo desta sobre o sistema de alimentação. Se as inclusões são provenientes do macho, os grãos inclusos devem ter configuração e tamanho semelhantes aos da areia do macho, se essa areia base for diferente da usada no molde. Por outro lado, se as inclusões vêm do molde, é provável que outras regiões da peça ou do sistema de alimentação apresentem protuberâncias típicas de erosão ou quebra de cantos. Caso isso não se verifique é provável que houvesse presença de areia no molde durante o fechamento, devido à limpeza inadequada. A figura 5 representa o defeito inclusão de areia (ROMANUS, 2005).

Figura 5 – Inclusões de areia.



Fonte: Senai (2023).

2.3.2 Bolo quebrado

Este defeito ocorre no decorrer das operações de moldagem, principalmente na extração do modelo de areia, onde ocorrem vários tipos de esforços mecânicos aos quais a areia deve aguentar. Sua origem pode ser por causa das tensões de tração e compressão presentes na cavidade do molde, devido ao limite de deformação a verde insuficiente (mesmo com uma alta resistência à compressão da areia verde), modelo áspero o que aumenta a aderência do molde tornando sua extração difícil. Pode ser verificado sobre duas formas: preenchimento de cavidades pelo metal, caso venha da quebra de bolos ou em forma de rebarbas não proposital, caso tenha ocorrido quebra de cantos da cavidade do molde. Para lidar com esse defeito caso for proveniente do modelo, o ideal é ajustar essa variável para evitar problemas relacionados à areia verde, que podem surgir devido a alterações desnecessárias em sua composição. Por outro lado, se os defeitos estiverem ligados à areia de

moldagem, algumas soluções envolvem a melhoria da eficiência da mistura, aumento da plasticidade da areia, que pode ser alcançado aumentando a resistência ao fendilhamento (ou tração) em relação à resistência à compressão, utilização ou aumento da adição de dextrina às misturas também pode ser eficaz. Este defeito se apresenta conforme figura 6 a seguir (ROMANUS, 2005; SENAI, 1987b).

Figura 6 – Bolo quebrado.



Fonte: Neto (2014).

2.3.3 Rechupe

O rechupe é um defeito volumétrico resultante da contração não compensada do metal líquido durante sua solidificação em peças fundidas. Este defeito se manifesta como um vazio aberto ou fechado, localizado em áreas mais volumosas que solidificam por último. As superfícies do rechupe são geralmente rugosas e por vezes interdendríticas. A presença desse defeito é mais comum em regiões próximas aos alimentadores, junções, pontos de entrada de metal líquido e machos utilizados nos moldes (FERREIRA, 1999).

A formação desses defeitos é causada pela contração volumétrica durante a solidificação do metal, por gases desprendidos pelo molde em combinação com a pressão atmosférica, deformação dos moldes devido à sua expansão térmica durante o vazamento em altas temperaturas também contribui para esse problema. Para lidar com esses desafios, é recomendado controlar rigorosamente a temperatura de

vazamento, revisar o projeto do sistema de enchimento da peça, ajustar o posicionamento dos massalotes, monitorar e ajustar a composição química do material e melhorar a rigidez do molde. Este defeito se apresenta conforme a figura 7 (AFS, 1966).

Figura 7 – Rechupe.



Fonte: Fuoco (2016).

2.3.4 Bolhas de gás

Este defeito tem a forma de cavidades com paredes lisas e brilhantes ou oxidadas, geralmente esféricas conforme figura 8. Se a origem deste defeito for o molde, a cavidade fica situada próxima a superfície da peça e fica coberta por uma fina camada de metal, sendo impossível visualizar antes da limpeza do fundido. Por outro lado, se sua origem vier de carepas de oxidação, o defeito aparece como uma protuberância superficial antes da limpeza, e após o jateamento como uma cavidade aberta na superfície da peça. Na areia verde esse defeito pode ser devido à umidade elevada, que pode ser causada pelo excesso de argila ativa ou finos inertes e pela adição insuficiente de areia base na mistura. Outro fator é a permeabilidade inadequada, que acontece pelo uso de areia base extremamente fina ou grossa e pelo grau de compactação dos moldes muito baixo ou elevado demais. E por último o excesso de “água livre”, que é causado por um baixo grau de renovação do sistema

ou por deficiência na mistura. Para eliminar estes defeitos, uma solução é o aumento da eficiência de mistura, buscando reduzir o teor de umidade, através de uma menor presença de “água livre” na areia verde, outra solução é aumentar a permeabilidade, caso a mesma esteja muito baixa (FERREIRA, 1999; ROMANUS, 2005).

Figura 8 – Bolha de gás.



Fonte: Senai (2023).

2.4 METODOLOGIA DE TAGUCHI

O projeto de experimentos é uma técnica que vem sendo desenvolvida há anos em diversos ramos da indústria. Essa técnica consiste na investigação de todas as condições possíveis de realização de experimentos com diferentes parâmetros. O planejamento fatorial de experimentos é uma técnica em que todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigadas. Contudo, pode ser um incômodo quando se tem um grande número de fatores a serem avaliados. Através disto, surge o planejamento fatorial fracionado, que tem o objetivo de reduzir o número de experimentos, pois, em um processo com muitas variáveis, o número de experimentos pode ser muito elevado e se tornar impraticável para um fatorial completo. Este planejamento é utilizado na tentativa de economizar tempo e recursos (MONTGOMERY, 2012).

Seguindo esta ideia, métodos foram desenvolvidos por Taguchi (1986), com o objetivo de simplificar e padronizar os experimentos fatoriais fracionados. Essas

técnicas se tornaram muito úteis em ambientes industriais e os resultados foram garantidos que fossem consistentes mesmo em experimentos conduzidos por vários pesquisadores. Taguchi propôs várias maneiras de tornar os projetos de experimentos mais acessíveis e atraentes para a indústria como (ROY, 2010):

a) Padronização do DOE: A utilização de arranjos ortogonais que representam o menor experimento fatorial fracionado possível. Isso simplifica a execução e interpretação dos experimentos, tornando-os mais acessíveis à indústria.

b) Estratégia de Projeto Robusto: Um procedimento para tornar produtos e processos menos sensíveis a fatores não controláveis, conhecidos como ruídos. Taguchi propôs uma forma de incorporar esses fatores no planejamento de experimentos, visando aumentar a robustez dos resultados.

c) Função Perda: Taguchi desenvolveu uma fórmula matemática para quantificar, em termos monetários, as economias resultantes da aplicação do projeto de experimentos. Esta função também evidencia a redução da variação, mostrando o benefício financeiro das melhorias implementadas.

d) Análise Sinal/Ruído: Introdução da relação sinal-ruído como uma métrica para avaliar a robustez de um produto ou processo. Essa análise permite investigar a relação entre as características desejadas e as indesejadas, auxiliando na identificação e redução de fontes de variação.

2.4.1 Padronização do DOE

O método de Taguchi (1986) se comparado com os métodos propostos nos experimentos fatoriais fracionados, tem sua principal diferença na construção da matriz e na razão sinal-ruído. As matrizes são arranjos ortogonais previamente preparados que fornecem diferentes combinações dos parâmetros a serem analisados e estabelecem seus níveis para cada experimento. Esses arranjos são elaborados de modo a permitir ao pesquisador avaliar o efeito das interações entre as variáveis (PHADKE, 1989).

Roy (2010), explica que os arranjos ortogonais de Taguchi são identificados pela letra "L" seguida de um número que indica a quantidade de experimentos. Onde são indicados os tipos de arranjos, número máximo de fatores e níveis possíveis para cada fator. A escolha do arranjo é baseada na quantidade de fatores e interações que se deseja estudar, na tabela 2 podemos ver os arranjos ortogonais de Taguchi.

Tabela 2 – Arranjos ortogonais.

Arranjo Ortogonal	Número de Linhas	Número Máximo de Fatores	Número Máximo de Fatores com esses Níveis			
			2	3	4	5
L4	4	3	3	-	-	-
L8	8	7	7	-	-	-
L9	9	4	-	4	-	-
L12	12	11	11	-	-	-
L16	16	15	15	-	-	-
L'16	16	5	-	-	5	-
L18	18	8	1	7	-	-
L25	25	6	-	-	-	6
L27	27	13	-	13	-	-
L32	32	31	31	-	-	-
L'32	32	10	1	-	9	-
L36	36	23	11	12	-	-
L'36	36	16	3	13	-	-
L50	50	12	1	-	-	11
L54	54	26	1	25	-	-
L64	64	63	-	-	-	-
L'64	64	21	-	-	21	-
L81	81	40	-	40	-	-

Fonte: Adaptado Phadke (1989).

Gijo e Scaria (2011), abordaram o método de Taguchi para otimização dos ingredientes da areia verde em uma fundição. A permeabilidade e a resistência à compressão foram as características importantes da areia verde. Três fatores (tempo de mistura, quantidade de bentonita e de pó de carvão) foram experimentados em três níveis, se fosse utilizado o planejamento fatorial completo seriam necessárias 27 tentativas (3^3), contudo através do método de Taguchi utilizando um arranjo ortogonal L9, foi preciso realizar apenas nove experimentos, uma vez que algumas interações que seriam avaliadas no planejamento fatorial completo não teriam muita relevância, conseguindo assim uma redução de tempo e custo, através da diminuição de experimentos realizados. A relação sinal-ruído foi utilizada para analisar os dados e foram selecionados os melhores níveis para esses fatores. Como resultado, além da identificação de níveis ótimos para os ingredientes, a proporção de bentonita e pó de carvão foram reduzidos consideravelmente, gerando um grande benefício financeiro.

2.4.2 Projeto robusto

Para formalizar o objetivo geral do sistema total de qualidade, é necessário desenvolver um produto ou processo que demonstre robustez diante de todos os

fatores perturbadores. A robustez é definida pela capacidade de as características funcionais do produto ou processo não serem sensíveis às variações causadas por fatores indesejáveis. Para alcançar essa robustez, é fundamental iniciar esforços de controle da qualidade desde as fases iniciais de engenharia de produção e fabricação. Este enfoque visa garantir a eficácia e a consistência dos produtos e processos ao longo de sua vida útil, minimizando a influência de variáveis externas indesejadas (ELSAYED, HSIANG e TAGUCHI, 1990).

Para alcançar a qualidade desejável de um produto ou processo desde o projeto, Taguchi recomenda um processo de três etapas, como segue (NETO, 1997; ROY 2010):

1) Projeto do sistema: Estabelece os aspectos conceituais do projeto, abordando os pontos fundamentais da engenharia do produto ou processo. Engloba a seleção de matérias, equipamentos de produção e processo. O foco no cliente ajuda a encontrar características de desempenho que atendam às suas necessidades.

2) Projeto de parâmetro: Visa desenvolver produtos e processos que sejam robustos em relação a todos os principais ruídos. Isso é alcançado por meio do uso de experimentos estatísticos e análise de sensibilidade para definir os valores-alvo do projeto. O objetivo é determinar a combinação ótima de parâmetros que torne o produto ou processo insensível aos efeitos dos ruídos. A condição ideal é selecionada de modo que a influência dos fatores não controlados (ruídos) cause variação mínima no desempenho do sistema.

3) Projeto de Tolerância: Concentra-se no delineamento de experimentos e outras ferramentas estatísticas para estabelecer as tolerâncias das medidas-alvo focadas durante a fabricação. Métodos experimentais são aplicados seletivamente para melhorar a qualidade do componente. Essa abordagem é adotada quando o projeto por parâmetros não é suficiente para reduzir as variações do produto ou processo, sendo que a redução de tolerâncias geralmente implica em custos mais elevados com materiais e equipamentos.

2.4.3 Função perda de qualidade

De acordo com Neto (1997) e Roy (2010), o conceito da função perda de qualidade, definido por Taguchi, representa a perda total transmitida à sociedade desde o momento em que um produto é enviado ao cliente. Essa perda é medida em

termos monetários e inclui todos os custos que excedem o custo de um produto perfeito. Qualquer variação nas dimensões da característica funcional de qualidade, para um produto ou processo, envolvem custos adicionais, e a função perda possibilita medir o custo da qualidade não atendida, que afeta indiretamente o consumidor.

2.4.4 Relação sinal/ruído

Quando um experimento é conduzido, existem muitos fatores não projetados que influenciam no resultado. Esses fatores não controláveis que afetam a variabilidade das funções dos produtos ou processos são conhecidos como fatores de ruído. A relação sinal-ruído busca medir a sensibilidade da característica de qualidade que está sendo investigada de maneira controlada aos fatores de ruído que não estão sob controle, a fim de indicar qual a melhor maneira experimental para que exista uma menor variação em determinado processo. A razão sinal-ruído busca observar, duas características distintas de uma distribuição estatística ao mesmo tempo, a média e a variância, reunindo estas características em um só número para medir o desempenho do produto ou processo (NETO, 1997; PHADKE, 1989; ROY, 2010).

De acordo com Taguchi (1986), maximizar a razão sinal-ruído significa diminuir a variabilidade do processo otimizando seu resultado. Assim para cada situação se tem um tipo de razão sinal-ruído, que são definidas como:

1) Quanto menor é melhor: É obtido quando o objetivo é minimizar o valor de saída, neste caso a meta é zero. Para esta condição a razão sinal-ruído é definida pela equação (4):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum y_i^2 \right) \quad (4)$$

2) Quanto maior é melhor: É obtido quando o objetivo é maximizar o valor de saída, neste caso o alvo é o infinito. Para esta condição a razão sinal-ruído é definida pela equação (5):

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (5)$$

3) Nominal é melhor: É obtido quando o objetivo de valor de saída esteja numa posição intermediária. Para esta condição a razão sinal-ruído é definida pela equação (6):

$$S/N = 10 \log \left(\frac{Y^2}{s^2} \right) \quad (6)$$

Onde:

S/N é a transformação sinal-ruído;

y_i é a i -ésima resposta observada para cada combinação;

n é o número de combinações;

Y é a média da distribuição;

s^2 é a variância da distribuição.

Fontana (2021) conduziu um estudo sobre a liga de alumínio SAE 305 fundida por gravidade em moldes permanentes, variando três parâmetros de processo (temperatura do molde, temperatura de vazamento e quantidade de desgaseificante no banho). Utilizando o método de Taguchi, realizou o cálculo de sinal ruído pela função perda. Os resultados utilizados para o cálculo, considerados ruídos do processo, foram as médias obtidas para quantidade e tamanho dos defeitos internos. E a razão utilizada foi a do tipo menor é melhor, pois é a que indica o valor zero como ideal, ou seja, quanto menor for a quantidade e tamanho dos defeitos, melhor é a qualidade da peça. Através do uso da metodologia de Taguchi para cálculo de sinal ruído de cada parâmetro, conseguiu verificar o parâmetro que mais influenciava a formação de defeitos, que foi a temperatura do molde metálico. Além disso, foi possível determinar os níveis ótimos para este processo, obtendo uma redução significativa no percentual de refugo por conta de defeitos internos.

Alves (2009) analisou as variáveis envolvidas no processo de fundição de um aço 1030 que levam a ocorrência de defeitos relacionados à solidificação do metal como rechupes e poros. Com o uso da razão sinal-ruído, e seguindo a ideia proposta por Taguchi, de que maximizar a razão sinal-ruído significa melhorar a resposta e minimizar a variabilidade. Conseguiu verificar através de resultados a comprovação desta afirmação, uma vez que a condição experimental que apresentou o menor volume de rechupe também apresentou maior razão sinal-ruído.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONTEXTO ATUAL

Atualmente os tambores de freio fundidos na empresa em ferro fundido cinzento, tem um alto grau de rejeição, uma coleta de dados é feita diariamente para realização do índice de refugo, através dos dados coletados foi possível identificar o item que apresentou maior taxa de refugo entre dezembro de 2023 e abril de 2024, conforme pode ser visualizado na tabela 3.

Tabela 3 – Principal item refugado nos últimos cinco meses.

Item TF366					
Mês	Quantidade produzida (peças)	Quantidade refugada (peças)	Quantidade produzida (kg)	Quantidade Refugada (kg)	Percentual refugado
Dezembro	1186	120	77920,2	7884,0	10,12%
Janeiro	2969	324	195063,3	21286,8	10,91%
Fevereiro	3021	194	198479,7	12745,8	6,42%
Março	2969	256	195063,3	16819,2	8,62%
Abril	2844	165	186850,8	10840,5	5,80%
Total	12989	1059	853377,3	69576,3	8,15%

Fonte: O autor (2024).

Como o refugo da empresa é avaliado pelo peso, os tambores de freio impactam diretamente nos índices de refugo, devido ao fato de serem as peças mais pesadas produzidas. Através da análise do refugo foi verificado que os principais defeitos encontrados nos tambores de freio foram bolos quebrados e inclusões de areia respectivamente, e somados equivalem a quase 50% dos refugos gerados deste item, conforme pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 – Principais defeitos nos tambores de freio.

Principais defeitos					
Mês	Quantidade total refugada (kg)	Bolo quebrado (kg)	Percentual refugado por bolo quebrado	Inclusão de areia (kg)	Percentual refugado por inclusão de areia
Dezembro	7884,0	1320	17%	1151	15%
Janeiro	21286,8	11235	53%	2562	12%
Fevereiro	12745,8	4336	34%	2365	19%
Março	16819,2	4533	27%	2628	16%
Abril	10840,5	2694	25%	1251	12%
Total	69576,3	24118	35%	9957	14%

Fonte: O autor (2024).

O processo de fundição do tambor de freio se inicia na fusão do ferro fundido cinzento, onde é utilizado um forno elétrico de indução do tipo cadinho, com capacidade de duas toneladas. O carregamento do forno se dá por uma matéria prima formada por retornos (composto por canais de alimentação e peças não conformes), sucata de aço, limalhas de ferro (cavacos que são removidos da peça durante a usinagem) e carburante (grafite), conforme figura 9.

Figura 9 – Materiais utilizados na preparação de carga.

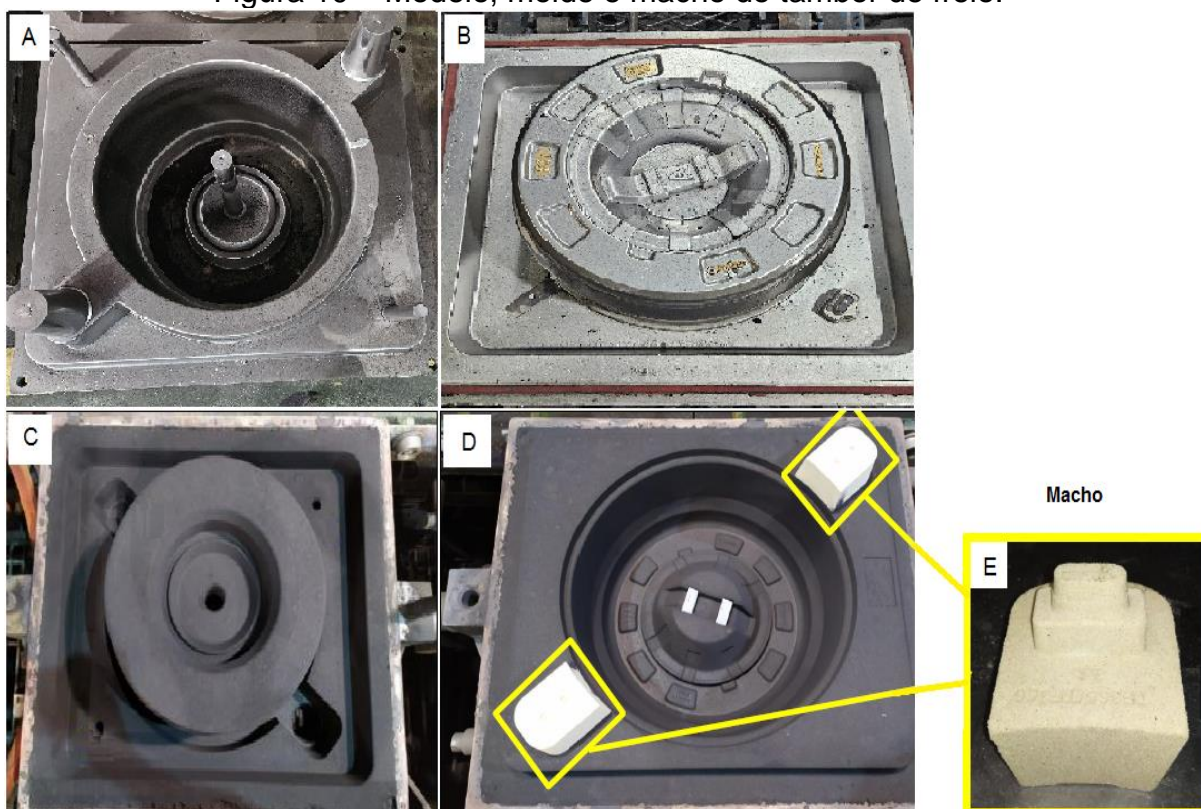


a) Retorno; b) Sucata de aço; c) Limalhas d) Carburante.
Fonte: O autor (2024).

Antes de realizar a transferência do metal líquido do forno para a panela de vazamento é verificado se a temperatura do forno está entre 1480 e 1520°C. O ferro fundido cinzento é vazado a uma temperatura entre 1350 a 1400 °C, e como se tem perda de calor no transporte do metal líquido até a área de vazamento, é preciso que a temperatura no forno esteja mais alta que a de vazamento.

A areia para execução do molde e machos é preparada em um misturador com uma mistura de areia base, argila (bentonita nacional e importada) e aditivo (carvão cardiff). Após o preparo é executado a moldagem da areia em uma moldadora Vick automatizada utilizando o modelo com a geometria da peça que se deseja moldar, para este item são utilizados dois machos que são feitos em uma sopradora Vick, a figura 10 apresenta o modelo, molde e machos utilizados na confecção do tambor de freio.

Figura 10 – Modelo, molde e macho do tambor de freio.



a) Parte inferior do modelo; b) Parte superior do modelo; c) Parte inferior do molde; d) Parte superior do molde; e) Macho. Fonte: O autor (2024).

Após a fundição, as peças ficam resfriando até a execução de sua desmoldagem. E por fim passam por um processo de jateamento, rebarbação e posterior usinagem, onde os defeitos ficam aparentes prejudicando a qualidade do produto final, conforme se pode ver na figura 11.

Figura 11 – Defeitos de bolo quebrado e inclusão de areia respectivamente.

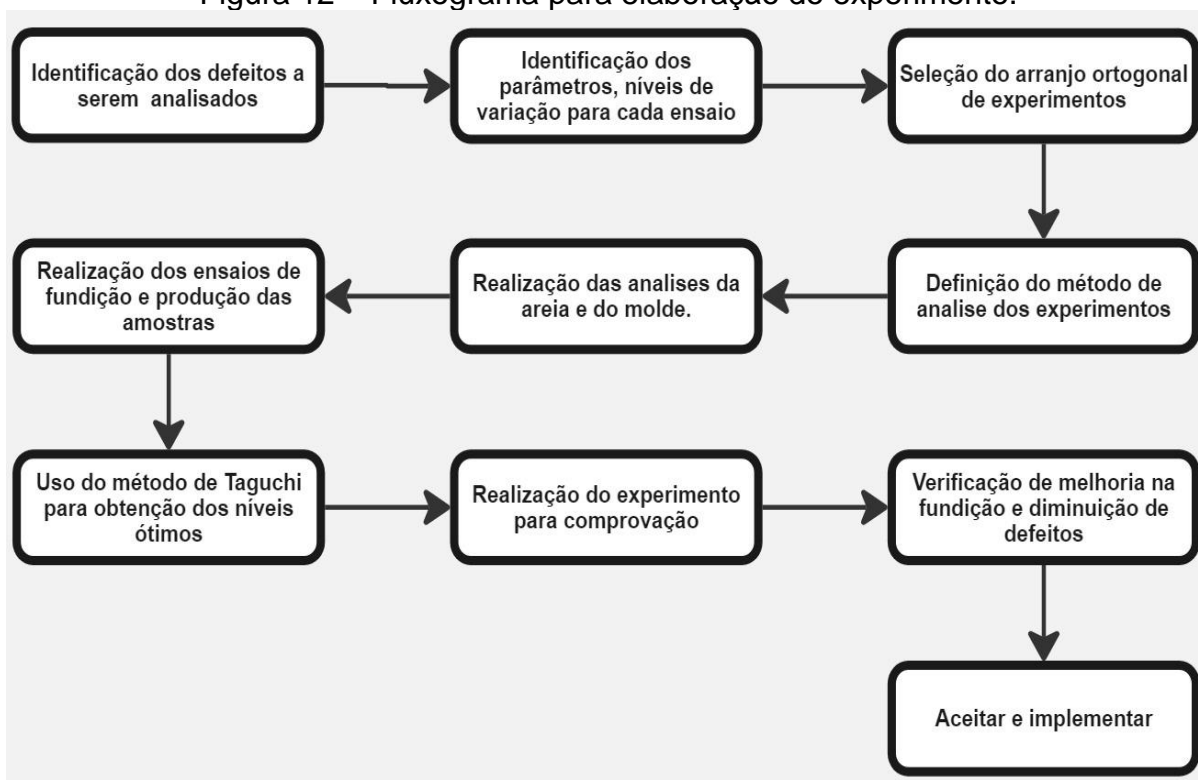


Fonte: O autor (2024).

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A figura 9 apresenta o fluxograma indicando os passos que foram seguidos, iniciando com a identificação dos defeitos já definidos acima, definição das variáveis de entrada e passando por todas as etapas até o experimento de confirmação, o qual verificou se a otimização dos parâmetros obteve o resultado esperado.

Figura 12 – Fluxograma para elaboração do experimento.

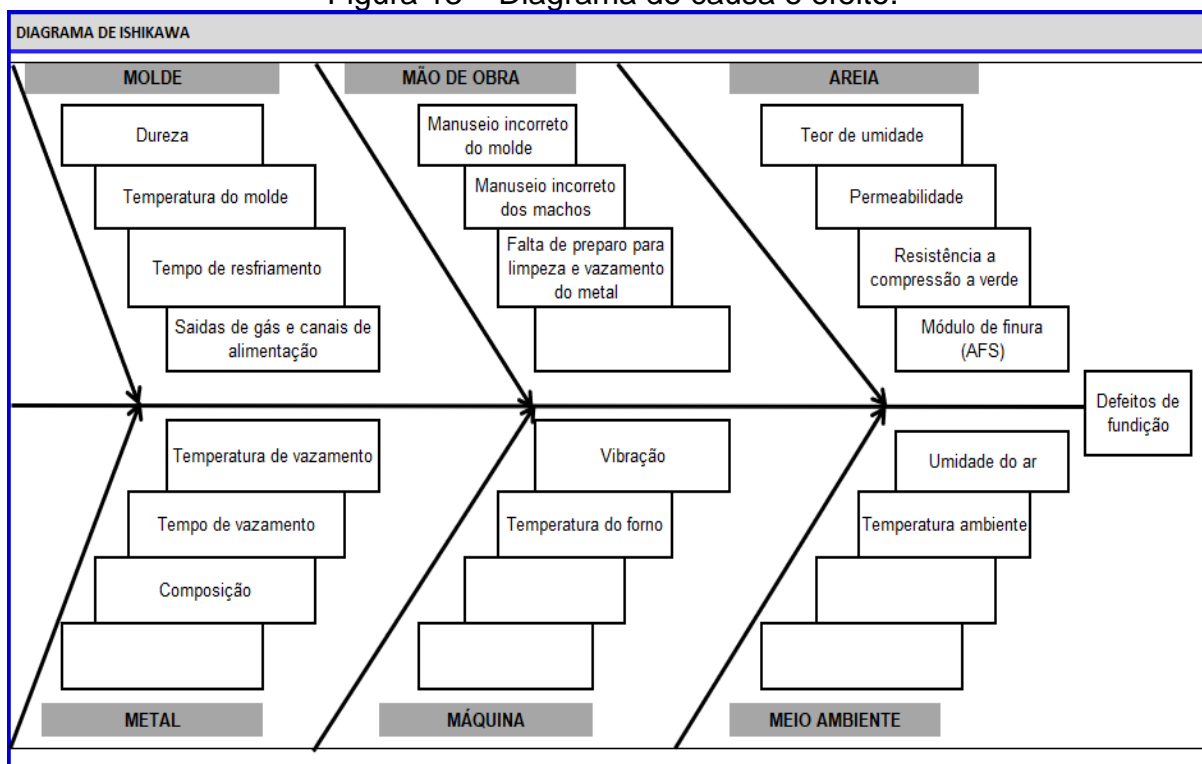


Fonte: O autor (2024).

3.2.1 Definição das variáveis de entrada

As definições das variáveis de entrada foram feitas com o uso do diagrama de causa e efeito (Ishikawa), que é uma ferramenta da qualidade que serve para identificar e organizar possíveis causas de um problema ou efeito específico. Conforme apresentado na figura 13, foram organizados no diagrama de Ishikawa, possíveis fatores que poderiam ter levado aos defeitos visualizados permitindo assim uma visão clara e estruturada de potenciais influências sobre os defeitos. Wu e Chang (2004) e Fontana (2021) utilizaram uma abordagem semelhante para seleção das variáveis e obtiveram resultados positivos.

Figura 13 – Diagrama de causa e efeito.



Fonte: O autor (2024).

A partir do diagrama de causa e efeito, foi criada uma matriz GUT conforme figura 14.

Figura 14 – Matriz GUT

Análise da causa raiz do problema que levou aos defeitos de fundição de bolo quebrado e inclusão de areia:									
Matriz GUT									
Descrição das possíveis causas (Fatores do método de Ishikawa)		G	U	T	Total	Grau de prioridade	Tabela de Avaliação GUT		
1	Dureza do molde	5	4	4	80	15,8%	G Gravidade	Sem gravidade	1
2	Temperatura do molde	3	2	2	12	2,4%		Pouco Grave	2
3	Tempo de resfriamento	2	2	2	8	1,6%		Grave	3
4	Sidas de gás e canais de alimentação	3	2	2	12	2,4%		Muito grave	4
5	Manuseio incorreto do molde	3	2	2	12	2,4%		Extremamente grave	5
6	Manuseio incorreto dos machos	3	2	2	12	2,4%	U Urgência	Sem urgência	1
7	Falta de preparo para limpeza e vazamento	3	2	2	12	2,4%		Pouco urgente	2
8	Teor de umidade	5	4	5	100	19,8%		Urgente	3
9	Permeabilidade	3	3	3	27	5,3%		Muito Urgente	4
10	Resistência a compressão a verde	5	4	5	100	19,8%		Extremamente urgente	5
11	Módulo de finura (AFS)	3	3	3	27	5,3%	T Tendência	Ficar como está	1
12	Temperatura de vazamento	4	3	3	36	7,1%		Piorar a longo prazo	2
13	Tempo de vazamento	3	2	2	12	2,4%		Piorar a médio prazo	3
14	Composição	2	2	2	8	1,6%		Piorar a curto prazo	4
15	Vibração	3	2	2	12	2,4%		Piorar muito rápido	5
16	Temperatura do forno	3	3	3	27	5,3%			
17	Umidade do ar	2	2	1	4	0,8%			
18	Temperatura ambiente	2	2	1	4	0,8%			

Fonte: O autor (2024).

A Matriz GUT apresentada na figura 14 é uma ferramenta da qualidade utilizada para solucionar problemas. Ela permite priorizar ações baseando-se em três critérios: Gravidade (G), Urgência (U) e Tendência (T). Cada um destes critérios é avaliado em uma escala de 1 a 5, onde 1 representa o impacto mínimo e 5 o impacto máximo. A multiplicação das pontuações de G, U e T geram um índice que determina a prioridade de cada fator ou problema analisado. No contexto deste trabalho, a matriz GUT foi utilizada para priorizar as causas de defeitos de bolo quebrado e inclusão de areia ocorridas nos tambores de freio, com base no Diagrama de Ishikawa. Esse método foi essencial para identificar os fatores que mais tem contribuído para os defeitos visualizados e que necessitavam de maior atenção para melhorar a qualidade do processo.

Com base na matriz fornecida, os fatores mais críticos foram: teor de umidade (GUT = 100 pontos), resistência a compressão a verde (GUT = 100 pontos), dureza do molde (GUT = 80 pontos) e temperatura de vazamento (GUT = 36 pontos), destes fatores foram selecionados para análise experimental os seguintes: teor de umidade, resistência à compressão a verde e dureza do molde. Apesar da temperatura de vazamento ter obtido a quarta maior pontuação na matriz, ela não foi selecionada, devido a já se ter um alto controle sobre esse parâmetro o que minimiza sua variabilidade e devido ao tempo limitado de disponibilidade da linha de moldagem oque então aumentaria o número de variáveis e conseqüentemente de experimentos devido a se ter que escolher um maior arranjo ortogonal de Taguchi.

Seguindo a metodologia de Taguchi para cada fator se estabeleceu dois níveis de variações de parâmetros. Os níveis mostrados na tabela 5, foram definidos de forma a representar valores próximos das faixas mínima e máxima de atuação utilizadas na empresa. A escolha desses níveis foi estratégica, uma vez que valores próximos às extremidades da faixa operacional permitem avaliar o impacto máximo de cada fator, de forma a respeitar os limites técnicos e operacionais praticados na empresa.

Tabela 5 – Fatores de controle e seus níveis.

Fator	Descrição	Nível 1	Nível 2
A	Teor de umidade (%)	3,0	3,4
B	Resistência a compressão a verde (N/cm ²)	18	24
C	Dureza do molde (PDB)	80	90

Fonte: O autor (2024).

Após definidos os fatores e seus níveis de variação, foi elaborada a Tabela 6, onde se apresentam os ensaios com a randomização utilizada em cada um, seguindo o arranjo ortogonal L4 da metodologia de Taguchi. Esse arranjo foi selecionado devido ao se precisar realizar apenas quatro ensaios, o que reduziu significativamente o tempo, sem comprometer a análise dos efeitos principais de cada fator. Isso foi de extrema importância devido a disponibilidade dos equipamentos para realização dos experimentos. Foram realizadas quatro rodadas de experimentos variando os parâmetros, essa variação foi feita randomicamente, essa ordem aleatória foi escolhida para reduzir a probabilidade de que tendências sistemáticas ou fatores externos influenciassem de maneira desigual os diferentes ensaios.

Tabela 6 – Arranjo ortogonal e método de ensaios.

Arranjo L4	Fatores atribuídos e níveis		
Nº do ensaio	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Fonte: O autor (2024).

3.2.2 Análises da areia e fundição das amostras

Os experimentos foram realizados em dias diferentes e o acompanhamento do processo se deu desde a preparação da areia até a realização da moldagem e vazamento das peças na linha, para assim garantir que a quantidade de matéria prima utilizada na preparação da areia fosse a correta e que não tivessem resíduos de areia ou partículas soltas no molde que pudessem se misturar ao metal líquido no vazamento causando defeitos devido a limpeza inadequada. O processo de preparação da areia, no misturador com a capacidade de 1 tonelada, foi realizado seguindo as quantidades apresentadas na tabela 7.

Tabela 7 – Composição utilizada.

Composição inicial					
Quantidade	Areia	Bentonita nacional	Bentonita importada	Carvão Cardiff (pó)	Água
	950 Kg	4 Kg	4 Kg	3 kg	30 L

Fonte: O autor (2024).

Estas quantidades utilizadas na composição foram feitas com base nas instruções de trabalho da empresa. Após foi feita a preparação da mistura por 180 segundos no misturador para garantir sua uniformidade e homogeneização, a areia misturada foi transportada pelas correias transportadoras até o silo que fica acima da linha de moldagem. A partir deste silo a areia foi liberada de forma controlada para a máquina de moldagem, a fim de avaliar a influência da areia no processo de fundição, foram retiradas amostras da areia na saída do silo da máquina de moldar onde ocorre a confecção dos moldes e realizadas as análises da areia no laboratório metalúrgico da empresa. As características avaliadas conforme mencionadas na tabela 8 foram: teor de umidade, resistência à compressão a verde (RCV) e dureza do molde. A realização dos ensaios e cálculos foram executadas conforme explicado no item 2.2.3.3. O número de análises que foram realizadas, dependeu do número de experimentos conforme tabela 8.

Tabela 8 – Matriz experimental L4.

Arranjo L4	Fatores atribuídos e níveis		
Nº do ensaio	A – Teor de umidade (%)	B – Resistência a compressão a verde (N/cm ²)	C – Dureza do molde (PDB)
1	3,0	18	80
2	3,0	24	90
3	3,4	18	90
4	3,4	24	80

Fonte: O autor (2024).

Sendo realizadas no mínimo quatro análises, uma por experimento, porém como se teve a necessidade de alterações na mistura da areia para se chegar aos níveis dos fatores de umidade e resistência solicitados, foi necessário realizar mais análises. Os resultados obtidos das análises de cada experimento encontram-se no documento contido no Apêndice B. As alterações se deram no tempo de mistura que foi aumentado para 270 segundos nos experimentos onde foi solicitado uma RCV mais elevada (24 N/cm²), para assim se ter uma maior ativação da bentonita, o que aumentou a RCV, e na quantidade de água adicionada a mistura que foi 28 L nos experimentos com um menor teor de umidade e 32 L nos com um maior teor. A seguir foi alterado os padrões de pressão da placa da máquina de moldagem para conseguir chegar aos valores de dureza do molde estipulados em cada experimento e executado a medição da dureza com o esclerômetro conforme figura 15, os valores lidos pelo equipamento foram em pontos de dureza escala B – AFS (PDB).

Figura 15 – Medição com o esclerômetro.



Fonte: O autor (2024).

Após a confecção dos moldes a fundição das amostras ocorreu conforme estipulado no item 3.1. Para a medição da temperatura de vazamento se utilizou um pirômetro de imersão, equipamento capaz de medir temperaturas na faixa de 600 °C até 1760 °C, conforme pode ser visualizado na figura 16.

Figura 16 – Medição da temperatura com pirômetro de imersão.



Fonte: O autor (2024).

Para cada experimento foram fundidas três peças, isso ocorreu, pois a quantidade de areia verde presente no misturador consegue preencher completamente três caixas de moldagem, sendo necessário aproximadamente 300 kg de areia verde para cada caixa. Depois da realização do vazamento do metal líquido, foi seguido o processo normal de desmoldagem, jateamento e rebarbação das peças, para então realizar a análise dos defeitos de fundição.

Para a análise dos defeitos de inclusão de areia ocorridos nos tambores de freio se utilizou o documento contido no Apêndice A. Já para tambores contendo

defeitos de bolo quebrado, por ser normalmente um defeito maior, a avaliação foi refugar totalmente itens com este defeito, sem a possibilidade de desvios.

3.2.3 Definição das variáveis de resposta

As variáveis de respostas foram apenas os defeitos relacionados a bolo quebrado e inclusão de areia. Ou seja, a variável resposta utilizada foi a % de rejeição das peças fundidas, que é a razão entre a rejeição devido aos parâmetros de processo considerados e a quantidade vazada em cada experimento, conforme equação 7.

$$\% \text{ defeitos} = \frac{\text{Número de peças refugadas por bolo ou inclusão de areia}}{\text{Número de peças produzidas}} \times 100 \quad (7)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo aborda o monitoramento do processo produtivo, analisando o índice de refugo dos tambores de freio ao longo dos últimos dez meses e comparando-o aos resultados obtidos a partir dos níveis ótimos identificados pelo método de Taguchi. Ademais, apresenta e discute os resultados da avaliação visual dos defeitos encontrados nos tambores de freio, buscando correlacioná-los às alterações realizadas nos parâmetros de processo. Por fim, expõe os resultados dos experimentos e os cálculos efetuados com a aplicação do método de Taguchi.

4.1 ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO

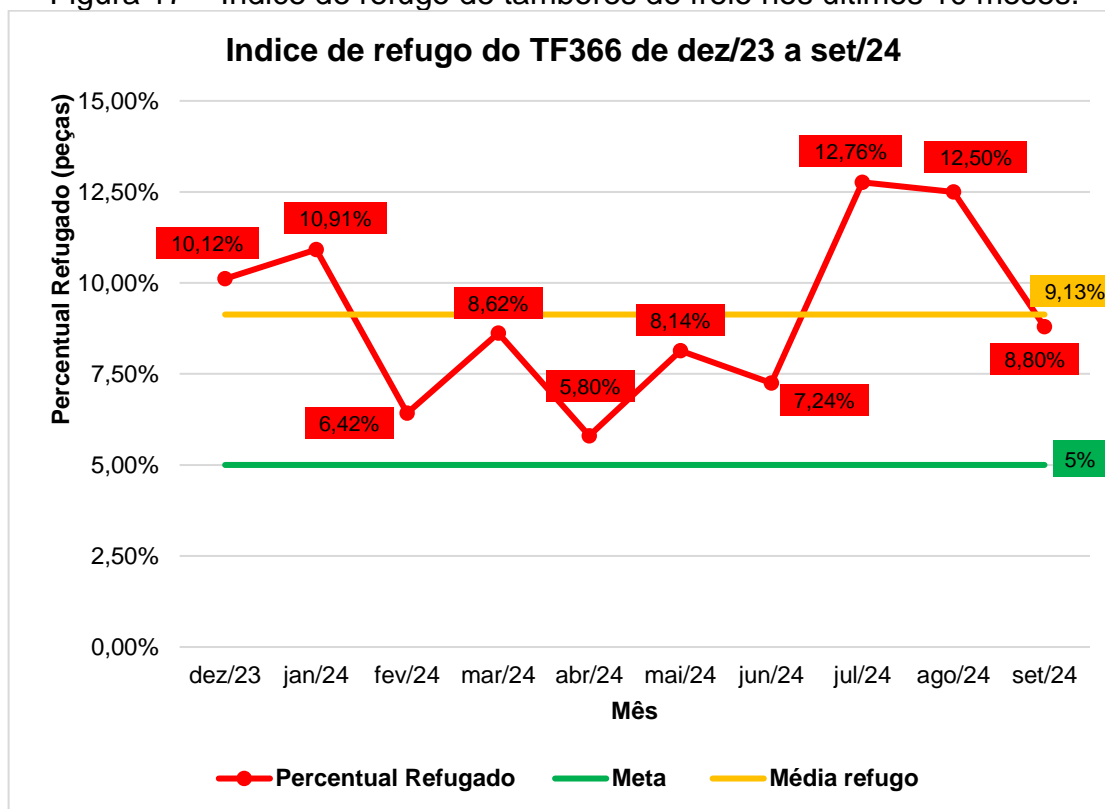
Continuando o acompanhamento do processo iniciado anteriormente onde haviam sido verificados os dados de refugo dos meses de dezembro de 2023 a abril de 2024. Buscou-se os dados de produção e percentual de refugos devido a falhas de fundição ocorridas nos tambores de freio dos últimos dez meses, para assim verificar se houve algum tipo de mudança nos cinco meses subsequentes aos observados anteriormente. As informações coletadas estão dispostas na Tabela 9 e no gráfico apresentado na Figura 17.

Tabela 9 – Percentual de tambores refugados nos últimos 10 meses.

Item	Mês	Quantidade Produzida	Quantidade Refugada	Percentual Refugado
Tambor de freio (TF366)	dez/23	1186	120	10,12%
	jan/24	2969	324	10,91%
	fev/24	3021	194	6,42%
	mar/24	2969	256	8,62%
	abr/24	2844	165	5,80%
	mai/24	3059	249	8,14%
	jun/24	2940	213	7,24%
	jul/24	3557	454	12,76%
	ago/24	3321	415	12,50%
	set/24	3512	309	8,80%

Fonte: O autor (2024)

Figura 17 – Índice de refugo de tambores de freio nos últimos 10 meses.




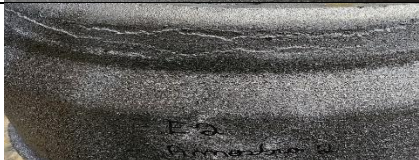



Fonte: O autor (2024).

Os dados apresentados acima na Tabela 9 e na Figura 17 evidenciam que não foram observadas mudanças ou melhorias significativas no índice de refugo ao longo do período analisado. O índice permaneceu consistentemente acima do limite estipulado pela empresa, que é de 5% de toda quantidade produzida, onde a média do índice de refugo atingiu 9,13%. Esse resultado reforçou a necessidade da busca por implementações de ações e estratégias que impactem na redução dos defeitos recorrentes nos tambores de freio.

4.2 ANÁLISE VISUAL DAS AMOSTRAS

O Quadro 1 apresenta as imagens das amostras fundidas que apresentaram defeitos de fundição de bolo quebrado e inclusões de areia. Para cada um dos quatro experimentos realizados, foram descritos os defeitos encontrados, acompanhados de suas respectivas análises visuais, bem como os parâmetros utilizados, que foram os seguintes: teor de umidade, resistência à compressão a verde (RCV) e dureza do molde.

Quadro 1 – Análise visual dos defeitos encontrados nos tambores de freio.

Experimento	Amostra	Foto da peça	Defeito observado	Descrição do defeito	Parâmetros
1	1	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	Umidade: 3% Resistência: 18 N/cm ² Dureza do molde: 80
	2	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	
	3	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	
2	1		Inclusão de areia	Defeito na parte interna da peça causado pela erosão do molde, aprovado através do procedimento de avaliação criado.	Umidade: 3% Resistência: 24 N/cm ² Dureza do molde: 90
	2		Bolo quebrado	Defeito causado pela ruptura do molde, peça refugada após inspeção devido ao tamanho do defeito.	
	3		Bolo quebrado	Defeito causado pela ruptura do molde, peça refugada após inspeção devido ao tamanho do defeito.	
3	1		Bolo quebrado	Defeito causado pela ruptura do molde, peça refugada após inspeção devido ao tamanho do defeito.	Umidade: 3,4 % Resistência: 18 N/cm ² Dureza do molde: 90
	2	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	
	3	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	
4	1	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	Umidade: 3,4 % Resistência: 24 N/cm ² Dureza do molde: 80
	2	-	Sem defeitos	Peça sem defeitos visíveis	
	3		Bolo quebrado	Defeito causado pela ruptura do molde, peça refugada após inspeção devido ao tamanho do defeito.	

Fonte: O autor (2024).

Fazendo uma análise dos resultados apresentados no quadro 1 acima, pode-se perceber algumas tendências e possíveis conclusões relacionadas aos defeitos ocorridos.

No experimento 1, onde se teve uma ausência de defeitos, sugere-se que os níveis utilizados dentro dos parâmetros controlados estipulados para produzir as amostras foram corretos para garantir a integridade do fundido nas três peças produzidas.

No experimento 2, onde todas as peças apresentaram defeitos, porém apenas duas foram refugadas seguindo o critério de aceitação imposto. Foi possível verificar que isto pode ter tido correlação com os fatores utilizados. A RCV mais alta, juntamente com a dureza do molde elevada podem ter gerado uma rigidez excessiva no molde, dificultando assim a capacidade da absorção das tensões e pequenas variações ocorridas durante o enchimento e solidificação do metal, o que por sua vez pode ter levado a uma possível erosão da superfície durante o vazamento do metal na primeira amostra, resultando na inclusão de partículas de areia na peça e também contribuído para a quebra de bolo nas outras duas amostras.

No experimento 3 a ocorrência de um único defeito de bolo quebrado pode estar relacionada a dureza do molde elevada. Porém a resistência a compressão mais baixa e teor de umidade mais elevado podem ter ajudado a minimizar os defeitos nas outras duas amostras tornando os moldes menos rígidos.

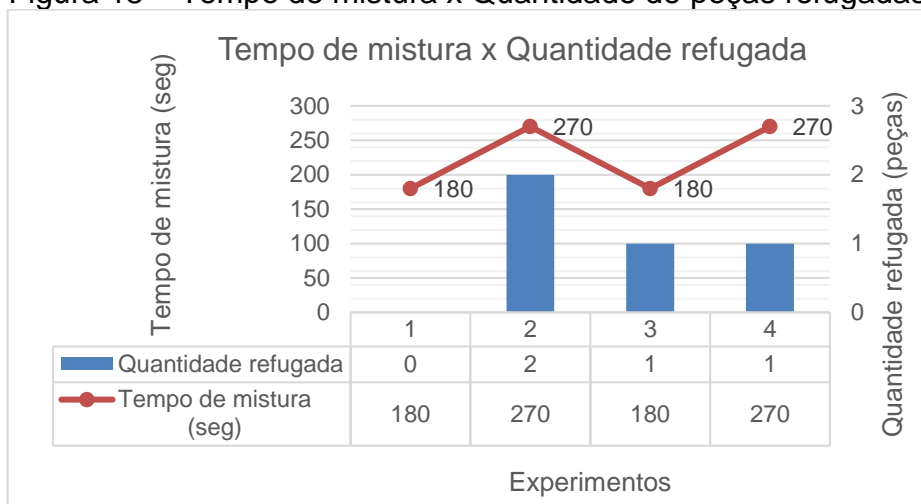
No experimento 4, também se obteve apenas uma peça refugada por bolo quebrado. Embora a resistência a compressão a verde utilizada tenha sido mais elevada a dureza do molde mais baixa, juntamente com o aumento do teor de umidade pode ter dado um pouco mais de flexibilidade ao molde.

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE PROPRIEDADES

A relevância da tentativa de estabelecer correlações entre as diversas características da areia verde analisadas ao longo deste estudo é indiscutível, considerando sua influência direta na qualidade das peças fundidas. Uma compreensão mais aprofundada do impacto de cada alteração realizada nos parâmetros do processo de moldagem pode ser alcançada por meio da análise detalhada dos gráficos apresentados nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

No gráfico apresentado na figura 18 está a correlação entre o tempo de mistura utilizado para cada um dos experimentos versus a quantidade de peças refugadas.

Figura 18 – Tempo de mistura x Quantidade de peças refugadas.



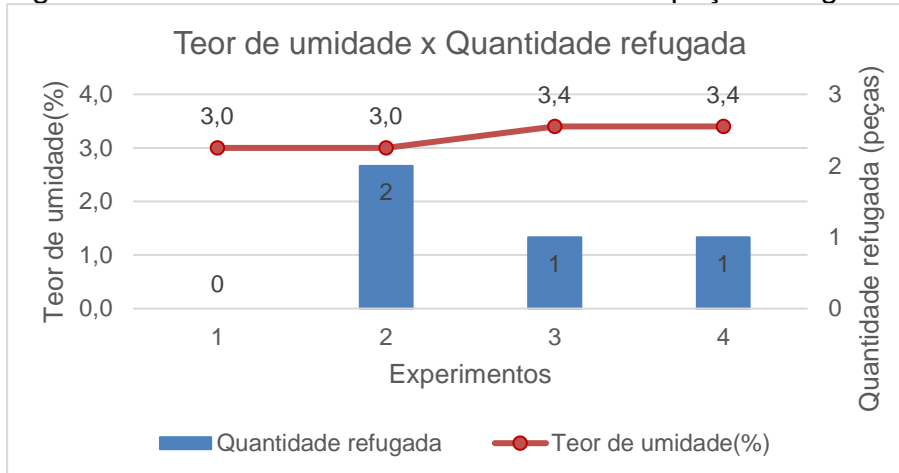
Fonte: O autor (2024).

Notou-se que o tempo de mistura mais longo (270 segundos) está associado a um número maior de peças refugadas (duas no experimento 2 e uma no experimento 4). Isso sugere que os tempos mais longos podem ter resultado em uma mistura excessivamente trabalhada, impactando na qualidade do molde. Também, foi verificado que nestes experimentos onde o tempo de mistura foi mais longo para se alcançar a RCV de 24 N/cm², a compactabilidade que é uma propriedade muito importante e que está diretamente ligada com o teor de umidade, ficou abaixo do especificado nas instruções de trabalho que é de 35% a 43%, ficando em 30% no experimento 2 e 33% no experimento 4. O que levou a conclusão de que esse maior tempo de mistura pode ter levado a uma redução do teor de umidade que juntamente com a RCV excessiva pode ter levado a uma redução da compactabilidade como visto. A compactabilidade baixa e a RCV alta podem ter deixado o molde mais frágil e mais propenso a quebras durante o manuseio ou o processo de fundição, levando ao defeito de bolo quebrado ocorrido.

Romanus (2005) conduziu experimentos com parâmetros parecidos e notou que um ponto extremamente negativo é que a RCV elevada demais (24 N/cm²), em certos modelos, certamente fará com que seja difícil conseguir um bom adensamento dos moldes. Isso, combinado com uma compactabilidade excessivamente baixa,

intensifica o risco de quebras de bolos/cantos, erosão dos moldes e consequente formação de rebarbas e inclusões de areia nas peças.

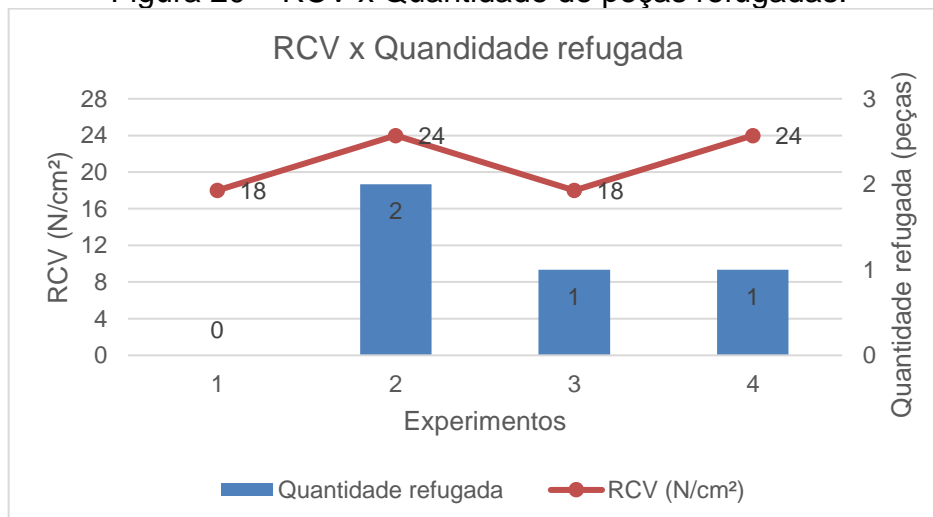
Figura 19 – Teor de umidade x Quantidade de peças refugadas.



Fonte: O autor (2024).

Pelo gráfico apresentado na figura 19, percebeu-se que por si só a variação nos teores de umidade não foi o fator determinante para a formação dos defeitos identificados. Já que em ambos os teores de umidade, 3% que foi obtido com menos adição de água a mistura (em torno de 28 L) e 3,4% que foi obtido com uma maior adição de água (em torno de 32 L), ocorreram o mesmo número de peças refugadas. Esse padrão sugere que a alteração no teor de umidade não teve um impacto significativo na ocorrência de defeitos, indicando que outros parâmetros podem ter sido mais influentes.

Figura 20 – RCV x Quantidade de peças refugadas.



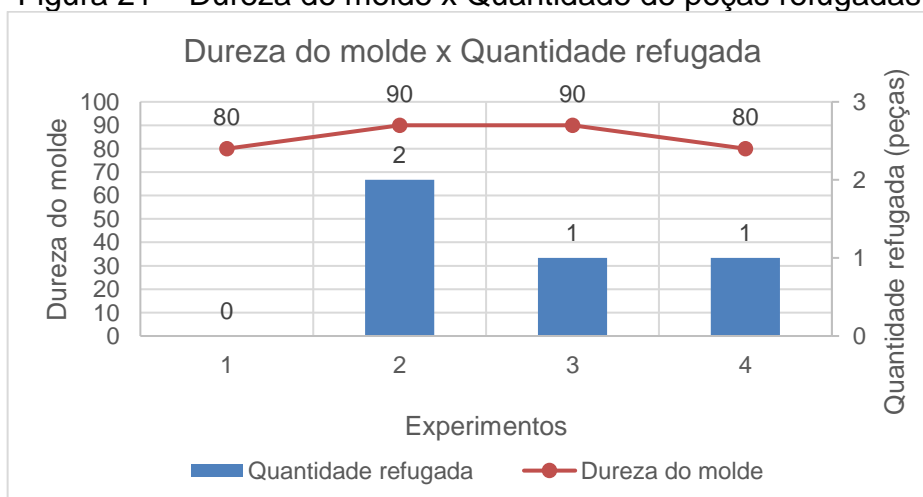
Fonte: O autor (2024).

Ao examinar o gráfico "RCV x Quantidade Refugada" apresentado na figura 20, foi possível observar que a RCV teve uma influência significativa sobre os defeitos de bolos quebrados ocorridos nas peças fundidas quando esteve em seu nível mais alto. Isso pode ter ocorrido, pois a RCV está diretamente relacionada à capacidade do molde de areia em resistir às tensões durante o processo de fundição, mantendo a integridade de sua forma. Outra observação visualizada foi que o teor de argila ativa utilizado que varia de 7% a 9%, nos experimentos em que foi solicitado uma RCV de 24 N/cm² estava no máximo estipulado que é 9%, enquanto nos experimentos onde foi utilizado a RCV de 18 N/cm² o teor de argila ativa se manteve em 7,5%.

De acordo com Romanus (2005) quando se passa a trabalhar com esse maior teor de argila ativa, que conseqüentemente aumenta a RCV, acaba se tendo uma menor compactabilidade na areia preparada como forma de evitar a ocorrência de um aumento muito crítico da umidade, porém essa "solução", acaba levando a alguns efeitos colaterais como: a diminuição da plasticidade da areia verde, o que permite ocorrência de quebras de bolos e cantos dos moldes, resultando em rebarbas e inclusões de areia nas peças. Elevação da friabilidade da areia verde que acaba agravando o seu ressecamento, levando à erosão dos moldes durante o vazamento do metal, resultando em inclusões de areia nas peças.

Essa afirmação pode ser vista em prática nos experimentos, já que onde se trabalhou com um maior teor de argila ativa e conseqüentemente maior RCV, se teve uma grande redução da compactabilidade da areia, o que pode ter afetado o aparecimento dos defeitos.

Figura 21 – Dureza do molde x Quantidade de peças refugadas.



Fonte: O autor (2024).

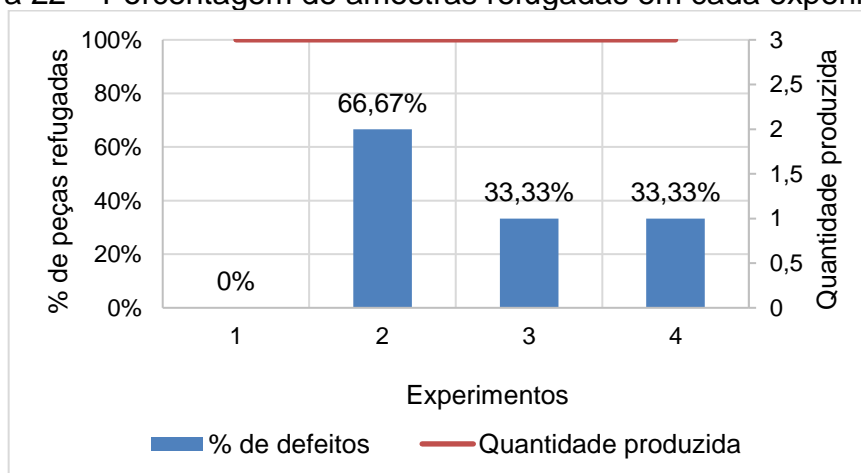
Analisando o gráfico apresentado na figura 21 onde está a relação entre a dureza do molde utilizada e a quantidade de peças refugadas, foi notado que se teve uma menor ocorrência de defeitos quando se utilizou uma menor pressão de moldagem (80 bar), onde se teve apenas uma peça refugada. Já nos experimentos onde se utilizou a pressão de moldagem de 90 bar foram refugadas três peças, sendo duas no experimento 2 e uma no experimento 3.

O que leva a conclusão de que os defeitos identificados nos moldes com dureza mais elevada podem ter ocorrido devido à compactação excessiva da areia, tornando o molde mais rígido e com menor capacidade de absorver as tensões produzidas durante o processo de fundição. Este aumento na dureza devido ao aumento da pressão de moldagem pode ter provocado a ruptura dos bolos de areia. Isso pode ter ocorrido porque o molde rígido é mais suscetível a fraturas durante o vazamento e resfriamento do metal fundido. Por outro lado, a menor dureza de 80 pontos possibilitou um melhor ajuste das tensões e uma menor taxa de defeitos, levando a uma única peça refugada.

4.4 CÁLCULO DAS VARIÁVEIS DE RESPOSTA

Após a análise dos defeitos, com o uso da equação 7 foram calculadas as variáveis de resposta utilizadas para o cálculo da razão do sinal ruído. O gráfico apresentado abaixo na figura 22, mostra esta variável resposta, que foi a porcentagem de amostras refugadas para uma quantidade produzida igual a três amostras por experimento.

Figura 22 – Porcentagem de amostras refugadas em cada experimento.



4.5 CÁLCULO DA RAZÃO SINAL RUÍDO

Através dos resultados mostrados na seção 4.4, foi realizado o cálculo da razão sinal-ruído. Os resultados utilizados para o cálculo, considerados como ruídos de processo, foram as porcentagens de peças refugadas em cada experimento. Como o objetivo principal do estudo foi a redução dos defeitos de fundição ocorridos nos tambores de freio, para os quais o valor ideal é zero. A razão utilizada foi a do tipo quanto menor é melhor (equação 4), pois indica que quanto menor for a porcentagem de peças refugadas, melhor será a qualidade das peças.

Na tabela 10 mostrada a seguir constam os valores da razão S/N para cada um dos experimentos realizados.

Tabela 10 – Razões S/N calculadas.

Experimento	Razão S/N (menor é melhor)
1	∞ (ideal)
2	- 36,47
3	- 30,46
4	- 30,46

Fonte: O autor (2024).

Visualizando a tabela 10 foi possível verificar que no experimento 1 a razão S/N tendeu ao infinito, isso porque no critério "Menor é melhor", a melhor condição possível é quando não há defeitos. Nesse caso, a equação da razão S/N envolve um logaritmo de 0 (erro total zero), resultando em um valor infinito. Isso refletiu a qualidade ideal do processo sem defeitos, para os níveis e fatores selecionados. Já nos outros três experimentos realizados, a razão S/N calculada foi negativa, refletindo a alta taxa de defeitos. O que indicou um desempenho muito inferior ao ideal, com muita presença de defeitos, principalmente no experimento 2 em que se teve o maior valor negativo.

Utilizando os dados da razão S/N disponíveis na tabela 10, a média da razão de cada nível para os três fatores foi calculada e listada na tabela 11 a seguir.

Tabela 11 – Média S/N para os diferentes níveis de fatores.

Nível	Teor de umidade (%)	Resistência a compressão a verde (N/cm ²)	Dureza do molde (PDB)
1	∞	∞	∞
2	- 30,46	- 33,46	- 33,46
Classificação	2	1	1

Fonte: O autor (2024).

Os valores médios apresentados na tabela 11 são os efeitos separados de cada fator, ou seja, os efeitos principais. Foi possível evidenciar que os fatores que mais influenciaram na qualidade das peças fundidas foram a resistência a compressão a verde e a dureza do molde, pois obtiveram uma maior média negativa da razão S/N, seguido do teor de umidade que teve uma influência menor.

Também, tendo como base os dados acima, foi possível definir as condições ideais para o processo em questão que foram previstas no nível 1 do DOE, onde não se teve a ocorrência de defeitos nas três amostras produzidas e o valor de S/N tendeu ao infinito. Portanto os níveis ótimos foram, 3% para o teor de umidade, 18 N/cm² para a resistência a compressão a verde e 80 PDB para a dureza do molde.

4.6 EXPERIMENTO PARA COMPROVAÇÃO

Após definidos os níveis ótimos de cada parâmetro para operação, foi produzido um lote de 25 tambores de freio, realizando um processo idêntico ao do experimento número 1. Onde se utilizou o teor de umidade em 3%, a resistência a compressão a verde em 18 N/cm² e a dureza do molde em 80 PDB. Após a fundição, as peças ficaram resfriando a temperatura ambiente e, em seguida, passaram pelas etapas de desmoldagem, jateamento e rebarbação. Após esses procedimentos, as peças foram identificadas e ficaram armazenadas conforme ilustrado na Figura 23, aguardando a análise visual dos defeitos.

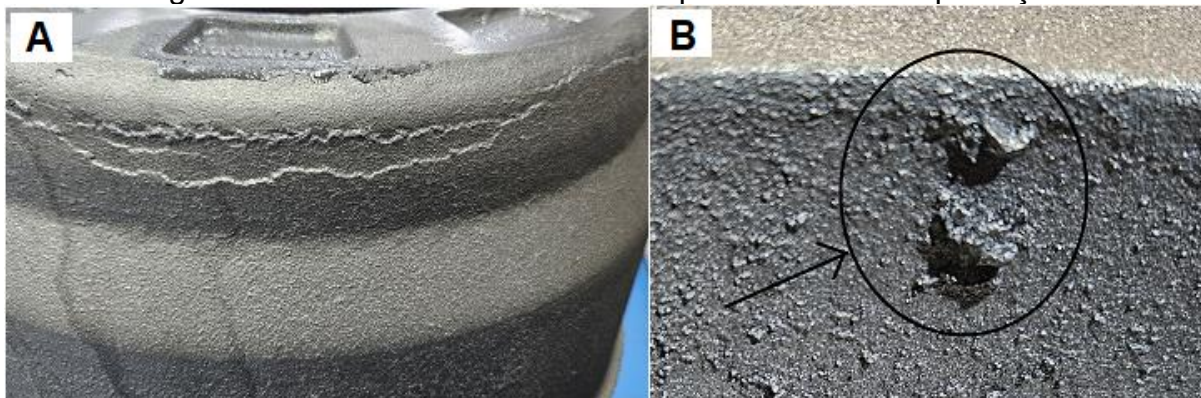
Figura 23 – Peças separadas para inspeção.



Fonte: O autor (2024).

Através da análise visual realizada nos 25 tambores de freio, foi evidenciada apenas uma peça com defeitos de bolo quebrado ou inclusões de areia, conforme apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Defeitos verificados no experimento de comprovação.



a) Defeitos encontrados na parte externa da peça; b) Defeitos encontrados na parte interna da peça.
Fonte: O autor (2024).

Ao analisar as imagens apresentadas na Figura 24, observou-se que, caso o tambor de freio apresentasse apenas o defeito de inclusão de areia na parte interna, conforme ilustrado no item B, a peça seria aprovada, visto que tal condição está dentro dos critérios de aceitação estabelecidos no procedimento descrito no Apêndice A. Nesse caso, a inclusão de areia seria removida durante o processo de usinagem. No entanto, como a peça também apresentou o defeito de bolo quebrado na parte externa, conforme indicado no item A, a mesma foi rejeitada, uma vez que tal defeito não pode ser removido no processo de usinagem, devido à sua extensão, que compromete uma área significativa da peça. Após realização das análises as demais peças foram consideradas boas e seguiram para o processo de usinagem.

4.6.1 Avaliação do experimento de comprovação

Neste experimento de comprovação realizado no mês de outubro de 2024, de todas as vinte e cinco peças produzidas, apenas uma peça foi refugada por decorrência de defeitos de inclusão de areia ou bolo quebrado. Como resultado, obteve-se um índice de refugo de 4%. Quando comparado com a média obtida do índice de refugo referente aos meses de dezembro de 2023 a setembro de 2024, mostrado na seção 4.1, que foi de 9,13%, ficou clara a redução deste índice e consequentemente melhoria das peças produzidas.

Mesmo com a produção de um número reduzido de amostras para comprovação dos níveis ótimos, que foram teor de umidade em 3%, a resistência a compressão a verde em 18 N/cm² e a dureza do molde em 80 PDB. O que foi limitado devido ao tempo necessário de produção, disponibilidade da linha de moldagem e dos equipamentos para realização dos ensaios de areia, o resultado final apresentou-se satisfatório em relação à qualidade das peças fabricadas.

5 CONCLUSÕES

Ao analisar os resultados expostos na seção 4 deste estudo, ficou evidente a relevância de regular os parâmetros no processo de fundição para garantir a qualidade das peças produzidas. No entanto, cada parâmetro tem um peso distinto no resultado final.

A implementação do procedimento para avaliação de defeitos de inclusão de areia em tambores de freio, apresentado no apêndice A, mostrou-se eficaz ao estabelecer critérios claros para aceitação de defeitos em áreas específicas, permitindo a liberação de peças antes refugadas por falta de critérios. A padronização dessas tolerâncias proporcionou uma análise alinhada com normas técnicas, garantindo a qualidade exigida pelo cliente.

Com a utilização do método de Taguchi para o cálculo da razão sinal ruído de cada parâmetro, pode-se perceber que os dois parâmetros que tiveram maior influência na formação de defeitos foram a resistência a compressão a verde e a dureza do molde. A partir desta verificação, também foi possível concluir que o nível 1 dos parâmetros controlados (teor de umidade em 3%, RCV em 18 N/cm² e a dureza do molde em 80 PDB), foi o que apresentou uma melhor razão sinal ruído com o seu valor tendendo ao infinito e, conseqüentemente, uma menor presença de defeitos.

Este estudo também revelou que os parâmetros monitorados, como o teor de umidade, resistência a compressão verde e a dureza do molde, exercem uma grande influência nos defeitos de moldagem examinados, como bolo quebrado e inclusão de areia.

Através do controle destes três parâmetros de processo utilizando os níveis ótimos de cada um, foi possível obter uma redução no índice de refugo que estava com uma média registrada de 9,13% referente aos últimos dez meses, e no experimento em questão reduziu para apenas 4%.

Embora o experimento tenha identificado os níveis ótimos de teor de umidade, RCV e dureza do molde de areia, a implementação desses parâmetros em escala industrial revelou-se inviável no momento. Isso ocorreu devido à limitação tecnológica do misturador utilizado na empresa, que é antigo e semiautomático, o que dificulta a realização das mudanças necessárias com a agilidade exigida. Como resultado, o tempo excessivo para ajustes prejudica o ritmo de produção, inviabilizando a aplicação dos níveis ótimos sem comprometer a eficiência produtiva.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados da pesquisa e objetivando sua continuidade, são sugeridas as seguintes ideias para trabalhos futuros:

1. Aplicação de uma matriz ortogonal de Taguchi mais extensa, avaliando mais parâmetros do processo que impactam nos defeitos de bolo quebrado e inclusão de areia, tais como compactabilidade, plasticidade e o teor de argila ativa. A execução de experimentos utilizando um maior número de amostragens também pode resultar em resultados mais exatos;
2. Análise da influência do tempo de mistura da areia de moldagem nas propriedades do molde e na qualidade dos tambores de freio fundidos;
3. Investigação do impacto do tamanho e do formato das caixas de moldagem no processo de fundição e na qualidade de tambores de freio fundidos;
4. Desenvolvimento de uma caixa de moldagem otimizada para a fundição de tambores de freio.

REFERÊNCIAS

ALVES, Luiz Henrique Dias. **Utilização Do Método De Taguchi Na Modelagem E Otimização De Vazios Relacionados à Solidificação Em Processo De Fundição De Aço ABNT 1030**. 2009. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, SP, 2009.

AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY. **Analysis of Casting Defects**. Des Plaines: American Foundrymen's Society, 1966.

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

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

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos** - 7. ed, São Paulo: ABM, 1996.

FERREIRA, J.M.G. de C. - **Tecnologia da Fundição**. 1ª edição, Lisboa: Editora Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

FIOD NETO, M. **Taguchi e a Melhoria da Qualidade: Uma Releitura Crítica**. Editora da UFSC. Florianópolis. 1997.

FONTANA, André. **Influência dos parâmetros do processo de fundição por gravidade na qualidade de bocais para tanques em alumínio SAE 305**. 2021.59 f. TCC (Graduação em Engenharia Mecânica). Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, 2021.

FUOCO, Ricardo, **Defeitos de fundição causam prejuízos certos às empresas do setor**, 2016, disponível em: <https://pt.linkedin.com/pulse/defeitos-de-fundi%C3%A7%C3%A3o-causam-preju%C3%ADzos-certos-%C3%A0s-empresas-fuoco#:~:text=Ricardo%20Fuoco>. acesso em: 17 maio 2024.

GALL, Thimoty L; BOYER Howard E. **Metal handbook: desk edition**. Ohio: American Society for Metals, 1985.

GIJO, E. V.; SCARIA, J. **Application of Taguchi method to optimise the characteristics of green sand in a foundry**. International Journal of Business Excellence, v. 4, n. 2, p. 191, 2011

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação**. Grupo GEN, 2014. E-book. ISBN 978-85-216-2640-4. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2640-4/>.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentos da Moderna Manufatura Versão SI - Vol. 1, 5ª edição**. Grupo GEN, 2017. E-book. ISBN 9788521634126. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521634126/>.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1. Edição, São Paulo: Blucher, 2009.

JAIL, P. L. **Principles of Foundry Technology**. 5th edition. Nova Delhi: Mc Graw Hill, 2009.

KALPAKJIAN, S. et al. **Manufacturing Engineering and Tecnology**. USA. Prentice Hall. 2000.

KIMINAMI, Claudio Shyinti. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of experiments**. 8th Edition. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc, 2012.

MORO, Norberto. **Processo de fabricação: fundição**. Disponível em: <https://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/fundicao.pdf>

NETO, Mário Sônego, **Defeitos de Fundição de Ferro Fundido**. Disponível em: https://slideplayer.com.br/slide/364136/%3E#google_vignette. acesso em: 19 maio. 2024.

PADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, (1989).

ROMANUS, Arnaldo. **Moldagem em areia a verde: manual de defeitos e soluções**. São Paulo: Global Market, 2005.

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

SENAI. DR. MG. **Areias de fundição aglomeradas com argila**. 2.ed. Belo Horizonte, DFP/DAT, 1987b. (Publicação Técnica Fundição, 1).

SENAI. DR. MG. **Caracterização de Defeitos em Peças de Ferro Fundido Cinzento e Nodular Fabricadas em Moldes de Areia Aglomerada com Argila**. Itaúna, CEFET, 2023.

SENAI. DR. MG. **Iniciação a fundição**. 2.ed. Belo Horizonte, DFP/DAT, 1987a. (Publicação Técnica Fundição, 2).

SIEGEL, Miguel. **Fundição**. 10.ed. São Paulo: ABM, 1978

SOARES, Gloria Almeida. **Fundição: Mercado, processos e metalurgia**. Rio de Janeiro: Ed. COPPEUFRJ, 2000.

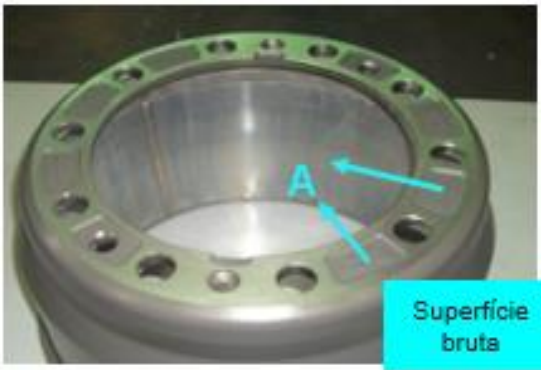



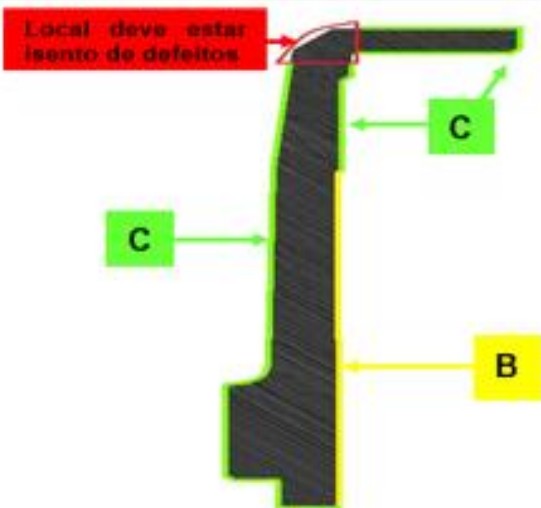
TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1986.

TAGUCHI, G.; ELSAYED, E. A.; HSIANG, T. C. **Engenharia da qualidade em sistemas de produção**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1990.

TECNOFUND. **Defeitos em peças fundidas causados por areia de moldagem e macharia e os ensaios laboratoriais para auxiliar nas soluções**. PUBLICAÇÃO TÉCNICA. Disponível em: <<http://www.tecnofund.com.br/port/wp-content/uploads/2020/05/TT-001PR02.pdf>>. Acesso em: 19 maio. 2024.

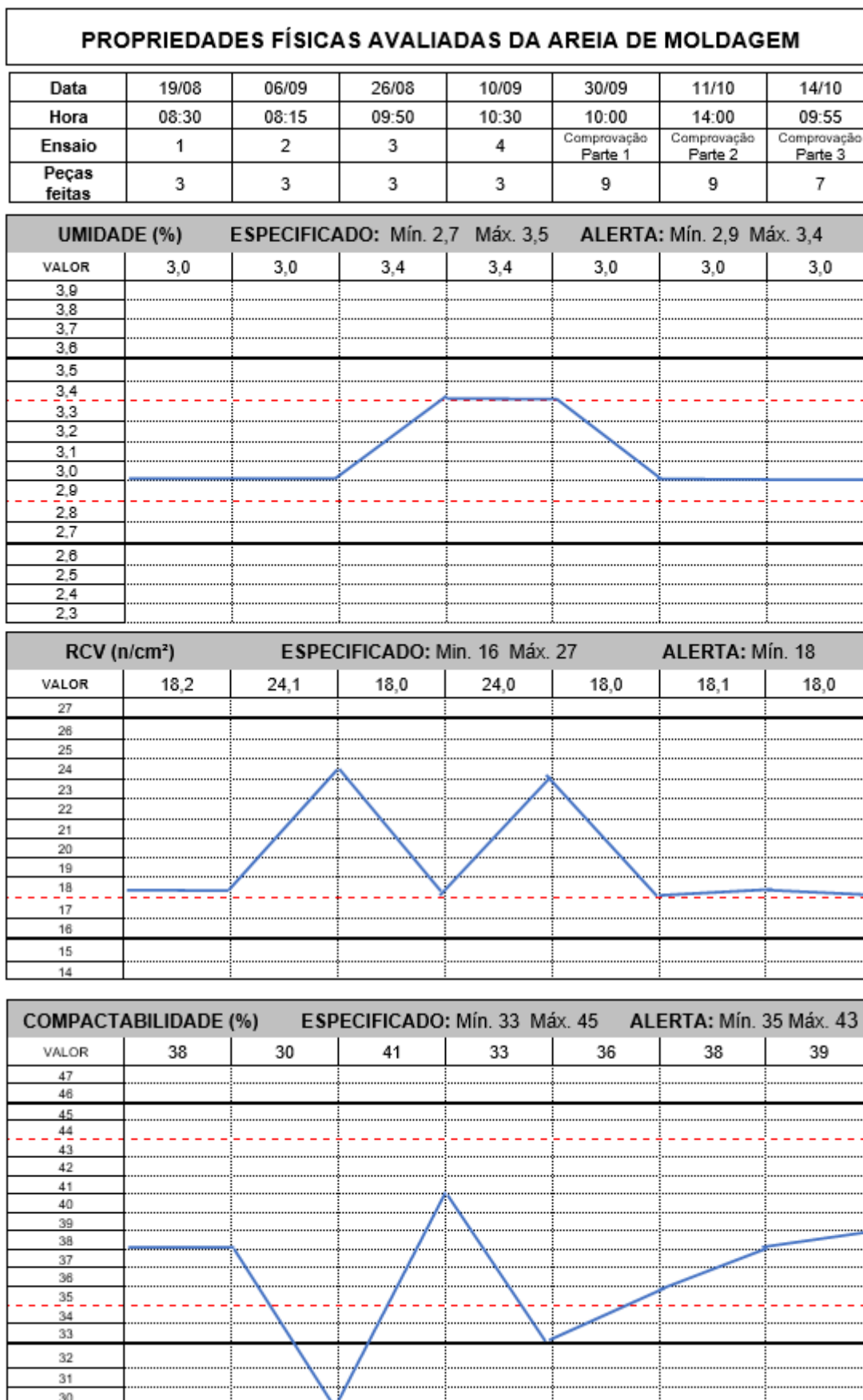
WU, Der Ho; CHANG, Mao Sheng. **Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process**. Materials Science & Engineering A, 2004.

APÊNDICE A

Defeitos Aceitáveis Tambores de Freio (TF366)																																										
Revisão válida: 01	Data: 26/08/2024	Elaborado: Álvaro Jr																																								
																																										
Defeito aceitável no bruto (JANELAS)	Defeito aceitável na pista de frenagem																																									
																																										
Defeito aceitável na superfície do Flange	Defeito aceitável parte externa																																									
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3">Superfície</th> </tr> <tr> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tamanho máximo (mm)</td> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> </tr> <tr> <td>Dimensões maiores</td> <td>5</td> <td>2</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>Profundidade</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <th colspan="4">Restrições</th> </tr> <tr> <td>Número máximo</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Espaçamento Mínimo</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>50</td> </tr> <tr> <td rowspan="3">Legenda</td> <td>A</td> <td colspan="2">Bruto</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td colspan="2">Pista de frenagem</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td colspan="2">Usinado</td> </tr> </tbody> </table> <p>Defeitos de fundição consideráveis são: inclusões de areia.</p>		Superfície			A	B	C	Tamanho máximo (mm)	A	B	C	Dimensões maiores	5	2	4	Profundidade	2	1	2	Restrições				Número máximo	3	2	3	Espaçamento Mínimo	50	50	50	Legenda	A	Bruto		B	Pista de frenagem		C	Usinado	
	Superfície																																									
	A	B	C																																							
Tamanho máximo (mm)	A	B	C																																							
Dimensões maiores	5	2	4																																							
Profundidade	2	1	2																																							
Restrições																																										
Número máximo	3	2	3																																							
Espaçamento Mínimo	50	50	50																																							
Legenda	A	Bruto																																								
	B	Pista de frenagem																																								
	C	Usinado																																								
Observações: Critérios de aceitação e zonas marcadas conforme desenho e normas do cliente.																																										

APÊNDICE B

(Continua)



(Conclusão)

TEOR DE ARGILA ATIVA – 7 a 9%							
VALOR	7,5	9,0	7,5	9,0	7,9	8,0	8,0
TEMPERATURA (°C)		ESPECIFICADO: Mín. 15 Máx. 50				ALERTA: Máx. 45	
Misturador	1	1	1	1	1	1	1
VALOR	27	30	29	35	38	36	33
60							
55							
50							
45							
40							
35							
30							
25							
20							
15							
10							

COMPOSIÇÃO			
	Bentonita Nacional	Carvão cardif (pó)	Bentonita Importada
Quantidade	4 kg	3 kg	4kg