

CARLOS BARBOSA RIBEIRO

PROJETO DE EXPERIMENTOS EM RODAS FERROVIÁRIAS
FUNDIDAS EM AÇO, COM O USO DA TÉCNICA DE TAGUCHI

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Branco Costa

Guaratinguetá
2008

R484p	Ribeiro, Carlos Barbosa Projeto de experimentos em rodas ferroviárias fundidas em aço, com o uso da técnica de Taguchi / Carlos Barbosa Ribeiro . – Guaratinguetá : [s.n.], 2008 98 f. : il. Bibliografia: f. 77-81 Inclui apêndice Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2008 Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva Co-orientador: Prof. Dr. Antonio Fernando Branco Costa 1. Fundação I. Título CDU 621.74
-------	--

UNESP  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

**"PROJETO DE EXPERIMENTOS EM RODAS FERROVIÁRIAS
FUNDIDAS EM AÇO COM O USO DA TÉCNICA DE TAGUCHI"**

CARLOS BARBOSA RIBEIRO

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MESSIAS BORGES SILVA
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JORGE MUNIZ
UNESP-FEG - UNITAU

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO ALVES MATTOS
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA - USP

Setembro de 2008

DADOS CURRICULARES

CARLOS BARBOSA RIBEIRO

NASCIMENTO	21.12.1959 – CACHOEIRA PAULISTA / SP
FILIAÇÃO	Domingos dos Reis Ribeiro Maria Aparecida Barbosa Ribeiro
1979/1983	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté
1998/2000	Curso de Especialização em Engenharia da Qualidade na Faculdade de Engenharia Química de Lorena
2005/2008	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

À minha esposa Márcia e aos meus filhos Matheus, Renan e Diego, que souberam conviver com minhas ausências e sempre me incentivaram, alimentando minha perseverança rumo ao meu objetivo.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Messias Borges Silva*, que sempre me motivou a prosseguir, orientando-me em todos os aspectos. Um grande amigo. Além de todo o seu incontestável conhecimento, repassou-me calma e motivação, cultivando em meu ser a objetividade necessária para realizar este trabalho.

Ao meu amigo e colega de trabalho, *Prof. Dr. Jorge Muniz*, grande incentivador para o início do mestrado em Guaratinguetá.

Ao meu co-orientador, *Prof. Dr. Antonio Fernando Branco Costa*, pelos elogios iniciais ao meu trabalho e pela confiança depositada para a minha primeira participação em congressos.

À empresa Amsted-Maxion Fundição e Equipamentos Ferroviários S.A., principalmente aos engenheiros José Antonio Correia Rodrigues, Celso Faria Pereira e Evandro Sampaio Ferreira, pela permissão concedida à realização deste trabalho, pela ajuda na realização operacional e levantamento de dados durante os experimentos na área fabril.

“Dê ao homem um peixe e você
o alimentará por um dia. Ensine o homem a
pescar e você o alimentará por toda a vida.”

Provérbio chinês

RIBEIRO, C. B. **Projeto de experimentos em rodas ferroviárias fundidas em aço, com o uso da técnica de Taguchi**. 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

RESUMO

Aplicou-se experimentos em rodas ferroviárias tipo D-38 (38 polegadas de diâmetro), fundidas em aço, obtidas pelo processo de pressão controlada. Estudou-se a influência de 15 fatores (variáveis de entrada), com o objetivo de minimizar ou eliminar a descontinuidade interna denominada “microrechupe”, a qual apresentou-se como variável de saída constante em todas as rodas experimentadas, na região do aro das rodas (região de contato com os trilhos da ferrovia). As descontinuidades internas foram detectadas por ensaio ultrassônico, através do método indireto de avaliação, com o auxílio do diagrama AVG, e uso de transdutor normal. Em função da quantidade e tamanhos diferenciados das descontinuidades internas detectadas em todas as rodas experimentadas, foi criado um método específico para mensurá-las, estabelecendo desta forma, respostas diferenciadas que possibilitaram a análise da influência dos fatores (variáveis de entrada). Para estudo e análise da influência das variáveis de entrada e suas respectivas interações, foi utilizado o método de Taguchi, com um Arranjo Ortogonal L-16. Os fatores (variáveis de entrada) operaram em dois níveis com uma razão sinal / ruído para a função “maior é melhor”, sendo utilizada a análise de variância ANOVA para testar a significância dos efeitos. Os resultados demonstraram que as variáveis “posição relativa da roda na corrida de vazamento” e “tempo de cura dos massalotes radiais” tiveram maior significância para a redução da descontinuidade microrechupe (output).

PALAVRAS-CHAVE: Taguchi, rodas ferroviárias, fundição sob pressão controlada

RIBEIRO, C. B. Design of experiments in steel casting railroad wheels using the Taguchi approach. 2008. 98 f. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

ABSTRACT

It was applied experiments in railroad wheels, casting in steel, D-38 type (38-inches- diameter), produced by controlled pressure process. It was studied influence of the 15 factors (entrance variables) with objective to minimize or to eliminate a internal discontinuity, called microshrinkage, which was presented as constant output in all tried wheels, inside the rim wheels (region of contact with railroad tracks). The internal discontinuities had been detected by ultrasonic test, through the indirect method of evaluation, with aiding of AVG diagram, with the use of normal transducer. In function of the amount and different sizes of the internal discontinuities detected in all the tried wheels, a new method was created to measure them, establishing different answers, in such a way that make possible the factors influence analysis. For study and analysis of the factors and its interactions, the Taguchi approach was used, with L-16 Ortogonal Array. The process factors had operated in two levels with a signal-to-noise ratio called “bigger is better” function and it was used variance analysis by ANOVA to determine the main significance of the effects. The results had demonstrated that, the factors “relative position of the wheel in the production line” and “cure time of radial risers” had greater significance for the reduction of the discontinuity microshrinkage (output).

KEYWORDS: Taguchi, railroad wheels, controlled pressure casting

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da malha ferroviária brasileira	17
Figura 2 – Modelo geral de um processo	25
Figura 3 – Distribuição da qualidade da cor em grupos de televisões da Sony U.S.A. e Sony Japão	31
Figura 4 – Modelo de curva de distribuição de Snedecor	35
Figura 5 – Roda ferroviária em corte com suas principais regiões	42
Figura 6 – Vista geral da roda ferroviária fundida em aço	42
Figura 7 – Aplicação da roda fundida em aço num truque ferroviário	43
Figura 8 – Aplicação da roda fundida em aço em vagão tipo gôndola	43
Figura 9 – Vazamento do aço do forno elétrico para a panela	44
Figura 10 – Molde tampa e molde fundo durante a operação de fechamento	45
Figura 11 – Desenho esquemático do processo de vazamento da roda ferroviária fundida em aço através do processo de pressão controlada	46
Figura 12 – Ensaio de partículas magnéticas	47
Figura 13 – Ensaio de ultra-som	47
Figura 14 – Principais defeitos de solidificação	47
Figura 15 – Diagrama da seqüência de ensaios	51
Figura 16 – Diagrama AVG para transdutor B2S-N da Krautkrämer	53
Figura 17 – Representação gráfica dos efeitos dos fatores sobre o NQ	60
Figura 18 – Representação gráfica dos efeitos dos fatores sobre a razão S/R	61
Figura 19 – Influência da posição relativa da roda no NQ	63
Figura 20 – Formação de cavidades de rechupe no massalote e na seção	65
Figura 21 – Influência do tempo de cura dos massalotes radiais no NQ	66
Figura 22 – Fases de um tipo de processo de shell mold pela técnica da caixa basculante	67
Figura 23 – Influência do número de corridas da luva no NQ	68
Figura 24 – Influência do número de corridas da panela no NQ	69
Figura 25 – Influência do número de corridas do tubo no NQ	70
Figura 26 – Influência da temperatura do molde tampa no NQ	71

Figura 27 – Influência da areia no NQ	71
Figura 28 – Influência do teor de alumínio no NQ	72
Figura 29 – Influência do pré-aquecimento da panela no NQ	73
Figura 30 – Gráfico linear para arranjo ortogonal de Taguchi L-16	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação da qualidade da cor entre Sony Japão e Sony U.S.A.	32
Tabela 2 – Exemplo de Análise da Variância ANOVA.....	33
Tabela 3 – Arranjo ortogonal L-4 de Taguchi.....	36
Tabela 4 – Variáveis de entrada e níveis de trabalho.....	50
Tabela 5 – Arranjo ortogonal de Taguchi tipo L-16	51
Tabela 6 – Equipamentos de medição mais importantes utilizados nos experimentos.....	52
Tabela 7 – Relação entre o número total de descontinuidades e o NQ	56
Tabela 8- Descontinuidades encontradas nas rodas dos experimentos e respectivos valores de NQ (Nível de Qualidade)	58
Tabela 9 – ANOVA dos efeitos dos fatores sobre o NQ.....	59
Tabela 10 – ANOVA dos efeitos dos fatores sobre a razão S/R.....	61
Tabela 11– Combinação ótima dos níveis de trabalho e as variáveis de entrada	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR	- Association of American Railroads
ANOVA	- Análise da variância
ARL	- Applied Research Laboratories
ASI	- American Supplier Institute
ASM	- American Society for Metals
AVG	- Abstand Verstärkung Grösse
CVRD	- Companhia Vale do Rio Doce
CJQCA	- Central Japan Quality Control Association
DOE	- Design of Experiments
ECL	- Electrical Communications Laboratories
FCA	- Ferrovia Centro Atlântica
GRACO	- Fabricante de medidores de camada de tinta
ITT	- ITT Automotive
JSA	- Japanese Standards Association
JUSE	- Japanese Union of Scientists and Engineers
M-107/208	- Norma da Association of American Railroads
RAYTEC	- Fabricante de medidores de temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

B2S-N	Tipo de transdutor ultrassônico	-
d_L	Densidade	Kg/m^3
D-38	Tipo de roda ferroviária (diâmetro de 38")	-
F	Teste F para comparação de variâncias	-
F	F (Snedecor)	-
gl	Graus de liberdade	-
k	Constante associada ao custo da função perda	-
L	Função perda	\$
L-16	Arranjo ortogonal com 16 experimentos	-
L-4	Arranjo ortogonal com 4 experimentos	-
m	Valor nominal da especificação da função perda	-
NQ	Nível de Qualidade	-
p	Percentual de contribuição dos fatores	%
P	Pressão	$mmHg$
P_{atm}	Pressão atmosférica	Atm
$P_{metalostática}$	Pressão metalostática	$mmHg$
S/R	Relação sinal ruído	dB
S/R_{meM}	Relação sinal ruído menor-é-melhor	dB
S/R_{Mem}	Relação sinal ruído maior-é-melhor	dB
S/R_{NeM1}	Relação sinal ruído nominal-é-melhor (variância)	dB
S/R_{NeM2}	Relação sinal ruído nominal-é-melhor (média e variância)	dB
S^2	Variância	-
SMQ	Média da soma dos quadrados	-
SQ	Soma dos quadrados	-
y	Qualquer variável em estudo	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA	20
1.2 IMPORTÂNCIA E INTERESSE DA PESQUISA	20
1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	23
2 REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1 HISTÓRICO	26
2.2 O MÉTODO DE TAGUCHI	27
2.2.1 Genichi Taguchi	27
2.2.2 A função perda de Taguchi	28
2.2.2.1 Função perda Menor-é-melhor	29
2.2.2.2 Função perda Maior-é-melhor	29
2.2.2.3 Função perda Nominal-é-melhor	30
2.2.3 Análise da variância	32
2.2.3.1 Distribuição F de Snedecor	34
2.2.4 Arranjos ortogonais de Taguchi	35
2.2.5 As estratégias de engenharia de qualidade de Taguchi	37
2.2.6 O projeto por parâmetros de Taguchi	38
2.2.6.1 Projeto robusto	38
2.2.6.2 Razão sinal-ruído	40
3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 A RODA FERROVIÁRIA	42
3.2 O AMBIENTE EXPERIMENTAL	43
3.3 PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	43
3.3.1 Preparação do aço	44
3.3.2 Preparação dos moldes	44
3.3.3 Vazamento do aço nos moldes	45
3.3.4 Etapas complementares de fabricação	46
3.4 DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA	47

3.5 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E DOS NÍVEIS DE TRABALHO	49
3.6 DEFINIÇÃO DO ARRANJO ORTOGONAL	50
3.7 ALEATORIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	51
3.8 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E ENSAIOS.....	52
3.8.1 Medição da variável resposta	53
3.8.2 Critério de aceitação	54
3.9 MÉTODO DE MENSURAÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA	54
3.9.1 Regra 1	55
3.9.2 Regra 2	55
3.9.3 Regra 3	55
3.9.4 Regra 4	55
3.9.5 Regra 5	56
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 CÁLCULOS E REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS	59
4.1.1 Efeito dos fatores sobre o NQ	59
4.1.2 Efeito dos fatores sobre a razão S/R	60
4.2 EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO	62
4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS	62
4.3.1 Primeiro grupo de variáveis mais significantes	63
4.3.2 Segundo grupo de variáveis mais significantes	67
4.3.3 Terceiro grupo de variáveis	75
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5 CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS	77
APÊNDICE A – Registros do experimento n° 1.....	82
APÊNDICE B – Registros do experimento n° 2.....	83
APÊNDICE C – Registros do experimento n° 3.....	84
APÊNDICE D – Registros do experimento n° 4.....	85
APÊNDICE E – Registros do experimento n° 5.....	86
APÊNDICE F – Registros do experimento n° 6.....	87

APÊNDICE G – Registros do experimento n° 7	88
APÊNDICE H – Registros do experimento n° 8	89
APÊNDICE I – Registros do experimento n° 9	90
APÊNDICE J – Registros do experimento n° 10	91
APÊNDICE L – Registros do experimento n° 11	92
APÊNDICE M – Registros do experimento n° 12	93
APÊNDICE N – Registros do experimento n° 13	94
APÊNDICE O – Registros do experimento n° 14	95
APÊNDICE P – Registros do experimento n° 15	96
APÊNDICE Q – Registros do experimento n° 16	97
APÊNDICE R – Registros do experimento de confirmação	98

1 INTRODUÇÃO

Após a privatização do setor ferroviário brasileiro, a partir de 1996, observa-se um crescimento constante na fabricação de vagões de carga, truques, eixos e rodas, além de todos os outros componentes e equipamentos agregados, necessários para atender as novas concessionárias atuantes na malha ferroviária brasileira, a qual é mostrada na Figura 1.

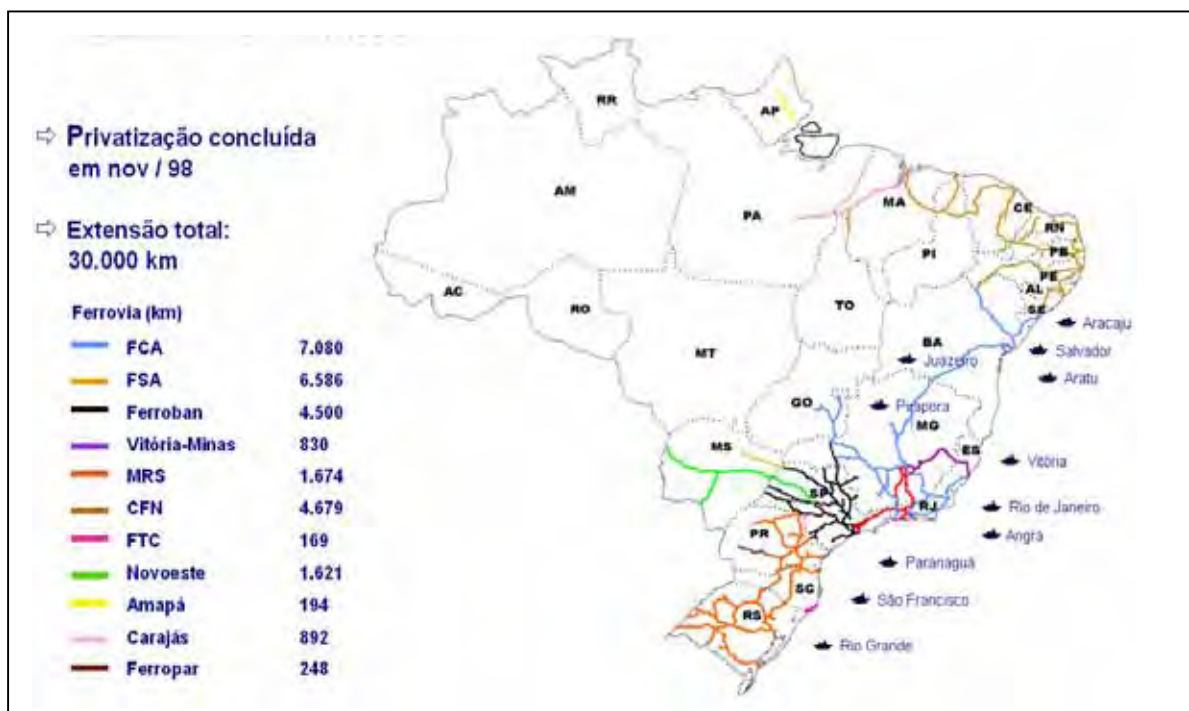


Figura 1 – Distribuição da malha ferroviária brasileira - Fonte: FCA (1999)

Alguns fatos importantes, que desde então vem contribuindo à impulsão da indústria de equipamentos ferroviários no Brasil, são:

- forte crescimento das exportações de minério de ferro, intensificando a aquisição de novos vagões (exemplo: Companhia Vale do Rio Doce - CVRD);
- crescimento nas exportações de componentes (rodas, truques ferroviários, fundidos, etc.). No caso de rodas os principais mercados são: América do Sul e Central, África e Ásia;

- maior utilização da malha ferroviária nacional pelas concessionárias considerando os novos modelos logísticos para melhorar o transporte, gerando a necessidade de manutenção constante, ocasionando troca ou reposição dos equipamentos;
- desoneração tributária e estímulo ao crédito e ao financiamento através do BNDES, para projetos em infra-estrutura nas áreas de operações logísticas (ferrovias, rodovias, aeroportos, portos e terminais), conforme proposto pelo Brasil (2007), através do governo federal brasileiro, com a elaboração do Programa de Aceleração do Crescimento 2007 – 2010 (PAC).

Com o crescimento da demanda, os novos clientes exigem cada vez mais, melhores condições de prazo, preço e qualidade das indústrias de equipamentos ferroviários do Brasil.

Além do desafio em atender as novas e imediatas demandas do mercado, muito tem sido desenvolvido na área ferroviária, o que obriga as indústrias a inovar para acompanhar as novas necessidades para a obtenção de um transporte adaptável à ferrovia.

Shevtsov, Markine e Esveld (2005) enfatizam que durante as últimas décadas, progressos substanciais têm sido realizados em projetos de veículos ferroviários e equipamentos rodantes. Trens basculantes, trens de alta velocidade e rodeiros com direção ativa e muitas outras soluções sofisticadas, tem sido praticadas nos últimos anos nas ferrovias.

Dentro deste contexto e com a absorção de conhecimentos adquiridos no meio acadêmico, propôs-se elaborar um trabalho focando a roda ferroviária fundida em aço como objeto de estudo.

No caso de rodas ferroviárias, o mercado brasileiro é abastecido por duas únicas empresas que possuem processos distintos de fabricação. Uma delas produz rodas através do processo de forjamento do aço, e a outra o faz pelo processo de fundição do aço com vazamento sob pressão controlada.

Apesar de toda tecnologia utilizada e aperfeiçoada ao longo dos anos no processo de fundição sob pressão controlada, aplicado na fabricação de rodas ferroviárias, verificou-se a oportunidade de aperfeiçoá-lo através deste trabalho, com a aplicação da Engenharia de Robusta proposta por Taguchi.

O método de experimento de Taguchi vem sendo amplamente utilizado nos mais diversos segmentos, visando a melhoria das características desejáveis (variável resposta) e na busca da diminuição dos custos de processos. Como referências, podemos citar trabalhos como os de Güley *et al.* (2006), Link *et al.* (1998), Tsauro *et al.* (2001), Wu *et al.* (2005), Silva *et al.* (2003); Tsoukalas *et al.* (2004), Vijian e Arunachalam (2007) e Anastasiou (2002).

Ross (1991) comenta que, desde a metade dos anos 60, muitos engenheiros japoneses têm participado do treinamento realizado por Taguchi. Em 1985, a Nippon Denso, filiada à Toyota, executou 2.500 experimentos relacionados a produtos elétricos para automóveis, por exemplo.

Para fazer a técnica mais fácil e acessível de ser aplicada, Taguchi padronizou o método de aplicação. Para planejar experimentos, ele criou uma quantidade de arranjos ortogonais especiais, cada um é usado para um número de situações experimentais. Para analisar os resultados dos experimentos com o propósito de determinar a solução do projeto que produz a melhor qualidade, ele introduziu um novo caminho para analisar os resultados. Seu uso da razão sinal-ruído para análise de resultados repetidos, ajuda facilmente aos experimentadores assegurarem que um projeto é imune (robusto) para a influência de fatores incontroláveis (ROY, 2001, p.10).

Neste trabalho, utilizou-se um arranjo ortogonal L16, com as variáveis do processo operando em dois níveis, com uma razão sinal / ruído para a função “Maior é Melhor”, e a análise de variância ANOVA para testar a significância dos efeitos.

À medida que as rodas eram inspecionadas, as discontinuidades foram sendo dimensionadas, possibilitando a elaboração de uma tabela onde se estabeleceram níveis diferenciados de variáveis de saída, que após cálculos, utilizando a razão Sinal / Ruído de Taguchi, pôde-se analisar as variáveis significantes e não significantes do processo.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho é analisar a utilização da Técnica de Taguchi, para investigar a influência de parâmetros do processo relativos a descontinuidades internas (microrechupes) presentes na produção da roda ferroviária fundida em aço.

O microrechupe é um tipo de descontinuidade interna que se forma durante o processo de fabricação de peças pelo processo de fundição, sendo geralmente tolerados em projetos, dependendo dos requisitos de utilização de cada produto. Quando a descontinuidade ultrapassa as especificações de projeto, ela passa a ser considerada como defeito e pode comprometer a vida útil do produto considerado. Neste trabalho, a definição técnica do microrechupe e demais condições técnicas são abordados no Capítulo 3.

Para complementar o objetivo geral acima, alguns objetivos específicos fazem-se presentes, a saber:

- Analisar a roda ferroviária tipo D-38.
- Identificar a melhor combinação dos níveis dos parâmetros experimentados do processo, reduzindo sua variabilidade, de forma a minimizar a ocorrência de microrechupes.
- Propor um método para mensurar a variável resposta microrechupe.

1.2 IMPORTÂNCIA E INTERESSE DA PESQUISA

Por tratar-se de produto que impacta diretamente na segurança dos veículos ferroviários, todas as fases de fabricação da roda ferroviária possuem parâmetros severamente controlados. Entretanto, no processo de fundição sob pressão controlada, devido a quantidade de variáveis existentes e de suas diversas combinações possíveis, algumas descontinuidades podem surgir durante o processo de fabricação, as quais são planejadas para serem detectadas pelo sistema por meio das inspeções existentes, proporcionando garantia de qualidade ao cliente. No entanto, possíveis reprovações geram perdas significantes, devido ao alto custo de valor agregado durante a

fabricação da roda fundida. Defeitos superficiais e subsuperficiais, conforme especifica a norma ferroviária da Association of American Railroads (AAR), só podem ser eliminados se não afetarem as tolerâncias dimensionais de perfil da roda, não sendo permitido recuperação ou retrabalho com solda. Desta forma, quando os defeitos surgem nestas condições, a roda é considerada como sucata e volta ao forno elétrico como matéria-prima para completar carga para nova corrida de aço.

Observou-se a oportunidade de minimizar a quantidade da descontinuidade denominada microrechupe, o que pode gerar um diferencial qualitativo positivo para a empresa no mercado, estendendo a aplicabilidade a todos os demais tipos de rodas ali fabricados.

Diversos trabalhos sobre rodas ferroviárias vêm sendo desenvolvidos, no sentido de estudar o aumento de sua vida útil e minimizar falhas nos equipamentos ferroviários rodantes em campo. Como referências, podemos citar trabalhos como os de Ekberg, Kabo e Andersson (2002), Bernasconi, Filippini, Foletti e Vaudo (2006), Gordon e Perlman (1998).

Para Berge¹ e Stone e Geoffrey² (2000 *apud* LIU *et al.*, 2006, p.9), a grande tensão, talvez devido ao impacto entre roda e trilho, ou descontinuidade no material, têm um importante efeito na falha de aros fraturados.

Em seu artigo sobre análise de propagação de trincas em rodas ferroviárias, Liu *et al.* (2007) mencionam que a comparação quantitativa do prognóstico de vida útil entre a simulação numérica e as observações em campo deve incluir a variabilidade de espectro de carregamento, propriedades do material e detalhes estruturais.

Estudos futuros, por meio de testes destrutivos e não destrutivos, além de testes de rodagem em composições ferroviárias, poderão avaliar um possível aumento de resistência mecânica nas rodas com quantidades minimizadas de microrechupe em suas estruturas. Por ser um item de segurança, acredita-se que toda a melhoria em prol de sua resistência poderá trazer resultados financeiros e sociais positivos, todavia estes

¹ BERGE, S. **Shattered rim fracture research**. LaQuinta, Califórnia, 2000. ² SERGE, D.H.; GEOFFREY, E.D. **The effect of discontinuity size on the initiation of shattered rim defects**. ASME Spring, 2000 *apud* LIU, Y. *et al.* **Multiaxial fatigue reliability analysis of railroad wheels**. Nashville, Elsevier Ltd., 2006.

estudos não estão mensurados neste trabalho.

Demonstrou-se ser possível melhorar substancialmente a qualidade dos produtos sem o incremento de investimentos na compra de novos equipamentos, utilizando-se somente do melhor arranjo das variáveis controláveis já existentes.

Por meio da pesquisa bibliográfica realizada em diversos bancos de dados acadêmicos, pôde-se observar a inexistência de pesquisas relacionadas a experimentos visando diminuir discontinuidades internas em rodas ferroviárias, o que realça a condição de sua importância e da continuidade de seu estudo em trabalhos futuros.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

Silva e Menezes (2001) classificam as pesquisas do ponto de vista de sua natureza, pela forma de abordagem do problema, pelos seus objetivos e pelos procedimentos técnicos utilizados nas mesmas.

Do ponto de vista da sua natureza, que pode ser básica ou aplicada, a pesquisa é aplicada por estar dirigida à solução de um problema prático específico, além de envolver verdades e interesses locais.

Com relação à forma de abordagem do problema, que pode ser quantitativa ou qualitativa, esta pesquisa enquadra-se melhor como quantitativa, tendo em vista a utilização de recursos e técnicas estatísticas, e ainda, conforme proposto por Berto e Nakano (2000), baseia-se em métodos lógico-dedutivos que busca explicar relações de causa e efeito, possibilitando replicações, através da generalização de resultados.

Conforme Gil (1991), quanto aos seus objetivos a pesquisa pode ser exploratória, descritiva ou explicativa. De acordo com as definições aqui existentes, trata-se de pesquisa explicativa por envolver uso de método experimental, identificando fatores que participam na ocorrência de um determinado fenômeno.

Ainda conforme Gil (1991), do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa pode classificar-se em bibliográfica, documental, experimental, de

levantamento, estudo de caso, expost-facto, pesquisa-ação ou pesquisa participante. O presente trabalho enquadra-se dentro da pesquisa experimental, devido ao fato de haver ocorrido a seleção de diversas variáveis, para avaliar os efeitos de suas influências no objeto estudado.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para efeito de uma visão geral, esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, os quais estão estruturados da seguinte forma:

- No capítulo um é feita uma introdução, onde é formulado o problema de pesquisa dentro do cenário vigente, além de estabelecer o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho. Informa-se sobre a metodologia de pesquisa adotada e mostra-se o que já foi escrito a respeito do tema, assinalando a relevância e o interesse do trabalho;
- O capítulo dois faz menção à revisão bibliográfica sobre projeto de experimentos e articula as principais informações sobre o método de Taguchi, através de seu projeto de parâmetros, que é a técnica de experimento adotada nesta dissertação;
- O terceiro capítulo descreve sobre o ambiente experimental; apresentando resumidamente a seqüência operacional de produção da roda ferroviária, através do processo de fundição sob pressão controlada; estabelecem-se as variáveis de entrada e seus respectivos níveis de trabalho (baixo e alto) e como são mensuradas, bem como a variável resposta (microrechupe); define-se o arranjo ortogonal de Taguchi a ser utilizado e a aleatorização natural dos experimentos para início das corridas experimentais na linha de produção, com coletas de dados obtidas através de observação individual, que conforme Silva e Menezes (2001) são realizadas pelo próprio pesquisador;
- O quarto capítulo apresenta os resultados das médias das respostas obtidas, e da razão sinal-ruído “maior é melhor”, as quais são transportadas aos seus

respectivos gráficos dos efeitos dos fatores. Com a elaboração da análise de variância (ANOVA), têm-se os níveis ótimos de cada variável para o estabelecimento da experiência de confirmação, etapa final da Técnica de Taguchi;

- Finalmente, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões sobre os resultados dos dezessete experimentos realizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Designa-se por projeto de experimentos, o ramo do conhecimento que procura dar um tratamento científico ao assunto. A ferramenta imprescindível no estudo conceitual do projeto de experimento é a estatística, que fornece o suporte necessário ao desenvolvimento do mesmo.

Segundo Montgomery (2004), um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta de saída. O processo pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transforma um material de entrada em um produto de saída. O experimento planejado é uma abordagem poderosa para a melhoria de um processo. Para usar esta abordagem, é necessário que todos os envolvidos no experimento tenham uma idéia prévia clara do objetivo do experimento, de exatamente quais os fatores devem ser estudados, de como o experimento deve ser conduzido e, pelo menos, uma compreensão qualitativa de como os dados serão analisados. Para isto, é recomendado: reconhecer e relatar claramente o problema, escolher os fatores e seus respectivos níveis, escolher o planejamento experimental adequado, realizar o experimento, analisar os dados, concluir e recomendar ações (seqüências de acompanhamento e testes de confirmação devem ser também realizados para validar as conclusões do experimento).

Um determinado processo de fabricação possibilita identificar fatores de controle, que devidamente combinados em diversos experimentos, podem estabelecer

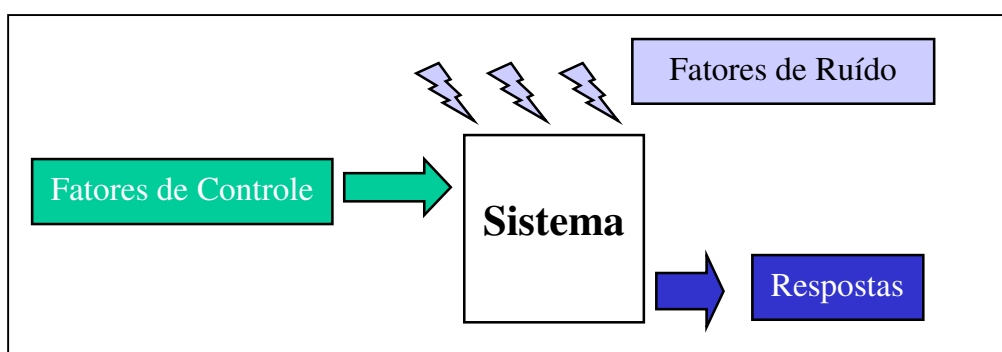


Figura 2 – Modelo geral de um processo.

níveis diferenciados na resposta conforme mostrado na Figura 2.

Segundo Neto (1995), o sistema pode ser considerado como uma função (a princípio desconhecida), ligando fatores (variáveis de entrada) às respostas (variáveis de saída), e que o objetivo do experimento é de estabelecer esta função, ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para a mesma.

Taguchi, Chowdhury e Wu (2005) relatam que o conteúdo do tradicional projeto de experimento, consiste primariamente de caminhos para expressar a variação individual e caminhos para separar tais variações. Estas incluem blocos para separar diferença condicional, randomização de ordem experimental, repetição de experimentos, distribuição e teste de significância, entre outros. DOE significa encontrar a relação entre vários fatores (variáveis) e respostas para elas. Portanto, é importante expressar seus relacionamentos precisa e eficientemente por uma equação. Se as interações entre as variáveis (fatores) são significantes, é importante incluir os termos de interação na equação.

2.1 HISTÓRICO

De acordo com Roy (2001) e Taguchi, Chowdhury e Wu (2005), a ciência do projeto de experimento estatístico tem suas origens com os trabalhos de Ronald A. Fisher, na Inglaterra, o qual é considerado como fundador do princípio básico do projeto de experimentos. O projeto de experimentos (DOE – design of experiments) é uma técnica estatística, introduzida no início dos anos da década de 1920. A primeira meta de Fisher foi determinar a ótima condição de água, luz do sol, fertilizante e solo, necessários para produzir a melhor colheita agrícola. Usando a técnica DOE, Fisher pôde planejar todas as combinações (também chamada de tratamentos ou condições de teste) dos fatores incluídos no estudo experimental. As condições foram criadas usando uma matriz, que permitiu a cada fator um número igual de condições de testes. Métodos para analisar os resultados de tais experimentos também foram introduzidos. Quando o número de combinações possíveis ficou muito grande, planos foram inventados para realizar uma fração do total de possibilidades, de tal forma que todos os fatores estariam igualmente presentes. Fisher inventou o primeiro método, que fez

ser possível analisar o efeito de mais de um fator no tempo. Depois que Fisher introduziu a técnica e demonstrou seu uso em experimentos na agricultura, no entanto, muito mais pesquisa e desenvolvimento vêm ocorrendo.

2.2 O MÉTODO DE TAGUCHI

Quando o Japão começou sua reconstrução após a Segunda Grande Mundial, enfrentou uma grande dificuldade em elaborar produtos de boa qualidade. Ajudado pelos americanos, o Japão iniciou um movimento pela qualidade, onde a ordem era incluir os conceitos de qualidade nos projetos, processos e na produção de seus produtos e serviços.

Segundo Ishikawa¹(1985 *apud* OSBORNE e ARMACOST, 1996, p.107), a qualidade deve ser obrigatoriamente construída dentro de cada projeto e de cada processo.

Iniciou-se então o aparecimento de vários líderes japoneses na área da qualidade, os quais passariam a ter grande importância na recuperação e reconstrução da indústria japonesa. Dentre eles, destacou-se a figura de Genichi Taguchi.

2.2.1 Genichi Taguchi

De acordo com Taguchi, Chowdhury e Wu (2005), o Dr. Genichi Taguchi foi Diretor Executivo do American Supplier Institute (ASI). Por mais de três décadas passadas, ele tem promovido continuamente seu envolvimento na filosofia da engenharia da qualidade (chamada por Método de Taguchi nos Estados Unidos), através da Japanese Society for Quality Control, Japanese Standards Association (JSA), Japanese Union of Scientists and Engineers (JUSE) e a Central Japan Quality Control Association (CJQCA). Em 1982, o American Supplier Institute foi o primeiro Órgão que introduziu o Dr. Taguchi e seu método nos Estados Unidos. Desde então

¹ ISHIKAWA, K. **What is total quality control ?** Englewood Cliffs, 1985 *apud* OSBORNE, D.M.; ARMACOST, R.L. **Review of techniques for optimizing multiple quality characteristics in product development.** Orlando, Elsevier Science Ltd., 1996.

seu método, que inclui técnicas para engenharia, negócios e gerenciamento, tem salvado companhias americanas de milhões de dólares, em desenvolvimento de produto e custos de garantia. O Dr. Taguchi foi premiado pelo cobiçado Prêmio Deming por três ocasiões distintas, por sua contribuição na área da engenharia da qualidade.

Roy (2001) complementa que, após a Segunda Guerra Mundial, o sistema telefônico japonês estava gravemente danificado e sem função, e diante deste quadro, Taguchi foi apontado como líder para a recém formada Electrical Communications Laboratories (ECL), da Nippon Telephone and Telegraph Company. Muito de sua pesquisa na ECL envolveu o desenvolvimento de uma compreensiva metodologia de melhoria de qualidade, que incluía o uso da técnica do DOE. Praticados e aperfeiçoados na Nippon Telephone and Telegraph Company, os conceitos de Taguchi foram adotados por muitas companhias, incluindo a Toyota, a Nippon Denso, a Fuji Film e outras empresas japonesas.

2.2.2 A função perda de Taguchi

Segundo Ross (1991), quando uma característica de qualidade de um produto, percebida pelo consumidor, não é atendida, ele sente que sofreu uma perda. Este tipo de percepção de perda do consumidor pode decidir sobre sua próxima compra. Possuidor do poder aquisitivo para a compra, o consumidor pode decidir sobre quais produtos irá adquirir. Sendo assim, a qualidade, além do preço e o prazo, são fatores preponderantes à esta decisão. A perda também é notada no fabricante, que poderá ser penalizado com custos de garantia e perda de imagem no mercado, por exemplo. Enfim, todos podem sair perdendo.

De acordo com Ross (1991), a função perda de Taguchi reconhece o desejo do consumidor em adquirir produtos que sejam mais duradouros, em todos os aspectos, e o desejo do fabricante em fabricar produtos com custo menor. A perda para a sociedade é formada pelos custos incorridos no processo de produção, assim como os custos sofridos pelos consumidores no decorrer da vida útil do produto (reparos, perda

de negócios, etc.). Minimizar a perda para a sociedade é a estratégia que irá incentivar produtos uniformes e reduzirá custos na hora da produção e do consumo.

Taguchi estabeleceu uma equação matemática para quantificar os custos envolvidos num processo devido à variabilidade existente, denominada função perda, que pode ser aplicada em três situações, em função do desejo do consumidor:

- Situação onde o valor nominal é o melhor valor;
- Situação onde o menor-é-melhor;
- Situação onde o maior-é-melhor.

Ross (1991), a seguir, explana as três situações acima, conforme os sub-itens 2.2.2.1, 2.2.2.2 e 2.2.2.3.

2.2.2.1 Função Perda Menor-é-Melhor

Um bom exemplo da característica menor-é-melhor é o tempo de espera num restaurante de serviço rápido para que seu pedido seja atendido. Se o garçom diz que você terá que aguardar alguns instantes para que seu hambúrguer fique pronto, você percebe uma certa perda. A constante de custo k pode ser calculada de modo similar à situação nominal-é-melhor, como mostrado no item 2.2.2.3 adiante. Existe determinada perda associada a um valor específico de y . A perda pode ser então, calculada para qualquer valor de y baseando-se no valor de k . Esta função-perda é idêntica à situação nominal-é-melhor, com valor nominal da especificação $m=0$, que é o melhor valor para característica menor-é-melhor. A função perda menor-é-melhor é representada pela equação (1):

$$L = k[S^2 + (\bar{y})^2] \quad (1)$$

onde S^2 é a variância relativa à média de y e k é a constante associada ao custo.

2.2.2.2 Função Perda Maior-é-Melhor

A constante de custo pode ser calculada tomando como base determinada perda associada a um valor específico de y . Subseqüentemente, qualquer valor de y possuirá perda estimada. A perda média por peça pode ser determinada encontrando o valor médio de $(1/y)^2$, que é matematicamente equivalente à equação (2):

$$L = k \left(\frac{1}{\bar{y}^2} \right) \left[1 + \left(\frac{3S^2}{\bar{y}^2} \right) \right] \quad (2)$$

2.2.2.3 Função Perda Nominal-é-Melhor

A função perda para situação nominal-é-melhor, é matematicamente equivalente a equação (3):

$$L = K[S^2 + (\bar{y} - m)^2] \quad (3)$$

Pode-se observar que a equação (3) é constituída por dois elementos: variância e posição relativa da média da característica de desempenho de uma série de produtos. Portanto, para minimizar a perda para a sociedade, a característica do produto deve estar centralizada no valor nominal e a variância daquela característica precisa ser reduzida.

Ainda conforme Ross (1991), a função perda exige dois aspectos do gerenciamento da qualidade dentro de uma fábrica. O primeiro, a variância, é o trabalho concernente a engenheiros de produto e de processo, e deve ser implantado antes do início da produção e aperfeiçoado no decorrer do tempo (perda menor). O segundo, a centragem da distribuição, é responsabilidade do pessoal da produção (industrial) nas atividades do dia-a-dia. Este é o controle da qualidade fora da linha (projetistas) e controle da qualidade na linha (fabricante). A função perda não objetiva ser acurada, mas pretende mostrar como a variação menor pode resultar em perdas reduzidas.

Pode-se complementar a relação entre a variância de um processo e as possíveis perdas, através de Park e Vining (2000), onde se comenta sobre um exemplo clássico, ocorrido e divulgado pelos jornais em 1979. Naquele ano circulou uma matéria, a qual

discursava sobre uma comparação sobre a qualidade entre os televisores Sony, produzidos em duas de suas fábricas distintas, uma do Japão e a outra localizada em San Diego, Califórnia, Estados Unidos. Embora o produto Sony pertencesse ao mesmo projeto, os televisores de San Diego tinham uma má reputação, pois apresentavam uma diferença na densidade das cores, que foi percebida pelos consumidores americanos, os quais preferiam o produto vindo do Japão.

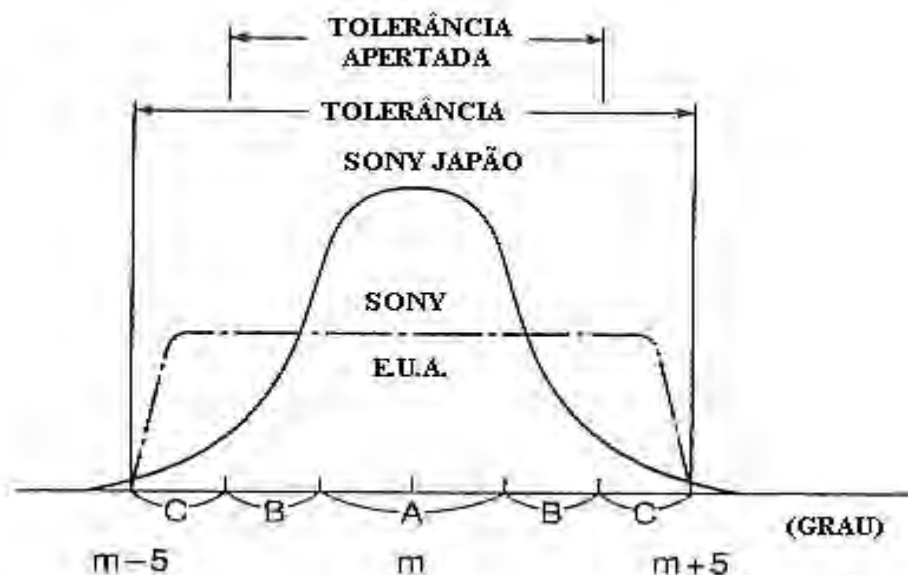


Figura 3 - Distribuição da qualidade da cor em grupos de televisão da Sony U.S.A. e Sony Japão
Fonte: Park e Vining (2000)

O fato obrigou uma resposta do vice-presidente da Sony americana escrever um artigo sobre a diferença observada. Todavia, os estudos demonstraram que a variabilidade dos televisores japoneses era menor que a dos americanos. O gráfico da Figura 3 mostra a diferença entre as distribuições dos processos envolvidos. A Sony americana utiliza a tolerância de produto ($m-5$; $m+5$) e a empresa japonesa adota o desvio padrão (A,B,C). Enquanto a qualidade da cor da TV japonesa é representada por uma curva normal (com desvio padrão igual a $1/6$ da tolerância), a TV americana tem uma distribuição uniforme, com produtos dentro da tolerância, porém com desvio padrão dado por $1/\sqrt{12}$, o que mostra que a capacidade de processo da empresa americana é pior que a japonesa. Park e Vining (2000) finalizam este caso através da Tabela 1, onde são comparados os valores adotados e os resultados obtidos entre as

duas plantas fabris da Sony. Pode-se concluir que, embora a fração de defeitos da fábrica japonesa seja maior (0,27%), sua perda corresponde a um terço da fábrica americana. Em outras palavras, o nível de qualidade japonês é três vezes maior que o americano.

Tabela 1 – Comparação da qualidade da cor entre a Sony Japão e Sony U.S.A.
Fonte: Park e Vining (2000)

País	Média	Desvio Padrão	Variância	Perda L (yen)	Fração de defeitos (%)
Japão	m	10/6	$(10/6)^2$	66.7	0.27
U.S.A.	m	$10/\sqrt{12}$	100/12	200.0	0.00

2.2.3 Análise da variância

Para efeito desta dissertação, os resultados dos experimentos são analisados conforme a ferramenta estatística para a análise da variância denominada ANOVA, a qual tem ampla utilização prática, tanto nos experimentos nas indústrias quanto em trabalhos acadêmicos em geral. Através da ANOVA, é possível analisar a variância das respostas médias, da razão sinal/ruído e do grau de significância (Teste F), os quais são ferramentas estatísticas importantes para interpretar os dados experimentais.

Para análise dos dados, uma tabela para análise da variância (ANOVA) pode ser gerada para determinar a significância estatística dos parâmetros (SYRCOS, 2002, p.69).

ANOVA é uma tabela de informações que expõe influências relativas do fator e interações destinadas para a coluna de um arranjo ortogonal (JI *et al.*, 2000, p.76).

Roy (2001) descreve que a ANOVA suporta cálculos, testes e observações da seguinte natureza:

- influência relativa do fator e interação para a variação dos resultados;
- teste de significância do fator e interações denominadas nas colunas;
- intervalo de confiança para um desempenho ótimo;

- intervalo de confiança dos efeitos principais dos fatores;
- erro do fator/termo, o qual inclui a influência de todos os fatores não incluídos nos experimentos e efeitos do erro experimental.

Estruturalmente, a ANOVA trata-se de uma tabela constituída de colunas de resultados calculados com base nas informações geradas pelos experimentos. Conforme exemplo da Tabela 2, estas colunas, ao menos, devem informar:

- a discriminação dos fatores (variáveis de entrada) envolvidos nos experimentos;
- a soma dos quadrados;
- o número de graus de liberdades;
- o número total de graus de liberdade;
- a soma média quadrática;
- o valor do fator F (Snedecor);
- o percentual de contribuição dos fatores.

Tabela 2 – Exemplo de Análise da Variância (ANOVA)

* Fator H foi usado para estimar o residual. ** Contribuição (C%) é definida como $100 \times (\text{média da soma dos quadrados} / \text{total da média da soma dos quadrados})$

Fonte: Silva et al. (2003)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Soma média quadrática	F	p	C % **
Fator A	19.66	1	19.66	66.9	0.077	15.91
Fator B	44.26	1	44.26	150.6	0.051	35.81
Fator C	8.29	1	8.29	28.2	0.118	6.71
Fator D	3.65	1	3.65	12.4	0.176	2.95
Fator E	1.70	1	1.70	5.8	0.251	1.37
Fator F	14.75	1	14.75	50.2	0.089	11.93
Fator G	1.67	1	1.67	5.7	0.253	1.35
Fator I	0.89	1	0.89	3.0	0.331	0.72
Fator J	0.86	1	0.86	2.9	0.336	0.70
Fator K	27.55	1	27.55	93.7	0.065	22.29
*Residual	0.29	1	0.29			0.24
Total	123.59	11	123.59			100.0

No exemplo apresentado da Tabela 2, é possível observar que os fatores B e K são os mais significantes para o experimento citado pela fonte Silva *et al.* (2003).

Os cálculos são derivados de fórmulas matemáticas simples, e as informações sobre a utilização correta das mesmas podem ser encontradas em referências tradicionais sobre o assunto (ROY, 2001; ROSS, 1991; TAGUCHI, CHOWDHURY e WU, 2005).

Enfim, Rosa² (1999 *apud* SILVA; RIBEIRO; SILVA, 2000, p.630) consideram a ANOVA como uma ferramenta de decisão estatisticamente formulada para detectar quaisquer diferenças no desempenho médio experimentado, levando-se em conta uma variação.

Atualmente, diversos softwares estão disponíveis no mercado para a realização rápida dos cálculos matemáticos envolvidos na ANOVA.

2.2.3.1 Distribuição F de Snedecor

Na elaboração da ANOVA, a distribuição F de Snedecor, também chamada de Teste F, é uma das ferramentas estatísticas utilizadas para a comparação das variâncias, que auxilia no levantamento da significância ou não dos fatores envolvidos no experimento. A distribuição de Snedecor (Figura 4), que não é simétrica, estabelece tabelas com valores de F para cada combinação de nível de confiança, graus de liberdade associados à variância da amostra.

Silva, Ribeiro e Silva (2000) enfatizam que o nível de significância (teste F), normalmente executado dentro de uma tabela de análise de variância, é uma ferramenta estatística que proporciona uma decisão com certo nível de confiança.

Para Box, Hunter e Hunter (1978), a distribuição F pode ser usada para checar hipóteses a respeito da relação das variâncias da população de duas populações normais.

² ROSA, J.L. **Aplicação do método de Taguchi no estudo das principais variáveis do processo de eletrodeposição de cobre sobre titânio.** Lorena, 1999 *apud* SILVA, G.; RIBEIRO, R.B.; SILVA, M.B. **Otimização da moagem de hidreto de níobio utilizando o método de planejamento de experimentos de Taguchi.** Congresso em Ciencia de Materiais – SULMAT, 2000.

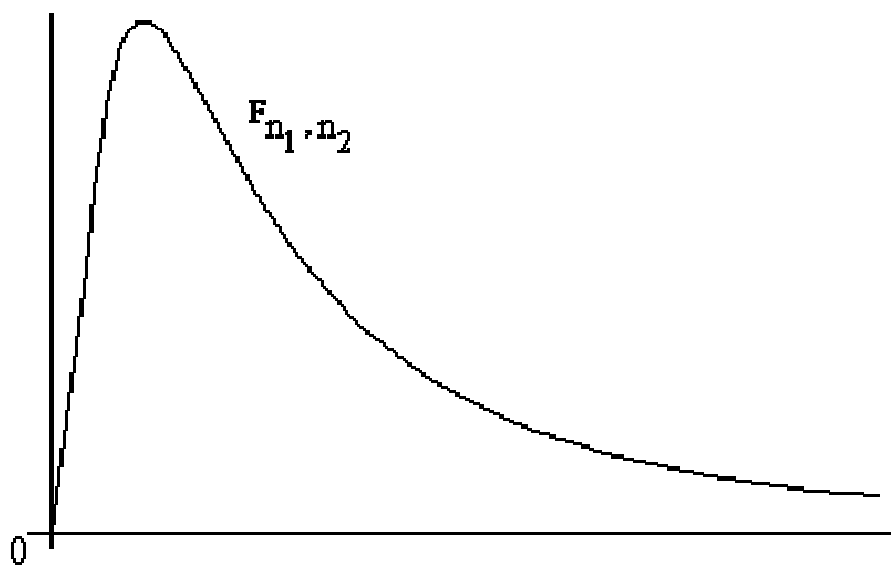


Figura 4 – Modelo de curva da distribuição de Snedecor

Hsiang e Kuo (2003) afirmam que os valores do teste F são aplicados na ANOVA para analisar cada fator. Se a razão do fator experimental é muito maior que o valor padrão do teste F, então este fator tem um importante efeito no experimento.

2.2.4 Arranjos ortogonais de Taguchi

Como histórico, Ross (1991) recorda que os arranjos ortogonais se constituem numa invenção matemática, cujo registro mais antigo vem de 1897, por Jacques Hadamard, matemático francês. A utilidade destes arranjos ainda não havia sido explorada, até que na Segunda Guerra Mundial, Plackett e Burman, estatísticos ingleses, empregaram o conceito de projeto saturado. As matrizes de Hadamard são matematicamente idênticas às matrizes de Taguchi; colunas e linhas são rearrumadas.

Os arranjos ortogonais foram introduzidos por Taguchi em seu método, objetivando reduzir as combinações de experimentos saturados. Os experimentos saturados são regidos pela potência 2^f , onde f corresponde ao número de fatores do experimento.

De acordo com Vijian e Arunachalam (2006) com a seleção de um arranjo ortogonal L9, usando quatro parâmetros e três níveis para cada, o número de

experimentos requeridos pode ser drasticamente reduzido para nove, os quais num método de combinação clássica usando uma experimentação fatorial completa exigiriam 81 experimentos para capturar a influência dos parâmetros.

A Tabela 3 mostra um arranjo ortogonal de Taguchi L-4 (2^3), o qual define quatro experimentos (1, 2, 3 e 4), com três fatores (A, B e C) trabalhando em dois níveis (1 e 2).

Tabela 3 – Arranjo ortogonal L-4 de Taguchi

Teste	Fator		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Interpretando o arranjo ortogonal da Tabela 3 considera-se, por exemplo, que o teste 3 (experimento 3) deve ser realizado com o fator A no nível 2, fator B no nível 1 e o fator C no nível 2.

Vijian e Arunachalam (2006) complementam que o arranjo ortogonal é somente a menor matriz possível de combinações, na qual todos os parâmetros são varridos ao mesmo tempo e seus efeitos e desempenho das interações são estudados simultaneamente.

Olds e Walberg (1993) utilizam o método de Taguchi em pesquisas aeroespaciais, definindo que os arranjos de Taguchi também são ortogonais, significando que as corridas experimentais são balanceadas com respeito aos níveis dos fatores. Arranjos ortogonais eliminam quaisquer prejuízos para um dado conjunto de parâmetros.

Os arranjos ortogonais de Taguchi podem ser facilmente encontrados nos apêndices de referências tradicionais sobre o assunto (ROY, 2001; ROSS, 1991; TAGUCHI, CHOWDHURY e WU, 2005, entre outros).

2.2.5 As estratégias de engenharia de qualidade de Taguchi

Conforme Ross (1991), os conceitos experimentais anteriores consideravam todos os fatores como sendo causas de variação. Se estas causas pudessem ser controladas ou eliminadas, consequentemente a variação do produto ou processo seria reduzida e a qualidade seria aperfeiçoada. As variações da temperatura ambiente, por exemplo, não podem ser controladas nem eliminadas sem um gasto ponderável. A temperatura ambiente numa fábrica pode ser muito bem controlada a fim de eliminar o seu efeito sobre o desempenho da máquina; porém, a atmosfera do planeta não pode ser controlada, e assim sendo, todos os tipos de dispositivos são expostos a intensas variações de temperatura. Portanto, exige-se um conceito diferente para que a qualidade de um produto deve ser aperfeiçoada. Este conceito foi intitulado por Taguchi como **projeto por parâmetros**. **Projeto por parâmetros** é utilizado para aperfeiçoar a qualidade sem controlar ou eliminar as causas de variação. Taguchi considera o projeto do produto ou processo como um programa de três fases:

- Projeto do sistema
- Projeto por parâmetros
- Projeto por tolerâncias

Projeto do sistema consiste na fase em que novos conceitos, idéias, métodos, etc. são desenvolvidos com o objetivo de fornecer aos consumidores produtos novos ou aperfeiçoados. Um meio de permanecer competitivo na economia mundial consiste em ser líder no emprego da tecnologia. No entanto, a predominância tecnológica desaparece rapidamente, pois pode ser copiada. Se o concorrente conseguir produzir a mesma idéia nova de forma mais uniforme, consequentemente a vantagem tecnológica se tornará mais do que perdida. A fase do **projeto por parâmetros** é crucial no sentido de aperfeiçoar a uniformidade do produto, e pode ser realizada isenta de custos ou até mesmo de forma econômica. Isto significa que, certos parâmetros em projeto de produtos ou processos, são estabelecidos para que o desempenho se torne menos sensível às causas da variação. A fase do **projeto por tolerância** aperfeiçoa a qualidade a um custo mínimo. Qualidade é aperfeiçoada através da redução das tolerâncias dos parâmetros do produto ou processo, para diminuir a variação no

desempenho. Isto é realizado somente após o **projeto por parâmetros**. Geralmente, quando um problema é detectado no desenvolvimento do produto, o projetista pode passar diretamente para o **projeto por tolerâncias**; quando as tolerâncias são reduzidas, a variação é diminuída e a qualidade aperfeiçoada. No entanto, a redução de tolerâncias pode se tornar cara e inteiramente desnecessária, se o **projeto por parâmetros** não tiver sido empregado anteriormente. Um grave erro que o projetista pode cometer é utilizar materiais, componentes e processos de custo alto num produto, quando peças de custo menor podem ser empregadas, se o conceito de **projeto por parâmetros** for aplicado (Ross, 1991, p.199-200, grifo nosso).

O projeto do sistema e o projeto por tolerâncias não são objeto de estudo desta dissertação.

2.2.6 O projeto por parâmetros de Taguchi

O objetivo de Taguchi, com o projeto de parâmetros, é determinar a melhor combinação dos parâmetros do produto e do processo que reduzam a variação. Entende-se que a variação é normal na natureza e que existem dois tipos de fatores que a provocam, que são os fatores de controle, os quais podem ser controlados e especificados pelo fabricante, e os fatores de ruído, os quais o fabricante não possui um controle direto.

Os fatores de ruído podem ser classificados em **ruído externo**, que são os fatores ambientais como temperaturas, pressão, entre outros que geram variações externas nos produtos (ex.:oxidação superficial prematura, desgaste, etc.); os **ruídos internos** causam variação interna nos produtos; e o **ruído do produto** manifesta-se como variação de peça a peça (Ross, 1991, p.201-202, grifo nosso).

2.2.6.1 Projeto robusto

Quando um projeto por parâmetros é utilizado e reduz o efeito do ruído, consequentemente diminuindo a variância, através da seleção adequada dos fatores de controle, diz-se que o projeto é robusto.

Wu e Chang (2004) e Rosa *et al.* (2008) descrevem que o método de Taguchi é um dos melhores métodos de projeto robusto, acrescentado que o princípio básico do método é desenvolver um entendimento dos efeitos individuais e combinados de vários projetos de parâmetros com um número mínimo de experimentos. Os objetivos do método de Taguchi para o projeto de parâmetros são: estabelecer a combinação ótima dos parâmetros e reduzir variações na qualidade do produto.

Casalino, De Filippis e Ludovico (2004) comentam que, para encontrar uma ótima combinação de fatores de controle, a experimentação deve ser robusta, o que significa insensibilidade para a variação causada por fatores de ruído. É importante lembrar que o desempenho de um produto ou processo, mensurado pelas características de qualidade, pode variar devido à variedade de causas que são chamadas de fatores de ruído. O fundamental objetivo do Projeto Robusto é melhorar a qualidade pela minimização do efeito das causas da variação, por exemplo, dos fatores de ruído.

Um trabalho apresentado pela Revista Banas Qualidade (1999) aponta um caso ocorrido em 1983, na ITT Automotive, nos EUA, e foi a primeira aplicação de Engenharia Robusta no setor automotivo americano. A ITT fornecia chicotes (rede de fios) para a Ford. O processo de fabricação estava sob controle estatístico, mas às vezes o produto apresentava fratura nas soldas – um problema grave que ocorria em certa proporção durante a montagem ou uso pelo cliente. A Ford havia proposto resolver o problema, investindo um milhão de dólares num moderno equipamento de solda por ultra-som. Ao contrário disso, um pequeno grupo de engenheiros, sob a orientação de Shin Taguchi (ASI), realizou um experimento usando técnicas de Engenharia Robusta. O experimento foi concluído em dois dias e custou aproximadamente cem dólares. Por meio dele, foram investigados os efeitos de 13 parâmetros de processo. Entre os parâmetros que se revelaram importantes, descobriu-se que dois eram particularmente críticos: o formato do fio (que deveria ser reto, ao invés de retorcido) e a área de solda (que deveria ser maior do que a especificada).

Ajustando-se o processo para as novas condições indicadas pelo experimento, foi possível aumentar a resistência da solda, a ponto dela tornar-se superior à resistência do fio. Isso, por sua vez, eliminou a necessidade do teste destrutivo até então utilizado para controle do processo. Em suma, além de resolver o problema e evitar o investimento desnecessário em novo equipamento, foi estimada uma economia anual de cerca de um milhão de dólares gastos em inspeção.

2.2.6.2 Razão Sinal-Ruído

Segundo Ross (1991), os fatores de controle que contribuem na redução de variação (aperfeiçoamento da qualidade), podem ser rapidamente identificados observando o quanto de variação aparece como resposta. Taguchi idealizou uma transformação dos dados da repetição em outro valor, que representa a medição da variação existente. A transformação é designada como razão sinal-ruído (S/R). A razão S/R combina diversas repetições (exigem-se no mínimo, dois valores observados) em um valor que reflete o quanto de variação está presente. Existem três tipos de razões S/R disponíveis, de acordo com o tipo de característica: menor-é-melhor, nominal-é-melhor e maior-é-melhor.

A razão S/R, que concentra os múltiplos valores observados dentro de um ensaio, depende do tipo de característica que estiver sendo avaliada conforme mostrado nas equações (4), (5), (6) e (7):

Menor-é-melhor

$$S / R_{meM} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right) \quad (4)$$

Onde r = número de repetições num ensaio (número de repetições independente dos níveis do ruído).

Nominal-é-melhor (somente variância)

$$S / R_{NeM_1} = -10 \log V_e \quad (5)$$

Nominal-é-melhor (média e variância)

$$S / R_{NeM_2} = 10 \log \frac{V_m - V_e}{r V_e} \quad (6)$$

Maior-é-melhor

$$S / R_{Mem} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

A razão S/R é tratada como resultado do experimento, que constitui uma medida da variação dentro de um ensaio quando os fatores de ruído estão presentes. Se um arranjo externo é empregado, a variação de ruído é estimulada num experimento; porém, com repetições simples (sem arranjo externo), a variação de ruído não sofre estímulo. A razão S/R consiste num resultado que concentra as repetições e o efeito dos níveis de ruído num único valor observado. A ANOVA padrão pode ser realizada de acordo com a razão S/R, que identificará fatores significativos para aumento do valor médio de S/R e, subseqüentemente, redução da variação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 A RODA FERROVIÁRIA

A roda ferroviária, conforme apresentado nas Figuras 5 e 6, possui regiões distintas tais como: cubo, aro, disco, pista de rolamento e friso.

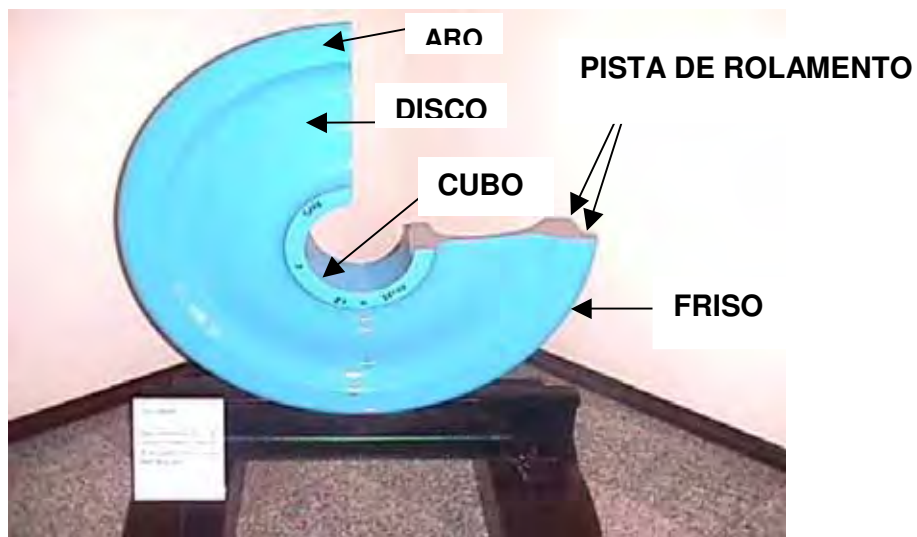


Figura 5 – Roda ferroviária em corte com suas principais regiões.

Em função dos perfis e dimensões envolvidos, vários tipos de roda podem ser fabricados. Sua aplicação se faz presente na montagem direta em locomotivas, ou em truques ferroviários, que por sua vez, são montados nos diversos tipos de vagões de transporte de cargas existentes, conforme mostrado nas Figuras 7 e 8.

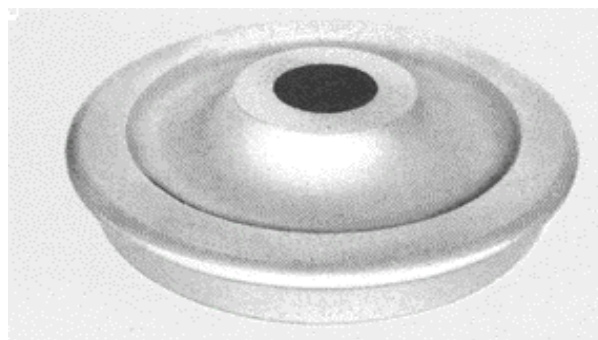


Figura 6 – Vista geral da roda ferroviária fundida em aço

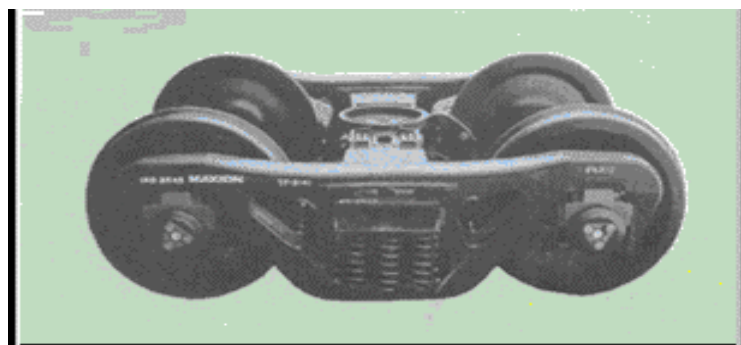


Figura 7 – Aplicação da roda fundida em aço num truque ferroviário.



Figura 8 – Aplicação da roda fundida em aço em vagão tipo gôndola.

3.2 O AMBIENTE EXPERIMENTAL

No Brasil, a fabricação de rodas ferroviárias de perfil parabólico em aço fundido, aplicadas em locomotivas e vagões é feita pela empresa Amsted Maxion Fundição e Equipamentos Ferroviários S.A., através do processo de fundição sob pressão controlada, conforme as especificações M-107/208 da AAR, por meio de licença da empresa norte-americana Griffin Wheel Company, do grupo Norte-Americano Amsted Industries, que desenvolveu o processo e vem aprimorando-o há mais de 120 anos.

Esta indústria de fundidos foi adotada como ambiente experimental para a obtenção das informações necessárias para elaboração desta dissertação.

3.3 PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

O processo de fundição sob pressão controlada é composto de diversas etapas, tendo-se um controle rigoroso e constante nas características envolvidas (temperatura, pressão, tempo, etc.).

3.3.1 Preparação do aço

A liga de aço da roda ferroviária é fundida no setor de aciaria, em forno elétrico a arco, com capacidade de 15 toneladas. Após a preparação e acerto da composição química, o aço é vazado por gravidade em **panelas** especiais conforme mostrado na Figura 9. Neste momento, o aço chega à temperatura de aproximadamente 1.700°C.

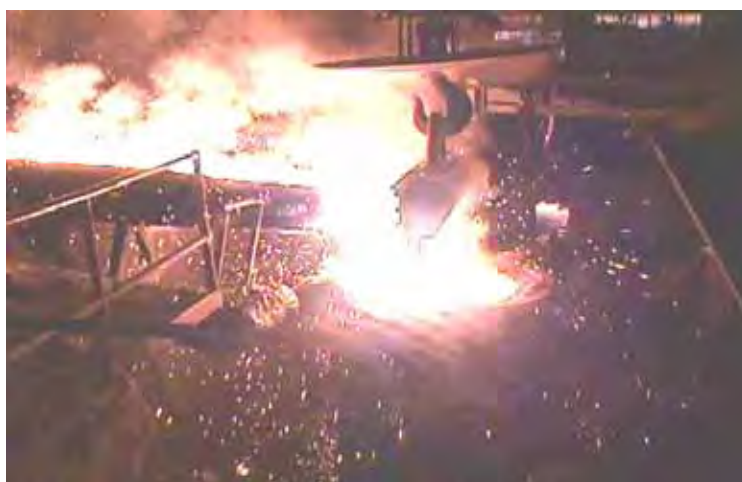


Figura 9 – Vazamento do aço do forno elétrico para a panela

3.3.2 Preparação dos moldes

Cada roda vazada tem um formato que a identifica. Este formato é determinado pelo molde da roda, que é fabricado em grafite e composto de duas partes, a parte superior e a parte inferior, denominadas respectivamente por **molde tampa** e **molde fundo** (Figura 10).



Figura 10 – Molde tampa e molde fundo durante a operação de fechamento

Enquanto o aço é fabricado no setor de aciaria, os moldes são preparados na linha de fabricação de rodas. Condições de limpeza, substituição de luvas desgastadas, preparação da superfície interna com areia especial (shell mold), controle de temperatura e espessura de camada de tinta são alguns dos requisitos de controle estabelecidos nos procedimentos para garantir o completo preenchimento do aço nos moldes durante o vazamento, visando manter o produto dentro das especificações de acabamento e dimensões.

3.3.3 Vazamento do aço nos moldes

A panela com o aço fundido segue para o início da linha de produção das rodas, sendo acondicionada numa abertura existente no equipamento de vazamento, localizada no subsolo, que posteriormente será fechada para dar início ao processo de vazamento.

O processo de vazamento do aço nos moldes de grafite pode ser mostrado conforme o esquema da Figura 11. O aço da panela é direcionado sob pressão controlada para os moldes através de um tubo de cerâmica, até preencher todo o espaço interno formado pelos moldes de grafite.

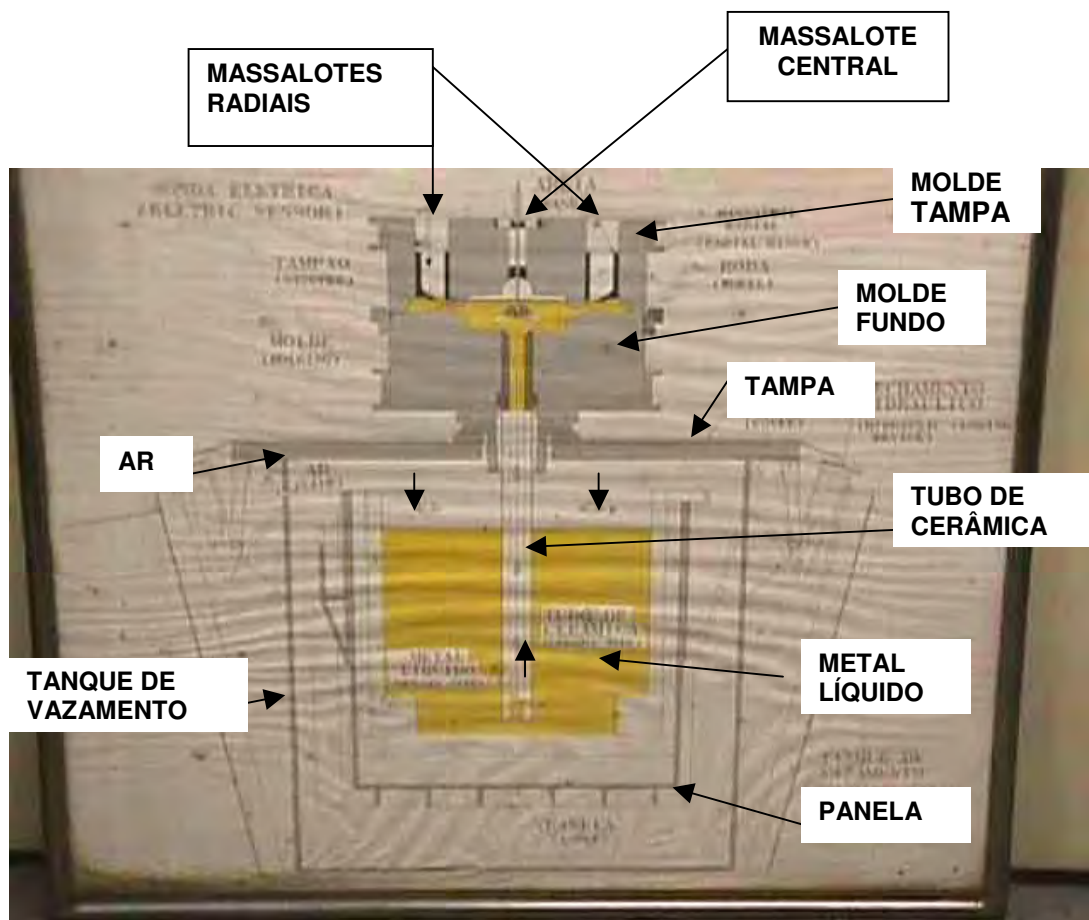


Figura 11 – Desenho esquemático do processo de vazamento da roda ferroviária fundida em aço, através do processo de pressão controlada

3.3.4 Etapas complementares de fabricação

Na sequência, a roda já vazada segue por uma esteira de roletes com velocidade suficiente para sofrer as operações posteriores. Após as operações de cortes à quente para retirada dos massalotes, gravação de identificação de rastreabilidade, tratamentos térmicos e acabamentos específicos, a roda passa por uma sala de testes (ver Figuras 12 e 13), onde são executados os ensaios não destrutivos (partículas magnéticas e ultra-som).

Estes ensaios garantem a qualidade final do produto, pois possibilitam identificar defeitos superficiais e internos não permitidos nos procedimentos de aprovação das rodas fundidas.



Figura 12 – Ensaio de partículas magnéticas



Figura 13 – Ensaio de ultra-som

3.4 DEFINIÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA

Neste trabalho decidiu-se por estudar a redução da variabilidade de tamanho e quantidade, na descontinuidade denominada microrechupe, conforme mostrada esquematicamente na Figura 14, localizada internamente na região do aro da roda ferroviária.

Müller (2002) considera que os microrechupes ou porosidades tendem a ser confundidos com defeitos provenientes da evolução de gases, que quando ocorrem, aparecem nos mesmos locais. São típicos de ligas com alto intervalo de solidificação, surgindo normalmente nos centros geométricos de peças regulares.

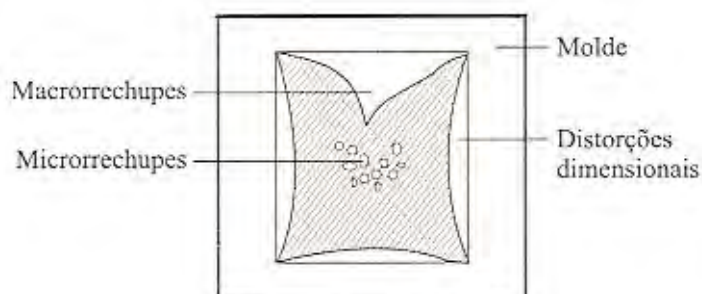


Figura 14 – Principais defeitos de solidificação – Fonte Müller (2002)

Barão (1983) afirma que a solidificação mais rápida das ligas de grande intervalo de solidificação em moldes refratários, a exemplo do aço, não se processa em condições de equilíbrio, representada pelos respectivos diagramas. Inicialmente formam-se cristallites junto às paredes frias do molde, envolvidos por metal líquido com maior teor de soluto (eliminado do cristal sólido), que tendo temperatura de solidificação mais baixa, dificulta o crescimento daqueles cristallites. A diminuição posterior da temperatura determina a formação de micro-cristais (nucleação) em toda a massa líquida remanescente, o que a torna muito viscosa. Os núcleos cristalinos existentes crescem formando uma estrutura rígida, resultante da solidificação de cerca de 70% do volume do líquido original e nesta fase recebem metal dos alimentadores, para compensar a contração de solidificação. Daí por diante, os 30% do líquido restante, isolado entre os grãos metálicos e não tendo mais comunicação com os alimentadores, solidifica, determinando a formação de microvazios de contração, denominados microrechupes.

De acordo com Ramón (2006), este defeito origina-se por um desequilíbrio no balanço dos fenômenos de expansão e contração, que se produzem ao longo do processo de solidificação das peças. Naqueles casos em que a contração originada pela mudança do estado líquido para o sólido, é maior que a expansão originada pela formação de grafita, produzem-se defeitos internos ou microrechupes.

A complexidade do processo de fundição é lembrada por Torre (1975) que argumenta que, devido à pressão exercida pela máquina sobre o metal fundido contido no molde, é possível fundir peças de formas complicadas e de grande exatidão dimensional, tendo como resultado séries completamente intercambiáveis. Por outro lado, a pressão exercida sobre o metal elimina em grande parte os rechupos, se bem que o problema da evacuação do ar dos moldes apresenta, na fundição a pressão, maiores dificuldades do que nos outros métodos conhecidos. Com efeito, devido à rapidez de penetração do metal fundido no molde, o ar que não foi evacuado fica retido na peça e faz surgir pequenas porosidades no interior das mesmas, que reduzem a sua resistência mecânica. Concluiu-se, portanto, que por este processo é difícil fundir peças de uma densidade completamente uniforme, devido às inclusões de ar, gases e impurezas que permanecem no seu interior e que por razão das características deste

procedimento de fundição, não são tão fáceis de eliminar como nos outros processos, em que a permeabilidade dos moldes e a existência de descansos evitam estes inconvenientes.

Kei e Koch¹ (1979 *apud* VERRAN *et al.*, 2000, p.741) mencionam que na fundição sob pressão, a concepção da câmara de injeção e o mecanismo de alimentação da mesma fazem com que, quando ocorre o disparo, boa quantidade de ar seja forçada para dentro da cavidade, o que além de tornar o regime mais turbulento, contribui para o aparecimento de porosidades. Alguns trabalhos têm sugerido a mudança desta concepção, propondo formas alternativas para a alimentação da câmara de injeção de forma não turbulenta.

Barkhudarov e Williams (1995) dão o parecer de que a alta complexidade da cavidade favorece o regime turbulento de preenchimento do molde, que pode ser amenizada com o posicionamento adequado dos canais de ataque, além de um perfil apropriado da zona de ataque.

3.5 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA E DOS NÍVEIS DE TRABALHO

Com a participação de engenheiros das áreas de processos, produção, aciaria, engenharia e qualidade da empresa, foram definidas 15 variáveis de entrada, sendo que cada uma operou em dois níveis de trabalho (baixo e alto), conforme apresenta a Tabela 4.

As variáveis de entrada foram sugeridas pelos especialistas de fundição em função de suas observações individuais, obtidas ao longo do tempo no local de trabalho. As variáveis de entrada são pertinentes aos locais específicos da fundição, constantes na Tabela 4, que são: as áreas de aciaria (A), de vazamento (V) e preparação dos moldes (PM), de onde se obteve o acompanhamento da mensuração e registros dos experimentos.

¹ KEIL E., KOCH P. **Proceso del fundir a presión.** Uzwill, Suiza, Información Técnica 6, Buhler Hermanos S.A., 1979 *apud* VERRAN *et al.* **Simulação da fundição sob pressão de ligas de alumínio – parte II: estudo experimental de uma peça representativa.** Congresso em Ciência de Materiais – SULMAT, 2000.

Tabela 4 – Variáveis de entrada e níveis de trabalho

Legenda: V...vazamento; PM...preparação dos moldes; A...aciaria

Variáveis de Entrada	Área do processo	Nível	
		Baixo (1)	Alto (2)
1. Temperatura do metal no vazamento (°C)	V	≤ 1.600	> 1.600
2. Número de corridas da luva	PM	≤ 20	> 20
3. Número de corridas da panela	V	0 a 12	13 a 24
4. Número de corridas do tubo	PM	1	2
5. Posição relativa da roda na corrida	V	$< 15^a$	$\geq 15^a$
6. Relação Mn/Si	A	$\leq 1,1$	$> 1,1$
7. Teor de Alumínio (%)	A	$\leq 0,009$	$> 0,009$
8. Pré aquecimento da panela	V	Não	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura (°C)	PM	≤ 200	> 200
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura (°C)	PM	≤ 193	> 193
11. Espessura da camada de tinta	PM	≤ 10	> 10
12. Tempo de cura (Core baker) massalotes central (s)	PM	≤ 55	> 55
13. Tempo de cura (Core baker) massalotes radiais (s)	PM	≤ 33	> 33
14. Areia de cobertura no vazamento	V	Não	Sim
15. Temperatura de desoxidação (°C)	A	≤ 1.600	> 1.600

3.6 DEFINIÇÃO DO ARRANJO ORTOGONAL

Em função da existência de quinze fatores, atuando em dois níveis de trabalho, foi adotado o arranjo ortogonal de Taguchi tipo L-16, com dezesseis experimentos, apresentado Tabela 5. Cada linha representa uma corrida experimental (ensaio), sendo

que as colunas representam o nível que cada fator atua (Nível 1= nível baixo; Nível 2= nível alto).

Tabela 5 – Arranjo ortogonal de Taguchi tipo L-16

Ensaio Nº	V A R I Á V E I S														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

3.7 ALEATORIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os experimentos ocorreram durante 37 dias, em períodos alternados (manhã, tarde e noite) e tiveram uma seqüência de realização conforme mostrado no diagrama da Figura 15.

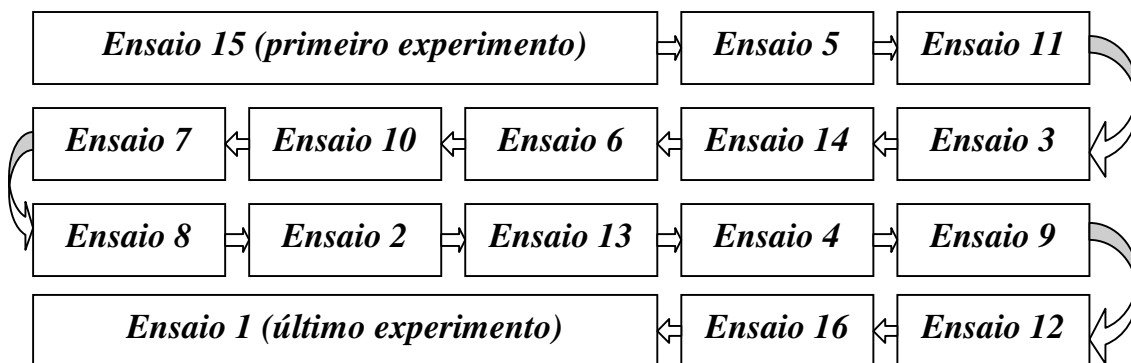


Figura 15 – Diagrama da seqüência de ensaios

3.8 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO E ENSAIOS

As unidades utilizadas para as variáveis são:

- Temperatura em graus Celsius;
- Tempo em segundos;
- Espessura da camada de tinta em MILS.

As medições de temperatura e tempo foram realizadas diretamente nos medidores existentes nos equipamentos do processo, os quais são aferidos periodicamente conforme procedimentos de qualidade da empresa (ISO 9000).

Para a obtenção dos registros deste projeto, foram utilizados diversos equipamentos de medição e de produção, sendo que os mais importantes são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 – Equipamentos de medição mais importantes utilizados nos experimentos

Equipamento	Modelo	Fabricante	Aplicação
Espectrômetro de emissão ótica	3460 / MA	ARL (Suíça)	Determinar os elementos químicos do aço das rodas
Medidor de temperatura digital	RAYST 5 LXB	RAYTEC (U.S.A.)	Determinar as temperaturas dos moldes da roda (tampa e fundo).
Medidor de espessuras da camada de tinta	168.084 (escala de 2-12 MILS)	GRACO	Determinar as espessuras das camadas de tinta dos moldes da roda (tampa e fundo).
Ultra-som	USK-7B	Krautkrämer (Alemanha)	Mensurar a descontinuidade interna (microrechupe)

3.8.1 Medição da variável resposta

Para mensurar a descontinuidade interna denominada microrechupe, utilizou-se a técnica de ensaio não-destrutivo conhecido por ultra-som, aplicando-se um transdutor normal B2S com ganho de 56 dB, considerando-se a espessura entre 70 a 140 mm.

Para avaliação do tamanho das descontinuidades, utilizou-se o método indireto de avaliação, tipo AVG especial para transdutor B2S, com auxílio do diagrama mostrado na Figura 16.

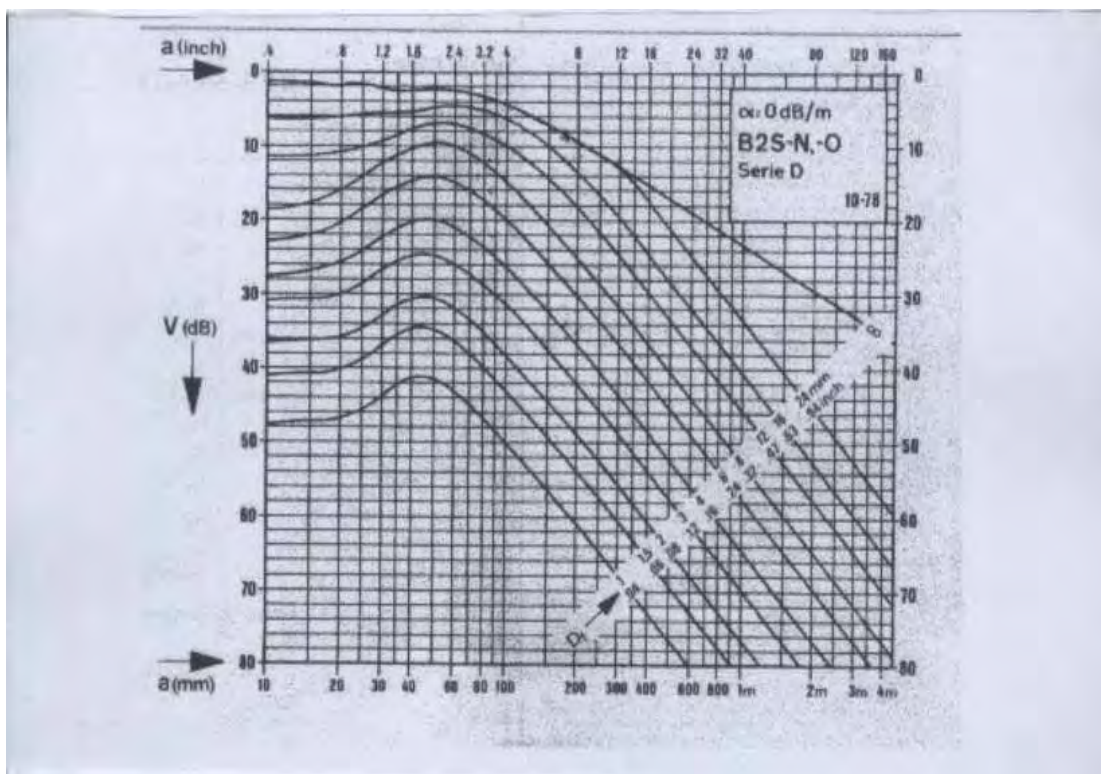


Figura 16 – Diagrama AVG para transdutor B2S-N da Krautkrämer - Fonte: Krautkrämer, 1979.

O método AVG para avaliação do tamanho de descontinuidade visa determinar qual o tamanho do disco plano refletor equivalente, em termos de refletividade, para a descontinuidade detectada. A amplitude do eco obtida da descontinuidade avaliada é expressa em termos de diâmetro do disco plano refletor, ou em termos de excesso de amplitude, em dB (decibel), em relação ao critério de aceitação pré-estabelecido. A comparação do sinal obtido é feita com o auxílio de diagramas, como o mostrado na Figura 16, que correlacionam a distância e tamanhos de discos planos refletores com a

variação de ganho e com o eco de fundo de uma parede oposta. As iniciais AVG vêm do alemão e significam:

A = Abstand = distância

V = Verstärkung = amplificação

G = Grösse = tamanho

Todos os ensaios de ultra-som foram realizados pelo mesmo inspetor da empresa, com qualificação de ultra-som reconhecida pelo Nível II, aprovada e mantida pelo Centro Tecnológico da Aeronáutica (CTA), em São José dos Campos, Estado de São Paulo, Brasil.

3.8.2 Critério de aceitação

A descontinuidade denominada microrechupe é definida como defeito neste processo de fabricação, quando passa a corresponder a uma reflexão ultra-sônica equivalente a dimensão de um furo de fundo plano de diâmetro de um oitavo de polegada, conforme Standard M-107/208 da Association of America Railroads (A.A.R.), citados em seus parágrafos 16.4.3.2 e 16.4.3.3.

3.9 MÉTODO DE MENSURAÇÃO DA VARIÁVEL RESPOSTA

Neste projeto, ocorreram diferentes resultados de microrechupes nas rodas dos experimentos, tanto em quantidade quanto na dimensão dos mesmos, conforme mostrado na Tabela 8.

Como a variável resposta apresenta duas características que definem sua intensidade (quantidade e dimensões), entende-se que as mesmas devem ser consideradas conjuntamente para obter-se uma resposta mais conclusiva, única e representativa. Para compor um valor único mensurável, optou-se em criar um método específico que estabelece um único valor para a variável resposta, denominado neste

trabalho como Nível de Qualidade (NQ). Neste método, o Nível de Qualidade advém da composição da quantidade de descontinuidades e das dimensões das mesmas, e é obtido através de regras sequenciais, mostradas adiante.

3.9.1 Regra 1

Para mensurar a variável resposta é necessário considerar a quantidade e dimensões das descontinuidades encontradas, valores estes obtidos através do ensaio de ultra-som, conforme procedimento descrito no item 3.8.1.

3.9.2 Regra 2

A quantidade de descontinuidades obtidas no ensaio de ultra-som é o valor inicial para o cálculo total das descontinuidades considerado.

3.9.3 Regra 3

Haverá um acréscimo à quantidade inicial de descontinuidades em função das dimensões das mesmas, conforme abaixo:

- Para dimensões até 1,5 mm não haverá acréscimo ao valor inicial;
- Para dimensões entre 1,5 e 2,0 mm, haverá acréscimo de uma unidade de descontinuidade a ser somada ao valor inicial;
- Para dimensões entre 2,0 e 2,5 mm, haverá acréscimo de três unidades de descontinuidade a ser somada ao valor inicial.

3.9.4 Regra 4

A quantidade total de descontinuidades considerada é a soma das descontinuidades advindas do ensaio de ultra-som e do acréscimo considerado pela Regra 3 (item 3.9.3).

3.9.5 Regra 5

O passo final para mensurar a variável resposta advém da adoção do valor do Nível de Qualidade (NQ). O NQ é obtido através da Tabela 7, a qual foi elaborada especificamente para este trabalho. A Tabela 7 consiste na criação de uma relação de valores proporcionais à quantidade total de descontinuidades considerada (item 3.9.4), onde se adotam valores de zero a cem, proporcionais às quantidades totais consideradas.

Tabela 7 – Relação entre o número total de descontinuidades e o NQ

Total de descontinuidades considerado	Nível de Qualidade (NQ)
de 0 a 1	100
2	90
3	80
4	70
5	60
6	50
7	40
8	30
9	20
de 10 a 11	10
maior que 11	0

Observa-se que quanto maior o NQ da roda experimentada, ou seja, quanto mais próximo do valor 100 ela se encontra, menor é a intensidade de microrechupes e conseqüentemente, melhor é a qualidade da mesma (condição maior é melhor).

Utilizando as cinco regras citadas em 3.9.1, 3.9.2, 3.9.3, 3.9.4 e 3.9.5, foi elaborado um quadro com o NQ de todas as rodas experimentadas. No capítulo 4 (Resultados e Discussão), é possível observar todos os Níveis de Qualidade obtidos através da Tabela 8. Observa-se pela Tabela 8, por exemplo, que a roda do ensaio

número 1 tem um resultado inicial de seis discontinuidades, sendo acrescida de mais uma discontinuidade conforme estabelece a Regra 3 (item 3.9.3) totalizando sete discontinuidades, que de acordo com a Regra 5 (item 3.9.5), representa um NQ de quarenta.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de cada roda experimentada estão registrados na Tabela 8. A quantidade e o tamanho das descontinuidades foram obtidos conforme item 3.8.1, sendo que os resultados dos Níveis de Qualidade foram determinados conforme utilização do método de mensuração da variável resposta (item 3.9).

Tabela 8 – Descontinuidades encontradas nas rodas dos experimentos e respectivos valores de NQ (Nível de Qualidade).

Ensaio N°	Roda série n°	Quantidade de descontinuidades obtidas no ensaio de ultra-som	Equivalência em Diâmetro (mm)	Total de descontinuidades considerado	Nível de Qualidade (N.Q)
1	375468	6	1,5 a 2,0	7	40
2	373872	2	1,5 a 2,0	3	80
3	372029	6	1,5	6	50
4	374979	6	1,5 a 2,5	9	20
5	371893	3	1,5	3	80
6	372197	3	1,5	3	80
7	373649	2	1,5 a 2,0	3	80
8	373813	3	1,5 a 2,0	4	70
9	375207	5	1,5 a 2,0	6	50
10	372261	7	1,5 a 2,5	10	10
11	371950	2	1,5	2	90
12	375248	2	1,5 a 2,0	3	80
13	373974	2	1,5 a 2,0	3	80
14	372048	8	1,5 a 2,5	11	10
15	371625	5	1,5	5	60
16	375392	4	1,5 a 2,0	5	60

Todos os registros dos experimentos encontram-se pormenorizados nos Apêndices, ao final desta dissertação.

4.1 CÁLCULOS E REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS

Com os resultados de N.Q. da Tabela 8, e utilizando-se do software statistica 8.0, foi possível calcular os efeitos e as razões S/R, representando-os graficamente conforme se segue:

4.1.1 Efeitos dos fatores sobre o NQ

Os efeitos dos fatores sobre o NQ têm a ANOVA representada conforme Tabela 9 e sua representação gráfica conforme a Figura 17.

Tabela 9 – ANOVA dos efeitos dos fatores sobre o NQ (Nível de Qualidade).

* Erro estimado através dos fatores 6 (relação Mn/Si) e 11 (espessura camada de tinta)

Fator	SQ	gl	SMQ	F	p
1.Temp.Vazamento	225	1	225	4,5	0,167950
2. N° corridas luva	625	1	625	12,5	0,071523
3. N° corridas panela	1225	1	1225	24,5	0,038476
4. N° corridas tubo	400	1	400	8,0	0,105573
5.Posição relativa	2500	1	2500	50,0	0,019419
7.Teor Alumínio	900	1	900	18,0	0,051317
8.Pré Aquecim. panela	900	1	900	18,0	0,051317
9.Temp.Molde Tampa	900	1	900	18,0	0,051317
10.Temp.Molde Fundo	100	1	100	2,0	0,292893
12.Tempo de Cura Massalote. Central	25	1	25	0,5	0,552786
13.Tempo de Cura Massalotes Radiais	2025	1	2025	40,5	0,023813
14.Areia	625	1	625	12,5	0,071523
15.Temperatura desoxidação	25	1	25	0,5	0,552786
Residual *	100	2	50		

Observando-se os valores obtidos na ANOVA (Tabela 9) e na representação gráfica (Figura 17), nota-se a existência de forte significância para o fator 5 (posição relativa da roda na corrida), seguido do fator 13 (tempo de cura dos massalotes radiais).

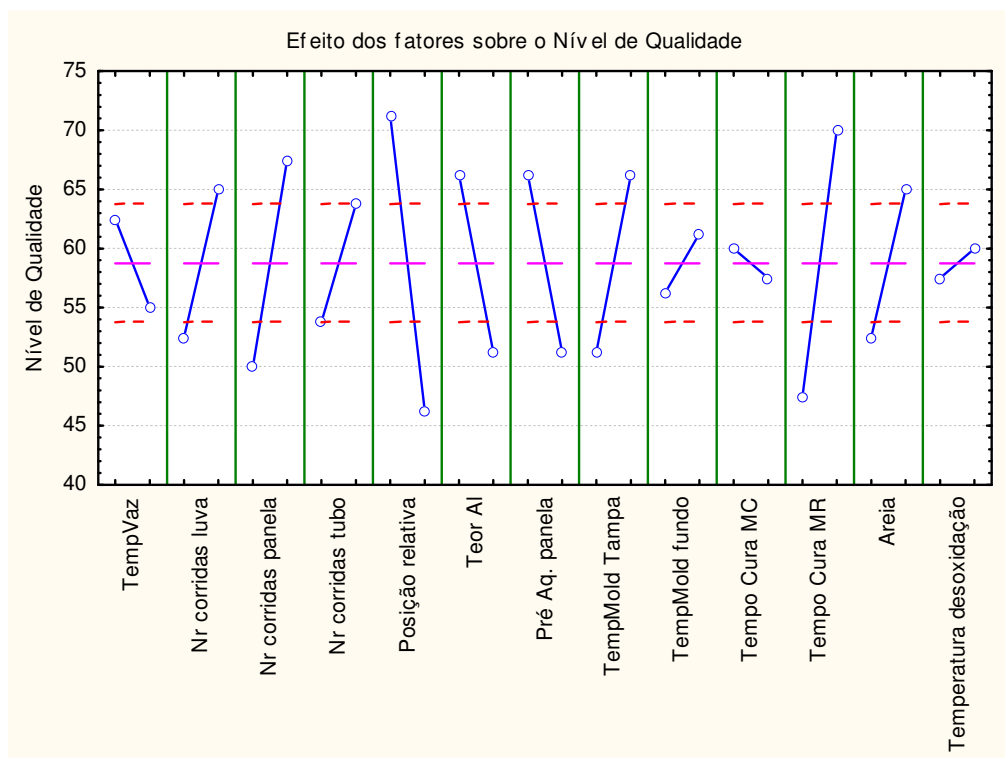


Figura 17 – Representação gráfica dos efeitos dos fatores sobre o NQ

4.1.2 Efeitos dos fatores sobre a razão S/R

Os efeitos dos fatores sobre a razão S/R_{Mem} (maior-é-melhor) têm a ANOVA representada conforme Tabela 10 e sua representação gráfica conforme a Figura 18.

Observando-se os valores obtidos na ANOVA (Tabela 10) e na representação gráfica (Figura 18), nota-se a existência de forte significância para o fator 5 (posição relativa da roda na corrida), seguido do fator 13 (tempo de cura dos massolotes radiais). Observa-se também considerável significância da razão S/R para as variáveis:

- número de corridas das luvas;
- número de corridas da panela;
- teor de alumínio;
- pré-aquecimento da panela;
- temperatura do molde tampa;
- areia de cobertura.

Tabela 10 – ANOVA dos efeitos dos fatores sobre a razão S/R

*Erro estimado através dos fatores 6 (relação Mn/Si) e 11 (espessura camada de tinta)

Fator	SQ	gl	SMQ	F	p
1.Temp.Vazamento	27,2392	1	27,2392	54,2300	0,017945
2. N° corridas luva	22,6723	1	22,6723	45,1379	0,021444
3. N° corridas panela	32,8402	1	32,8402	65,3812	0,014953
4. N° corridas tubo	38,9646	1	38,9646	77,5741	0,012647
5.Posição relativa	140,9820	1	140,9820	280,6791	0,003544
7.Teor Alumínio	22,6723	1	22,6723	45,1379	0,021444
8.Pré Aquecim. panela	81,7319	1	81,7319	162,7190	0,006089
9.Temp.Molde Tampa	56,1234	1	56,1234	111,7352	0,008831
10.Temp.Molde Fundo	0,3252	1	0,3252	0,6474	0,505489
12.Tempo de Cura Massalote. Central	15,7587	1	15,7587	31,3738	0,030426
13.Tempo de Cura Massalotes Radiais	133,1565	1	133,1565	265,0994	0,003751
14.Areia	20,0816	1	20,0816	39,9802	0,024111
15.Temperatura desoxidação	3,7192	1	3,7192	7,4045	0,112680
Residual *	1,0046	2	0,5023		

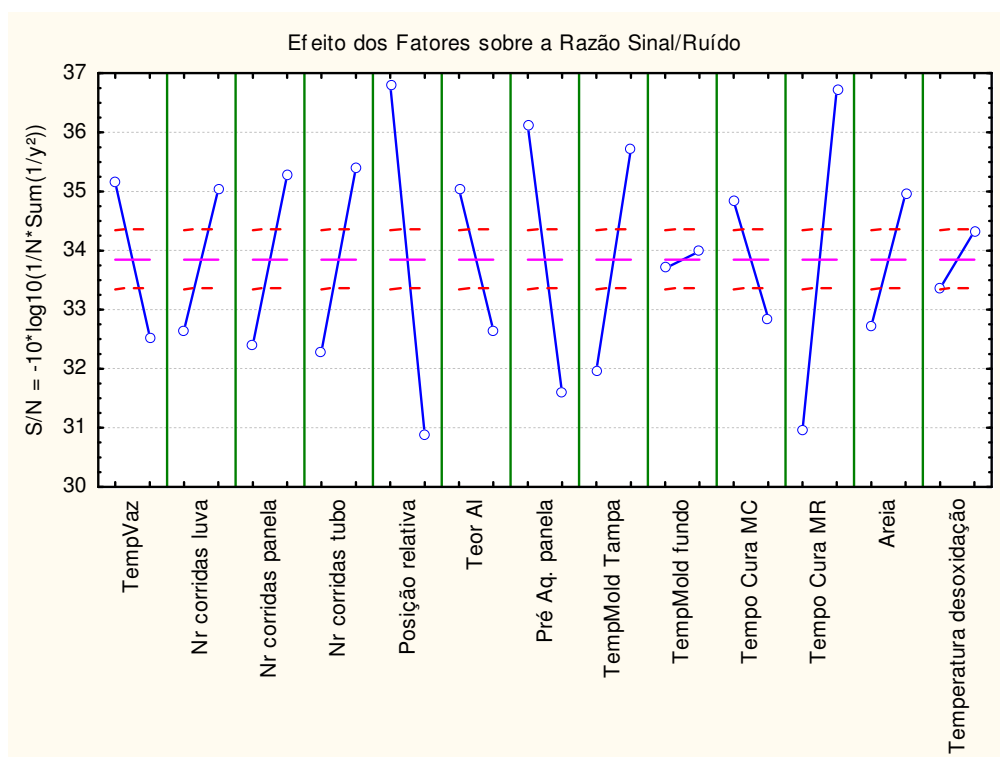


Figura 18 – Representação gráfica dos efeitos dos fatores sobre a razão S/R

4.2 EXPERIMENTO DE CONFIRMAÇÃO

De posse dos resultados das Tabelas 9 e 10 e das Figuras 17 e 18, é possível determinar o melhor nível de trabalho para cada fator e observar o grau de significância dos fatores. A Tabela 11 resume o melhor nível de trabalho para cada fator.

Tabela 11 – Combinação ótima dos níveis de trabalho nas variáveis de entrada

	Fatores (variáveis de entrada)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Média Nível 1	62,50	52,50	50,00	53,75	71,25	56,25	66,25	66,25	51,25	56,25	58,75	60,00	47,50	52,50	57,50
Média Nível 2	55,00	65,00	67,50	63,75	46,25	61,25	51,25	51,25	66,25	61,25	58,75	57,50	70,00	65,00	60,00

Os níveis ótimos da Tabela 11 foram aplicados em mais uma experiência na produção, denominada experiência de confirmação, e o resultado NQ da roda inspecionada foi 100, ou seja, utilizando os níveis ótimos obtém-se fisicamente uma roda com níveis praticamente nulos da descontinuidade microrechupe. Os registros dos valores das variáveis utilizados nesta experiência de confirmação encontram-se no Apêndice R.

4.3 DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS

Após análise dos resultados encontrados nas Tabelas 9 e 10 e com o auxílio das Figuras 17 e 18, torna-se possível discursar sobre a influência das quinze variáveis do processo, com relação à quantidade e dimensões de microrechupes presentes nas rodas experimentadas, observando ainda se os resultados encontrados nesta pesquisa vão de encontro com a prática de fundição vigente. Para isto utiliza-se uma análise seqüencial, ou seja, discursar-se inicialmente da variável mais significativa (itens 4.3.1 e 4.3.2) para a de menor significância (item 4.3.3).

4.3.1 Primeiro grupo de variáveis mais significantes

Compõe este grupo:

- Variável número 5 (posição relativa da roda na corrida);
- Variável número 13 (tempo de cura dos massalotes radiais).

Para variável nº 5 (posição relativa da roda na corrida), mostrou-se neste trabalho que a mesma é a mais significativa. Conforme mostrado na Figura 19, operando no nível 1 obtém-se um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas seqüenciadas entre a primeira e a décima quinta posição da corrida de produção podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe e as rodas seqüenciadas a partir da décima quinta posição, tem efeito contrário.

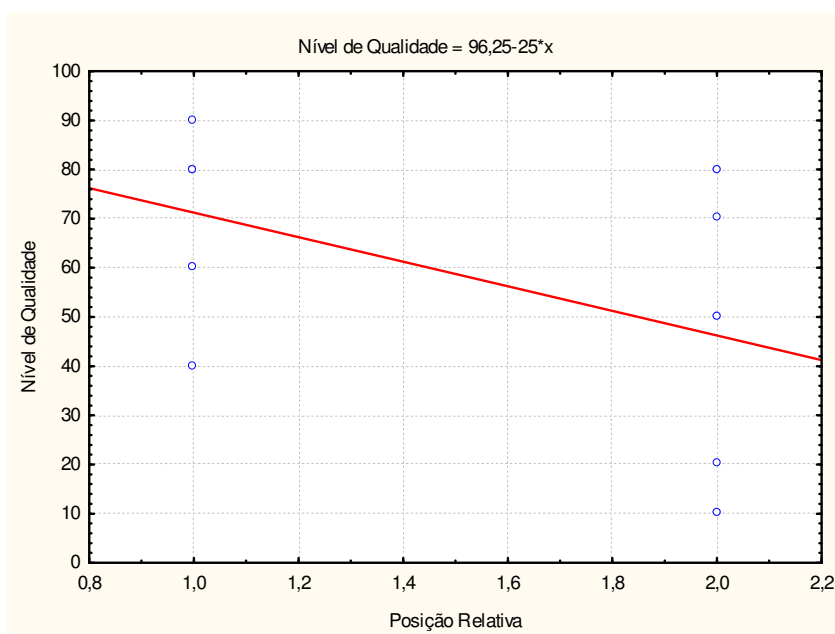


Figura 19 - Influência da posição relativa da roda no Nível de Qualidade

Este resultado se alinha com a prática de fundição, que defende a condição de que as primeiras rodas vazadas no processo possuem maior concentração de calor em seus moldes com relação às rodas do final da corrida, podendo manter o aço no estado líquido por mais tempo e consequentemente minimizar a ocorrência de

descontinuidades internas na estrutura do aço, que por ação da influência da alta temperatura existente, favorece melhores condições de fluidez do líquido no molde, bem como as ações favoráveis das pressões existentes (pressão atmosférica e pressão metalostática principalmente). Por outro lado, as rodas mais próximas do final da corrida estão mais sujeitas a queda de temperatura, e consequentemente, podem aderir às condições de contração inerentes ao processo de solidificação do material.

O sólido cristalino, estável entre zero absoluto e o ponto de fusão, é a forma da matéria que apresenta simetria mais simples. Em baixas temperaturas, perto de zero absoluto, cessam as vibrações térmicas que normalmente fazem oscilar a sua estrutura, fazendo com que neste ponto ela se encontre num estado de máxima ordenação. À medida que se injeta energia no sistema, a temperatura aumenta e cresce a amplitude das oscilações geradoras de defeitos estruturais. Estes estão presentes inicialmente na forma de *defeito de ponto*, passando a *defeitos de linha* e chegando a *descontinuidades* quando a temperatura se aproxima do ponto de fusão. Ultrapassando o ponto de fusão, os defeitos passam a se interconectarem, provocando o isolamento de porções que ainda guardam ordenação, ditas de “curto alcance”, formando as *colônias*, os *embriões*, ou os *clusters*, e o metal, agora líquido, passa a ter propriedade de um fluido. No estado líquido, o tamanho médio das colônias vai diminuindo com o aumento da temperatura, chegando ao ponto de ebulição com um tamanho teórico igual ao do diâmetro atômico do elemento. Esse fenômeno, descrito para o aquecimento, é perfeitamente reversível durante a solidificação que parte do estado líquido para o sólido, ou seja, o tamanho médio dos embriões aumenta com a queda da temperatura, mesmo na região do líquido superesfriado (MÜLLER, 2002, p.17).

Garcia (1995), ao comentar sobre o efeito da distribuição de porosidades, inclusões, produtos segregados, etc., exemplifica que a maioria das fases mais frágeis precipitam mais tardiamente no processo de solidificação e acomodam-se preferencialmente nos contornos de grão e, juntamente com a ação de outros parâmetros estruturais, são responsáveis pela qualidade mecânica inferior das estruturas constituídas de granulação mais grosseira. Ainda sobre o aparecimento de descontinuidades nos materiais fundidos, Garcia (1995) acrescenta que, o metal líquido flui através dos canais interdendríticos para compensar a contração do metal durante a solidificação, mas a complexidade da rede dendrítica provoca uma queda de pressão dentro dos canais (ΔP), e, quando essa variação de pressão é maior que a pressão atuante na entrada do canal, ocorre falta de alimentação de líquido e consequentemente a formação de microporosidades, ou seja:

$$|\Delta P| \geq P_{metalostática} + P_{atm} \quad (8)$$

onde $P_{metalostática}$ é a pressão exercida pela coluna h de metal líquido que alimenta o canal ($P = d_L \cdot g \cdot h$), e P_{atm} é a pressão atmosférica atuante.

Wlodawer (1966) atenta para o fato de que o resfriamento prematuro na superfície da cabeça do massalote, conforme mostrado na Figura 20, conduz a formação de cavidades secundárias (porque o metal líquido fica impedido da pressão atmosférica), as quais desta forma podem penetrar profundamente dentro do fundido. O gradiente de temperatura do massalote deve crescer, portanto, para o topo do mesmo.

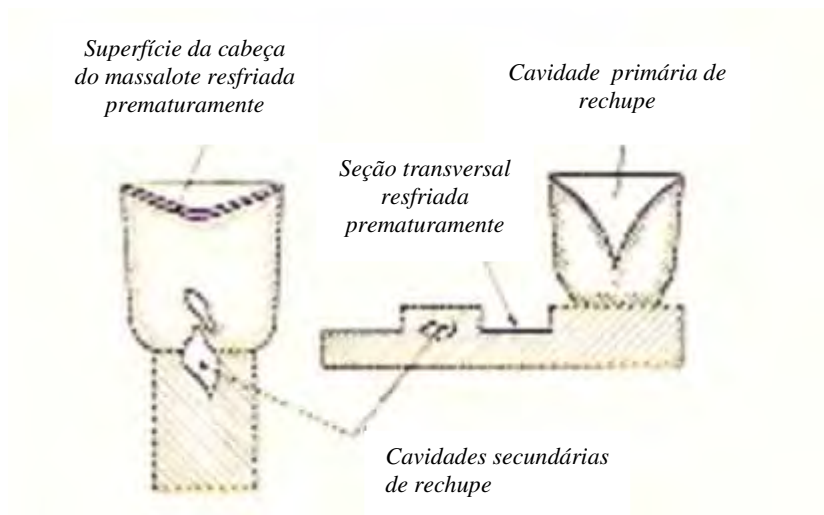


Figura 20 – Formação de cavidades de rechupe no massalote e na seção transversal.
Fonte: Wlodawer (1966)

Outra variável significativa foi a variável nº 13 (tempo de cura dos massalotes radiais). Conforme mostrado na Figura 21, esta variável demonstrou que operando no nível 2 tem um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas com tempo de cura maior que 33 segundos podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas com tempo de cura menor que 33 segundos tem efeito contrário.

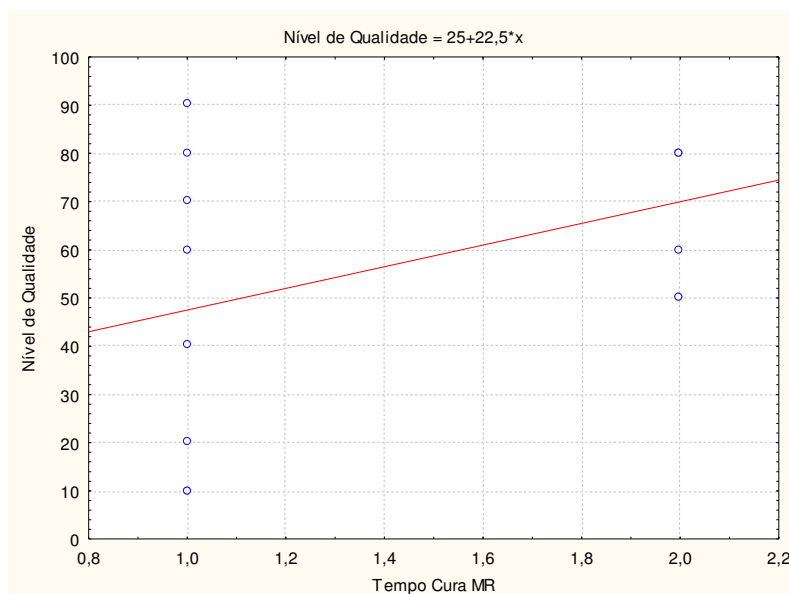


Figura 21 - Influência do tempo de cura dos massalotes radiais no Nível de Qualidade

A significância da variável nº 13 demonstra que pode ser compatível com a prática de fundição, que considera que quanto maior o tempo de cura de shell mold para a tolerância de processo estabelecida, mais homogênea fica a camada de areia que envolve o molde de grafite na região dos massalotes. A Figura 22 demonstra um tipo de processo de shell mold (processo shell ou fundição em casca) utilizando uma espécie de caixa basculante. O modelo é fixado na caixa e rotacionado 180° para impregnação de areia misturada com resina no modelo.

Observa-se que, entre outros fatores, um baixo tempo de cura pode causar o efeito peelback (ver exemplo de ocorrência na Figura 22), considerada como um descascamento da camada de areia de shell mold, oriunda da rotação do molde para a retirada do excesso de areia das cavidades dos massalotes radiais. Como a areia de shell tem a função de atuar como um isolante térmico, reduzindo a troca de calor na superfície dos massalotes do molde, uma redução de espessura por descascamento ou mesmo insuficiência de camada pela diminuição de tempo de cura, aumenta a velocidade de troca de calor imposta pelo molde ao massalote, reduzindo sua eficiência. A redução da espessura de shell fora dos padrões especificados no processo, pode acarretar entre outras consequências, na tendência de formação de rechupes com tamanhos diferenciados.

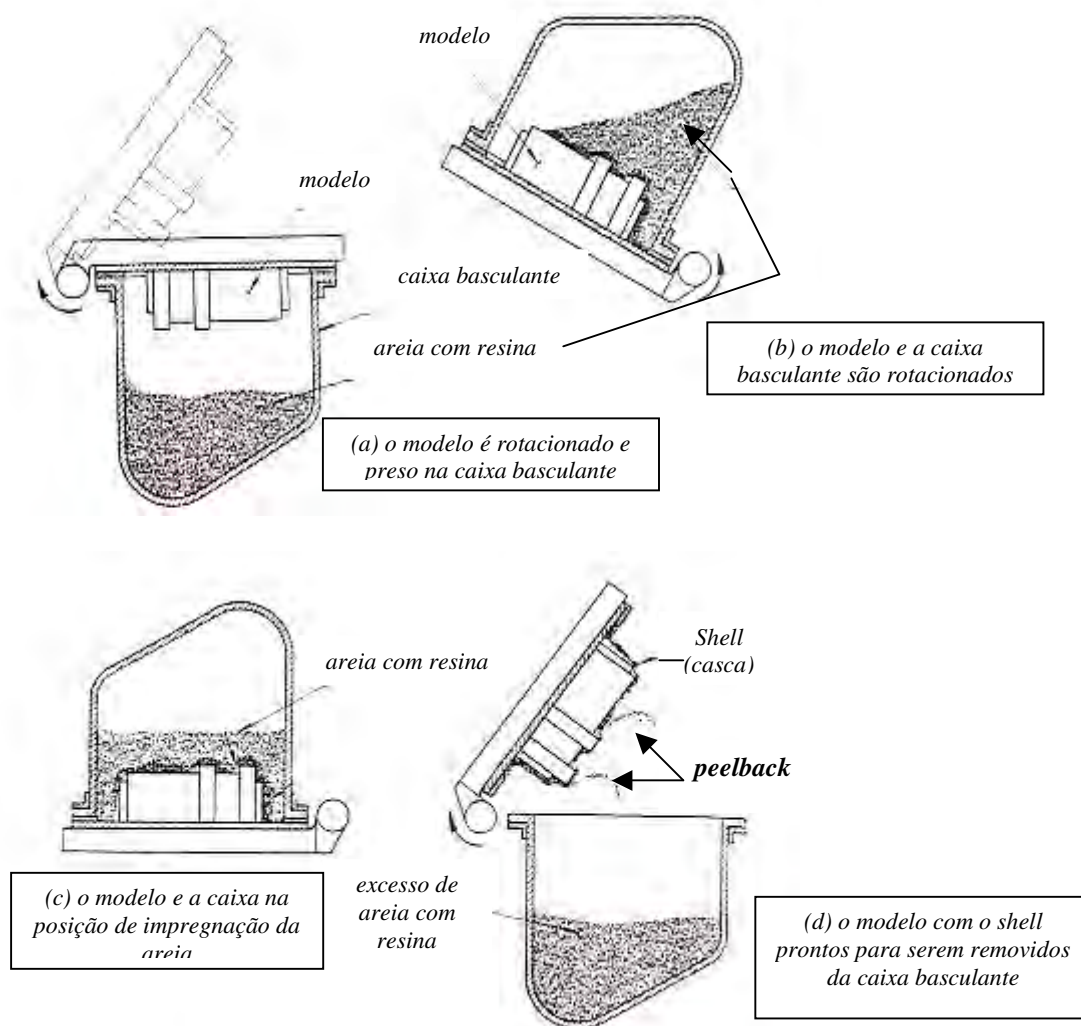


Figura 22 – Fases de um tipo de processo de shell mold pela técnica da caixa basculante.
Fonte: ASM (1970)

Sobre a fundição por shell mold, a American Society for Metals- ASM (1970), apresenta que uma das desvantagens ou limitações do método está nos fatores de rechupe os quais variam com a prática de fundição, e acrescenta ainda que duas fundições usando o mesmo padrão podem vazar fundidos com diferentes variações dimensionais.

4.3.2 Segundo grupo de variáveis mais significantes

Compõe este grupo:

- Variável número 2 (número de corridas da luva);

- Variável número 3 (número de corridas da panela);
- Variável número 4 (número de corridas do tubo);
- Variável número 9 (temperatura do molde-tampa);
- Variável número 14 (areia de cobertura no vazamento);
- Variável número 7 (teor de alumínio);
- Variável número 8 (pré aquecimento da panela).

A variável nº 2 (número de corridas da luva), conforme mostrado na Figura 23, demonstrou que operando no nível 2 tem um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas em moldes com luvas cujo número de corridas é maior que vinte corridas podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechepe, e rodas vazadas em moldes com luvas cujo número de corridas é menor que vinte corridas tem efeito contrário.

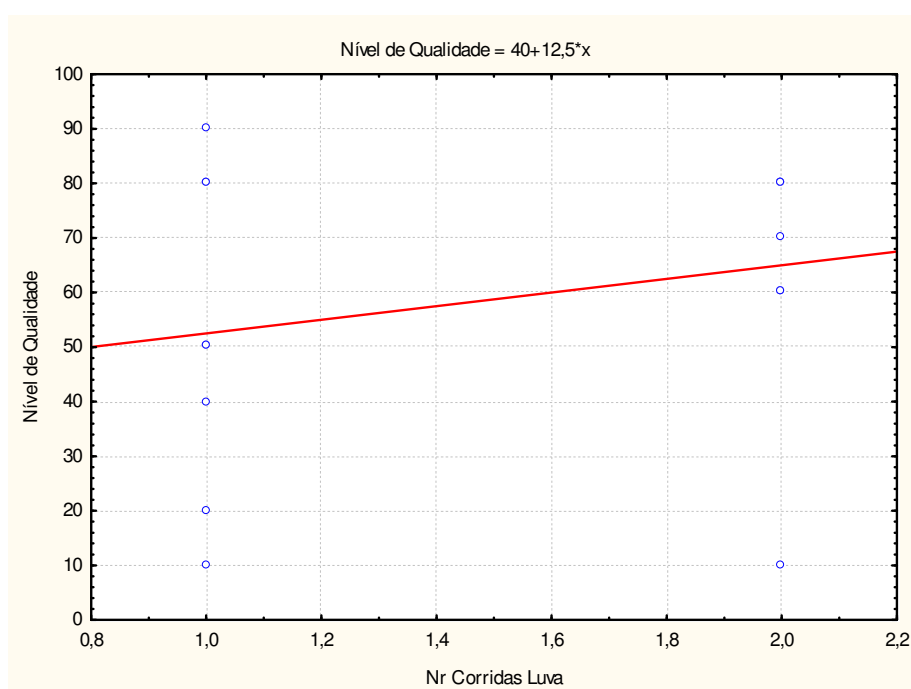


Figura 23 - Influência do número de corridas da luva no Nível de Qualidade

A princípio este resultado da pesquisa também pode estar relacionado com a prática de fundição. A luva, assim denominada nesta pesquisa, é um componente refratário do processo que faz a conexão entre o tubo de cerâmica e o molde (ver Figura 11), por onde fluirá o aço líquido para dentro do molde fechado (molde tampa com o molde fundo). Dentro de uma limitação natural, o desgaste da luva a deixa mais

encharcada, ou seja, mais receptiva para conservar a temperatura durante o fluxo do líquido. Esta condição é similar à condição da variável nº 5 (ver item 4.3.1), onde se observa que a concentração de calor pode manter o aço no estado líquido por mais tempo e, conseqüentemente, minimizar a ocorrência de descontinuidades internas na estrutura do aço, que por ação da influência da alta temperatura existente, favorece melhores condições de fluidez do líquido no molde, bem como as ações favoráveis das pressões existentes. A respeito desta análise, ver também no item 4.3.1, as citações de Muller (2002), Garcia (1995) e Wlodawer (1966).

A variável nº 3 (número de corridas da panela), conforme mostrado na Figura 24, demonstrou que operando no nível 2 tem um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas em panelas (ver Figura 11) cujo número de corridas está entre 13 a 24 corridas podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas vazadas em panelas cujo número de corridas é menor que 13 corridas tem efeito contrário.

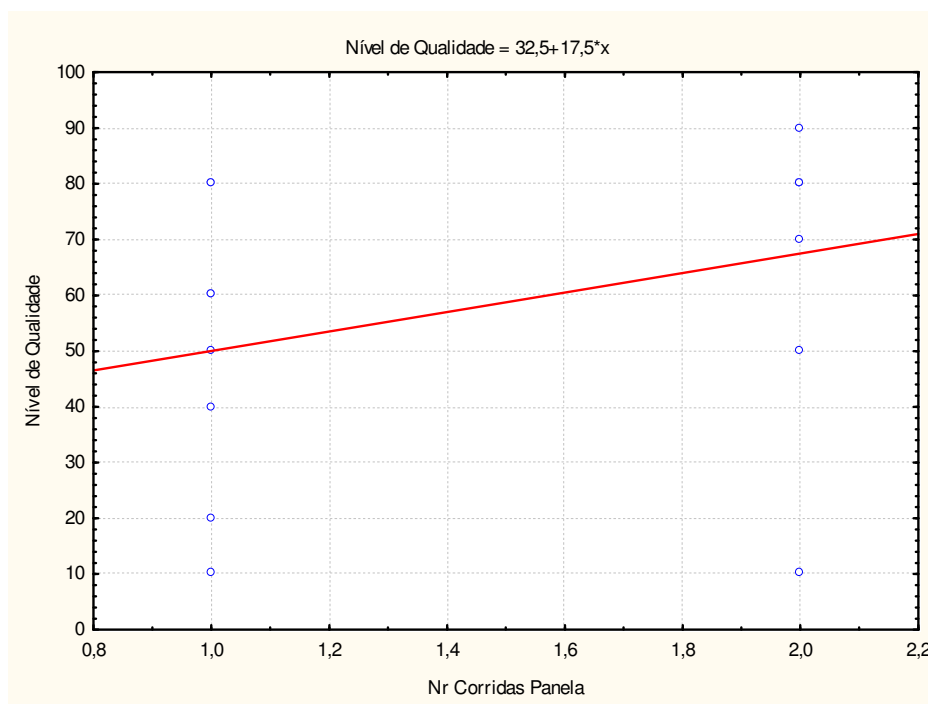


Figura 24 - Influência do número de corridas da panela no Nível de Qualidade

Esta discussão pode ter a mesma análise que a aplicada para as variáveis nº 2 e nº 5, já mencionadas anteriormente.

A variável nº 4 (número de corridas do tubo), conforme Figura 25, demonstrou que operando no nível 2 tem um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas em tubos de cerâmica (ver Figura 11) com duas corridas podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas vazadas em tubos com uma corrida tem efeito contrário.

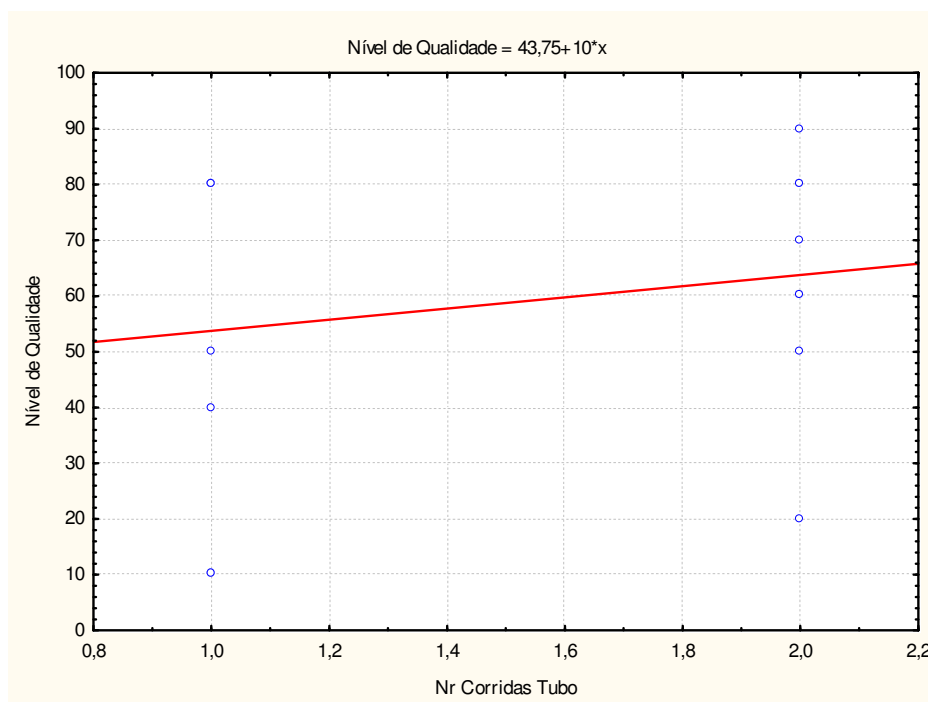


Figura 25 - Influência do número de corridas do tubo no Nível de Qualidade

Esta discussão inclina-se para a questão da manutenção da concentração de calor, podendo ter a mesma análise que a aplicada para as variáveis nº 2 e nº 5, já mencionadas anteriormente.

A variável nº 9 (temperatura do molde tampa), conforme Figura 26, demonstrou que operando no nível 2 tem um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas em molde tampa (ver Figuras 10 e 11) com temperatura maior que 200 °C podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas vazadas temperatura menor ou igual a 200 °C tem efeito contrário. Esta discussão também diz respeito a concentração de calor, podendo ter a mesma análise que a aplicada para as variáveis nº 2 e nº 5, já mencionadas anteriormente.

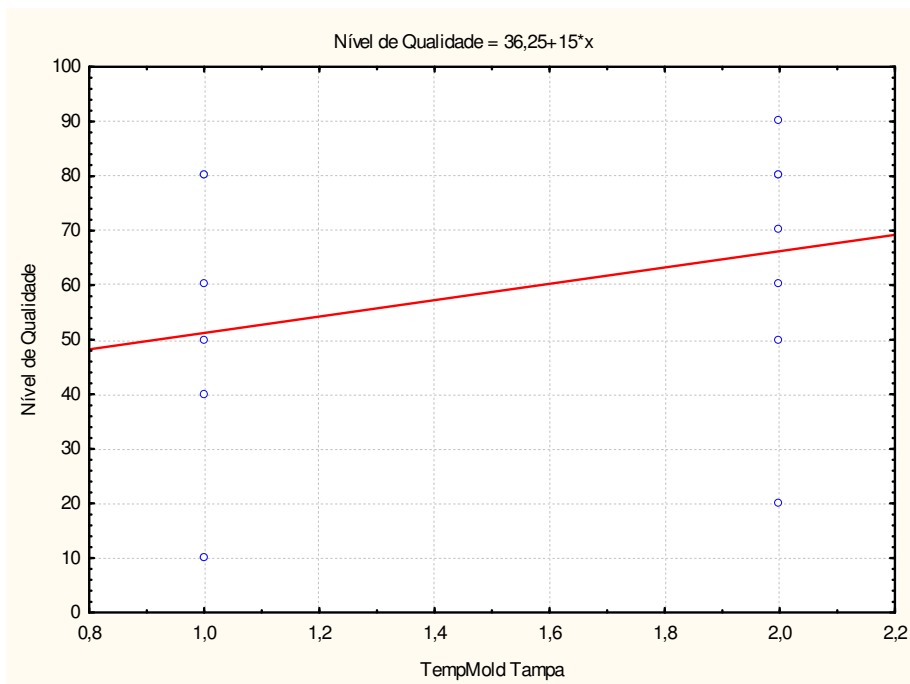


Figura 26 - Influência da temperatura do molde tampa no Nível de Qualidade

A variável nº 14 (areia de cobertura no vazamento), conforme Figura 27, demonstra ter melhor Nível de Qualidade (NQ) operando no nível 2, ou seja, rodas vazadas com a adição de areia na superfície do aço antes do vazamento no molde, podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrecheue, e rodas vazadas sem a adição de areia tem efeito contrário.

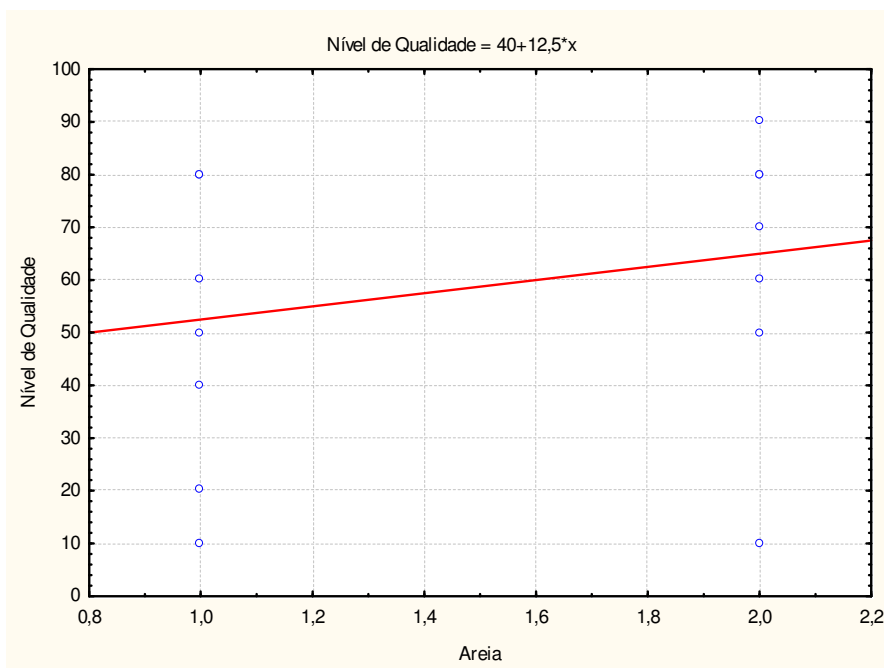


Figura 27 - Influência da areia de cobertura no Nível de Qualidade

Esta discussão inclina-se para a questão da manutenção da concentração de calor, podendo ter a mesma análise que a aplicada para as variáveis nº 2 e nº 5, já mencionadas anteriormente.

A variável nº 7 (teor de alumínio), conforme a Figura 28, demonstrou que operando no nível 1 obtém-se um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas com a adição de alumínio com percentuais igual ou abaixo de 0,009 % podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas vazadas com adição de alumínio com percentuais acima de 0,009% tem efeito contrário.

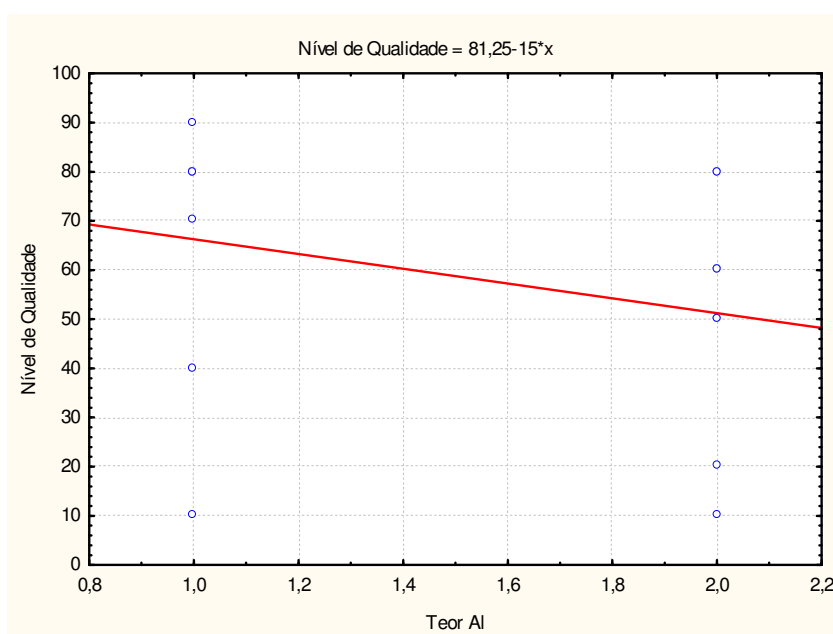


Figura 28 - Influência do teor de alumínio no Nível de Qualidade

Não foi encontrada uma razão técnica que relacione a adição de alumínio com a minimização de microrechupes nos aços fundidos para a fabricação de rodas com o processo de pressão controlada, no entanto o alumínio ao reagir com o oxigênio pode causar a criação de outro tipo de descontinuidade.

É o caso do alumínio, que adicionado ao aço pode ter como resultado a presença de inclusões de Al_2O_3 , mas a falta de desoxidação que a ausência do alumínio traria provocaria um efeito pior ainda nas características mecânicas, em função da presença de bolhas de gás disseminadas pela estrutura da peça. Mesmo sendo necessária a adição de elementos adicionais à composição química das ligas de fundição, é fundamental o controle criterioso da quantidade desses elementos a ser adicionada (GARCIA, 2001, p.366).

É possível que pequenas inclusões de Al_2O_3 podem ter sido formadas na estrutura das rodas experimentadas e quando do ensaio de ultra-som, as mesmas poderiam ter sido confundidas com os microrecupes ali contidos. Um ensaio não destrutivo de raios X ou cortes para análise micrográfica, nas seções onde se apresentam as descontinuidades, possibilitariam confirmar a presença ou não de pequenas inclusões de Al_2O_3 , o que não pôde ter sido realizado nesta pesquisa. Sugere-se aqui um novo trabalho de pesquisa para avaliar esta questão.

A variável nº 8 (pré aquecimento da panela), conforme Figura 29, demonstrou que operando no nível 1 obtém-se um melhor Nível de Qualidade (NQ), ou seja, rodas vazadas sem o pré aquecimento na panela podem colaborar com resultados melhores na diminuição da descontinuidade microrechupe, e rodas vazadas com o pré aquecimento tem efeito contrário.

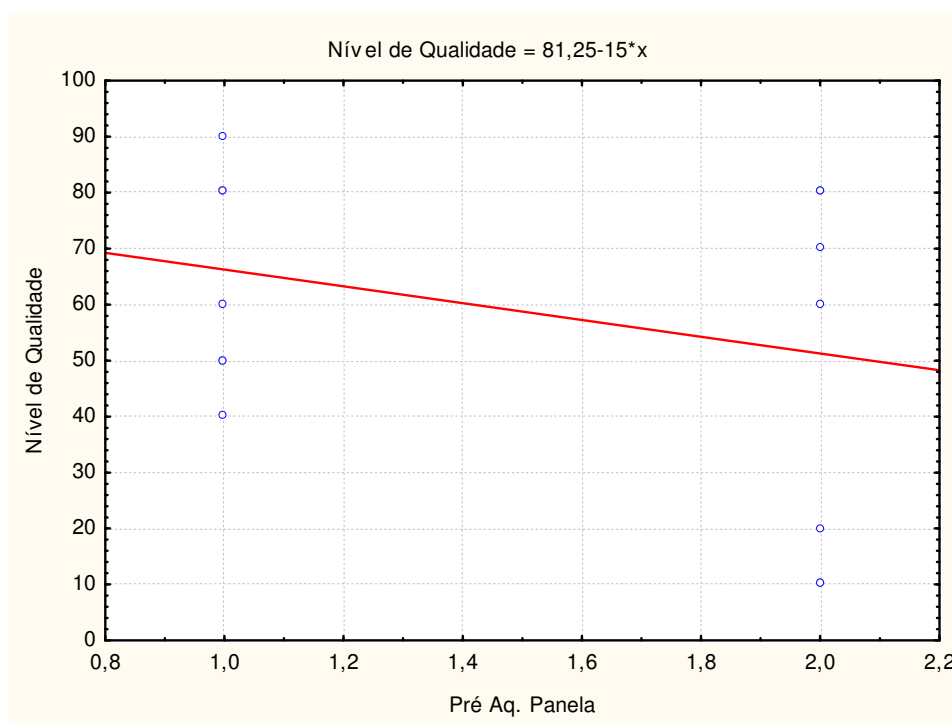


Figura 29 - Influência do pré-aquecimento da panela no Nível de Qualidade

Este resultado mostra-se contrário ao que diz respeito à manutenção da concentração de calor como forma de contribuir com a minimização dos microrechupes, conforme defendido para as variáveis com efeitos similares (variáveis

2, 3, 4, 5, 9 e 14), já discutidas anteriormente neste trabalho. Tal fato pode ser relacionado às possíveis causas:

- Existência de interação entre fatores: Utilizando-se do gráfico linear, mostrado na Figura 30, e para o caso particular aplicado neste trabalho, observa-se que o fator pré aquecimento da panela encontra-se no arranjo ortogonal localizado na coluna 8, que por sua vez é uma combinação entre a coluna 9 e a coluna 7, e desta forma o efeito do pré aquecimento da panela aparece confundido com os efeitos do teor de alumínio e da temperatura do molde da tampa antes da pintura. Um melhor entendimento desta possível existência de interação, só poderia ser esclarecido através da utilização de um novo planejamento de experimentos utilizando um arranjo ortogonal L-64, representando com isto 64 experimentos, o que seria totalmente inviável no contexto deste trabalho;

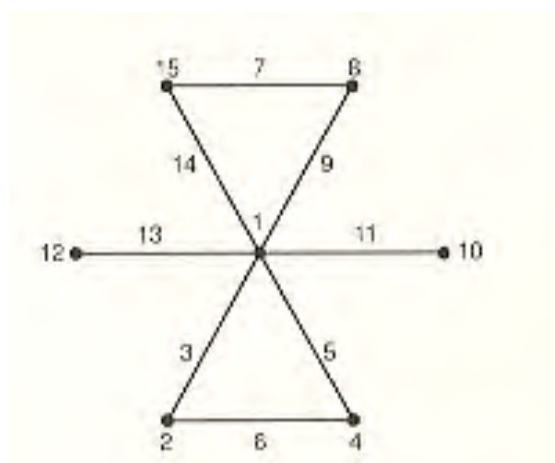


Figura 30 – Gráfico linear para arranjo ortogonal de Taguchi L-16 - Fonte: Ross (1991)

- Tempo de espera da panela pré-aquecida: Após o pré-aquecimento por maçarico, a panela aguarda por ser preenchida pelo aço produzido no forno elétrico (ver Figura 9). Como, para este trabalho, não houve medições deste tempo de espera, tampouco da temperatura média da panela antes de seu preenchimento, é provável que estas diferenças possam ter causado a discordância apresentada. Sugere-se neste caso uma pesquisa futura, considerando padrões de tempo e temperatura para o pré-aquecimento da panela.

4.3.3 Terceiro grupo de variáveis

Compõe este grupo:

- Variável número 1 (temperatura do metal no vazamento);
- Variável número 10 (temperatura do molde-fundo);
- Variável número 12 (tempo de cura do massalote central);
- Variável número 15 (temperatura de desoxidação);

As variáveis 1, 10, 12 e 15 não apresentaram efeito significativo na variável resposta microrechupe.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Os benefícios da condição ótima da relação Sinal/Ruído utilizada nas rodas D-38 experimentadas neste projeto podem ser testados, adaptados ou aperfeiçoados nos outros tipos de rodas produzidos pelo processo de fundição por pressão controlada, com os mesmos recursos de manufatura, sem aumento de custos, podendo melhorar consideravelmente a durabilidade e a confiabilidade dos produtos ferroviários.
- A execução deste tipo de pesquisa com a linha em plena produção foi um grande desafio, por exigir o acompanhamento *in loco*, para a correta obtenção dos registros e posteriores conclusões, junto à necessidade de produtividade diária pré-estabelecida pela empresa.

5 CONCLUSÕES

- Por meio do método de Taguchi foi possível investigar a influência de parâmetros do processo com relação às descontinuidades internas denominadas microrechupes. O método de Taguchi mostrou-se eficiente como ferramenta de planejamento, execução e análise de experimentos, para análise da roda ferroviária tipo D-38, obtida pelo processo de fundição sobre pressão controlada.
- O experimento de confirmação identificou a melhor combinação dos parâmetros experimentados e demonstrou que o processo pode ser otimizado de forma multivariada pelo uso do Método de Taguchi, podendo-se ter grande probabilidade de que a melhoria será reproduzível em alta escala de manufatura.
- O método para mensuração da variável resposta, estabelecida especificamente para este trabalho, mostrou-se consistente para identificar a composição entre as características que representam a variável resposta (quantidade e dimensões), tendo em vista a aplicação das variáveis com melhor Nível de Qualidade (NQ) no experimento de confirmação (item 4.2).

REFERÊNCIAS

ANASTASIOU, K.S. Optimization of the aluminium die casting process based on the Taguchi method. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Lamia, v.216, n.7, p.969-977, 2002.

ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS, Mechanical Division – **Specification M-107/208 – Standard wheels, cast carbon steels**, U.S.A.: AAR, 1998, p.G33-G48.

BARÃO, A.S. **Normas para o estudo de fabricação de peças fundidas**, MEC – Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, RJ – 1983.

BARKHUDAROV, M.; WILLIAMS, K. **Simulation of “surface turbulence” fluid phenomena during mold filling**. AFS Transactions, p. 699 – 674, 1995.

BERNASCONI, A.; FILIPPINI, M.; FOLETTI, S.; VAUDO, D. **Multiaxial fatigue of a railway wheel steel under non-proportional loading**. Int J Fatigue, 2006.

BERTO, R.M.V.S.; NAKANO, D.N. **A produção científica nos anais do encontro nacional de engenharia de produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa**. Produção (São Paulo), Rio de Janeiro, v.9, n.2, p.65-75, 2000.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978, 653p.

BRASIL. Ministério do Planejamento. **Programa de aceleração do crescimento 2007-2010**. Brasília: Governo Federal, 2007. 82p.

CASALINO, G.; DE FILIPPIS, L.A.C.; LUDOVICO, A. A technical note on the mechanical and physical characterization of selective laser sintered sand for rapid casting. **Journal of Materials Processing Technology**, 166, p.1-8, Bari, 2005.

EKBERG, A.; KABO, E.; ANDERSON, H. **An engineering model for prediction of rolling contact fatigue of railway wheels**. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 2002.

GARCIA, A. **Solidificação: fundamentos e aplicações**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. 399p.

GIL, A.C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas, 1991.

GORDON, J.; PERLMAN, A.B. **Estimation of residual stresses in railroad commuter car wheels following manufacture**. Proceedings, International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, ASME RTD, vol.15, p.13-18, 1998.

GÜLEY, V.; TEKKAYA A.E.; SAVAS, T.; ÖZHAN, F. Influence of heat treatment and grinding conditions on surface residual stresses in the production of rollers. **Materials Science Forum**, Zurich, v.524-525, p.317-322, sep.2006.

HSIANG S.-H; KUO J.-L.,. An investigation on the hot extrusion process of magnesium alloy sheet. **Journal of Materials Processing Technology**, 140, p.6-12, Taipei, 2003.

JI, C.H.; LOH, N.H.; KHOR, K.A.; TOR, S.B. Sintering study of 316L stainless steel metal injection molding parts using Taguchi method: final density. **Materials Science & Engineering**, A311, p. 74-82, Singapore, 2000.

LINK, G.R.; FESSLER, J.; NICKEL, A.; PRINZ, F. Rapid tooling die cast inserts using shape deposition manufacturing. **Materials and Manufacturing Processes**, New York, v.13, n.2, p.263-274, mar. 1998.

LIU, Y.; LIU, L.; MAHADEVAN, S. Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM. **Engineering fracture Mechanics**, Nashville, v.74, p.2659-2674, feb. 2007.

METALS HANDBOOK - AMERICAN SOCIETY FOR METALS, **Forging and Casting**, vol.5. Ohio, 1970, p.191.

MONTGOMERY, D.C. **Introduction to statistical quality control**. New York: John Wiley & Sons 4.ed, 2001. 520p.

MOURA, E.C.; Taguchi, S. **Aplicação prática da engenharia robusta**, Revista Banas Qualidade, São Paulo, edição de fevereiro/1999, p.82-85, edição de março/1999, p.60-63,. fev.-mar./1999.

MOURA, E.C. **Aplicação prática da engenharia robusta**, Revista Banas Qualidade, p. 60, ed. março, 1999.

MÜLLER, A. **Solidificação e análise térmica dos metais**, Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002. 278p.

NETO, B.B.; SCARMÍNIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995. 299p.

OSBORNE, M.O.; ARMACOST, R.L. Review of techniques for optimizing multiple quality characteristics in product development. **Elsevier Science Ltd**, Vol.31, No. ½, p. 107-110, Orlando, 1996.

OLDS, J.; WALBERG, G. **Multidisciplinary design of a rocket-based combined cycle SSTO launch vehicle using Taguchi methods**. AIAA/AHS/ASEE Aerospace Design Conference, Irvine, 1993. 12p.

PARK, S.H.; VINING, G.G. **Statistical process monitoring and optimization**. New York: Marcel Dekker, Inc., 2000. 489p.

RAMÓN, S.C. Método para la determinación de la tendencia al rechue de una fundición gráfica esferoidal. **Oficina Española de Patentes y Marcas**, Madrid, 2006.

ROSA, J.L.; ROBIN, A.; SILVA, M.B.; BALDAN, C.A.; PERES, M.P. Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach. **Journal of Materials Processing Technology**, v.inpres, p.1-31, 2008.

ROSS, P. J. **Aplicações das técnicas de Taguchi na engenharia da qualidade**, Makron Books do Brasil Editora Ltda., 1991. 333p.

ROY, R.K. **Design of experiments using the Taguchi approach : 16 steps to product and process improvement.** New York: John Wiley & Sons, 2001. 538p.

SHEVTSOV, I.Y.; MARKINE, V.L.; ESVELD, C. Optimal design of wheel profile for railway vehicles. **Wear, Elsevier B.V.**, 258, p.1022-1030, Delft, 2005.

SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** Universidade Federal de Santa Catarina. 3 ed., Florianópolis, SC, 2001.

SILVA, M.B.; ALMEIDA, C.R.O.; MATTOS, J.R.A.; CHAVES, F.J.M.; IZÁRIO FILHO, H.J. **Treatment of strong wastewater using advanced oxidation process (AOP) and biological process (BP) to reduction of chemical oxygen demand (COD) in samples from polyester manufacturing industry.** In: CONFERENCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL: MÉDIO AMBIENTE SIGLO XXI (MAS III), Santa Clara, 2003.

SILVA, G.; RIBEIRO, R.B.; SILVA, M.B. **Otimização da moagem de direto de nióbio utilizando o método de planejamento de experimentos de Taguchi.** Congresso em Ciência de Materiais – SULMAT, pp. 629-636, 2000.

SYRCOS, G.P. Die casting process optimization using Taguchi methods. **Journal of Materials Processing Technology**, 135, p. 68-74, Athens, 2003.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's quality engineering handbook.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 1662p.

TORRE, J. **Manual prático de fundição e elementos de prevenção da corrosão.** , HEMUS – Livraria Editora Ltda. – 1975.

TSAUR, J.-j.; DU, C.-H.; LEE, C. Investigation of TMAH for front-side bulk micromachining process from manufacturing aspect. **Elsevier Science B.V.**, Hsinchu, v.A92, p.375-383, 2001.

TSOUKALAS, V.D.; MAVROMMATIS, S.; ORFANOUDAKIS, N.G.; BALDOUKAS, A.K. A study of porosity formation in pressure die casting using the Taguchi approach. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, Suffolk, v.218, p.77-86, jan. 2004.

VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, V.P. Modeling and multi objective optimization of LM24 aluminium alloy squeeze cast process parameters using genetic algorithm, **Journal of Materials Processing Technology**, Coimbatore, 186, p.82-86, 2007.

VIJIAN, P.; ARUNACHALAM, V.P. Optimization of squeeze cast parameters of LM6 aluminium alloy for surface roughness using Taguchi method. **Journal of Materials Processing Technology**, Coimbatore, 180, p.161-166, 2006.

WU, D.H.; CHANG, M.S. Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process. **Materials Science & Engineering**, A379, p. 366-371, Taiwan, 2004.

WU, D.H.; CHIEN, W.T.; TSAI, Y.J. Applying Taguchi dynamic characteristics to the robust design of a piezoelectric sensor. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, Pingtung, v.52, n.3, p.480-486, mar. 2005.

WLODAWER, R. **Directional solidification of steel castings**. Oxford, Pergamon Press Ltd. – 1st Edition, 1966, Chapter 5, 5.2 Action of open feeder heads, p.28.

APÊNDICE A - Registros do experimento n° 1

Variáveis de Entrada	Experimento 1	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.590
2. N° corridas da luva	≤ 20	17
3. N° corridas da panela	0 a 12	12
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$< 15^a$	14^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	0,82
7. Teor de Alumínio (%)	$= < 0,009$	0,005
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	195
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	175
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	9
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	51
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.549

- N° de Série da roda: 375468

- Moldes utilizados: Tampa 1407 / Fundo 1412

- Corrida N.º: 45729/730

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE B - Registros do experimento n° 2

Variáveis de Entrada	Experimento 2	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.595
2. N° corridas da luva	≤ 20	6
3. N° corridas da panela	0 a 12	2
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$< 15^a$	14^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	0,92
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,008
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	> 200	208
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	> 193	220
11. Espessura da camada de tinta	> 10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	> 55	59
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	> 33	35
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	> 1.600	1.603

- N° de Série da roda: 373872

- Moldes utilizados: Tampa 1409 / Fundo 1404

- Corrida N.º: 45541/542

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE C - Registros do experimento n° 3

Variáveis de Entrada	Experimento 3	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.596
2. N° corridas da luva	≤ 20	13
3. N° corridas da panela	0 a 12	4
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	16^a
6. Relação Mn/Si	$> 1,1$	1,43
7. Teor de Alumínio (%)	$> 0,009$	0,011
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	177
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	160
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	9,5
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	> 55	58
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	> 33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	> 1.600	1.672

- N° de Série da roda: 2029
- Moldes utilizados: Tampa 1403 / Fundo 1412
- Corrida N.º: 45329/330
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE D - Registros do experimento n° 4

Variáveis de Entrada	Experimento 4	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.599
2. N° corridas da luva	≤ 20	15
3. N° corridas da panela	0 a 12	10
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	21^a
6. Relação Mn/Si	$> 1,1$	1,82
7. Teor de Alumínio (%)	$> 0,009$	0,014
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	> 200	212
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	> 193	239
11. Espessura da camada de tinta	> 10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	$= < 1.600$	1.585

- N° de Série da roda: 4979
- Moldes utilizados: Tampa 1415 / Fundo 1416
- Corrida N.º: 45671/672
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE E - Registros do experimento n° 5

Variáveis de Entrada	Experimento 5	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.593
2. N° corridas da luva	> 20	63
3. N° corridas da panela	13 a 24	21
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$< 15^a$	14^a
6. Relação Mn/Si	$> 1,1$	1,31
7. Teor de Alumínio (%)	$> 0,009$	0,012
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	190
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	> 193	204
11. Espessura da camada de tinta	> 10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	> 1.600	1.692

- N° de Série da roda: 371893

- Moldes utilizados: Tampa 1407 / Fundo 1404

- Corrida N.º: 45314/315

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE F - Registros do experimento n° 6

Variáveis de Entrada	Experimento 6	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.595
2. N° corridas da luva	>20	76
3. N° corridas da panela	13 a 24	13
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$<15^a$	12^a
6. Relação Mn/Si	$>1,1$	1,29
7. Teor de Alumínio (%)	$>0,009$	0,012
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	240
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	193
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	10
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	59
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.587

- N° de Série da roda: 372197
- Moldes utilizados: Tampa 1407 / Fundo 1404
- Corrida N.º: 45354/355
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE G - Registros do experimento n° 7

Variáveis de Entrada	Experimento 7	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.594
2. N° corridas da luva	>20	32
3. N° corridas da panela	13 a 24	16
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	18^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	0,92
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,007
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	170
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	>193	215
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	57
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	35
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.580

- N° de Série da roda: 373649

- Moldes utilizados: Tampa 1409 / Fundo 1404

- Corrida N.º: 45517/518

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE H- Registros do experimento n° 8

Variáveis de Entrada	Experimento 8	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.593
2. N° corridas da luva	>20	40
3. N° corridas da panela	13 a 24	24
4. N° corridas do tubo	2	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	17^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	1,09
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	235
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	187
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	10
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	51
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	29
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	>1.600	1.654

- N° de Série da roda: 373813
- Moldes utilizados: Tampa 1409 / Fundo 1404
- Corrida N.º: 45535/536
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE I - Registros do experimento n° 9

Variáveis de Entrada	Experimento 9	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.610
2. N° corridas da luva	≤ 20	4
3. N° corridas da panela	13 a 24	22
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	18^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	0,95
7. Teor de Alumínio (%)	>0,009	0,021
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	234
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	180
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	>1.600	1.608

- N° de Série da roda: 375207
- Moldes utilizados: Tampa 1417 / Fundo 1412
- Corrida N.º: 45698/699
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE J - Registros do experimento n° 10

Variáveis de Entrada	Experimento 10	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.605
2. N° corridas da luva	≤ 20	9
3. N° corridas da panela	13 a 24	16
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	16^a
6. Relação Mn/Si	$\leq 1,1$	0,96
7. Teor de Alumínio (%)	>0,009	0,015
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	182
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	>193	209
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	9,5
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	58
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.544

- N° de Série da roda: 372261
- Moldes utilizados: Tampa 1403 / Fundo 1400
- Corrida N.º: 45359/560
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE L - Registros do experimento n° 11

Variáveis de Entrada	Experimento 11	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.605
2. N° corridas da luva	≤ 20	9
3. N° corridas da panela	13 a 24	24
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	<15 ^a	13 ^a
6. Relação Mn/Si	>1,1	1,31
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,009
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	215
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	155
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	60
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.500

- N° de Série da roda: 371950
- Moldes utilizados: Tampa 1409 / Fundo 1412
- Corrida N.º: 45320/321
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE M - Registros do experimento n° 12

Variáveis de Entrada	Experimento 12	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.605
2. N° corridas da luva	≤ 20	6
3. N° corridas da panela	13a 24	24
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	<15 ^a	14 ^a
6. Relação Mn/Si	>1,1	1,33
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,004
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	188
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	>193	232
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	9
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	>1.600	1.610

- N° de Série da roda: 375248

- Moldes utilizados: Tampa 1417 / Fundo 1412

- Corrida N.º: 45702/703

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE N - Registros do experimento n° 13

Variáveis de Entrada	Experimento 13	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.607
2. N° corridas da luva	>20	47
3. N° corridas da panela	0 a 12	8
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	19^a
6. Relação Mn/Si	>1,1	1,47
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,001
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	211
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	>193	230
11. Espessura da camada de tinta	≤ 10	10
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	51
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	≤ 1.600	1.584

- N° de Série da roda: 373974

- Moldes utilizados: Tampa 1421 / Fundo 1416

- Corrida N.º: 45554/555

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE O - Registros do experimento n° 14

Variáveis de Entrada	Experimento 14	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.610
2. N° corridas da luva	>20	31
3. N° corridas da panela	0 a 12	5
4. N° corridas do tubo	1	1
5. Posição relativa da roda na corrida	$\geq 15^a$	15^a
6. Relação Mn/Si	>1,1	1,45
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,007
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤ 200	180
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤ 193	182
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	59
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤ 33	31
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	>1.600	1.642

- N° de Série da roda: 372048
- Moldes utilizados: Tampa 1403 / Fundo 1402
- Corrida N.º: 45332/333
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE P - Registros do experimento n° 15

Variáveis de Entrada	Experimento 15	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.609
2. N° corridas da luva	>20	50
3. N° corridas da panela	0 a 12	7
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	<15 ^a	14 ^a
6. Relação Mn/Si	≤1,1	0,92
7. Teor de Alumínio (%)	>0,009	0,01
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	>200	230
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	>193	205
11. Espessura da camada de tinta	≤10	10
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	>55	60
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	≤33	30
14. Areia de cobertura no vazamento	Não	Não
15. Temperatura de desoxidação	>1.600	1.605

- N° de Série da roda: 371625

- Moldes utilizados: Tampa 1417 / Fundo 1404

- Corrida N.º: 45285/286

- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE Q - Registros do experimento n° 16

Variáveis de Entrada	Experimento 16	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	>1.600	1.602
2. N° corridas da luva	>20	32
3. N° corridas da panela	0 a 12	8
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	<15 ^a	14 ^a
6. Relação Mn/Si	≤1,1	0,73
7. Teor de Alumínio (%)	>0,009	0,012
8. Pré-aquecimento da panela	Sim	Sim
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	≤200	175
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	≤193	170
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	36
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Não
15. Temperatura de desoxidação	≤1.600	1.522

- N° de Série da roda: 375392
- Moldes utilizados: Tampa 1407 / Fundo 1410
- Corrida N.º: 45719/720
- Responsável: Ribeiro

APÊNDICE R - Registros do experimento de confirmação

Variáveis de Entrada	Experimento 16	
	Especificado	Encontrado
1. Temperatura do metal no vazamento	≤ 1.600	1.593
2. N° corridas da luva	>20	63
3. N° corridas da panela	13 a 24	23
4. N° corridas do tubo	2	2
5. Posição relativa da roda na corrida	$<15^a$	11^a
6. Relação Mn/Si	$>1,1$	1,66
7. Teor de Alumínio (%)	$\leq 0,009$	0,003
8. Pré-aquecimento da panela	Não	Não
9. Temperatura do molde-tampa antes da pintura	> 200	210
10. Temperatura do molde-fundo antes da pintura	> 193	212
11. Espessura da camada de tinta	>10	12
12. Tempo de cura (Core Baker) massalote central	≤ 55	50
13. Tempo de cura (Core Baker) massalotes radiais	>33	37
14. Areia de cobertura no vazamento	Sim	Sim
15. Temperatura de desoxidação	> 1.600	1.662

- N° de Série da roda: 76947

- Moldes utilizados: Tampa 1423 / Fundo 1400

- Corrida N.º: 45916/9170

- Responsável: Ribeiro