

UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO - CT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA - DEM
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEM

HELTON KENJI ARÇARI AMBO
THIAGO MERIGUETE DE OLIVEIRA

PROJETO DE GRADUAÇÃO
ESTUDO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TAMPAS
DE MOTORES ELÉTRICOS POR INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

Vitória
2016

HELTON KENJI ARÇARI AMBO
THIAGO MERIGUETE DE OLIVEIRA

PROJETO DE GRADUAÇÃO
ESTUDO DOS PARÂMETROS NO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TAMPAS
DE MOTORES ELÉTRICOS POR INJEÇÃO DE ALUMÍNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Dr. Geraldo Rossoni Sisquini

Co-Orientador: Prof. Herbert Barbosa Carneiro

Vitória
2016

HELTON KENJI ARÇARI AMBO
THIAGO MERIGUETE DE OLIVEIRA

**ESTUDO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TAMPAS
DE MOTORES ELÉTRICOS POR INJEÇÃO DE ALUMÍNIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 24 de junho de 2016 como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

COMISSÃO EXAMINADORA

Professor Dr. Geraldo Rossoni Sisquini
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Professora Dr. Patrícia Alves Barbosa
Examinadora

Engenheiro Mecânico Rubson M. Camporez
Examinador

AMBO, Helton Kenji Arçari; Oliveira, Thiago Merigute.

Estudo dos parâmetros no processo de fabricação de tampas de motores elétricos por injeção de alumínio / AMBO, Helton Kenji Arçari; Oliveira, Thiago Merigute – 2016.

99f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Rossoni Sisquini

Co-orientador: Prof. Herbert Barbosa Carneiro

Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Seis Sigma. 2.Fundição sob pressão. 3.Alumínio. 4. Parâmetros que influenciam no processo I. AMBO, Helton Kenji Arçari; Oliveira, Thiago Merigute. II Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica. III Estudo dos parâmetros no processo de fabricação de tampas de motores elétricos por injeção de alumínio.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Geraldo Rossoni Sisquini e ao professor Herbert Barbosa Carneiro pela orientação e motivação ao longo da graduação em Engenharia Mecânica e especialmente no Projeto de Graduação.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica por todo ensinamento e paciência ao longo do curso.

Aos colegas das turmas 2012/02 e 2012/01 pelo grande companheirismo e amizade durante os longos anos de graduação.

Aos amigos e amigas que nunca deixaram de nos apoiar.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Este trabalho de Conclusão de Curso descreve um estudo de caso realizado em uma empresa de motores elétricos. A pedidos da empresa, não será revelado o nome e iremos nos referenciar apenas como Motores Elétricos Ltda. O trabalho foi realizado através de uma parceria do Departamento de Controle de Qualidade e o Departamento de Injeção de Alumínio da empresa de Motores Elétricos Ltda envolvendo a utilização da metodologia Seis Sigma para investigar a influência dos parâmetros do processo de fabricação de tampas de motores elétricos por injeção de alumínio. A produtividade é um dos fatores de maior impacto no desempenho de uma empresa, pois influencia diretamente nos custos dos produtos e no dimensionamento adequado da fábrica relacionado à produção, pessoas e tempo de máquinas paradas. Desta forma, foi elaborado um planejamento de experimentos onde foram utilizadas diversas combinações entre os parâmetros do processo de fundição sob pressão de ligas de alumínio (temperatura do metal, temperatura do molde, ângulo para dosagem do metal fundido, ângulo para derramamento do metal, aplicação de desmoldante sólido, velocidade de primeira fase de injeção, velocidade de segunda fase de injeção, velocidade de terceira fase de injeção, curso de segunda fase de injeção, curso de terceira fase de injeção), de forma a analisar a causa raiz causadora de defeitos na peça fundida. Para avaliação da integridade das peças obtidas foram realizadas inspeções visuais pelo Departamento de Controle de Qualidade da empresa e análises estatísticas. Os resultados obtidos permitiram avaliar, por meio de análises estatísticas as influências das variações dos diferentes parâmetros de injeção estudados sobre a integridade das peças obtidas e determinar as combinações de parâmetros que permitiram a obtenção dos melhores e piores resultados quanto aos defeitos da peça fundida.

Palavras-chave: Fundição sob pressão. Ligas de alumínio. Parâmetros de injeção. Defeitos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O ciclo de hipótese e análise da causa raiz	22
Figura 2 - Molde (Lado Fixo – Câmara fria)	29
Figura 3 - Molde (Lado Fixo – Câmara fria)	29
Figura 4 - Molde (Lado móvel – Câmara fria)	30
Figura 5 - Molde (Lado móvel – Câmara fria)	30
Figura 6 - O robô enchendo, com metal líquido, um pequeno cadinho.....	31
Figura 7 - Processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara quente	32
Figura 8 - Esquema da máquina de injeção – Mesa fixa e mesa móvel	32
Figura 9 - Processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara fria	33
Figura 10 - Pistão avançado de maneira a posicionar o alumino na primeira fase da injeção.....	34
Figura 11 - Pistão se movendo para preencher o alumino na cavidade do molde, segunda fase de injeção.....	35
Figura 12 - Peça com presença de trinca (provocada no momento de cisalhamento)	48
Figura 13 - Peça com presença de trinca (provocada no momento de cisalhamento)	49
Figura 14 - Peça com presença de rachadura (provocada no momento de extração do molde)	49
Figura 15 - Peça com presença de rachadura (provocada no momento de extração do molde)	49
Figura 16 - Peça com rebarba (provocada pelo molde ou no momento de cisalhamento)	50
Figura 17 - Peça com falha de injeção (provocada retenção de alumínio no molde)	50
Figura 18 - Peça com falha de injeção (provocada por porosidade)	50
Figura 19 - Peça refugada por oxidação e com manchamento.....	51
Figura 20 - Diagrama de causa e efeito	52
Figura 21 - Bolsas de ar em perfeito estado.....	53
Figura 22 - Peça (sem imperfeições)	53
Figura 23 - Bolsas de ar em com presença de imperfeições.....	54

Figura 24 - Peça com rebarba.....	54
Figura 25 - Bolsas de ar com muitas imperfeições.....	55
Figura 26 - Peça com falha de injeção	55
Figura 27 - Lingotes de alumínio	56
Figura 28 - Preparação para fusão do alumínio	56
Figura 29 - Forno de indução	57
Figura 30 - Fundição do alumínio	57
Figura 31 - Alumínio sendo retirado do forno através do cadinho de transporte.....	58
Figura 32 - Transporte do alumínio retirado do forno	58
Figura 33 - Vazamento do alumínio	59
Figura 34 - Aplicação do desmoldante	59
Figura 35 - Abertura dos moldes para futura retirada das galhas	60
Figura 36 - Galhas e seus componentes.....	60
Figura 37 - Transporte da galha para os sensores.....	61
Figura 38 - Verificação por parte dos sensores.....	61
Figura 39 - Resfriamento da galha no tanque de resfriamento	62
Figura 40 - Refrigeração da galha retirada.....	62
Figura 41 - Posicionamento da galha para separação das peças e retirada dos massalotes	63
Figura 42 - Conferência visual.....	63
Figura 43 - Armazenamento das peças.....	64
Figura 44 - Peça (sem imperfeições) ao término do processo de produção	64
Figura 45 – Matriz de injeção	69
Figura 46 – Molde de injeção	69
Figura 47 – Bolsa de ar	69
Figura 48 – Relação Variação do modelo vs. Variação das medidas Resultado	84
Figura 49 – Cálculo do “Efeito”	86
Figura 50 – Resultado DOE II	88
Figura 51 – Gráfico “Normal Plot”	88
Figura 52 – Efeitos (variação da resposta).....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das causas de refugos.....	47
Tabela 2 – Exemplos de classificação quanto aos critérios definidos.....	53
Tabela 3 – Mapa de Raciocínio.....	65
Tabela 4 – Mapa de Processo.....	66
Tabela 5 – Mapa de Produto.....	69
Tabela 6 – Experimento 2^2	71
Tabela 7 – Experimento 2^2 (Análise)	71
Tabela 8 – Experimento 2^3	72
Tabela 9 – Experimento 2^3 (Análise)	72
Tabela 10 – Combinação de parâmetros para realização do DOE I (Parte 01)	73
Tabela 11 – Combinação de parâmetros para realização do DOE I (Parte 02)	74
Tabela 12 – Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método Taguchi – Combinação de parâmetros I.....	75
Tabela 13 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II (Parte 01)	79
Tabela 14 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II (Parte 02)	80
Tabela 15 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II.....	81
Tabela 16 – Exemplo para cálculo do “Efeito”	85
Tabela 17 – Configuração para obter-se uma peça sem qualquer falha de injeção..	89
Tabela 18 – Configuração para obter-se uma peça com falhas de injeção.....	90
Tabela 19 – Especificações Técnicas Injetora AGRATI – Modelo CF 600.....	97
Tabela 20 – Composição e informações sobre os ingredientes.....	98

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Número de refugos mensais (em PPM)	46
Gráfico 2 – Número de refugos semanais (em PPM)	46
Gráfico 3 – Possíveis combinações	89

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

CLP – Controlador Lógico Programável

DOE – Desing of Experiments

DEMAIC – Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar

DFSS – Design For Six Sigma

GQT – Gestão da Qualidade Total

PDCA – Planejar, Executar, Verificar, Agir

MAIC – Medir, Analisar, Melhorar, Controlar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema proposto e justificativa.....	15
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivo específico	17
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	18
3.1 Metodologia Seis Sigma	18
3.1.1 Definição do Seis Sigma	18
3.1.2 Origem do Seis Sigma	19
3.1.3 Metodologia do Seis Sigma	20
3.1.4 As fases do Seis Sigma	21
3.1.4.1 A fase “Definir”	21
3.1.4.2 A fase “Medir”	21
3.1.4.3 A fase “Analisar”	21
3.1.4.4 A fase “Melhorar”	22
3.1.4.5 A fase “Controlar”	22
3.1.5 A estrutura Seis Sigma	23
3.1.6 A equipe Seis Sigma.....	23
3.1.6.1 Os “Líderes”	24
3.1.6.2 Os “Patrocinadores”	24
3.1.6.3 Os “Master Black Belts”	25
3.1.6.4 Os “Black Belts”	25
3.1.6.5 Os “Green Belts”	25
3.1.7 Implementação do Seis Sigma	25
3.2 Fundição	26
3.2.1 Fundição sob pressão.....	26
3.2.2 Vantagens e desvantagens.....	27
3.2.3 Etapas do processo	28
3.2.4.Projeto e confecção do modelo.....	28
3.2.5 Confecção dos moldes e machos.....	29

3.2.6 Fusão e vazamento do metal líquido para dentro dos moldes.....	30
3.2.7 Desmoldagem e acabamento da peça fundida.....	31
3.2.8 Sistemas de injeção.....	31
3.2.9 Parâmetros que influenciam no processo.....	33
3.2.9.1 <i>Tempo de enchimento da matriz</i>	33
3.2.9.2 <i>Velocidades de injeção</i>	34
3.2.9.2.1 <i>Velocidade de primeira fase de injeção</i>	34
3.2.9.2.2 <i>Velocidade de segunda fase de injeção</i>	34
3.2.9.2.3 <i>Velocidade de terceira fase de injeção</i>	35
3.2.9.3 <i>Pontos de comutação</i>	35
3.2.9.4 <i>Pressão de recalque</i>	36
3.2.10 Alumínio	36
3.2.10.1 <i>Vantagens</i>	36
3.2.10.2 <i>Classificação</i>	37
3.2.10.2.1 <i>Ligas trabalhadas</i>	37
3.2.10.2.2 <i>Ligas para fundição</i>	37
3.2.10.3 <i>Aplicação</i>	38
3.2.10.4 <i>Propriedades mecânicas</i>	39
3.2.10.4.1 <i>Limite de resistência à tração</i>	39
3.2.10.4.2 <i>Limite de escoamento</i>	39
3.2.10.4.3 <i>Alongamento</i>	39
3.2.10.4.4 <i>Dureza</i>	40
3.2.10.4.5 <i>Tensão de fadiga</i>	40
3.2.10.4.6 <i>Propriedades em temperaturas elevadas</i>	40
3.2.10.4.7 <i>Propriedades em baixas temperaturas</i>	41
3.2.11 Fundição sob pressão de alumínio	41
3.2.12 Problemas na injeção de alumínio	41
3.2.12.1 <i>Porosidade</i>	41
3.2.12.2 <i>Rechupe</i>	42
3.2.12.3 <i>Solda fria</i>	43
3.2.12.4 <i>Trincas</i>	43
3.2.12.5 <i>Oxidação e/ou Manchamento</i>	43

4. METODOLOGIA	45
4.1 Caracterização do problema e definição do objetivo do experimento.....	48
4.1.1 Defeitos apresentados ao final do processo de produção	48
4.1.2 Escolha dos parâmetros de influência e níveis.....	51
4.1.3 Seleção dos fatores de controle e das variáveis de saída	52
4.2 Determinação da matriz experimental.....	56
4.2.1 Fluxograma experimental.....	56
4.2.2 Sequência de tarefas executadas ao longo do ciclo durante o experimento	64
4.2.2.1 <i>Elaboração do Mapa de Raciocínio</i>	<i>65</i>
4.2.2.2 <i>Elaboração do Mapa de Processo.....</i>	<i>66</i>
4.2.2.3 <i>Elaboração do Mapa de Produto</i>	<i>69</i>
4.2.2.4 <i>Experimento fatorial (DOE)</i>	<i>70</i>
4.2.2.5 <i>Ajuste da combinação de parâmetros desejada DOE I</i>	<i>73</i>
4.2.2.6 <i>Ajuste da combinação de parâmetros desejada DOE II</i>	<i>79</i>
5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	87
5.1 Avaliação das variáveis de saída.....	87
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	93
8 REFERÊNCIAS.....	94
ANEXOS	97
ANEXO A – Especificações Técnicas Injetora AGRATI – Modelo CF 600.....	97
ANEXO B – Características do desmoldante aplicado no processo de injeção sob pressão.....	98

1 INTRODUÇÃO

1.1 Problema proposto e justificativa

Na indústria, um dos departamentos que atua como área de apoio da fábrica para controlar, auditar e propor melhorias no processo de produção é o “Departamento de Controle de Qualidade”.

A realização do controle de qualidade nas indústrias é de extrema importância para que a qualidade, segurança, eficácia e a credibilidade dos seus produtos sejam assegurados junto à população ou clientes que irão consumi-los.

Desta forma, através do controle de qualidade do Departamento de Injeção de Alumínio e dos indicadores de qualidade da empresa de Motores Elétricos Ltda, constatou-se, que o provável causador do maior número de refugos e retrabalhos na injeção de alumínio – era a falha de injeção nas tampas de alumínio (componente do motor elétrico).

Logo, surgiu-se a necessidade de um estudo detalhado para analisar a causa raiz desta falha de processo, uma vez que para que a injeção seja feita, diversos parâmetros são configurados na máquina como: velocidade da primeira fase de injeção, velocidade da segunda fase de injeção, velocidade da terceira fase de injeção, curso da segunda fase de injeção, curso da terceira fase de injeção, pressão de injeção, quantidade de desmoldante, tempo de resfriamento e etc.

Portanto a equipe do Departamento de Injeção de Alumínio juntamente com o Departamento de Controle de Qualidade da empresa de Motores Elétricos Ltda realizou um estudo dos parâmetros configurados na máquina, para que assim, pudesse identificar quais parâmetros e como estes influenciam na falha de injeção das peças.

Neste trabalho, foi analisada, em especial, o processo de fundição sob pressão das tampas de alumínio fornecidas para indústria de eletrodomésticos em geral, pois estas possuem uma forma geométrica complexa e, conseqüentemente, como

resultado final, têm-se um melhor controle do processo dos demais componentes produzidos na empresa de Motores Elétricos Ltda.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral reduzir o índice de refugo e retrabalho no processo de fabricação de tampas de motores elétricos por injeção de alumínio e, como consequência, aumentar a produtividade e garantir a satisfação do cliente.

2.2 Objetivo específico

- Reduzir o índice de refugo e retrabalho no processo de fabricação de tampas e de motores elétricos por injeção de alumínio;
- Analisar a causa raiz causadora desta falha de injeção;
- Estudar os parâmetros que configuram a máquina injetora;
- Aplicar novas configurações no processo de produtivo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Metodologia Seis Sigma

3.1.1 Definição do Seis Sigma

São inúmeras as definições encontradas na vasta gama de literaturas disponíveis sobre a definição de Seis Sigma. Algumas definições são mais simples e objetivas, outras já procuram ser mais abrangentes e profundas, tentando demonstrar que não se trata apenas de mais uma “coqueluche passageira” e sim de uma filosofia de trabalho.

Segundo Pande et al. (2001), Seis Sigma é definido como um sistema abrangente e flexível para alcançar, sustentar e maximizar o sucesso empresarial, onde o Seis Sigma é singularmente impulsionado por uma estreita compreensão das necessidades dos clientes, pelo uso disciplinado de fatos, dados e análise estatística e a atenção diligente à gestão, melhoria e reinvenção dos processos de negócios. Esta definição fornece a base de todos os esforços para se descerrar o potencial do Seis Sigma para uma organização. Os tipos de sucesso empresarial são proporcionais aos inúmeros benefícios comprovados que se pode alcançar com o Seis Sigma, tais como:

- Redução de custos;
- Melhoria de produtividade;
- Crescimento da fatia de mercado;
- Retenção de clientes;
- Redução de tempo de ciclo;
- Redução de defeitos;
- Mudança cultural;
- Desenvolvimento de produto/serviço.

Conforme Harry (1998), ele define em seu artigo que o Seis Sigma é um processo de negócio que permite às organizações incrementar seus lucros por meio da

otimização das operações, melhoria da qualidade e eliminação de defeitos, falhas e erros. A meta do Seis Sigma não é alcançar níveis Seis Sigma de qualidade. Seis Sigma está relacionado à melhoria da lucratividade. Organizações que implementam o Seis Sigma fazem isso com o objetivo de melhorar seus lucros.

3.1.2 Origem do Seis Sigma

A origem do Seis Sigma como uma abordagem para a melhoria da qualidade surgiu nos anos 80 através da Motorola, onde seus objetivos eram claramente focados na redução da variabilidade de todos os seus processos. Sinais de um significativo sucesso na Motorola rapidamente se tornaram aparentes. De fato, de 1987 a 1997, a Motorola alcançou aumentos em vendas significativos da ordem de 20% ao ano, gerando uma economia acumulada da ordem de 14 bilhões de dólares. Com isso, a Motorola foi a primeira empresa premiada com o prêmio Malcolm Baldrige National Quality Award em 1988 (KLEFSJO, WIKLUND e EDGEMAN, 2001).

Outras companhias de atuação mundial como General Electric, Allied Signal, Sony, Texas Instruments, Polaroid também optaram pela implementação da metodologia Seis Sigma e, em pouco tempo, passaram a obter maiores ganhos como aumento da participação de mercado, redução de custos e um aumento correspondente em suas margens de lucros (HARRY, 1998).

Dissertando-se em termos de Brasil, a iniciativa Seis Sigma já completou a fase onde as organizações estão procurando saber o que é a metodologia e como ela funciona. Na verdade, pode-se considerar que a aplicação do Seis Sigma já ocorre na maioria das empresas brasileiras de grande porte, principalmente em companhias subsidiárias de companhias de origem internacional, como Kodak, General Electric, ABB, Siemens e Ford. Há também as grandes companhias de origem brasileira que também têm se destacado na aplicação da metodologia, como por exemplo, a Ambev, Belgo Mineira, Votorantim, Brasmotor e Gerdau. Quanto às empresas de médio porte, a iniciação ao Seis Sigma deve estar ocorrendo dentro dos próximos anos enquanto que, para as de pequeno porte, muitas se encontram em fase de implementação do Sistema da Qualidade (CAMPOS, 2000).

3.1.3 Metodologia do Seis Sigma

Segundo Pande, Neuman, Cavanagh (2001) o Seis Sigma conta com duas metodologias de máxima eficiência que são: Design For Six Sigma (DFSS), que é utilizado quando se precisa desenvolver um produto ou processo novo ou adaptar um produto que foi fabricado em outro país para as necessidades do novo mercado, e a segunda metodologia é a Define, Measure, Analyse, Improve, Control (DMAIC), que esta dividida em cinco fases ou estágios básicos para se obter o desempenho Seis Sigma em um processo, divisão ou empresa. Essas cinco fases são conhecidas como: Define (Definir), Measure (Medir), Analyse (Analisar), Improve (Melhorar) e Control (Controlar).

Desde que o movimento da qualidade começou, há algumas décadas atrás, muitos modelos de melhoria foram criados, adaptados e aplicados a processos ao longo dos anos. A maioria deles é baseado nos passos introduzidos por W. Edwards Deming, o ciclo Plan, Do, Check, Act (PDCA) que descreve a lógica básica de melhoria de processos baseada em dados (PANDE et al., 2001).

A Motorola desenvolveu inicialmente o modelo Measurement, Analysis, Improvement, Control (MAIC) como sendo uma evolução do ciclo PDCA. Este modelo foi mais tarde adotado pela G.E. que incluiu mais uma fase inicial denominada pela letra D com a finalidade de reconhecer a importância de se ter um projeto bem focado, chamando-o de DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar) (HENDERSON e EVANS, 2000). Esse método DMAIC passou a ser a base da filosofia Seis Sigma para as empresas, sendo fundamental para o seu sucesso (ROTONDARO et al., 2002 ; HARRY, 1998).

A metodologia Seis Sigma utilizada na empresa de Motores Elétricos Ltda é a DMAIC.

3.1.4 As fases do Seis Sigma

3.1.4.1 A fase “Definir”

Na exposição de Rotondaro et al. (2002), a primeira fase é atribuída à chamada “Seleção de Projetos”, na qual consiste em definir claramente qual o efeito indesejável de um processo que deve ser eliminado ou melhorado, desde que haja uma relação clara com um requisito especificado do cliente e que um projeto seja economicamente vantajoso.

3.1.4.2 A fase “Medir”

Nesta fase tem-se o objetivo de se saber como o processo é medido e qual é sua respectiva performance. O tempo de projeto Seis Sigma procura identificar os processos internos principais que influenciam as características críticas para a qualidade e medem os defeitos atualmente gerados, relativos a estes processos (HENDERSON e EVANS, 2000).

3.1.4.3 A fase “Analisar”

Nesta fase tem-se o objetivo de se identificar a lacuna existente entre as performances do processo atual e do processo desejado, priorizando problemas e identificando as causas desses problemas (PORTER, 2000).

Pande et al. (2001) considera esta fase como sendo a mais imprevisível do DMAIC, pois ele afirma que não existe certeza absoluta de uma causa raiz. As ferramentas que se devem usar e a maneira de como aplicá-las vão depender muito do problema a ser estudado, bem como do processo envolvido. Ele ainda apresenta a fase ANALISAR como um ciclo aplicado na melhoria de processo. O ciclo é impulsionado através da geração e da avaliação de hipóteses (ou estimativas) quanto à causa do problema. Pode-se entrar num ciclo ou no ponto (a), examinando-se o processo e os dados para se identificar causas possíveis; ou no ponto (b), onde se começa com a suspeita de uma causa e procura confirmá-la ou rejeitá-la através de uma análise, conforme mostrado na Figura 1. Quando se encontra uma hipótese que não seja

correta, pode-se ter que voltar ao início do ciclo para se obter uma explicação completamente diferente. Mas, mesmo as causas incorretas, na verdade, são oportunidades para refinar e estreitar a explicação do problema.



Figura 1 – O ciclo de hipótese e análise da causa raiz (Adaptada de PANDE et al).

3.1.4.4 A fase “Melhorar”

Conforme Henderson e Evans (2000), esta fase é baseada em como se remover as causas dos erros e/ou defeitos do processo. A equipe de projeto Seis Sigma consolida as variáveis essenciais e quantifica seus efeitos sobre as características críticas para a qualidade. É também identificado os limites máximos aceitáveis para essas as variáveis essenciais, bem como a validação de um sistema de medição de desvios para as variáveis. A equipe modifica então o processo para que este possa apresentar uma performance quanto à variabilidade dentro dos limites aceitáveis.

Com uma definição mais branda e simplificada, Porter (2000) define esta fase como sendo uma etapa que envolve a geração de soluções de melhoria e resolução de problemas para que sejam alcançados os requisitos financeiros e outros objetivos de performance.

3.1.4.5 A fase “Controlar”

Henderson e Evans (2000) definem esta fase através de uma simples pergunta: “Como nós podemos manter as melhorias?”. Para tanto ele alega que ferramentas de auxílio devem ser colocadas em prática para se assegurar que as variáveis principais dos processos modificados permaneçam dentro das faixas aceitáveis definidas por todo tempo.

3.1.5 A estrutura Seis Sigma

Uma característica muito poderosa do Seis Sigma é a criação de uma infraestrutura para assegurar que as atividades de melhoria de performance tenham recursos necessários. A falha que proporciona essa infraestrutura é a razão número um do porquê 80% das implementações da Gestão da Qualidade Total (GQT) terem falhado no passado. O Seis Sigma proporciona melhorias e mudanças no trabalho, representando um percentual pequeno, mas crítico da organização. Esses agentes de mudança são os catalisadores que as institucionalizam (PYZDEK, 2002).

A frase escrita por Snee (2001) procura sintetizar a importância de uma equipe de projeto Seis Sigma bem estruturada: “Um projeto escolhido pode ser o projeto certo para uma organização trabalhar, porém, ele ainda pode vir a ser uma falha porque pessoas erradas foram escolhidas para trabalharem neste projeto”.

3.1.6 A equipe Seis Sigma

De acordo com Rotondaro et al. (2002), a constituição da equipe Seis Sigma é fundamental no sucesso do programa, pois ele é desenvolvido essencialmente por pessoas.

Segundo Harry (1998), os termos que serão citados a seguir e, que formam a estrutura básica de uma Equipe Seis Sigma, foram criados pela Motorola e procuram salientar as características e as qualidades de cada especialista dentro do sistema.

As nomenclaturas são:

- “Líderes”;
- “Patrocinadores ou Campeões”;
- “Master Black Belts”;
- “Black Belts”;
- “Green Belts”.

3.1.6.1 Os “Líderes”

Pande et al. (2001) também atribui o papel dos líderes dentro de um Projeto Seis Sigma como sendo de membros da alta gerência, os quais devem possuir funções específicas, como:

- Estabelecer os papéis e a infraestrutura da iniciativa Seis Sigma;
- Selecionar projetos específicos e alocação de recursos;
- Rever periodicamente o progresso de vários projetos e oferecer ideias e auxílio;
- Auxiliar e quantificar o impacto dos esforços Seis Sigma sobre a linha de resultados da empresa;
- Avaliar o progresso e identificar pontos fortes e fracos do esforço;
- Compartilhar melhores práticas com toda a organização, com fornecedores e principais clientes;
- Agir como removedores de barreiras, quando as equipes identificarem bloqueios aparentes;
- Aplicar as lições aprendidas e seus estilos pessoais de gerência.

3.1.6.2 Os “Patrocinadores”

Os patrocinadores são profissionais de alto nível que compreendem o Seis Sigma e estão comprometidos com seu sucesso. Em grandes organizações, o Seis Sigma será liderado por um patrocinador de alto nível, em tempo integral, tal como o vice-presidente executivo, por exemplo.

De acordo com Pande et al. (2001), os patrocinadores devem possuir uma responsabilidade crítica que pode exigir um equilíbrio delicado, pois as equipes precisam de liberdade para tomar suas próprias decisões, mas também necessitam de orientação dos líderes da empresa para direcionarem seus esforços.

3.1.6.3 Os “Master Black Belts”

Pyzdek (2000) declara que o “Master Black Belt” é o nível mais alto de proficiência técnica e organizacional dentro da filosofia Seis Sigma. Por consequência, eles devem conhecer tudo o que os “Black Belts” sabem, bem como entender a teoria matemática na qual os métodos estatísticos são baseados. Os “Master Black Belts” devem estar aptos a acompanhar os “Black Belts” na aplicação correta dos métodos em situações incomuns.

3.1.6.4 Os “Black Belts”

Os “Black Belts” são profissionais tecnicamente orientados levando-se em consideração suas habilidades incomuns. Eles devem estar ativamente envolvidos no processo de mudança e desenvolvimento organizacional. Os “Black Belts” trabalham para extrair conhecimento litigioso do armazenamento de informações da organização (PYZDEK, 2000).

3.1.6.5 Os “Green Belts”

Segundo Pysdek (2000), os “Green Belts” são líderes de projetos Seis Sigma capazes de formar e facilitar equipes de Seis Sigma e administrar os projetos, desde o seu conceito até sua conclusão.

3.1.7 Implementação do Seis Sigma

Naumann (2000) afirma que, para a implementação de um projeto Seis Sigma, deve haver um fluxo lógico entre os vários passos existentes no processo. Ele afirma que há também a possibilidade de haver sobreposição de tarefas na passagem de um passo para o outro, ocorrência que considera normal se a direção dos esforços Seis Sigma continuar focada e consistente com a melhoria do processo.

Marash (2000) destaca em seu artigo que, quando se fala em implementação do Seis Sigma, um dos maiores impulsos em empresas que aplicaram o Seis Sigma tem sido o desenvolvimento de especialistas altamente treinados. Para finalizar,

cabe a citação do planejamento de implementação do Seis Sigma de forma simples, curta e objetiva de Gross (2001), que escreve: “Uma vez que a equipe tenha definido claramente as metas e objetivos do programa, o plano de implementação pode começar”.

3.2 Fundição

A indústria de fundição de ferro é a mais antiga do Brasil datando do final do século XVI (CALDEIRA, 2005). É um segmento da economia caracterizada pela produção de bens intermediários. Fornece produtos para indústrias de diversos segmentos como a automobilística, construção ferroviária e naval, bens de capital (principalmente máquinas e implementos agrícolas), de base como a siderúrgica (lingoteiras e cilindricos), o setor de mineração e fabricação de cimento (corpos moedores e peças de desgaste) e ainda o de extração/refino de petróleo (válvula e outras peças) (FILHO E LIMA, 2000).

3.2.1 Fundição sob pressão

O processo de fundição sob pressão consiste em injetar um metal líquido (liga de alumínio, zinco ou magnésio) contido em um recipiente para o interior da cavidade de um molde (matriz), submetendo o metal a altas pressões (MALAVAZI, 2005).

Este processo de fundição pode ser considerado como um processo de precisão, já que se consegue produzir peças com espessuras finas e geometrias relativamente complexas. A precisão dimensional pode variar entre 0,05 mm até 0,25 mm, sendo que a mínima espessura que pode ser obtida é de 2,5 mm. As peças fabricadas possuem pesos entre 50 g e 64 kg de material injetado, e a rugosidade superficial pode variar entre 0,4 μm à 3,2 μm , dependendo do acabamento superficial do molde (matriz).

As peças produzidas no processo de fundição sob pressão são atualmente vistas como componentes de engenharia inovadora, que possibilitam redução de custos em processos posteriores e redução de peso. Dentre os processos de fundição de alumínio, a fundição sob pressão é o processo mais utilizado globalmente,

contabilizando cerca de 70% da produção de peças fundidas em alumínio (APELIAM e MAKHLOUF, 2006).

3.2.2 Vantagens e desvantagens

As principais vantagens apresentadas na utilização do processo de fundição sob pressão são (ASM, 1998):

- Excelente acabamento superficial;
- Obtenção de peças com espessura de parede muito fina;
- Elevada produtividade;
- Na maioria dos casos não é necessária a realização de tratamentos térmicos;
- Geralmente a resistência à fadiga das peças injetadas é superior do que a das peças que sofreram outros processos;
- A perda de material é muito baixa, podendo os canais de alimentação serem reutilizados, bem como as rebarbas provenientes do cisalhamento das peças;
- Em determinados casos, pode-se dispensar o uso de etapas de acabamento, como rebarbação ou usinagem.

As principais desvantagens na utilização do processo de fundição sob pressão são (ASM, 1998):

- Elevado custo dos equipamentos e ferramental;
- Não permite o processamento de diversos materiais (como aço e ferro fundido);
- Limitações nas dimensões máximas ou na geometria (complexidade) das peças.

Os metais mais utilizados na fundição sob pressão são as ligas de alumínio, zinco, magnésio e algumas ligas de cobre, sendo as ligas de alumínio as mais utilizadas dentre todas citadas, seguida das ligas de zinco.

A liga utilizada na fundição sob pressão na empresa de Motores Elétricos Ltda é liga de alumínio 305 modificado, sendo fundido a uma temperatura de 700 °C à 915 °C e com uma potência aproximada de 400 KW. Vale destacar que, em média, são

consumidos 0,795 KW por tonelada, sendo que na empresa de Motores Elétricos Ltda, em média, são fundidas 450 toneladas de alumínio por mês.

3.2.3 Etapas do processo

No processo de injeção de alumínio sob pressão na empresa de Motores Elétricos Ltda, têm-se como operações básicas de processo de fundição as etapas:

- Fechamento do molde;
- Vazamento do metal líquido;
- Acionamento da primeira fase de velocidade de injeção;
- Acionamento da segunda fase de velocidade de injeção;
- Acionamento da terceira fase de velocidade de injeção;
- Aplicação da pressão de recalque;
- Abertura do molde.

3.2.4 Projeto e confecção do modelo

No projeto de uma peça a ser fundida já se analisa a capacidade dessa peça de suportar esforços sem se deformar ou romper, de suportar as variações de temperatura, de permitir o fluxo adequado de líquidos e gases, enfim, de cumprir sua futura função com eficiência. Toda essa análise é feita sem ter que se construir uma peça real. A fabricação só será aprovada quando estas análises concluírem que a peça funcionará adequadamente (COSTA, 2000).

Nesta fase de projeto, outros aspectos, como por exemplo, a geometria da peça, são consideradas a fim de facilitar sua extração do molde. Outro ponto a ser analisado é a localização adequada dos canais de vazamento e distribuição do metal de modo que se propicie um enchimento correto do molde. As sobre medidas também são consideradas na fabricação do modelo, para que a peça, ao contrair durante o resfriamento, chegue ao seu tamanho correto. O modelo tem um formato aproximado da peça a ser fundida e irá servir para a construção do molde. Ele pode ser feito de madeira, alumínio, aço, resina plástica e até isopor (COSTA, 2000).

3.2.5 Confeção dos moldes e machos

O molde é o dispositivo no qual o metal fundido é injetado para que se obtenha a peça desejada. Ele representa uma cavidade com o formato da peça a ser fundida.

O molde permanente utilizado no processo de injeção de alumínio sob pressão na empresa de Motores Elétricos Ltda é constituído de aço P20 (aço ferramenta) e de aço H13 (matrizes), além de conter tratamento termoquímico de nitretação. Seguem abaixo fotos do lado fixo e do lado móvel do molde:



Figura 2 – Molde (Lado Fixo – Câmara fria)



Figura 3 – Molde (Lado Fixo – Câmara fria)



Figura 4 – Molde (Lado móvel – Câmara fria)



Figura 5 – Molde (Lado móvel – Câmara fria)

O macho corresponde às cavidades que são necessárias nas peças fundidas (principalmente orifícios). Sua função no molde é, ao contrário do modelo em si, formar uma seção cheia onde o metal não penetrará, de modo que a peça apresente um vazio naquela região (DEMARCHI, 2008).

3.2.6 Fusão e vazamento do metal líquido para dentro dos moldes

O robô enche, com metal líquido, um pequeno cadinho preso em sua garra e o derrama dentro do injetor da máquina. Em seguida, os passos da sequência de injeção serão executados por meio do Controlador Lógico Programável (CLP). Após

o término do ciclo de injeção, o mesmo robô, utilizando-se de outro tipo de ferramenta, pode retirar a peça injetada e a deposita numa esteira (COSTA, 2000).

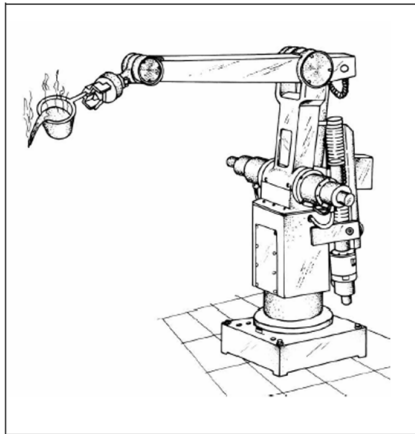


Figura 6 – O robô enchendo, com metal líquido, um pequeno cadinho (Adaptado de Costa 2000)

3.2.7 Desmoldagem e acabamento da peça fundida

Finalmente, após o tempo de resfriamento, as matrizes são abertas e as peças retiradas. O processo que normalmente não é automático consiste na colocação das peças a serem rebarbadas dentro de um recipiente rotativo: o tambor. Quando este tambor gira, as peças em seu interior chocam-se contra suas paredes e umas contra as outras. As rebarbas são retiradas pelo impacto e pelo atrito resultantes (COSTA, 2000).

3.2.8 Sistemas de injeção

O processo é dividido em dois tipos de acordo com o sistema de injeção utilizado: câmara quente ou fria (MALAVAZI, 2005).

A princípio, o processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara quente utiliza um equipamento no qual existe um recipiente aquecido onde o metal líquido está depositado. No seu interior está um pistão hidráulico que, ao descer, força o metal líquido a entrar em um canal que leva diretamente à matriz. A pressão exercida pelo pistão faz com que todas as cavidades da matriz sejam preenchidas,

formando-se assim a peça. Após a solidificação do metal, o pistão retorna à sua posição inicial, mais metal líquido entra na câmara, por meio de um orifício, e o processo se reinicia. Uma representação esquemática desse equipamento é mostrada abaixo, na Figura 7:

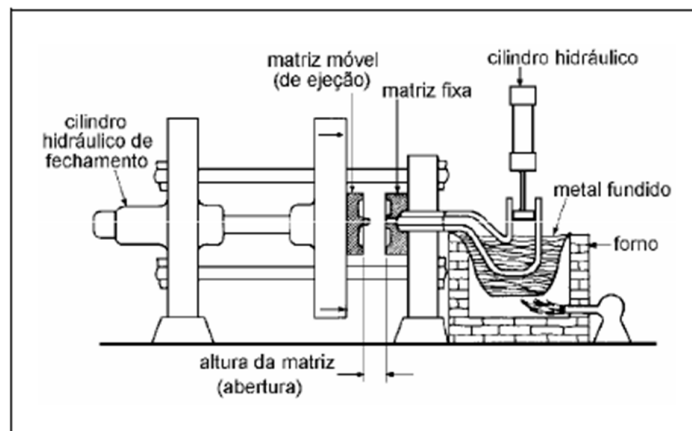


Figura 7 – Processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara quente (Adaptado de Costa 2000)

Essa máquina é dotada de duas mesas: uma fixa e outra móvel. Na mesa fixa ficam uma das metades da matriz e o sistema de injeção do metal. Na mesa móvel localizam-se a outra metade da matriz, o sistema de extração da peça e o sistema de abertura, fechamento e travamento da máquina. Ela é usada quando o metal líquido se funde a uma temperatura que não corrói o material do cilindro e do pistão de injeção, de modo que ambos possam ficar em contato direto com o banho de metal (COSTA, 2000).

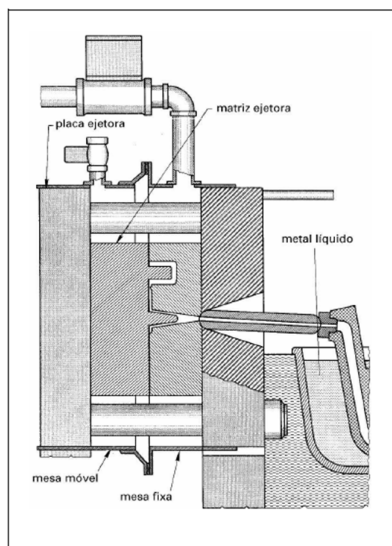


Figura 8 – Esquema da máquina de injeção – Mesa fixa e mesa móvel (Adaptado de Costa 2000)

Se a liga se funde a uma temperatura mais alta, o que prejudicaria o sistema de bombeamento (cilindro e pistão), usa-se a máquina de fundição sob pressão de câmara fria, empregada principalmente para fundir ligas de alumínio, magnésio e cobre. O princípio de funcionamento desse equipamento é o mesmo. A diferença é que o forno que contém o metal líquido é uma unidade independente, de modo que o sistema de injeção não fica dentro do banho de metal (COSTA, 2000).

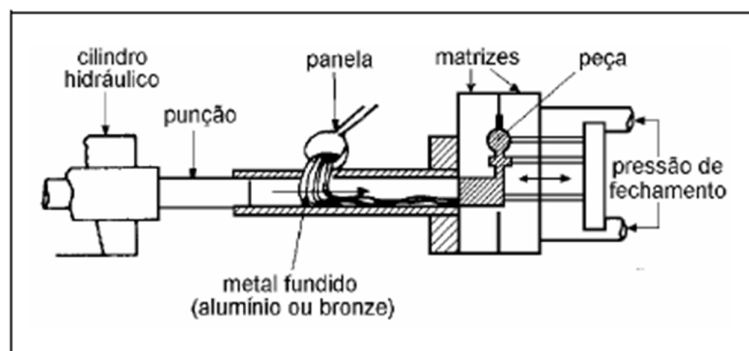


Figura 9 – Processo de fundição sob pressão realizado na máquina de câmara fria (Adaptado de Costa 2000)

O sistema utilizado no processo de injeção de alumínio sob pressão na empresa de Motores Elétricos Ltda é de câmara fria.

3.2.9 Parâmetros que influenciam o processo

O processo de fundição sob pressão é regido por uma série de parâmetros, que adequadamente determinados e ajustados, resultam em uma peça injetada de qualidade (KARBAN, 2001).

3.2.9.1 Tempo de enchimento da matriz

O tempo de enchimento da matriz deve ser tal que garanta o completo enchimento sem que ocorra a solidificação prematura da frente metálica. Portanto, visando também à otimização do processo, deve se estabelecer os menores tempos possíveis de enchimento. O tempo de enchimento do molde é um parâmetro importante na determinação de outros parâmetros como o tamanho da câmara de injeção, velocidades do pistão de injeção e tamanho dos canais de ataque (KARBAN, 2001; GP SYRCOS 2002).

3.2.9.2 Velocidades de injeção

3.2.9.2.1 Velocidade de primeira fase de injeção

A velocidade da primeira fase é a velocidade do pistão quando o mesmo se avança para posicionar o alumínio no canal de ataque, preparando a injetora para o disparo (Figura 10). Normalmente esta velocidade fica em torno de 0,10 m/s a 1,0 m/s. (GARBER, 1980; KARNI, 1991; TZENG, 1992).

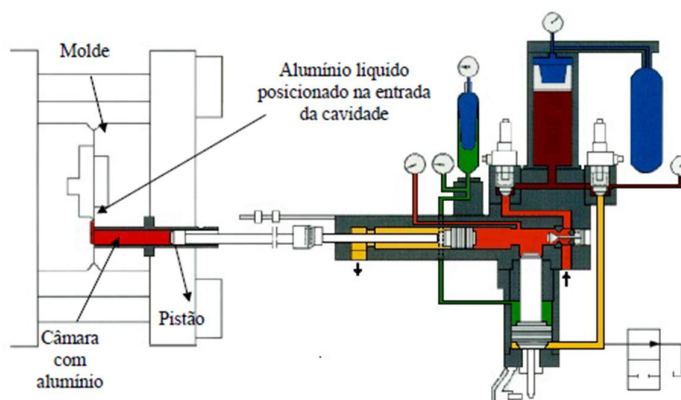


Figura 10 – Pistão avançado de maneira a posicionar o alumínio na primeira fase da injeção (Mendes, 2005)

3.2.9.2.2 Velocidade de segunda fase de injeção

É a velocidade da fase responsável pelo preenchimento da peça. Esta fase determina o tempo de enchimento da peça (Figura 11) e a velocidade no canal de ataque. Velocidades muito baixas da segunda fase podem resultar em falhas de preenchimento e solda fria. Velocidades muito altas podem resultar em porosidades na peça injetada. (KARBAN, 2001; GP SYRCOS 2002).

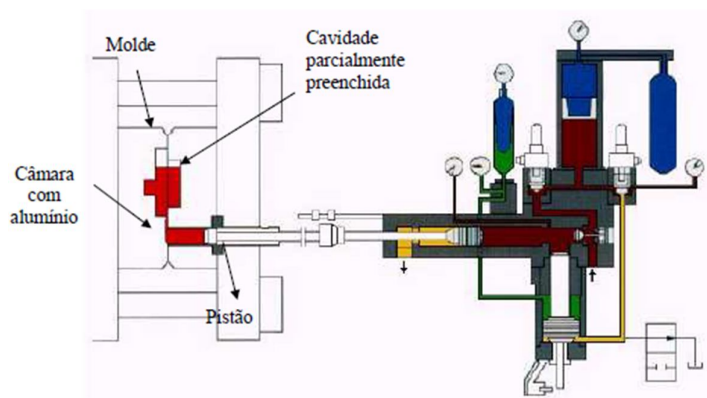


Figura 11 – Pistão se movendo para preencher o alumínio na cavidade do molde, segunda fase de injeção (Mendes, 2005)

3.2.9.2.3 Velocidade de terceira fase de injeção

A terceira fase determina a força de injeção da máquina e a pressão específica de injeção, é responsável pela compactação final do metal injetado imediatamente após a segunda fase de injeção, compensando a contração de metal, diminuindo a ocorrência de porosidades. É utilizada em peças com paredes grossas e que sejam alimentadas por canais generosos a fim de permitir a transmissão de pressão. Geralmente a terceira fase é empregada em peças que exigem estanqueidade, ou seja, com dificuldade de fluir (UFPR, 2007).

3.2.9.3 Pontos de comutação

A posição do pistão no momento do acionamento da segunda e da terceira fase de velocidade também é fundamental para o preenchimento adequado da peça. Temos como efeitos deste parâmetro a ocorrência de porosidade ou solda fria. Caso o

acionamento se inicie antes do ponto de comutação (local onde ocorre mudança de velocidade), o metal se posicionará antes do canal de ataque podendo resultar e aprisionamento de gases (porosidade) e, caso se iniciar além do ponto de comutação, o metal líquido entrará na cavidade antecipadamente podendo prejudicar o preenchimento do molde (solda fria) (MENDES, 2005).

3.2.9.4 Pressão de recalque

É a pressão específica aplicada no cilindro de injeção após o preenchimento da peça, pressão esta responsável pela compactação da peça durante a solidificação, impedindo assim a expansão dos gases nela aprisionados e diminuindo a formação de rechupes devido à contração do metal. Caso ocorra demora na aplicação da pressão da terceira fase, o metal no canal já terá solidificado, resultando na formação de porosidade e rechupes (SAVAGE, 2001).

3.2.10 Alumínio

O alumínio é um metal que possui excelente combinação de propriedades úteis resultando numa adequabilidade técnica para um campo extraordinário de aplicações em engenharia, podendo ser facilmente transformado, através de todos processos metalúrgicos normais, sendo assim viável à indústria manufatureira em qualquer forma que seja requerida. As atividades de pesquisa desenvolvidas pela própria indústria do alumínio, pelos laboratórios acadêmicos e pelos seus usuários têm levado a um maior conhecimento das características de engenharia deste metal, além do que técnicas de fabricação, de soldagem e de acabamento têm sido desenvolvidas, fazendo com que o alumínio seja considerado um material que não apresenta dificuldade nas suas aplicações (ABAL, 2007).

3.2.10.1 Vantagens

De acordo com GGD Metals (2016), as vantagens da utilização do alumínio são:

- Excelentes propriedades de usinagem (alta velocidade de corte, tempo de usinagem muito mais curto, menor desgaste, maior vida útil às ferramentas de corte e boa resistente à corrosão);
- Baixo peso (A densidade do alumínio equivale a 1/3 do peso do aço);
- Alta condutividade térmica (quatro vezes maior do que a do aço, reduz a formação de tensões residuais internas);
- Alta condutividade elétrica (dez vezes maior que a do aço, permite a usinagem do alumínio por erosão).

3.2.10.2 Classificação

As ligas com base em alumínio não-ligado contêm entre 99,0% e 99,5% de alumínio, sendo o restante, principalmente, ferro e silício. Pode-se obter metal com pureza maior do que 99,5% de alumínio, até 99,99%, a um custo muito mais elevado, que é usado quando se requer alta condutividade elétrica ou elevada resistência à corrosão (ABAL, 2007).

3.2.10.2.1 Ligas trabalhadas

Uma liga muito utilizada (3003) contém 1,2% de manganês. Suas propriedades, principalmente a conformabilidade e a resistência à corrosão, são similares às do alumínio comercialmente puro, com propriedades mecânicas um pouco maiores, particularmente quando deformadas a frio. As mais resistentes são as ligas da série alumínio-magnésio, disponíveis em vários formatos como lâminas, chapas, perfis, tubos, arames, etc. Elas também possuem elevada resistência à corrosão e são facilmente produzidas e soldadas. As ligas tratadas termicamente de média resistência, que contêm magnésio e silício, possuem elevada resistência à corrosão, mas perdem um pouco da sua trabalhabilidade. As ligas tratadas termicamente de elevada resistência, que contêm cobre ou zinco como principais elementos de liga, são tão resistentes quanto o aço estrutural, mas necessitam de proteção superficial. Estas ligas são utilizadas quando a maior relação resistência/peso for a principal

consideração, como na aviação. A tabela a seguir resume as mais importantes ligas de alumínio trabalháveis (ABAL, 2007).

3.2.10.2.2 Ligas para fundição

Diferentemente dos materiais trabalháveis, os quais estão sujeitos às variações dos processos de aquecimento e de resfriamento, as ligas de fundição adquirem suas propriedades na condição de fundida (em alguns casos com tratamento térmico) e, conseqüentemente, um grupo diferente de ligas tem sido formulado para a produção de peças fundidas. As ligas empregadas nas aplicações gerais de engenharia frequentemente contêm silício para melhorar suas características de fundição, tais como, fluidez, quando do vazamento, e resistência a trincas de contração, quando o metal quente se solidifica e se contrai. O cobre também é frequentemente utilizado como um elemento de liga, para proporcionar às propriedades mecânicas maiores dureza e resistência exigidas em serviço. As ligas alumínio-magnésio apresentam maiores problemas na fundição, mas possuem boa resistência e ductilidade, sendo amplamente utilizadas, particularmente em ambientes agressivos. Uma pequena proporção de magnésio também está presente em algumas ligas em conjunto com silício para tornar a liga mais suscetível a tratamentos térmicos (ABAL, 2007).

3.2.10.3 Aplicação

De acordo com GGD Metals (2016), o alumínio pode ser empregado nas seguintes áreas:

- Indústria Bélica;
- Trocadores de Calor;
- Moldes e Matrizes de PET, PP, PVC e ABS;
- Moldes de protótipos;
- Ferramentas;
- Meios de Transporte (como elementos estruturais em aviões, barcos, automóveis, bicicletas, tanques, blindagens e outros);
- Embalagens: Papel de alumínio, latas, embalagens Tetra Pak e outras;
- Construção civil: Janelas, portas, divisórias, grades e outros;

- Bens de uso: Utensílios de cozinha, ferramentas e outros;
- Transmissão elétrica: Ainda que a condutibilidade elétrica do alumínio seja 60% menor que a do cobre, o seu uso em redes de transmissão elétricas é compensado pelo seu menor custo e densidade, permitindo maior distância entre as torres de transmissão;
- Recipientes criogênicos até -200°C .

3.2.10.4 Propriedades mecânicas

3.2.10.4.1 Limite de resistência à tração

O limite de resistência à tração é a máxima tensão que o material resiste antes de ocorrer sua ruptura. O limite de resistência à tração do alumínio puro recozido é aproximadamente 48 MPa (4,9 kgf/mm²). Vale ressaltar que, este valor aumenta em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível) (ABAL, 2007).

3.2.10.4.2 Limite de escoamento

O limite de escoamento é a tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento original medido em um corpo-de-prova normal. É importante definir este grau de deformação permanente porque as ligas de alumínio não possuem um limite de escoamento tão pronunciado como a maioria dos aços. O limite de escoamento do alumínio puro recozido é aproximadamente 12,7 MPa (1,3 kgf/mm²). O trabalho a frio e o tratamento térmico aumentam o limite de escoamento mais rapidamente do que a resistência à tração final (ABAL, 2007).

3.2.10.4.3 Alongamento

O alongamento é expresso em porcentagem relativamente ao comprimento original medido em um corpo-de-prova normal e é calculado através da diferença de comprimentos medidos entre os pontos de referência, antes e após o ensaio de tração. O alongamento é a indicação da ductilidade, a qual é relativamente menor

para um corpo-de-prova mais fino do que para um mais espesso da mesma liga, sendo, portanto, necessário associar o alongamento com a espessura do corpo-de-prova (ABAL, 2007).

3.2.10.4.4 Dureza

A dureza de um metal é definida como a medida da sua resistência à penetração. Existem várias maneiras de se determinar a dureza, sendo as mais comuns a Brinell, a Vickers e a Rockwell. Todos os ensaios de dureza são empíricos, ainda que existam tabelas indicativas da relação entre as várias escalas de dureza, a “equivalência” de valores deve ser usada com reserva. Mais importante ainda é o fato de que não existe relação direta entre o valor de dureza e as propriedades mecânicas das várias ligas de alumínio. Os elementos de liga aumentam em muito a resistência do alumínio, assim como o tratamento térmico e o endurecimento pelo trabalho a frio, porém a dureza é significativamente mais baixa do que a maioria dos aços (ABAL, 2007).

3.2.10.4.5 Tensão de fadiga

Quando uma tensão oscilante é aplicada por um número suficiente de vezes, embora possa ser bem inferior ao limite de resistência à tração do material, através de uma carga estática, o metal pode estar sujeito à falha por fadiga. Em muitas ligas de alumínio não há um limite inferior de tensão abaixo do qual a fadiga nunca possa ocorrer, mas quanto menor a tensão maior o número de ciclos necessário para produzir falha. O limite de resistência à fadiga para testes normais é da ordem de 50 milhões de inversão de tensão e pode variar de 25% a 50% da tensão de ruptura conforme a liga (ABAL, 2007).

3.2.10.4.6 Propriedades em temperaturas elevadas

O alumínio puro funde a 660°C e várias ligas possuem ponto de fusão abaixo deste. O metal puro e muitas das ligas perdem um pouco da sua resistência, ficando sujeitas a uma lenta deformação plástica conhecida como fluência, se permanecer sob tensão por longos períodos em temperaturas acima de 200°C. Entretanto, ligas

desenvolvidas para serviços em altas temperaturas, tais como aquelas usadas em pistões, retêm suas propriedades adequadamente, funcionando satisfatoriamente dentro da faixa de temperatura de trabalho requerida (ABAL, 2007).

3.2.10.4.7 Propriedades em baixas temperaturas

Ao contrário do aço doce, o alumínio não se torna frágil em temperaturas abaixo de zero e na realidade sua resistência aumenta sem perder a ductilidade. Esta é a característica que leva uma liga de alumínio-magnésio ser escolhida na construção de tanques soldados para armazenar gás metano liquefeito, em temperaturas de -160°C (ABAL, 2007).

3.2.11 Fundição sob pressão de alumínio

O processo de injeção de alumínio possibilita alta produtividade e produção seriada. Partes injetadas tipicamente possuem boas resistências e ductilidade, elevada qualidade, formas complexas, com exatidão dimensionais e detalhes superficiais, requerem pouca ou nenhuma usinagem ou retrabalho (MOURA, 2006).

3.2.12 Problemas na injeção de alumínio

Defeitos internos em peças fundidas podem não ser visíveis ao olho nu, entretanto comprometem seriamente a usinabilidade e a funcionalidade da peça. Defeitos como porosidades internas diminuem as propriedades mecânicas e a estanqueidade da peça, propriedades estas que devem obedecer a critérios de projetos, principalmente em projetos de alta responsabilidade (CUNHA, 2012).

3.2.12.1 Porosidade

Porosidades são vazios que se localizam nas partes internas do produto injetado. Estas porosidades provocam descontinuidades de material no produto diminuindo a resistência mecânica e também favorecendo a ocorrência de trincas quando em uso. Além disso, podem provocar vazamentos em componentes hidráulicos comprometendo o funcionamento do conjunto (ASM, 1998).

Originada devido ao aprisionamento de ar (causado por turbulência do material em regiões críticas) durante o enchimento e solidificação, ou também devido a decomposições de lubrificantes ou desmoldantes. Este defeito pode prejudicar processos posteriores, como soldagem e usinagem (ASM, 1998).

A porosidade também pode ser causada pelo hidrogênio, que possui elevada solubilidade no alumínio líquido, mas muito baixa no metal solidificado. O hidrogênio é único gás consideravelmente solúvel no alumínio líquido. Devido a afinidade do metal pelo oxigênio, a principal fonte de absorção de hidrogênio é a redução do vapor de água do ar ambiente em contato com o banho de metal líquido. (ASM, 1998).

Para se eliminar este inconveniente, pode-se utilizar sais desgaseificantes, em desuso devida à baixa eficácia e toxicidade, ou borbulhamento de nitrogênio no metal fundido, de elevada eficácia (MOURA, 2006)

A forma mais efetiva de remoção do hidrogênio é pelo controle do tamanho das bolhas introduzidas no metal. Este controle é obtido pela introdução de um eixo rotativo com um eixo perfurado na ponta que é o responsável pela fragmentação das bolhas durante a injeção do gás distribuindo-o uniformemente pelo fundo da panela. Esta situação permite a remoção mais eficiente do hidrogênio e até de partículas sólidas (óxidos, resíduos de refratários, etc.) contribuindo inclusive para aumentar a fluidez do alumínio. Na fundição sob pressão, estas partículas promovem o desgaste prematuro dos moldes de injeção principalmente nos canais de alimentação e componentes próximos (ASM, 1998).

3.2.12.2 Rechupe

Origina-se devido à contração do material, geralmente na região que se solidifica por último. Sua ocorrência está associada às transferências de calor no molde e como se dá a alimentação da cavidade. Ocorre principalmente em regiões de maior espessura, após a solidificação dos canais de entrada que, portanto, não tem como compensar esta contração de solidificação (MOURA, 2006).

3.2.12.3 Solda fria

Forma-se devido ao encontro de diversas frentes de metal líquido que não se fundem em função da baixa temperatura. Solda fria é o encontro de diversas frentes de metal líquido que não se fundem em função da baixa temperatura. A solda fria diminui a resistência mecânica do produto, agindo como um gerador de trincas. Esta ocorrência está associada à entrada de material que, dividida, provoca duas ou mais correntes de fluxo na mesma direção gerando zonas de baixa pressão entre elas com intensas camadas de óxidos e portanto, de difícil junção (MOURA, 2006).

3.2.12.4 Trincas

São descontinuidades no que comprometem sua utilização posterior. As trincas são provocadas, geralmente, por movimentação de partes móveis do molde durante sua abertura ou extração do produto e também estão associadas a outros defeitos, o que é mais comum e de fácil solução, desde que o operador esteja atento observando os sinais durante a extração do produto (ruídos, aspecto superficial do produto, aspecto superficial do molde e machos) (WEG, 2012).

3.2.12.5 Oxidação e/ou Manchamento

A oxidação e/ou manchamento de peças injetadas pode ocorrer devido a variáveis do processo ou ambiente. Geralmente são apenas problemas estéticos que não comprometem a integridade da peça (MOURA, 2006).

Durante o processo de injeção é aplicado desmoldante para facilitar a extração das peças do molde. Caso a composição ou modo de aplicação esteja fora do padrão, pode ocorrer comprometimento estético da peça (MOURA, 2006).

Os desmoldantes geralmente são diluídos em água para sua aplicação, e é neste ponto onde pode ocorrer contaminação caso a água esteja fora dos padrões. Durante a aplicação deve-se tomar cuidado com o tempo e regiões de aplicação, pois caso contrário existiram heterogeneidades de temperatura do molde e

espessura da camada de desmoldante aplicada. Esses fatores influenciam no acabamento superficial das peças e vida útil do molde (MOURA, 2006).

Quando a produção é elevada, geralmente as células de injeção são automatizadas com robôs, tanques de resfriamento e cisalhadores. Os robôs são utilizados para manipular as peças e também podem aplicar desmoldante no molde. Como são programados, superam a produtividade humana, caso não tenham muita manutenção (MOURA, 2006).

Tanques de resfriamento são utilizados pra diminuir a temperatura das peças para que sejam retirados os excessos de material, tais como bolsas de ar e canais de alimentação. Quando o resfriamento é realizado em água, deve-se cuidar para que não exista contaminantes ou compostos que possam atacar o alumínio e comprometer sua aparência (MOURA, 2006).

Se as peças estiverem à temperatura elevada, podem deformar ou até trincarem durante a operação de cisalhamento (MOURA, 2006).

4. METODOLOGIA

O Departamento de Controle de Qualidade atua como área de apoio da fábrica para controlar, auditar e propor melhorias no processo de produção. A realização do controle de qualidade nas indústrias é de extrema importância para que a qualidade, segurança, eficácia e a credibilidade dos seus produtos sejam asseguradas junto à população ou clientes que irá consumir (ROCHA e GALENDE, 2014).

O controle atual dos centros de trabalho restringe-se ao apontamento manual da produção diária total e de refugo, acompanhado de uma opcional descrição da causa que ocasionou a não-qualidade (Tabela 1). A análise dos dados é feita de forma pontual pelos técnicos de fábrica juntamente com os responsáveis pelo controle de qualidade, semanalmente e mensalmente, até que se obtenha novamente o controle do processo, vide Gráfico 1 e Gráfico 2, abaixo:

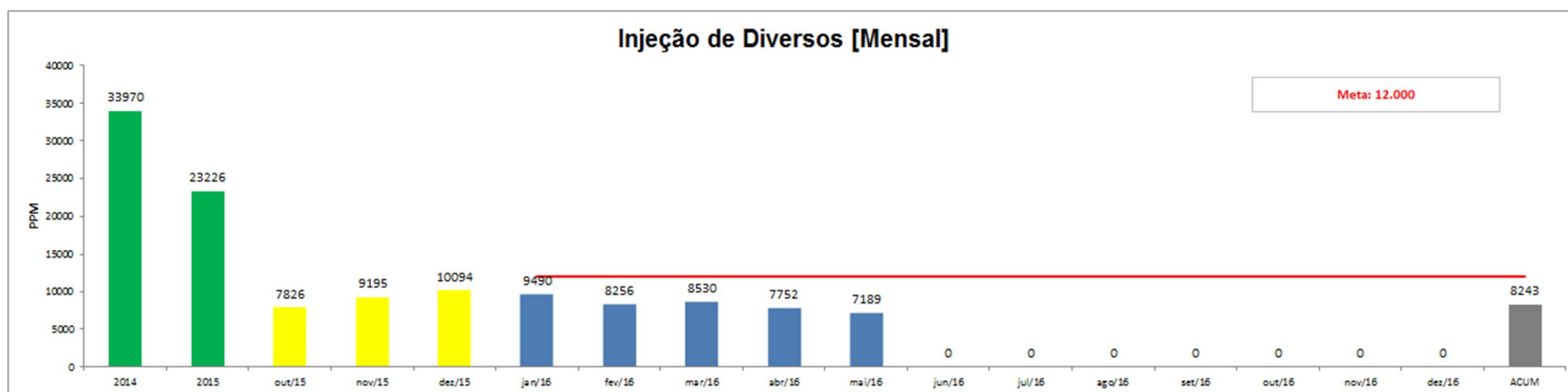


Gráfico 1 – Número de refugos mensais (em PPM)

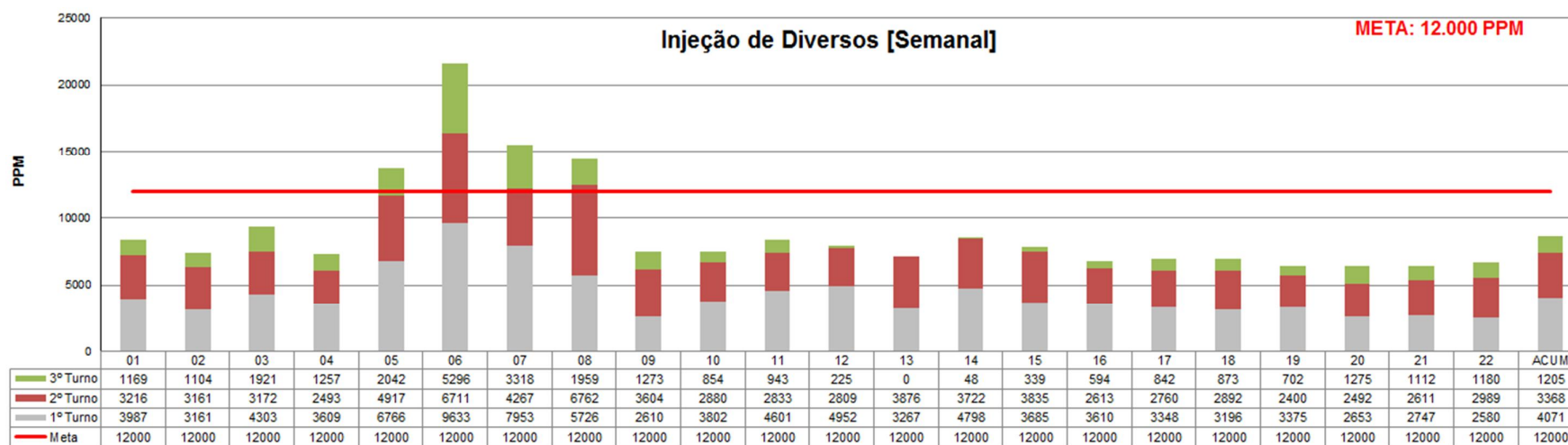


Gráfico 2 – Número de refugos semanais (em PPM)

Principais defeitos apresentados na semana de análise

Descrição do defeito	Quantidade	%
ACABAMENTO/ASPECTO-PECA INCOMPLETA – TAMPA	457	26%
ACABAMENTO-PECA INCOMPLETA – TAMPA	317	18%
ACABAMENTO/ASPECTO-SOLDA FRIA – TAMPA	301	17%
PROCESSO/PARAMETRO-REFUGO PROCESSO - TAMPA	164	9%
ACABAMENTO-TRINCADO – TAMPA	101	6%
ASPECTO-SOLDA FRIA – TAMPA	91	5%
ACABAMENTO/ASPECTO-TRINCADO/RACHADO - TAMPA	75	4%
ACABAMENTO/ASPECTO-EMPENADO/ONDULADO - TAMPA	69	4%
ACABAMENTO/ASPECTO-AMASSADO/BATIDO - CARCACA INJ SEM PES	30	2%
ACABAMENTO-PECA INCOMPLETA - CARCACA INJ SEM PES	30	2%
ACABAMENTO/ASPECTO-MANCHADO – TAMPA	27	7%

Tabela 1 – Descrição das causas de refugos

Nos processos de fabricação industriais, existem vários parâmetros com diferentes níveis de ajustes, que podem influenciar as características finais dos produtos. Para se obter informações sobre os processos de fabricação, normalmente se utilizam procedimentos práticos, com o objetivo de determinar os parâmetros necessários para a obtenção de um produto com qualidade (COLEMAN, 1993; MONTEGOMERY, 1991).

Planejamento de experimentos são empregados para resolver problemas de fabricação, decidir entre diferentes processos de manufatura, diferentes conceitos de produto e entender a influência de determinados fatores. Além disso, esta tarefa torna-se cada vez mais importante medida que se intensifica a base tecnológica dos produtos e as exigências governamentais e dos clientes aumentando a necessidade do emprego de experimentos durante todas as etapas do ciclo de vida do produto. (TAHARA, 2008)

Um dos programas utilizados para reduzir de maneira contínua a variabilidade nos processos de produção, de maneira a eliminar os defeitos ou falhas nos produtos e serviços é a metodologia Seis Sigma: uma prática de gestão, que visa melhorar a rentabilidade das empresas, aumentar a participação de mercado e diminuir custos e otimizar as operações. A aplicação desse programa acontece com o auxílio de

várias ferramentas para a identificação, análise e solução dos problemas, com acentuado embasamento na coleta e tratamento de dados, e com suporte estatístico. (ANDRIETTA e MIGUEL, 2006)

Foi proposta para este projeto a utilização de uma metodologia de Design of Experiments (DOE) com o objetivo principal de verificar a influência dos principais parâmetros de injeção sobre a qualidade final do produto injetado no processo de produção de toda empresa de Motores Elétricos Ltda.

4.1 Caracterização do problema e definição do objetivo do experimento

Através da inspeção visual, é possível identificar defeitos comumente encontrados no processo de fundição sob pressão:

4.1.1 Defeitos apresentados ao final do processo de produção

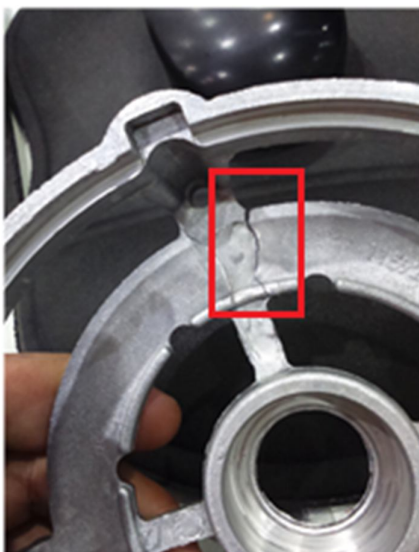


Figura 12 – Peça com presença de trinca (provocada no momento de cisalhamento)

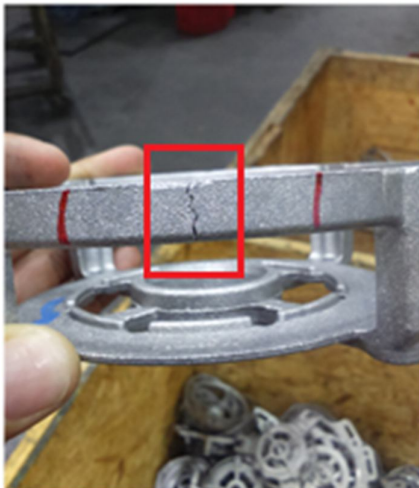


Figura 13 – Peça com presença de trinca (provocada no momento de cisalhamento)



Figura 14 – Peça com presença de rachadura (provocada no momento de extração do molde)



Figura 15 – Peça com presença de rachadura (provocada no momento de extração do molde)

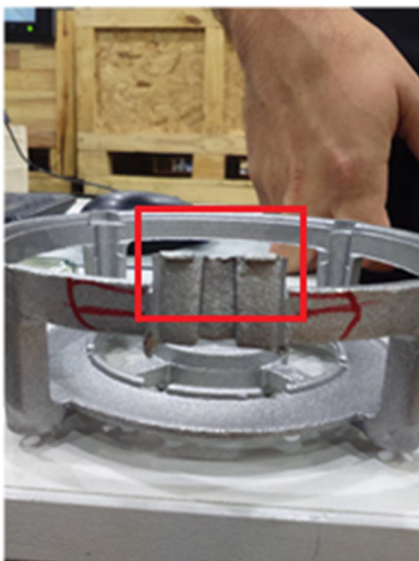


Figura 16 – Peça com rebarba (provocada pelo molde ou no momento de cisalhamento)

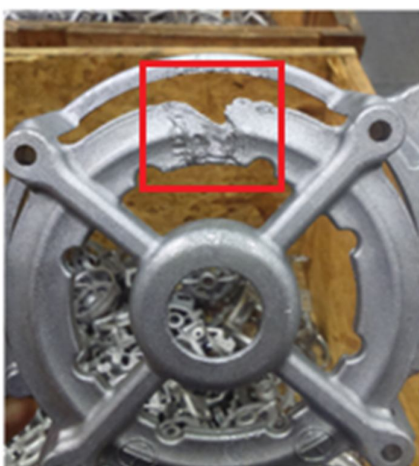


Figura 17 – Peça com falha de injeção (provocada retenção de alumínio no molde)



Figura 18 – Peça com falha de injeção (provocada por porosidade)

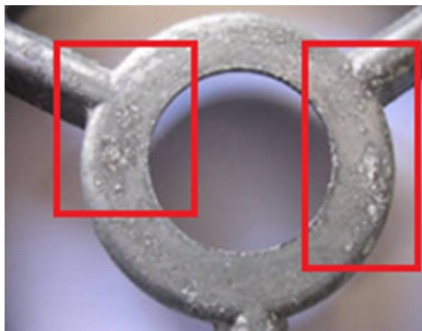


Figura 19 – Peça refugada por oxidação e com manchamento

4.1.2 Escolha dos parâmetros de influência e níveis

O processo de injeção sob pressão é regido por uma série de parâmetros, que adequadamente determinados e ajustados, resultam em uma peça injetada de qualidade. Normalmente, as principais variáveis controladas são a temperatura do molde, volume de dosagem, velocidades de primeira e segunda fase de injeção, pontos de comutação, pressões de injeção, recalque bem como a qualidade metalúrgica, composição química e temperatura do alumínio líquido (MENDES, 2006)

Tagushi (1993), afirma que os fatores que regem o processo de fundição sob pressão podem ser ajustados em diferentes níveis de intensidade, existindo algumas combinações dos mesmos que podem resultar na robustez do processo de fabricação.

Baseado no processo produtivo foi utilizado o diagrama de causa e efeito para a determinação dos parâmetros a serem considerados no planejamento de experimentos (Figura 20). Este diagrama foi utilizado para levantar todos os parâmetros do processo de injeção sob pressão de alumínio, que podem influenciar na qualidade da peça injetada. Esse procedimento foi utilizado para discutir os parâmetros durante os “braisntormig” realizados com os técnicos envolvidos no processo de fabricação da empresa (ISHIKAWA, 1976).

Baseado no estudo realizado por Syrcos (2001), aos parâmetros de injeção pode ser subdivididos em quatro categorias:

- Parâmetros relacionados com a injetora;

- Parâmetros relacionados com a câmara de injeção;
- Parâmetros relacionados com a matriz de injeção;
- Parâmetros relacionados com o metal líquido.

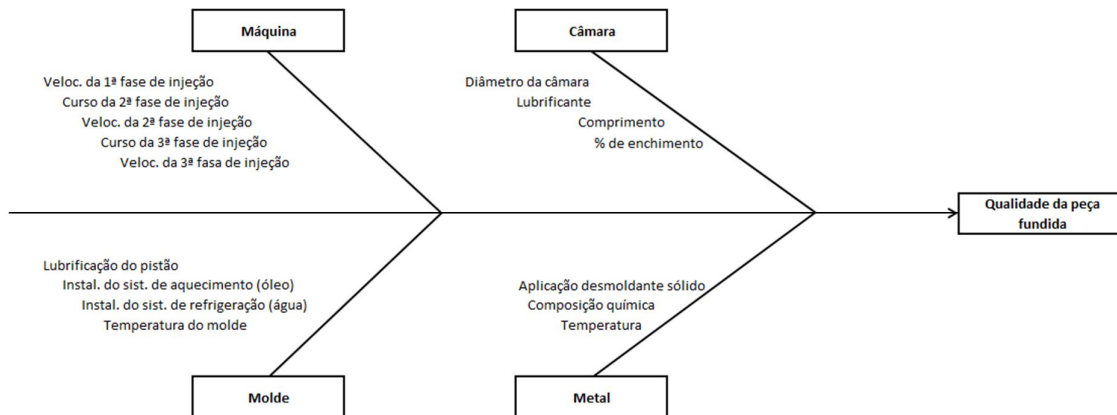


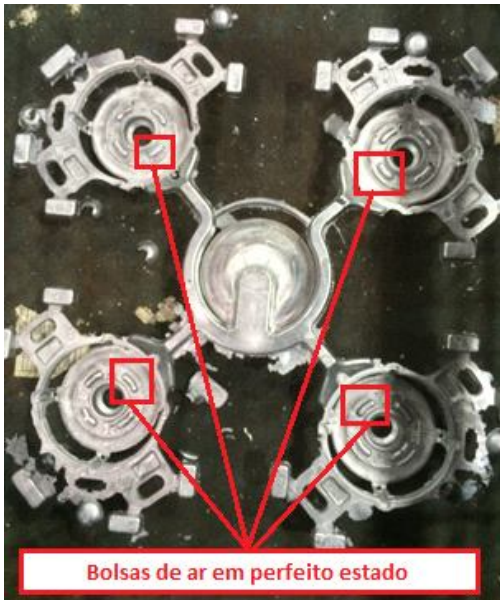
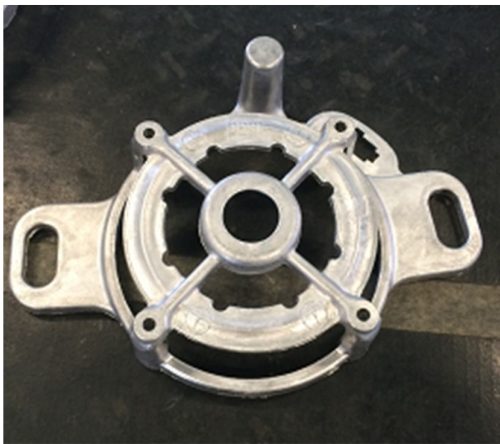
Figura 20 – Diagrama de causa e efeito

4.1.3 Seleção dos fatores de controle e das variáveis de saída

Para avaliação da sanidade e qualidade das peças deve-se realizar uma inspeção visual de toda região superficial da peça avaliando a ocorrência de possíveis trincas, rachaduras, rebarbas ou falhas de injeção (principais motivos de refugo das peças produzidas) classificando-as em três níveis, (como apresentado na Tabela 2 em conjuntos com as Figuras 21 a 26):

- Nível 1 – Sem algum tipo de falha de injeção e/ou bolsas de ar;
- Nível 2 – Pouca presença de falhas de injeção e/ou falhas nas bolsas de ar;
- Nível 3 – Grande presença de falhas de injeção e/ou falhas/ausência de bolsas de ar.

Exemplos de classificação quanto aos critérios definidos

Foto	Classificação
 Bolsas de ar em perfeito estado Figura 21 – Bolsas de ar em perfeito estado	Nível 1 – Sem algum tipo de falha de injeção e/ou bolsas de ar
 Figura 22 – Peça (sem imperfeições)	

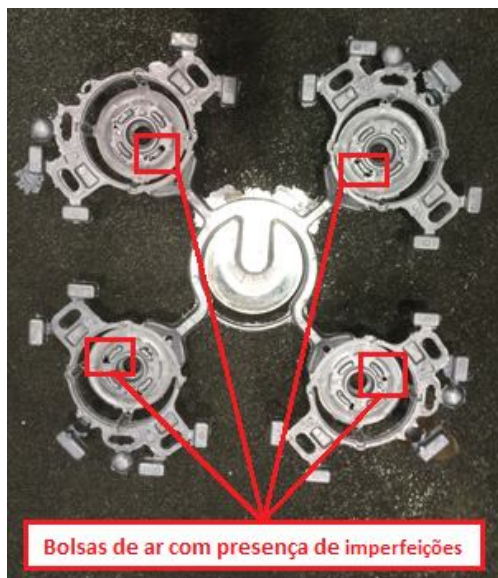


Figura 23 – Bolsas de ar em com presença de imperfeições

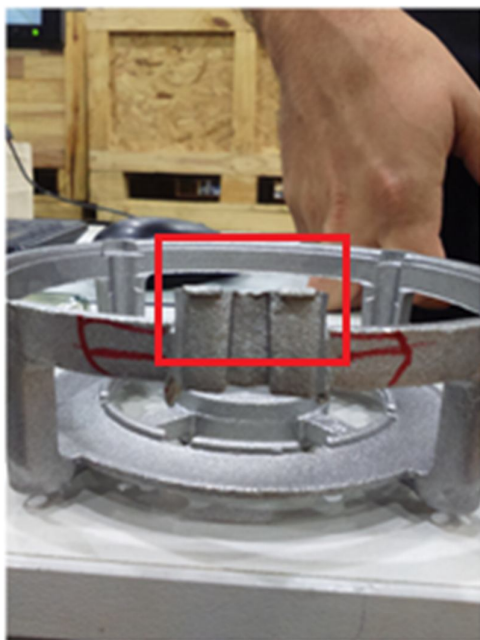


Figura 24 – Peça com rebarba

Nível 2 – Pouca
presença de falhas de
injeção e/ou falhas nas
bolsas de ar;

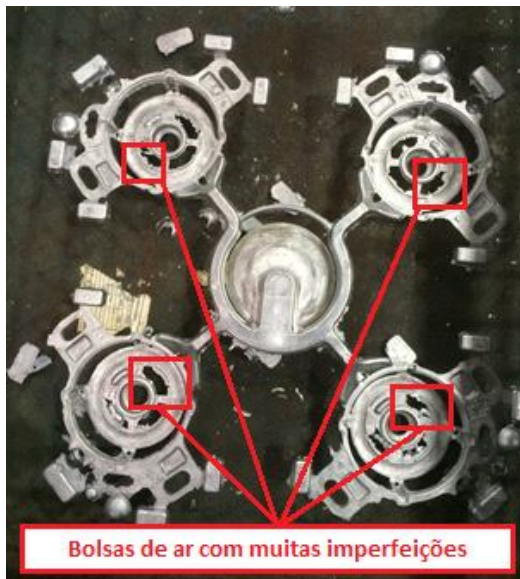


Figura 25 – Bolsas de ar com muitas imperfeições

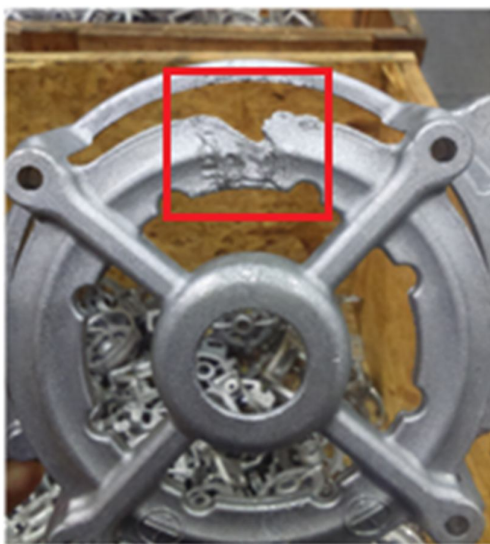


Figura 26 – Peça com falha de injeção

Nível 3 – Grande presença de falhas de injeção e/ou falhas/ausência de bolsas de ar.

4.2 Determinação da matriz experimental

4.2.1 Fluxograma experimental

O experimento, seguindo o processo normal de manufatura da peça avaliada no estudo, foi realizado na célula de injeção composta por uma máquina injetora (especificações técnicas contidas no ANEXO A), um forno de indução, uma prensa de cisalhamento e sistemas automáticos de aplicação de desmoldante. Vale destacar que o metal líquido foi vazado na câmara de injeção pelo operador com o auxílio de uma concha.

As etapas do ciclo de fabricação da peça podem ser descritas conforme a seguinte sequência:

1. Recebimento dos lingotes de alumínio;



Figura 27 – Lingotes de alumínio

2. Fusão do metal (alumínio);



Figura 28 – Preparação para fusão do alumínio

3. Alimentação do forno de indução com alumínio;



Figura 29 – Forno de indução

4. Pré-aquecimento antes de fundir o alumínio para evitar a umidade (evitando o risco de explosão);

5. Fundição do alumínio;



Figura 30 – Fundição do alumínio

6. Retirada do alumínio do forno através da utilização do cadinho de transporte;



Figura 31 – Alumínio sendo retirado do forno através do cadinho de transporte

7. Transporte do alumínio;



Figura 32 – Transporte do alumínio retirado do forno

8. Vazamento do alumínio na câmara de injeção;

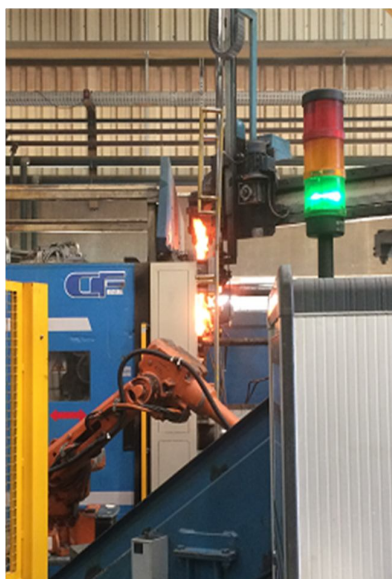


Figura 33 – Vazamento do alumínio

9. Acionamento da injetora para executar o avanço do pistão de injeção;

10. Aplicação do desmoldante (características do desmoldante aplicado vide ANEXO B) nas cavidades do molde e acionado o fechamento dos moldes na injetora;



Figura 34 – Aplicação do desmoldante

11. Abertura dos moldes e retirada das galhas (peça molde) de dentro do molde através do braço robô;



Figura 35 – Abertura dos moldes para futura retirada das galhas

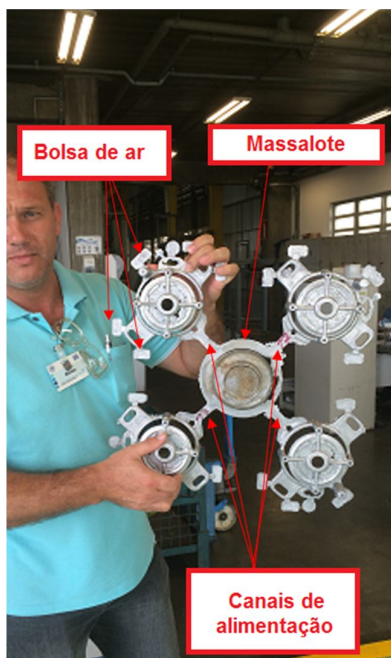


Figura 36 – Galhas e seus componentes

12. Transporte (através do braço-robô) da galha para os sensores onde será conferido o número de peças;



Figura 37 – Transporte da galha para os sensores



Figura 38 – Verificação por parte dos sensores

13. Resfriamento da galha no tanque de resfriamento e agarramento da galha anterior (que já se encontra resfriada);



Figura 39 – Resfriamento da galha no tanque de resfriamento



Figura 40 – Refrigeração da galha retirada

14. Posicionamento da galha resfriada no equipamento de cisalhamento para separar as peças e retirar os massalotes;



Figura 41 – Posicionamento da galha para separação das peças e retirada dos massalotes

15. Rebarbação (caso se faça necessária);

16. Conferência visual (por parte do operador);



Figura 42 – Conferência visual

17. Armazenamento das peças na grade.



Figura 43 – Armazenamento das peças



Figura 44 – Peça (sem imperfeições) ao término do processo de produção

4.2.2 Sequência de tarefas executadas ao longo do ciclo durante o experimento

1. Elaboração do Mapa de Raciocínio;
2. Elaboração do Mapa de Processo;
3. Elaboração do Mapa de Produto;
4. Ajuste da combinação de parâmetros desejada;
5. Execução da sequência de disparos para cada combinação de fatores de controle;
6. Análise dos resultados DOE I;
7. Novo ajuste da combinação de parâmetros desejada;
8. Execução da sequência de disparos para cada combinação de fatores de controle;
9. Análise dos resultados DOE II.

4.2.2.1 Elaboração do Mapa de Raciocínio

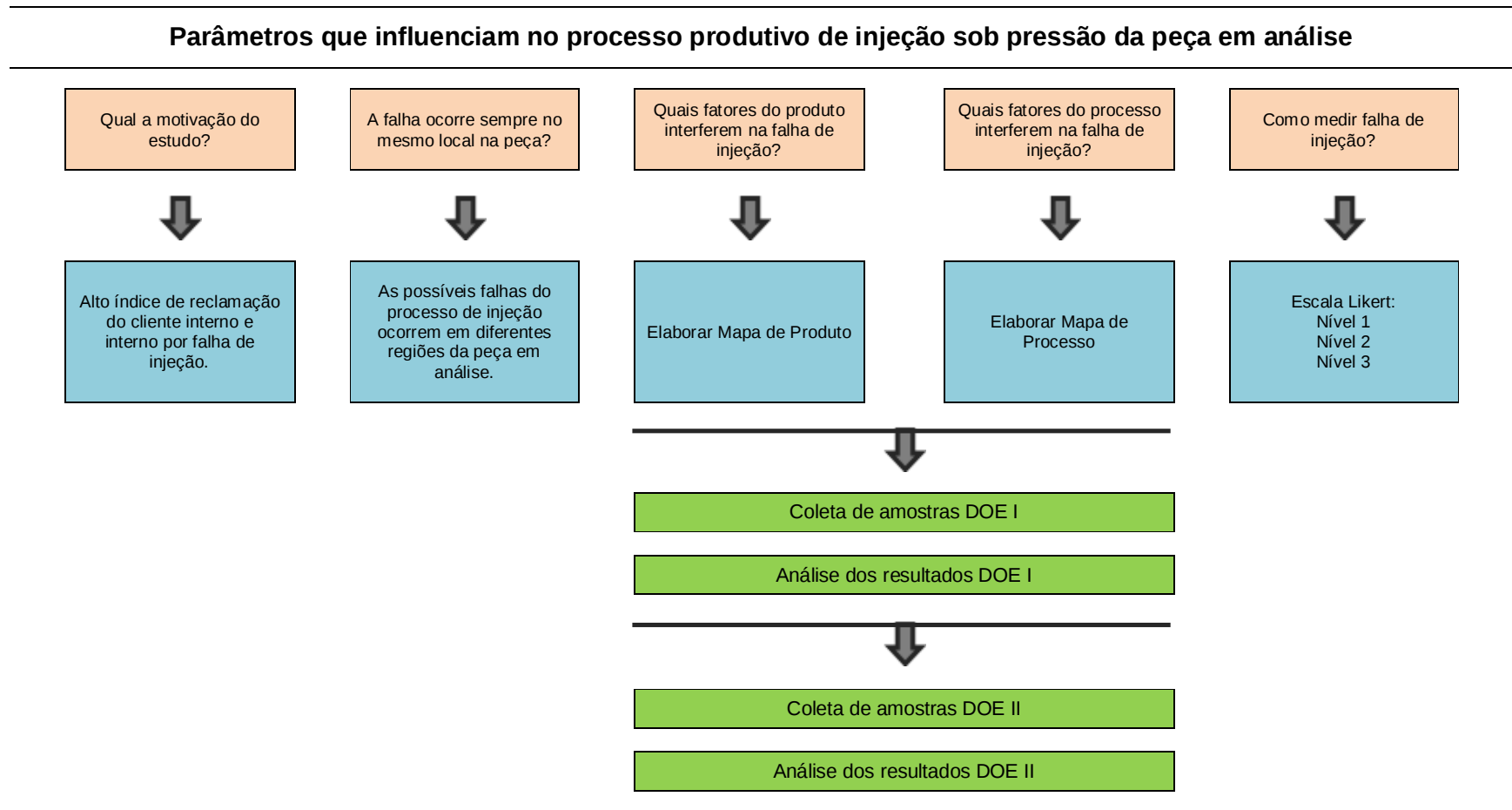


Tabela 3 – Mapa de Raciocínio

4.2.2.2 Elaboração do Mapa de Processo

1	Fundir alumínio
Variáveis independentes (X's)	
X1	Sinterização do forno (Controle da temperatura)
X2	Abastecer com lingote de alumínio
X3	Atingir temperatura de especificação

2	Transporte do alumínio
Variáveis independentes (X's)	
X1	Aplicação de pasta anti-soldante na concha
X2	Aquecimento da concha
X3	Mergulho da concha
X4	Angulo para dosagem
X5	Velocidade de transporte forno X máquina
X6	Angulo para derramamento

3	Preparação do pistão de injeção
Variáveis independentes (X's)	
X1	Instalação do sistema de refrigeração
X2	Instalação do pistão de injeção compatível com a câmara
X3	Instalação e definição do angulo da câmara de injeção
X4	Posicionar e regular quantidade de lubrificante sólido

4	Preparação do molde
Variáveis independentes (X's)	
X1	Fixação das haste extratoras do molde
X2	Fixação do molde
X3	Fixação das travas na hastes extratoras
X4	Instalação do sistema de resfriamento (água)
X5	Instalação do sistema de aquecimento (óleo)
X6	Regulagem de fechamento do molde

5	Parâmetros de injeção
Variáveis independentes (X's)	
X1	Velocidade de 1ª fase de injeção
X2	Curso de 2ª fase de injeção
X3	Velocidade de 2ª fase de injeção
X4	Curso de 3ª fase de injeção
X5	Velocidade de 3ª fase de injeção
X6	Parada espessura maçalote
X7	Velocidade espessura maçalote
X8	Velocidade de retorno do cilindro
X9	Fim de injeção
X10	Atraso do retorno de injeção
X11	Pressão de contraste

6	Regulagem do robô
Variáveis independentes (X's)	
X1	Injetar peça
X2	Regular pontos de acordo com o modelo da galhada
X3	Regulagem de aplicação de desmoldante (tempo)

7	Início do ciclo
Variáveis independentes (X's)	
X1	Injetar peça
X2	Parada programada para aplicação de anti-solda (graxa)

X12	Velocidade de multiplicação
X13	Velocidade de intervenção
X14	Valor de intervenção
X15	Tempo de esfriamento
X16	Abertura do molde
X17	Início da baixa pressão
X18	Baixa pressão
X19	Início de estiramento
X20	Estiramento

Tabela 4 – Mapa de Processo

4.2.2.3 Elaboração do Mapa de Produto

1	Matriz de injeção (extração)	2	Molde de injeção	3	Bolsa de ar
 Figura 45 – Matriz de injeção		 Figura 46 – Molde de injeção		 Figura 47 – Bolsa de ar	
Variáveis independentes (X's)		Variáveis independentes (X's)		Variáveis independentes (X's)	
X1	Bolsa de ar amassada (presa)	X1	Fechamento de matrizes	X1	Rebaixo com espessura 0,03 mm a 0,05 mm
X2	Saída de gás amassada	X2	Refrigeração do molde (água e óleo)		
X3	Fechamento de matrizes				

Tabela 5 – Mapa de Produto

4.2.2.4 Experimento fatorial (DOE)

O estudo realizado tem como base o experimento fatorial, que por sua vez, testa todas as combinações possíveis de fatores em um determinado numero de níveis. Os experimentos fatoriais permitem estimar os efeitos dos fatores e os efeitos das interações simultaneamente com igual precisão (WEG, 2010).

Os experimentos realizados no experimento fatorial são chamados de experimentos 2^n , onde n é o numero de variáveis e 2 é o numero de níveis nos quais as variáveis são testadas (WEG, 2010).

Estes experimentos são de interesse particular por que eles fornecem uma grande gama de informações. Contudo, a quantidade de recursos necessária para se executar experimentos fatoriais completos podem ser grandes. Experimentos fatoriais completos são eficazes quando usados na hora certa na estratégia de melhoria do processo como um todo (WEG, 2010).

Detalhes sobre experimentos fatoriais completos:

- 2^n , onde 2 = níveis & n = nº de fatores.
- Fácil de planejar e analisar.
- Pode avaliar fatores quantitativos e qualitativos.
- Balanceado.
- Útil para quantificar interações.

O código usado para estes experimentos será:

“-“= nível baixo de um fator.

“+“= nível alto de um fator.

Usar a designação + ou – será importante no entendimento de como os experimentos são gerados.

Exemplo 1: Experimento 2^2

- 2 fatores em 2 níveis (Tempo-A, Temperatura-B).
- 4 rodadas no mínimo (2×2).
- 2 colunas de fator.

	A	B
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Tabela 6 – Experimento 2^2

1. Faça uma estimativa do efeito de A, B e da interação (AB).
2. A coluna AB (para análise) pode ser criada ao se manipular as colunas A e B.

	A	x	B	=	AB
1	-	x	-	=	+
2	+	x	-	=	-
3	-	x	+	=	-
4	+	x	+	=	+

Tabela 7 – Experimento 2^2 (Análise)

Observe que todas as colunas são diferentes.

Para um experimento de 2^3 , os efeitos possíveis de se estimar são A, B, C, AB, AC, BC e ABC. Somente as colunas contendo os fatores A, B & C são manipulados. Ao se manipular os fatores desta forma, pode-se obter informações sobre os efeitos de interação. Para cada padrão único de – ou +, uma estimativa pode ser feita do fator ou fatores que possam ter contribuído para o efeito. Para um experimento de 8 rodadas, 7 padrões únicos de – ou + pode ser criados. Os diferentes padrões são criados multiplicando-se as colunas de efeito principal apropriada (e.x. AC é criada multiplicando a coluna A pela coluna C. Portanto, 7 efeitos podem ser separados. Uma vez que os efeitos de fator são separados, eles podem ser comparados e analisados.

Exemplo de interação em 3 níveis:

A	B	C	Y	AB	AC	BC	ABC
1	1	1	12	+	+	+	+
1	1	-1	7	+	-	-	-
1	-1	1	2	-	+	-	-
1	-1	-1	15	-	-	+	+
-1	1	1	12	-	-	+	-
-1	1	-1	6	-	+	-	+
-1	-1	1	3	+	-	-	+
-1	-1	-1	15	+	+	+	-

Tabela 8 – Experimento 2³

A+	$(12+7+2+15)/4 = 9$	$(A+) - (A-) =$	0
A-	$(12+6+3+15)/4 = 9$		
B+	$(12+7+12+6)/4 = 9,25$	$(B+) - (B-) =$	0,5
B-	$(2+15+3+15)/4 = 8,75$		
C+	$(12+2+12+3)/4 = 7,25$	$(C+) - (C-) =$	-3,5
C-	$(7+15+6+15)/4 = 10,75$		
AB+	$(12+7+3+15)/4 = 9,25$	$(AB+) - (AB-) =$	0,5
AB-	$(2+15+12+6)/4 = 8,75$		
AC+	$(12+2+6+15)/4 = 8,75$	$(AC+) - (AC-) =$	-0,5
AC-	$(7+15+12+3)/4 = 9,25$		
BC+	$(12+15+12+15)/4 = 13,5$	$(BC+) - (BC-) =$	9
BC-	$(7+2+6+3)/4 = 4,5$		
ABC+	$(12+15+6+3)/4 = 9$	$(ABC+) - (ABC-) =$	0
ABC-	$(7+2+12+15)/4 = 9$		

Tabela 9 – Experimento 2³ (Análise)

4.2.2.5 Ajuste da combinação de parâmetros desejada DOE I

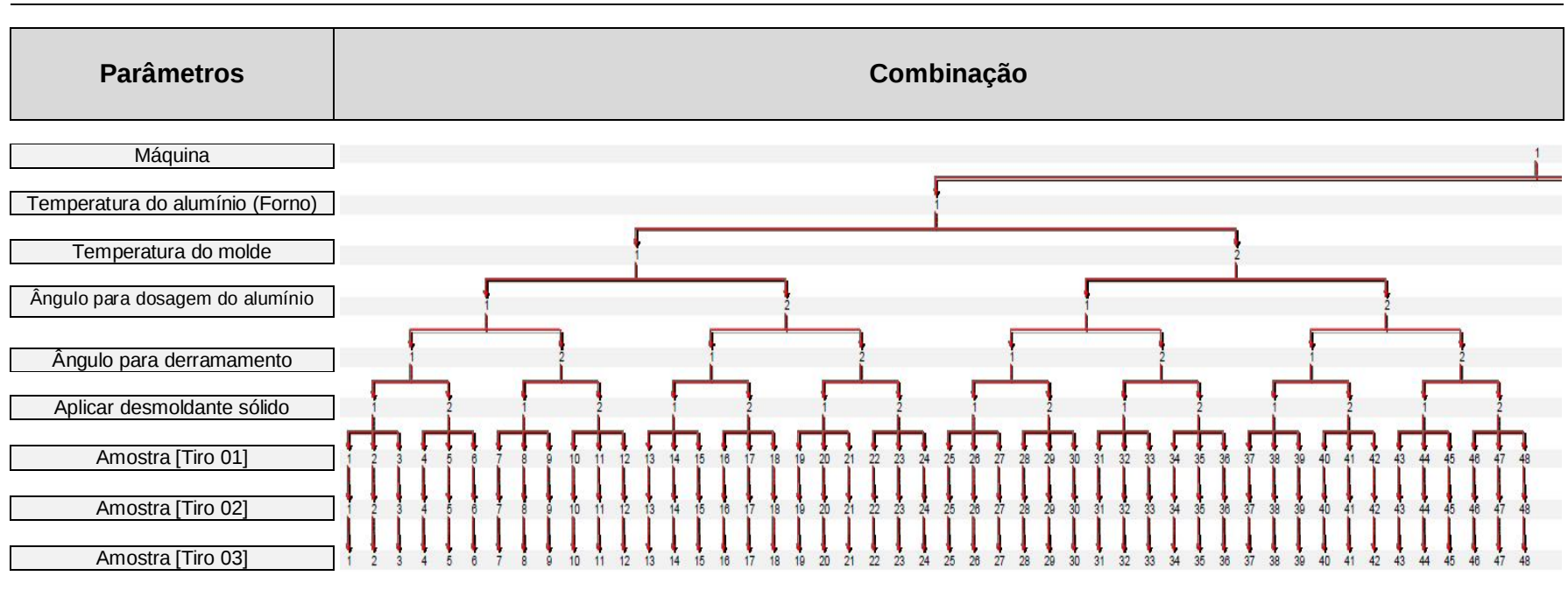


Tabela 10 – Combinação de parâmetros para realização do DOE I (Parte 01)

Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método Taguchi – Combinação de parâmetros I

Parâmetros							Classificação
Máquina	Amostra	Temperatura do alumínio	Temperatura do molde	Ângulo para dosagem do alumínio	Ângulo para derramamento do alumínio	Aplicar desmoldante sólido	-
1	1	1	1	1	1	1	-
1	2	1	1	1	1	1	-
1	3	1	1	1	1	1	-
1	4	1	1	1	1	2	-
1	5	1	1	1	1	2	-
1	6	1	1	1	1	2	-
1	7	1	1	1	2	1	-
1	8	1	1	1	2	1	-
1	9	1	1	1	2	1	-
1	10	1	1	1	2	2	-
1	11	1	1	1	2	2	-
1	12	1	1	1	2	2	-
1	13	1	1	2	1	1	-
1	14	1	1	2	1	1	-
1	15	1	1	2	1	1	-
1	16	1	1	2	1	2	-
1	17	1	1	2	1	2	-
1	18	1	1	2	1	2	-
1	19	1	1	2	2	1	-
1	20	1	1	2	2	1	-

1	21	1	1	2	2	1	-
1	22	1	1	2	2	2	-
1	23	1	1	2	2	2	-
1	24	1	1	2	2	2	-
1	25	1	2	1	1	1	-
1	26	1	2	1	1	1	-
1	27	1	2	1	1	1	-
1	28	1	2	1	1	2	-
1	29	1	2	1	1	2	-
1	30	1	2	1	1	2	-
1	31	1	2	1	2	1	-
1	32	1	2	1	2	1	-
1	33	1	2	1	2	1	-
1	34	1	2	1	2	2	-
1	35	1	2	1	2	2	-
1	36	1	2	1	2	2	-
1	37	1	2	2	1	1	-
1	38	1	2	2	1	1	-
1	39	1	2	2	1	1	-
1	40	1	2	2	1	2	-
1	41	1	2	2	1	2	-
1	42	1	2	2	1	2	-
1	43	1	2	2	2	1	-
1	44	1	2	2	2	1	-
1	45	1	2	2	2	1	-
1	46	1	2	2	2	2	-
1	47	1	2	2	2	2	-
1	48	1	2	2	2	2	-
1	49	2	1	1	1	1	-
1	50	2	1	1	1	1	-
1	51	2	1	1	1	1	-
1	52	2	1	1	1	2	-

1	53	2	1	1	1	2	-
1	54	2	1	1	1	2	-
1	55	2	1	1	2	1	-
1	56	2	1	1	2	1	-
1	57	2	1	1	2	1	-
1	58	2	1	1	2	2	-
1	59	2	1	1	2	2	-
1	60	2	1	1	2	2	-
1	61	2	1	2	1	1	-
1	62	2	1	2	1	1	-
1	63	2	1	2	1	1	-
1	64	2	1	2	1	2	-
1	65	2	1	2	1	2	-
1	66	2	1	2	1	2	-
1	67	2	1	2	2	1	-
1	68	2	1	2	2	1	-
1	69	2	1	2	2	1	-
1	70	2	1	2	2	2	-
1	71	2	1	2	2	2	-
1	72	2	1	2	2	2	-
1	73	2	2	1	1	1	-
1	74	2	2	1	1	1	-
1	75	2	2	1	1	1	-
1	76	2	2	1	1	2	-
1	77	2	2	1	1	2	-
1	78	2	2	1	1	2	-
1	79	2	2	1	2	1	-
1	80	2	2	1	2	1	-
1	81	2	2	1	2	1	-
1	82	2	2	1	2	2	-
1	83	2	2	1	2	2	-
1	84	2	2	1	2	2	-

1	85	2	2	2	1	1	-
1	86	2	2	2	1	1	-
1	87	2	2	2	1	1	-
1	88	2	2	2	1	2	-
1	89	2	2	2	1	2	-
1	90	2	2	2	1	2	-
1	91	2	2	2	2	1	-
1	92	2	2	2	2	1	-
1	93	2	2	2	2	1	-
1	94	2	2	2	2	2	-
1	95	2	2	2	2	2	-
1	96	2	2	2	2	2	-

Tabela 12 – Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método Taguchi – Combinação de parâmetros I

4.2.2.6 Ajuste da combinação de parâmetros desejada DOE II

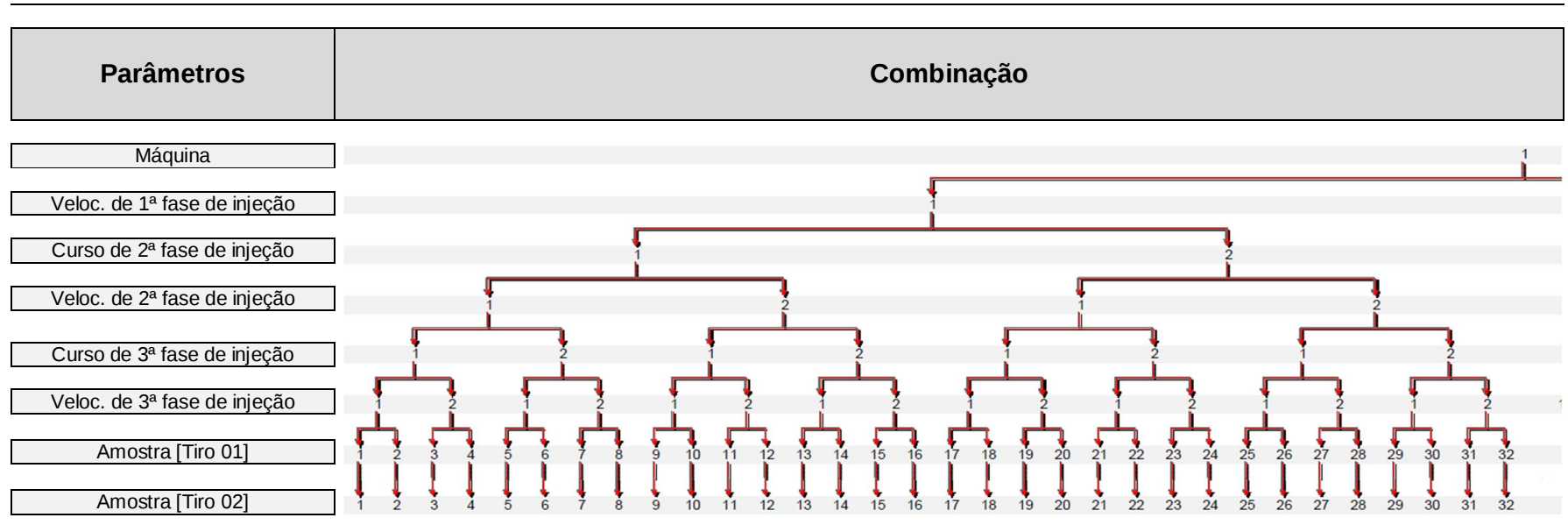


Tabela 13 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II (Parte 01)

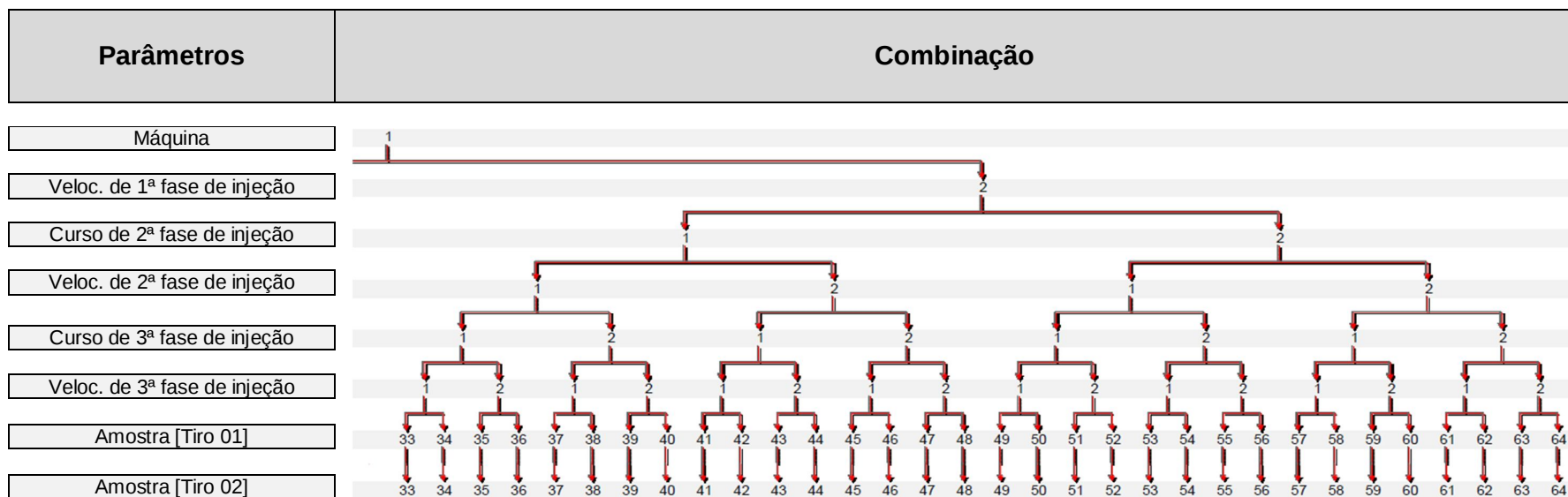


Tabela 14 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II (Parte 02)

Otimização do processo de fundição sob pressão aplicando o método Taguchi – Combinação de parâmetros II

Parâmetros							Classificação		
Máquina	Amostra	Veloc. de 1ª fase de injeção	Curso de 2ª fase de injeção	Veloc. de 2ª fase de injeção	Curso de 3ª fase de injeção	Veloc. de 3ª fase de injeção	Avaliador 1	Avaliador 2	Avaliador 3
1	1	1	1	1	1	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	2	1	1	1	1	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	3	1	1	1	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	4	1	1	1	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 2
1	5	1	1	1	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	6	1	1	1	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	7	1	1	1	2	2	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	8	1	1	1	2	2	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	9	1	1	2	1	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	10	1	1	2	1	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	11	1	1	2	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	12	1	1	2	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	13	1	1	2	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	14	1	1	2	2	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	15	1	1	2	2	2	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	16	1	1	2	2	2	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	17	1	2	1	1	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	18	1	2	1	1	1	Nível 3	Nível 1	Nível 2
1	19	1	2	1	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	20	1	2	1	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2

1	21	1	2	1	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	22	1	2	1	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	23	1	2	1	2	2	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	24	1	2	1	2	2	Nível 2	Nível 2	Nível 2
1	25	1	2	2	1	1	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	26	1	2	2	1	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	27	1	2	2	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	28	1	2	2	1	2	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	29	1	2	2	2	1	Nível 3	Nível 2	Nível 3
1	30	1	2	2	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	31	1	2	2	2	2	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	32	1	2	2	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 2
1	33	2	1	1	1	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	34	2	1	1	1	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	35	2	1	1	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 2
1	36	2	1	1	1	2	Nível 1	Nível 2	Nível 2
1	37	2	1	1	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	38	2	1	1	2	1	Nível 1	Nível 1	Nível 2
1	39	2	1	1	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 2
1	40	2	1	1	2	2	Nível 1	Nível 1	Nível 2
1	41	2	1	2	1	1	Nível 3	Nível 2	Nível 2
1	42	2	1	2	1	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	43	2	1	2	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1
1	44	2	1	2	1	2	Nível 2	Nível 1	Nível 2
1	45	2	1	2	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	46	2	1	2	2	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	47	2	1	2	2	2	Nível 2	Nível 2	Nível 2
1	48	2	1	2	2	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1
1	49	2	2	1	1	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	50	2	2	1	1	1	Nível 2	Nível 3	Nível 2
1	51	2	2	1	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1
1	52	2	2	1	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1

1	53	2	2	1	2	1	Nível 1	Nível 2	Nível 1
1	54	2	2	1	2	1	Nível 1	Nível 2	Nível 1
1	55	2	2	1	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 1
1	56	2	2	1	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 1
1	57	2	2	2	1	1	Nível 2	Nível 2	Nível 2
1	58	2	2	2	1	1	Nível 3	Nível 3	Nível 2
1	59	2	2	2	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1
1	60	2	2	2	1	2	Nível 1	Nível 1	Nível 1
1	61	2	2	2	2	1	Nível 3	Nível 3	Nível 3
1	62	2	2	2	2	1	Nível 1	Nível 2	Nível 1
1	63	2	2	2	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 2
1	64	2	2	2	2	2	Nível 1	Nível 2	Nível 1

Tabela 15 – Combinação de parâmetros para realização do DOE II

Contudo, antes prosseguirmos com a análise, devemos investigar (através do software JMP) se as amostras coletadas e os resultados da avaliação eram válidos para o prosseguimento da análise e vale destacar que foi considerada a ausência de erros sistemáticos em todo o processo.

Para cada configuração dos parâmetros foram avaliadas duas amostras. Estas duas amostras foram avaliadas por três avaliadores, sendo que a variação do resultado da avaliação dos avaliadores não pode ser maior do que a variação dos modelos.

A variação do modelo tem que ser maior do que a variação das medidas, caso contrário, teremos o que chamamos de “ruído” (que por sua vez não é controlado e faz com que o processo varie). Neste caso, teríamos resultados diferentes para um mesmo tratamento, e variando os parâmetros não haveria diferença no resultado final da avaliação.

O número de vezes que a variação do modelo é maior do que a variação das medidas citado acima foi calculado e obteve-se 0,0001. Desta forma, a variação do nosso modelo é 6,8407 vezes maior que a variação de erros dos avaliadores, permitindo a continuação da análise (vide Figura 48) abaixo:



Figura 48 – Relação Variação do modelo vs. Variação das medidas

O próximo passo é calcular o “efeito” (grau de importância de uma variável ou uma combinação de variável no meu processo para eu obter peça boa ou ruim) do experimento.

Exemplo de cálculo do “efeito” de um experimento qualquer:

1º passo: para cada amostra têm-se uma nota (1, 2 ou 3) atribuída por cada um dos avaliadores, como mostrado na Tabela 12:

Avaliador	Nota
A1	1
A2	2
A3	1

Tabela 16 – Exemplo para cálculo do “Efeito”

Faz-se, então, a média aritmética das notas, obtendo-se: 1,3333.

2º passo: após o cálculo de todas as médias, teremos o resultado médio da avaliação é estimado. Após o feito, deve-se obter outra média, que calcularemos utilizando um parâmetro na condição de trabalho mínima, sem se importar com a configuração dos outros parâmetros e, também, utilizando o mesmo parâmetro na condição de trabalho máxima, sem se importar com a configuração dos outros parâmetros. Sendo assim, obtêm-se uma média de trabalho com o parâmetro na condição mínima e outra média de trabalho com o parâmetro na condição máxima.

3º passo: cálculo do efeito – o cálculo do efeito é dado pela média aritmética da subtração da média obtida trabalhando-se com o parâmetro na condição máxima pela média obtida trabalhando-se com o parâmetro na condição mínima.

Estimativa dos parâmetros					
Parâmetro	Efeito na resposta	Desvio padrão	Relação t		Probabilidade de significância
X5	-0,364583	0,053136	-6,86		<,0001*
X1	-0,302083	0,053136	-5,69		<,0001*
X1*X4	-0,135417	0,053136	-2,55		0,0141*
X4*X5	0,1145833	0,053136	2,16		0,0361*
X4	0,1145833	0,053136	2,16		0,0361*
X1*X2	-0,072917	0,053136	-1,37		0,1764
X1*X5	-0,072917	0,053136	-1,37		0,1764
X2	-0,052083	0,053136	-0,98		0,3319
X2*X4	-0,052083	0,053136	-0,98		0,3319
X1*X3	0,0416667	0,053136	0,78		0,4368
X2*X3	0,0416667	0,053136	0,78		0,4368
X3	0,0208333	0,053136	0,39		0,6967
X3*X4	-0,020833	0,053136	-0,39		0,6967
X3*X5	-0,020833	0,053136	-0,39		0,6967
X2*X5	-0,010417	0,053136	-0,20		0,8454

Figura 49 – Cálculo do “Efeito”

Como brevemente explicado anteriormente, a linha na cor azul presente na Figura 50, significa que os parâmetros que ultrapassam essa linha (estatisticamente falando) são capazes de influenciar significativamente a variação do processo. Vale destacar que no cálculo estatístico para obtenção desta referida linha, inclui-se uma porcentagem de variação aceitável dos parâmetros, onde, acima de uma porcentagem adota, este parâmetro é considerado significativo.

A coluna destacada na cor vermelha presente na Figura 49 é o resultado dos efeitos para um parâmetro ou uma interação de parâmetros. A coluna destacada na cor verde presente na Figura 49 é o erro. A coluna destacada na cor azul e na cor roxa presentes na Figura 49 são cálculos estatísticos avançados a partir do “efeito” que não são relevantes para o estudo do processo.

Portando, para análise de grau de influência de um parâmetro no processo em estudo, leva-se em consideração somente a coluna destacada na cor vermelha presente na Figura 49. Sendo assim, chega-se aos resultados de quais parâmetros são significativos para poder gerar falha de injeção.

5 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 Avaliação das variáveis de resposta

Uma vez que as corridas experimentais foram realizadas houve uma gama de métodos para auxiliar na análise, sendo que os parâmetros de processo não devem apenas ser estudados isoladamente mas também suas interações (que inidicarão as condições de trabalho ótimas).

Sendo assim, para uma análise profunda das corridas experimentais fez-se a utilização do software “JMP”, mais conhecido como “Jump” (um método estatístico, que analisa as interações entre as diferentes variáveis) amplamente utilizado em aplicações como Seis Sigma, controle de qualidade de engenharia, dentre outros.

Os resultados obtidos nas corridas experimentais realizadas (DOE I e DOE II) neste trabalho levaram as seguintes conclusões:

DOE I:

Os parâmetros definidos, em reunião com o Departamento de Injeção de Alumínio, (temperatura do forno, temperatura do molde, ângulo para dosagem do alumínio, ângulo para derramamento, aplicação de desmoldante sólido), bem como seus níveis de aplicação, não resultaram em qualquer tipo de defeito significativo nas peças produzidas.

DOE II:

Com o auxílio da utilização do método estatístico, obtem-se os seguintes resultados, Vide Figura 48, com os parâmetros utilizados no DOE II:



Figura 50 – Resultado DOE II

Na Figura 50 temos os parâmetros (X1, X2, X3, X4 e X5) listados por ordem decrescente de influência no refugo da peça em análise, bem como os graus de influencia dos respectivos parâmetros no processo, onde: X1 = Velocidade da 1ª fase de injeção, X2 = Curso de 2ª fase de injeção, X3 = Velocidade da 2ª fase de injeção, X4 = Curso de 3ª fase de injeção e X5 = Velocidade da 3ª fase de injeção; a linha na cor azul é uma linha de referência (estatisticamente calculada pelo software JMP) para auxílio na identificação de quais são os parâmetros que tem influencia significativa.

Outra forma de analisar os resultados é através do gráfico “Normal Plot”, onde os parâmetros que estiverem mais distantes da linha de tendência, são os parâmetros de maior influencia no processo.

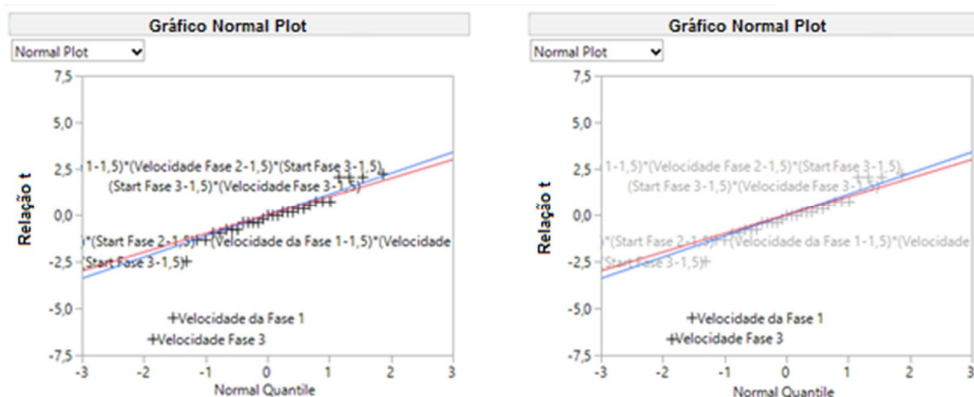


Figura 51 – Gráfico “Normal Plot”

A partir do conhecimento de quais são os parâmetros que influenciam, de forma significativa, o processo, analisa-se os resultados variando estes parâmetros com o intuito de conhecer em quais condições cada parâmetro fornece uma configuração que apresentará maior ou menor chance de gerar falha de injeção.

No software JMP existe uma ferramenta capaz de calcular todas as combinações possíveis com os parâmetros de entrada e informar quais são as configurações em que se obtêm falhas de injeção ou não.

Segue abaixo, no Gráfico 3, a utilização desta ferramenta no processo em análise de peça sem falhas de injeção:

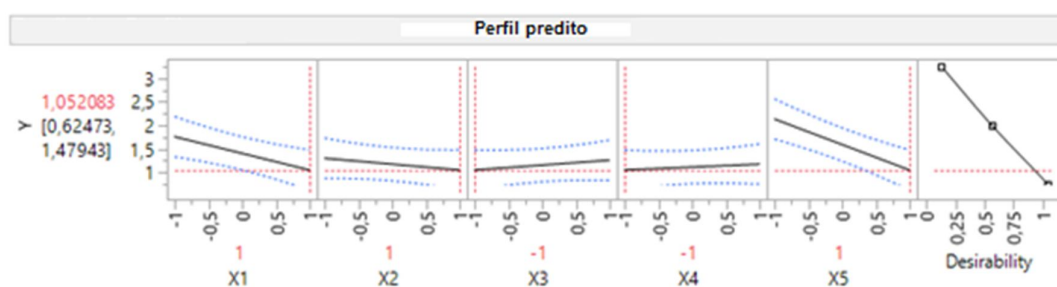


Gráfico 3 – Possíveis combinações

É válido destacar que os parâmetros, no Gráfico 3, variam entre “1” ou “-1”, onde “1” significa que o parâmetro trabalha em sua condição máxima e o “-1” significa que o parâmetro trabalha em sua condição mínima.

Logo, a configuração que nos dará uma probabilidade maior de obter-se uma peça sem qualquer falha de injeção é apresentada na Tabela 13, abaixo:

Parâmetro	Valor
X1	Máximo
X2	Máximo
X3	Mínimo
X4	Mínimo
X5	Máximo

Tabela 17 – Configuração para obter-se uma peça sem qualquer falha de injeção

Com isso, obtem-se o resultado de 1,052083 que, por sua vez, é o resultado que mais se aproxima do valor 1 (lembrando que este é valor adotado como critério para se obter uma peça livre de falhas de injeção).

Dependendo das configurações atribuídas aos parâmetros utilizados na análise (trabalhando na condição máxima ou mínima) temos, no Gráfico 3, no eixo das ordenadas, a variação, que caso seja próxima ao valor “3”, classifica-se como alta a probabilidade de se obter uma peça com falhas de injeção.

Portanto a configuração que nos dá o pior resultado (maior probabilidade de obtermos falhas de injeção) é apresentada na Tabela 14, abaixo:

Parâmetro	Valor
X1	Mínimo
X2	Mínimo
X3	Máximo
X4	Máximo
X5	Mínimo

Tabela 18 – Configuração para obter-se uma peça com falhas de injeção

O software JMP é capaz de plotar o gráfico “Variability Chart” que organiza os parâmetros de forma que possamos visualizar o quão significativo é trabalharmos com estes em suas configurações mínimas ou máximas.

Podemos analisar através da Figura 52 que o parâmetro “Velocidade em Fase 3” é o primeiro parâmetro listado, sendo que todas as combinações com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua condição mínima estão ao lado esquerdo (indicadas pelo número 1) e todas as combinações com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua condição máxima estão ao lado direito.

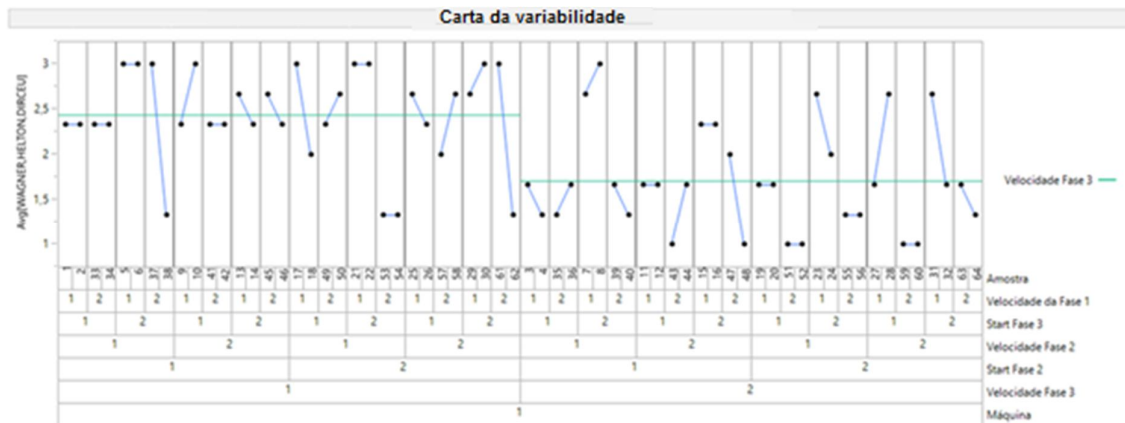


Figura 52 – Efeitos (variação da resposta)

Dessa forma, é possível analisar e quantificar as diferenças de se trabalhar com os parâmetros em suas configurações mínimas e máximas. A linha na cor verde da traçada do lado esquerdo na Figura 52 é a média dos resultados trabalhando-se com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua configuração mínima. E a linha na cor verde da traçada do lado direito na Figura 52 é a média dos resultados trabalhando-se com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua configuração máxima.

Vale destacar que a média trabalhando-se com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua configuração mínima está próxima de 2,5, ou seja, próximo de 3 (critério que caracteriza uma peça com falhas de injeção). E trabalhando-se com o parâmetro “Velocidade em Fase 3” em sua configuração máxima temos uma média próxima de 1,5, ou seja, próximo de 1 (critério que caracteriza uma peça livre de falhas de injeção).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho realizado possibilitou o conhecimento da influência dos parâmetros de injeção estudo sobre a qualidade da peças injetadas com alumínio. As análises dos resultados demonstraram quais eram os principais fatores de controle e os níveis ótimos que satisfazem as condições de operação do processo de injeção de alumínio, para a peça analisada.

Como resultado, pode-se afirmar que os melhores valores (em termos de combinação de parâmetros de injeção testados) foram obtidos com a combinação dos parâmetros X1, X2, X3, X4 e X5 trabalhando nas seguintes configurações, respectivamente: máxima, máxima, mínima, mínima, máxima. É importante destacar, também, que os piores valores (em termos de combinação de parâmetros de injeção testados) foram obtidos com a combinação dos parâmetros X1, X2, X3, X4 e X5 trabalhando nas seguintes configurações, respectivamente: mínima, mínima, máxima, máxima, mínima.

O aplicativo numérico utilizado para avaliar os resultados das combinações dos parâmetros apresenta uma boa sensibilidade para analisar tendências à formação de falhas de injeção, quando se variam os parâmetros de injeção investigados neste trabalho.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Como sugestão para futuros trabalhos indica-se uma análise mais completa do processo e recomenda-se que novos experimentos sejam realizados.

Neste caso, para estudar o comportamento ou variação da função resposta, podem ser selecionados outros parâmetros e faixas de operação. Em futuros experimentos recomenda-se a variação da terceira fase de injeção em mais níveis de intensidade, para se aprofundar no conhecimento de sua influencia sobre qualidade da peça. A avaliação deste parâmetro permitiria a determinação de um valor que resulte no menor índice de refugos.

Outros parâmetros que podem ser explorados são os pontos de comutação, os mesmos podem ser variados em futuros trabalhos, para se avaliar o início do preenchimento da peça em pontos diferenciados e conhecer também sua influencia sobre a qualidade da peça injetada.

8 REFERÊNCIAS

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**, 2007. 69 p.

ANDRIETTA, J. M., Miguel, P. A. C. **Aplicação do programa Seis Sigma no Brasil: resultados de um levantamento tipo survey exploratório-descritivo e perspectivas para pesquisas futuras**, 2006.

ASM – American Society for Metals, **Metals Handbookk** - 8ªed, Ohio, 1998.

ASM International, Handbook Volume 15 **Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection, Manual**, EUA, 2003.

CALDEIRA. Jorge. **O primeiro fundidor do Brasil**. Revista fundição e Serviços, 2005.

CAMPOS, M. S., **Seis Sigma: Sonho ou realidade em atingir o zero defeito**. Revista Banas Qualidade nº 96 – Pág. 30, 2000.

GGD Metals - Grupo Gonçalves Dias Metal. **Catálogo Técnico do Alumínio**. São Paulo, 2016. 10 p.

GROSS, J. M., **A road map to six sigma quality**. Quality Progress, Pág. 24-29, 2001.

HARRY, M. J.; SCHROEDER, R., **Six Sigma: a breakthrough strategy for profitability**. New York: Quality Progress, 1998.

HENDERSON, K., EVANS, J. **Successful Implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company**. Benchmarking and International Journal, V.7 N.4, 2000.

KARBAN, R. Jr. Ph. D. **The Effects of Intensification Pressure, Gate Velocity & Intermediate Shot Velocity on the Internal Quality of Aluminum Die Castings.** North American Die Casting Association, 2001.

MALAVAZI, J. **Área de fundição: Processo de fundição sob pressão.** Osasco: SENAI, 2005.

MARASH, S. A. **Six Sigma: Business Results Though Innovation.** In: Annual quality congress of the American Society for Quality, Pág. 627-630, 2000.

MEDEIROS, M. História da fundição. São Paulo: Salus, 2009.

MENDES, R. P. K. **Avaliação da influência dos parâmetros do processo de fundição sob pressão sobre a qualidade de uma peça injetada em liga de alumínio.** Dissertação (Mestrado em Ciencia e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas, UESC, Joinville, 2005.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments.** 6ª Ed. Nova York: John Wille & Sons, 2005.

MOURA, C. F. A. **Implementação da liga SAE para redução de custos na injeção de alumínio.** Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Santa Catarina, 2006.

NAUMANN, E. **Customer centered six sigma.** In: ASQ's 54th Annual Quality Congress Proceedings, Pág. 631-640, 2000.

PANDE, PETER S., NEUMAN, ROBERT P. E CAVANAGH, RONALD R., **Estratégia Seis Sigma: Como A GE, A Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho;** RIO DE JANEIRO: QUALITYMARK, 2001.

PYZDEK, T. **The six Sigma project planner: a step-by-step guide to leading a Six Sigma project throught DMAIC.** McGraw-Hill. New York. 2003.

ROCHA, T. G., GALENDE, S. B. **A importância do controle de qualidade na indústria; Revista UNINGÁ**, 2014.

ROTONDARO, R. G. et al. **Seis Sigma: Estratégia Gerencial para a Melhoria de Processos, Produtos e Serviços**; Ed. Atlas, São Paulo, 2002.

SCHEUNEMANN, Ricardo. **Regeneração de areia de fundição através de tratamento químico via processo fenton**. Disponível em . Acesso em 28 fev. de 2005.

SHI, Qi, **Prediction of Thermal Distortion and Thermal Fatigue in Shot Sleeves**, Ph.D. Dissertação, Universidade Estadual de Ohio, EUA, 2002.

SYRCOS G. P. **Die casting process optimization using Tagushi methods. Journal of Materials Processing Technology**, v.135, p. 68 – 74, 2003.

TAGUCHI, G. **Introduction to quality engineering**. Tokyo: Asian Productivity Organization, 1993.

TAHARA, S. **Um Guia do Conhecimento Em Gerenciamento de Projetos - 5ª Ed.** Editora Saraiva, 2014.

UFPR – Universidade Federal do Paraná, **Fundição sob pressão**, Curitiba – PR, 2007.

WEG – **Injeção de Alumínio, Módulo II, Máquinas de Injeção Sob Pressão**, 2012.

WEG – **Qualificação Profissional Seis Sigma – Yellow Belt**, 2010.

ANEXOS

ANEXO A - Especificações Técnicas Injetora AGRATI – Modelo CF 600

Injetora AGRATI – Modelo CF 600

Dimensão e Potência			
Peso da máquina		Kg	31000
Dimensões externas	Comprimento	mm	8150
	Largura	mm	2270
	Altura	mm	3290
Potência do motor da bomba		KW	37
Grupo de fechamento			
Força de extração central		Ton.	29,3
		KN	287,4
Força de fechamento		Ton.	620
		KN	6076
Curso de placa móvel		mm	700
Altura mínima de molde		mm	350
Altura máxima de molde		mm	900
Curso de extração		mm	200
Dimensões das placas		mm	1160x1140
Distância entre as colunas		mm	727x727
Diâmetro das colunas		mm	150
Grupo de injeção			
Força máxima de injeção regulável		Ton.	64,6
		KN	633,7
Peso máximo da peça		Kg	9,4
Distanciamento de ponto de injeção		mm	0-125-250
Máxima área estampável [400Kg/cm²]		cm²	1550

Tabela 19 – Especificações Técnicas Injetora AGRATI – Modelo CF 600 Fonte: AGRATI AEE srl, CF Series. Disponível em: < <http://www.agrati.it/pr/prodotti2.asp?ln=6&id=1>>. Acesso em: 21/05/2016.

ANEXO B - Características do desmoldante aplicado no processo de injeção sob pressão

Características do desmoldante

Ingrediente	Concentração	Número CAS
Emulsão de polidimetilsiloxanos	15 – 20%	63148-62-9
Lubrificantes a base de ácido graxo	10 – 15%	61791-12-6
Lubrificantes a base de hidrocarbonetos	10 – 20%	8020-83-5
Água	Balanço	7732-18-5

Tabela 20 – Composição e informações sobre os ingredientes