

LUIZ HENRIQUE DIAS ALVES

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE TAGUCHI NA MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO
DE VAZIOS RELACIONADOS À SOLIDIFICAÇÃO EM PROCESSO DE
FUNDIÇÃO DE AÇO ABNT 1030

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na linha de pesquisa de Gestão e Otimização.

Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

Guaratinguetá
2009

Alves, Luiz Henrique Dias
A4 Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de
74 vazios relacionados à solidificação em processos de fundição de aço
u ABNT 1030 / Luiz Henrique Dias Alves - Guaratinguetá : [s.n.], 2010.
148f. : il.
Bibliografia: f. 133

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de
Engenharia de Guaratinguetá, 2010.
Orientador: Prof. Dr. Messias Borges Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

1. Fundição 2. Taguchi, método de (Controle de qualidade)
3. Solidificação I. Título

CDU 621.74

DADOS CURRICULARES

LUIZ HENRIQUE DIAS ALVES

NASCIMENTO	09.11.1959 – JUIZ DE FORA / MG.
FILIAÇÃO	José Maria Duque Alves Maria Helena Dias Alves
1979/1984	Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica Plena na Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense (UFF).
1996/2000	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP).
2007/ 2009	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, linha de Gestão e Otimização, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista (UNESP).
1984/ 2009	25 Anos de trabalho em Fundições de Ferro e Aço, atuando como Engenheiro, Supervisor de Produção, Gerente de Produção e Gerente Industrial.

Com um carinho muito especial dedico este trabalho à minha esposa Edna, aos meus filhos Luiz Henrique, Melina e Arthur, aos meus pais José Maria e Maria Helena e aos meus avós Dias e Anita (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, amigo e amado irmão Prof. Dr. Messias Borges Silva pelos ensinamentos, orientação, dedicação e apoio.

Ao Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins, meu co-orientador, pelo apoio e orientação.

Ao Prof. Dr. Amilton Sinatora, pela amizade, conselhos e orientação.

Aos Membros da banca, Professores Doutores Antônio Fernando Branco da Costa, Marcela Aparecida Guerreiro Machado, Rosinei Batista Ribeiro, por aceitarem participar desta parte fundamental da pesquisa, orientando-me.

Aos Professores do Departamento de Produção da FEG pelos ensinamentos passados nas aulas e seminários.

Ao Engenheiro José Antônio Correia Rodrigues, em quem procuro me referenciar, pela sua capacidade empreendedora, pelos ensinamentos e incentivo.

Ao Prof. Dr. Sérgio Sodré pela amizade, apoio e ensinamentos.

À Amsted Maxion por ter me permitido desenvolver a pesquisa e pelo apoio.

Ao Amigo Eduardo Monteiro, pelas proveitosas conversas, apoio e amizade.

À Patrícia Baptistela, ao Prof. M.Sc. Alexandre e todos os colegas da FACIC pelo apoio e incentivo.

Aos Amigos da Amsted Maxion André Machado, Carlos Renato, Jardim, José Carlos, Leoni, Luiz Carlos(SJ), Mariana, Mark, Marcio Nascimento e Maury, que me deram todo apoio e incentivo para desenvolver esta pesquisa.

À Renata Garcez, Ingrid Meirelles e Camila Araújo pela ajuda e dedicação no desenvolver da pesquisa.

ALVES, L. H. D. Utilização do Método de Taguchi na Modelagem e Otimização de Vazios Relacionados à Solidificação em Processos de Fundição de Aço ABNT 1030I. 2009. 148 P. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Gestão e Otimização) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

RESUMO

O grande número de variáveis envolvidas no processo de fundição de aço o torna muito susceptível a ocorrência de defeitos relacionados à solidificação como rechupes e poros, que elevam o custo de fabricação devido ao sucateamento e retrabalho de peças. Explorando oportunidades neste cenário, esta Tese de Doutorado, desenvolvida dentro do ambiente industrial de uma fundição de aço propõe um modelo matemático capaz de prever a combinação de níveis de variáveis de processo que minimizam a ocorrência de rechupes e poros relacionados à solidificação em peças fundidas em aço ABNT 1030, moldadas em areia com aglomerante químico e vazamento por gravidade. Empregou-se, no desenvolvimento do trabalho o Planejamento Estatístico de Experimentos com fatorial fracionado na fase exploratória e o método de Taguchi para validação final e desenvolvimento do Modelo matemático. Na fase de validação, utilizou-se um arranjo ortogonal L16 com quatro réplicas. Na fase exploratória, avaliou-se o volume de defeito em uma peça de produção normal da fundição. Na fase de validação, desenvolveram-se corpos de prova em forma de cubo, vazados sem alimentação. Depois de produzidos, os corpos de prova passavam por ensaio de ultrassom para identificação e localização do defeito e corte de serra, para posterior medição do volume do defeito. O sistema de medição foi validado por meio de um estudo de Análise do Sistema de Medição – MSA GR&R. Os resultados dos experimentos mostraram uma grande diferença entre a contração teórica prevista na literatura de 5,5% para o aço estudado para 2% determinado experimentalmente. As variáveis que mais influenciaram no tamanho do defeito foram: o percentual de carbono queimado no processo de elaboração do aço, percentual de alumínio na liga, percentual de óxido de ferro na areia de moldagem e a interação entre a temperatura de vazamento e o percentual de carbono queimado no processo de elaboração do aço. O modelo matemático foi validado através de experimentos, que demonstraram um bom comportamento na predição dos defeitos.

PALAVRAS-CHAVE: Taguchi; Vazios de Solidificação; Processos de Fundição de Aço ABNT 1030.

ALVES, L. H. D. Modeling and optimization of voids related to solidification in steel casting process for ABNT 1030 using the Taguchi approach. 2009. 148 P. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica – Área de Concentração em Gestão e Otimização) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

ABSTRACT

The number of variables involved in the steel foundry process makes it susceptible to the occurrence of defects related to the solidification, like shrinkages and pores. This charge the foundries scrap and rework costs. Exploring the opportunities at this context, this Thesis, developed inside an industrial environment of a steel foundry, purposes a mathematic model capable to predict the combination of levels of variables that minimizes the occurrence of shrinkage and pores in carbon steel cast parts, through no-bake sand molding and gravity pouring processes. Statistical Design of Experiments with fractional and factorial at the screening step and Taguchi Method for the final validation and development of the mathematic model were used. A L16 orthogonal array with four replicates was used in the validation step. The defect volume inside a regular cast part was evaluated in the screening step. In the validation step, cube form specimens were designed, poured without feeders and ultrasound tested to bound the defect then saw cut to measure the defect's volume. In order to the validation of the measurement system, a MSA – Measurement Systems Analysis and Gauge R & R - Gauge Repeatability and Reproducibility were used. The experiments results shown a considerable difference between the theoretical expected contraction, 5.5%, and the 2% experimentally determined. The variables that influenced the defect size the most were: the carbon drop in the steel making, the Aluminum content of the alloy, the Black Iron Oxide content of the molding sand and the interaction between the pouring temperature and the carbon drop. The mathematic model was validated by experiments, which showed a good performance in the prediction of defects.

KEYWORD: Taguchi; Voids related to solidification; ABNT 1030 Steel Casting Process.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Representação esquemática do processo de fundição	28
FIGURA 2: Seção de um cubo de aço fundido apresentando rechupe.....	31
FIGURA 3: Representação gráfica da contração volumétrica desde a temperatura de vazamento até o ambiente.....	33
FIGURA 4: Sequência esquemática de contração de solidificação em um cubo de aço	34
FIGURA 5: Solidificação direcional para o alimentador ou massalote	35
FIGURA 6: Modo de solidificação de um metal puro e uma liga com pequeno intervalo de solidificação	39
FIGURA 7: Raio de ação ou distância de alimentação de massalotes para geometrias em forma de chapa	40
FIGURA 8: Distância de alimentação para geometrias em forma de barra de aço	41
FIGURA 9: Efeito do resfriador na distância de alimentação ou raio de ação do massalote (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL,1996)....	42
FIGURA 10: Procedimento para determinação das dimensões do massalote utilizando o método NRL (Adaptado de Plutshack e Suschil,1996).....	43
FIGURA 11: Módulo para formas geométricas simples (Adaptado de Maehara, 1991).....	45
FIGURA 12: Seção de um cubo de aço fundido com 100mm de aresta com massalotes	48
FIGURA 13: Classificação dos massalotes (Adaptada de Brown,2000)...	49
FIGURA 14: Macho atmosférico em massalotes em areia e concentradores de calor em luvas (Adaptado de Maehara, 1996).....	52
FIGURA 15: Esquema da Reação Química Do Processo Fenólico Uretânico (Galante <i>et al</i> ,1997).....	64
Figura 16: Peça selecionada para estudo exploratório ou “Screening”	86

Figura 17: Método de medição do defeito (GARCEZ e ALVES, 2006).....	87
Figura 18: Modelo utilizado nos experimentos com respectivo posicionamento dos corpos de prova.....	89
Figura 19: Corpos de prova preparados e sendo realizado ensaio de ultrassom.....	91
Figura 20: Corpos de prova sendo realizado ensaio de ultrassom e corpo de prova já com as linhas para corte de serra traçadas.....	91
Figura 21: Corpos de prova já serrados.....	91
Figura 22: Ilustração do sistema e da sequência de medição.....	94
Figura 23: Gráfico linear para o L16 de Taguchi utilizado nos experimentos (Adaptado de Taguchi <i>et al</i> , 2005).....	100
Figura 24: Representação gráfica do efeito das variáveis e interações mais importantes na resposta quando passam do nível baixo para o alto.....	105
Figura 25: Representação gráfica da razão S/N.....	106
Figura 26: Representação gráfica do efeito de todas as variáveis e interações na resposta quando passam do nível baixo para o alto.....	107
Figura 27: Representação gráfica da razão S/N.....	110
Figura 28: Seção de quatro corpos de prova de experimentos diferentes.....	111
Figura 29: Seção de 2 corpos de prova da condição experimental 8 e 2 corpos de prova da condição experimental 5.....	111
Figura 30: Comparação do tamanho do rechupe com padrões radiográficos conforme ASTM a 447, 2008.....	113
Figura 31: Comparação do tamanho do defeito com padrões radiográficos conforme ASTM a 447, 2008 para poros internos.....	114
Figura 32: Foto micrografia obtida por MEV mostrando rechupes e poros apresentados em corpo de prova da condição experimental 8.....	116

Figura 33: Análise química por EDS de raios-X na região próxima ao poro indicada como S na figura 10 D.....	116
Figura 34: Detalhe de um dos defeitos apresentados em um dos corpos de prova da condição experimental 8 obtido por foto micrografia em MEV.....	117
Figura 35: Contração teórica calculada a partir da composição química e temperatura de vazamento dos experimentos.....	119
Figura 36: Comportamento do modelo em relação aos valores médios obtidos nos experimentos.....	125
Figura 37: Representação gráfica do resultado dos experimentos de teste comparados com os previstos pelo modelo.....	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis estudadas e seus níveis para os experimentos exploratórios.....	84
Tabela 2: Arranjo ortogonal utilizado para análise exploratória.....	85
Tabela 3: Faixa de composição química do aço utilizado nos Experimentos.....	90
Tabela 4: Resultado da análise do sistema de medição(GRR).....	96
Tabela 5: Resultado dos experimentos exploratórios com o valor da média de volume de defeitos e valor da contribuição na resposta.....	96
Tabela 6: Variáveis avaliadas na segunda etapa de experimentos.....	98
Tabela.7: Arranjo Ortogonal L16 utilizado como Matriz de experimento..	100
Tabela 8: Volume do rechupe por experimento e valores da média e razão (S/N).....	101
Tabela 9: Análise de variância para média dos efeitos nas respostas.....	105
Tabela 10: Análise de variância para a razão Sinal/Ruído(S/N).....	106
Tabela 11: Análise de variância para média dos efeitos nas respostas....	108
Tabela 12: Análise de variância para a razão Sinal/Ruído(S/N).....	109
Tabela 13: Resultado dos experimentos para teste do modelo.....	126
Tabela 14: Comparação dos resultados dos experimentos de confirmação com os experimentos iniciais conforme tabela 8.....	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABIFA - Associação Brasileira das Indústrias de Fundição
- AFS - American Foundry Society (Sociedade Americana de Fundições)
- ASM - American Society of Materials (Sociedade Americana de Materiais)
- ASTM - American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Teste e Materiais)
- GLP - Gás Liquefeito de Petróleo
- GRR - Gauge repeatability & Reproducibility
- MSA - Measurement Systems Analysis
- NRL - U. S. Naval Research Laboratory (Laboratório de Pesquisas Navais dos Estados Unidos da América)
- PEE - Planejamento estatístico de experimentos
- S/N - Razão Sinal-Ruído de Taguchi

LISTA DE SÍMBOLOS

(+) (-) – Níveis alto e baixo que os fatores podem assumir

μ^2_i – Valor médio ao quadrado;

A – n° de níveis e K – n° de fatores

CE – Porcentual de Carbono equivalente

Ci – Contribuição do fator

Ei – Efeito do i-ésimo fator

fc – Fator de forma

k - Coeficiente que depende das condições de funcionamento do massalote

L – Comprimento; W – Largura; T – Espessura da seção

Mc – Módulo da seção; Mr – Módulo do massalote

n – Número de observações

$n^{(-)}$ – número de condições experimentais no nível (-)

$n^{(+)}$ – número de condições experimentais no nível (+)

P_{MSR} – Pressão ou Resistência ao suprimento de metal

r – Coeficiente de contração volumétrica do metal

S/N – Razão Sinal/Ruído

Vm – Volume do massalote; Vp – Volume da peça sólida

x_1, x_2, x_n – Representa os fatores

Y – Preditor da resposta

$y^{1(-)}, y^{2(-)}, \dots, y^{n(-)}$ – respostas encontradas no nível (-)

$y^{1(+)}, y^{2(+)}, \dots, y^{n(+)}$ – respostas encontradas no nível (+)

y^2_i – Quadrado do valor da observação;

β_0 – Grande média dos experimentos

$\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$ – Efeito dos fatores e interações

ε – Representa o resíduo do modelo preditor

ρ_l – Densidade do metal líquido; ρ_s – Densidade do metal líquido

σ^2 – Variância.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIações

LISTA DE SÍMBOLOS

I – INTRODUÇÃO	15
1.1 Motivação	18
1.2 Objetivos	19
1.2 Delimitação do Tema e Contribuição do Modelo Proposto	20
1.3 Estrutura do trabalho	20
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 Técnicas de Pesquisa	22
2.1.1 Documentação Indireta	22
2.1.1.1 Pesquisa Documental	23
2.1.2 Pesquisa Bibliográfica	23
2.1.3 Pesquisa de Campo	23
2.1.4 Observação Direta Intensiva	26
2.1.5 Observação Direta Extensiva	27
2.2 Fundição	28
2.2.1 Formação de Rechupes	32
2.2.2 Projeto de Massalotes para Peças de Fundidos de Aço	39
2.2.3 Tipos de Massalotes	48
2.2.4 Variáveis do Processo de Fundição de Aço que afetam a formação de rechupe	53
2.2.4.1 Temperatura de Vazamento	53
2.2.4.2 Processo de elaboração do Aço	55
2.2.4.3 Composição Química e Carbono equivalente no Aço Líquido	59
2.2.4.4 Processos de Moldagem em Areia	61
A) Aplicação por Pincel	67
B) Aplicação por Imersão	68
C) Aplicação por Spray ou Aspersão	68
D) Aplicação por Lavagem	69
2.2.5 Planejamento Estatístico de Experimentos	70
2.2.5.1 Experimentos Fatoriais Completos	71
2.2.5.2 Construção da Matriz Experimental	71
2.2.5.3 Cálculo dos Efeitos	72
2.2.5.4 Modelo Matemático Linear	73
2.2.5.5 Análise da Contribuição	73
2.2.5.6 Experimentos Fatoriais Fracionados do tipo 2^{k-P}	74
2.2.5.7 Método de Taguchi	76

2.2.5.8 Resumo de alguns artigos que empregaram o PEE ou o Método de Taguchi em otimização de processos ou Melhoria de Qualidade.....	80
2.3 Conclusões da Revisão Bibliográfica.....	81
3. MATERIAIS E MÉTODOS	83
3.1 Experimentos Exploratórios.....	83
3.2 Segunda Etapa de Experimentos.....	88
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1 Avaliação do Sistema de Medição.....	95
4.2 Experimentos Exploratórios.....	96
4.3 Segunda Etapa de Experimentos ou Experimentos Empregando o Método de Taguchi.....	99
4.3.1 Definição do Arranjo Ortogonal.....	99
4.3.2 Resultado da segunda etapa de Experimentos (Método Taguchi).101	
4.3.2.1 Análise Gráfica dos Efeitos, da Razão Sinal/Ruído (S/N) e Análise de Variância.....	104
4.3.2.2 Caracterização dos Defeitos e Discussão dos Resultados.....	110
4.4 Modelo Preditor.....	124
5. CONCLUSÕES	129
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133
ANEXO 1 Modelos de Massalotes.....	141
ANEXO 2 Cálculo do MSA – GRR (Sistema de Medição).....	143
ANEXO 3. Arranjos Ortogonais de Taguchi.....	145
ANEXO 4. Cálculo dos Efeitos e Modelos.....	148

1. INTRODUÇÃO

Uma grande preocupação das fundições de aço que utilizam processos de moldagem em areia e vazamento por gravidade está relacionada à variabilidade de processo. Nem sempre utilizar softwares que contribuem para prevenir a ocorrência de defeitos ou mesmo simular a solidificação é uma garantia de obtenção de fundidos com sanidade interna adequada ao atendimento das especificações requeridas pelos clientes. É comum se verificarem em determinado lote de produção, peças aprovadas e peças rejeitadas por apresentarem defeitos internos, detectados por ensaio de ultrassom e relacionados à solidificação. Estes defeitos podem gerar retrabalho nos fundidos ou mesmo sucateamento, dependendo de sua gravidade.

Esta variabilidade no processo sugere que as variáveis, normalmente utilizadas para simular a solidificação ou a ocorrência de um defeito interno em processos de fundição de aço, tais como percentual de carbono ou carbono equivalente, presença de elementos de liga, temperatura de vazamento, tipo de areia de moldagem e emprego de resfriadores são insuficientes ou inadequadas. Assim deve haver outras variáveis atuando no processo ou, ainda, devem ocorrer interações com algumas variáveis, potencializando o efeito de outras e levando à ocorrência de defeitos relacionados à solidificação, como rechupes ou uma mistura de rechupes e poros internos (MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005; VIJAYARAM, 2006).

Para garantir a sanidade interna dos fundidos em relação à formação de defeitos como rechupes, ou vazios de contração, são utilizados massalotes ou alimentadores, que funcionam como um reservatório de metal líquido, dimensionado e posicionado na seção, de maneira a alimentá-la, de modo que se forme dentro dele o vazio que se formaria no fundido face às contrações volumétricas (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996). Após solidificação e resfriamento, os massalotes ou alimentadores serão removidos das peças na fase de

rebarbação ou acabamento e retornam para a fusão como sucata ou retorno de fundição. O uso de massalotes é necessário para compensar a contração volumétrica que ocorre durante a solidificação. Mas, sua presença significa custo e diminuição no rendimento metálico, que é a relação entre o peso líquido do fundido e o peso total do fundido. Logo, minimizar o uso de massalotes e ainda garantir a sanidade interna da peça deve ser uma busca constante nas fundições (AFS. *Analysis of Casting Defects*, 1994 p.111; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; BLAIR, *et al*, 2005; STEFANESCU, 2005).

Além da deficiência de alimentação, os rechupes podem, ainda, ser causados por variações no processo que, de alguma maneira, possam interferir na solidificação, como composição química do metal, nível de desoxidação, ou ainda a parâmetros operacionais como temperatura de vazamento, velocidade de resfriamento imposta pelo material do molde ao metal líquido durante a solidificação e resistência à compressão da areia (AFS. *Analysis of Casting Defects*, 1994 p.111; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; BLAIR, *et al*, 2005; STEFANESCU, 2005; KANNO, 2008).

Plutshack e Suschil (1996) relatam que muitas destas variáveis podem ser afetadas por ruídos externos como temperatura ambiente, umidade, poeiras e ainda desgaste de equipamentos ou mesmo pelo fator humano, uma vez que de maneira geral os processos de fundição de aço ainda são muito dependentes da atuação direta do homem, ou seja, são processos manuais ou semi-automatizados.

O conceito de projeto robusto para processo e produto introduzido por G.Taguchi (1987) procura tornar tanto o processo quanto o produto insensíveis às perturbações ou ruídos que, ocasional ou sistematicamente, afetam a variabilidade do processo, podendo causar imperfeições nos produtos. Obter um projeto robusto exige reduzir a variabilidade entre unidades produzidas, diminuir os problemas com produto e processo e sustentar seu desempenho frente ao ambiente que está sendo empregado. Para tal, o conhecimento das variáveis

que atuam no processo, bem como dos ruídos e as possíveis interações entre as variáveis deve receber atenção especial durante a fase de projeto e definição de processo (TAGUCHI, 1986; FIOD NETO, 1997; OKTEM; UZMAN, 2007; RAGHUNATH; PANDAY, 2007).

O planejamento estatístico de experimentos-PEE (AZEREDO, 2001; MONTGOMERY *et al*, 2004) tem mostrado ser um método eficaz de análise das variáveis de um processo e suas interações, bem como das suas influências em uma resposta. O PEE permite ainda o desenvolvimento de processos e o estabelecimento de modelos previsores da ocorrência de um defeito, maximização de um resultado, etc.

Como, durante o processo de produção de uma peça fundida podem ocorrer interações entre as variáveis e estas interações também podem ser afetado por ruídos, comprometendo o seu desempenho, um estudo que leve em consideração estas interações, como o planejamento estatístico de experimentos, pode tornar o processo ou produto robusto.

A presente Tese de Doutorado avalia, usando ferramentas estatísticas definidas pelo PEE, a ocorrência de rechupe e poros na solidificação em cubos de aço fundido e propõe um modelo para predizer quais variáveis e seus respectivos níveis minimizam a ocorrência destes defeitos.

1.1 Motivação

Os maiores custos de fabricação envolvidos em um processo de fundição de aço em moldes de areia estão relacionados ao metal e contemplam os custos de transformação com energia e refratário e de matéria prima com sucata e ligas. Uma redução em torno de 10 % neste custo chega a representar 5% no custo final.

A maneira mais efetiva de diminuir o impacto do custo do metal na peça é por meio do aumento do rendimento metálico que é a relação entre o peso líquido da peça e o peso bruto ou total de metal para produzi-la.

Numa experiência prática proposta e realizada com sucesso no ano de 2006 na fundição da Amsted Maxion, um novo projeto de alimentação para certa família de peças, proporcionou um ganho de 36% no rendimento metálico se comparado com o anterior, realizado com o emprego de softwares que se baseiam nos modelos clássicos de alimentação, passando o rendimento metálico de 60% para 82%. Isto fez voltar a ser lucrativa uma família de produtos que devido à valorização do Real tinha deixado de ser atraente de ser produzida. Mas, ao confrontar-se o novo projeto com a literatura clássica de alimentação, levantou-se a pergunta: Porque deu certo o projeto?

Somado ao problema do baixo rendimento metálico, a variabilidade no que diz respeito à sanidade interna dos fundidos é muito grande, o que sugere que os modelos clássicos para dimensionamento da alimentação não são eficazes, pois ou superdimensionam a alimentação ou não garantem a sanidade interna dos fundidos de aço. Como os softwares empregados em fundição de aço no dimensionamento de massalotes e simulação da solidificação se baseiam na literatura clássica, o emprego deles não é uma garantia para a sanidade interna da peça e nem para a otimização no dimensionamento da alimentação.

Face a este cenário de possibilidades de melhoria de qualidade e redução de custos para as indústrias de fundição de aço, desenvolveu-se a pesquisa.

1.2 Objetivos

Este trabalho, desenvolvido dentro do ambiente industrial de uma fundição de aço, tem como principal objetivo propor um modelo capaz de prever a combinação de níveis de variáveis de processo que minimizam a ocorrência de rechupes e poros, durante a produção de peças de aço fundido em moldes de areia ligados com aglomerantes químicos e vazamento por gravidade.

Para realização do objetivo principal torna-se necessário:

- Caracterizar, por meio de análise de morfologia e topografia, os defeitos formados na fase final de solidificação em processos de fundição de aço, empregando por microscopia eletrônica de varredura;
- Evidenciar, empregando padrões visuais e microanálise química por EDS- (Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios-X), a presença de gases e óxidos formados junto com o vazio de final de solidificação;
- Empregar o método de Taguchi como uma ferramenta para análise e solução de problemas de fundição relacionados à solidificação.
- Ter um melhor entendimento do processo de formação de vazios de solidificação em peças de aço fundido e identificar outras variáveis de processo que influenciam na ocorrência do defeito e não são citadas na literatura clássica;
- Contribuir para que aumente a competitividade da indústria de fundição de aço através da melhora dos índices de qualidade e do aumento do rendimento metálico.

Diante dos objetivos do presente trabalho e olhando para o Estado da Arte em processos de fundição de aço, percebe-se a carência de trabalhos de pesquisa com enfoque em defeitos relacionados à solidificação, existindo, pois, lacunas que permitiram afirmar ser esta pesquisa uma “contribuição original”, que caracteriza uma Tese de Doutorado.

1.3 Delimitação do Tema e Contribuição do Modelo Proposto

O Tema do Trabalho é delimitado à formação de defeitos relacionados à solidificação, rechupes e poros, que ocorrem em peças fundidas de aço baixo carbono, moldadas em areia de cura frio, com ligantes químicos e vazamento por gravidade.

O trabalho foi desenvolvido em uma fundição de aço que emprega esse processo em sua linha de produção.

O modelo, baseado no método de Taguchi, utiliza algumas variáveis diferentes das propostas pela literatura contemporânea de fundição, podendo ser empregado em fundições de aço que operam com os mesmos processos utilizados em seu desenvolvimento para melhora de processo.

1.4 Estrutura do Trabalho

A Tese é composta por cinco capítulos e trata dos aspectos conceituais e experimentais.

No capítulo 1, são apresentados o problema, ou seja, os defeitos rechupe e poros, o objetivo principal da presente Tese e os seus objetivos específicos, a delimitação do tema e as contribuições da Tese.

No capítulo 2, são apresentados a revisão da literatura referente às técnicas de pesquisa, o processo de formação de rechupes e poros as variáveis

do processo que interferem em sua ocorrência, o planejamento estatístico de experimentos e o método de Taguchi.

O capítulo 3 apresenta o método empregado no desenvolvimento do trabalho, os materiais envolvidos e os ensaios de caracterização empregados.

O capítulo 4 apresenta e discute os resultados obtidos na pesquisa. Nesse capítulo é proposto o modelo e são realizados os experimentos para validação do modelo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa

O capítulo 6 apresenta as propostas de trabalhos futuros e, por fim, apresentam-se todas as referências bibliográficas utilizadas para suportar a pesquisa e os anexos 1, 2, 3 e 4 que mostram modelos de massalotes (Anexo 1), cálculo para validação do sistema de medição (Anexo 2), arranjos ortogonais padrões de Taguchi (Anexo 3) e os cálculos do modelo (Anexo 4).

2. REVISÃO DA LITERATURA

O capítulo aborda os conceitos de técnicas de pesquisa, definições de processos de fundição e de rechupes ou outros defeitos relacionados à solidificação em processos de fundição de aço. O capítulo servirá de suporte para as conclusões do trabalho.

2.1 Técnicas de Pesquisa

“Técnica é um conjunto de preceitos, normas ou processos de que se serve uma ciência ou arte e é a habilidade para usar esses preceitos a parte prática. Toda ciência utiliza técnicas na obtenção de seus propósitos” (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.176).

As principais técnicas de pesquisa são (MARCONI; LAKATOS 2006, p.62):

- Documentação indireta
- Pesquisa bibliográfica
- Documentação direta
- Observação direta intensiva
- Observação direta extensiva

2.1.1 Documentação Indireta

É a fase da pesquisa que tem como objetivo recolher ou levantar dados ou informações prévias sobre o campo de interesse. Pode ser feita por meio de pesquisa documental e pesquisa bibliográfica. (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.62).

2.1.1.1 Pesquisa Documental

A pesquisa documental pode ser baseada em fontes escritas ou não, sendo elas primárias, secundárias ou retrospectivas. As fontes primárias, escritas ou não escritas, são geradas pelo próprio autor e as secundárias são as realizadas a partir de leitura e descrição de fontes contemporâneas ou retrospectivas produzidas por outros autores (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.63).

“Muniz, Jr (2007, p.65) descreve que a pesquisa documental vale-se de materiais que ainda não receberam tratamentos analíticos ou devem ainda ser reelaborados”.

2.1.2 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica é aquela desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros, artigos científicos e publicações periódicas, jornais, monografias, dissertações e teses. Ela se baseia numa leitura crítica e na documentação do material selecionado que servirá para elucidar as investigações, análises e conclusões do trabalho (GIL, 2002, p. 44; MARTINS, 2002, p. 25; MARCONI; LAKATOS, 2006, p.71; MUNIZ, JR. 2007, p.65).

2.1.3 Pesquisa de Campo

É uma documentação direta, utilizada com objetivo de levantar informações a cerca de um problema. Em geral, se constitui no levantamento de dados, observação de fatos e fenômenos exatamente como ocorrem podendo ser eles em campo ou no laboratório. É utilizada com o objetivo de conseguir informações e ou conhecimento acerca de um problema, uma hipótese que se

queira comprovar, ou, ainda, descobrir novos fenômenos ou as relações entre eles. (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.83).

A pesquisa de campo requer inicialmente a realização de uma pesquisa bibliográfica sobre o tema em questão. Esta pesquisa prévia conduzirá o pesquisador ao estado da arte em que se encontra assunto. Ela permite que se estabeleça um modelo teórico inicial de referência que auxiliará na determinação das variáveis envolvidas e na elaboração do plano geral de pesquisa. As pesquisas de campo se dividem em quantitativo-descritivas, exploratórias e experimentais (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.83 e 84):

A) Quantitativo-Descritivas – São pesquisas empíricas cuja principal finalidade é o delineamento ou análise das características de fatos ou fenômenos, a avaliação de programas e definição de variáveis principais. Pode utilizar métodos como planejamento estatístico de experimentais com finalidade de fornecer dados para a verificação de hipóteses. Podem ainda utilizar várias técnicas como entrevistas, questionários, formulários e empregam procedimentos de amostragem. Empregam maneiras quantitativas, tendo por objetivo a coleta sistemática de dados sobre a população (MARCONI; LAKATOS, 2006, p. 84).

“Muniz Jr. (2007, p. 64) relata que a pesquisa descritiva tem como objetivo a descrição das características de determinada população ou fenômeno ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis”.

B) Exploratórias – São investigações de pesquisa cujo objetivo é a formulação de questões, formulação de um problema ou aumento da familiaridade do pesquisador com o problema. Tem finalidades distintas destacando-se o desenvolvimento de hipóteses, a clarificação dos conceitos ou, ainda, a definição de variáveis a serem pesquisadas com mais profundidade posteriormente. Empregam-se, geralmente, procedimentos sistemáticos, seja para a obtenção de observações empíricas, seja para as análises dos dados, seja para ambas

simultaneamente. Pode obter descrições quantitativas e qualitativas do objeto de estudo e o investigador deve conceituar as inter-relações entre as propriedades do fenômeno, fato ou ambiente observado. Como procedimento, pode-se usar levantamento bibliográfico, entrevista, observação participante, análise de conteúdo. Geralmente não utilizam técnicas de amostragem de população (MARCONI; LAKATOS, 2006, p. 84; MUNIZ JR, 2007, p.64).

C) Experimentais – Baseiam-se na evidência empírica e têm como objetivo principal testar hipóteses que dizem respeito a relações causa-efeito. Os estudos deste tipo normalmente utilizam projetos experimentais que incluem grupo de controle, seleção de amostras por técnica probabilística, com interferência no experimento por meio da manipulação de variáveis independentes com a finalidade de verificar seu efeito sobre variáveis dependentes, além de outros fatores pertinentes. Logo, As técnicas rigorosas de amostragem têm o objetivo de possibilitar a generalização das descobertas quantitativamente, sendo as variáveis relevantes especificadas (MARCONI;LAKATOS, 2006, p.86; NETO; TAVARES, 2008, p.163).

“Gil (2002, p.47) relata que o experimento representa o melhor exemplo de pesquisa científica”. Essencialmente, a pesquisa experimental consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo e definir as forma de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto. A pesquisa experimental pode ser realizada em qualquer lugar, desde que o pesquisador possa manipular pelo menos uma das características dos elementos estudados, introduzir um ou mais controle na situação experimental e que haja uma distribuição aleatória, ou seja, a designação dos elementos para participar dos grupos experimentais e de controle seja feita aleatoriamente (GIL, 2002, p. 47).

“Mezzaroba e Monteiro (2005, p. 86) descrevem a pesquisa experimental como um ensaio científico em que o objeto de pesquisa é submetido a um quadro controlado, destinado à verificação de seus atributos”.

Pela aplicação desse método é possível pôr à prova determinado fenômeno, testando-o sob condições idealizadas, não necessariamente em laboratório, mas também ser desenvolvida em campo no ambiente natural (MEZZAROBA; MONTEIRO, 2005, p. 86; MARCONI; LAKATOS, 2006, p.86).

O emprego do método experimental pressupõe a eleição de certas hipóteses a serem verificadas durante a experiência. Assim, tais hipóteses poderão ser confirmadas ou não pelos efeitos alcançados (MEZZAROBA; MONTEIRO, 2005, p. 86).

2.1.4 Observação Direta Intensiva

A observação direta intensiva é a realizada através de observação e entrevista. A observação é uma técnica de coleta de dados para conseguir informações e utiliza os sentidos humanos com foco em aspectos da realidade de que se tem interesse em estudar. Não consiste em apenas ver e ou ouvir, mas também em examinar fatos ou fenômenos, o que obriga o pesquisador a ter um contato direto com a realidade (VALDETE; BONI, 2005; MARCONI; LAKATOS, 2006, p.86).

A entrevista é um encontro entre duas pessoas, a fim de que uma delas obtenha informações sobre um determinado assunto, mediante uma conversação objetiva sobre o tema de interesse. Segundo Valdeti e Boni (2005), a entrevista como coleta de dados sobre um determinado tema científico é a técnica mais utilizada no de trabalho de campo e através dela os pesquisadores buscam coletar dados objetivos e subjetivos como opiniões, atitudes e valores. É muito utilizada na investigação social, para coleta de dados ou para ajudar no

diagnóstico ou tratamento de um problema (VALDETE; BONI, 2005; MARCONI; LAKATOS, 2006, p.92).

A preparação da entrevista precisa ser planejada de modo a se obter o resultado esperado e a pessoa entrevistada precisa ter domínio do tema pesquisado e ter disponibilidade em fornecer a entrevista. Esta deve ser marcada com antecedência e devem-se criar condições favoráveis de modo a se garantir confidencialidade quando requerida. Deve-se preparar um roteiro ou formulário com as questões importantes. As perguntas devem ser feitas levando-se em conta a sequência do pensamento do entrevistado e não se devem fazer perguntas ambíguas ou tendenciosas. De maneira geral, os objetivos principais de uma entrevista são: averiguação de fatos, determinação das opiniões sobre fatos, determinação de sentimentos, descoberta de planos de ação, conduta atual ou do passado e motivos conscientes para opiniões, sentimentos e condutas (VALDETE; BONI, 2005; MARCONI; LAKATOS, 2006, p.92).

2.1.5 Observação Direta Extensiva

“A observação direta extensiva realiza-se por meio de questionário, formulário, e medidas de opinião e atitudes” (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.98).

O questionário é um instrumento de coleta de dados constituído de uma série ordenada de perguntas que devem ser respondidas por escrito sem a presença do entrevistador. Normalmente são enviados ao informante e depois de preenchidos, o pesquisado devolve-o do mesmo modo que recebeu. Os formulários são caracterizados por uma série de questões que são perguntadas e anotadas por um entrevistador numa situação face a face com a outra pessoa que está sendo entrevistada. Medidas de opinião e atitudes são uma forma de observação direta extensiva onde se atribui uma escala de mensuração a objetos, acontecimentos ou situações de acordo com uma determinada regra. A

propriedade dos objetos denomina-se atributo mensurável e o número atribuído a um objeto particular é a sua medida (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.98-114).

Como Técnica de Pesquisa, adotou-se na presente Tese de Doutorado, a Pesquisa Bibliográfica para fundamentação teórica, abrangendo bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo. Conforme sugere Lakatos e Marconi (2006, p.71-72) foram utilizados artigos técnicos contemporâneos publicados em periódicos nacionais e internacionais, livros e teses. Toda a pesquisa bibliográfica serviu também para certificação da “Contribuição Original” que é exigida para uma Tese de Doutorado. Além da pesquisa bibliográfica, empregaram-se, também, nesta Tese de Doutorado, a Pesquisa de Campo Exploratória e Experimental (MARCONI; LAKATOS, 2006, p.84) em que os experimentos foram realizados no ambiente de trabalho, ou seja, ambiente Industrial de uma fundição de aço.

2.2 Fundição

O processo de produção por fundição é uma tecnologia pré-histórica, que consiste na obtenção de uma peça a partir da solidificação de um metal líquido em um molde, que garante, quase na totalidade, as dimensões finais do produto. O processo é extremamente versátil e proporciona um caminho muito curto entre a matéria prima e a peça acabada. Podem ser produzidas por fundição a maior parte das ligas comerciais, tais como aços, ferros fundidos, ligas de cobre, alumínio, ouro, prata, dentre outros, bem como as formas mais variadas e complexas de produtos. Em face de sua complexidade, determinados tipos de peça, como blocos de motor, caixas de transmissão, engates de vagões ferroviários, torneiras e corpos de válvulas são produzidos somente por fundição (GOODWAY, 1996, p.12-18).

A Figura 1, adaptada de Araújo e Arenales (2003) mostra, esquematicamente, o processo de fundição e suas diversas etapas.

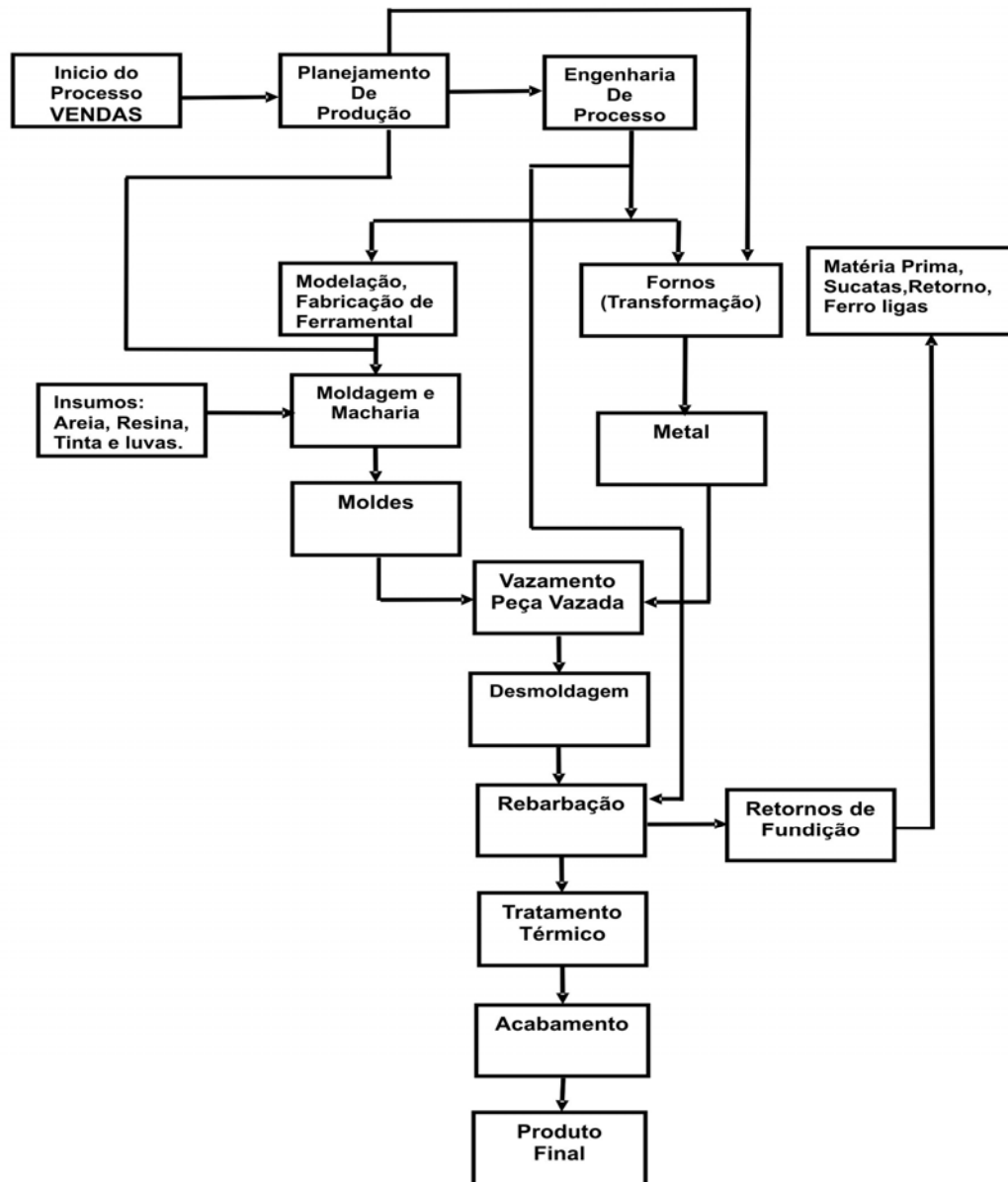


Figura 1. Representação esquemática do processo de fundição (Adaptada de ARAUJO; ARENALES, 2003).

O ajuste de composição química é realizado na etapa de elaboração do aço em fornos (Transformação). A adequação da microestrutura bem como das propriedades mecânicas é realizada na etapa de Tratamento Térmico (CALLISTER JR, 2008, P.249; KATZ, 1996, P.144).

2.2.1 Formação de Rechupes

Rechupes são definidos como vazios ou cavidades formadas nos últimos estágios da solidificação. Apresentam-se com forma irregular, esponjoso, com a superfície interior composta por cristais dendríticos. Geralmente ocorrem próximo ao centro das maiores seções da peça, em transições de seções com variações de espessura, junções, cantos ou pontos quentes. Ocorrem também como depressões ou vazios abertos em faces superiores de peças grossas e planas, em forma lamelar no centro da seção e ainda em forma de trincas largas ou ainda podem se apresentar na forma de microporosidades conhecidas como microrechupes (AFS. ANALYSIS OF CASTING DEFECTS, 1994 p.111; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; GALANTE et al, 1999; BLAIR, et al 2005; STEFANESCU, 2005).

Os estudos da formação de rechupes, bem como o dimensionamento de massalotes têm os seguintes marcos: Nicolas Chvorinov (1940) introduziu a “regra de Chvorinov” que é expressa por um modelo matemático para calcular o tempo de solidificação para um fundido com forma geométrica simples. A regra descreve que o tempo de solidificação é uma relação entre o volume do fundido e a área superficial de resfriamento. Em função do tempo de solidificação, dimensiona-se um massalote que alimente o fundido desde que este esteja ligado diretamente ao fundido e se solidifique após o mesmo.

Caine (1948), com base nos conceitos introduzidos por Chvorinov (1940), propôs o “fator forma”, que é uma relação entre as dimensões externas da placa (comprimento, largura e espessura). Por meio do fator forma, define-se o volume do massalote e suas dimensões.

Wlodawer (1966) apresentou o conceito do módulo de solidificação, que também tem por base a proposta de Chvorinov (1940). O método proposto por Wlodawer passou a ser o mais aplicado no dimensionamento da alimentação de

peças de aço fundido e serviu de base para o desenvolvimento de programas para dimensionamento de massalotes.

Mais recentemente, com o desenvolvimento dos programas computacionais, a formação de rechupes e o dimensionamento de massalotes passaram a ser modelados com o uso de softwares que também se baseiam nos conceitos de Chvorinov (1940).

A revisão a seguir relaciona a análise clássica da formação de rechupes, complementando-a com contribuições mais recentes.

No processo de fundição por gravidade, a cavidade do molde é preenchida por metal líquido durante o vazamento. Normalmente, o metal líquido recebe um sobreaquecimento acima de sua temperatura de solidificação, para permitir que o líquido ocupe toda a cavidade do molde, gerando a peça completa (FINARDI, 1993). Como o aço sólido tem densidade mais elevada do que o metal líquido, é natural que o volume da peça sólida seja menor que o volume de aço líquido dentro do molde (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Porém, o super-resfriamento imposto ao líquido devido à diferença de temperatura entre a parede do molde e o metal cria quase que instantaneamente uma fina pele de metal sólido que define a forma externa da peça. Adicionalmente, tanto o líquido quanto o sólido sofrem dilatação ou contração térmica. À medida que o metal sólido é resfriado, a variação de volume associada à contração também contribui para que o volume sólido seja menor que o volume líquido. É esta diferença volumétrica que causará os rechupes nos aços (AFS. Analysis of Casting Defects, 1994 p.111; BLAIR, *et. al* 2005; STEFANESCU, 2005).

Gases dissolvidos no metal podem aumentar o tamanho dos rechupes ou ainda contribuir para a formação de porosidades internas em regiões típicas para formação de rechupes. Durante o resfriamento e solidificação, esses gases dissolvidos no metal são rejeitados do líquido, e, atingindo-se uma pressão crítica para formação de uma bolha de gás, inicia-se uma porosidade. Se esta bolha se

forma na zona pastosa nos últimos estágios da solidificação, ela ficará presa na rede dendrítica e contribuirá para aumentar o tamanho do rechupe ou mesmo o tamanho de microrechupes. (FINARDI, 1993; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005).

A Figura 2 mostra a seção de um cubo com 100 mm de aresta fundido em aço ao carbono ABNT 1030, apresentando rechupe.

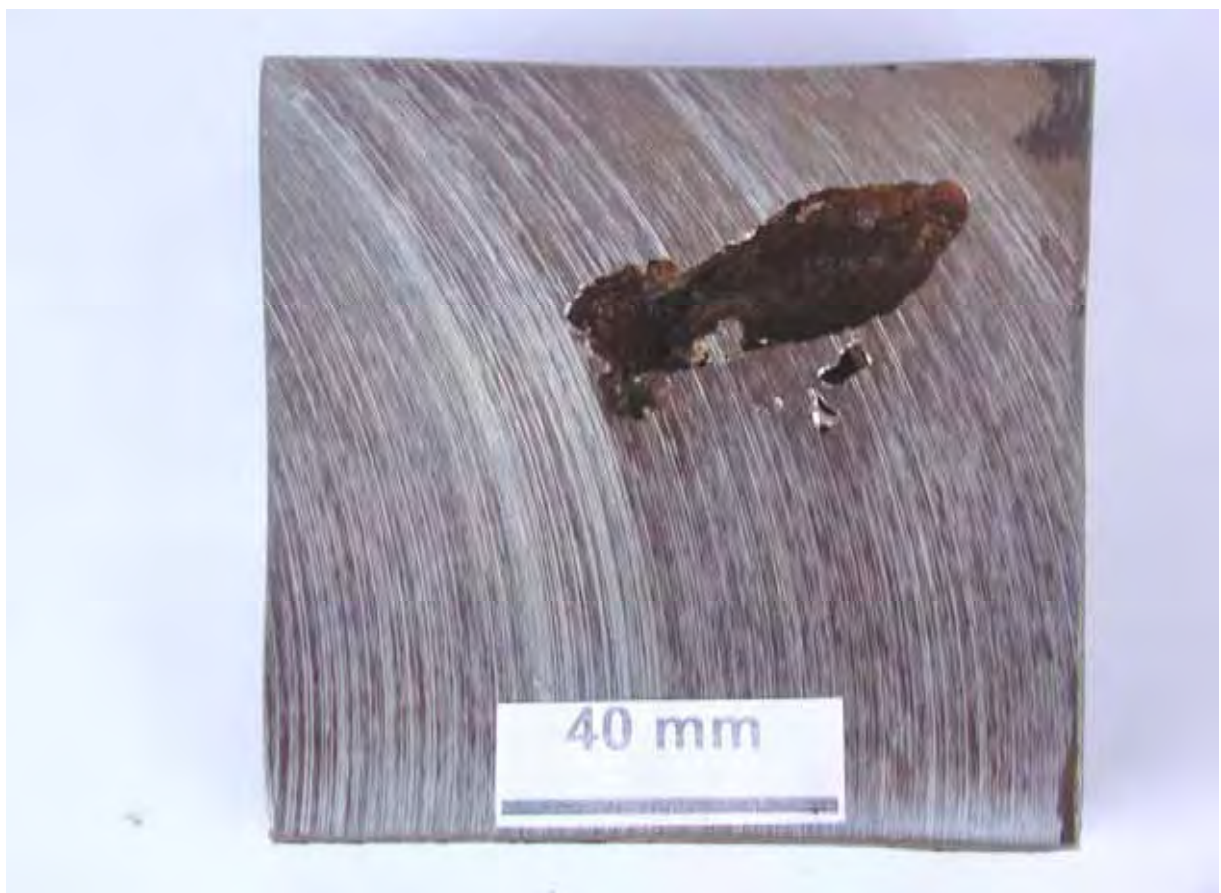


Figura 2. Seção de um cubo de aço fundido apresentando rechupe.

Para garantir a sanidade interna dos fundidos em relação à formação de rechupes, são utilizados massalotes ou alimentadores, que funcionam como um reservatório de metal líquido, dimensionado e posicionado na seção de maneira a alimenta-la, transferindo para dentro dele o vazio que se formaria no fundido.

Após solidificação e resfriamento, os massalotes ou alimentadores serão removidos das peças na fase de rebarbação e retornam para a fusão como sucata ou retorno de fundição (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

2.2.2 Projeto de Massalotes para Peças de Aço Fundido

Wlodawer (1966), Maehara (1991) e Plutshack e Suschil (1996) relatam que, quando o metal se solidifica e resfria para formar o fundido, ele passa por três estágios distintos de contração volumétrica, conforme descritos a seguir e ilustrados na figura 3 (adaptada de Plutshack e Suschil, 1996):

1. Contração líquida: O metal líquido reduz seu volume no interior do molde desde a temperatura de sobreaquecimento para vazamento até a temperatura de solidificação. Este sobreaquecimento é para que o metal possa ter fluidez suficiente para preencher toda a cavidade do molde;
2. Contração de solidificação: O metal, ao se solidificar diminui de volume, uma vez que a densidade do metal no estado sólido é maior que no estado líquido. Para um metal puro, esta contração ocorrerá em uma temperatura única. Para as ligas, esta contração ocorre dentro de uma faixa de temperatura;
3. Contração no estado sólido: É a contração que ocorre desde o final da solidificação até a temperatura ambiente. Esta contração não interfere na formação do rechupe e, nos fundidos, é compensada no ferramental.

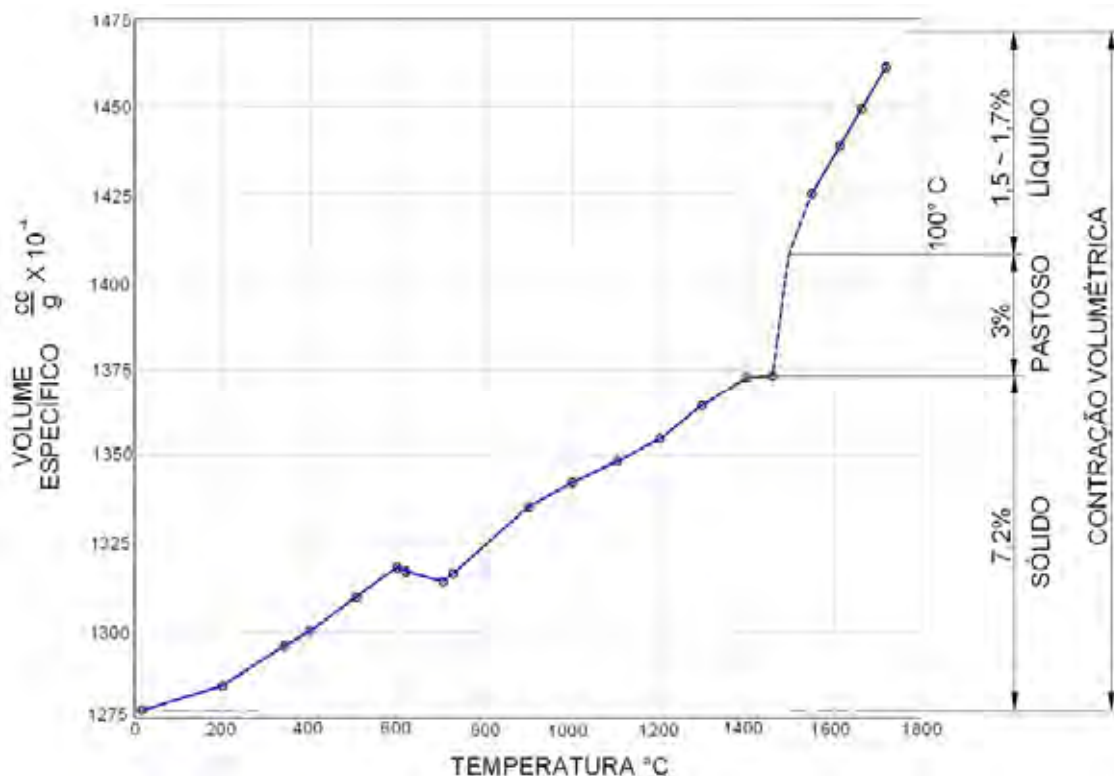


Figura 3. Representação gráfica da contração volumétrica desde a temperatura de vazamento até a ambiente (Adaptado de Plutshack e Suschil, 1996).

Na falta de massalotes, um fundido cúbico deveria se solidificar conforme a figura 4. Inicialmente, devido à grande diferença de temperatura entre o molde e o metal líquido, forma-se quase que instantaneamente uma pele na região de contato com a areia. À medida que a frente de solidificação avança para o interior da peça, começa a se formar o vazio na região superior abaixo da casca de metal solidificado. No final da solidificação, um grande vazio deve ser formado próximo à parte superior central do cubo. Porém, em função da composição química e do modo de solidificação da liga, a forma, o tamanho e a posição destes vazios ou rechupes variam (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Para eliminar esses defeitos nos fundidos, devem-se utilizar massalotes, que têm as funções de acomodar, em seu interior, as contrações líquida e de solidificação durante o resfriamento no molde (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

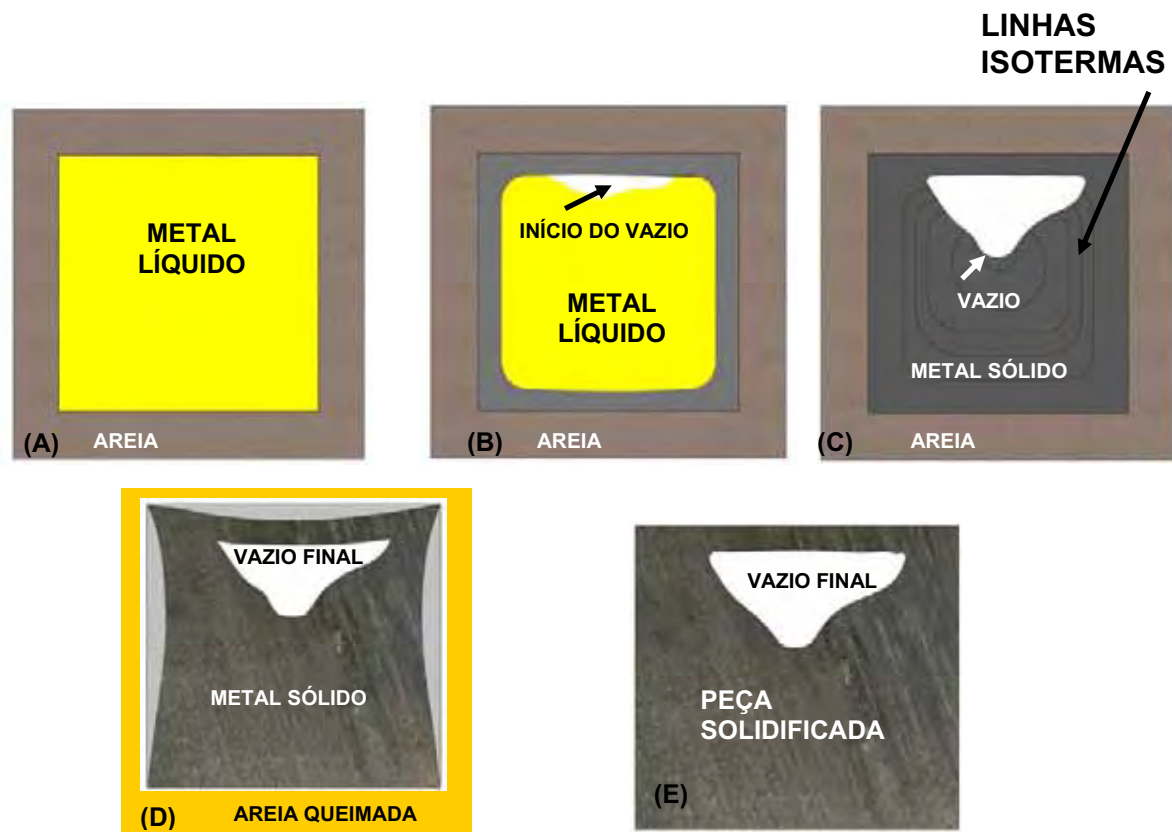


Figura 4. Sequência esquemática de contração de solidificação em um cubo de ferro. (A) Contração líquida. (B) Pele sólida e formação do vazio do rechupe. (C) Metal sólido e vazio formado. (D) Rechupe interno e deformação externa. (E) Forma final (Adaptado de Plutshack e Suschil, 1996).

Siequel (1985), Steven e Blair (1995), Plutshack e Suschil (1996), descrevem que, se o massalote deve fornecer líquido suficiente para alimentar as contrações volumétricas durante o resfriamento do líquido e durante a solidificação, é de se esperar que ele se solidifique após a peça ou seção que ele está alimentando. Dessa forma, ele deve ser dimensionado e estar posicionado corretamente.

Um projeto de alimentação ou massalotagem deve objetivar ou prover uma quantidade certa de metal, no lugar certo e no tempo certo. A estas três considerações podem-se adicionar outras como (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996):

- A junção peça-massalote deve ser tal que minimize o custo de remoção do massalote;
- O número e o tamanho dos massalotes devem ser minimizados para reduzir o custo de metal. Dessa forma, aumenta-se o rendimento metálico que é definido pela relação entre o peso líquido da peça e o peso total de metal utilizado para produzi-la;
- O posicionamento dos massalotes deve ser definido de modo a não potencializar problemas como distorção ou trincas à quente;

Na prática estas considerações estão sempre em conflito e, no final, o projeto do massalote e do ferramental de fundição devem representar um compromisso que previna a ocorrência de rechupe na peça, mas não potencialize outros problemas como trincas e inclusões (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

A literatura clássica descreve que o massalote deve ser adequado para satisfazer as contrações líquidas e de solidificação do fundido e do próprio massalote, uma vez que ele também estará solidificando. Logo o total de contração será uma combinação entre a contração do fundido e do massalote. O total de contração líquida depende da quantidade de sobreaquecimento que o aço recebe. Para aços baixo carbono, Plutshack e Suschil (1996) mostram que a contração líquida varia entre 1,5 a 1,7% para cada 100 °C de sobreaquecimento. A contração de solidificação é função da liga e para aços ao baixo carbono varia de 2,5 a 3%. Se for somada a contração líquida e a de solidificação obtém-se uma contração total de aproximadamente 4,5%. Este valor interfere diretamente no dimensionamento do massalote sendo que quanto maior a contração, maior o tamanho do massalote (MAEHARA, 1989; STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

A geometria do fundido afeta no dimensionamento do massalote. Isto se deve ao tempo de solidificação. Segundo Maehara (1989), Plutshack e Suschil(1996) e Brown (2000), quanto maior o tempo de solidificação, maior deve ser o tamanho do massalote. Isto porque o tamanho do massalote está relacionado ao tempo de solidificação, que é função do módulo da seção ou peça a alimentar. Maiores módulos, maiores tempos de solidificação e maiores deverão ser os massalotes. Menores módulos, menores tempos de solidificação e menores massalotes.

A rigidez do molde pode afetar sua geometria e consequentemente comprometer a eficácia da alimentação. Kanno (2008) mostra que moldes com menor resistência são mais propensos a apresentar maiores rechupes que moldes mais resistentes.

A definição do posicionamento correto dos massalotes está relacionada com os conceitos de solidificação direcional que mostram que os defeitos oriundos da solidificação devem ser dirigidos para os massalotes. A solidificação direcional depende do tipo de liga, modo de solidificação, material do molde e projeto de fundição (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; BROWN, 2000; MONROE 2004).

A Figura 5 mostra esquematicamente a solidificação direcional e progressiva num fundido. Com a cavidade do molde preenchida, a solidificação irá geralmente proceder a partir da parede formando uma fina pele de sólido. A perda de calor para o molde faz com que a pele cresça progressivamente. Duas situações alteram a taxa de crescimento da pele ou o avanço da frente de solidificação. São elas os pontos frios e os pontos quentes conforme indicados na Figura 5. Os pontos frios apresentam maior área de troca de calor, imprimindo maior velocidade de solidificação ao aço e os pontos quentes, como na junção com o massalote, concentram o calor. Logo, a velocidade de troca de calor é menor, retardando a solidificação (PLUTSHACK; SUSCHIL,1996; BROWN, 2000).

A capacidade de promover e sustentar a solidificação direcional vai depender do modo como a liga se solidifica. As ligas podem ser classificadas de acordo com o modo de solidificação em três tipos (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996):

- Pequeno intervalo de solidificação na qual a variação de temperatura entre início e final de solidificação é menor que 50°C;
- Intervalo intermediário de solidificação com a faixa de temperatura variando de 50 a 110 °C;
- Grande intervalo de solidificação com faixa de temperatura acima de 110°C.

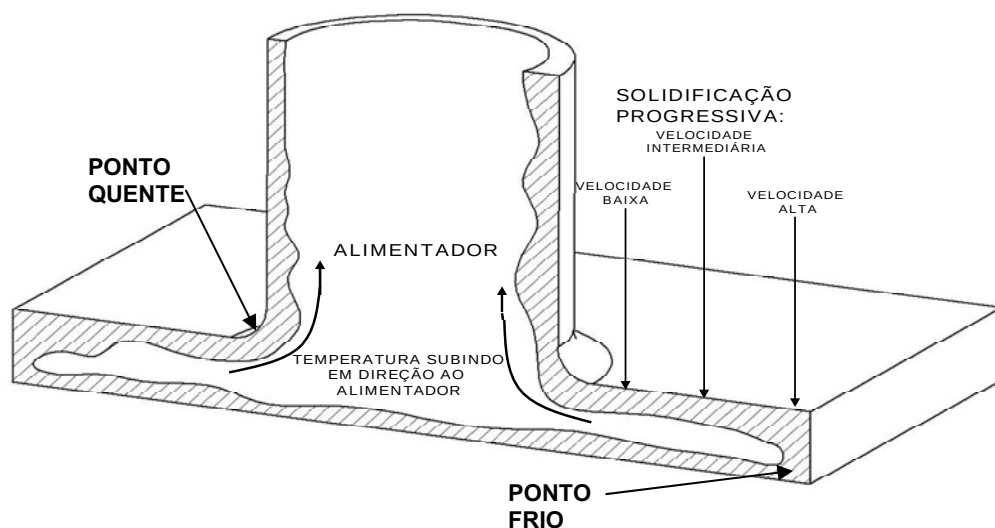


Figura 5. Solidificação direcional para o alimentador ou massalote (Adaptado de Plutshack e Suschil, 1996).

Para metais puros, o intervalo de solidificação se aproxima de zero, ou seja, a solidificação ocorre em uma temperatura única e a frente de solidificação plana avança a partir da parede do molde para o centro (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Ligas com pequeno intervalo de solidificação, como os aços baixo carbono apresentam uma forte tendência à formação de pele solidificada que se direciona para o centro da seção a solidificar. Porém, com o aumento da espessura solidificada e da temperatura da areia que circunda a peça, a frente não avança tão rapidamente no final da solidificação, formando microporos na linha de centro. (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

O aumento do intervalo de solidificação aumenta a faixa de zona pastosa. Aços com maiores teores de carbono que se solidificam dentro do campo austenítico do diagrama de equilíbrio das ligas Ferro-Carbono podem apresentar intervalos de solidificação que chegam a aproximadamente 250°C (ASM HANDBOOK, Properties and Selection Irons Steels and High Performance Alloys, 1996. Vol 1, 10th Edition. p. 302; CALLISTER, JR, 2007, p.211).

O aumento da taxa de troca de calor nestas ligas por meio do uso de resfriadores, somado ao emprego de massalotes, promove a solidificação direcional. Em peças de aços ao carbono com a espessura aproximadamente cinco vezes menor que a largura, gradientes de temperatura da ordem de 0,022 a 0,045°C/mm são suficientes para promover a solidificação direcional (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Para geometrias em que a largura tem aproximadamente o valor da espessura, são necessários gradientes entre 0,135 a 0,269 °C/mm. (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

A Figura 6, adaptada de Plutshack e Suschil (1996) ilustra o processo de solidificação para metal puro e para ligas com pequeno intervalo de solidificação, como é o caso dos aços baixo carbono. (PLUTSHACK e SUSCHIL, 1996)

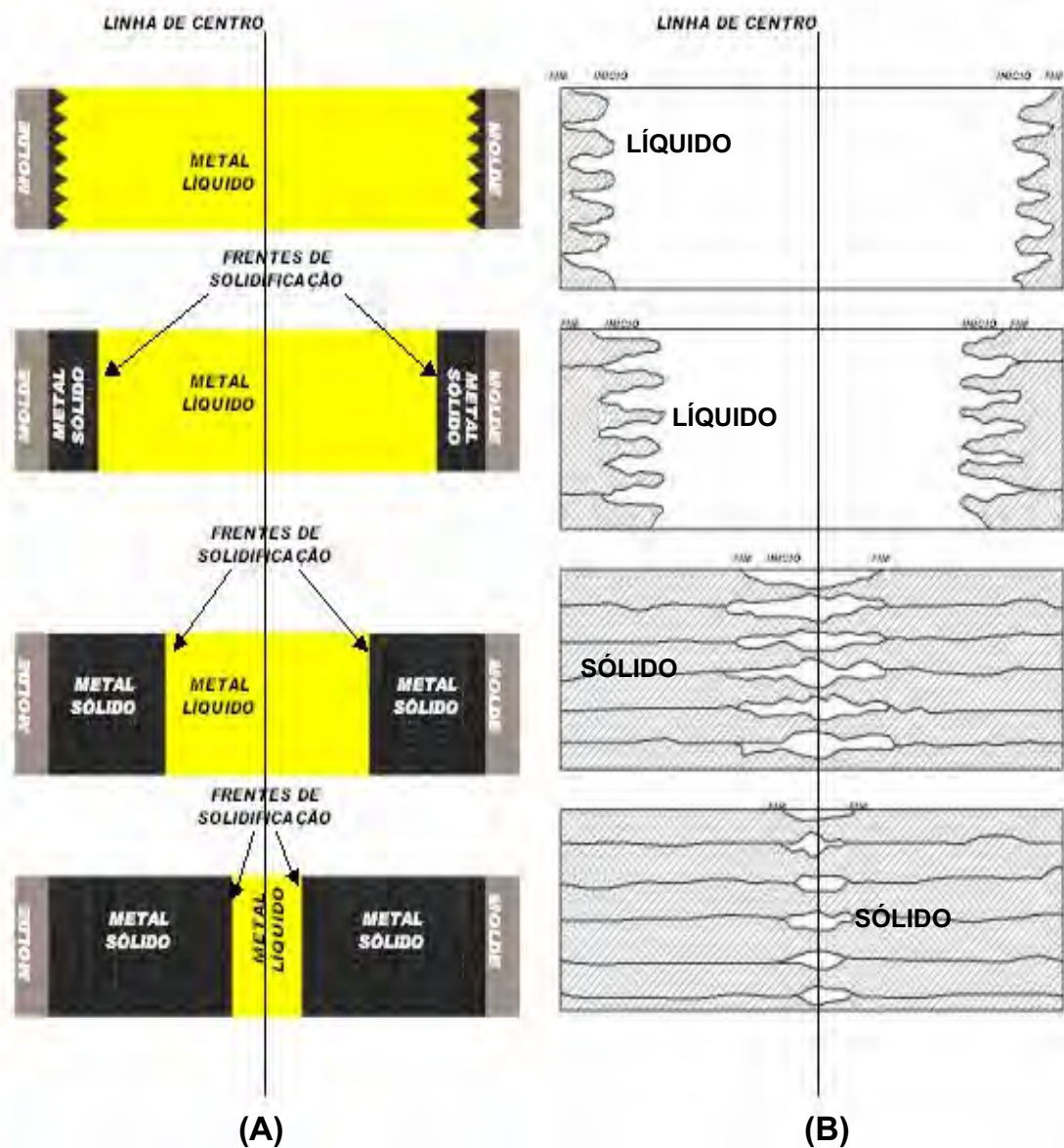


Figura 6. (A) Modo de solidificação para metal puro; (B) Modo de solidificação para uma liga com pequeno intervalo de solidificação (b) (Adaptado de PLUTSHACK e SUSCHIL, 1996).

Definido o modo de solidificação, define-se a localização ou posicionamento do massalote que deve estar ligado diretamente à seção a ser alimentada. Para determinar o número de massalotes necessários para alimentar o fundido, utiliza-se a regra dos raios de ação. (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

A Figura 7 mostra o raio de ação de massalotes alimentando uma chapa de aço com largura (L) e espessura (T). Considera-se chapa quando $L \geq 5T$. A máxima distância de alimentação é de $4,5T$ a partir da extremidade da peça até a face lateral do massalote, sendo o raio de ação do massalote igual a $2T$ e o efeito de ponta que acelera a solidificação na extremidade igual a $2,5T$. A máxima distância de alimentação entre dois massalotes é $4T$ (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

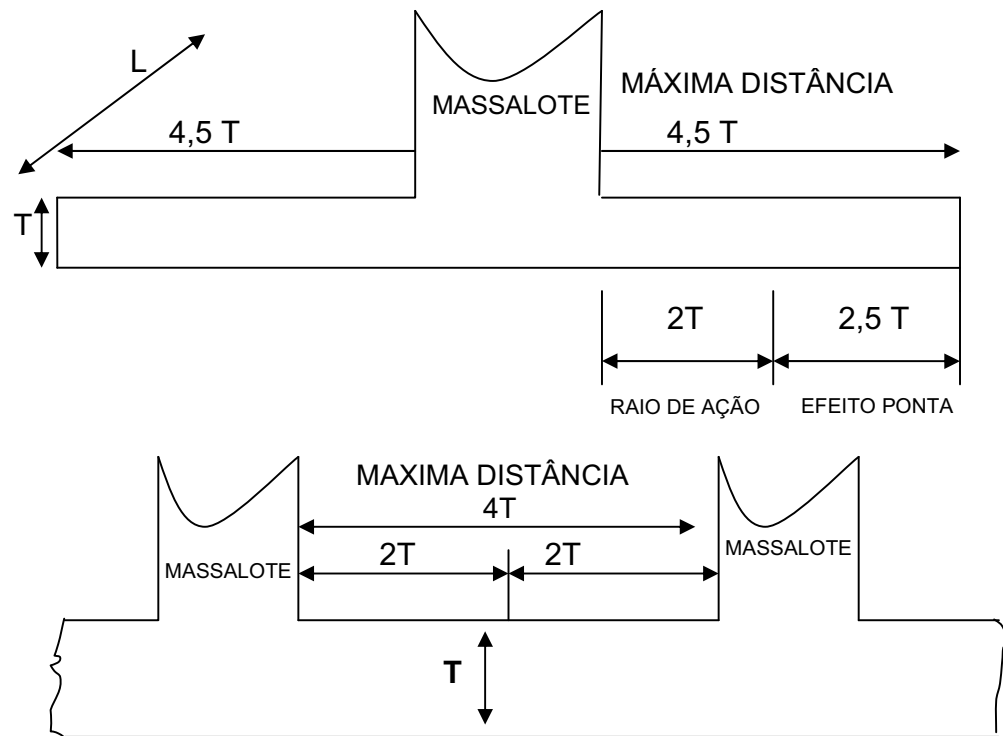


Figura 7. Raio de ação ou distância de alimentação de massalotes para geometrias em forma de chapa ($L \geq 5T$) (Adaptado de Plutshack e Suschil, 1996).

A Figura 8 mostra o raio de ação de um massalote alimentando uma peça com geometria em forma de barra de aço (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHI, 1996).

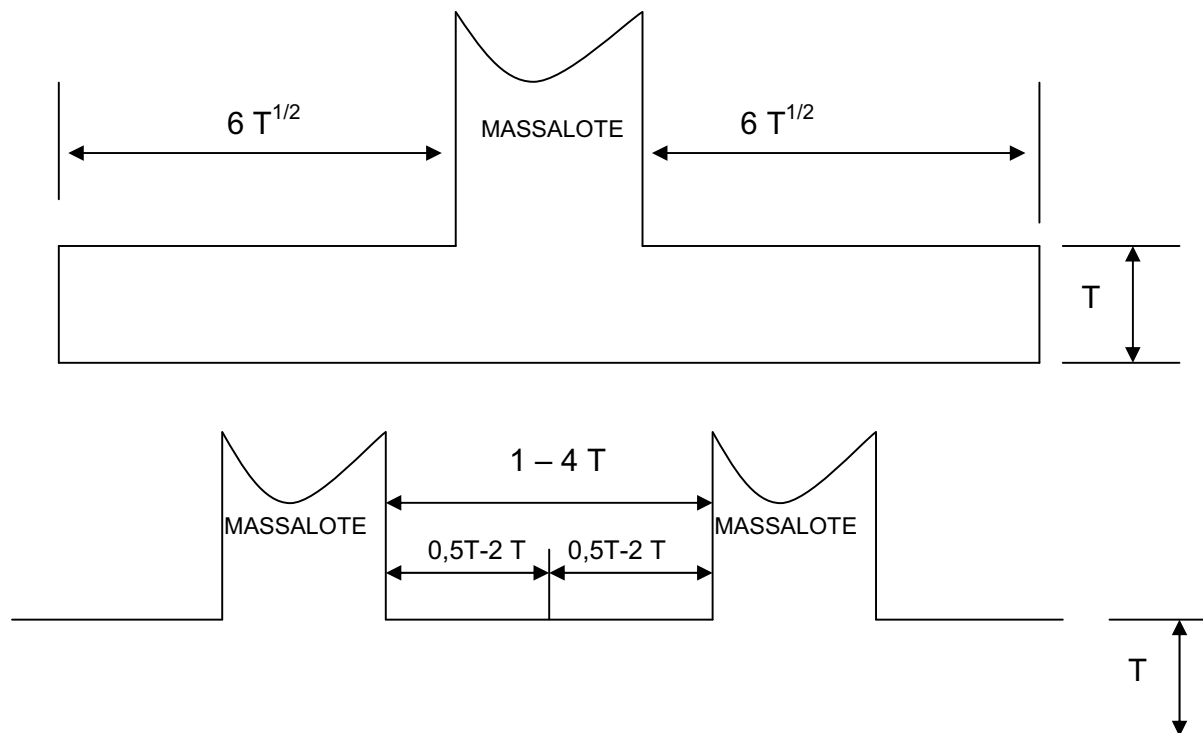


Figura 8. Distância de alimentação para peças com geometrias em forma de barra de aço. (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996)

O uso de resfriadores metálicos aumenta a velocidade de extração de calor do molde e, conseqüentemente, acelera o processo de solidificação. Plutshack e Suschil (1996) relatam que a distância de alimentação é aumentada sensivelmente com o emprego de resfriadores, especialmente no caso em que a relação entre a largura (L) e a espessura (T) é menor que cinco vezes $[(L/T) < 5]$.

A Figura 9 mostra esquematicamente o efeito de resfriadores metálicos na distância de alimentação para uma barra de aço. Verifica-se que a distância de alimentação ou raio de ação do massalote aumentou devido ao emprego de resfriadores em até uma vez a espessura, no caso do resfriador lateral, porém, em valores significativos para o caso de resfriador entre massalotes, quando comparado com a Figura 8. Isto se deve à maior troca de calor imposto pelo material metálico do resfriador ao aço durante a solidificação, sendo esta uma

prática útil para diminuir o número de massalotes na peça fundida (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

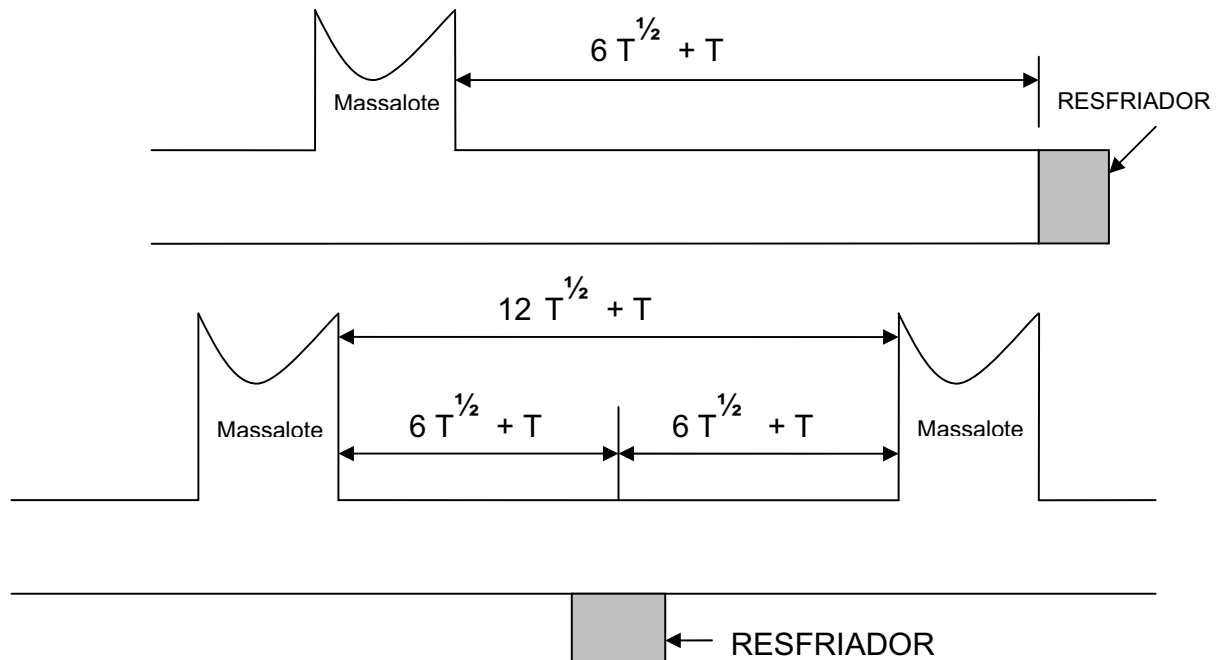


Figura 9. Efeito do resfriador na distância de alimentação ou raio de ação do massalote (STEVEN; BLAIR, 1995; PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Para o dimensionamento do massalote, pode-se utilizar o método proposto por Caine (1948) citado por Plutshack e Suschil (1996) conhecido como método do U. S. Naval Research Laboratory ou método NRL. Por este método, calcula-se o tamanho do massalote, utilizando um fator de forma (fc) que é calculado conforme equação (1).

$$fc = (L+W)/T \quad (1)$$

Onde L é o comprimento, W a largura e T a espessura da seção.

A Figura 10 adaptada de Plutshack e Suschil (1996) ilustra o método NRL para dimensionamento de massalote, que compreende os seguintes passos:

1. Calcula-se o fator-forma utilizando a Equação 1;

2. Com o valor de f_c , encontra-se graficamente na Figura 10 (B) a relação (V_r/V_c) , ou seja, volume do alimentador(V_r) sobre volume do fundido(V_c);
3. Calcula-se o volume do fundido (V_c);
4. Calcula-se o volume do massalote multiplicando $f_c \cdot V_c$;
5. Calculado o volume, encontram-se graficamente na Figura 10 (C) as dimensões do massalote, ou seja, seu diâmetro e altura.

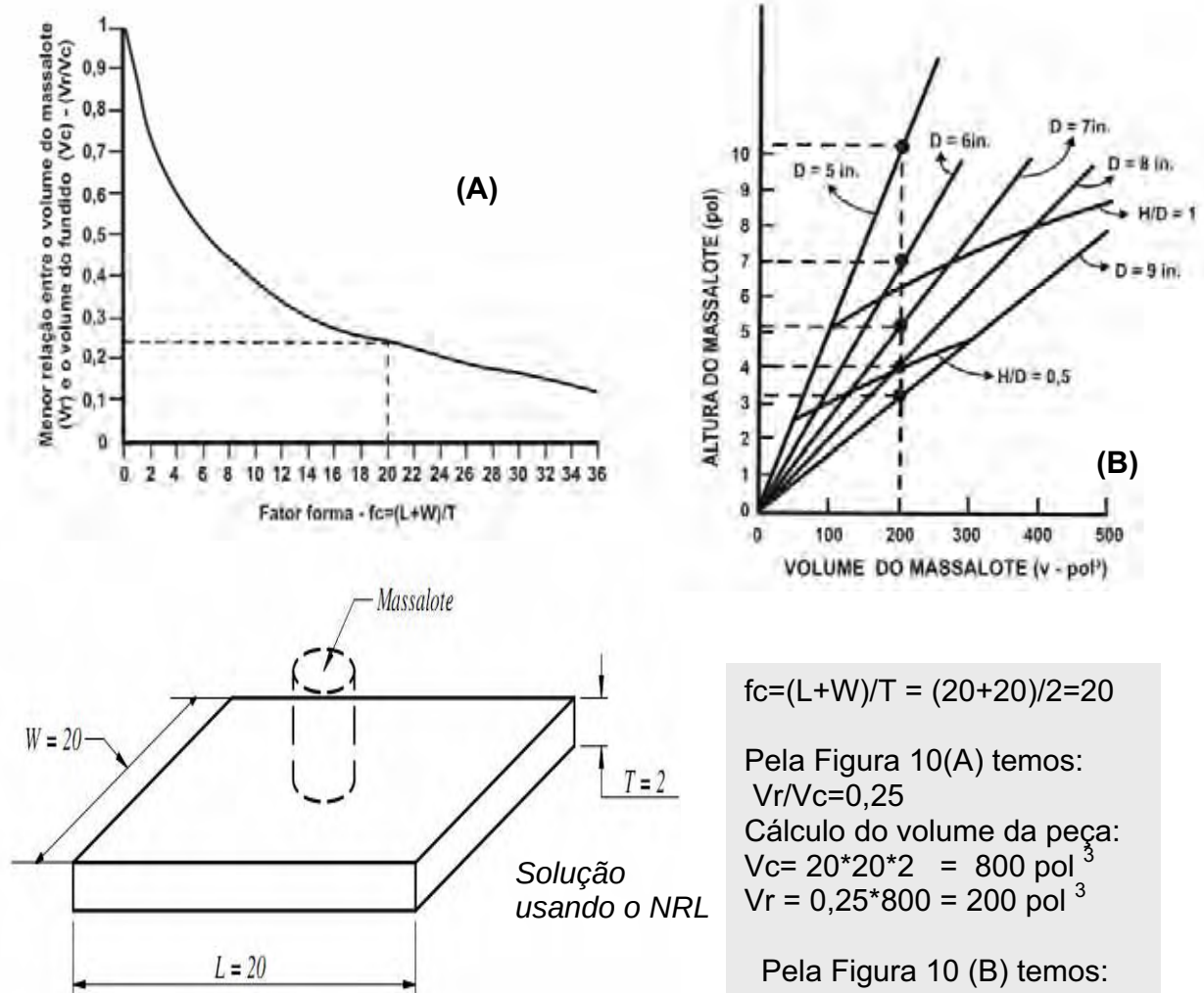


Figura 10. Procedimento para determinação das dimensões do massalote utilizando o método NRL (Adaptado de Plutshack e Suschil, 1996).

Outro método para dimensionamento de massalotes é o proposto por Wlodawer (1966), conhecido como método do módulo da peça ou seção. O método é baseado no conceito de que o tempo de solidificação de um fundido segue a regra de Chvorinov (1940) e uma aproximação para módulo pode ser feita conforme a equação (2) (PLUTSHACK;SUSCHIL, 1996; SCHMIDT *et al*, 2003; SILVA; MEI, 2006):

$$t = k^2 (V_c/A_c)^2 \quad (2)$$

Onde:

- t é o tempo de solidificação;
- V_c é o volume do fundido;
- A_c é a área de resfriamento do fundido (Área de contato com a areia de moldagem);
- k é uma constante que depende do tipo de liga e propriedades do material do molde como capacidade de troca de calor e densidade;

Como a razão V_c/A_c é definida como módulo pode-se dizer que conforme equação (3) (PLUTSHACK e SUSCHIL, 1996; SCHMIDT *et al*, 2003):

$$t = k^2 * M_c^2 \quad (3)$$

Onde:

M_c é o módulo da seção do fundido que deve ser alimentada.

Segundo Maehara (1989) e Plutshack e Suschil (1996), Wlodawer (1966) simplificou o método dos módulos, mostrando que muitas seções de fundidos podem ser transformadas ou reduzidas a formas geométricas simples em que o módulo da seção ou do fundido é facilmente calculado sem que seja necessário

calcular todo o volume ou área de superfície do fundido. Nestas simplificações verifica-se que o módulo pode ser calculado a partir da relação entre a área e o perímetro da seção. A Figura 11, adaptada de Maehara (1989) mostra algumas formas geométricas simplificadas para o cálculo do módulo da seção.

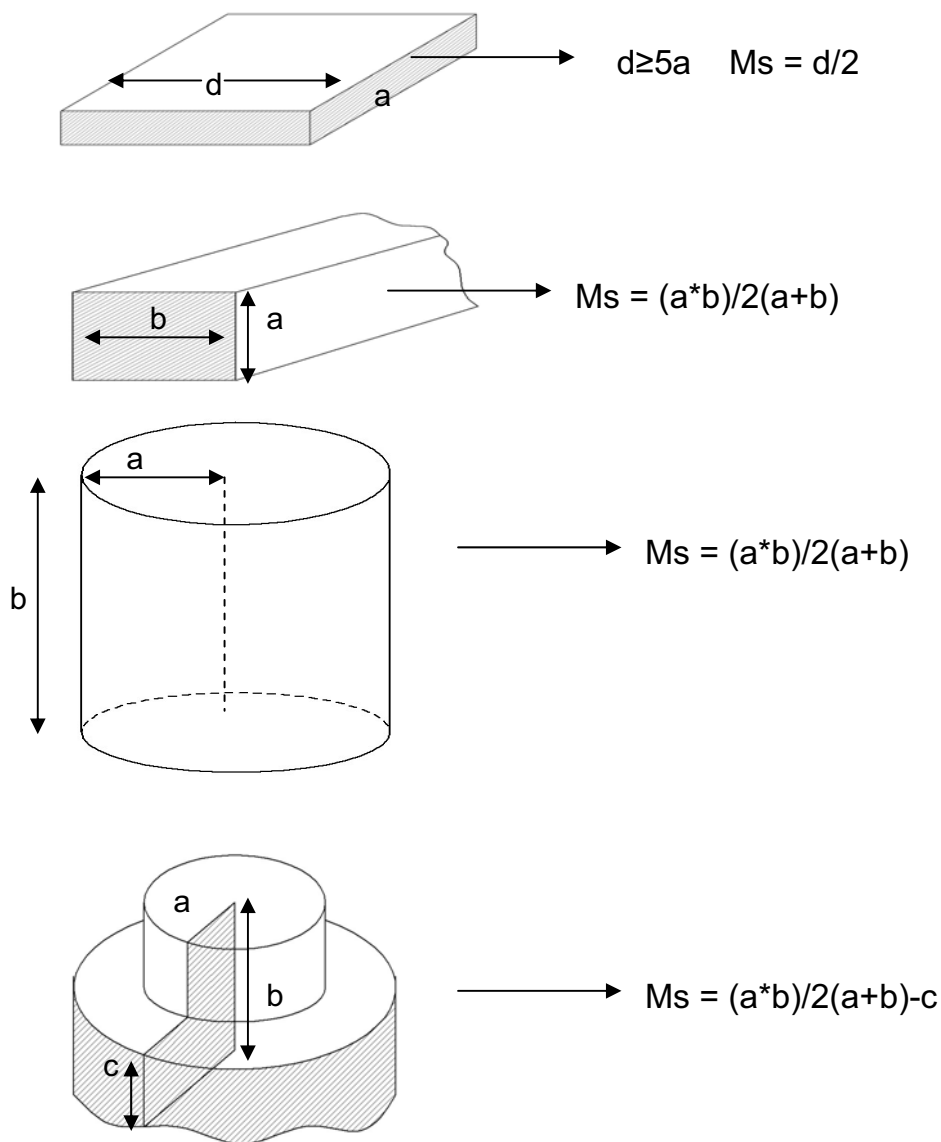


Figura 11. Módulo para formas geométricas simples (Adaptado de MAEHARA, 1989).

“Wlodawer (1966) define que, para que o massalote atue corretamente, seu tempo de solidificação deve ser maior que o da seção e propôs que, para o aço, o módulo do massalote deve ser 1,2 vezes o módulo da seção a alimentar”. Isto é mostrado na equação (4).

$$M_r (\text{Módulo do massalote}) = 1,2 * M_c (\text{módulo da seção}) \quad (4)$$

Depois de calculado o módulo da seção, calcula-se o módulo do massalote utilizando a Equação 4. De posse do módulo do massalote, calcula-se suas dimensões (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; SCHMIDT *et al*, 2003).

Para massalotes cilíndricos, com diâmetro igual à altura, o diâmetro do massalote será igual a cinco vezes o seu módulo (MAEHARA, 1989).

Além da necessidade do massalote apresentar módulo maior que o módulo da seção a ser alimentada, ele deve ter um volume suficiente de líquido para compensar as contrações líquidas e de solidificação. Para se certificar se seu volume é suficiente, Wlodawer (1966) propôs que a inequação (1) fosse satisfeita:

$$V_m \geq k * r * V_p (p_s / p_l) \quad \text{Inequação 1}$$

Onde:

V_m - Volume do massalote

r - Coeficiente de contração volumétrica do metal

k - Coeficiente que depende das condições de funcionamento do alimentador

V_p - Volume da peça sólida e fria

p_l - Densidade do metal líquido

p_s - Densidade do metal sólido

Plutshack e Suschil (1996) relatam que Wlodaver(1966) propôs várias formas de massalotes padronizadas para aços. Algumas destas formas são mostradas no anexo 1.

Vários programas computacionais estão disponíveis para projetos de alimentação. De maneira geral, estes programas podem ser divididos em dois grupos. O primeiro grupo inclui programas recomendados para determinar o tamanho dos massalotes e se baseiam no método do módulo ou método de Wlodawer (1966). Estes programas contêm sub-rotinas que permitem o cálculo de volume de fundidos, sua massa, módulo de seção, distância de alimentação e número de massalotes. O cálculo do massalote requer entradas ou “Inputs” simples como peso da seção a alimentar, o percentual de contração da liga, processo de moldagem, a localização do canal de entrada do metal e a forma desejada do massalote. Com estas entradas, o programa irá gerar as alternativas de tipo e tamanho de massalote para a seção a alimentar. (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; SCHMIDT *et al*, 2003).

O segundo grupo usa cálculos de transmissão de calor para simular o avanço da solidificação no fundido e no massalote. Esses programas são utilizados para definir os últimos pontos a se solidificarem e, desta forma, permitem uma otimização da alimentação e eliminação de defeitos provenientes da solidificação (SCHMIDT *et al*, 2003). Mas, também se baseiam-se nos mesmos conceitos empregados no primeiro grupo.

A Figura 12 mostra a seção do mesmo cubo de aço com 100 mm de aresta conforme mostrado na Figura 2, agora com alimentação ou massalote. O massalote foi dimensionado através do uso de programas computacionais que se baseiam no método do módulo e se considerou uma contração teórica de 5,5% conforme sugerida pelo software THERMO-CALC (THERMO-CALC, 2008, TCSE6). Como resultado do dimensionamento, utilizou-se uma luva exotérmica cilíndrica com diâmetro de 80 mm e altura de 110 mm. Nota-se, pela Figura 12, que não ocorreu rechupe interno e os defeitos relacionados à da solidificação se

posicionaram no massalote. Porém, a massa do massalote foi aproximadamente 4,5 kg e a da peça 7,8 kg. O peso bruto foi 12,3 kg e o rendimento metálico foi de 63%. Logo, 37% de perda, que volta para o processo de fundição como retorno, o que é um valor muito elevado.

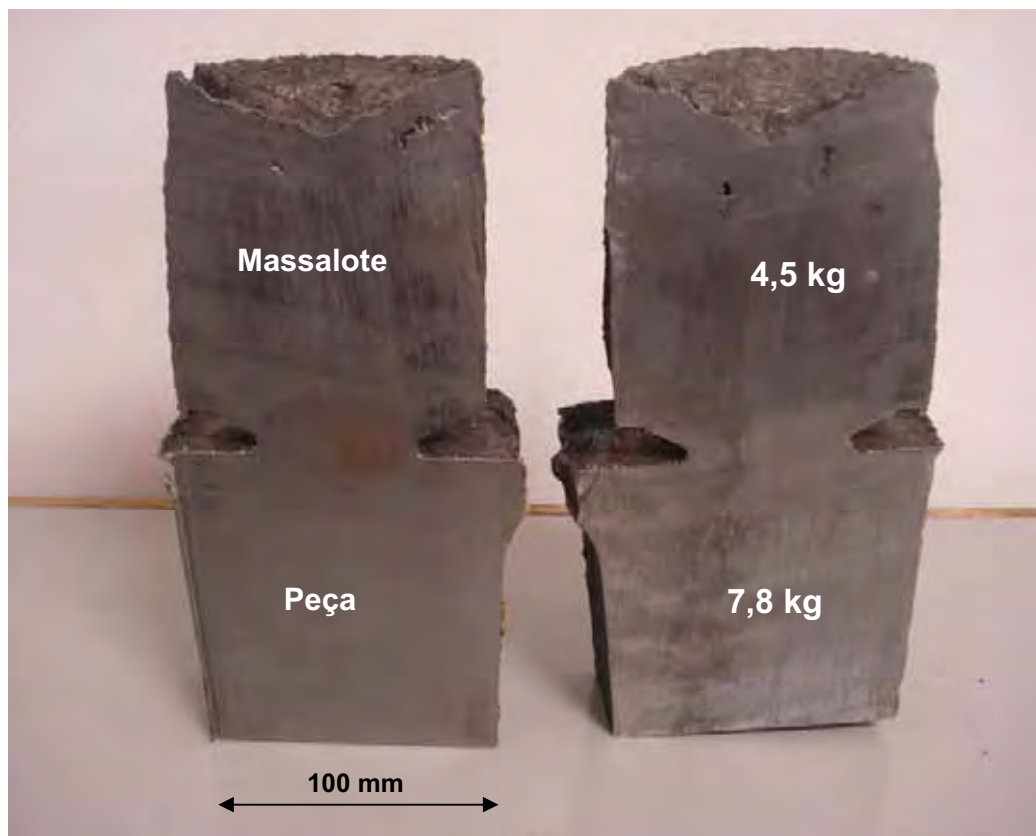


Figura 12. Seção de um cubo de aço fundido com 100 mm de aresta com massalotes.

2.2.3 Tipos de Massalotes

Os massalotes podem ser classificados de acordo com seu posicionamento na peça, forma ou material com que é revestido. A Figura 13 adaptada de Brown (2000) mostra os tipos de massalote conforme nomenclatura de fundição.

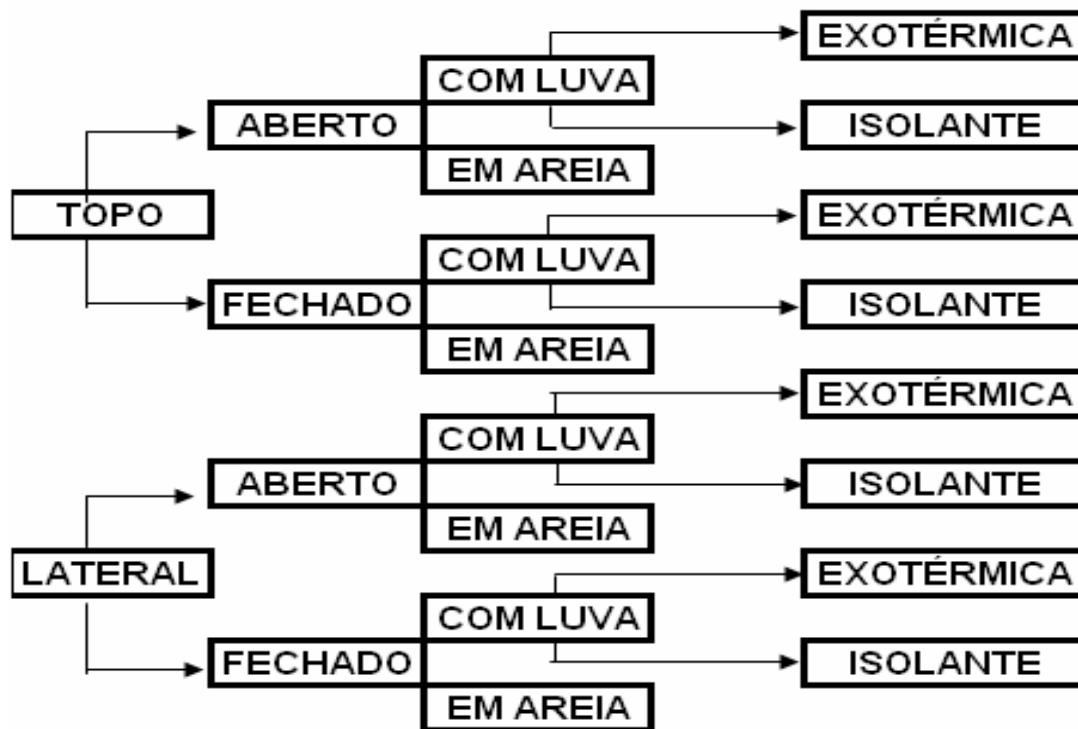


Figura 13. Classificação dos massalotes (Adaptada de Brown, 2000).

Conforme seu posicionamento em relação à seção a alimentar os massalotes podem ser de topo ou laterais. Os massalotes de topo estão ligados na parte superior da seção e os laterais são ligados lateralmente. Tanto os de topo quanto lateral, podem ser abertos, quando sua face superior está aberta ao ambiente ou fechados, também conhecidos como massalotes cegos, quando não tem face exposta ao ambiente.

Quanto ao tipo de material em que são revestidos, os massalotes podem ser em areia, quando revestidos com o mesmo material do molde ou com luvas. As luvas podem ser fabricadas com material isolante, tendo somente a função de reduzir a troca de calor, aumentando o tempo de solidificação do massalote ou exotérmica, quando, além de ter a função de retardar a solidificação do massalote, o material da luva se queima e gera calor que suficiente para aquecer o líquido, aumentando ainda mais o tempo de solidificação do massalote.

Atenção deve ser dada à qualidade da luva e seu estado de conservação, pois deve ser utilizada seca ou sem umidade para evitar ferveras e gases no interior do massalote, o que dificultaria seu preenchimento pelo metal líquido e comprometeria seu desempenho (BROWN, 2000).

Por reduzirem a taxa de transferência de calor do metal líquido para o molde, mantendo, desta forma, o metal líquido por mais tempo, as luvas aumentam o módulo do massalote. Logo, o emprego de luvas tanto isolante quanto exotérmica em substituição aos massalotes de areia, permite a redução do tamanho do massalote, melhorando desta forma o rendimento metálico. (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; BROWN, 2000; SCHMIDT *et al*, 2003).

Para reduzir a perda de calor na face que fica exposta ao ambiente, os massalotes abertos devem ser cobertos após enchimento por um pó exotérmico constituído por uma mistura de materiais que, em contato com o metal fundido, entram em ignição, liberando calor. Por se tratar de uma reação fortemente exotérmica, o calor gerado pela queima do pó exotérmico reaquece o metal líquido e o produto da queima forma uma casca porosa que reduz sensivelmente a perda de calor por radiação na face superior do massalote. Este reaquecimento retarda a solidificação do metal no interior do massalote, mantendo-o líquido por mais tempo (BROWN, 2000).

As forças atuantes sobre o metal líquido durante o processo de alimentação, estão relacionadas à pressão metalostática, atmosférica e a outras pressões desenvolvidas no interior do líquido. A pressão metalostática é devida ao peso de metal e varia diretamente proporcional com a altura do massalote. A pressão atmosférica é a ação da atmosfera sobre o líquido (MORAES, 1985; BROWN, 2000).

Se toda a superfície externa do massalote estiver solidificada, a pressão atmosférica deixa de atuar sobre o metal líquido, agindo, a partir deste momento somente a pressão metalostática. Para o caso de ligas ferrosas, a atmosférica atua com uma pressão aproximadamente 1,7 vezes maior que a metalostática

para uma coluna de metal líquido de 760 mm, o que demonstra uma eficiência muito maior da pressão atmosférica, se comparado com a metalostática, sendo fundamental para que o metal líquido vença as pressões internas que se formam na peça durante a solidificação (MORAES, 1985; BROWN, 2000).

Kanno (2008) relata que, durante a solidificação, desenvolve-se uma pressão no líquido a se solidificar denominada P_{MSR} ou “Resistência ao suprimento de metal”. Esta resistência gera uma pressão interna que atua no sentido contrário à exercida pelo peso do metal do massalote, dificultando o fornecimento de líquido e quando esta pressão ultrapassa 0,7 atm, aumenta o volume do rechupe.

Monroe (2004) mostra que a pressão interna na peça aumenta à medida que gases dissolvidos no metal são segregados para as últimas frações de líquido a se solidificar. Todo este processo, seja aumento da pressão exercida pelo líquido e ou por gases segregados, culminam com aumento da cavidade do rechupe. O processo é agravado no final da solidificação, uma vez que a mistura de cristais sólidos e metal líquido fica mais pastosa.

Se toda a superfície externa do massalote estiver solidificada, a pressão atmosférica deixa de atuar sobre o metal líquido, agindo, a partir deste momento, somente a pressão metalostática ou pressão da coluna de metal dentro do próprio massalote. Para o caso de ligas ferrosas, a pressão atmosférica atua com uma pressão de aproximadamente 1,7 vezes maior que a metalostática para uma coluna de metal líquido de 760 mm (BROWN, 2000).

Logo, se o metal líquido, em processo de solidificação, oferece uma resistência para receber líquido do massalote, desenvolvendo pressões negativas ou resistentes a esse suprimento, deixar de ter a pressão atmosférica atuando sobre o líquido do massalote agrava mais ainda o problema aumentando, assim, o tamanho do rechupe. Por isto, é de fundamental importância os massalotes abertos serem cobertos com pós exotérmicos (BROWN, 2000).

Os massalotes fechados ou cegos, por não apresentarem faces expostas ao ambiente, não requerem o emprego de pós de cobertura. Para que, depois de preenchido com metal líquido, em sua parte superior não forme uma pele sólida que não permite a ação da pressão atmosférica sobre o líquido, tanto os massalotes que utilizam luvas fechadas quanto os em areia, necessitam de uma alteração em sua forma, de modo a criar pontos que se solidifiquem lentamente.

Na terminologia de fundição, estes pontos são conhecidos como pontos quentes, ou pontos concentradores de calor, onde a solidificação é retardada. Para os massalotes em areia, os concentradores de calor são conhecidos como machos atmosféricos e são posicionados normalmente na face superior do massalote. Na luva, o concentrador de calor ou ponto quente é em forma de “V” e também está posicionado na parte superior do massalote. A Figura 14, adaptada de Maehara (1989), ilustra os concentradores de calor em uma luva e num massalote em areia.

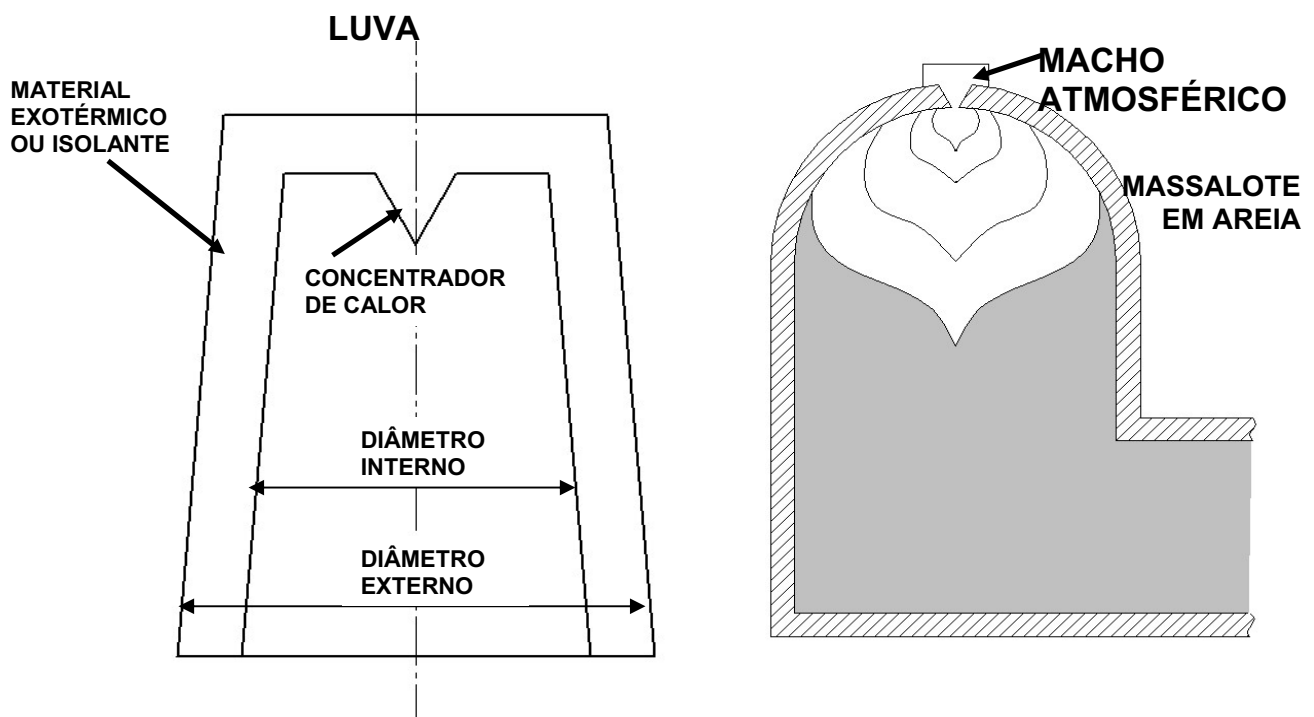


Figura 14. Macho atmosférico em massalote em areia e concentradores de calor em luvas (Adaptado de Maehara, 1989).

O uso de massalotes é necessário para compensar a contração volumétrica que ocorre durante a solidificação. Mas, sua presença significa custo e diminuição no rendimento metálico, que, por definição, é a relação entre o peso líquido do fundido e o peso total do fundido. Logo, minimizar o uso de massalotes e ainda garantir a sanidade interna da peça deve ser uma busca constante nas fundições (SCHMIDT *et al*, 2003).

Além da deficiência de alimentação, os rechupes podem ainda ser causados por variações no processo que, de alguma maneira possam interferir na solidificação como composição química do metal, nível de desoxidação, ou ainda a parâmetros operacionais como temperatura de vazamento, tempo de vazamento, velocidade de resfriamento imposta pelo material do molde ao metal líquido durante a solidificação e resistência à compressão da areia, (GALANTE *et al*, 1997; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005; BLAIR, M. *et al*, 2005).

2.2.4 Variáveis do Processo de Fundição de Aço que afetam a Formação de Rechupes

A seguir, são analisadas as variáveis que podem influenciar na ocorrência de rechupes em peças de aço fundido, vazadas por gravidade em moldes de areia.

2.2.4.1 Temperatura de Vazamento

Como relatado na seção 2.2.3 uma das contrações a que estão sujeitas as peças de aço fundido durante seu processo de produção é a contração no estado líquido. De uma maneira geral, os aços, por não se tratar de metais puros, se solidificam dentro de uma faixa de temperatura que se inicia na “**temperatura líquidus**” onde começam a se formar os primeiros cristais sólidos e termina na “**temperatura sólidus**” (SILVA; MEI, 2006). O intervalo entre a

temperatura líquidus e temperatura sólidos é conhecido como intervalo ou faixa de solidificação e, nesta faixa de temperatura, tem-se uma mistura de cristais sólidos com líquido. Para se garantir um completo enchimento da cavidade do molde é necessário que o aço seja vazado a uma temperatura acima da temperatura líquidus. A diferença entre a temperatura de vazamento e a temperatura líquidus é chamada de sobreaquecimento (FINARDI, 1993).

Num processo de fundição de aço em molde de areia, a temperatura de vazamento deve ser a mínima possível. Isto se deve ao fato de que os metais líquidos, quando aquecidos, aumentam de volume e, durante o resfriamento, se verificará uma maior contração. Logo, uma temperatura mais baixa geraria menor volume de líquido e, conseqüentemente, menor contração (PLUTSHACK E SUSCHIL, 1996; BLAIR *et al*, 2005; STEFANESCU, 2005; VIJAYARAM, *et al*, 2006; GARCES; ALVES, 2006). Além disso, maiores temperaturas agredem mais o molde aumentando a expansão da sílica e gerando outros defeitos como escamas e defeitos relacionados à expansão (GALANTE, *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2007).

Kanno (2008) em experimentos realizados com ferro nodulares mostra que tanto a forma quanto o volume do rechupe estão diretamente ligados a temperatura de vazamento e define que, quanto menor a temperatura de vazamento, menor será o tamanho do defeito (KANNO, 2008).

Finardi (1993), Johnson e Heine (2000), Monroe (2004), Stefanescu (2005) relatam que uma maior temperatura de vazamento também aumenta a solubilidade de gases como nitrogênio e hidrogênio no aço líquido e isto pode gerar outros defeitos de fundição, como gás ou mesmo potencializar a ocorrência de rechupes (FINARDI, 1993; JOHNSON; HEINE, 2000; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005).

Makaya e Fredriksson (2007), em estudos sobre formação de materiais porosos, relatam a influência do nitrogênio na formação do poros ou vazios de

solidificação e mostram que maiores temperaturas do metal líquido aumentam a dissolução de nitrogênio e, conseqüentemente, o volume do poro.

Porém, um mínimo de sobreaquecimento é necessário para conferir ao metal a fluidez adequada para que este possa produzir uma reprodução fiel ou sem perda de detalhes do fundido. O sobreaquecimento do aço está relacionado à geometria da peça, devendo ser tanto mais elevado, quanto menor as espessuras à preencher. Os valores normais de sobreaquecimento variam de 30 a 80°C (COLAGROSSI, 1991, PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

O tempo de vazamento ou velocidade de enchimento do molde tem influência sobre a temperatura de vazamento. Quanto menor o tempo de vazamento, menor pode ser o sobre aquecimento imposto ao metal para vazar e conseqüentemente menor será a contração líquida. Além disto, maiores tempos de vazamento comprometem a qualidade do molde e aumentam a absorção de gases oriundos do molde pelo metal (MONROE, 2004; RIBEIRO *et al*, 2007).

2.2.4.2 Processo de Elaboração do Aço

A elaboração dos aços para fabricação de peças fundidas é normalmente realizada em fornos elétricos, que podem ser a arco trifásico ou a indução (FINARDI, 1993; FUOCO, 2005).

O refino compreende as fases de eliminação e controle das impurezas (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; FUOCO, 2005; SILVA; MEI, 2006).

Finardi (1993) relata que os fornos elétricos a arco são eficientes para remoção das impurezas, enquanto que os fornos a indução são menos adequados ao seu controle.

As principais impurezas contidas nos aços são: fósforo, enxofre, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio. No aço solidificado, esses elementos se encontram dissolvidos na matriz metálica na forma de solução sólida ou na forma de

inclusões. Parte das inclusões pode se localizar nas porosidades durante a solidificação (FINARDI, 1993; MONROE, 2004).

As inclusões não metálicas constituem descontinuidades no líquido ou sólido contribuindo para redução da fluidez do metal, enquanto ele ainda está líquido dificultando o enchimento da peça e, no sólido, prejudicando as propriedades mecânicas (FINARDI, 1993; FUOCO, 2005; SILVA; MEI, 2006).

As porosidades estão associadas aos gases dissolvidos no metal. As inclusões podem nuclear porosidades (FINARDI, 1993; SILVA e MEI, 2006).

Nos fornos elétricos a arco trifásico a existência de escória no estado líquido permite que o aço seja refinado durante a fusão através do corte de sucata e após a fusão através da injeção de oxigênio comercialmente puro na forma gasosa no aço líquido. Esta operação de injeção de oxigênio no metal líquido pode ser feita através de lanças que sopram o oxigênio direto no metal próximo à interface metal-escória ou através de jato do tipo “Cojet” ou jato coerente que consiste na utilização de um gás combustível como o gás natural ou GLP para promover uma chama envolvente supersônica de oxigênio. O processo, com jato coerente, reduz o tempo de elaboração do aço, uma vez que a queima do gás combustível é uma fonte a mais de geração de calor e a injeção se inicia concomitante com a fusão. Além disso, a velocidade com que se injeta o oxigênio o torna mais eficiente se comparado com processos com lança e somente oxigênio (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; VIANA et al, 2004).

A injeção de oxigênio promove a oxidação do metal formando FeO. O FeO em presença de carbono, que é um dos constituintes do aço, será reduzido, formando o gás monóxido de carbono (CO) conforme a equação (5).



O percentual de carbono recomendado pela literatura clássica para ser oxidado durante o processo de refino dos aços em fornos elétricos a arco gira

em torno de 0,3%, sendo este valor conhecido como “carbon droop”. As bolhas de monóxido de carbono formadas pela redução do FeO evoluem através do metal provocando o “boilling” ou seja, uma agitação do metal que arrasta gases dissolvidos no líquido como nitrogênio e hidrogênio. A presença desses gases no metal durante a solidificação, poderia provocar o aparecimento de poros ou mesmo fragilizar o material devido a formação de nitretos ou microtrincas em forma de flocos causadas por hidrogênio. Desta forma, quanto maior e mais intenso for o “boilling”, menor deve ser o volume de gases dissolvidos no aço líquido (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; FUOCO, 2005).

Finardi (1993), Monroe (2004) e Stefanescu (2005), descrevem que as porosidades relacionadas com gases são resultantes da diferença de solubilidade dos gases entre o metal líquido e o sólido. Durante a solidificação e resfriamento do metal, uma significativa quantidade de gás dissolvido é rejeitada pelo líquido e, se a pressão crítica para formação do poro é ultrapassada, forma-se uma bolha de gás e inicia-se, assim, uma porosidade. Com a queda da temperatura, devida ao resfriamento e ao processo de solidificação, a solubilidade dos gases diminui e mais gás é rejeitado do líquido, indo para interface líquido-sólido, gerando um progressivo aumento na concentração de gases no metal líquido, na frente de solidificação, eventualmente formando poros isolados que se confundem com rechupes mas não são rechupes. Se estes gases se formam nos últimos estágios da solidificação, onde deve se formar o maior rechupe, eles aumentam o tamanho do defeito, porém deixam, em sua superfície interna, regiões arredondadas e lisas. Se este gás se forma na zona pastosa, após o fechamento das dendritas, ele irá ficar preso entre as redes dendríticas e nucleará, nos locais, pequenas cavidades denominadas microporos (FINARDI, 1993; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005).

A quantidade de carbono queimado no processo de elaboração do aço, bem como o volume de oxigênio injetado no metal líquido irão definir a intensidade do “boilling”. Porém, no final da oxidação, a quantidade de oxigênio no aço líquido é

muito elevada, necessitando de uma redução em seu teor (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; FUOCO, 2005; SILVA; MEI, 2006)

Por isto, a última etapa do processo, antes do vazamento, deve ser a desoxidação. Esta etapa tem como propósito reduzir o teor de oxigênio residual. A desoxidação, geralmente, é feita com silício, manganês e alumínio (FINARDI, 1993; FUOCO, 2005; SILVA; MEI, 2006)

Segundo Finardi (1993), tanto manganês quanto silício são desoxidantes fracos que reduzem, dependendo de seus teores, o percentual de oxigênio do metal para valores até 50 ppm (0,005%). Porém, 50 ppm de oxigênio dissolvido é um valor muito elevado para o processo de fundição de aço (FINARDI, 1993; SILVA; MEI, 2006).

Desta forma, é necessário adição de desoxidantes mais fortes, ou seja, elementos com mais baixa energia livre para formação do óxido que o sício e o manganês. O alumínio é normalmente escolhido por apresentar forte capacidade desoxidante aliada a um menor custo. O produto da desoxidação com alumínio é alumina – Al_2O_3 (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1998; FUOCO, 2005; SILVA; MEI, 2006).

Os teores de alumínio normalmente encontrados nos aços fundidos variam de 0,03 a 0,09%. Valores abaixo de 0,03% tendem a formar óxidos de baixa estabilidade com ferro e manganês, que podem, posteriormente, durante a solidificação, ser reduzidos pelo carbono, formando pequenas bolhas de CO. Além disso, aços com níveis de alumínio residuais abaixo de 0,03% podem favorecer a formação de inclusões de oxi-sulfetos do tipo II que formam precipitados eutéticos contínuos em contornos de grão, vindo a reduzir as propriedades mecânicas, especialmente a ductilidade do aço (FUOCO, 2005).

Monroe (2004) mostra que, durante a solidificação, com a redução gradativa da temperatura e mudança de fase de líquido para sólido, ocorre a diminuição da solubilidade de gases como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dissolvidos no metal, favorecendo sua segregação para o líquido remanescente

ou mesmo contornos de grão já formados. Estes gases, em presença de alumínio, silício e carbono, reagem formando óxidos ou compostos intermetálicos que forram a superfície do rechupe como se fosse uma fina pele de escória ou mesmo um poro junto ao rechupe (MONROE, 2004).

Finardi e Alves (1998), Fuoco (2005) descrevem que, além de óxidos, a presença de alumínio em conjunto com nitrogênio no aço líquido irá formar compostos intermetálicos do tipo AlN que atuam como refinador de grão, mas que, dependendo do volume e da concentração, podem vir a fragilizar o material, resultando na Fratura Intergranular ou “Rock Candy Fracture”(ALVES; FINARDI, 1998; FUOCO, 2005).

Logo, seja através da formação de alumina ou de compostos intermetálicos do tipo AlN, a presença do alumínio em teores mais elevados atua no sentido de diminuir as porosidades fixando gases dissolvidos no metal em forma de partículas sólidas, que compensam, em parte, as contrações de solidificação. Atenção deve ser dada à formação excessiva de óxidos ou compostos intermetálicos que podem vir a fragilizar o aço (ALVES; FINARDI, 1998; FUOCO, 2005).

Outra possibilidade para a eliminação de gases dissolvidos no líquido é através da rinsagem ou borbulhamento de gás inerte como argônio pelo fundo da panela de vazamento. Fruehan (1996) relata que, quando o argônio é borbulhado através do líquido, átomos de nitrogênio e hidrogênio aderem à superfície da bolha e se combinam formando N_2 ou H_2 . Estes gases são arrastados junto com a bolha de argônio para fora do metal (FRUEHAN, 1996).

2.2.4.3 Composição Química e Carbono Equivalente no Aço Líquido

A composição química do aço tem relação direta com o volume de contração durante a solidificação e, conseqüentemente, com o volume do rechupe (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; SILVA; MEI, 2006).

O carbono equivalente fornece um valor numérico da contribuição na composição química do próprio teor de carbono e dos demais elementos químicos presentes no aço sob a forma de uma quantidade de carbono equivalente. Para processos especiais como solda e tratamento térmico, ele é uma medida importante para definição de temperaturas de pré-aquecimento para soldagem, temperaturas de revenido e definição de meios de severidade de têmpera (UHRENIUS, 1977; LAMPMAN, 1996; CLESLAK, 1996).

Plutshack e Suschil (1996) mostram que o aumento do percentual de carbono equivalente reduz a temperatura de início de solidificação ou “temperatura líquidus” e aumenta o intervalo de solidificação e descrevem que, quanto maior o intervalo de solidificação, maior a contração volumétrica e, consequentemente, maior o tamanho do rechupe.

Wlodawer (1966) mostra que, o volume de contração varia com a temperatura do metal e com o percentual de carbono equivalente no aço, sendo que, quanto maior o carbono equivalente do aço, maior será o percentual de contração durante a solidificação. De acordo com Wlodawer (1966), a variação volumétrica na temperatura de 1600 °C é de aproximadamente 4,5%, para um aço com 0,2%, de carbono e chega a 7,5%, para um aço com 1% de carbono equivalente (WLODAWER, 1966).

Rajindra (2007) mostra que o carbono equivalente do aço é função de sua composição química e varia conforme a equação (6) (RAJINDRA, 2007).

$$CE = C + Mn/6 + (Ni + Cu)/15 + (Cr + Mo + V)/5 \quad (6)$$

Onde:

CE – Percentual de Carbono equivalente; C – Percentual de carbono; Mn – Percentual de manganês; Ni – Percentual de níquel; Cu – Percentual de cobre; Cr – Percentual de cromo; Mo – Percentual de molibdênio; V – Percentual de vanádio.

Com isto, conclui-se que o metal pode influenciar no volume de vazios de solidificação, tanto pela composição química, especialmente em razão dos elementos carbono e alumínio, quanto pelo processo de elaboração, que pode gerar um metal com maior volume de gases dissolvidos que tendem a aumentar o tamanho dos vazios.

2.2.4.4 Processos de Moldagem em Areia

O tipo de processo de moldagem empregado na fundição de uma peça de aço, bem como a taxa de resfriamento imposta pelo material do molde ao metal, durante a solidificação, podem ter efeito no desenvolvimento da estrutura do fundido e na forma e volume do rechupe (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; BLAIR et al, 2005; VIJAYARAM et al 2006; GARCES; ALVES, 2006).

Os moldes em areia são constituídos de areia base, aditivos e aglomerantes (SIGUEL, 1985; ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

A areia base é um material mineral granular, refratário, com tamanho que varia desde 0,06mm até 2,0mm aproximadamente, e empregam-se faixas granulométricas adequadas a cada uso. São normalmente resultado da fratura e decomposição de rochas através de ações das intempéries ou através de transformação mecânica por processos de britagem, moagem e classificação. As principais areias base utilizadas em processos de fundição de aço são areias de sílica ou quartzo, cromita, zirconita e olivina, sendo as silicosas as mais empregadas. Os aglomerantes, normalmente empregados na preparação das areias de moldagem, são inorgânicos, do tipo argilosos e silicatos ou orgânicos, geralmente resinas (SIGUEL, 1985; O'MEARA *et al*, 1996; ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997)

Os principais processos que empregam aglomerantes inorgânicos são conhecidos como processos de areia sintética, também conhecidos como

processos à verde. Nesses processos, a areia é normalmente misturada em misturadores de galga ou convencionais que operam por batelada ou lote a lote, misturadores contínuos ou ainda misturadores à vácuo. A mistura é constituída de areia, argilas especiais, como bentonitas, aditivos derivados de cereais e água (SIGUEL, 1985). Para atingir os níveis de resistência necessários para suportar as pressões exercidas pelo metal contra a parede do molde, o processo requer forte compactação mecânica, que pode ser obtida manualmente com uso de marteletes pneumáticos processo este conhecido como moldagem manual, por máquinas de moldagem que projetam a areia sobre o modelo, fazendo a compactação por impacto, conhecida como “sand slinger”, batida e compressão conhecida com “joults squeezer” ou ainda, moldagem por sopro de areia e alta compressão. Os processos à verde, além de produzirem fundidos de boa qualidade, podem ser totalmente automatizados em função dos volumes de produção necessários (SHIH; ZONG, 2000; JUNJIAO *et al*, 2007)

Os processos que empregam aglomerantes orgânicos são conhecidos como processos químicos e podem ser por cura a quente ou a frio. Nestes processos, a resistência mecânica do molde é obtida, principalmente, por uma reação química que polimeriza a resina, formando uma rede rígida de polímero, envolvendo os grãos de areia (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

O processo químico de cura a quente mais empregado em fundição é a moldagem em casca ou “Shell molding”. O processo consiste em produzir as duas partes do molde, superior e inferior, em forma de casca com espessura entre 8 e 20mm. Para produção das cascas, um ferramental metálico, aquecido entre temperaturas que variam de 180°C a 350°C, é coberto com uma areia de moldagem previamente preparada com 2,5 a 4% de resina fenólica e catalisador. A areia permanece sobre o modelo aquecido por um tempo suficiente para formar a casca. Depois de formada a casca, o modelo é retirado e as duas partes são preparadas e fechadas, estando, assim, o molde pronto para receber

o metal. O processo, que tem grande aplicação na produção de peças de pequeno porte e grandes séries, gera produtos com bom acabamento e precisão dimensional, podendo ser utilizado na fundição de qualquer metal (ARCHIBALD; SMITH, 1996).

Dentre os processos químicos, os de cura a frio são os mais empregados na produção de aço fundido. Estes processos são classificados de acordo com o tipo de resina utilizada. Os processos mais empregados são:

A) Processo furânico: O sistema furânico é largamente utilizado em processos de fundição de aço em virtude de sua alta resistência a quente e excelentes características de desmoldagem e acabamento superficial. É um sistema de aglomerantes de duas partes, que consiste em uma resina do tipo furânica reativa e um catalisador ácido. Normalmente, a quantidade de aglomerante ou resina utilizada é de 0,9% a 1,5%, calculada sobre o peso da areia. Os níveis de catalisador são geralmente de 20% a 50%, calculados sobre o peso do aglomerante. A base da resina é um álcool furfurílico que normalmente é modificado com uréia, formaldeído ou fenol. Os catalisadores normalmente utilizados são ácido fosfórico, tolueno sulfônico, paratolueno sulfônico ou ácido xileno sulfônico. A escolha do catalisador está relacionada ao tempo de cura e ao custo. As areias aglomeradas com resinas furânicas são facilmente regeneradas com reaproveitamentos da ordem de 95% (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

B) Processo éster fenólico alcalino: Compreende uma resina fenólica endurecida por um éster que funciona como catalisador. Os níveis típicos de ligante empregados são de 1,2% a 1,8% sobre o peso da areia e aproximadamente, 20% de éster sobre o peso de resina. Uma característica original do sistema de éster fenólico é a cura em dois estágios. O primeiro é atingido à temperatura ambiente e o segundo ocorre durante o processo de fundição. Como a resina fenólica contém certa proporção de material inorgânico, como potássio, o sistema não é literalmente orgânico, o que pode causar problemas

com a recuperação desta areia (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

C) Processo fenólico-uretânico ou PUNB “phenolic urethane no-bake”: O sistema fenólico-uretânico de cura a frio, também conhecido como resina poliuretânica, utiliza duas partes. A parte I é uma resina fenólica ou benzil-éter diluído com solventes orgânicos, que se combina a uma parte II ou um poliisocianato. Para regular a velocidade de reação entre as partes I e II utiliza-se um catalizador do tipo amina (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

Da combinação dos dois componentes, catalisada pelo terceiro, tem-se a formação de uma resina poliuretânica, onde o catalisador reage com as hidroxilas da resina, havendo apenas um estágio de reação. O produto da reação é um plástico uretânico e não se formam subprodutos. A reação química do PUNB é controlável, rápida e completa. Para um mesmo percentual de aglomerante a resistência obtida no molde é a mesma em toda a espessura da seção, sendo que as seções mais finas curam com a mesma velocidade das seções mais espessas (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

A Figura 15 adaptada de Galante *et al* (1997) mostra esquematicamente a reação química e o poliuretano formado.

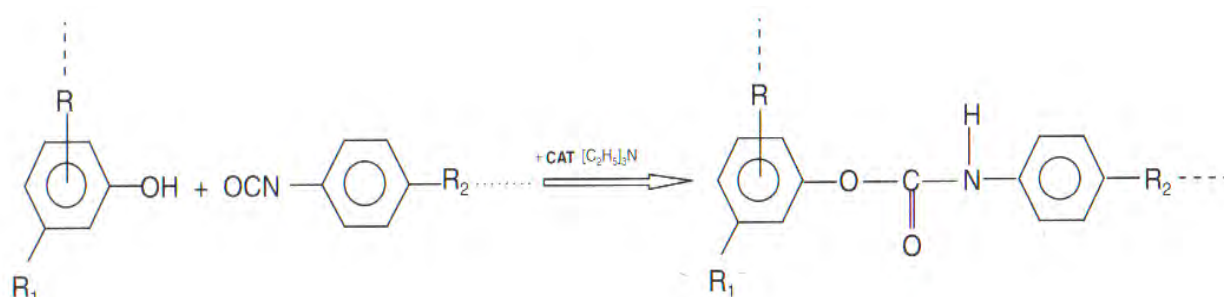


Figura 15. Esquema da reação química do processo fenólico uretânico (GALANTE *et al*, 1997).

Para uma dada granulometria da areia base, a sua resistência à temperatura ambiente varia com o percentual de resina e com o tempo, sendo os maiores valores de resistência obtidos com maiores percentuais de resina e tempos após cura superiores a 24 horas (GALANTE *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2007). Para a moldagem e vazamento de aços, recomenda-se resistência superior à 550 kPa . Baixa resistência pode aumentar o tamanho do rechupe (KANNO, 2008). As porcentagens de uso normalmente recomendadas são (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997):

- parte I(Resina fenólica): 0,4 a 0,6% sobre o peso de areia base;
- parte II(Isocianato): 0,4 a 0,6% sobre o peso de areia base;
- catalisador: 0,5 a 10% sobre o peso da parte I (valores usuais entre 3 e 5%).

Para o caso de processos de fundição de aço, em face de sua resistência à quente ser baixa, recomenda-se o uso de aditivos como óxido de ferro vermelho do tipo hematita- Fe_2O_3 ou óxido de ferro preto do tipo magnetita- Fe_3O_4 (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; SERGHINI, 2007).

Ribeiro *et al* (2006) relata que adições de óxido de ferro na areia de moldagem tendem a aumentar sua densidade e capacidade de troca de calor durante a solidificação. Em processos de moldagem, utilizando ligantes químicos do tipo fenólicos uretânicos, a adição de óxido de ferro pode ser uma maneira de aumentar a resistência a quente devido a maior capacidade do molde trocar calor e, conseqüentemente, acelerar o processo de solidificação, evitando defeitos superficiais relativos à expansão da areia de sílica. O percentual de óxido de ferro normalmente empregado varia de 2 a 4% sobre o peso da areia (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2006).

O óxido de ferro tem várias funções no processo: a)melhorar o acabamento superficial do molde, visto que, normalmente, os processos de fundição de aço empregam areias grossas ou de menor módulo de finura; b) reduzir a tendência à formação de defeitos oriundos da expansão da sílica, como veiaamentos e escamas; c) reduzir a tendência a formação de defeitos

superficiais relacionados à decomposição da resina, formando uma atmosfera redutora no molde, o que facilita a deposição de carbono na sua superfície com acréscimos de carbono na peça ou mesmo formação do defeito conhecido como “Lustrous Carbon”; d) reduzir a tendência à absorção de nitrogênio da resina, uma vez que ela apresenta de 3 a 4% de nitrogênio; e) prevenir trincas a quente; f) aumentar a resistência a quente devido ao aumento da capacidade de troca de calor da areia, uma vez que ele aumenta a sua densidade (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2006; MAKAYA, 2007; FREDRIKSSON; PETERS, 2007; REIS *et al*, 2007).

Se a adição de óxido de ferro na areia de moldagem faz com que ela apresente maior capacidade de troca de calor, consequentemente, ela acelera o processo de solidificação. Desta forma, esta adição pode reduzir segregações de gases dissolvidos no metal, ficando estes dispersos na massa em forma de microporos ou formando microinclusões. Além disto, a maior velocidade de resfriamento imposta pelo material do deve diminuir o tamanho do rechupe. Zhao e Liu (2007) relatam que, em experimentos realizados em ferros fundidos nodulares, a maior velocidade de resfriamento imposta pelo material do molde ao metal acelera o processo de nucleação de nódulos e grãos que podem crescer rapidamente devido às maiores taxas de resfriamento, evitando a formação de poros. Comportamento similar pode ocorrer nos aços.

Uma outra maneira de melhorar a capacidade de troca de calor e resistência à quente de moldes que empregam o processo fenólico uretânico é por meio do uso de tintas de moldagem. Brown (2000) relata que o uso de tintas em moldes e machos produzidos pelo processo fenólico uretânico melhora a resistência à penetração do aço líquido, além acelerar o resfriamento na interface metal-molde (BROWN, 2000).

Ribeiro *et al* (2007) mostra que a utilização de tintas à base de zirconita acelera o resfriamento superficial e reduz a tendência a defeitos relacionados à expansão da sílica, além de reduzir areia sinterizada e reação metal-molde.

As tintas normalmente empregadas em processos de fundição de aço em moldes de areia utilizam material refratário à base de óxido de zircônio, silicato de zircônio, silicato de alumínio, olivina, magnesita e sílica. Exceto para as tintas à base de magnesita, todas elas podem ser diluídas em água ou álcool. Além do material refratário, as tintas possuem ligantes orgânicos ou inorgânicos e materiais de suspensão que têm a finalidade de manter a homogeneidade da tinta durante a aplicação, evitando decantação de material refratário (WILE et al 1996, p. 520-521; GALANTE et al, 1997, p. 77-81; FERNANDES, 2001, p.107)

Devido a sua maior condutibilidade térmica, mesmo sendo a camada de tinta utilizada relativamente fina, e em geral os intervalos de solidificação da peça bastante curtos na interface metal/molde com o emprego de tintas adequadas, é possível direcionar a solidificação do metal e até eliminar alguns defeitos de solidificação com a correta aplicação de tintas contendo cargas minerais mais condutoras ou isolantes em regiões distintas do molde(WILE et al, 1996 p. 520-521; GALANTE et al, 1997, p. 77-81).

As tintas devem ser aplicadas à superfície do macho ou molde por meio de um método que permita a formação de uma camada uniforme dentro das necessidades do processo de fundição empregado. Os métodos mais comuns de aplicação de tintas de fundição são:

- a) Pincel
- b) Imersão
- c) Spray ou aspersão
- d) Lavagem

a) Aplicação por pincel

Técnica mais comum e simples de aplicação de tintas em fundição. Este método consiste em diluir a tinta até se conseguir uma densidade que permita a formação de uma camada consistente e uniforme de tinta sobre o macho ou

molde. Com este método, pode-se adequar a espessura da camada às necessidades da região pintada, sendo possível a variação da espessura, se necessário (WILE *et al*, 1996 p. 520-521; GALANTE *et al*, 1997, p. 77-81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000, p.84).

Embora este método de aplicação de pintura seja relativamente lento, é em muitos aspectos os mais apropriados tecnicamente. O esforço mecânico contido no ato de pintar com brocha ou pincel força as partículas de refratário da pintura a entrar nos poros da superfície da areia. A composição da pintura não é tão crítica com este modo de aplicação. O uso do pincel, em particular, é muito útil para pintura de difíceis ângulos ou bolsas no macho ou moldação que sejam difíceis de pintar à brocha (WILE *et al*, 1996 p. 520-521; GALANTE *et al*, 1997, p. 77-81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000. p.84).

b) Aplicação por imersão

Este método consiste em diluir a tinta até uma densidade previamente estabelecida, em que se consiga um equilíbrio entre sólido e líquido, em um recipiente no qual seja possível imergir manual ou mecanicamente o molde ou macho. O método permite uma ótima uniformidade de camada e é amplamente utilizado na produção de peças automotivas, onde se produz grande volumes sendo necessário utilizar um método rápido (WILE *et al*, 1996, p. 521; GALANTE *et al*, 1997, p.81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000. p.84).

c) Aplicação por spray ou aspersão

Bastante comum nas fundições, consiste na diluição das tintas até uma viscosidade mais baixa que as utilizadas nas aplicações com pincel e imersão. A aplicação é feita com uma pistola sobre a superfície do molde ou macho. Neste caso a tinta necessita possuir um grau de tixotropia, que é uma característica

que certos líquidos apresentam de diminuir sua viscosidade quando são agitados, que possibilite à tinta encorpar-se rapidamente sem que haja acúmulo ou escorrimento. Este método permite que se obtenha uma camada de tinta uniforme, sem apresentar marcas, comuns na aplicação com pincel (WILE *et al*, 1996, p. 521; GALANTE *et al*, 1997, p.81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000. p.84).

É necessária muita atenção na seleção da composição da pintura, visto não existir qualquer esforço mecânico para forçar as partículas de refratário na superfície da areia. Este método tem o inconveniente, assim como o da brocha, em haver dificuldade de pintar à pistola, bolsas ou pás de difícil acesso, uma vez que existe uma pressão de ar na cavidade que evita o depósito de refratário. A habilidade do operário é importante. O capital envolvido num bom equipamento de pintura pode ser elevado, visto que, para haver uma consistente aplicação, a manutenção do equipamento é vital (WILE *et al* 1996 p. 520-521; GALANTE *et al*, 1997, p. 77-81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000. p.84).

d) Aplicação por lavagem

Este método é uma maneira prática e eficiente de aplicação que consiste em lavar o macho ou molde com um fluxo contínuo de tinta. Este fluxo é aplicado por gravidade, através de uma mangueira alimentada por reservatório em um nível superior. O excesso de tinta é recolhido de tal forma que, através de uma bomba, a tinta retorna ao reservatório superior, seguindo assim o ciclo normal de pintura. Após a aplicação da tinta, o macho ou molde deve ser seco, podendo a secagem ser realizada em estufa ou por chama, com maçarico, evaporando totalmente o solvente utilizado na tinta, que pode ser álcool ou água (WILE *et al*/ 1996 p. 520-521; GALANTE *et al*, 1997, p. 77-81; AFS Mold & Core Coatings Manual, 2000. p.84).

Logo, o processo de preparação do molde pode influenciar no volume dos

vazios, seja devido à resistência do molde ou a sua capacidade de extrair calor do metal durante a solidificação.

2.2.5 Planejamento Estatístico de Experimentos

Muitas situações experimentais requerem que se observe o efeito da variação de dois ou mais variáveis ou fatores. Mostra-se que, para uma exploração completa de tal situação, não é suficiente variar um fator de cada vez, mas sim que todas as combinações dos níveis diferentes do fator devem ser examinadas para esclarecer o efeito de cada fator e as maneiras possíveis em que o fator pode ser modificado pela variação dos outros fatores. Na análise dos resultados experimentais, o efeito de cada fator pode ser determinado com a mesma exatidão como se somente um fator tenha sido variado em um momento, e os efeitos da interação entre os fatores podem também ser avaliados. Um caminho para se montar estes experimentos é escolher um conjunto de valores, ou níveis, formado pelos valores máximos e mínimos em que cada um dos fatores a ser estudado pode assumir e experimentar uma ou mais interações do processo com cada uma das combinações possíveis dos níveis dos fatores. Tal metodologia é denominada Planejamento Estatístico de Experimentos ou PEE, cujo objetivo é determinar como uma variável afeta um processo de fabricação com o grau de precisão esperado e o menor custo (FIOD, 1997; MONTGOMERY, *et al*, 2004; TAGUCHI *et al*, 2005).

A metodologia pode ser aplicada a novos processos bem como na otimização de processos existentes, com a vantagem de reduzir o número de experimentos. Minimizar o número de experimentos significa reduzir tempo e custo. Outra vantagem que se obtém através do planejamento estatístico de experimentos é a possibilidade de diminuir a variância, o que implica melhorar o conhecimento do fenômeno em estudo (FIOD, 1997; MONTGOMERY *et al*, 2004).

Em geral, o PEE utiliza planejamentos fatoriais em dois níveis, ou seja, do tipo 2^k ou 2^{k-p} onde K representa o número de fatores e o “2” o número de níveis. Por conveniência, um fator é indicado por uma letra maiúscula, e os dois níveis do fator por (-) e (+). O sinal (-) representa o nível inferior, e o sinal (+), o nível superior. Os experimentos fatoriais podem ser completos ou fracionados (FIOD, 1997; MONTGOMERY *et al*, 2004).

2.2.5.1 Experimento Fatorial Completo

“Experimento fatorial completo é o planejamento de experimentos em que em cada réplica completa do experimento, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores são investigados” (MONTGOMERY *et al*, 2004, p. 216). O número de experimentos é calculado a partir da equação (7).

$$\text{Número de Experimentos } N = A^K \quad (7)$$

Onde: A = n° de níveis e K = n° de fatores.

Para uma avaliação com 5 variáveis operando em 2 níveis teríamos num fatorial completo $2^5 = 32$. Logo, tem que realizar 32 experimentos (MONTGOMERY *et al*, 2004; BOX *et al*, 2005)

2.2.5.2 Arranjo Ortogonal ou Matriz Experimental

A matriz de experimento é montada com uma coluna referente ao número de experimentos e as outras colunas para os fatores, subdividida pela quantidade de fatores. As últimas colunas são normalmente utilizadas para as respostas. Os níveis dos fatores são normalmente nomeados com sinais de (+) para o nível alto e (-) para o nível baixo. Ela deve ser ortogonal, ou seja, em cada

coluna a quantidade de experimentos no nível alto tem que ser igual a quantidade de experimentos no nível baixo e a soma dos produtos dos sinais em quaisquer duas colunas é zero (MONTGOMERY, *et al*, 2004). Para maior detalhamento sobre a montagem das matrizes de experimentos, ver “Estatística Aplicada à Engenharia”, p. 213 (MONTGOMERY, *et al*, 2004).

2.2.5.3 Cálculo dos Efeitos

Os efeitos são definidos como a mudança ocorrida na resposta quando se move do nível inferior (-) para o nível superior (+), ou seja, são as quantificações da influência do fator naquela determinada resposta e são calculados pela diferença entre a média das respostas quando o fator estava no nível superior e a media das respostas quando o fator estava no nível inferior. A equação (8) mostra o cálculo dos efeitos (TSCHOPP, *et al*, 2000; MONTGOMERY *et al*, 2004):

$$E_A = \frac{y^{1(+)} + y^{2(+)} + y^{3(+)} + \dots + y^{n(+)}}{n^{(+)}} - \frac{y^{1(-)} + y^{2(-)} + y^{3(-)} + \dots + y^{n(-)}}{n^{(-)}} \quad (8)$$

Onde:

E_A = efeito do fator A

$y^{1(+)}, y^{2(+)}, \dots, y^{n(+)}$ = respostas encontradas no nível (+)

$y^{1(-)}, y^{2(-)}, \dots, y^{n(-)}$ = respostas encontradas no nível (-)

$n^{(+)}$ = número de condições experimentais no nível (+)

$n^{(-)}$ = número de condições experimentais no nível (-)

Para o cálculo dos efeitos das interações entre dois ou mais fatores, deve-se multiplicar a coluna do fator pela do outro fator, encontrar os sinais que também devem ser ortogonais e calcular o efeito conforme equação 8.

2.2.5.4 Modelo Matemático Linear

O modelo matemático linear tem como objetivo predizer ou prever a resposta, baseado nas informações de entrada, ou seja, no valor das variáveis independentes ou fatores e se baseia numa análise de regressão. O modelo é calculado conforme a equação (9) (MONTGOMERY, *et al* 2004; BOX *et al*, 2005)

:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * x_1 + \beta_2 * x_2 + \beta_{12} * x_1 x_2 + \varepsilon \quad (9)$$

Onde:

Y = Preditor da resposta

β_0 = grande média dos experimentos

$\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$ = Representa o efeito dos fatores e interações

x_1, x_2, x_n = Representa os fatores

ε = .Representa o resíduo

2.2.5.5 Análise da Contribuição

Para definição de quais variáveis apresentam maior significância na resposta, pode-se utilizar a análise de Variância ou ainda a Análise da Contribuição. A análise de contribuição é calculada conforme equação (10).

$$Ci = [Ei^2 / \sum_{l=1}^n (Ei)^2] * 100 \quad (10)$$

Onde:

Ci = Contribuição do fator

Ei = Efeito do i -ésimo fator

n = Número de fatores

2.2.5.6 Experimentos Fatoriais Fracionados do Tipo 2^{k-P}

Montgomery *et al* (2004), Box *et al* (2002) relatam que o experimento fatorial fracionado tem como objetivo reduzir o número de experimentos, visto que, no caso de um processo com muitas variáveis, o número de experimentos pode ser muito grande e se tornar impraticável para um fatorial completo. Numa análise exploratória de um processo complexo com 10 variáveis, se empregasse um fatorial completo, teriam que realizar $2^{10} = 1024$ experimentos. Se utilizassem 3 réplicas para análise de variância, faria, no total, 3072 experimentos. Para reduzir o número de experimentos foram desenvolvidas as matrizes de fatoriais fracionados que permitem que se planeje o experimento e se obtenha uma boa qualidade de resposta com menor número de experimentos (MONTGOMERY *et al*, 2004; BOX *et al*, 2005).

Nos fatoriais fracionados é necessário fazer o confundimento de alguns fatores para gerar código para outros fatores. Confundir um fator na matriz de experimentos significa multiplicar a coluna desse fator pela de um outro fator e gerar código para um terceiro fator, por exemplo, multiplicando a coluna do fator A pela coluna do fator B, gera-se código para o um terceiro fator C ($A*B=C$). Desta forma, este terceiro fator está confundido com a interação dos dois que lhe geraram os códigos. Em função do número de fatores utilizados na multiplicação para geração de código, define-se em qual resolução está se operando. Quando, em uma matriz, um fator recebe código a partir da multiplicação de dois outros fatores principais, tem-se uma interação de segunda ordem, onde um fator principal está confundido com a interação de outros dois. Quando um fator recebe código a partir da interação de três fatores, por exemplo, $D= A*B*C$, tem-se uma interação de terceira ordem. Para o caso de um fator receber código a partir da multiplicação de quatro fatores, tem-se uma interação de quarta ordem (MONTGOMERY *et al*, 2004, p. 245-246; BOX *et al*, 2002, p. 173-222).

Quando se trabalha com interações de segunda ordem, não se tem efeito principal confundido com efeito principal. Mas, pode-se ter fator principal confundido com interação de segunda ordem que, estatisticamente, pode ser significativo. Neste caso, diz-se que se trabalha em uma baixa resolução. As baixas resoluções são empregadas em análise exploratória, onde se avalia uma grande quantidade de variáveis e se selecionam as principais por meio de um “screening”. (MONTGOMERY *et al*, 2004, p. 245-246; BOX *et al*, 2002, p. 173-222).

Montgomery *et al* (2001, p. 245), Box *et al* (2002) mostram que são normalmente possíveis três tipos de resolução, como segue:

Resolução III: O planejamento 2^{k-p} apresenta uma função identidade $I = ABC$, e $C = A*B$. Neste caso, não temos efeito principal confundido com efeito principal, mas temos efeito principal confundido com interação de 2ª ordem, e temos interação de 2ª ordem confundida com interação de 2ª ordem. Montgomery *et al* (2001) relata que esta resolução aplica-se para condições exploratórias. Sua representação é 2_{III}^{k-p} , (MONTGOMERY, *et al*, p. 245-246);

Resolução IV: O planejamento 2^{k-p} apresenta uma função identidade $I = ABCD$ e $A = B*C*D$. Não se verifica efeito principal confundido com efeito principal ou com interações de 2ª ordem. Porém as interações de segunda ordem estão confundidas entre si. Sua representação é 2_{IV}^{k-p} (MONTGOMERY, *et al*, p. 245-246);

Resolução V: Estes são os planejamentos em que nenhum efeito principal ou qualquer interação de segunda ordem estão associados com qualquer outro efeito principal ou com interações de segunda ordem. Porém, interações de terceira ordem estão associadas com interações de terceira ordem. Sua representação é 2_V^{k-p} . (MONTGOMERY, *et al*, p. 245-246)

“Conforme Montgomery *et al* (2004) planejamentos de resolução III e IV são particularmente úteis em experimentos de seleção ou “screening” de fatores” (MONTGOMERY *et al* 2004, p 246).

Outro método que utiliza fatorial fracionado é o método proposto por Plackett & Burman em 1946 (VINDEVOGEL; SANDRA, 1991; DENG; TANG, 1999; LEDOLTER; SWERSEY, 2007), que utiliza matrizes fatoriais fracionadas saturadas. No método, as matrizes são previamente definidas e devem ser escolhidas de modo a se ter, pelo menos três, colunas livres para que seja estimado o erro experimental. Como se trata de um fatorial fracionado de baixa

resolução, o mesmo deve ser usado somente em análises exploratórias (LEDOLTER; SWERSEY, 2007).

2.2.5.7 Método de Taguchi

Dentro do planejamento estatístico de experimentos há o método desenvolvido na década de 60, por Genichi Taguchi, no Japão, que deu uma nova dimensão aos experimentos estatisticamente projetados. Este método é também conhecido como “Projeto Robusto” (PADKE, 1989).

“Fiod Neto (1997) comenta que, visto de uma forma ampla, o método de Taguchi é uma filosofia para o desenvolvimento de processos, produtos e garantia da qualidade além de diminuição de custos operacionais (FIOD NETO, 1997, p.19). A qualidade é medida pelo desvio que uma característica funcional apresenta em relação ao valor estabelecido. Taguchi (1986) propôs a criação da “função perda”, uma vez que, qualquer variação nas dimensões da característica funcional de qualidade, para um produto ou processo, envolve custo adicional, e a função perda possibilita medir o custo da qualidade não atendida.

“Conforme Fiod Neto (1997), Taguchi (1987) denomina ruídos ou fatores de perturbação as causas que eventual ou sistematicamente afetam a variabilidade das funções do produto” (FIOD NETO, 1997, p.20). Eles podem ser de origem interna, quando estão ligados às características próprias do produto, processo ou serviço e se relacionam aos níveis dos fatores que tem influência no produto ou resposta. Estão diretamente ligados à engenharia do produto. Os externos decorrem tanto da condição de utilização quanto do ambiente onde o produto funciona. Os ruídos de produção ocorrem em função de variabilidades que ocasionam problemas ou falhas no produto decorrentes da manufatura (FIOD NETO, 1997).

Ruídos no processo, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, poeira, dentre outros, podem causar desvios e perda de qualidade, o que acarreta em aumento de custo e afeta a função perda. Porém, remover, eliminar ou atuar nesses ruídos pode ser muito caro. Para fazer frente a esses ruídos, Taguchi (1986) propôs a introdução de ferramentas que visam diminuir a variabilidade desde o início da fase de pesquisa até o final da elaboração do produto. Além da função perda, essa abordagem faz uso de três passos principais, chamados de projeto de sistemas, projeto de parâmetros e projeto de tolerâncias como descritos abaixo (TAGUCHI, 1986; PADKE, 1989, FIOD NETO, 1997):

1. Projeto de sistemas: Aborda os pontos básicos da engenharia e do conhecimento científico requeridos para projetar um protótipo funcional ou um processo, estabelecendo os aspectos conceituais do projeto. Tal protótipo engloba a seleção dos materiais, equipamentos de produção e processo. O foco no cliente orienta a obtenção das características de desempenho mais adequadas às suas necessidades;
2. Projeto de parâmetros: Produtos e processos devem ser projetados para serem robustos contra todos os ruídos principais. O projeto dos parâmetros utiliza experimentos estatísticos e análise de sensibilidade para definir os valores-alvo do projeto (dimensões, propriedades, materiais, etc.) Consiste na determinação dos valores ótimos para cada um dos fatores importantes no projeto. Procura-se determinar a combinação ótima de parâmetros que torna o produto ou processo insensível aos efeitos dos ruídos. Em suma, o projeto de parâmetros é utilizado para aperfeiçoar o arranjo dos valores dos parâmetros de processo para melhorar a qualidade na aplicação do método;

3. Projeto de tolerâncias: Trabalha com planejamento estatístico de experimentos e com outras ferramentas estatísticas para estabelecer as tolerâncias das medidas-alvo que serão enfocadas durante a fabricação do produto. Métodos experimentais são aplicados para melhorar, de forma seletiva, a qualidade dos componentes, sempre levando em conta os custos.

Quando se compara o método de Taguchi (1986) com os propostos nos experimentos fatoriais fracionados, verifica-se que a diferença básica entre eles diz respeito simplesmente à montagem da Matriz e a Razão Sinal/Ruído. As matrizes são arranjos ortogonais previamente preparados que fornecem diferentes combinações dos parâmetros a serem analisados, bem como estabelecem seus níveis para cada experimento. Os arranjos são elaborados de forma a permitir ao pesquisador avaliar interações entre as variáveis (PADKE, 1989).

A outra diferença é a razão Sinal/Ruído (S/N) que é a utilização de conceitos matemáticos e estatísticos fundamentada em conceitos da Física Ondulatória e que indica qual a melhor maneira experimental para que exista uma menor variação em determinado processo. A razão Sinal/Ruído procura observar, ao mesmo tempo, a média e a variância de uma distribuição estatística, reunindo estas características em um só número (PADKE, 1989; FIOD NETO, 1997).

Segundo Taguchi (1986), maximizar a razão Sinal/Ruído significa diminuir a variabilidade do processo e otimizar seu resultado. Ela se divide em três condições:

- Menor é Melhor – Quando se tem o objetivo minimizar a Resposta. Para esta condição a razão Sinal/Ruído é definida pela equação (11).
- Maior é Melhor – Quando se tem o objetivo maximizar a Resposta. Para esta condição a razão Sinal/Ruído é definida pela equação (12).

- Nominal é Melhor – Quando o objetivo é que a Resposta esteja numa posição intermediária. Para esta condição a razão Sinal/Ruído é definida pela equação (13).

$$S / N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (11)$$

$$S / N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (12)$$

$$S / N = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (13)$$

Onde:

- y_i^2 é o quadrado do valor da observação;
- μ^2 é o valor médio ao quadrado;
- σ^2 a variância;
- n o número de observações

Taguchi (1986) propôs arranjos ortogonais que devem ser escolhidos em função do número de níveis que as variáveis vão assumir e em função do número de variáveis e interações a serem estudadas. Para escolha do arranjo ortogonal adequado, pode-se empregar o método do “Número de Graus de Liberdade” que define os seguintes passos (PADKE, 1989; RANJIT, 1990):

Primeiro passo: Conta-se o número de fatores e respectivos níveis. Cada fator utilizará $(n-1)$ graus de liberdade, onde n é o número de níveis de cada fator;

Segundo passo: Define-se o número de interações a ser estudada. Cada interação utilizará 1 grau de liberdade;

Terceiro passo: Soma-se o total de graus de liberdade utilizados para os fatores e para as interações e acrescenta-se 1 unidade.

O arranjo ortogonal a ser escolhido deve possuir um número de condições experimental, no mínimo, igual ao número de graus de liberdade

calculado. Isto é definido na tabela dos arranjos ortogonais de Taguchi (PADKE, 1989).

Para a distribuição dos fatores na matriz, bem como avaliar suas interações, deve-se utilizar os gráficos lineares de Taguchi. Nestes gráficos, os pontos ou nós representam as variáveis ou fatores e as linhas entre os pontos as interações entre eles (PADKE, 1989; RANJIT, 1990).

2.2.5.8 Resumo de alguns artigos que empregaram o PEE ou o Método de Taguchi em Otimização de Processos ou Melhoria de Qualidade

A seguir são relacionados alguns trabalhos que empregaram com sucesso o PEE e o método de Taguchi:

- Azeredo e Silva (2003) avaliaram, utilizando o PEE com um fatorial fracionado 2^{k-p} , os efeitos de variáveis de processo de moldagem por injeção na qualidade de peças de plástico e concluíram que as principais variáveis que afetam o processo são a velocidade de injeção, a temperatura do molde e a temperatura do plástico líquido;
- Ribeiro *et al* (2007) determinaram quais são as variáveis mais significantes na ocorrência de escamas em peças de aço fundido empregando um fatorial fracionado 2^{k-p} com duas réplicas;
- Ogasawara (2007) utilizando o PEE com fatorial fracionado 2^{k-p} otimizou os níveis dos parâmetros de processo com consequente melhoria na qualidade de fundidos de alumínio produzidos por fundição sob pressão;
- Mohamed *et al* (2007) estudaram, empregando o PEE com fatorial fracionado 2^{k-p} de alta resolução, a influência da composição química, de parâmetros de tratamento térmico (solubilização e envelhecimento) e modo de fundição na resistência mecânica de ligas eutéticas de Al-Si-Cu-Mg-Fe;

- Pitarelli Filho e Shimabukuru (2008), empregaram o PEE com fatorial fracionado 2^{k-p} no estudo da influência da quantidade de resina epóxi, granulometria do granito e suas interações na resistência de compósitos cerâmicos concluindo ser a quantidade de resina epóxi adicionada a variável mais significativa na resistência do compósito;
- Raghunath e Panday(2007) utilizaram o método de Taguchi para definição dos níveis das variáveis que mais influenciam o processo de contração durante a fabricação de insertos de usinagem;
- Oktem, Erzurunlu e Uzma (2007) empregaram o método para modelar o processo de injeção de plástico definindo os parâmetros que devem ser controlados para evitar empenos e contrações que prejudicam a qualidade peças de espessura fina;
- Savas e Kayikci (2008) definiram empregando o método de Taguchi quais as variáveis de processo que mais influenciam a ocorrência de microporosidades em peças de alumínio fundidas;
- Senthickunar, Ponnambalam e Janahar (2008) empregaram o método de Taguchi para definição de quais variáveis de processo afetam a formação de rechupes em paredes planas de peças de ferro fundido;
- Rosa *et al* (2009) investigaram a deposição de cobre em arames de titânio empregando com sucesso o método de Taguchi.

2.3 Conclusões da Revisão Bibliográfica

1. Rechupes são vazios ou cavidades formadas nos últimos estágios da solidificação e ocorrem devido a menor densidade do metal líquido em relação ao sólido;
2. Para solucionar o problema de rechupes em peças de aço fundido é necessário o emprego de massalotes, que funcionam como um

reservatório de metal líquido posicionado na seção a alimentar e que supre esta seção com líquido durante a solidificação, transferindo para o seu interior o vazio que se formaria na peça. O dimensionamento dos massalotes é baseado no tempo de solidificação e está relacionado às seguintes variáveis:

- Porcentual de contração da liga durante a solidificação que é função do % de carbono e presença de elementos de liga que aumentam o intervalo de solidificação e para aços baixo carbono é aproximadamente 4,5%;
 - Temperatura de vazamento, que interfere na contração líquida;
 - Tipo de areia de moldagem, que influencia na velocidade de resfriamento imposta pelo molde ao aço durante a solidificação;
 - Emprego de resfriadores que aumentam o raio de ação do massalote requerendo assim menor quantidade de massalotes;
 - Presença de macho atmosférico ou concentrador de calor como pó exotérmico na parte superior do massalote;
 - Tempo de vazamento que influencia na perda de calor do metal;
3. A presença de gases dissolvidos no metal aumenta o tamanho do rechupe. A redução do volume de gás no metal é feita na etapa de refino do aço e é por meio da adição de oxigênio puro no metal líquido. O oxigênio oxida o ferro líquido, que em seguida é reduzido pelo carbono formando monóxido de carbono (CO). As bolhas de CO agitam o banho provocando o “boiling” que arrasta gases dissolvidos no metal. Após o refino, o aço precisa ser desoxidado;
 4. Os massalotes são revestidos por areia ou luvas que podem ser exotérmicas ou isolantes. As luvas devem ser usadas secas;
 5. O tamanho do rechupe varia com a resistência da areia de moldagem;
 6. A pintura do molde com tinta refratária reduz o tamanho do rechupe por aumentar a capacidade de troca do molde aumentando assim a velocidade de solidificação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O capítulo descreve os materiais e métodos empregados na pesquisa, e está dividido em duas seções. A primeira seção mostra os experimentos exploratórios realizados, utilizando o PEE com fatorial fracionado. As variáveis avaliadas nos experimentos exploratórios foram definidas a partir de revisão na literatura referente à formação de rechupes em processos de fundição de aço.

A segunda seção ocupa-se com o método experimental empregado nos experimentos utilizando o método de Taguchi bem como, com o sistema de medição e sua validação através de MSA ou Análise do Sistema de Medição por meio de um estudo de GR&R.

3.1 Experimentos Exploratórios

Para os experimentos exploratórios foram selecionadas 15 variáveis conforme revisão bibliográfica. Depois de definidas as variáveis, definiram-se os níveis que estas variáveis iriam assumir na fase experimental.

As variáveis estudadas foram:

A – Temperatura de vazamento: Temperatura em que o metal se encontrava no momento do vazamento;

B – Quantidade de pó exotérmico sobre massalotes abertos : Quantidade em gramas de pó exotérmico adicionado sobre o massalote;

C – Tipo de luva ou “Fabricante de luva A e Fabricante de luva B”;

D – Luva estufada para eliminar umidade e luva conforme era retirada da embalagem;

E – Tempo de vazamento: Tempo para enchimento do molde;

F – Tempo da luva fora da embalagem: Tempo em que a luva ficou fora da embalagem antes de seu uso;

G – Luva fechada com ou sem concentrador de calor;

H – Tempo, aguardando vazamento após moldagem: Tempo em que o molde após moldado ficou aguardando para ser vazado, também conhecido como tempo de cama (SIGUEL, 1986);

I – Percentual de óxido de ferro na areia;

J – Percentual de alumínio adicionado no aço para desoxidação;

L – Resistência da areia: Resistência à tração da areia de moldagem medida 1 hora após ser misturada;

M – Percentual de carbono equivalente no metal final;

N – Percentual de carbono queimado ou oxidado no processo de elaboração do aço;

O – Tipo de pintura: Tipo de pintura empregada no molde, sendo elas por spray ou por lavagem;

P – Sequência de vazamento: Seqüência em que o molde foi vazado na corrida.

A Tabela 1 mostra as variáveis estudadas e seus respectivos níveis.

Tabela 1. Variáveis estudadas e seus níveis para os experimentos exploratórios.

	Variáveis	Limite Inferior (-)	Limite Superior(+)
A	% Al na composição química do aço	0,03	0,09
B	% carbono equivalente no metal final	0,415	0,513
C	% óxido de ferro na areia de moldagem	2	4
D	Temperatura de vazamento	1540°C	1600°C
E	% Carbono queimado na elaboração do aço	0,05	0,3
F	Tempo aguardando vazamento após moldagem	4 horas	72 horas
G	Tipo de pintura	Spray	Lavagem
H	Tempo da luva fora da embalagem	0 dia	7 dias
I	Tipo de luva (Fabricante A e B)	A	B
J	Umidade da luva	Ambiente	Ambiente
L	Resistência da areia em 1 hora	552 kPa	689 kPa
M	Quantidade pó exotérmico sobre o massalote	550 g	1.650 g
N	Tempo de vazamento (segundos)	< 25 s	>60 s
O	Luva com ou sem ponto concentrador de calor	Com ponto quente	Sem ponto quente
P	Sequência de vazamento	Primeiro vazado	Ultimo vazado

Depois de definidas as variáveis a serem estudadas e seus respectivos níveis, definiu-se o arranjo ortogonal a ser empregado. Como se tratava de 15 variáveis, um fatorial completo era totalmente inviável, pois seria necessário realizar 32768 experimentos. Logo, optou-se por um fatorial do tipo fatorial fracionado 2^{k-p} com 16 condições experimentais. Para cada condição experimental, foram realizadas duas réplicas, num total de 32 experimentos. A resposta dos experimentos foi dada em volume de Vazios (rechupes ou poros) relacionados à solidificação, medidos em centímetros cúbicos (cm³).

A Tabela 2 mostra o arranjo ortogonal empregado para os experimentos exploratórios bem como o posicionamento na matriz de cada variável relacionada na tabela 1.

Tabela 2. Arranjo ortogonal utilizado para análise exploratória.

Experimentos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
3	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+
5	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-
6	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+
7	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
8	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-
9	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-
10	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+
11	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+
12	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+
14	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-
15	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
16	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+

Os experimentos foram realizados em uma peça de produção normal da fundição da Amsted Maxion, conhecida como caixa de transmissão de trator de esteira com peso líquido aproximado de 1860 kg e peso bruto, ou seja, peça mais alimentação de 3060 kg, vazada em aço ao carbono do tipo ABNT 1030.

Os moldes foram produzidos com areia de sílica, em cura frio, pelo processo fenólico uretânico. Todas as peças após vazadas, passaram por processos de tratamento térmico de normalização, jateamento por granalha, acabamento e usinagem. A Figura 16 mostra a peça utilizada no estudo.

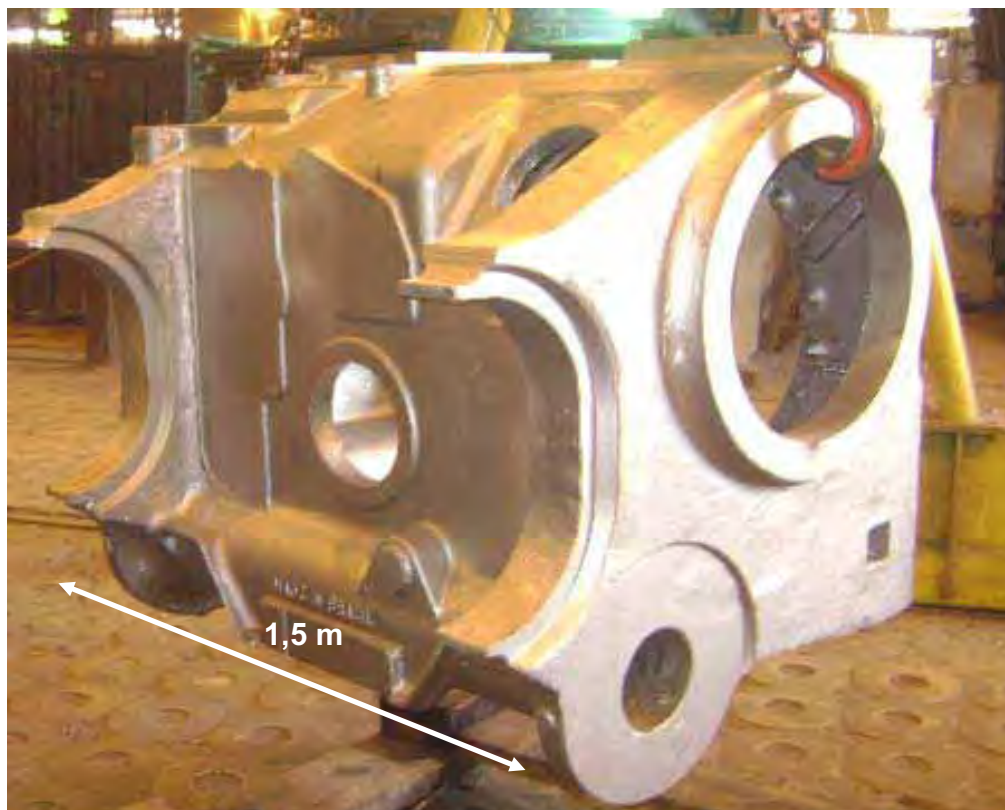


Figura 16. Peça selecionada para estudo exploratório ou “Screening” (GARCEZ; ALVES, 2006).

Depois de acabadas, as peças passaram por ensaio de ultrassom nas faces usinadas para detecção e localização de defeitos internos relacionados à solidificação. Após localizados os defeitos, os mesmos foram abertos por goivagem e caracterizados como defeitos relacionados à solidificação pelo próprio pesquisador, por meio de inspeção visual e comparação com padrões definidos pela “American Foundrymen’s Society”(AFS. CASTINGS DEFECTS

HANDBOOK,1995 p. 163). Após abertos os defeitos, eram medidas as suas cavidades para cálculo do volume.

Como as cavidades abertas apresentavam formas muito irregular e em diversas posições da peça, o que praticamente impossibilitava o cálculo do seu volume por meio de método matemático, desenvolveu-se um método de cálculo de volume baseado na densidade. Para tal, preencheu-se toda a cavidade de um Becker de peso e volume conhecidos com uma massa de moldar. Depois de preenchido com massa, pesou-se novamente o Becker e, por diferença de peso obteve-se o peso da massa. Como já se conhecia o volume do Becker, calculou-se a densidade da massa de moldar. Essa mesma massa foi utilizada para determinação do volume da cavidade do defeito através de sua impressão e preenchimento da cavidade aberta. Depois de preenchida a cavidade, a massa era retirada e pesada e como se conhecia sua densidade, calculou-se o seu volume.

A Figura 17 mostra um defeito já eliminado por goivagem (A) e em (B) preenchido com massa para calculo do volume de rechupe.



Figura 17. Método de medição do defeito (GARCEZ; ALVES, 2006).

Por se tratar de uma peça de grandes dimensões e que apresentava defeitos em diferentes áreas, o volume total de defeitos foi calculado pela soma dos volumes de todas as cavidades e o resultado dado em centímetros cúbicos.

A partir dos resultados dos experimentos exploratórios, calculou-se a contribuição de cada variável na formação do defeito e definiram-se, em função do valor da análise de contribuição, as variáveis de maior influência. Todas as variáveis com contribuição acima de 3% deveriam ser pesquisadas posteriormente.

3.2 Segunda etapa de Experimentos

Para esta segunda etapa, optou-se pela metodologia de Taguchi. Para escolha do novo arranjo ortogonal, adotou-se o método do “Número de Graus de Liberdade” (PADKE, 1989), conforme descrito na página 79.

Os experimentos foram realizados em cubos, vazados sem alimentação. Para tal, adaptou-se a um ferramental existente de Base de 5ª Roda (peça utilizada na indústria automotiva que tem a função de fazer o acoplamento da carreta ao cavalo mecânico) com dois modelos por placa, 4 corpos em forma de cubo com 100 mm de aresta, sem massalotes, posicionados de maneira simétrica aos canais de descida e ataque das peças e ligados a esta por um canal com 10 mm de espessura por 20 mm de largura e 40 mm de comprimento, conforme ilustrado na Figura 18. O peso bruto de cada molde após vazamento com os 4 corpos de prova, 2 peças e canais foi de 296 kg.

Para o processo de moldagem utilizou-se areia de sílica nova com módulo de finura 45-50 AFS aglomerada com 1% de resina fenólica uretânica, sendo 0,5% de parte I e 0,5% de parte II. Além da resina e da areia de sílica, utilizou-se na mistura, óxido de ferro preto do tipo Fe_3O_4 em forma de pó, com granulometria abaixo de 600 mesh. O percentual de óxido de ferro na areia foi uma das

variáveis estudadas. Todos os moldes foram pintados com tinta à base de Zirconita diluída em álcool com densidade de 70° Be.

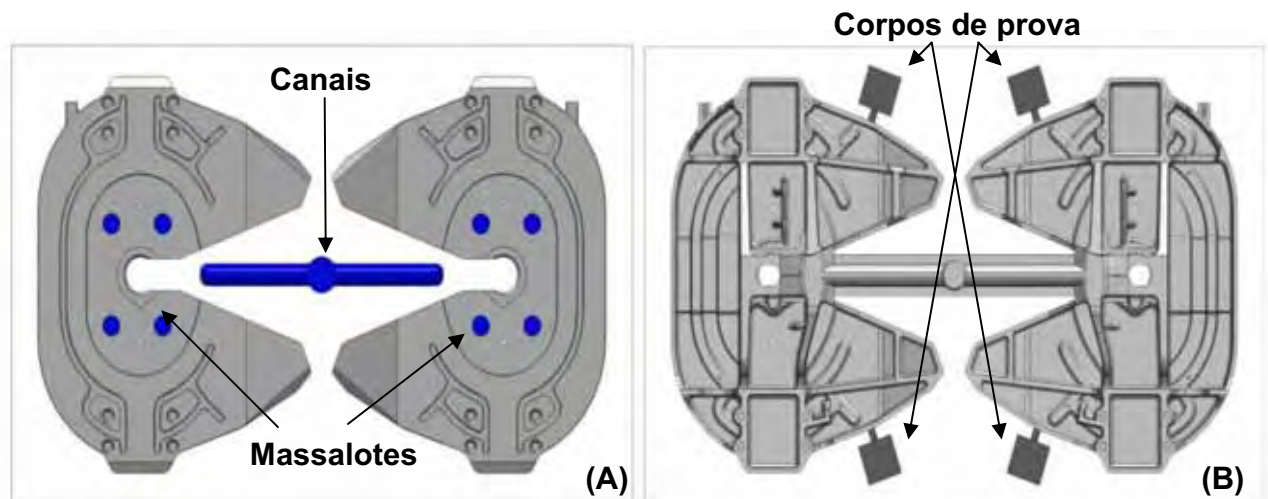


Figura 18. Modelo utilizado nos experimentos com respectivo posicionamento dos corpos de prova. (A) Modelo superior ou tampa; (B) Modelo inferior ou fundo.

As peças bem como os corpos de prova foram produzidas em aço ABNT 1030 com composição química conforme Tabela 3. O aço foi elaborado em forno elétrico a arco básico de 10 toneladas de capacidade. A carga metálica foi constituída de sucata de estamparia e retornos de fundição. Em todas as corridas trabalhou-se com somente uma escória que foi formada inicialmente de cal dolomítica. Utilizou-se 40 kg/t de cal por corrida. Durante a fusão, foi prática normal o corte de sucata com oxigênio. A pressão de sopro para todas as corridas foi de 12 kgf/cm² e utilizaram-se lanças consumíveis de 19 mm de diâmetro. Em todas as corridas, após oxidação e atingido a temperatura de 1630°C, foi realizada uma desoxidação parcial dentro do forno com ferro-silício (75% de Si) e ferro silício manganês (65% de Mn e 15% de Si) utilizando 3kg/t de cada ferro-liga. O acerto de composição final foi feito através da adição de parte das ligas no fundo da panela e parte através de adição direta no jato de metal líquido colocando as ligas em um silo posicionado sobre a bica do forno, que era

automaticamente aberto durante o basculamento. Todas as corridas foram rinsadas com argônio por 8 minutos com uma pressão de 3kgf/cm².

Tabela 3. Faixa de composição química do aço utilizado nos experimentos.

C	Mn	Si	P	S	Al	Ni	Cr	Mo
0,26/0,32	0,65/0,85	0,30/0,60	< 0,03	< 0,03	0,02/0,09	< 0,30	< 0,30	< 0,20

A sequência de experimentos seguiu as seguintes etapas:

1. Preparação dos moldes, pintura e fechamento;
2. Elaboração do aço;
3. Vazamento;
4. Solidificação e resfriamento
5. Desmoldagem;
6. Corte dos canais que ligavam os corpos de prova às peças;
7. Identificação dos corpos de prova através de marcação com “tipos” ou marcadores metálicos;
8. Tratamento térmico de normalização para homogeneizar a microestrutura do aço e com isso melhorar o resultado do ensaio de ultra-som;
9. Jateamento com granalha, acabamento e preparação para ultrassom;
10. Inspeção por ultrassom conforme norma ASTM A 609-91(2008) para identificação do tamanho e posicionamento do defeito;
11. Traçagem de duas linhas para referenciar o corte de serra na direção central do defeito;
12. Corte por serra em equipamento do tipo fita com espessura de serra de 2mm;
13. Medição do volume de defeito por corpo de prova no laboratório SP.

As Figuras 19, 20 e 21 mostram alguns corpos de prova nos quais foram realizados ensaios de ultrassom, preparação para corte e corpos de prova após corte de serra.



Figura 19. Corpos de prova preparados e sendo realizado ensaio de ultrassom.



Figura 20. Corpos de prova sendo realizado ensaio de ultrassom e corpo de prova já com as linhas para corte de serra traçadas.

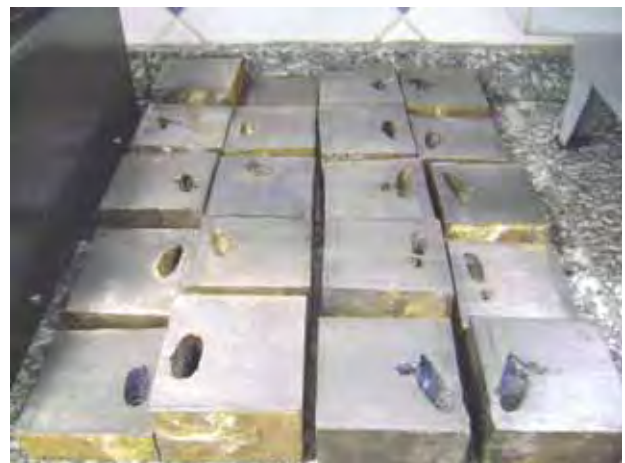


Figura 21. Corpos de prova já serrados.

Os volumes de rechupe foram medidos com o método da injeção de água destilada. Nesta etapa, posicionavam-se os corpos de prova sobre um leito de areia seca e os nivelava utilizando um nível. Depois de niveladas às duas metades do corpo de prova, pesava-se, em uma balança digital com precisão de 0,01g, um copo de água destilada. Utilizando uma seringa, injetava-se a água no defeito até preenchê-lo completamente. Depois de preenchido o defeito, verificava-se a diferença de peso em relação à medida inicial da água e, como a densidade da água destilada é igual a $1\text{g}/\text{cm}^3$, obtinha-se o volume de defeito em cm^3 do defeito. A Figura 22 ilustra as etapas do método de medição tais como nivelamento do corpo de prova (Figura 22A, 22B e 22C) e enchimento do defeito com água destilada para cálculo do volume (Figura 22D, 22E e 22F).

Para validação do método de medição foi realizada uma “Análise do Sistema de Medição”, também conhecida como MSA, por meio de um estudo de GR&R que avalia a repetitividade e reprodutibilidade (FUTRELL, 1995; Manual de Referência AIAG, 2003, p. 208 e 209; MOTTONEN et al, 2008). As definições de repetitividade e reprodutibilidade conforme manual de referência do Sistema de Análise de Medição do AIAG (2003) são:

- Repetitividade é uma variação aleatória, de causa comum resultante de sucessivas medições, feitas sob condições de medição definidas, sendo, pois uma variação do próprio sistema de medição quando as condições de medição estão determinadas e definidas. Há determinação para a peça, instrumento, padrão, método, operador, ambiente e para as premissas. Adicionalmente a variação do próprio equipamento, a repetitividade inclui também todas as variações próprias provenientes das condições do modelo de erro da medição (Manual de Referência AIAG, 2003, p. 208).
- Reprodutibilidade é a variação na média das medições causada pela condição normal de modificação do processo de medição. Geralmente a reprodutibilidade tem sido definida como variação da média das medições de uma mesma peça feitas por diferentes avaliadores que usam o mesmo instrumento de medição e o mesmo método num ambiente estável. Isto ocorre para condições em que se utilizam instrumentos manuais dependentes diretamente da habilidade do operador. Refere-se à variação entre sistemas ou entre condições de medição (Manual de Referência AIAG, 2003, p. 208).

Os equipamentos envolvidos nas medições foram sempre os mesmos, ou seja, balança, seringa e equipamento de verificação de nível ou nível. Todas as medições foram feitas no laboratório de areias da fundição. Não houve um controle rigoroso das condições ambientais como umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Mas, tratava-se de um ambiente climatizado.

Para efeito de aprovação do sistema de medição, foi considerado as faixas definidas pelo MANUAL AIAG-Automotive Industry Action Group (2003) que define como aceitáveis erros menores que 10%. Erros entre 10 a 30% podem ser aceitos com base na importância de sua aplicação e tipo de aparato de medição. São considerados inaceitáveis erros acima de 30%.(MANUAL AIAG, 2003, p. 77 e 208; MOTTONEN *et al*, 2008).

Para o número de categorias distintas “ndc” que, por definição, é o produto da raiz quadrada de 2 pela relação entre o desvio padrão verificado em uma peça ou corpo de prova e o desvio padrão geral do sistema de medição, trabalhou-se com um valor aceitável maior ou igual a 5 (MANUAL AIAG, 2003, p. 77 e 208; MOTTONEN *et al*, 2008).

Os testes de GRR foram realizados com três operadores que fizeram todas as medições. Foram avaliados dez corpos de prova diferentes e realizadas três medições em cada corpo de prova por cada operador. Os cálculos do GRR foram feitos, utilizando a planilha do manual do AIAG (2003, p. 217).

Após avaliação dos volumes de rechupes, foram selecionados alguns corpos de prova para caracterização dos defeitos através de microscopia eletrônica de varredura e microanálise química por meio de EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios-x. As análises foram realizadas no laboratório de ensaios da Divisão de Materiais do Instituto de Aeronáutica e Espaço no Departamento de Ciência e Tecnologia Espacial em São José dos Campos, SP. Utilizou-se um equipamento marca Zeiss DSM 950 modelo MEV 435 VPI com equipamento EDS acoplado. Para a microanálise utilizou-se um software INCA versão 4.09 (2007).



Figura 22. Ilustração do sistema e da sequência de medição. (A), (B) e (C) nivelamento do corpo de prova; (D), (E) e (F) injeção de água destilada para medir volume do defeito.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute a avaliação do sistema de medição através do GRR, os resultados dos experimentos exploratórios, os resultados dos experimentos utilizando o método de Taguchi, análise gráfica dos efeitos, da razão Sinal/Ruído e análise de variância, caracterização dos defeitos por meio de análise visual, Microscopia Eletrônica de Varredura, micro-análise química por EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios-X, propõe um Modelo Preditor da combinação de níveis das variáveis que minimizam a ocorrência de vazios relacionados à solidificação e os resultados dos experimentos de confirmação e teste do modelo.

4.1 Avaliação do Sistema de Medição

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise do sistema de medição avaliado através do GR&R ou R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade). Pela Tabela 6 verifica-se que o valor do R&R foi de 17,15% estando, portanto, dentro da faixa de 10 a 30%, em que o sistema de medição pode ser aceito com base tanto na importância da aplicação, quanto no custo do aparato de medição e, ainda, na dificuldade de se realizar a medição por se tratar de um sistema muito dependente do operador e pelo fato de se utilizar água para medir o volume em uma superfície irregular poder permitir ficar resíduo de água entre medições. Desta forma, considerou-se aceitável o sistema de medição (MANUAL AIAG, 2003, p. 77; CAMPOS, 2003, p. 134).

Avaliou-se também o número de categorias distintas ou ndc e, conforme mostrado na Tabela 4, o valor obtido para o ndc foi de 8,1 estando também aprovado uma vez que o valor mínimo recomendado pelo AIAG é 5 (BALDO, 2003, p.47; MANUAL AIAG, 2003, p.77; CAMPOS, 2003, p. 134). O anexo 2, mostra os cálculos para validação do MSA.

Tabela 4. Resultado da análise do sistema de medição (GRR).

RESULTADO DA ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO - GRR			
ANÁLISE NUMÉRICA		VARIAÇÃO	
1) REPETIBILIDADE (VE)	VE=0,0624	%VE=100(VE/VT) =13,65%	
2) REPRODUTIBILIDADE (VO)	VO=0,0475	%VO=100(VO/VT) = 10,38%	
3) REPETIBILIDADE & REPRODUTIBILIDADE (R&R)	R&R=0,0784	%R&R=100(R&R/VT) = 17,15%	
4) VARIAÇÃO DA PEÇA (VP)	VP=0,4506	%VP= 100(VP/VT)= 98,52%	
5) VARIAÇÃO TOTAL (VT)	VT=0,4574	Número de categorias distintas (ndc)= 1,41(VP/R&R) = 8,10	

4.2 Experimentos Exploratórios

A Tabela 5 mostra o resultado dos experimentos exploratórios em volume médio de rechupe apresentado em cm^3 bem como o valor da contribuição de cada variável na resposta.

Tabela 5. Resultado dos experimentos exploratórios com o valor da média de volume de defeitos e valor do percentual de contribuição na resposta.

Experimentos	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M	N	O	P	V (cm^3)
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	315
2	+	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	332
3	+	-	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	444
4	+	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	528
5	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	+	+	+	-	820
6	-	-	+	-	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	+	180
7	-	-	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	479
8	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	539
9	-	-	-	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	-	-	1.013
10	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	770
11	-	+	+	+	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	701
12	-	-	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	432
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	+	390
14	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-	770
15	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	577
16	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	-	-	+	+	+	195
% Contribuição	14	18	14	8	11	0	3	0	3	11	0	4	0	0	14	

Pela Tabela 5, verifica-se que 10 das 15 variáveis estudadas apresentaram contribuição acima de 3%. Logo, deveriam ser pesquisadas na segunda etapa de experimentos. Foram elas:

- A – Percentual de alumínio adicionado no aço para desoxidação;
- B – Percentual de carbono equivalente no metal final;
- C – Percentual de óxido de ferro na areia;
- D – Temperatura que o metal se encontrava no momento do vazamento;
- E – Percentual de carbono oxidado no processo de elaboração do aço;
- P – Seqüência em que o molde foi vazado na corrida;
- J – Coluna vazia;
- M – Quantidade em gramas de pó exotérmico adicionado sobre o massalote;
- I – Tipo de luva ou “Fabricante de luva A e Fabricante de luva B”;
- G – Pintura empregada no molde sendo elas por spray ou por lavagem.

Para as novas condições experimentais previa-se avaliar o defeito em corpos de prova vazados apensos a peças de produção e sem massalotes. Desta forma, não se justificava avaliar a variável “I” tipo de luva e “M”, quantidade de pó exotérmico adicionada no massalote.

No caso da variável “J”, umidade da luva, seu nível não se alterou nos experimentos exploratórios. Logo, esta coluna foi considerada vazia.

Porém, na análise de contribuição, a coluna “J” foi representativa, o que sugere a existência de uma interação entre as variáveis “D” e “O”. Isto pode ser explicado pelo fato de que maiores temperaturas de vazamento manteriam o metal por mais tempo líquido no massalote e permitiriam que a pressão atmosférica atuasse por mais tempo, aumentando sua eficiência mesmo sem o ponto quente ou entalhe da luva (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996; GARCEZ; ALVES, 2006). Como temperatura de vazamento seria avaliada e não se iria utilizar massalotes, esta interação não foi selecionada para estudo.

A variável “F” ou tempo aguardando vazamento após moldagem não se mostrou significativa. Diferentemente das outras variáveis, isto, de certa forma, foi conflitante com a literatura de fundição, pois esta mostra que, quando um molde, após fechamento, fica por um longo período aguardando vazamento na cama de vazamento, pode aumentar a incidência de defeitos tanto relacionados à inclusões como defeitos de solidificação (Fundamentals of metal casting. The Physical aspects of casting: Mold Design production and material, 1962, p. 48. Addison-Wesley Publishing Company; GALANTE et al, 1997). Sendo assim, resolveu-se reavaliar esta variável na segunda etapa de experimentos.

Como a variável “P” ou seqüência de vazamento está relacionada com a temperatura de vazamento, ou seja, no último molde que se vaza o metal está sempre mais frio que no primeiro, e, esta é uma condição inerente à produção de uma fundição onde, normalmente, vaza-se mais de um molde por corrida, definiu-se avaliar esta variável em conjunto com a temperatura de vazamento no molde. Desta forma, ficaram sete variáveis para serem estudadas empregando o método de Taguchi. A Tabela 6 relaciona as variáveis a serem estudadas na segunda etapa de experimentos ou experimentos empregando o método de Taguchi, e seus respectivos níveis.

Tabela 6. Variáveis a serem avaliadas na segunda etapa de experimentos.

	Variáveis	Limite Inferior	Limite Superior
A	% Al na composição química do aço	0,03	0,09
B	% Carbono equivalente no aço	Menor que 0,40	Maior que 0,52
C	% Óxido de ferro na areia de moldagem	2	4
D	Temperatura de vazamento do aço no molde	1540 °C	1600 °C
E	% Carbono queimado na elaboração do aço	0,1	0,4
F	Tempo aguardando vazamento após moldagem	Até 8 horas	>24 horas
G	Processo de pintura utilizado para pintar o molde	Spray	Lavado

4.3 Segunda Etapa de Experimentos ou Experimentos Empregando o Método de Taguchi

4.3.1 Definição do Arranjo Ortogonal

Para definição do arranjo ortogonal empregado, utilizou-se o método dos graus de liberdade como mostrado na seção 2.2.5.7. Como se tratava de sete variáveis e também se objetivava avaliar algumas interações como: % de carbono equivalente e temperatura de vazamento, % de carbono equivalente e % de alumínio no metal, % de óxido de ferro na areia e temperatura de vazamento do metal, temperatura de vazamento e % de carbono queimado no processo, temperatura de vazamento e tempo aguardando vazamento após moldagem e temperatura de vazamento e tipo de pintura dando um total de seis interações. Somando o número de variáveis com as interações tem-se um total de 13. Pelo método do grau de liberdade, cada variável, por estar operando em dois níveis, consome um grau de liberdade. O mesmo ocorre para cada interação. Logo, 13 graus de liberdade. Segundo o método, deve-se reservar um grau de liberdade para média. Logo, o arranjo ortogonal deve ter no mínimo 14 colunas. O arranjo ortogonal de Taguchi que apresenta o menor número de colunas acima de 14 e que permite investigar interações é o L16. Logo, este foi escolhido. No anexo 2 são mostrados alguns arranjos ortogonais de Taguchi (TAGUCHI et al, 2005).

Para posicionamento das variáveis e interações no arranjo ortogonal L16 empregou-se o gráfico linear conforme mostrado na Figura 23. No gráfico, os pontos representam as variáveis ou fatores e as linhas entre eles representam suas interações.

A Tabela 4 mostra a matriz de experimento com as respectivas variáveis e suas interações já posicionadas conforme gráfico linear empregado. Também são mostradas as colunas vazias na tabela representada pela letra V, que foram posteriormente utilizadas para cálculo do erro experimental.

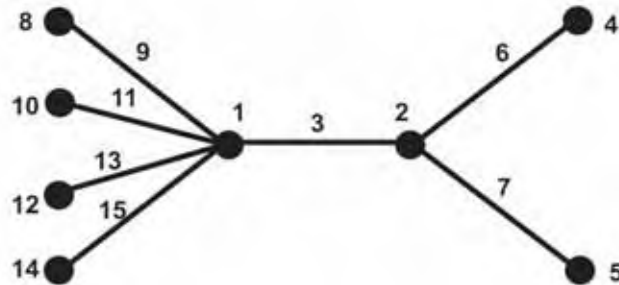


Figura 23. Gráfico linear para o L16 de Taguchi utilizado nos experimentos (Adaptado de Taguchi et al, 2005).

Tabela.7. Arranjo Ortogonal L16 utilizado como “Matriz de experimento”.

EXPERIMENTO	D	B	DB	A	V	BA	V	C	CD	E	DE	F	DF	G	DG
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
3	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-
5	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+
6	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-
7	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-
8	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
10	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-
11	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-
12	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-
14	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+
15	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+
16	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-

Para facilitar o processo de leitura, adotou-se no arranjo ortogonal empregando o método Taguchi a mesma nomenclatura para os níveis alto (+) e baixo (-) empregada nos experimentos exploratórios. Porém, a nomenclatura utilizada por G. Taguchi (2005) em seus arranjos ortogonais com as variáveis operando em dois níveis é 1 para o nível baixo e 2 para o nível alto. O anexo 3 mostra alguns arranjos ortogonais de Taguchi (TAGUCHI *et al*, 2005).

4.3.2 Resultado da segunda etapa de Experimentos (Método Taguchi)

A Tabela 8 apresenta os resultados da segunda etapa de experimentos, bem como a média dos volumes de defeitos encontrados, bem como o cálculo da razão Sinal/Ruído para todas as condições experimentais.

Tabela 8. Volume do rechupe por experimento e valores da média e razão (S/N). (H=DB; I=BA; L=CD; M=DE; O=DF; P=DG)

																VOLUME DE RECHUPES (cm ³)					
EX	D	B	H	A	V	I	V	C	L	E	M	F	O	G	P	Y1	Y2	Y3	Y4	Média	(S/N)
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17,66	19,26	22,23	20,86	20,00	-26,05
2	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	19,94	17,21	19,96	19,19	19,08	-25,62
3	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	13,38	8,05	16,12	13,26	12,70	-22,30
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	20,58	13,84	13,78	17,79	16,50	-24,48
5	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	71,62	15,69	19,32	18,78	31,35	-31,68
6	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	19,62	17,91	4,65	9,37	12,89	-23,09
7	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	18,91	17,26	16,55	17,66	17,60	-24,92
8	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	1,65	7,65	13,08	0,81	5,80	-17,65
9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	15,46	16,03	14,61	16,09	15,55	-23,84
10	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	4,14	5,03	19,81	17,63	11,65	-22,71
11	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	10,67	16,43	20,73	15,21	15,76	-24,17
12	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	16,63	19,87	24,98	11,17	18,16	-25,50
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	21,55	19,11	17,56	22,33	20,14	-26,12
14	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	18,89	17,78	20,07	12,39	17,28	-24,88
15	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	14,87	10,53	16,90	17,12	14,86	-23,57
16	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	18,16	6,69	15,86	11,74	13,11	-22,81
																				16,40	-24,17

Pela Tabela 8, verifica-se que os volumes de defeitos apresentaram uma significativa variação dentro da própria condição experimental, principalmente

considerando que os quatro corpos de prova foram vazados simultaneamente. Também se verificou uma grande variação entre experimentos.

A melhor condição experimental foi a de número 8, com um volume médio de defeito de aproximadamente 6 cm^3 , e a pior condição experimental foi a número 5, com um volume médio de até 31 cm^3 . O menor valor de defeito apresentado por um corpo de prova foi de $0,81 \text{ cm}^3$, na condição experimental 8 e o maior volume individual foi de $71,62 \text{ cm}^3$, para um corpo de prova da condição 5. A média das médias dos volumes de defeitos foi de $16,40 \text{ cm}^3$.

A seguir serão discutidas as variáveis de ruído (variáveis não controladas) que podem ter causado as variações dentro da mesma condição experimental.

Em todas as corridas as ligas utilizadas para acerto de composição química foram adicionadas na panela durante o vazamento. Mesmo com a rinsagem ou agitação do metal líquido com argônio, pode ainda haver heterogeneidades de composição química face às dificuldades de diluição das ligas. Katz (1996) mostra a dificuldade de diluição de ligas como ferro-silício e ferro-silício-mangânês no aço líquido e relata que, em função do sobreaquecimento em que se encontra o aço, forma-se uma casca de aço solidificado envolvendo a liga. A espessura desta casca será tanto maior, quanto menor for a temperatura do metal ou maior for o tamanho do ferro-liga empregado. Esta casca, em face da temperatura e volume de metal que a envolve, se funde novamente e, depois de fundida, inicia-se o processo de derretimento do ferro-liga e sua diluição (KATZ, 1996, p.145).

A rinsagem com argônio tem a finalidade de homogeneizar química e termicamente o aço líquido, além de remover gases e inclusões (FRUEHAN, 1996, p.182; PEREIRA *et al*, 2002). Porém, em função da dificuldade de diluição das ligas, podem ocorrer heterogeneidades tanto de temperatura quanto na composição química, mesmo com a rinsagem com argônio (KATZ, 1996; SHAKHPAZOV *et al*, 2008).

Rodrigues et al (2007) relatam que durante a permanência do aço na panela ocorre estratificação térmica com variações de temperatura durante o vazamento. Esta estratificação é função da vazão ou velocidade de vazamento do metal. Quanto maior a velocidade de vazamento, menor a variação de temperatura (RODRIGUES *et al*, 2007).

A variação de temperatura também pode ocorrer durante o enchimento do molde na operação de vazamento. Como os corpos de prova estavam apensos à peça “Base da Quinta Roda” e para chegar até eles o metal tinha que percorrer uma grande parte do fundido, pode ter havido variação na velocidade de enchimento e, conseqüentemente, perdas diferenciadas de temperatura do metal, que interfere na contratação tanto líquida como de solidificação (PLUTSHACK; SUSCHIL, 1996).

Outra possibilidade de variabilidade, dentro do próprio experimento, pode ser arraste de ar ou absorção de gás durante o vazamento. Monroe (2004) relata que uma das maneiras de se gerar porosidades em metais fundidos é através do arraste e absorção de gases durante o vazamento. Estes gases, se arrastados e presos no metal líquido, têm seu volume expandido devido às diferenças de temperaturas envolvidas. Segundo a lei de Charles (RUSSELL, 2008, p152) para uma condição de pressão constante, o volume de um gás ideal varia diretamente com a temperatura. Desta forma, 0,52ml de ar à 25°C ocupa um volume equivalente a uma esfera de 10mm de diâmetro à 1500°C (MONROE, 2004).

Os gases podem também ser absorvidos pelo metal durante, o enchimento do molde por reação metal/molde, que pode ocorrer em diferentes regiões do molde. Desta forma, estes gases, que têm sua solubilidade diminuída à medida que diminui a temperatura do metal, acabam se segregando e incorporando ao líquido em final de solidificação (MONROE, 2004). Estes gases podem aumentar o tamanho do defeito dentro do mesmo experimento.

Para a razão Sinal/Ruído, assim como verificado no volume médio de defeitos, a melhor condição experimental também foi a de número 8 e a pior a de

número 5. Tal como definido por Taguchi, maximizar a razão Sinal/Ruído além de melhorar o resultado do processo, também minimiza a variabilidade. Os resultados dos experimentos comprovaram esta afirmação (TAGUCHI, 1986; PADKE, 1989).

4.3.2.1 Análise Gráfica dos Efeitos, da Razão Sinal/Ruído (S/N) e Análise de Variância

A Figura 24, obtida a partir da utilização do software “Statistica8” da Statsoft mostra a representação gráfica dos efeitos dos fatores e suas interações sobre a média das respostas quando eles passam do limite inferior para o limite superior. Verifica-se que as variáveis de maior influência são: (A) % de alumínio no aço, (C) % de óxido de ferro na areia, (E) % de carbono queimado no processo e a interação (DE) temperatura de Vazamento e carbono queimado no processo.

As variáveis (B) percentual de carbono equivalente no aço, (G) processo de pintura utilizado para pintar o molde, as colunas vazias e as interações (DF) temperatura de vazamento e tempo aguardando vazamento após moldagem e (DG) temperatura de vazamento e processo de pintura utilizado para pintar o molde, por terem apresentado muito pouca significância, não aparecem na figura, tendo sido utilizadas na estimativa do erro experimental. Outras variáveis e interações como (D) temperatura de vazamento, (F) tempo aguardando vazamento após moldagem, (DB) temperatura de vazamento e % de carbono equivalente, (BA) % de carbono equivalente e % de alumínio no aço e (CD) % de óxido de ferro na areia de moldagem e temperatura de vazamento são de menor significância.

A Tabela 9 mostra a análise de variância ou ANOVA para a média dos efeitos nas respostas. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%.

A Figura 25 mostra a representação gráfica da influência das variáveis e interações de maior significância na razão Sinal/Ruído (S/N).

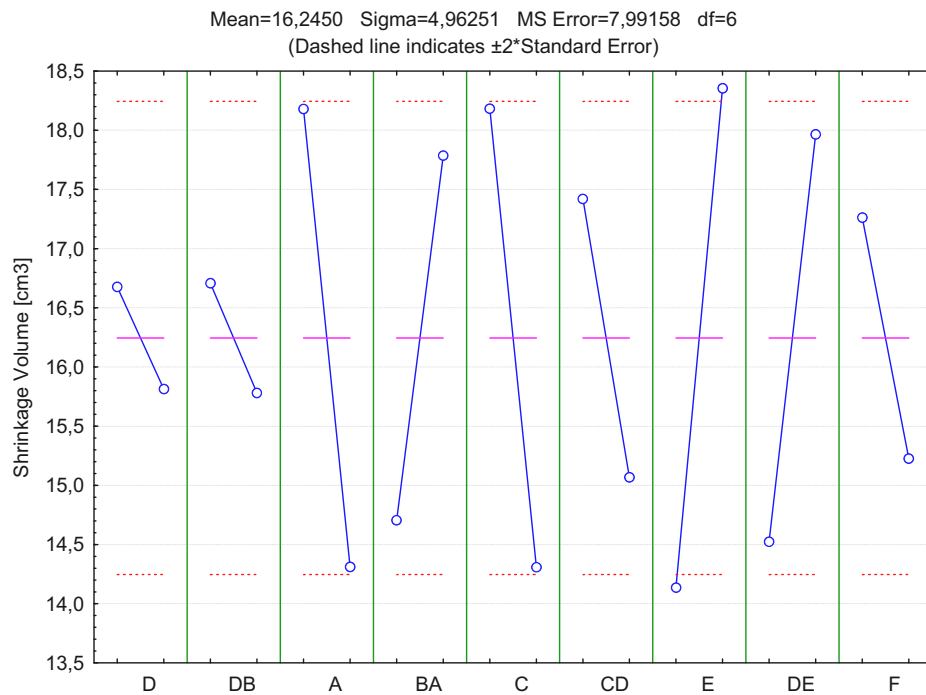


Figura 24. Representação gráfica do efeito das variáveis e interações mais importantes na resposta quando passam do limite inferior para o limite superior.

Tabela 9. Análise de variância para média dos efeitos nas respostas.

Análise de variância. Volume de vazios ($f_{0,05, 1, 6} = 5,9$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	2,97563	1	2,97563	0,372345	0,564110
DB	3,43176	1	3,43176	0,429422	0,536573
A	59,88825	1	59,88825	7,493922	0,033848
BA	37,96100	1	37,96100	4,750127	0,072113
C	60,00439	1	60,00439	7,508455	0,033729
CD	22,10175	1	22,10175	2,765631	0,147369
E	71,12814	1	71,12814	8,900389	0,024530
DE	47,35160	1	47,35160	5,925189	0,050873
F	16,60563	1	16,60563	2,077891	0,199531
Erro*	47,94946	6	7,99158		

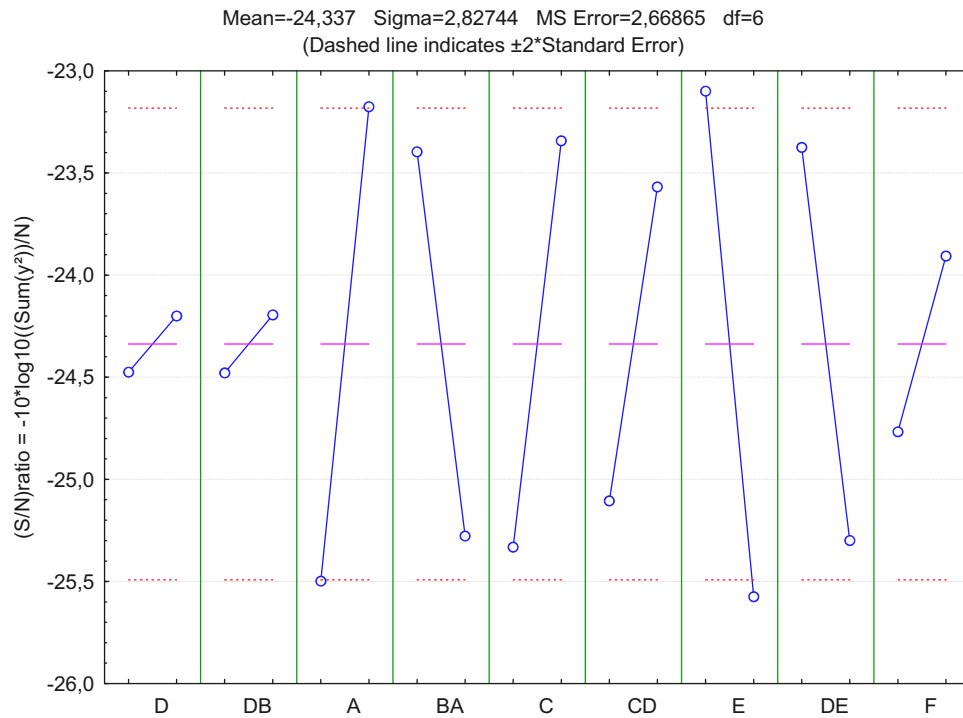


Figura 25. Representação gráfica da razão S/N. Variáveis mais importantes.

Tabela 10. Análise de variância para a razão Sinal/Ruído(S/N).

Análise de variância. Razão S/N (f _{0,05, 1, 6} = 5,9)					
	SS	df	MS	F	P
D	0,30323	1	0,30323	0,113628	0,747530
DB	0,32353	1	0,32353	0,121235	0,739590
A	21,58153	1	21,58153	8,087049	0,029421
BA	14,13862	1	14,13862	5,298035	0,060954
C	15,82833	1	15,82833	5,931205	0,050788
CD	9,45223	1	9,45223	3,541948	0,108852
E	24,51147	1	24,51147	9,184958	0,023078
DE	14,81271	1	14,81271	5,550630	0,056594
F	2,95295	1	2,95295	1,106532	0,333346
Erro*	16,01192	6	2,66865		

A Tabela 10 apresenta a análise de variância ou ANOVA da influência das variáveis mais importantes na razão Sinal/Ruído. Tal como para a influência dos efeitos e interações, o erro foi estimado usando duas colunas vazias, os fatores (B) e (G) e as interações (DF) e (DG) e empregou-se um intervalo de confiança de 95%. Analisando a Figura 25 e Tabela 10, para razão Sinal/Ruído, verifica-se que, tal como para os efeitos, as variáveis de maior influência são (A), (C), (E) e a interação (DE).

A Figura 26, obtida a partir da utilização do software “Statistica8” da Statsoft mostra a representação gráfica dos efeitos de todos os fatores e interações quando estes passam do nível inferior para o nível superior sobre todas as respostas. Olhando para a matriz quadruplicada como maior número de graus de liberdade para estimativa do erro, verifica-se que todas as variáveis que se apresentaram significantes quando se utilizou à média dos efeitos, continuaram significantes e sendo as mais importantes.

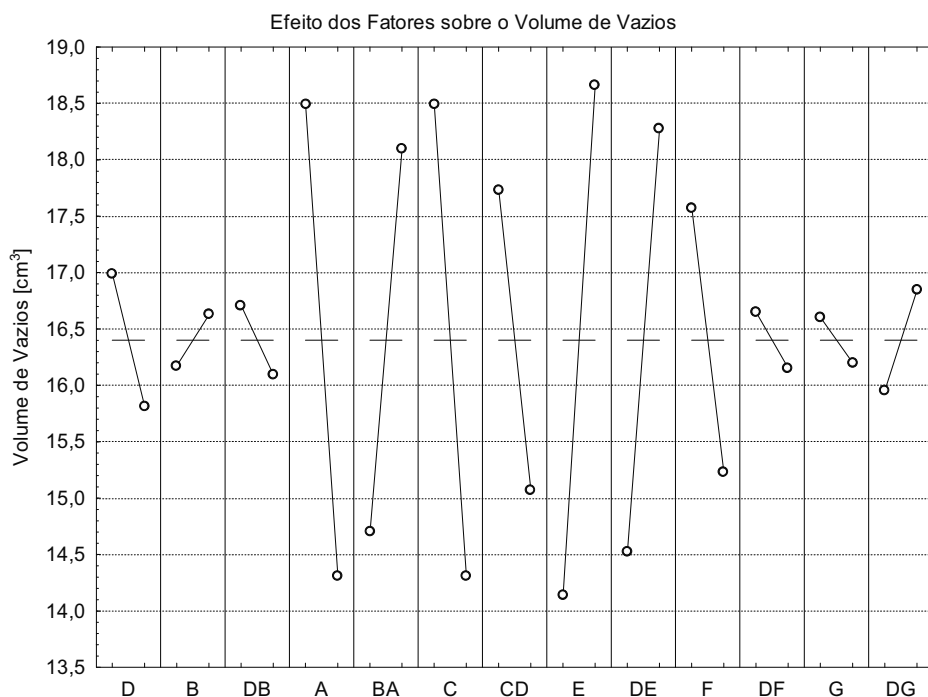


Figura 26. Representação gráfica do efeito de todas as variáveis e interações na resposta quando estas passam do limite inferior para o limite superior.

A Tabela 11 mostra a análise de variância ou ANOVA para o efeito das variáveis e suas interações no volume dos vazios. Empregou-se um intervalo de confiança de 95%. Pela Tabela 11 confirma-se a significância das variáveis (A) % de alumínio no aço, (C) % de óxido de ferro na areia, (E) % de carbono queimado no processo. A interação (DE) ou temperatura de vazamento e carbono queimado no processo de elaboração do aço passou a ter um valor para “F” um pouco menor que o crítico, deixando assim de ser significativa.

Tabela 11. Análise de variância dos efeitos de todas as variáveis e interações na resposta.

Análise de Variância (Volume de Vazios) ($f_{0,05, 1, 50} = 4,04$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	22,090	1	22,0900	0,343286	0,560574
B	3,276	1	3,2761	0,050912	0,822404
DB	6,027	1	6,0270	0,093662	0,760843
A	279,809	1	279,8093	4,348327	0,042171
BA	184,213	1	184,2128	2,862726	0,096878
C	280,311	1	280,3113	4,356129	0,041994
CD	113,476	1	113,4758	1,763450	0,190225
E	328,244	1	328,2438	5,101016	0,028306
DE	225,375	1	225,3752	3,502403	0,067136
F	88,360	1	88,3600	1,373143	0,246826
DF	3,960	1	3,9601	0,061541	0,805092
G	2,624	1	2,6244	0,040784	0,840775
DG	12,709	1	12,7092	0,197506	0,658660
Erro	3217,436	50	64,3487		

A Figura 27 mostra a representação gráfica dos efeitos de todos os fatores e interações sobre a razão Sinal/Ruído e a Tabela 12 apresenta a análise de variância ou ANOVA da influência de todas as variáveis sobre razão Sinal/Ruído.

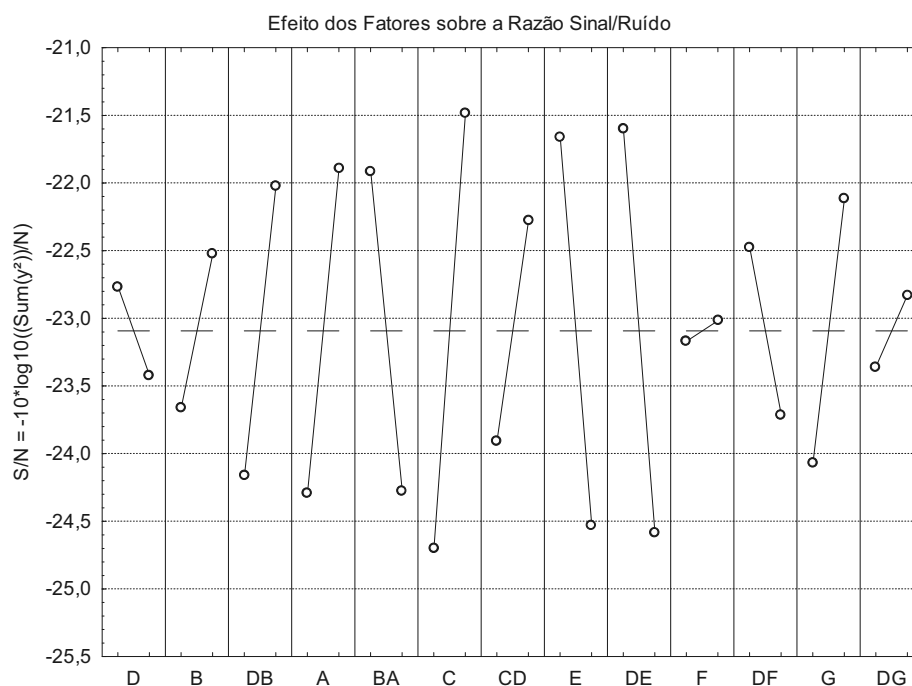


Figura 27. Representação gráfica da razão S/N.

Tabela 12. Análise de variância para a razão Sinal/Ruído(S/N).

Análise de Variância (Razão Sinal/Ruído) ($f_{0,05, 1, 50} = 4,04$)					
	SQ	gl	SMQ	F	p
D	6,9031	1	6,9031	0,351399	0,555994
B	20,5997	1	20,5997	1,048616	0,310755
DB	73,4419	1	73,4419	3,738510	0,058843
A	92,1174	1	92,1174	4,689175	0,035150
BA	89,2357	1	89,2357	4,542483	0,038003
C	165,4673	1	165,4673	8,423003	0,005498
CD	42,4639	1	42,4639	2,161599	0,147762
E	131,5528	1	131,5528	6,696610	0,012612
DE	142,4935	1	142,4935	7,253540	0,009605
F	0,3711	1	0,3711	0,018890	0,891235
DF	24,4401	1	24,4401	1,244106	0,270013
G	61,2323	1	61,2323	3,116990	0,083586
DG	4,4922	1	4,4922	0,228670	0,634596
Erro	982,2344	50	19,6447		

Pela Figura 27 e Tabela 12 verifica-se que, com base na matriz quadruplicada com maior número de graus de liberdade para estimativa do erro os resultados não se alteraram em relação às análises realizadas com base nos valores médios, sendo que a variável C passou a ser a mais influente na razão Sinal/Ruído. Porém, devido ao fato de se utilizar um número maior de graus de liberdade para estimativa do erro, esperava-se obter valores de “f calculados” com maior significância. Mas, isto não ocorreu. Uma explicação para isso pode vir da grande variabilidade apresentada dentro da mesma condição experimental como mostrado na Tabela 8.

Por se tratar de experimentos realizados dentro de um ambiente industrial, os ruídos os variáveis não controladas, acabam participando do processo e interferindo nas respostas. Esta pode ser uma oportunidade de trabalhos futuros, ou seja, identificar e controlar estas variáveis não controladas, ou ruídos de modo a reduzir a variabilidade tornando o processo mais robusto.

De acordo com os resultados dos experimentos e análise de variância, as variáveis de maior influência são: (A), (C), (E) e a interação (DE). Para minimizar a ocorrência de vazios estas variáveis devem:

- 1) Variável A: Deve ser ajustada no seu nível alto;
- 2) Variável C: Deve ser ajustada no seu nível alto;
- 3) Variável E: Deve ser ajustada no seu nível mínimo;
- 4) Interação DE: Deve ser ajustada no seu nível mínimo.

4.3.2.2 Caracterização dos Defeitos e Discussão dos Resultados

A Figura 28 mostra as seções de quatro corpos de prova após corte de serra, referentes a quatro condições experimentais diferentes, sendo elas as condições experimentais 1 e 2 que apresentaram valores médios de volume de vazios acima da média e condições experimentais 3 e 16 que apresentaram valores médios de volume de vazios abaixo da média.



Figura 28. Seção de quatro corpos de prova de experimentos diferentes.

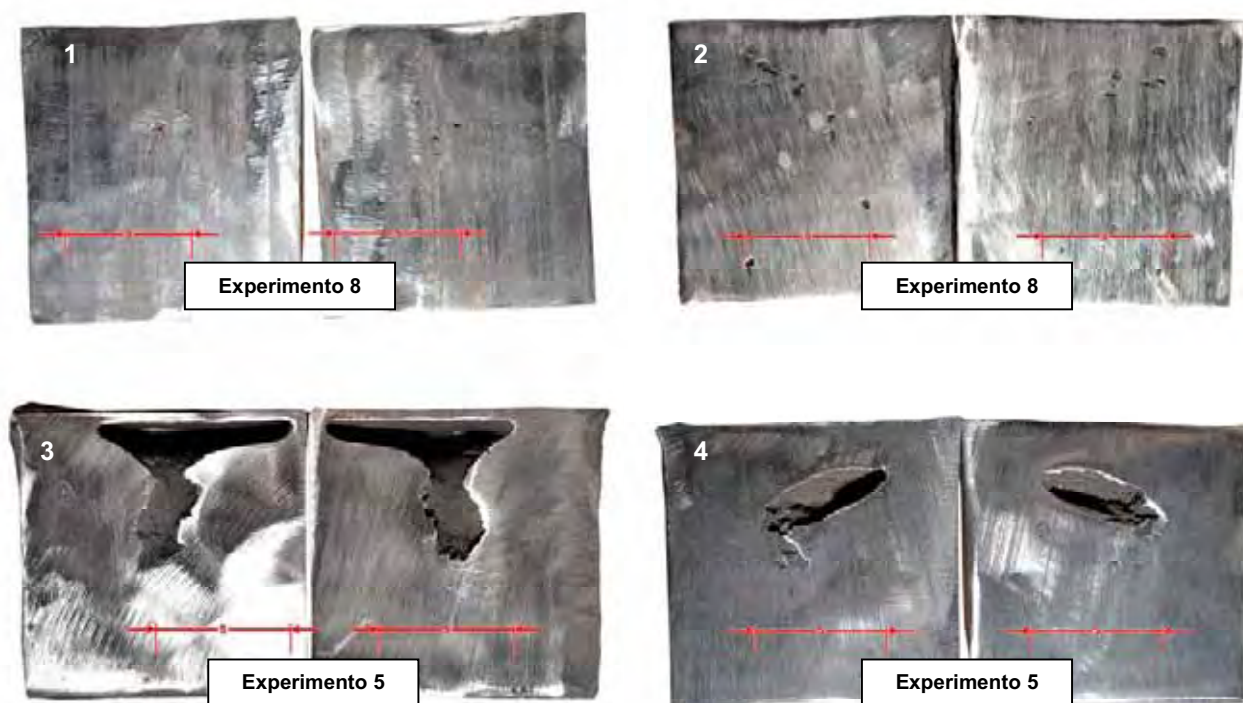


Figura 29. Seção de 2 corpos de prova da condição experimental 8 e 2 corpos de prova da condição experimental 5.

Pela Figura 28, verifica-se uma grande variação, tanto no formato quanto no tamanho dos defeitos, o que de certa forma confirma os resultados apresentados na Tabela 8. Observa-se também que os defeitos apresentam algumas superfícies mais lisas e arredondadas, característico de gases que se acumularam no último líquido a se solidificar (REED-HILL, 1982; AFS. Analysis of Casting Defects. American Foundry Society Publishing, 1994, p. 42; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005). A Figura referente à condição experimental 2 mostra, na região da seta, uma forma típica de gás que, pela profundidade ou distância em relação à face superior do molde, não parece ser ar preso. Nas Figuras referentes às condições experimentais 1 e 16 também se verifica no formato do rechupe superfícies lisas e arredondadas típicas de gás (AFS. Analysis of Casting Defects, 1994, p. 42).

A Figura 29 mostra quatro corpos de prova sendo 2 da condição experimental 8 que apresentou menor volume de rechupes e 2 da condição experimental 5 que apresentou maior volume de rechupes. O corpo de prova 1, referente à condição experimental 8 apresentou poros muito pequenos, praticamente no meio da massa, tendo sido aprovado no ensaio de ultrassom nível I para materiais fundidos conforme ASTM A 609/A 609M-91 (Annual book of ASTM Standards 2008). O corpo de prova 2 referente à condição experimental 8 apresentou poros um pouco maiores que o corpo de prova 1, dispersos na massa e com formas tendendo a esféricas, também característico da presença de gases dissolvidos no metal e que precipitaram durante a solidificação (AFS. Analysis of Casting Defects. American Foundry Society Publishing, 1994, p. 42; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005). Os corpos de prova 3 e 4 são referentes à condição experimental 5, que foi a que apresentou a maior media de volumes de defeitos, bem como o maior defeito em um corpo de prova isolado. Todos os quatro corpos de prova apresentaram defeitos concentrados, sendo que o corpo de prova 1 apresenta uma face praticamente reta, próxima à face superior da

peça que pode estar relacionada a um gás preso, durante o vazamento, ligando o rechupe que está na parte inferior indicada pela seta inferior.

A Figura 30 faz uma comparação de um corpo de prova da condição experimental 8 com os padrões radiográficos conforme ASTM E 446 (Anual book of ASTM Standards, 2008). Pela figura 30 verifica-se que o corpo de prova está entre as classes 2 e 3.

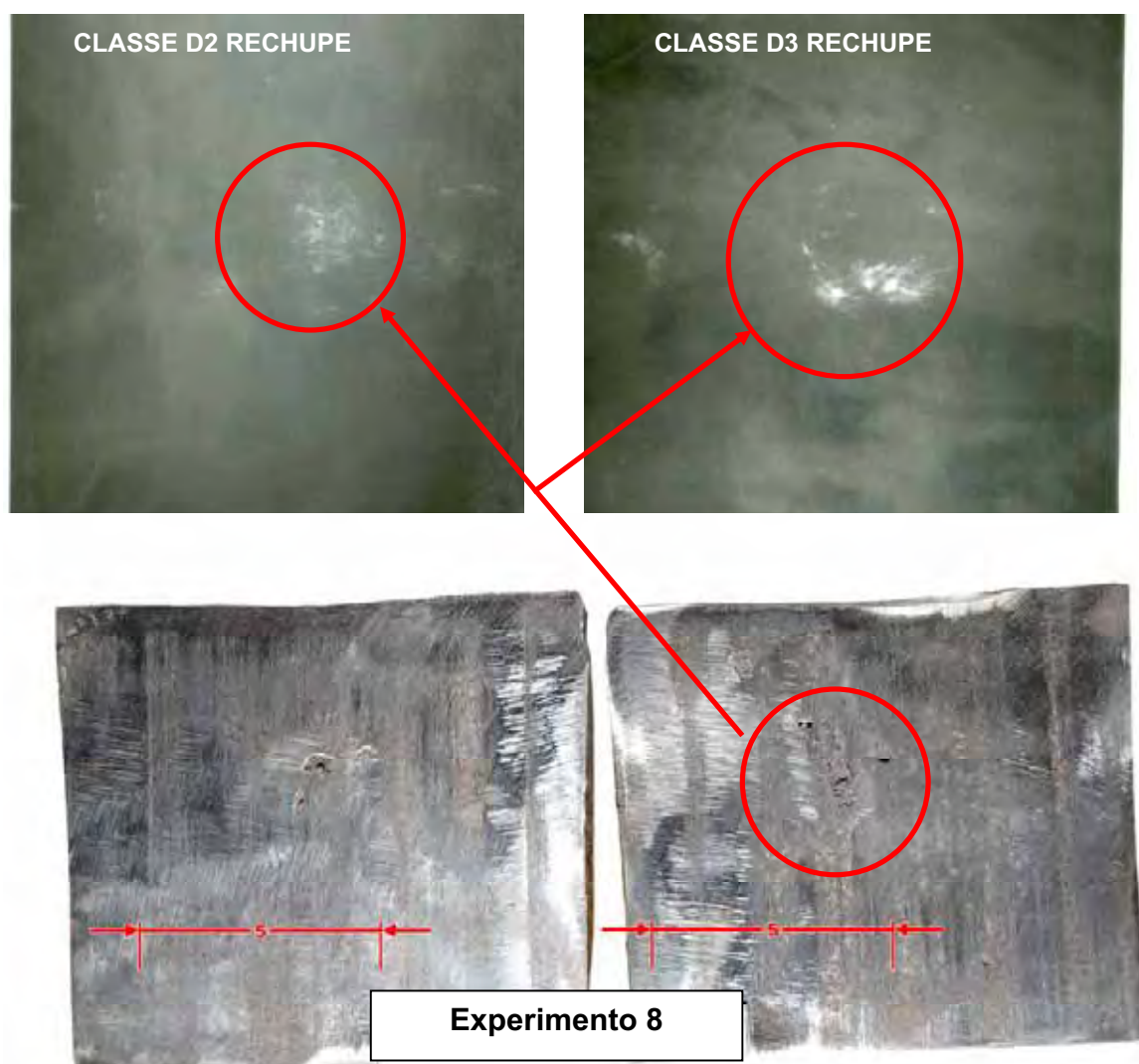


Figura 30. Comparação do tamanho do rechupe com padrões radiográficos conforme ASTM E 446, 2008.

A Figura 31 faz uma comparação entre os padrões radiográficos conforme ASTM E 446-98-2008 para poros internos e os defeitos apresentados pelo corpo de prova da condição experimental 8 (Anual book of ASTM Standards 2008. vol. 01.02). Verifica-se que tal como para a classe de rechupe, os defeitos também estão classificados entre as classes 2 e 3. As especificações de ensaios por raios-X normalmente exigidas para peças fundidas em aços ao carbono são classe 3. Logo, estariam aprovadas em ensaios por raios-X tanto para poros como para rechupe.

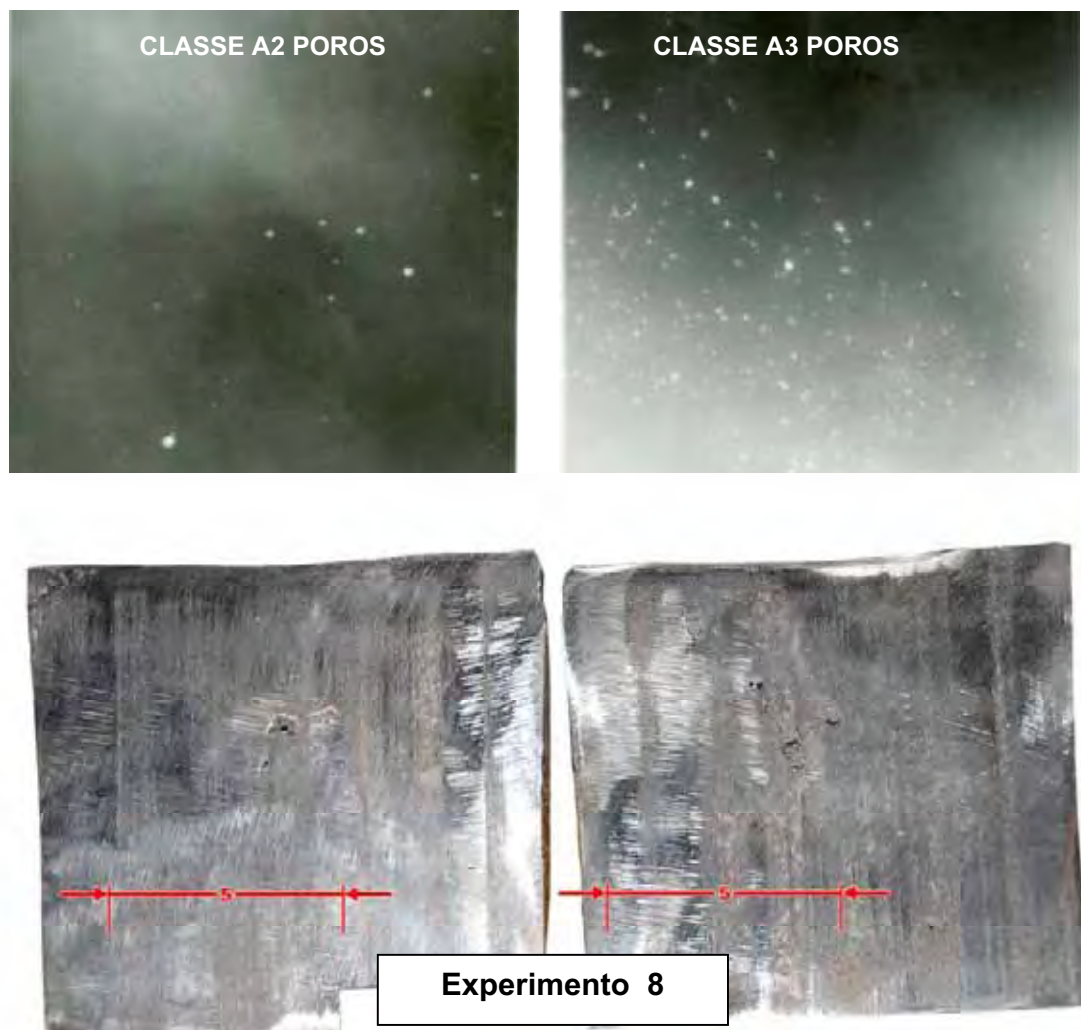


Figura 31. Comparação do tamanho do defeito com padrões radiográficos para poros internos (ASTM E 446, 2008).

Durante a solidificação e resfriamento do metal, uma significativa quantidade de gás dissolvido é rejeitada pelo líquido e, se uma pressão crítica para formação do gás é ultrapassada, uma bolha de gás é formada, iniciando-se assim, uma porosidade. Com a queda da temperatura, devido ao resfriamento e a solidificação, a solubilidade dos gases diminui e mais gás é rejeitado durante o processo, indo para interface líquido-sólido, eventualmente formando poros isolados. Se estes gases se formam nos últimos estágios da solidificação, onde se deve formar o maior rechupe, eles aumentam o tamanho do defeito. Porém, deixam em sua superfície interna regiões arredondadas e lisas. Se estes gases se formam na zona pastosa, após o fechamento das dendritas, eles ficarão presos entre as redes dendríticas e nuclearão nos locais pequenas cavidades denominadas microporos ou microrechupes (FINARDI, 1993; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005).

A Figura 32, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostra presença de rechupe e poros formados em um corpo de prova da condição experimental 8. O aspecto claro em alguns pontos se deve à oxidação do corpo de prova, uma vez que as análises por microscopia foram feitas após medição dos volumes e para medição utilizou-se água. Verificam-se, no interior do defeito, regiões rugosas (Figura 32B), característica de formações dendríticas e também regiões lisas e claras (Figura 32C) característico de presença de gás no defeito.

A Figura 32D mostra um poro isolado dentro do defeito. Uma microanálise química realizada por EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva de raios-x realizada na região próxima ao poro identificado na Figura 32 como S é mostrada na Figura 33. Verifica-se, por esta análise, uma forte presença de alumínio, oxigênio e manganês. Nota-se também presença de silício o ferro. A maior presença de alumínio, manganês e silício no local sugere a formação de óxidos e compostos intermetálicos durante o processo de solidificação, que, como já descrito, acabam forrando a superfície do defeito como uma fina camada de escória.

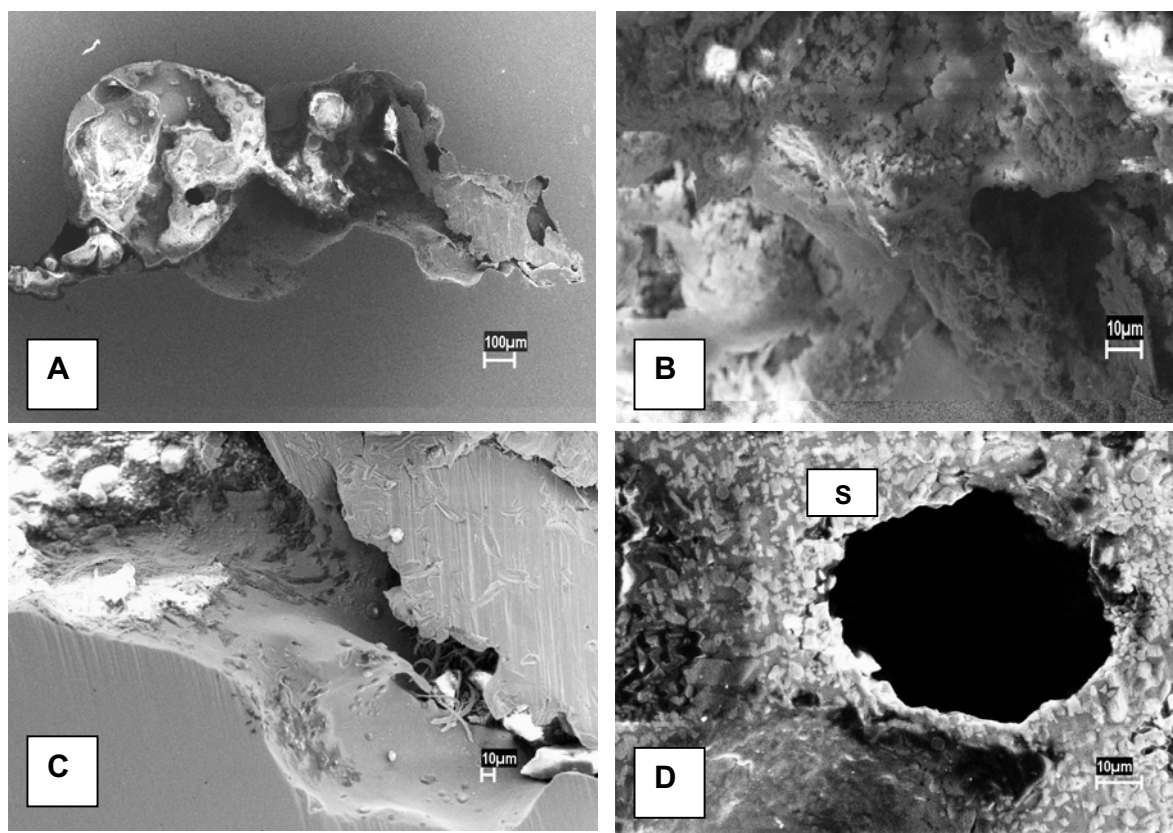


Figura 32. Foto micrografia obtida por MEV mostrando rechupes e poros apresentados em corpo de prova da condição experimental 8.

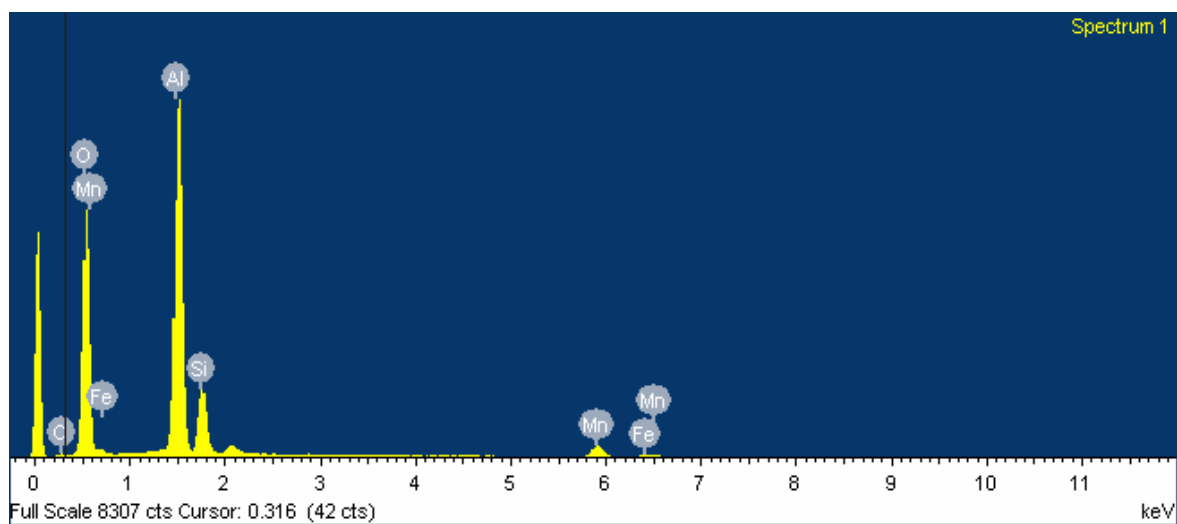


Figura 33. Microanálise de Energia Dispersiva de raios-X na região próxima ao poro ou ponto **S** da figura 32 D.

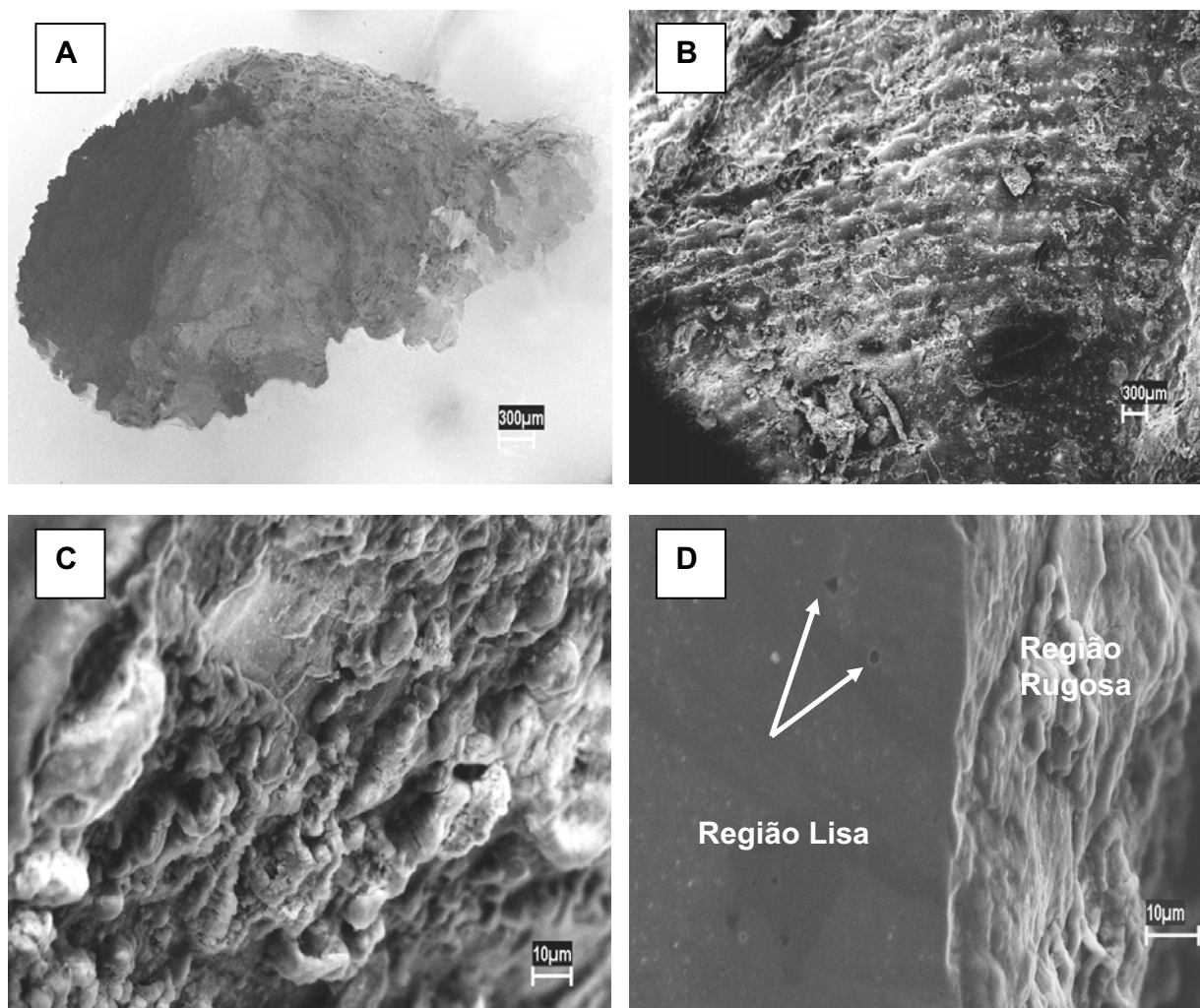


Figura 34. Detalhe de um dos defeitos apresentados em um dos corpos de prova da condição experimental 8 obtido por foto micrografia em MEV.

A Figura 34, obtida por microscopia eletrônica de varredura, mostra um dos poros em um dos corpos de prova da condição experimental 8. Verifica-se presença de uma superfície irregular e rugosa, característica de formação dendrítica, comumente verificada na superfície de um rechupe (American Foundrymen's Society, 1994; GALANTE *et al* 1997).

O fato de o volume do defeito ter sido medido através da adição de água em seu interior provocou uma maior oxidação em sua superfície interna, o que de certa forma, dificultou uma melhor caracterização do defeito. A superfície,

quando oxidada, apresenta um aspecto arredondado no ensaio por microscopia eletrônica de varredura (BRAMFITT. B.L. ASM, 1996, Handbook Metallography and Microstructure, vol. 9. p. 624). Isto é facilmente verificado na Figura 34C. Mas, mesmo oxidado, é possível verificar a estrutura rugosa típica de dendritas.

A Figura 34D na região das setas verifica-se a presença de pequenos poros. Uma microanálise química por EDS – raios-X neste local mostrou somente a presença de ferro e manganês sem nenhuma evidência de oxigênio, o que sugere serem esses poros formados por pequenas quantidades de gases que estavam dissolvidos no metal e acabaram formando pequenas bolhas (MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005; MAKAYA; FREDRIKSSON, 2007).

A Figura 35 mostra as curvas de contração teórica do aço estudado durante a solidificação obtidas através do uso do software THERMO-CALC (THERMO-CALC, 2008, TCSE6). Utiliza-se, para tal, a composição química e a temperatura. Pelo cálculo obtido através do THERMO-CALC (TCSE6, 2008) verificou-se uma contração teórica de aproximadamente 5,5% para a condição.

Considerando que os experimentos foram realizados com corpos de prova cúbicos, sem alimentação ou massalotes, com dimensão 100 mm de aresta, ou seja, 1000 cm^3 de volume, tinha-se como expectativa encontrar volumes de rechupes próximos a 55 cm^3 , considerando 5,5% de contração teórica.

Porém, o volume médio de defeitos foi de $16,401 \text{ cm}^3$, o que dará aproximadamente 1,7% de contração. Esse valor é bem menor que os 5,5% calculado através do THERMO-CALC (TCSE6, 2008) e também dos 4,5%, como mostrado na Figura 3(página 33) definidos pela literatura clássica como o valor a ser empregado no dimensionamento do massalote. Considerando a pior condição experimental, o valor médio foi de $31,35 \text{ cm}^3$, que ainda é aproximadamente a metade do valor teórico calculado. Esta variação indica a influência de outras variáveis na formação do defeito, e não somente composição química, percentual de carbono e temperatura de vazamento como mostra a literatura clássica além de ainda grande oportunidade de rever os

critérios de dimensionamento de massalotes o que possibilitará as fundições de aço aumentar seu rendimento metálico e reduzir custos de fabricação.

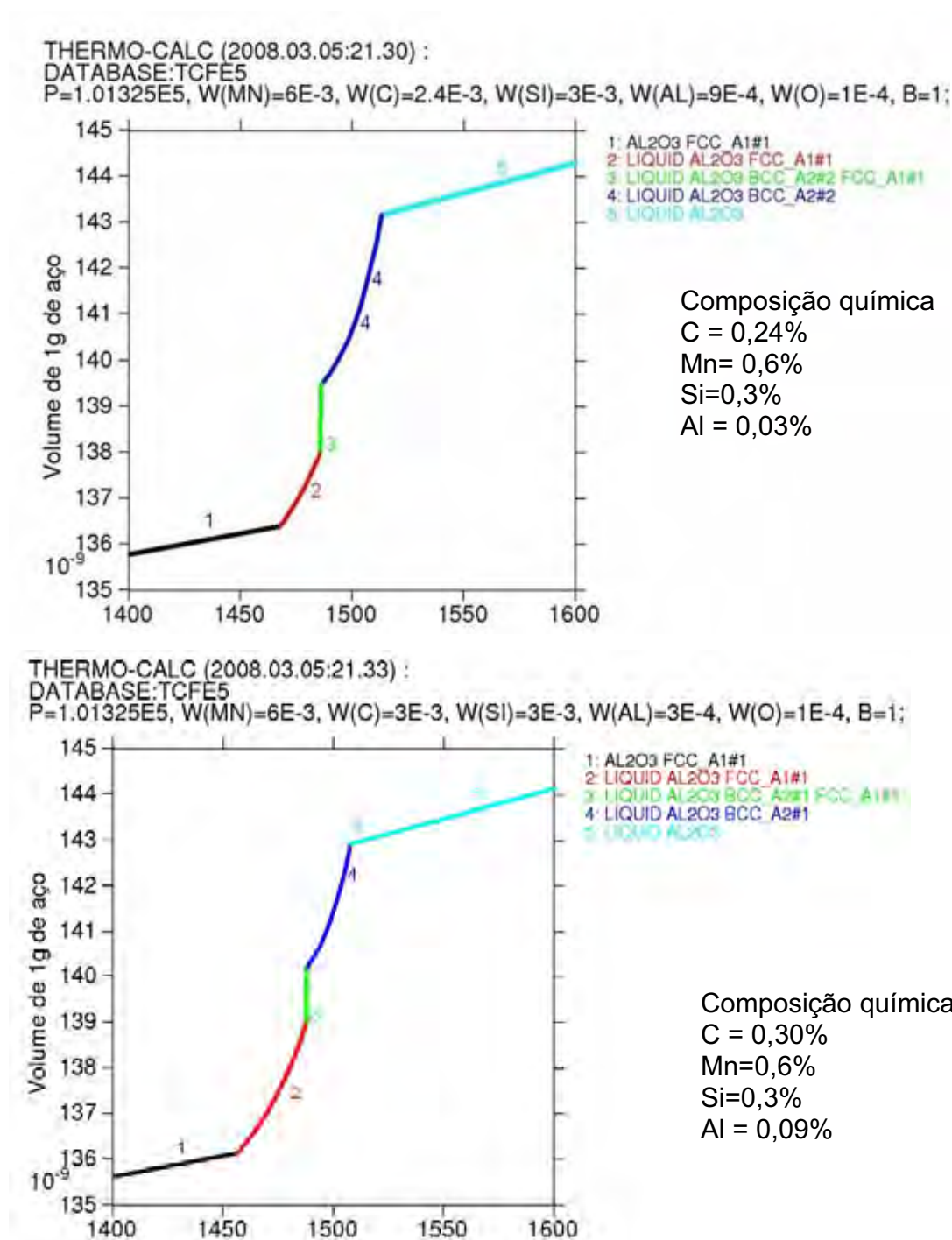


Figura 35. Contração teórica calculada a partir da composição química e temperatura de vazamento dos experimentos.

Como verificado na seção 2.2.4.2 a adição de alumínio nos aços tem como objetivo principal a desoxidação do metal. Os produtos da desoxidação com alumínio são pequenas partículas sólidas de alumina – Al_2O_3 dispersas no metal. Os teores de alumínio, normalmente verificados nos aços fundidos, variam de 0,03 a 0,09%. Valores abaixo de 0,03% podem formar óxidos de baixa estabilidade com ferro e manganês que podem, posteriormente, durante a solidificação, ser reduzidos pelo carbono, formando pequenas bolhas de CO (FINARDI, 1993; FUOCO, 2005). No caso da formação de bolhas de CO durante a solidificação, pelo fato do molde já estar preenchido com líquido e a fina pele de metal sólido já ter sido formada, estas pequenas bolhas podem ficar retidas nos espaços interdendríticos, aumentando o tamanho dos microrechupes ou ainda serem segregadas para o último líquido a solidificar e, desta forma, contribuir para a formação de um rechupe maior.

Outro fato é a queda de solubilidade de gases como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, dissolvidos no metal, durante o resfriamento e solidificação. Esses gases acabam segregando para o líquido remanescente ou mesmo contornos de grão já formados. Em presença de alumínio, oxigênio e nitrogênio reagem formando óxidos ou compostos intermetálicos que podem ficar dispersos na massa ou forrar a superfície do rechupe como se fosse uma fina pele de escória (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; FINARDI; ALVES, 1998; FUOCO, 2005).

Desta forma, seja através da formação de alumina ou de compostos intermetálicos do tipo AlN , a presença do alumínio em teores mais elevados atua no sentido de diminuir as porosidades fixando gases dissolvidos no metal em forma de partículas sólidas que compensam, em parte, as contrações de solidificação, além de evitar a formação de poros, contribuindo, assim, para reduzir o tamanho do rechupe. Atenção deve ser dada à formação excessiva de AlN que pode vir a fragilizar o aço (FINARDI, 1993; FINARDI; ALVES, 1998; FUOCO, 2005).

A adição de óxido de ferro aumenta a densidade da areia e sua capacidade de trocar calor. Desta forma ela acelera o processo de solidificação, reduzindo segregações de possíveis gases dissolvidos no metal, ficando esses dispersos na massa, além de tender a diminuir o tamanho do rechupe devido ao seu maior poder refrigerante. A maior capacidade de troca de calor pode contribuir também para a solidificação direcional (ARCHIBALD; SMITH, 1996; GALANTE *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2007; MAKAYA, 2007; FREDRIKSSON; PETERS, 2007; REIS *et al*, 2007; ZHAO; LIU, 2007).

O percentual de carbono queimado no processo de elaboração do aço ou “Carbon droop” é uma medida para controle de “Boiling” ou agitação do aço pela movimentação das bolhas de monóxido de carbono que se formam durante o sopro de oxigênio. Esta movimentação provoca uma agitação do metal que favorece o trabalho de escória na desfosforação e, ao arraste de gases, como hidrogênio e nitrogênio que entram no processo através da carga metálica, fundentes ou ligas hidratadas ou mesmo são dissociados no arco voltaico e em ambos os casos incorporados ao líquido segundo lei de “Sievers”. Logo, quanto maior o percentual de carbono queimado no processo menor deveria ser o percentual de gases dissolvidos (ELLIOTT, 1985; FINARDI, 1993; ALVES, 1998; FUOCO, 2005).

Porém, os experimentos mostraram que esta variável melhorou a resposta quando assumiu seu valor mínimo e tem-se, aí, outra desconexão com a literatura. Isto pode estar relacionado ao corte de sucata que foi empregado em todas as corridas e utilizou-se oxigênio para o corte.

Durante a etapa de fusão em um forno elétrico a arco, os eletrodos furam toda a carga e uma poça de metal líquido é formada na soleira do forno, passando os eletrodos a trabalharem sobre esta poça. O aquecimento e fusão da carga se dão, principalmente, por efeito Joule e pela radiação gerada pelo arco elétrico através dos curtos-circuitos entre os eletrodos e a sucata. A operação de corte por oxigênio acelera o processo de derretimento, uma vez que

corta a sucata derrubando-a e esta passa a ter contato direto com o líquido acelerando sua fusão. Além disto, a reação de oxidação do ferro é exotérmica e libera calor que também acelera o processo de fusão. Para manter a chama acesa na ponta da lança de oxigênio, o operador do forno é obrigado a estar, sempre, molhando-a no metal líquido e isto é feito com oxigênio aberto, o que provoca a oxidação da poça. Sendo assim, quando termina a fusão, o metal já se encontra num nível de oxidação elevado e parte dos gases dissolvidos pode ter sido removida pela evolução de monóxido de carbono nesta fase. Desta forma, se for utilizado o corte de sucata para acelerar a fusão, a eliminação dos gases dissolvidos no metal ocorre naturalmente durante a própria fusão, não sendo necessário oxidar mais 0,3% de carbono como é citado na literatura. Isto, de certa forma, reduz tempo e custo de fabricação do metal sendo uma quebra de paradigma.

Conforme Fruehan (1996), outra possibilidade que pode ter ocorrido para a eliminação de gases dissolvidos no metal se deve a rinsagem ou borbulhamento de argônio pelo fundo da panela que foi realizada em todas as corridas.

A interação DE (temperatura de vazamento e carbono queimado no processo) também se mostrou significativa para resposta, devendo assumir seu valor mínimo. Num processo de fundição de aço em molde de areia silicosas a temperatura de vazamento deve ser a mínima possível, pois, além de reduzir as contrações líquidas, menores temperaturas agredem menos o molde, diminuindo problemas relacionados à expansão da sílica, que gerariam outros defeitos como escamas e defeitos relacionados à expansão da sílica (GALANTE *et al*, 1997; RIBEIRO *et al*, 2007). Além disto, quanto maior a temperatura, maior a solubilidade de gases como nitrogênio e hidrogênio no metal. Isto sugere que para uma condição de “carbon droop” menor, menores temperaturas devem apresentar melhores resultados (FINARDI, 1993; MONROE, 2004; STEFANESCU, 2005).

Quando analisada isoladamente, a temperatura de vazamento não se mostrou significativa. Isto pode estar relacionada às condições experimentais uma vez que os corpos de prova estavam apenas à peça, e uma “Base de quinta roda” é uma peça com espessura fina, e o metal percorria uma parte da peça de aproximadamente 400 mm até chegar no corpo de prova e, neste percurso, pode ter perdido calor e minimizado o efeito desta variável. Esta distância percorrida pelo metal dentro do molde também pode ter influenciado na absorção de gases provenientes do molde.

A variável B ou percentual de carbono equivalente no metal não apresentou significância na resposta, apesar de a literatura indicar esta variável como importante no processo da formação de rechupes (WLODAWER, 1966). Isto pode estar relacionado ao intervalo entre o valor inferior e o superior estudado estarem muito próximos para as condições experimentais empregadas. Desta forma uma variação de somente 0,12% não teria influenciado na resposta.

A variável G ou processo de pintura utilizado para pintar o molde também não apresentou significância. Como se empregou em ambos os casos uma mesma tinta, ou seja, Zirconita diluída em álcool e com a mesma densidade, variando somente a forma de aplicação, isto pode ter favorecido a não significância na resposta. Esperava-se, porém, que pelo fato do processo de pintura por lavagem de molde propiciar uma cobertura mais espessa e homogênea de tinta e face ao maior poder de troca de calor da zirconita na interface metal molde se comparada com a areia de sílica, o método de pintura poderia influenciar mais na resposta. Mas, isso não ocorreu. De qualquer forma, mesmo não tendo significância, a condição lavada apresentou melhor resultado.

A variável F ou tempo aguardando vazamento após moldagem tal como na fase exploratória também não apresentou significância. Apesar de os manuais de processos de fundição disponíveis na literatura normalmente definirem que um molde tende a absorver mais gás e gerar produtos fundidos com mais poros, quando ficam por um longo tempo aguardando vazamento, levando muitas vezes

as fundições a sucatarem moldes por eles estarem nessa condição, em nenhum experimento isto se comprovou. Este pode ser mais um paradigma a ser quebrado e representar maior facilidade operacional e redução de custo para as indústrias de fundição.

4.4 Modelo Preditor

Com base nos resultados dos experimentos, em que foi utilizado o método de Taguchi (Tabela 8), foi proposto um modelo que fosse capaz de prever a combinação de níveis de variáveis de processo que minimizam a ocorrência de vazios relacionados à solidificação na produção de peças de aço ao carbono, fundido, que utilizam moldagem com areia sílica quimicamente ligada com resina fenólica uretânica e vazamento por gravidade. A Equação (14) apresenta o modelo (os cálculos do modelo são mostrados no anexo 4).

$$Y = 16,401 - 2,091*A - 2,09*C + 2,265*E + 1,88*ED \quad (14)$$

Onde:

A – Nível do percentual de alumínio no metal final que varia de (-1) para o nível inferior experimentado de 0,03% até (+1) para o nível superior experimentado que foi de 0,09%.

C – Nível do percentual de óxido de ferro no molde que varia de (-1) para o nível inferior experimentado de 2% até (+1) para o nível superior experimentado que foi de 4%.

E – Nível do percentual de carbono queimado no processo ou “carbon droop” que varia de (-1) para o nível inferior que foi de 0,1% até (+1) para o nível superior que foi de 0,4%.

DE – Nível da interação temperatura de vazamento e carbono queimado no processo, que varia de (-1) para o nível inferior a (+1) para o nível superior.

A Figura 36 mostra o comportamento do modelo em relação aos valores médios obtidos na fase experimental conforme demonstrados na tabela 8. A linha em preto representa os valores reais obtidos nos experimentos. A linha em vermelho representa os valores preditos pelo modelo. A diferença entre as linhas é o erro do modelo.

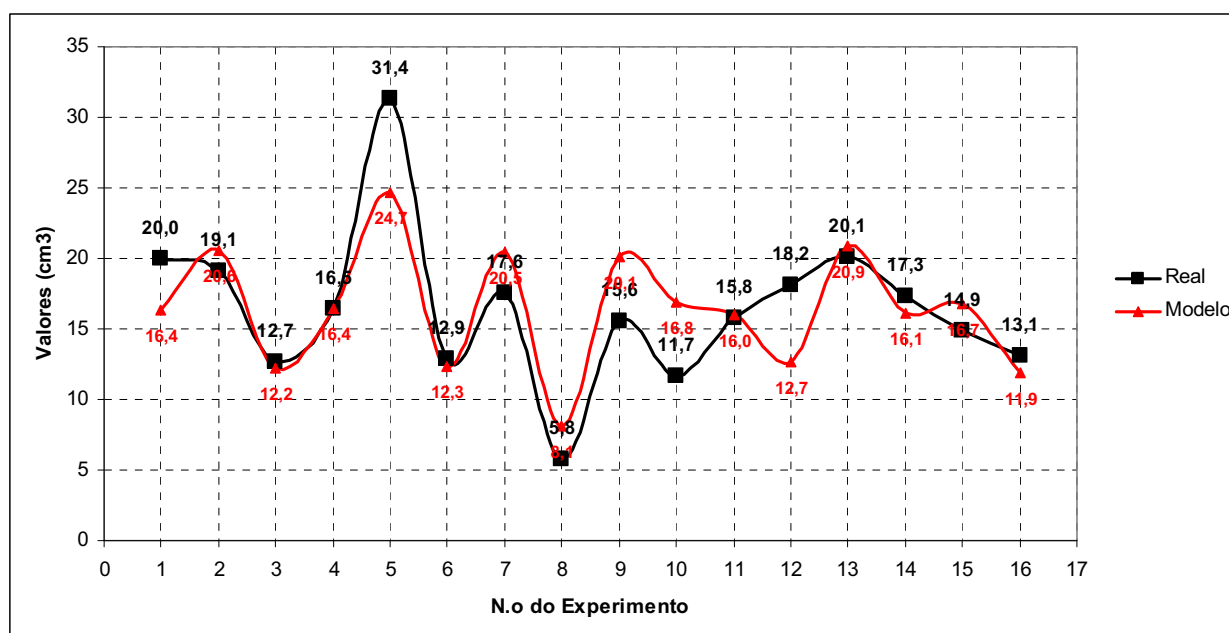


Figura 36. Comportamento do modelo em relação aos valores médios obtidos nos experimentos.

Verifica-se pela Figura 36 um comportamento muito próximo em relação ao que o modelo prediz e o verificado na prática, com exceção da condição experimental 5 que foi um extremo, muito afetado por um corpo de prova que apresentou um valor muito alto de volume de defeito, ou seja $71,62\text{cm}^3$, provavelmente devido a um arraste de gás durante a operação de enchimento do

molde uma vez que a parte superior do defeito apresenta-se lisa e plana, e que elevou a média desta condição experimental para $31,35\text{cm}^3$.

Após definido o modelo, repetiram-se alguns experimentos para validação do modelo. Foram repetidas três condições experimentais, sendo uma abaixo da média (condição experimental 8), uma próxima à média (condição experimental 15) e uma acima da média (condição experimental 2). Foram avaliados 10 corpos de prova para cada condição ensaiada. A Tabela 13 mostra o volume do defeito por corpo de prova (cp).

Tabela 13. Resultado dos experimentos para teste do modelo.

VARIÁVEIS E INTERAÇÃO					RESULTADOS												
	A	C	E	DE	cp1	cp2	cp3	cp4	cp5	cp6	cp7	cp8	cp9	cp10	μ	σ	S/N
EX 2	1	2	2	2	19,26	18,91	20,24	20,25	18,95	19,10	19,41	18,70	20,07	19,54	19,44	0,57	-25,78
EX8	2	2	1	1	7,96	6,22	9,88	4,88	5,08	6,23	4,02	9,84	6,1	5,25	6,546	2,04	-16,7
EX15	2	1	2	1	16,84	15,42	15,54	15,3	16,88	14,02	13,08	17,1	16,04	14,88	15,51	1,29	-23,8

Tabela 14. Comparação dos resultados dos experimentos de confirmação com os experimentos iniciais conforme tabela 8

CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	Resultado dos experimentos iniciais conforme tabela 8			Resultado dos experimentos de confirmação do modelo		
	μ	σ	S/N	μ	σ	S/N
Condição Experimental 2	19,08	1,12	-25,62	19,44	0,57	-25,78
Condição Experimental 8	5,8	4,96	-17,65	6,546	2,04	-16,68
Condição Experimental 15	14,86	2,65	-23,57	15,51	1,29	-23,84

A Tabela 14 compara os resultados obtidos nos experimentos iniciais conforme mostrados na tabela 8 com os resultados obtidos nos experimentos de confirmação para as três condições ensaiadas. Em relação às médias, praticamente não se verificaram grandes diferenças para as condições experimentais 2 e 15. Já para a condição experimental 8, verificou-se um aumento em torno de 12% na média. Para a razão Sinal/Ruído, os resultados

praticamente se mantiveram nas condições 2 e 15 e verificou-se uma pequena melhoria na condição experimental 8 com um aumento da ordem de 6% na razão Sinal/Ruído. Porém, para todas as três condições testadas, verificou-se uma sensível melhora no desvio padrão.

Como toda a parte experimental foi desenvolvida dentro do ambiente industrial, à medida que o trabalho de pesquisa mostrava evidências para que se fossem tomadas determinadas ações, tais como melhorar a condição de vazamento, padronizando a altura da válvula da panela em relação ao copo de vazamento, melhorar o processo de elaboração do aço, evitando temperaturas elevadas no forno, reduzir ao máximo o tempo de basculamento do forno para a panela, poder-se-iam reduzir a absorção de gases, a reoxidação do metal e a perda de temperatura, melhorando, assim, a qualidade das peças de produção normal da fundição, estas medidas foram adotadas e podem ter contribuído para redução do desvio padrão.

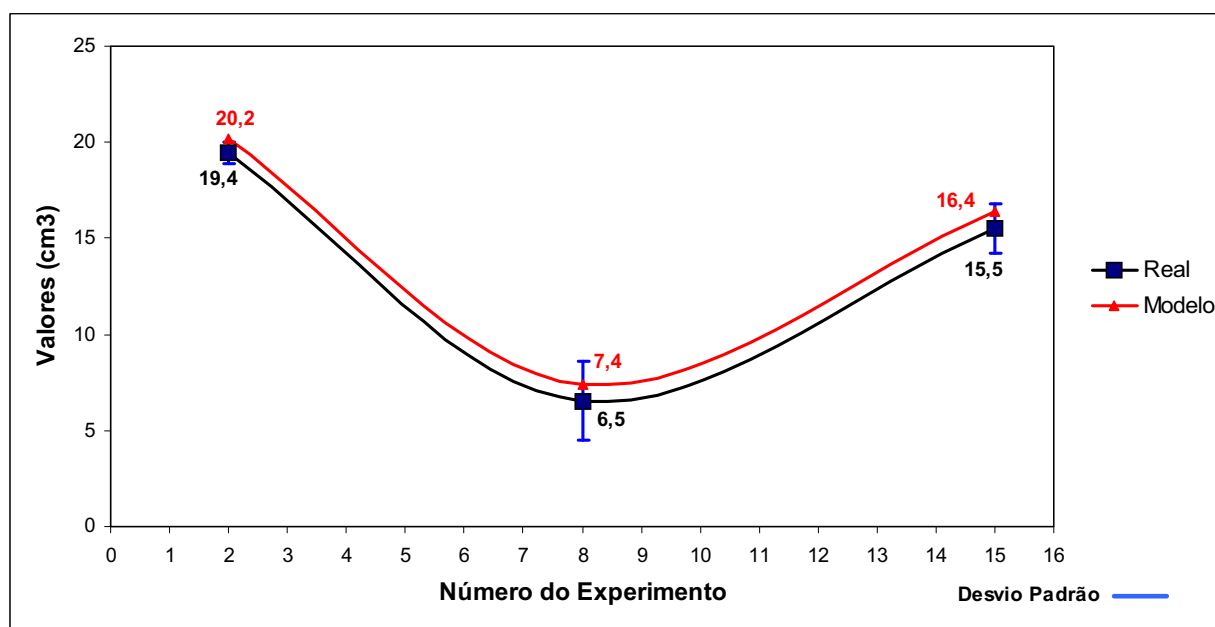


Figura 37. Representação gráfica do resultado dos experimentos de teste comparados com os previstos pelo modelo.

A Figura 37 mostra graficamente o resultado dos experimentos de confirmação do modelo para as três condições ensaiadas e compara com o previsto pelo próprio modelo. Verifica-se, novamente, um comportamento muito próximo em relação ao predito pelo modelo indicado pela linha vermelha e o obtido nos experimentos.

Considerando que todos os experimentos foram realizados dentro do ambiente industrial de uma fundição de aço, estando sujeitos a diversos ruídos, e com base nos resultados apresentados nos experimentos e nos preditos pelo modelo, pode-se dizer que o modelo matemático contendo as variáveis: A (% de Alumínio no metal final), C (% de óxido de ferro na areia), E (% de carbono queimado ou oxidado no processo de elaboração do aço) e a interação DE (temperatura de vazamento-% de carbono queimado ou oxidado no processo de elaboração do aço) prediz a realidade com uma margem média de erro de até 13%. Estes valores foram confirmados nos experimentos de teste e validação do modelo e apresentaram um erro médio de 8%, tendo o valor máximo atingido 13%, estando, portanto, totalmente em acordo com o erro médio de 13% verificado inicialmente.

Dentro de um processo complexo com muitas variáveis envolvidas como é o de uma fundição de aço, um modelo que opera dentro de um intervalo de confiança de 87% pode ser considerado adequado.

Desta forma, as fundições de aço que utilizam fornos elétricos a arco básico e moldagem em areia de sílica com processo cura frio fenólico uretânico podem reduzir a variabilidade e a ocorrência e o tamanho de rechupes e poros relacionados à solidificação se ajustarem às variáveis propostas, no modelo, aos níveis sugeridos.

5. CONCLUSÕES

Para as condições experimentais empregadas na pesquisa, os resultados mostraram que:

1. As variáveis que mais contribuíram para minimizar a ocorrência do defeito rechupes e poros internos relacionados à solidificação foram: E (% carbono queimado no processo), A (% Alumínio no aço), C (% óxido de ferro na areia) e a interação DE (D temperatura de vazamento; E % carbono queimado no processo);

Para minimizar a ocorrência do defeito a condição ideal seria a condição experimental 8, onde:

- A variável A (% alumínio no aço) deve assumir seu valor superior;
- A variável B (% carbono equivalente) deve assumir seu valor superior;
- A variável C (% óxido de ferro na areia) deve assumir seu valor superior;
- A variável D (temperatura de vazamento) deve assumir seu valor inferior;
- A variável E (% carbono queimado no processo) deve assumir seu valor inferior;
- A variável F (tempo de molde pronto aguardando vazamento) deve assumir seu valor superior;
- A variável G (tipo de pintura do molde) deve ser feito por lavagem.

Alguns desses resultados estão de acordo com a literatura. Isto é válido para a temperatura de vazamento, percentual de óxido de ferro na areia, processo de pintura e para o percentual de alumínio.

Já as outras variáveis estudadas como carbono equivalente no metal, percentual de carbono queimado no processo e tempo em que o molde ficou aguardando vazamento apresentaram resultados conflitantes com a literatura.

No caso do carbono equivalente, pode ser que a faixa de variação estudada tenha sido pequena e o resultado final tenha sido influenciado por algum ruído ou mesmo por outra variável.

Para o percentual de carbono queimado, o fato de utilizar o corte de sucata como forma de refino injetando o oxigênio a baixa temperatura pode ser mais efetivo na eliminação de gases e refino do metal do que iniciar o sopro após fusão e oxidar 0,3% de carbono como sugere a literatura. Desta forma, pode-se reduzir o tempo de refino e, conseqüentemente, o tempo e o custo de fabricação do aço, além de reduzir defeitos.

Quanto ao tempo de molde na cama aguardando vazamento, todos os experimentos comprovaram que um maior tempo leva a obtenção de fundidos com menor volume de poros internos, o que é uma quebra de paradigma em relação à literatura e outra possibilidade de redução de custo para as fundições de aço que empregam processos em cura frio do tipo fenólico uretânico e areia de sílica.

2. O modelo proposto prediz a realidade com uma margem de erro de até 13%. Estes valores foram confirmados nos experimentos de teste e validação do modelo que apresentaram um erro médio de 8%, tendo o valor máximo atingido 13%, estando, portanto, totalmente em acordo com o erro de 13% verificado inicialmente. Dentro de um processo complexo com muitas variáveis envolvidas como é o de uma fundição de aço, um modelo que opera dentro de um intervalo de confiança de 87% é adequado.
3. A diferença no valor entre a contração teórica de 5,5%, e a contração obtida nos experimentos de aproximadamente 2,0%, mostra a influência de outras variáveis atuantes sobre o processo de solidificação e não

somente as consideradas na literatura clássica. Isso é um bom indicador de que os métodos atuais utilizados para dimensionamento de alimentação de peças de aço fundido não são eficazes e pode-se, além de melhorar a acurácia no que diz respeito a sanidade interna, melhorar o rendimento metálico. Isto representa uma forte possibilidade de redução de custo de fabricação e aumento de capacidade produtiva, uma vez que, com a mesma quantidade de metal líquido, se produzirá mais peças;

4. O planejamento estatístico de experimentos, bem como o método de Taguchi mostraram ser ferramentas poderosas a serem aplicadas na melhoria de processo, especialmente quando o número de variáveis envolvidas é grande e pode existir interações entre essas variáveis, como no caso dos processos de fundição de aço;
5. Conforme proposto por Taguchi, maximizar a razão (S/N) significa melhorar a resposta e minimizar a variabilidade. Os resultados dos experimentos comprovaram esta afirmação, uma vez que a condição experimental que apresentou o menor volume de rechupe também apresentou maior razão (S/N);
6. O processo para formação de rechupes pode ocorrer concomitantemente com a formação de poros, especialmente se houver presença de gases dissolvidos no metal. Isto foi comprovado nas análises visuais, onde se verificou presença de gás junto ao rechupe, análise por microscopia eletrônica de varredura, onde se verificaram poros formados junto à cavidade do rechupe e na análise química por EDS e raios-X. A presença de gás junto ao rechupe pode ser uma explicação para a variação de comportamento em termos de sanidade interna em peças de aço fundido.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos resultados da pesquisa e objetivando sua continuidade, são sugeridos os seguintes trabalhos de pesquisa:

- 1) Revisão dos valores de contração volumétrica para aços em função do carbono equivalente. A pesquisa poderá abranger faixas de carbono maiores que a pesquisada, e permitirá as fundições redimensionarem a alimentação de suas peças;
- 2) Análise da morfologia e topografia de rechupes;
- 3) Planejamento de experimentos envolvendo este processo de fundição utilizando arranjos internos e externos de Taguchi onde simultaneamente investiga-se a influência dos fatores do processo na presença de ruídos, visando entender melhor a elevada variabilidade dentro de cada condição experimental.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFS. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. Analysis of Casting Defects. **American Foudrymen's Society Publishing**. Des Plaines. (1994), 3th Edition, 111-117.

AFS. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. Castings Defects Handbook. **American Foudrymen's Society Publishing** (1995), p.163.

AFS. AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. Mold & Core Coatings Manual. **American Foudrymen's Society Publishing**, (2000), 2^a Edition, p.29-49.

ALVES, L. H. D.; FINARDI, J. Control of Intergranular Fracture in Steel Castings. **AFS Transactions**. (1998), vol. 43, p. 453-459.

ARAUJO, S. A.; ARENALES, M. N. Dimensionamento de lotes e programação do forno numa fundição automatizada de porte médio. **Pesquisa Operacional, ISSN 0101-7438. SCIELO DO BRASIL**. (2003), vol.23, no. 3. Rio de Janeiro, Sept/Dec.

ARCHIBALD, J. J.; SHIMITH, R. L. Resin Binder Process. **ASM - Metals Handbook**. (1996), 10th Edition, V. 15, p. 214-217.

ASTM STANDARDS. , ASTM E 446-98, 2008. **Annual book of ASTM Standards** (2008). vol. 01.02, Section 1.2.1.

ASTM STANDARDS. Standard Practice for Castings, Carbon, Low-Alloy and Martensitic Stainless Steel, Ultrasonic Examination Thereof, A 609/A 609M-91. **Annual book of ASTM standards** (2008). vol. 01.02, p. 319-331.

AZEREDO, M. B. V. Avaliação dos efeitos das variáveis do processo de moldagem por injeção nas propriedades de uma peça plástica utilizando planejamento de experimentos". **Dissertação apresentada a Universidade Federal Fluminense - UFF**, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Niteroi, (2001), p 41-60.

AZEREDO, M. B. V.; SILVA, S. S. Improve Molded Part Quality. **Quality Progress**. (2003), July, 72-76.

BALDO, C. R. A Interação entre o Controle de Processos e a Metrologia em Industrias de Manufatura. Setembro de (2003). Dissertação apresentada à **Universidade Federal de Santa Catarina** para obtenção do Título de Mestre em Metrologia.

BLAIR, M. et al. Predicting the occurrence and Effects of Defects in Castings. **JOM**. (2005), may. P 29-34.

BONI, V.; QUARESMA, S. J. Aprendendo a entrevistar: como fazer entrevistas em Ciências Sociais. **EM TESE**, Janeiro-julho, (2005), p. 68-80.

BOX, G. E. P; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics For Experiments. An Introduction to Design and Model Building. Wiley&Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2^a Edicion, 2005, p. 173-222, 235-273

BROWN, J. R; Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. **Butter Worth-Heinemann**, Oxford, OX28DP. First Published, (2000).p 119-129, 226-244.

CALLISTER Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais. Uma Introdução. 7^a Edição, (2007). **LTC Editora**, p. 211.

CAMPOS, M. S. Desvendando o MINITAB. Qualitymark **Editora, Rio de Janeiro**. (2003), p.134.

CHAKRABARTI, A. K. Casting Technology and Cast Alloys. New Delhi, (2005). **Prentice-Hall of India**, p. 42-75.

CLESLAK, M. J. Welding, Brazing and Soldering. **ASM Handbook**, (1996), Vol. 6, p.229-238, 241-242.

COLAGROSSI, J. N. Ensaio de Fluidez em Aços. Grelha Oliver. 4^o Combrafund. **ABIFA**. (1991), p. 5-15.

DENG, L. Y; TANG, B. Generalized Resolution and Minimum Aberrations Criteria for Plackett-Burman and Other nonregular Factorial Designs. **Statistica Sinica**, (1999) vol. 9, p. 1071-1082.

ELLIOTT, J. F. Electric Furnace Steelmaking. **Iron and Steel Society**. (1985), p.291-318.

EXMER, H. E.; WEINBRUCH, S. Scanning Electron Microscopy. **ASM HANDBOOK**. Vol. 9, Metallography and Microstructures, 2004. p. 895-899.

FERNANDES, D. L. Areias de fundição aglomeradas com ligantes furânicos. **Perfil Editora**, (2001).p. 48-51; p.107-117.

FINARDI, J. Refino e desoxidação de aço destinado à fabricação de peças fundidas. IV Combrafund. **ABIFA**. São Paulo, (1993). p 249-259.

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

FRUEHAN, R. J. Gases in Metals. **ASM-Metals Handbook**. (1996). 10th Edition. Vol 15, p. 182.

FUNDAMENTALS OF METAL CASTING. The Physical aspects of casting: Mold Design, production and materials. **ADDISON-WESLEY Publishing Company INC** (1962), p. 41-62.

FUOCO, R. Fratura intergranular em peças fundidas de aço devido à precipitação de nitretos de alumínio (Rock Candy). **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. (2005), São Paulo, v.1, n.3, Jan-março.

FUTRELL, D. When Quality is a Matter of Taste, Use Reliability Indexes. **Quality Progress**. (1995), v.28 n.5, p 81-86.

GALANTE, G.; MICHILI, O.; MASPERO, R. No-Bake. As we see it. **Publishing-IMF S.R.L Luino**. Italy, (Va), (1997). V.1, p.49.

GARCEZ, R; ALVES, L. H. D. Influência das variáveis de processo na ocorrência de rechupes em peças de aço fundido. **VI Seminário de Fundição da ABM**. São Paulo, outubro, (2006), p. 145-153.

GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa.2002, **Editora Atlas**, 4^a Edição, São Paulo, p. 44-47.

GOODWAY, M. History of Casting. **ASM Handbook**, (1996), vol. 15, 10th Edition, p. 12-18.

JOHNSON, B. D; HEINE, R. W. Nitrogen in molten iron process and its effects. **AFS Transactions**, 2000. p. 163-170.

JUNJIAO, W. U.; HONGLIANG, L. I; TSINGHUA; MAKINO, H.; HIRATA, M.; HANAI, T. Two-Phase flow analysis of aeration sand filling for green sand molding machine. **WFO Technical Forum**. Dusseldorf, Germany, (2007). p. 65-68.

KANNO, T. Effect of pouring temperature, composition, mould strength and metal flow resistance on shrinkage cavities in spheroidal graphite cast iron. **Internatinal Journal of Cast Metals Research**, (2008), vol. 21. p. 1-4.

KATZ, S. Composition Control. **ASM-Metals Handbook**. (1996), 9th Edition. Vol. 15, P 144 -153.

LAMPMAN, S. Heat Treating. **ASM Handbook**, vol. 4, (1996), p. 729.
LEDOLTER, J; SWERSEY, A. Testing 1-2-3. Experimental Design with Applications in Marketing and Service Operations. **Stanford University Press**.(2007), p. 150-169.

MAEHARA, Y. Projetos de Fundição: Padrões de fabricação para aços fundidos. **Scriba Assessoria Editorial**, 1ª Edição,(1989). p 51-52.

MAKAYA, A.; FREDRIKSSON, H. Variation of nitrogen solubility and mechanism of poro formation during production of porous Fe-Cr-Mn-Si-C material. **International Journal of Cast Metals Research**.(2007), v. 20, no. 2, p.73-81.

Manual de Referência AIAG - **Automotive Industry Action Group Manual**, (2003), p. 208 e 209; p. 77.

MARKONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Fundamentos de Metodologia Científica. (2005). **Editora Atlas**, São Paulo, 6ª Edição, p. 176-215.

MARKONI, M. A.; LAKATOS, E. M. Técnicas de Pesquisa, (2006). **Editora Atlas**, São Paulo, 6ª Edição, p. 62-98.

MARTINS, G. A. Manual para Elaboração de Monografias e Dissertações. **Editora Atlas**, São Paulo, (2002). p. 25.

MENEGHINI, A.; SANGIORGI, C.; TOMESANI, L. Modelling heat transfer coefficient at cast/chill interface to account for effects of metal head. **International Journal of Cast Metals Research**. 2007, vol. 20, No. 3, p 159-162.

MEZZARROBA, O.; MONTEIRO, C. S. Manual de Metodologia da Pesquisa no Direito. **Editora Saraiva**, (2005). 2ª Edição, p.86.

MOHAMED, A. M. et al. Application of experimental design to study and control properties and behaviors of cast Al-10.8Si eutectic alloy. **International Journal of Cast Metals Research**. (2007), vol. 20, No.5, p 246-252.

MONROE, R. Porosity in Steel. **Steel Founders Society of America National T&O Conference**. (2004).

MONTGOMERY D.C.; RUNGER, G. C. "Gauge Capability Analysis and Designed Experiments. Part II: Experimental Design Models and Variance Component Estimation. **Quality Engineering**. (1994), v.6 (2), 289-305.

MONTGOMERY D.C.; RUNGER, G. C. Estatística Aplicada a Engenharia. **Editora LTC**. (2004). p. 215-255.

MORAES, M. VII Curso de Fundição. **Associação Brasileira de Metais**, (1985). 15ª Edição. P.6-1 a 6-21.

MOTTONEN, M.; BELT, P.; HARKONEN, J. HAAPASALO, H.; KESS, P. Manufacturing Process Capability and Specification Limits. **The open Industrial and Manufacturing Engineering Journal**, (2008), 1, 29-36.

NETTO, A. A. O.; TAVARES, W. R. Introdução à Engenharia de Produção. (2008), **Visual Book Editora Ltda**, Florianópolis, 2ª Edição, p.163.

O'MEARA, P.; WILE, L. E.; ARCHIBALD, J. J.; SMITH, R. L. Bonded Sand Molds. **ASM - Metals Handbook**. (1996), 10th Edition, V. 15, p. 484-515.

OGASAWARA, A. Improvement and optimization of aluminum die casting technology with parameter design of quality engineering. **WFO Technical Forum**. June, (2007). Dusseldorf, Germany, 87-89.

OKTEM, H.; ERZURUMLU, T.; UZMAN, I. Application of Taguchi optimization technique in determining plastic injection molding process parameters for a thin-shell part. **Materials and Design**. (2007), v. 28, p 1271-1278.

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

PEREIRA, J. A. M.; FRANÇOIS, M. G.; VILELA, A. C. F. Determinação do tempo de Mistura numa Panela Siderúrgica. **Metalurgia e Materiais, Revista Escola de Minas**, ISSN 0370-4467, vol. 55, n. 1, Jan/Março, (2002).

PETERS, F; VOIGT, R.; OU, S. Z.; BECKERMANN. Effect of mould expansion on pattern allowances in sand casting of steel. **International Journal of Cast Metals Research**. (2007), v. 20, no 5, p.275-287.

PIRATELLI-FILHO, A.; SHIMABUKURU, F. Characterization of compression Strength of Granite-epoxy Composites Using Design of Experiments. **Materials Research**. (2008), Vol. 11, No. 4, 399-404.

PLUTSHACK, L.A ; SUSCHIL, L. Riser Design. **ASM-Metals Handbook**. (1996). 10th Edition. Vol. 15, P 577-587.

Properties and Selection: Irons Steels and Performance Alloys. **ASM HANDBOOK**. (1996), Vol. 1 10th Edition, p. 302.

RAGHUNATH, N.; PANDAY, P.M. Improving accuracy through shrinkage modeling by using Taguchi method in selective laser sintering. **International Journal of Machining Tolls & Manufacture**. (2007), vol. 47, p. 985-995.

RAJINDRA, C. R. Considerações Metalúrgicas na Fabricação de Aços para Tubos API 56. **62º Congresso Anual da ABM**, Vitória, ES, Julho (2007).

RANJIT, R. A Primer on the Taguchi Method. **Society of Manufacturing Engineers**, (1990), p.214.

REED-HILL, R. E. Princípios de Metalurgia Física. **Editores Guanabara Dois**. Segunda Edição. (1982). P 504-514.

REIS, A. et al. Model for prediction of shrinkage defects in long and short freezing range materials. **International Journal of Cast Metals Research**. (2007), vol. 20, No. 3p. 171-175.

RIBEIRO, L. G; ALVES, L. H. D; SILVA, M. B. “Melhora da qualidade na produção de peças fundidas utilizando planejamento de experimentos”. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, jul-set (2007). V. 4, p36-41.

RODRIGUES, E. F.; MARINIS, A. M. F.; SOLIMANI, R. Estudo numérico e experimental do escoamento do aço líquido durante o vazamento de uma panela de aciaria. **Revista Escola de Minas**, (2007), ISSN 0370/4467.

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**. (2009), vol. 209, 1181-1188.

RUSSELL, J. Química Geral. **Pearson Makron Books**, (2008). Vol. 1, 2ª Edição, p. 152.

SAVAS, O.; KAYIKCI, R. Application of Taguchi's methods to investigate some factors affecting micro porosity formation in A 360 aluminum alloy casting. **Material and Design**. (2007), v.28, p2224-2228.

SCHMIDT, J.; ROLA, F.; STUEWE, L. Simulação como ferramenta para desenvolvimento de projetos de canais de enchimento e alimentação não tradicionais. IV Seminário de Fundição. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. Volta Redonda, RJ (2003). P. 135-143.

SENTHICKUMAR, B.; PONNAMBALAM, S. G; JANAHAR, N. Process Factor Optimization for Controlling pull-down defects in iron castings. **Journal of Materials Processing Technology**. (2008).

SERGHUINI, A. Do the actual binder systems satisfy the future requirements? **WFO Technical Forum**, june, (2007), Dusseldorf, Germany, p. 9-13.

SHAKHPAZOV, E. K et al. Model for controlling processes in the ladle treatment of steel. **Metallurgist**, (2008), vol. 52, N. 5-6, p. 335-342.

SHIH, T. S.; ZONG, K. Z. Effect of Mulling on Green Sand Properties and Mold Quality. **Transactions of American Foundry Society**, (2000). Vol. 108, p. 767-772.

SIGUEL, M. Fundição de Metais Ferrosos. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais**. (1985). 15ª Edição, p. 6.1-6.17; p.8.1-8.17.

SILVA, A. L. V. C; MEI, P. R. Aços e Ligas Especiais. **Editora Edgard Blucher**, 2ª Edição (2006). P. 508-509.

SILVA, S. S.; AZEVEDO, M. B. Estudo identifica variáveis críticas que definem dimensões de peças injetadas. **Revista Plástico Industrial**. Outubro, (2003), p. 90-97.

STEFANESCU, D. M. Computer simulation of shrinkage related defects in metal castings - a review. **International Journal of Cast Metals Research**. (2005), vol.18 No. 3 p 129-143.

STEVEN, T.; BLAIR, M. Manufacturing Design Considerations. **ASM. Steel Castings Handbook**. (1995), 6th Edition. p. 1-2 – 1-3; 7-1 – 7-17.

TAGUCHI, G. Introduction to quality engineering: design quality into products and process. 1986, Tokio. **Asian Productivity Organization**.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. Taguchi's Quality Engineering Handbook. 2005. John Wiley&Sons, Inc. p. 1530-1617.

TSCHOPP, M. A.; RAMSAY, C. W.; ASKELAND, D. R. Processing Variable Significance on Metal Flow and Defect Formation in Thick-Section LFCs – Full Factorial Experiment. **AFS Transactions**, (2000), p.267-275.

UHRENIUS, B. Hardenability Concepts with applications to steel, **Proc. Symp., Chicago**, (1977), p. 28-81.

VIANA, J. F.; CAMPOS, E. B.; SANTOS, F. D. SARDINHA, I. Desenvolvimento do Sopro de Oxigênio com Lança de Jato Coerente na Usiminas. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**, São Paulo, (2004), V.1, n.2, p. 10-12, out-dez.

VIJAYARAM, S. S. et al. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds. **Journal of Materials Processing Technology**. (2006), vol. 178, p 29-33.

VINDEVOGEL, J; SANDRA, P. Resolution Optimization in Micellar Electrokinetic Chromatography: Use of Plackett-Burman Statistical Design for the Analysis of Testosterone Esters. **Anal Chem**. (1991), vol. 63, p. 1530-1536.

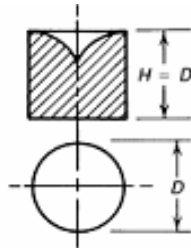
WILE, L. E. et al. Coremaking. **ASM - Metals Handbook**. (1996), 10th Edition, V. 15, p. 520.

WLODAWER, R. Directional Solidification of Steel Castings, **Sulzer Brothers Ltd., Tranlated by L.D. Hewitt**. (1966), English Translation Edited by R.V.Riley. Chesterfield, England.

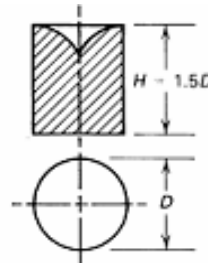
ZHAO, H. D.; LIU, B. C. Simulation of feeding flow and prediction of macro porosity of SGI casting based on microestruture formation. **International Journal of Cast Metals Research**. (2007), vol. 20. No 2, 42-46.

ANEXO 1 MODELOS DE MASSALOTES

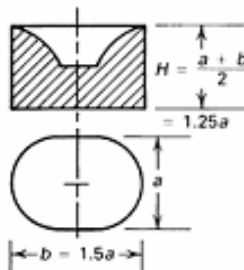
Valores
característicos



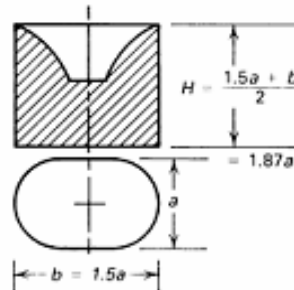
$$\begin{aligned} V_r &= 0.785D^3 \\ &= 1.69M_r^2 \\ M_r &= 0.1667D \\ D &= 6M_r = H \end{aligned}$$



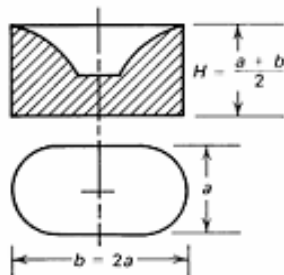
$$\begin{aligned} V_r &= 1.18D^3 \\ &= 179M_r^2 \\ M_r &= 0.187D \\ D &= 5.35M_r \\ H &= 8.02M_r \end{aligned}$$



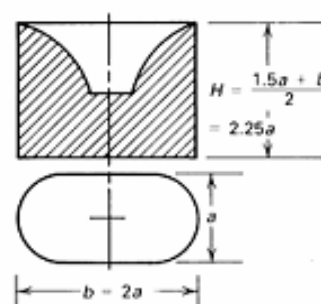
$$\begin{aligned} V_r &= 1.605a^3 \\ &= 181.5M_r^2 \\ M_r &= 0.207a \\ a &= 4.84M_r \\ b &= 7.25M_r \\ H &= 6.05M_r \end{aligned}$$



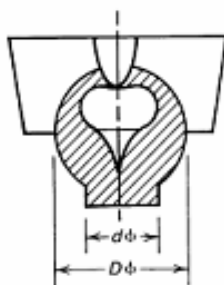
$$\begin{aligned} V_r &= 2.4a^3 \\ &= 189M_r^2 \\ M_r &= 0.233a \\ a &= 4.29M_r \\ b &= 6.43M_r \\ H &= 8.03M_r \end{aligned}$$



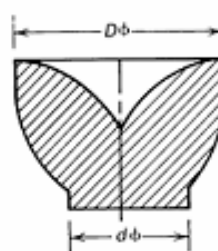
$$\begin{aligned} V_r &= 2.67a^3 \\ &= 200M_r^2 \\ M_r &= 0.237a \\ a &= 4.22M_r \\ b &= 8.45M_r \\ H &= 6.32M_r \end{aligned}$$



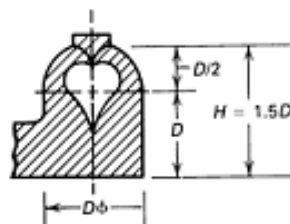
$$\begin{aligned} V_r &= 4.01a^3 \\ &= 211M_r^2 \\ M_r &= 0.267a \\ a &= 3.75M_r \\ b &= 7.5M_r \\ H &= 8.42M_r \end{aligned}$$



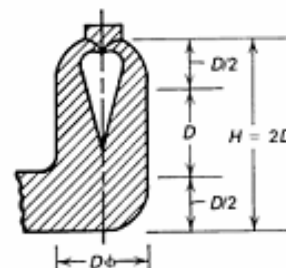
$$\begin{aligned} V_r &= 0.533D^3 \\ &= 115M_r^2 \\ M_r &= 0.1667M_r \\ D &= 6M_r \\ d &= 0.61D \\ &= 3.66M_r \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_r &= 0.261D^3 \\ &= 196M_r^2 \\ M_r &= 0.11D \\ D &= 9.1M_r \\ d &= 0.4D \\ &= 3.64M_r \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_r &= 1.04D^3 \\ &= 156M_r^2 \\ M_r &= 0.189 \\ D &= 5.3M_r \\ H &= 7.94M_r \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_r &= 1.318D^3 \\ &= 143M_r^2 \\ M_r &= 0.21D \\ D &= 4.76M_r \\ H &= 9.52M_r \end{aligned}$$

ANEXO 2

SISTEMA DE MEDIÇÃO. MSA-GR&R - CÁLCULOS.

ANALISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO															
ESTUDO DE R & R - MÉTODO DA MÉDIA E AMPLITUDE															
Nome Sistema de Medição: Verificação de volume com água destilada															
Nome e nº Peça:		Cubo de 100 mm de aresta													
Característica:		Volume em cm³													
OPERADOR		Peça		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Médias	
A	Medição 1			19,26	18,91	20,24	20,25	18,95	19,10	19,41	18,70	20,07	19,54	19,443	
	Medição 2			19,31	18,84	20,07	20,20	19,02	19,15	19,33	18,73	20,03	19,57	19,425	
	Medição 3			19,36	18,93	20,19	20,12	18,91	19,19	19,28	18,77	19,96	19,62	19,433	
	Média A			19,31	18,89	20,17	20,19	18,96	19,15	19,34	18,73	20,02	19,58	Xa = 19,434	
B	Amplitude A			0,100	0,090	0,170	0,130	0,110	0,090	0,130	0,070	0,110	0,080	Ra = 0,108	
	Medição 1			19,18	18,75	20,04	20,11	18,78	19,08	19,18	18,60	19,78	19,84	19,33	
	Medição 2			19,10	18,91	19,98	20,17	18,76	19,01	19,11	18,62	19,83	19,85	19,33	
	Medição 3			19,13	18,89	19,98	20,01	18,82	19,11	19,07	18,7	19,89	19,93	19,35	
C	Média B			19,14	18,85	20,00	20,10	18,79	19,07	19,12	18,64	19,83	19,87	Xb = 19,340	
	Amplitude B			0,080	0,160	0,060	0,160	0,060	0,100	0,110	0,100	0,110	0,090	Rb = 0,103	
	Medição 1			19,23	18,94	20,01	20,16	19,03	19,13	19,23	18,68	19,83	19,68	19,392	
	Medição 2			19,28	18,82	20,13	20,09	18,98	19,19	19,09	18,71	19,78	19,66	19,373	
Média da peça	Medição 3			19,32	18,89	20,08	20,11	19,01	19,22	19,15	18,82	19,89	19,79	19,428	
	Média C			19,28	18,88	20,07	20,12	19,01	19,18	19,16	18,74	19,83	19,71	Xc = 19,398	
	Amplitude C			0,090	0,120	0,120	0,070	0,050	0,090	0,140	0,140	0,110	0,130	Rc = 0,106	
				19,24	18,88	20,08	20,14	18,92	19,13	19,21	18,70	19,90	19,72	X̄ = 19,391	
														Rd = 1,432	
Repetições		D4		Repetições		K1		Operadores		K2		Operadores		K3	
3		2,58		3		0,5908		3		0,5231		10		0,3146	
X _{DIFF} =		max(X) - min(X)				R̄ =		(Ra+Rb+Rc)/3		U _{CLR} =		R' D4			
X _{DIFF} =		0,0933				R̄ =		0,1057		U _{CLR} =		0,2726			

ANALISE NUMERICA		VARIAÇÃO	
		VARIAÇÃO TOTAL	
1) . Repetibilidade (VE)		2) . % VE	
$VE = \boxed{\overline{R} * K_1}$	$VE = 0,0624$	$\%VE = 100[VE/VT]$	$\%VE = 13,65$
3) . Reprodutibilidade (VO)		4) . % VO	
$VO = \boxed{\sqrt{(\overline{X}_{mnp} - K_2)^2 - (VP^2 / (n^2))}}$	$VO = 0,0475$	$\%VO = 100[VO/VT]$	$\%VO = 10,38$
5) . Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R)		6) . % R&R	
$R\&R = \boxed{\sqrt{VP^2 + VO^2}}$	$R\&R = 0,0784$	$\%R\&R = 100[R\&R/VT]$	$\%R\&R = 17,15$
7) . Variação da Peça (VP)		8) . % VP	
$VP = \boxed{R_p * K_3}$	$VP = 0,45058$	$\%VP = 100[VP/VT]$	$\%VP = 98,52$
9) . Variação Total (VT)		10) . Número de categorias distintas (ndc)	
$VT = \boxed{\sqrt{R^2 + VP^2}}$	$VT = 0,4574$	$ndc = 1,41[VP/R\&R]$	$ndc = 8,10$

ANEXO 3

ARRANJOS ORTOGONAIS PADRÕES (Adaptado de Taguchi, 2005)

Arranjo Ortogonal L4. Dois níveis e no máximo três fatores

$L_4 (2^3)$			
N. Exp.	FATORES		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Arranjo Ortogonal L8. Dois níveis e no máximo sete fatores

$L_8 (2^7)$							
N. Exp.	FATORES						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Arranjo Ortogonal L12. Dois níveis e no máximo onze fatores

$L_{12} (2^{11})$											
N. Exp.	FATORES										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2
4	1	2	1	2	2	1	2	2	1	1	2
5	1	2	2	1	2	2	1	2	1	2	1
6	1	2	2	2	1	2	2	1	2	1	1
7	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1
8	2	1	2	1	2	2	2	1	1	1	2
9	2	1	1	2	2	2	1	2	2	1	1
10	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	2
11	2	2	1	2	1	2	1	1	1	2	2
12	2	2	1	1	2	1	2	1	2	2	1

Arranjo Ortogonal L16. Dois níveis e no máximo quinze fatores

$L_{16}(2^{15})$															
N. Exp.	FATORES														
	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

Arranjo Ortogonal L32. Dois níveis e no máximo trinta e um fatores

L ₃₂ (2 ³¹)																																
N. Exp.	FATORES																															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2
6	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1
7	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
8	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
9	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2
10	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1
11	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1
12	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2
13	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
14	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2
15	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	1	2	2
16	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1	1
17	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1
18	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
19	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2
20	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
21	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1
22	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
23	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	1
24	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2
25	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2
26	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1
27	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1
28	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2
29	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1
30	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2
31	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2
32	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	1

$L_9 (3^4)$				
N. Exp.	FATORES			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Arranjo Ortogonal L27. Três níveis e treze fatores no máximo

$L_{27} (3^{13})$													
N. Exp.	FATORES												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

ANEXO 4

CÁLCULO DO MODELO

Tabela 8. Resultado dos Experimentos com Método Taguchi

EX	D	B	H	A	V	I	V	C	L	E	M	F	O	G	P	Média
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
2	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	19,08
3	-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	12,7
4	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	16,5
5	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	31,35
6	-	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	12,89
7	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	-	-	17,6
8	-	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	5,8
9	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	15,55
10	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	11,65
11	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	15,76
12	+	-	+	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	18,16
13	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	+	+	-	20,14
14	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	17,28
15	+	+	-	+	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	14,86
16	+	+	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	+	-	13,11
																16,4

Efeito dos Fatores	$\sum E$ superior/n	$\sum E$ inferior/n	ΔE	$\Delta E/2$
EA	14,3113	18,4925	- 4,1813	- 2,0906
EC	14,3088	18,4950	- 4,1863	- 2,0931
EE	18,6675	14,1363	4,5313	2,2656
EDE	18,2788	14,5250	3,7538	1,8769

$$Y = \text{Grande Média} + \Delta EA/2 \cdot A + \Delta EC/2 \cdot C + \Delta EE/2 \cdot E + \Delta EED/2 \cdot ED$$

MODELO

$$Y = 16,401 - 2,091 \cdot A - 2,09 \cdot C + 2,265 \cdot E + 1,88 \cdot ED$$