

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Luis Felipe
Inglez E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 25/07/2008
Roseana da E. Trevisan
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Análise do Processo de Solda de Tanques de Combustível Soprados através da Metodologia de Projeto Axiomático

Autor: Luis Felipe Inglez

Orientadora: Profa. Dra. Roseana da E. Trevisan

83/2008

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Análise do Processo de Solda de Tanques de Combustível Soprados através da Metodologia de Projeto Axiomático

Autor: Luis Felipe Inglez

Orientador: Profa. Dra. Roseana da E. Trevisan

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2008
S.P . – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

In45a Inglez, Luis Felipe
 Análise do processo de solda de tanques de
 combustível soprados através da metodologia de projeto
 axiomático /Luis Felipe Inglez. --Campinas, SP: [s.n.],
 2003.

 Orientador: Roseana da Exaltação Trevisan
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
 Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Tanques. 2. Solda e soldagem. 3. Organização e
 métodos. I. Trevisan, Roseana da Exaltação Silva. II.
 Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
 Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Analysis of fuel tank welding process through axiomatic design

Palavras-chave em Inglês: Fuel tank, Plastic welding, Axiomatic design

Área de concentração: Materiais e processos de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Felipe Araújo Calarge, Iris Bento da Silva

Data da defesa: 25/07/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

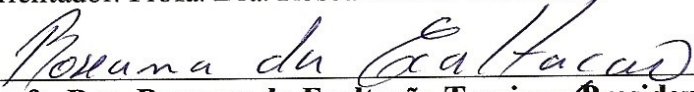
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

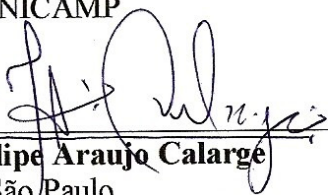
**Análise do Processo de Solda de Tanques de
Combustível Soprados através da Metodologia
de Projeto Axiomático**

Autor: Luis Felipe Inglez

Orientador: Profa. Dra. Roseana da E. Trevisan



Profa. Dra. Roseana da Exaltação Trevisan, Presidente
DEF/FEM/UNICAMP



Prof. Dr. Felipe Araujo Calarge
UNINOVE/São Paulo



Prof. Dr. Iris Bento da Silva
DEF/FEM/UNICAMP

Campinas, 25 de Julho de 2008.

Dedicatória

Para Antonio, Deuza, Marcela e Mariana, presenças importantes em minha vida e motivos maiores de meu empenho, esforço e dedicação.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais, pelo amor e confiança depositados em mim, possibilitando-me chegar onde estou.

À minha irmã, pela amizade e companheirismo constantes nesta vida.

À minha esposa, cujo apoio e incentivo possibilitaram o término deste trabalho.

Ao Prof. Dr Paulo Correa Lima, que me motivou a desenvolver este trabalho.

À Profa. Dra Roseana da Exaltação Trevisan pela confiança prestada, por sua dedicação, compreensão e amizade.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.

Ao Cleber, grande amigo, pela ajuda, disposição e verdadeira amizade.

Aos colegas de trabalho, em especial o Pedro e o Enildo, que muito ajudaram.

À Andreza, pela ajuda e orientação.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.



Bill Waterson

Resumo

INGLEZ, Luis Felipe, *Análise do Processo de Solda de Tanques de Combustível Soprados através da Metodologia de Projeto Axiomático*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 82 p. Dissertação (Mestrado)

Apesar de todos os avanços tecnológicos, o desenvolvimento de projeto, na grande maioria das vezes, ainda é executado de forma interativa, empírica e intuitiva, baseado unicamente na experiência, inteligência ou criatividade dos engenheiros. O desenvolvimento de processo e máquinas para solda em plástico de tanques de combustível soprados não é exceção. Assim como na fase de desenvolvimento, a alteração ou correção de um projeto já existente também é realizada de forma empírica. Visando identificar as falhas de projeto de um processo de solda existente e orientar ações de correção e melhoria, o autor deste estudo utilizou uma metodologia de desenvolvimento sistêmico de projeto, no caso o *Axiomatic Design*, como uma ferramenta de análise. Para tanto, ele coordenou a construção da matriz de *design* do processo estudado para identificar os acoplamentos existentes. Num segundo momento, baseando-se nos documentos de controle de produção diário do período de 2005 a 2007, buscou-se estimar os valores anuais do conteúdo de informação deste sistema (I_{sys}). A correção ou melhoria dos acoplamentos que obtivessem as menores eficiências no ano de 2005 foi priorizada. O cálculo dos valores de conteúdo de informação dos anos de 2006 e 2007 visou avaliar a eficácia do método proposto. Os resultados destes cálculos comprovaram que o projeto axiomático pode ser utilizado como ferramenta de análise.

Palavras-Chave:

Tanques de combustível, Solda em Plástico, Projeto Axiomático.

Abstract

INGLEZ, Luis Felipe, *Analysis of Fuel Tank Welding Process Through Axiomatic Design*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 82 p. Dissertação (Mestrado)

Despite all technological and scientific breakthroughs, design is being done empirically on a trial-and-error basis, depending on intuitive and innate reasoning rather than a rigorous scientific study. Design of welding machines for fuel plastic tanks is no exception. Refurbishment and corrective maintenance tasks are also made without any scientific basis. This work intended to demonstrate the use of axiomatic design as an analytic tool for an existent machine design in use on the shop floor. Based on the literature review about Axiomatic Design and Plastic Welding, the author determined the design matrix of an existent fuel tank welding machine, identifying the coupled elements. Moreover, based on production data from 2005 to 2007, the information content (Isys) of this machine was evaluated. The correction or improvement of design parameters with low information content values in 2005 was prioritized. In order to validate the efficacy of using axiomatic design as an analytic tool, the information content values of 2006 and 2007 were evaluated. The result proves that axiomatic design can be used as an analytical tool.

Key Words:

Fuel Tank, Plastic Welding, Axiomatic Design

Índice

LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
NOMENCLATURA	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS	2
ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	2
CAPÍTULO 2: REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 DEFINIÇÃO DE PLÁSTICO	4
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE SOLDA.....	5
2.4 DESCRIÇÃO DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDA	7
2.4.1 Solda por Ultra-Som	9
2.4.2 Solda por Vibração	10
2.4.3 Solda por Rotação.....	11
2.4.4 Solda a Laser e Infravermelho	12
2.4.5 Solda por Placa de Aquecimento	13
2.5 SOLDA DE TANQUES DE COMBUSTÍVEL SOPRADOS	14
2.6 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA SOLDA DE TANQUES DE COMBUSTÍVEL.....	14
2.7 EQUIPAMENTOS	23
2.8 TESTES DE QUALIDADE	24
2.8.1 Teste mecânico	24
2.8.2 Teste de aquecimento (Heat test)	25
2.8.3 Inspeção visual (Linha de solda)	26
2.8.4 Inspeção visual (Lábio duplo).....	27
2.9 DEFINIÇÃO DE <i>DESIGN</i>	28
2.10 MÉTODOS DE <i>DESIGN</i>	30
2.11 CONCEITOS BÁSICOS DO PROJETO AXIOMÁTICO	33

2.12 CONCEITO DE DOMÍNIOS	33
2.13 DEFINIÇÕES	35
2.14 MAPEAMENTO	36
2.16 RESTRIÇÕES.....	40
2.17 DECOMPOSIÇÃO	40
2.18 AXIOMA DA INFORMAÇÃO.....	42
CAPÍTULO 3: MÉTODO E MATERIAIS	45
3.1 INTRODUÇÃO	45
3.2 METODOLOGIA CIENTÍFICA.....	45
3.2.1 Fase Exploratória	46
3.2.2 Formulação do Problema	47
3.2.3 Construção de Hipóteses.....	47
3.2.4 Realização do Seminário.....	47
3.2.5 Seleção da amostra	48
3.2.6 Coleta de Dados	48
3.2.7 Análise e Interpretação dos Dados	49
3.2.8 Elaboração do Plano de Ação	49
3.2.9 Divulgação dos resultados	50
3.3 MATERIAL E EQUIPAMENTO.....	50
CAPÍTULO 4: APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	55
4.1 INTRODUÇÃO	55
4.2 EMPRESA VDP	55
4.3 VOZ DO CLIENTE.....	57
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
BIBLIOGRAFIA.....	75

Lista de Figuras

Figura 2.1: Classificação dos Plásticos	5
Figura 2.2: Classificação dos Processos de Solda	6
Figura 2.3: Processos de Solda Simplificado.....	7
Figura 2.4: Solda por Vibração.....	11
Figura 2.5: Solda a Laser.....	13
Figura 2.6: Fases do processo de solda por placa de aquecimento.....	15
Figura 2.7: Solda por Placa de Aquecimento – <i>Matching</i>	16
Figura 2.8: Tempo de Aquecimento vs. Pressão.....	17
Figura 2.9 Solda por Placa de Aquecimento – <i>Heating</i>	18
Figura 2.10: Profundidade de Zona Fundida vs. Resistência de Solda.....	19
Figura 2.11: Profundidade de Zona Fundida vs. Temperatura.....	19
Figura 2.12: Solda por Placa de Aquecimento – <i>Change-over</i>	21
Figura 2.13 Solda por Placa de Aquecimento – <i>Fusion</i>	22
Figura 2.14: Amostras de Teste Mecânico	25
Figura 2.15: Amostras de Teste de Aquecimento.....	26
Figura 2.16: Amostra Inspeção Visual – Linha de solda.....	26
Figura 2.17: Amostra de Inspeção Visual – Lábio duplo.....	27
Figura 2.18: Fluxo de Etapas da Confeção de um Projeto.....	29
Figura 2.19: Metodologia do Processo de Projeto Axiomático.....	30
Figura 2.20: Modelo de Senge Aplicado ao Desenvolvimento de Projeto	31
Figura 2.21: Domínios da Metodologia de Projeto Axiomático.....	34
Figura 2.22: Axiomas do Processo de Projeto Axiomático.....	37
Figura 2.23: Exemplo do Processo de Decomposição.....	41
Figura 3.1: Máquina de Sopro Krupp-Kautex, modelo KSB 2-241/120-D-COEX.....	51
Figura 3.2: Operação de <i>Double-Clamp</i>	51
Figura 3.3: Máquina de Resfriamento a Ar <i>Sherdil Precision</i>	53

Figura 3.4: Máquina de solda KVT, modelo 22194.....	54
Figura 4.1: Exemplo de Tanque e Gargalo de Enchimento.....	56
Figura 4.2: Fluxo de Produção	56
Figura 4.3: Eficiência de <i>Design</i> (2005).....	68
Figura 4.4: Eficiência de <i>Design</i> (2006).....	69
Figura 4.5: Eficiência de <i>Design</i> (2007).....	70
Figura 5.1 – Evolução do Conteúdo de Informação do Sistema.....	72

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2005.....	66
Tabela 4.2: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2006.....	67
Tabela 4.3: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2007.....	67

Nomenclatura

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

TTIr - *Through Transmission IR Welding*

IR - *Infrared*

EWI - *Edson Welding Institute*

PTFE - Politetrafluoretileno

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

DNA - *Deoxyribonucleic Acid*

TRIZ - *Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*

FRs - *Functional Requirements*

Cs - *Constraints*

DPs - *Design Parameters*

PVs - *Process Variables*

COEX - *Coextrusion (with Barrier Layer)*

OEE - *Overall Equipment Effectiveness*

Capítulo 1

Introdução

Uma fase importante dos processos de manufatura que utilizam peças plásticas e/ou compostos poliméricos como componentes é a junção ou montagem dos mesmos. Segundo BENATAR et al. (2001), os métodos de junção de plásticos podem ser subdivididos nos seguintes grupos:

- Junção mecânica;
- Junção química (Substâncias Adesivas);
- Junção físico-química (Solda).

Segundo JOSHI (2005), a junção do tipo mecânica é um processo rápido, mas é suscetível a vazamentos e, devido ao fato de causar acúmulo de tensões localizadas, pode danificar os componentes plásticos.

Adesivos produzem uniões com boas propriedades, mas são difíceis de manusear e de cura demorada, além de necessitarem de cuidados especiais quanto à limpeza das superfícies a serem unidas.

A solda produz uniões com boas qualidades mecânicas, aproximando-se das propriedades dos componentes soldados. Atualmente, devido ao fato de poder ser utilizada na junção de componentes grandes (tubos hidráulicos, tanques de combustível e containeres) e pequenos (interruptores de luz, isqueiros e câmeras), simples e complexos, e em processos de produção em massa e em lotes, inúmeras indústrias utilizam a solda de plásticos e/ou compostos poliméricos em seus processos. Dentre estas indústrias se pode destacar a automotiva, a aeroespacial, a hospitalar, a eletrônica, a de brinquedos e de infra-estrutura.

O processo de solda entre componentes plásticos e tanques de combustível soprados possui uma alta criticidade. Por outro lado, as soluções de *design* de máquinas e processo são invariavelmente obtidas de forma totalmente empírica, na base de tentativa e erro, o que acaba gerando as seguintes barreiras para quem as utiliza:

- Falta de informação sobre o assunto, já que o conhecimento sobre este processo é atividade principal (*core-business*) para as empresas que constroem as máquinas de solda e para as próprias empresas que fazem uso do processo;
- Ferramental e processo de custo elevado.

Portanto, é fundamental entender o processo como um todo, bem como as variáveis presentes no mesmo, para se produzir com qualidade e buscar competitividade no mercado. Justifica-se desta forma o tema da presente dissertação, cujos objetivos serão propostos a seguir.

Objetivos

O objetivo principal deste estudo é aplicar a metodologia de projeto axiomático em um processo de solda já definido, com o intuito de identificar as falhas do mesmo e orientar ações de correção e melhoria com base em resultados científicos, minimizando assim o processo de resolução por tentativa e erro, tornando o mesmo mais robusto e confiável.

Os objetivos secundários consistem em propostas, quando aplicável, de alterações de *design* e no entendimento do impacto de um *design* acoplado na baixa eficiência do processo.

Estruturação do trabalho

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos.

No primeiro capítulo faz-se uma sucinta revisão sobre os métodos de junção de componentes plásticos. A falta de informação sobre o processo de solda de tanques de combustível soprados justifica a escolha do tema desenvolvido neste trabalho.

No segundo capítulo, buscando suprir uma lacuna de literatura e metodologia que envolva a verificação e correção de problemas de qualidade no processo de solda de tanques de combustível soprados, é desenvolvida uma revisão bibliográfica sobre o processo de solda de componentes plásticos e sobre projeto axiomático. O intuito é compreender os vários métodos de solda existentes, principalmente o de solda por placa de aquecimento, bem como a influência de suas variáveis no projeto existente, gerando assim conhecimento e base para propor a utilização da metodologia de projeto axiomático como ferramenta de análise para um *design* já existente.

O terceiro capítulo explica e justifica o uso da metodologia científica chamada pesquisa-ação. A descrição do tipo de material e equipamentos utilizados durante este estudo também serão apresentados neste capítulo.

O capítulo quatro demonstra um projeto, onde se buscou desenvolver, através do uso da metodologia de projeto axiomático, a matriz de *design* do objeto de estudo. Num segundo momento os resultados são analisados e demonstrados.

Por fim, o capítulo cinco traz as conclusões e as propostas de melhoria do processo estudado.

Capítulo 2

Revisão da Literatura

2.1 Introdução

O entendimento do processo de solda de artigos plásticos, seus conceitos e variáveis são fundamentais para que a análise do *design* de máquina de solda seja realizada de forma coerente e objetiva.

Deste modo, uma revisão bibliográfica sobre os conceitos e principais métodos de solda em plástico, bem como sobre a metodologia de projeto axiomático, se faz necessária.

2.2 Definição de Plástico

A palavra polímero tem sua origem na língua grega, sendo que “*poly*” e “*meros*” significam, respectivamente, “muitas partes”. Deste modo, polímero é uma longa molécula (macromolécula) feita a partir de muitas partes repetidas, as quais são usualmente chamadas de “*meros*”.

Ao plástico é atribuída a seguinte definição: “materiais macromoleculares, principalmente de origem orgânica (carbono), os quais são preparados pela modificação de produtos naturais ou por síntese de compostos de baixo peso molecular” (POLISUL, 1995).

De acordo com BENATAR et al. (2001), plásticos são materiais derivados de polímeros sintéticos, e podem ser divididos em dois grandes grupos: termoplásticos e termofixos ou termorígidos (reticulados). Segundo o manual de moldagem de sopro da POLISUL (1995), ambos podem ser diferenciados através de suas configurações e mecanismos de união. Na figura 2.1 pode-se observar que enquanto os primeiros consistem em moléculas lineares, entre as quais

interagem as forças de valência principais e secundárias, os termofixos consistem somente em moléculas reticuladas com forças de valência principal.

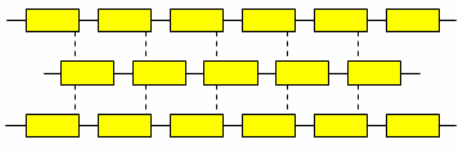
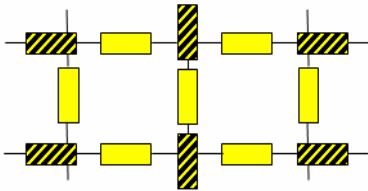
	TERMOPLÁSTICOS	TERMOFIXOS
ESTRUTURA	MACROMOLÉCULAS UNIDIMENSIONAIS LINEARES	MACROMOLÉCULAS TRIDIMENSIONAIS RETICULADAS
		
MECANISMOS DE LIGAÇÃO	POLÍMEROS DE CADEIA LINEAR	POLÍMEROS RETICULADOS
	LIGAÇÕES MACROMOLECULARES COVALENTES PRINCIPAIS ————— FORÇAS INTERMOLECULARES DE VALÊNCIA SECUNDÁRIA - - - - -	POLÍMEROS RETICULADOS COM LIGAÇÕES MACROMOLECULARES DE VALÊNCIA PRINCIPAL

Figura 2.1: Classificação dos Plásticos (POLISUL, 1995).

Quando o termoplástico é aquecido, as fracas ligações de valência secundárias entre as moléculas são quebradas e as moléculas podem se mover, permitindo que o polímero possa ser remodelado. Já a longa cadeia de polímeros dos termofixos não pode ser quebrada sem também romper as ligações de valência principais, degradando assim o material (BENATAR et al., 2001).

Assim, é desejável que no processo de solda as moléculas dos polímeros sejam capazes de se difundir através da interface de solda sem sofrerem degradação. Deste modo, a solda de termofixos não é possível, exceto em raras ocasiões em que as ligações de valência principal são rompidas sem prejuízo às propriedades químicas do material.

2.3 Classificação dos Processos de Solda

De acordo com o Instituto de Normas Alemão (*Deutsches Institut für Normung – DIN*), pode-se definir solda em plástico como a junção de polímeros termoplásticos através da aplicação de calor e pressão, utilizando-se ou não de material de preenchimento, cuja zona de interface entre as duas partes esteja plastificada.

A norma DIN 1910 classifica o processo de solda conforme o tipo de energia de aquecimento utilizada, como ilustra a figura 2.2.

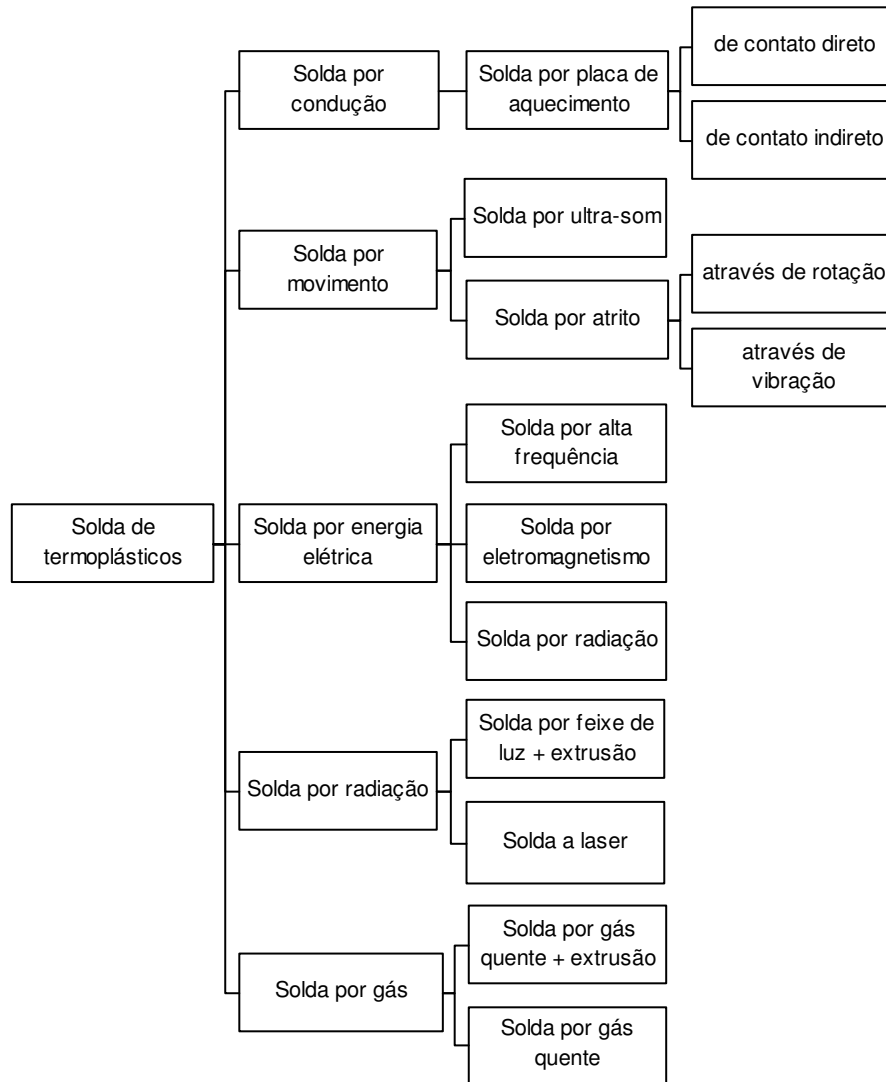


Figura 2.2: Classificação dos Processos de Solda (Adaptado de NATROP, 1999).

Apesar de também classificar o processo de solda conforme o método de aquecimento utilizado, BENATAR et al. (2001) classifica-o de forma mais sucinta, conforme mostrado na figura 2.3.

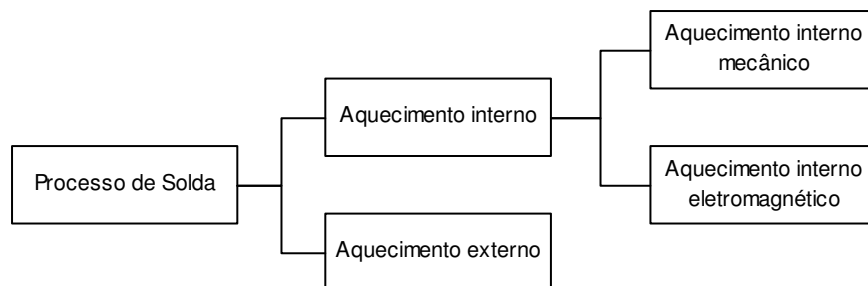


Figura 2.3: Processos de Solda Simplificado (Adaptado de BENATAR et al., 2001).

Com base no conteúdo das figuras 2.2 e 2.3, pode-se observar que os processos de solda são geralmente classificados e identificados pelo método de aquecimento utilizado, o qual pode ser dividido em duas categorias gerais: aquecimento interno e aquecimento externo. O método de aquecimento interno ainda pode ser subdividido entre aquecimento interno mecânico e aquecimento interno eletromagnético.

O método de aquecimento interno mecânico baseia-se na conversão de energia mecânica em calor através de atrito superficial e intermolecular. Como exemplo, pode-se citar: a solda por ultra-som, a solda por vibração e a solda por rotação (*spin welding*). Já o método de aquecimento interno eletromagnético é aquele que absorve e converte a radiação eletromagnética em calor. Este processo inclui a solda a laser, a solda por alta frequência e a solda por microondas.

Por fim, o método de aquecimento externo utiliza a convecção e a indução para aquecer a superfície de solda. Entre os processos que utilizam este método pode-se citar a solda por placa de aquecimento, a solda a gás, a solda por extrusão, entre outros.

2.4 Descrição dos Principais Processos de Solda

Por meio da análise dos processos de solda, BENATAR et al. (2001) identificou cinco fases distintas presentes nos mesmos. Dependendo do processo, estas fases ocorrem de maneira sequencial ou simultânea. Estas fases são descritas a seguir:

- **Fase 1 - Preparação da Superfície**

É a primeira fase na preparação de termoplásticos ou compósitos para a solda. Esta fase é especialmente importante quando processos manuais ou semi-automáticos são utilizados, pois a maioria das contaminações da superfície de solda está relacionada ao manuseio. Usinagem e/ou limpeza da superfície são operações usuais desta fase.

- **Fase 2 – Aquecimento**

A principal função desta fase é eliminar qualquer irregularidade da superfície de solda. Há vários modos de se aquecer termoplásticos ou compósitos para a solda. Todos os processos de solda utilizam o aquecimento do polímero com o intuito de derreter ou amolecer o mesmo até a interface de solda.

- **Fase 3 - União das Partes**

Uma vez que as zonas de aquecimento foram estabelecidas, deve-se aplicar pressão para unir as partes. Os objetivos principais da utilização de pressão são:

- Deformar e distribuir uniformemente o termoplástico na região de solda;
- Eliminar a presença de ar na região de solda.

- **Fase 4 - Difusão Intermolecular**

Uma vez que o contato entre os polímeros é estabelecido na interface, a difusão intermolecular e o enlaçamento entre as moléculas são necessários para completar o processo e formar uma boa solda. Nesta fase, longas moléculas de um dos polímeros atravessam a interface de solda, se unindo às moléculas do outro polímero. Deste modo, após o resfriamento, as ligações secundárias entre estas moléculas e os enlaçamentos provêm a força da solda.

- **Fase 5 - Resfriamento**

A fase final de um processo de solda se constitui no resfriamento e resolidificação do polímero aquecido. Durante esta fase, as matrizes semicristalinas se recristalizam formando, assim, a microestrutura do material.

2.4.1 Solda por Ultra-Som

Segundo BENATAR et al. (2001), a solda por ultra-som é uma técnica muito utilizada na fusão ou solda de termoplásticos e compósitos. A solda entre as partes é estabelecida através da utilização de vibrações mecânicas de baixa amplitude ($1\mu\text{m}$ - $250\mu\text{m}$) e alta frequência (10 - 70kHz).

Este método de aquecimento resulta em deformações cíclicas das partes a serem unidas, bem como de qualquer irregularidade superficial. A energia cíclica é convertida em calor no interior do termoplástico, através da fricção intermolecular. O calor, que é mais elevado na superfície (devido às irregularidades da mesma), é suficiente para derreter o termoplástico e fundir as partes.

Usualmente, com o intuito de melhorar o processo, cria-se uma irregularidade em uma das superfícies, normalmente em formato triangular. Esta protuberância, também conhecida por “direcionador de energia” ou “concentrador de energia”, experimentará os maiores níveis da energia cíclica, produzindo assim, os maiores níveis de aquecimento. Por final, o “concentrador de energia” se derrete e une as partes.

Este método é comumente utilizado pela indústria na união de componentes plásticos. As seguintes vantagens deste tipo de solda podem ser citadas:

- Velocidade (ciclo de máquina típico é menor do que 1s);
- Facilidade de automação;
- Investimento relativamente baixo;
- Possibilidade de uso em uma grande variedade de termoplásticos.

2.4.2 Solda por Vibração

Este é um método bem difundido, utilizado na união de peças grandes, gerando soldas com boa resistência mecânica através de ciclos de máquina de apenas alguns segundos.

Para BENATAR et al. (2001), este método é principalmente utilizado quando ciclos de máquina reduzidos são necessários e os componentes são muito grandes para se utilizar o método por ultra-som. Entretanto, este método tem limitações, já que este exige superfícies relativamente planas. Embora esta prática não seja recomendada, uma pequena inclinação de 10 graus nas superfícies a serem soldadas pode ser tolerada nas soldas por vibração linear. Em alguns casos, este método pode auxiliar na solução de problemas de empenamento, principalmente no caso de compósitos de fibra de vidro, já que é possível unir as peças a serem soldadas através de sargentos, forçando a correta geometria. A solda por vibração também pode ser utilizada como um método alternativo para aderir ou unir mecanicamente componentes de diferentes matérias, tais como, fibras de madeira e termoplásticos.

Na solda por vibração, as partes a serem soldadas são unidas através de sargentos sob uma força relativamente alta. Sob a influência de uma força pré-determinada, uma das partes começa a vibrar em relação à outra, usualmente com deslocamentos entre 0,5 e 1,5mm. Este atrito resultará em um aquecimento, que unirá os componentes nas regiões fundidas.

A solda por vibração pode ser classificada conforme a orientação do movimento de vibração: linear ou orbital. Deve ser notado que, historicamente, a indústria em geral faz distinção sobre a solda por rotação, tratando-a como um método distinto, embora a mesma seja caracterizada pela utilização do atrito.

A solda por vibração linear permite a solda de superfícies, cujo deslocamento se dá em uma única direção. Entretanto, quando a orientação entre as superfícies de contato é transversal, há o risco de se criar soldas frias. Este fenômeno ocorre devido à falta de um suporte adequado, seja ele interno (*design* do componente) ou externo (*jigs* com suportes apropriados para a operação).

Deste modo, as superfícies de contato podem fletir e reduzir o movimento relativo entre as mesmas.

A figura 2.4 apresenta o princípio básico de funcionamento de uma máquina de solda por vibração linear, onde a peça superior (*Joining part – upper side*) sofre vibração no sentido horizontal e a peça inferior (*Joining part – lower side*) é movida, através de um mecanismo vertical de curso controlado (*Lifting table*), ao encontro da peça superior até que a solda seja completada.

A solda por vibração orbital, devido ao seu movimento elíptico ou circular, produz uma velocidade relativamente constante. Esta velocidade constante, dada certa amplitude e tempo de solda, dissipa mais energia na região de união da solda. Ainda, devido à orientação do movimento, o efeito de se fletir e reduzir o movimento relativo entre as superfícies de contato é minimizado, gerando assim, uma solda de melhor qualidade.

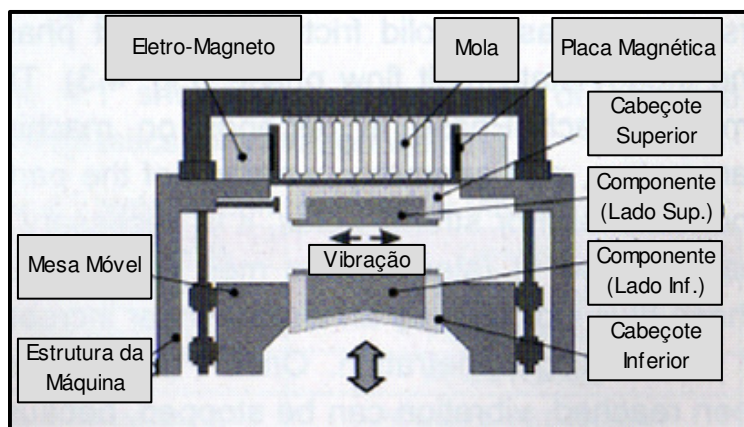


Figura 2.4: Solda por vibração (BENATAR et al. 2001).

2.4.3 Solda por Rotação

Similar ao processo de solda por vibração, a solda por rotação é um dos métodos de solda mais utilizado pela indústria na solda de componentes termoplásticos com linha de solda circular ou cilíndrica.

O processo ocorre da seguinte maneira: mantendo as partes unidas sob uma carga pré-determinada, uma das partes é mantida imóvel, enquanto a outra é rotacionada sob a mesma, gerando aquecimento por atrito e conseqüentemente, soldando os componentes. A pré-carga tem papel fundamental, já que garante um perfeito alinhamento e aquecimento das partes, produzindo assim, uma solda de boa qualidade.

A solda por rotação possui os seguintes benefícios:

- Ciclos relativamente baixos (entre 1 e 5s);
- Custo de equipamento/ferramental relativamente baixo quando comparado com os outros processos de solda por atrito;
- Possibilidade de solda em baixo d'água; e
- Possibilidade de soldas com propriedades herméticas.

2.4.4 Solda a Laser e Infravermelho

Os processos de solda a laser e infravermelho para termoplásticos já estão disponíveis há alguns anos, mas, apenas recentemente, com a diminuição do custo do ferramental e o aumento da demanda de produtos com maior qualidade, é que estes métodos se tornaram mais populares.

As seguintes fontes de infravermelho podem ser utilizadas: lasers, lâmpadas de quartzo e aquecedores de cerâmica. A emissão de radiação para cada tipo de fonte é específica e freqüentemente é o fator determinante na seleção da fonte de emissão.

As seguintes vantagens podem ser citadas:

- Ciclos rápidos (entre 2 e 10s);
- Não gera particulados;
- Tensões residuais baixas;
- Bom controle da zona de aquecimento; e

- Rebarba gerada no processo de solda é suave e totalmente colada ao produto.

Podem ser citadas as seguintes limitações:

- O investimento inicial pode ser relativamente alto;
- Não é recomendado para solda de materiais com alto teor cristalino; e
- Não é aplicável para componentes cuja região interna não pode ser exposta a radiação infravermelha.

A figura 2.5 mostra o princípio básico de funcionamento de uma máquina de solda a laser (TTIr), onde a fonte de infra-vermelho (*IR source*) gera um feixe de luz, o qual atravessa o componente superior translúcido (*“clear” sample*), aquecendo a superfície do componente inferior (*“black” sample*), o qual absorverá a energia, possibilitando a solda dos dois componentes.

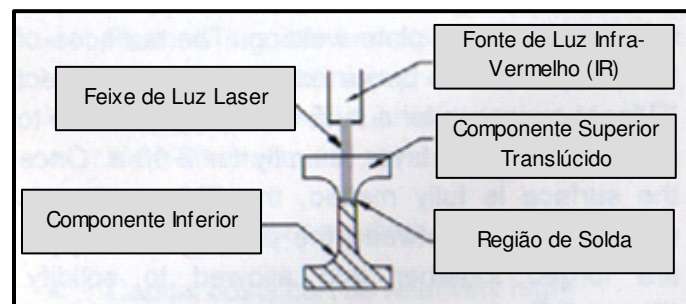


Figura 2.5: Solda a laser (BENATAR et al., 2001).

2.4.5 Solda por Placa de Aquecimento

Devido à sua grande confiabilidade, repetibilidade e economia, a solda por placa de aquecimento é um dos métodos mais utilizados para a solda de componentes plásticos. Empresas de vários setores industriais, tais como automotivo, alimentício, químico, construção civil, entre outros, fazem uso desse método.

Embora o método por placa de aquecimento apresente tempos de ciclo longos quando comparado aos outros métodos de solda, sua utilização é indicada para produção em massa de componentes que necessitem de grande confiabilidade, tais como sistemas combustíveis e baterias automotivas. Outro ponto positivo é sua grande flexibilidade, fazendo com que este possa ser aplicado tanto para produções em massa, quanto para soldas manuais ou semi-automáticas.

2.5 Solda de Tanques de Combustível Soprados

Devido à grande confiabilidade, repetibilidade e economia do processo de solda por placa de aquecimento, este é o método de solda mais utilizado na fabricação de tanques de combustível soprados.

Conforme o grau de contato com combustível, a solda de tanques de combustível pode ser classificada do seguinte modo:

- Solda primária: há contato com combustível (Ex: Válvulas de respiro);
- Solda secundária: não há contato com combustível (Ex: *Clips*);

A solda por rotação (*spin welding*) também possui grande aplicação na solda de tanques de combustível, mas está restrita a componentes simétricos de solda secundária, como por exemplo, na solda de botões de fixação do defletor de calor.

2.6 Princípios Básicos da Solda de Tanques de Combustível

Segundo NATROP (1999), o método de solda por placa de aquecimento tem como princípio básico o aquecimento por condução térmica associado à união sob pressão. Em termos de engenharia de processamento, este é um método de múltiplas fases, já que os processos de aquecimento e união são subseqüentes. Conforme apresentado na figura 2.6, este tipo de método por ser dividido em três fases essenciais:

- Pré-aquecimento e Aquecimento (*Premelt e Heating*);
- Movimentação das placas (*Change-over*);
- União e resfriamento (*Joining e Cooling*).

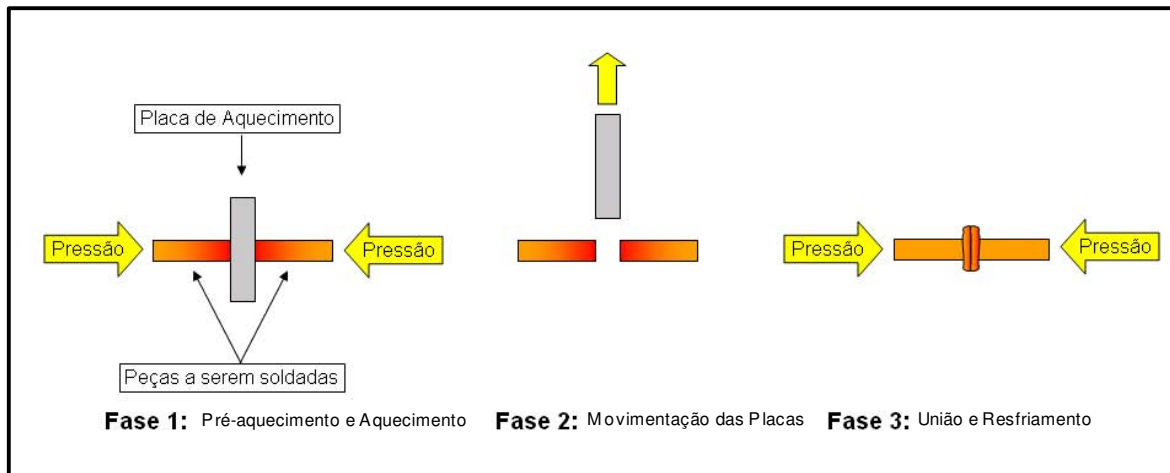


Figura 2.6: Fases do processo de solda por placa de aquecimento (Adaptado de NATROP, 1999).

Além das fases apresentadas na figura 2.6, dependendo da necessidade do produto, tem-se uma fase inicial conhecida como “preparação de superfície”, cujo objetivo é eliminar qualquer impureza, que possa prejudicar a solda dos componentes a serem soldados. Essa fase consiste na usinagem ou limpeza com solvente da superfície a ser soldada. Por exemplo, no caso de tanques de combustível fluoretados, a superfície a ser soldada é usinada com o intuito de retirar a camada com flúor, já que este dificulta a solda de componentes de polietileno, podendo ocasionar uma solda inadequada e, conseqüentemente, gerar vazamentos.

Na fase de pré-aquecimento, também conhecida por *Premelt* ou *Matching*, os componentes são pressionados contra as placas de aquecimento (*hot plates*) durante um determinado período ou deslocamento, com o objetivo de melhorar a planicidade das regiões a serem soldadas, criando assim boas condições de solda.

Na figura 2.7, destacado em vermelho, pode se observar a pressão e o deslocamento da superfície de solda usualmente utilizados nesta fase. Nota-se que o valor de pressão é mais elevado nesta fase, já que o intuito é melhorar a planicidade dos componentes a serem soldados no menor tempo possível. Já o deslocamento crescente explica-se pelo próprio aquecimento das superfícies a serem soldadas, já que estas começam a fundir e se deslocar devido a pressão aplicada.

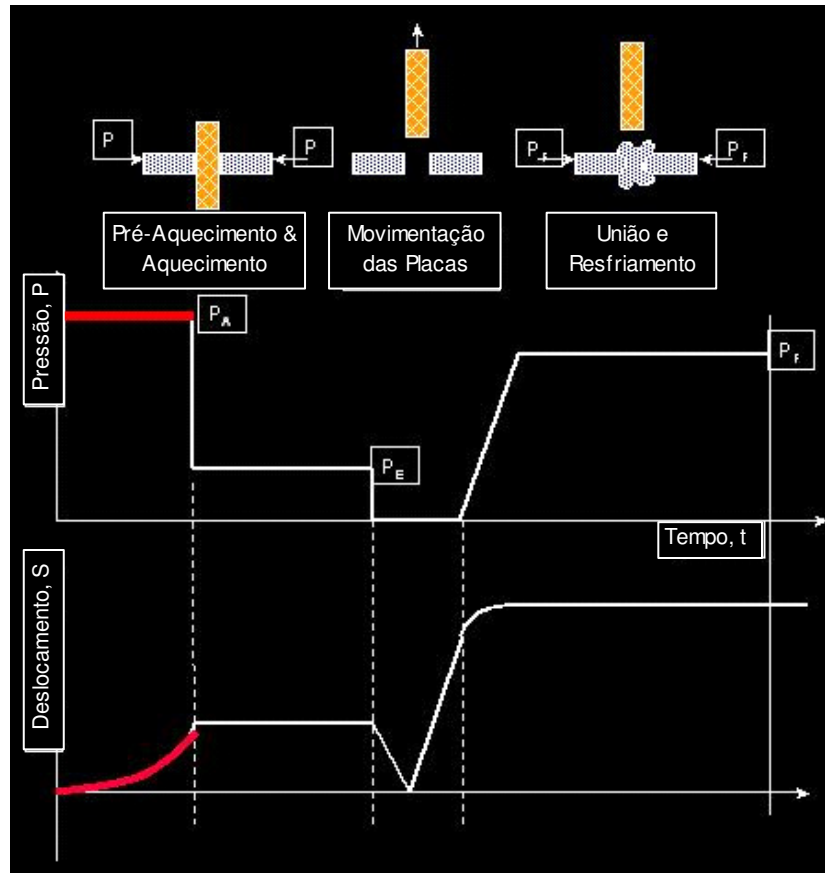


Figura 2.7: Solda por Placa de Aquecimento – *Matching* (Adaptado de NATROP, 1999).

A duração desta etapa depende da temperatura da placa de aquecimento (*hot plate*) e da pressão utilizada. Os valores de pressão de pré-aquecimento mais utilizados para estão compreendidos entre 0.1 e 0.5 N/mm². Em alguns casos, com o intuito de evitar a flexão da

superfície de solda, a utilização de valores próximos ao limite superior deve ser evitada (EWI, 2002).

A alta compressão do componente na placa de aquecimento também otimiza o tempo necessário para transferência de calor, sendo este um fator positivo quando se busca produção em massa.

A figura 2.8 mostra o efeito da pressão e temperatura no tempo de aquecimento dos componentes, cujas irregularidades de superfície sejam inferiores a 1mm. Sabendo que os valores mais utilizados estão compreendidos entre 0.1 e 0.5 N/mm², pode-se deduzir que o tempo de pré-aquecimento pode variar entre 15 e 25s.

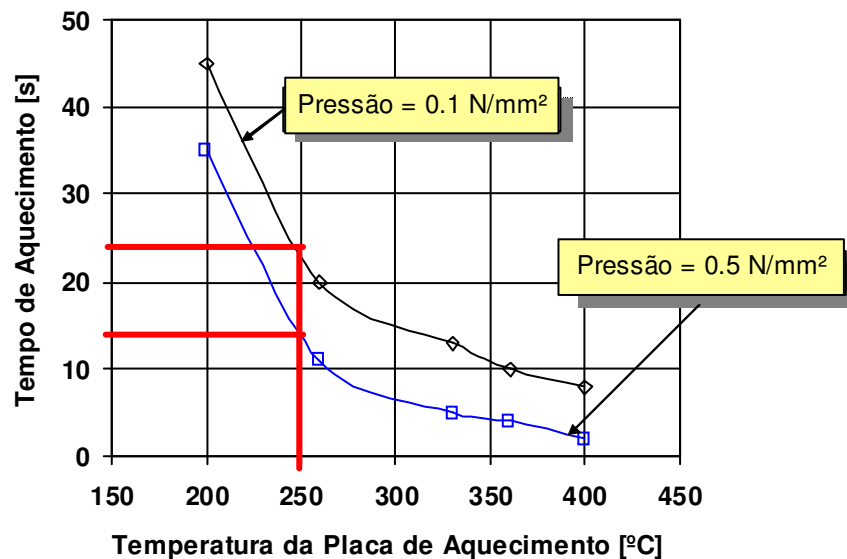


Figura 2.8: Tempo de Aquecimento vs. Pressão (Adaptado de EWI, 2002).

Conforme apresentado na linha demarcada em vermelho da figura 2.9, durante a fase de aquecimento, a pressão é reduzida a níveis bem baixos, chegando, em alguns casos, efetivamente a zero. Deste modo, a transferência de calor obtém uma maior penetração e se evita o deslocamento do material fundido.

O aquecimento ocorre durante um tempo pré-determinado, com o intuito de permitir a formação de uma zona fundida de espessura pré-determinada. A profundidade da zona fundida depende da espessura da menor região de solda. Assim, pode-se dizer que quanto maior a espessura da região de solda, maior deve ser a zona fundida para garantir uma solda de boa qualidade.

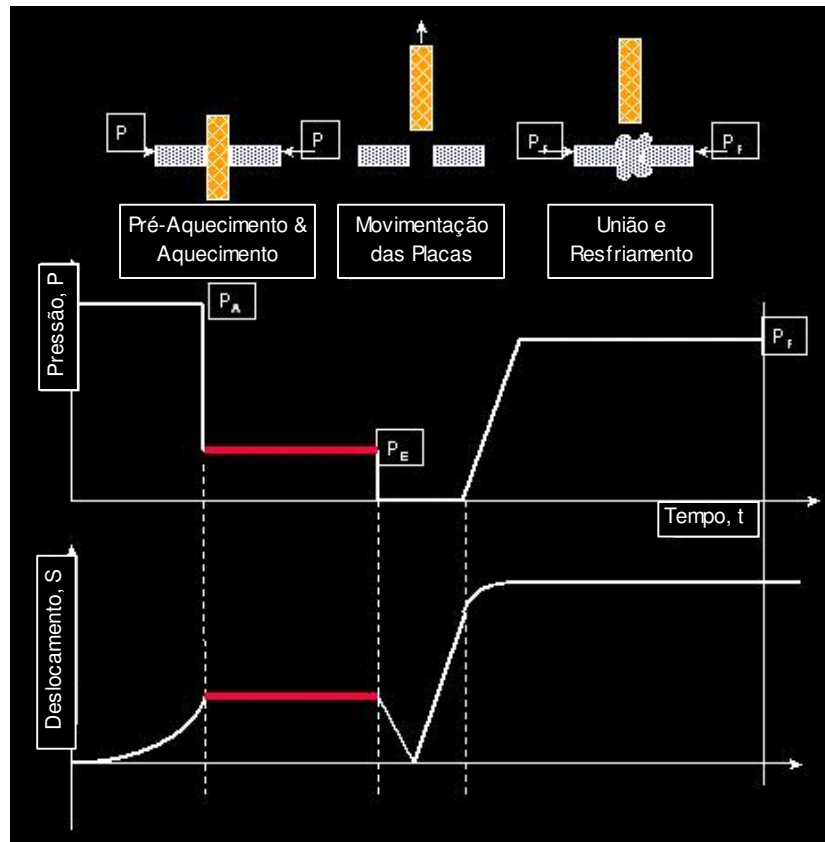


Figura 2.9 Solda por Placa de Aquecimento – *Heating* (Adaptado de NATROP, 1999).

De acordo com a figura 2.10, para um corpo de prova com resistência original de 20,52 MPa, um mínimo de 2,5mm de zona fundida, considerando as duas superfícies de contato, é necessário para se obter uma solda com a maioria da resistência exibida pelos componentes originais (POOPAT et al.,1999).

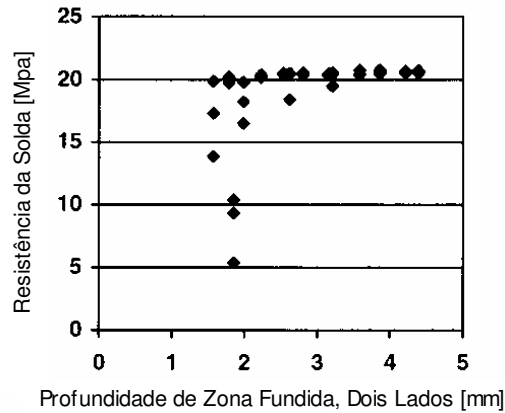


Figura 2.10: Profundidade de Zona Fundida vs. Resistência de Solda (POOPAT et al.,1999).

Assim como na a fase anterior, a duração desta etapa depende da temperatura da placa de aquecimento (*hot plate*) e profundidade de zona fundida pretendida. Conforme mostra a figura 2.11, para se obter uma zona fundida de 2,5 mm em 30 segundos, seria necessário a utilização de uma placa de aquecimento a 275 graus Celsius.

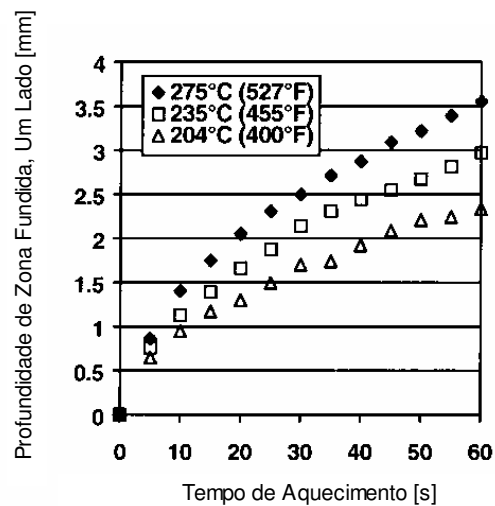


Figura 2.11: Profundidade de Zona Fundida vs. Temperatura (POOPAT et al., 1999).

POOPAT et al. (1999) sugere a seguinte relação entre profundidade de zona fundida, temperatura de placa de aquecimento e tempo de aquecimento:

$$\text{Profundidade de Zona Fundida (mm)} = CxT_{hp}x\sqrt{t} \quad (2.1)$$

Onde:

T_{hp} = Temperatura da placa de aquecimento [°C];

t = Tempo de aquecimento [s];

$C = 0.0016$ (depende das propriedades do material utilizado, neste caso, o PEAD).

A fórmula 2.1, para um determinado tempo de aquecimento, mostra a relação direta entre a profundidade de zona fundida e a temperatura da *hot plate*.

Com o objetivo de minimizar os tempos de aquecimento, busca-se trabalhar com temperaturas elevadas nas placas de aquecimento, mas muita atenção é necessária, já que o polietileno degrada a partir de certo nível (~250°C), gerando assim, soldas de má qualidade.

Após o aquecimento, os componentes são afastados das placas de aquecimento, a placa é retraída e os componentes são pressionados um contra o outro. O tempo decorrente entre o momento em que os componentes deixam de tocar as placas de aquecimento e o contato entre eles é conhecido como “*change-over time*” ou tempo de abertura dos cabeçotes de solda. Com o intuito de evitar um excesso de resfriamento das superfícies de solda e uma possível solda de má qualidade, é desejável minimizar este tempo ao máximo. Este tempo é especialmente crítico em operações manuais ou semi-automáticas. Como mostra a região demarcada em vermelho da figura 2.12, a pressão exercida nesta etapa é zero.

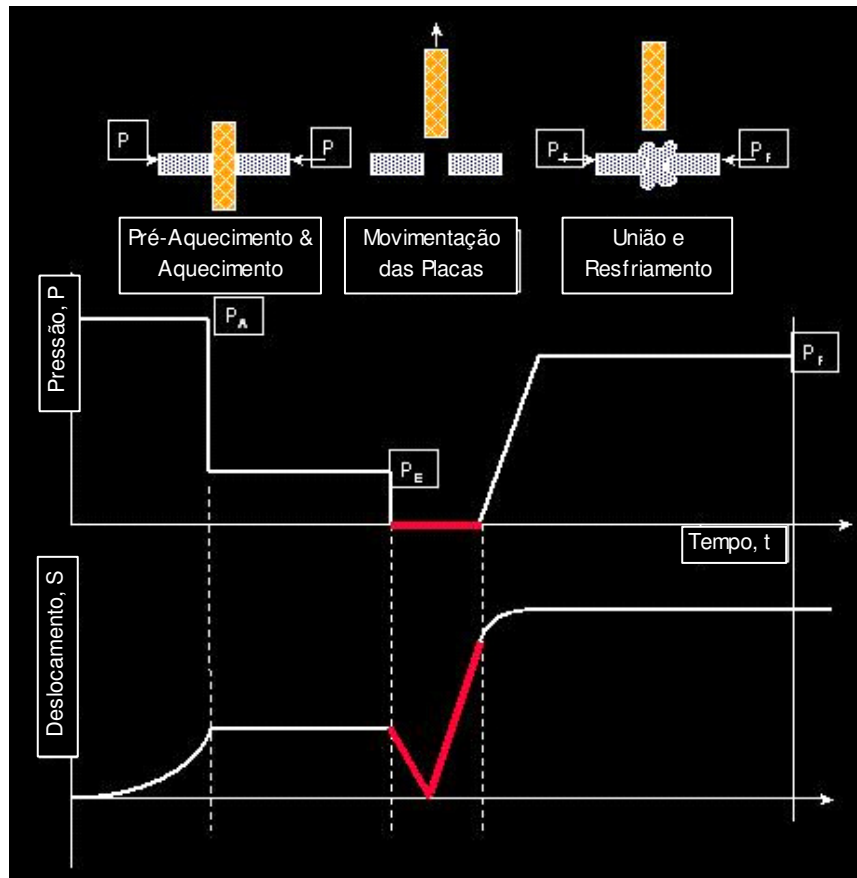


Figura 2.12: Solda por Placa de Aquecimento - *Change-over* (Adaptado de NATROP, 1999).

Conforme mostra a figura 2.13, durante a fase de fusão, os componentes são lentamente colocados em contato até que uma pressão pré-determinada seja atingida. Alguns modelos de máquina de solda mantêm a pressão de união até um resfriamento mínimo da região de solda. Há modelos que fazem uso de suportes mecânicos, os quais permitem que a pressão seja aplicada somente até o momento em que o cabeçote de solda atinja estes. Neste caso, o resfriamento ocorre enquanto os componentes estão presos nos suportes de solda. Segundo BENATAR et al. (2001), este tipo de *design* fornece um melhor controle dimensional para o produto final.

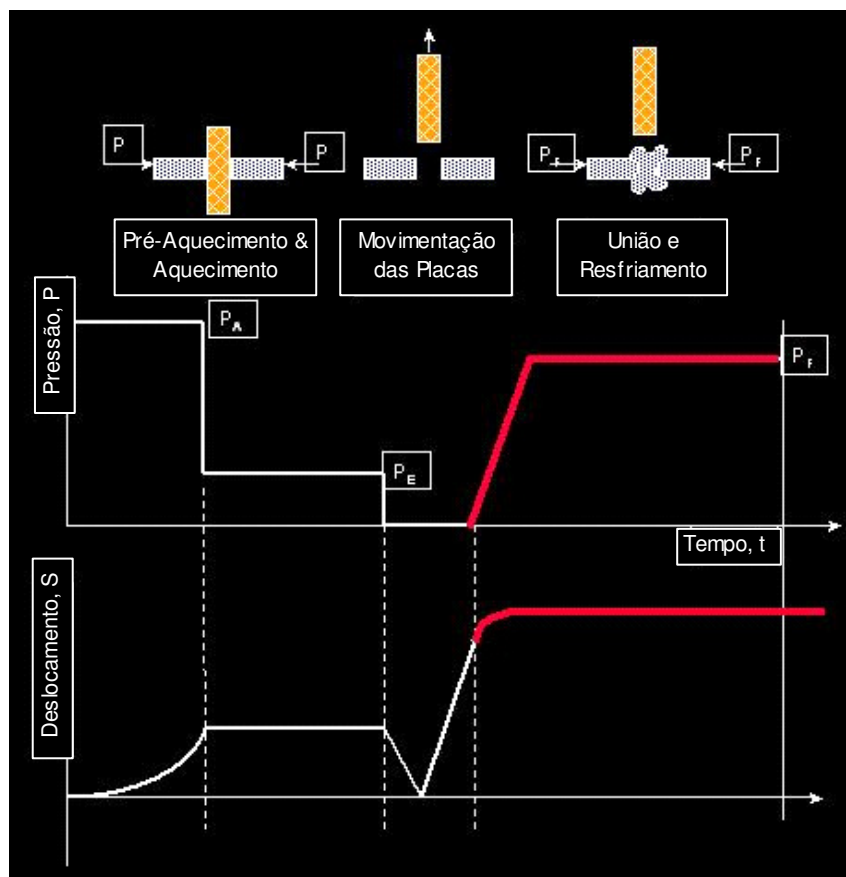


Figura 2.13 Solda por Placa de Aquecimento – *Fusion* (Adaptado de NATROP, 1999).

Os valores de pressão de fusão mais utilizados para esta fase estão compreendidos entre 0.1 e 0.3 N/mm² (NATROP, 1999).

A pressão de fusão é necessária para criar um fluxo de material fundido do núcleo para a região externa. Deste modo o material com melhores propriedades químicas estará presente na área de solda. Caso a pressão seja insuficiente, as condições ótimas para formação de uma solda com boa resistência não serão criadas. O oposto também é verdadeiro, ou seja, caso a pressão seja excessiva, toda a zona fundida será expelida da área de solda, gerando assim uma solda com pouca resistência (EWI, 2002).

Durante o tempo de fusão (ou resfriamento) o fundido presente na interface de contato solidifica-se e a solda é formada. A duração do tempo de fusão deve ocorrer até o momento que a

temperatura do material fundido atinja valores abaixo do ponto de cristalização do material (EWI, 2002).

Estudos revelam que a máxima resistência da solda é atingida quando o material fundido deslocado equivale a aproximadamente 75% da zona fundida (NATROP, 1999).

2.7 Equipamentos

Segundo BENATAR et al. (2001), na solda por placa de aquecimento as partes são aquecidas pela condução de calor através das superfícies em contato direto com as placas de aquecimento. Embora os equipamentos de solda, também conhecidos por acabadoras ou *downlines*, sejam customizados, os seguintes elementos são comuns para todas as aplicações:

- **Ferramenta de aquecimento:** Usualmente uma placa metálica cujo aquecimento ocorre através de resistências elétricas ou gás quente. A ferramenta é usinada de forma a manter o paralelismo entre as superfícies a serem soldadas. Esta é usualmente coberta com uma camada de politetrafluoretileno (PTFE) com o intuito de evitar que o material fundido grude na ferramenta. A vida útil desta camada, utilizando-se temperaturas inferiores a 250°C, é de aproximadamente seis meses.
- **Guias:** Com o intuito de prover a transmissão de força necessária aos componentes e o correto alinhamento durante as fases de aquecimento e fusão, os componentes a serem soldados e as placas de aquecimentos são montados em estruturas com guias.
- **Atuadores:** Atuadores pneumáticos, hidráulicos ou eletromecânicos são utilizados para mover a placa de aquecimento e os componentes, e prover as forças ou pressões desejadas.
- **Sistemas de fixação:** Os componentes e o tanque são fixados em berços montados às guias de movimento por uma variedade de métodos incluindo fixações a vácuo, pneumática, hidráulica, ou manual.

- **Controladores:** Um número de controladores é utilizado para garantir a repetibilidade da solda. Um ou mais controladores são utilizados para controlar a temperatura da placa de aquecimento. Controladores de pressão são utilizados para controlar a pressão aplicada aos atuadores. Frequentemente, controladores programáveis são utilizados para controlar o tempo de ciclo, bem como, incorporar dispositivos de segurança com interruptores de limite. Equipamentos de produção em massa podem ainda incluir sensores de força e deslocamento e capacidade para controle estatístico de processo.

2.8 Testes de Qualidade

BONAZZA & SIMON (1998) afirma que a qualidade da solda presente em tanques de combustível de PEAD deve ser medida através dos seguintes testes:

- Teste mecânico;
- Teste de aquecimento;
- Inspeção visual.

O teste mecânico e de aquecimento são destrutivos. A frequência do teste depende do nível de desenvolvimento do produto. Usualmente, no início de vida do projeto, a frequência adotada para testes destrutivos é de um teste a cada duas horas. Já os testes não destrutivos, no caso a inspeção visual, são realizados em 100% das peças.

2.8.1 Teste mecânico

A resistência da solda é determinada através da dobra, com um par de alicates, de seções de 1 a 2mm de espessura da região de solda, retirados a um intervalo de 90° graus. A aprovação somente ocorre caso não haja nenhuma falha na linha de solda.

A figura 2.14 mostra exemplos de peças aprovadas e rejeitadas no teste mecânico. As regiões reprovadas no teste estão marcadas com um círculo tracejado.

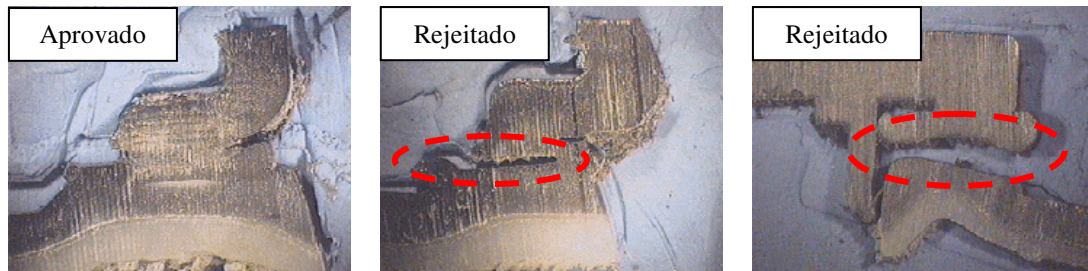


Figura 2.14: Amostras de Teste Mecânico (BONAZZA & SIMON, 1998).

Existem variações deste teste, como a utilização de máquinas de tração, onde as duas extremidades da solda são presas e tracionadas, bem como o teste de flor (*flower test*), no qual cortes, em todo o perímetro da solda, serão realizados até o lábio duplo, a intervalos de aproximadamente 10mm. As seções cortadas, também conhecidas como pétalas, são posteriormente dobradas com a utilização de alicates, realizando assim a tração mecânica entre os componentes soldados.

Independente da variação utilizada, o critério de avaliação é comum a todos.

2.8.2 Teste de aquecimento (*Heat test*)

No teste de aquecimento, seções de 1 a 2mm de espessura da região de solda são retiradas a cada 90°. As amostras devem ser limpas de rebarbas, provenientes da operação de corte, e com o auxílio de uma pistola de calor, estas devem ser aquecidas até a temperatura de fusão do plástico.

A figura 2.15 é uma foto de uma peça já testada. Como se pode observar, o aquecimento destaca a linha de solda e as zonas de aquecimento presentes no tanque e no componente, facilitando assim sua visualização. Deste modo, utilizando equipamento apropriado, a espessura destas fases pode ser medida em milímetros. A análise pode ser realizada a olho nu, mas o uso de lentes de aumento aumenta a acuracidade do teste.

A presença de zona de aquecimento não garante a qualidade da solda, mas sua ausência é um indicativo de solda com qualidade duvidosa, sendo necessário revisar o alinhamento entre as partes e os parâmetros de solda utilizados.

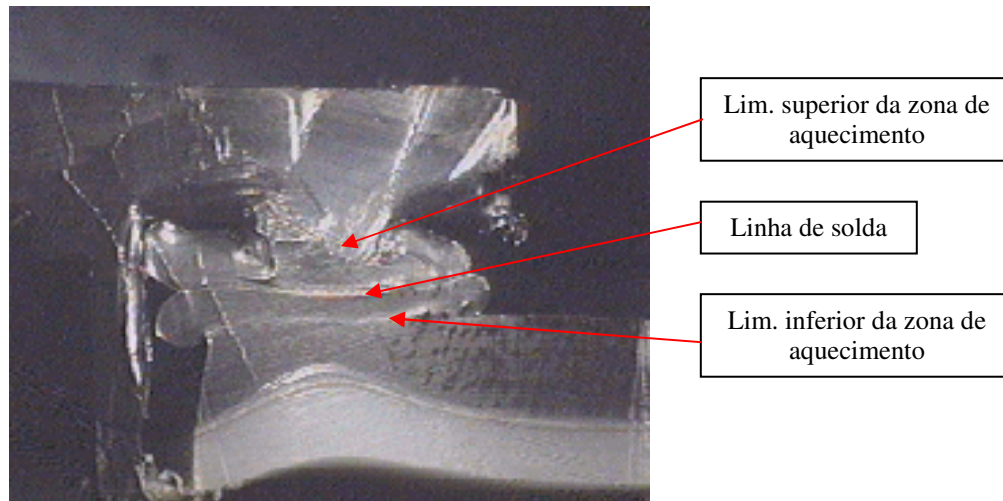


Figura 2.15: Amostras de Teste de Aquecimento (BONAZZA & SIMON, 1998).

2.8.3 Inspeção visual (Linha de solda)

Através do uso de um micrótomo, seções de 0,3 a 0,6 mm de espessura devem ser retiradas a cada 90° da região analisada. Com o auxílio de um microscópio, deve-se verificar a ausência de falhas na linha de solda. A presença das mesmas indica uma solda de baixa qualidade, conforme mostra as regiões marcadas com círculos tracejados na figura 2.16.

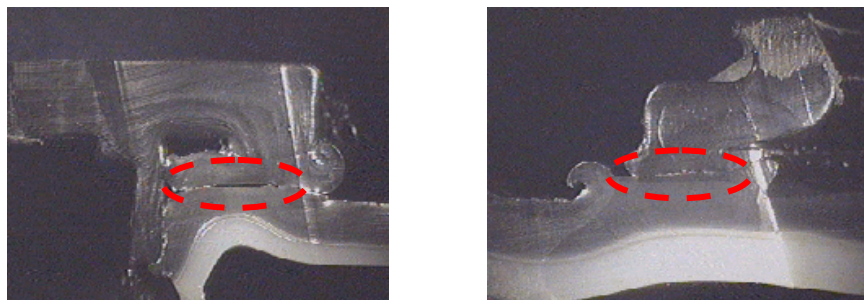


Figura 2.16: Amostra Inspeção Visual - Linha de solda rejeitada (BONAZZA & SIMON, 1998).

2.8.4 Inspeção visual (Lábio duplo)

Uma análise da seção de solda seccionada quanto à indicação de deslocamento de material fundido durante a fase de fusão também deve ser executada. Componentes de solda primária devem exibir presença de fluxo de material tanto no lado interior (contato com combustível), quanto no exterior, conforme mostra as regiões marcadas com círculos contínuos da figura 2.17. Tipicamente este pode ser evidenciado através da formação de um lábio duplo no perímetro de solda. Um exemplo de falta de lábio duplo pode ser observado na região demarcada com círculo tracejado da mesma figura.

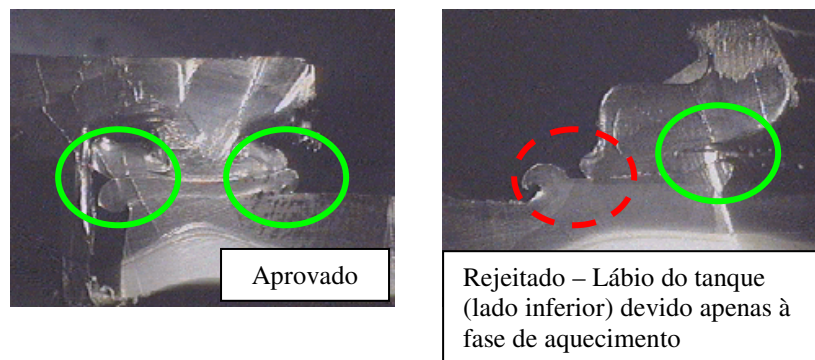


Figura 2.17: Amostra de Inspeção Visual - Lábio duplo (BONAZZA & SIMON, 1998).

Determinar a presença de lábio duplo é subjetivo, já que facilmente se confunde o deslocamento de material ocorrido durante a fase de aquecimento com o deslocamento ocorrido durante a fase de fusão. Deste modo, a presença de lábio duplo não garante a qualidade da solda, mas sua ausência é um indicativo de solda com qualidade duvidosa, sendo necessário revisar o alinhamento entre as partes e os parâmetros de solda utilizados.

2.9 Definição de *Design*

Desde a Revolução Industrial, a humanidade presenciou avanços tecnológicos e científicos jamais vistos, tais como: chips de memória, componentes eletrônicos microscópicos, descobrimento do DNA e outros.

Apesar destas e de outras brilhantes realizações, a humanidade está cercada por problemas sociais e tecnológicos que surgiram devido a falhas de projeto.

Estas falhas podem causar os seguintes danos:

- Risco de vida aos consumidores;
- Prejuízos decorrentes de ‘retrabalhos’, *downtime* e *recalls*;
- Redução de vida útil do produto;
- Atraso de lançamento de novos produtos; e outros.

Segundo SUH (2001), a causa de tantos erros de projeto na atualidade deve-se à falta de uma metodologia estruturada, na qual *design* é tratado de forma empírica, na base da tentativa e erro. Deste modo, têm-se como pressuposto que o desenvolvimento de projeto não é suscetível ao tratamento científico. Conseqüentemente, vem se baseando mais na experiência e características inatas do projetista, do que num rigoroso estudo científico.

A definição de *design* depende do contexto inserido ou do campo de interesse. Embora cada atividade faça uso de diferentes dados e práticas, elas compartilham várias características de projeto.

Conforme mostra a figura 2.18, uma vez entendida as necessidades do cliente pelo projetista, as mesmas devem ser transformadas num conjunto mínimo de especificações, as quais descreverão de forma objetiva e concisa o que deve ser buscado para satisfazer as necessidades do cliente. A solução deve descrever como as necessidades do cliente serão supridas.

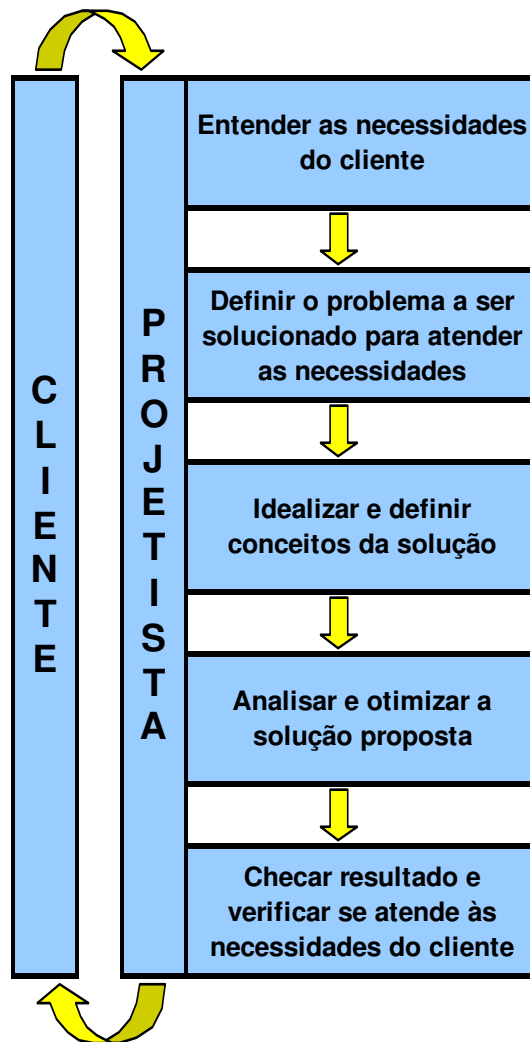


Figura 2.18: Fluxo de Etapas da Confeção de um Projeto.

Simplificando, de acordo com a figura 2.19, pode-se concluir que *design* é a relação entre necessidade e solução, ou seja, é a relação entre “O que se quer atingir” e “Como”.

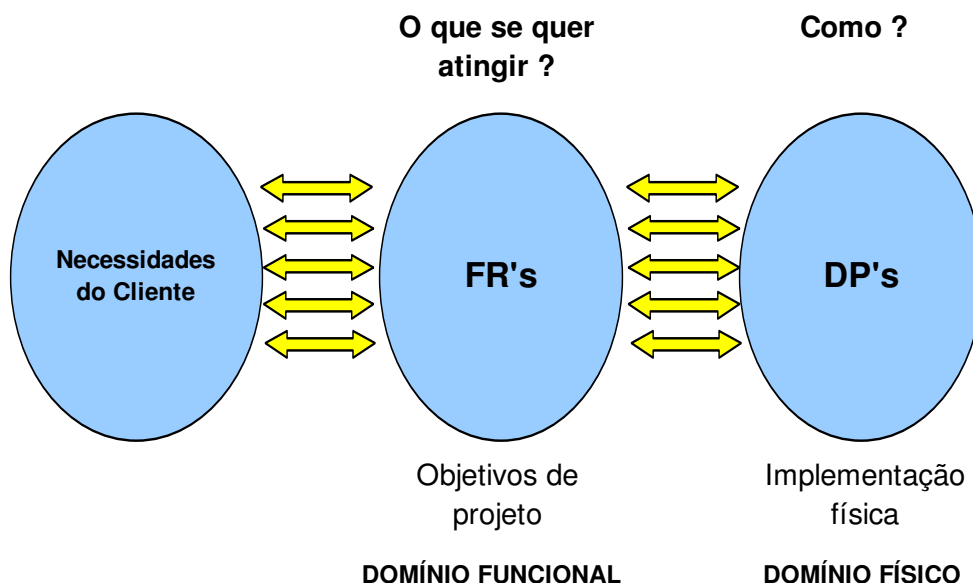


Figura 2.19: Metodologia do Processo de Projeto Axiomático (SUH, 2001).

2.10 Métodos de *Design*

Desde o passado, o *design* é executado de forma interativa, empírica e intuitiva, baseada unicamente na experiência, inteligência ou criatividade dos engenheiros. Este processo se baseia na tentativa e erro, consumindo assim muitos recursos até o lançamento do produto, podendo até inviabilizar o projeto. Outro problema recorrente é a falta de objetividade no desenvolvimento do projeto, onde a medida de sucesso era a comparação entre o projeto executado e o projeto “imaginado”, o que nem sempre convergia com as necessidades do cliente.

Fatores como experiência, inteligência e criatividade são importantes na geração de conhecimento e informação no processo de *design*, mas não são suficientes para a obtenção de um bom projeto. O resultado da utilização destes fatores em contextos diferentes é uma grande prova da insuficiência dos mesmos. Estes fatores devem ser suportados por uma metodologia. A

codificação e sistematização do conhecimento do *design* reduzem o tempo de desenvolvimento e permitem que soluções corretas sejam atingidas mais rapidamente.

SENGE (1990; apud TRUSCOTT, 2003) propõe três níveis de pensamento sistêmico – nível evento, nível padrão e nível estrutural. O pensamento de nível evento foca na reação sobre fatos que já ocorreram. O pensamento de nível padrão foca nas tendências e suas implicações. O pensamento de nível estrutural, o nível mais elevado, é direcionado à arquitetura do sistema como um todo, buscando compreender como os elementos interagem entre si, e como isso influencia os padrões.

A figura 2.20 é baseada nos três níveis de pensamento acima descritos. Os principais métodos e práticas de *design* são correlacionados com os níveis de pensamento, e com a progressão do processo de desenvolvimento de projeto, nos quais estes podem ser usualmente utilizados.

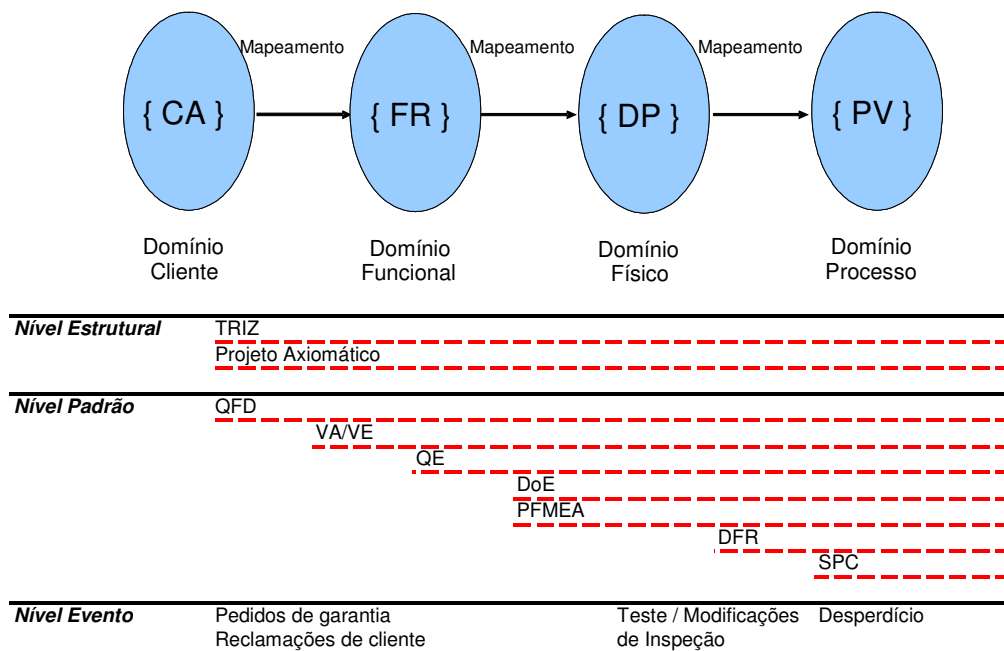


Figura 2.20: Modelo de Senge Aplicado ao Desenvolvimento de Projeto (TRUSCOTT, 2003).

Considerando apenas o nível estrutural, atualmente há duas metodologias principais para o desenvolvimento sistêmico de projeto:

1) Teoria da Solução Inventiva de Problemas (TRIZ)

Segundo SAVRANSKY (1996), a TRIZ foi elaborada por Genrich S. Altshuller na Rússia, o qual, com ajuda de colaboradores, analisou aproximadamente 1.500.000 de patentes. Seus princípios mais importantes são:

- Todos os sistemas de engenharia possuem uma evolução uniforme em direção ao ideal. Muitos outros sistemas (econômicos, educacionais, etc.) possuem a mesma tendência;
- Qualquer problema inventivo representa um conflito entre novos requerimentos e o sistema anterior.

A TRIZ compreende várias técnicas sistêmicas – Princípios Inventivos, Efeitos Químicos e Geométricos, Previsão de Tecnologia, etc. Baseado no conhecimento evolutivo do sistema, este método auxilia na busca de uma solução quase ideal para os problemas inventivos através da resolução das contradições existentes no sistema.

2) Projeto Axiomático

Segundo SUH (2001), há dois modos de lidar com *design*: através de axiomas ou algoritmos. Num mundo ideal, o desenvolvimento do conhecimento deveria iniciar-se com axiomas, passando pela criação de algoritmos, que resultariam em ferramentas ou métodos de produção. Entretanto, nos últimos anos, o desenvolvimento de algoritmos ocorreu sem os benefícios de princípios básicos.

Desta forma, o propósito do projeto axiomático é estabelecer uma base científica e melhorar o processo de desenvolvimento de projeto através do fornecimento de princípios, teorias e metodologias, permitindo assim uma melhor utilização da experiência e criatividade dos

projetistas. Ele baseia-se nas relações entre 4 domínios: cliente, funcional, físico e processo, as quais se baseiam em 2 axiomas: o da independência e o da informação.

2.11 Conceitos Básicos do Projeto Axiomático

A utilização de axiomas na resolução de qualquer problema inicia-se com a premissa de que há princípios gerais que governam o comportamento do sistema em estudo. O uso de axiomas no desenvolvimento de *design* é baseado na abstração das decisões e processos dos bons projetos. Através de um processo lógico e racional, SUH (2001) pôde identificar os elementos comuns a todos os bons projetos e resumi-los aos seguintes axiomas:

- **Axioma da Independência:** Manter a independência dos requisitos funcionais;
- **Axioma da Informação:** Minimizar o conteúdo de informação do *design*.

Além dos axiomas, a existência de domínios, o mapeamento das necessidades do cliente, a decomposição em “zig-zag” entre domínios, os teoremas e os corolários, são conceitos fundamentais ao projeto axiomático.

2.12 Conceito de Domínios

Resumidamente, pode-se definir design como a relação ou mapeamento entre “*o que se quer atingir*” e “*como atingir o resultado esperado*”. O conceito de domínios, o qual define as fronteiras entre as atividades presentes no processo de *design*, provêem uma importante base ao projeto axiomático, possibilitando a sistematização desta relação.

Segundo SUH (2001), o mundo do *design* é composto por quatro domínios, conforme a figura abaixo:

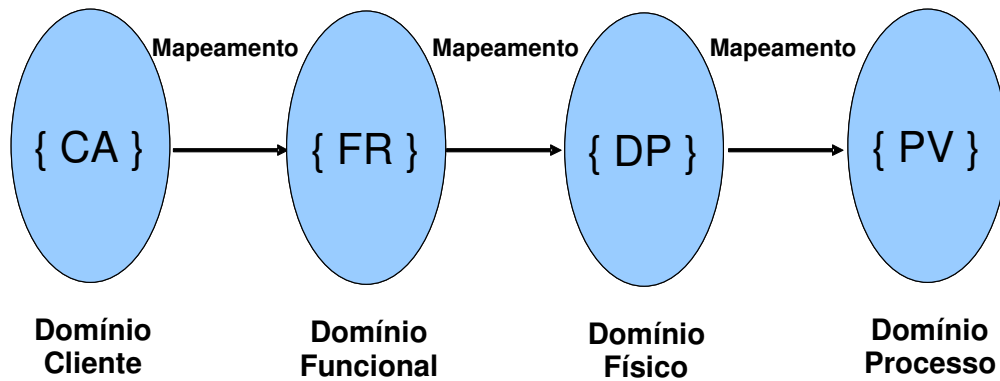


Figura 2.21: Domínios da Metodologia de Projeto Axiomático (SUH, 2001).

De acordo com a figura 2.21, pode-se afirmar que todo domínio à esquerda de outro representa os requisitos do projeto, ou seja, “o que se quer atingir”, sendo que o domínio relativo à direita deste representa a proposta de solução, ou seja, “como atingir o resultado esperado”. Os símbolos {x} são os vetores característica de cada domínio. Embora o processo de *design* seja realizado da esquerda para a direita, pode-se dizer que este ocorre de modo iterativo, ou seja, idéias surgidas no domínio da direita podem fazer com que haja a necessidade de reavaliação dos requisitos do domínio da esquerda.

O domínio cliente é caracterizado pelos atributos que o cliente procura em um determinado produto (*customer attributes*: [CAs]) . Observa-se que neste caso a palavra “produto” tem um sentido mais amplo, podendo significar um artigo, ou um processo, ou um sistema, ou um material. O domínio funcional é a tradução destas necessidades em termos de requisitos funcionais (*functional requirements*: [FRs]) e restrições (*constraints*: [Cs]). O domínio físico contém os parâmetros de *design* (*design parameters*: [DPs]) que satisfazem os requisitos funcionais especificados. Por último, o domínio processo é caracterizado pelas variáveis de processo (*process variables*: [PVs]) necessárias no processo de produção do produto especificado pelos parâmetros de *design*.

Segundo SUH (2001), devido à estrutura lógica do processo de *design*, a generalização destes princípios pode ser aplicada a todos os tipos de atividade, sendo que todo problema de *design* pode ser tratado e discutido dentro dos quatro domínios.

2.13 Definições

Segundo SUH (2001), a base da metodologia de projeto axiomático são os axiomas. Estes são válidos somente dentro dos limites estabelecidos pelas definições dos termos-chave abaixo:

- **Axioma:** verdade fundamental para qual não há contra provas ou exceções. Um axioma não pode ser derivado de outra lei ou princípio da natureza.
- **Corolário:** dedução derivada de axiomas ou de proposições derivadas de axiomas ou de proposições que foram provadas.
- **Teorema:** proposição não evidente que pode ser comprovada através de premissas ou axiomas deste modo estabelecendo uma lei ou princípio.
- **Requisito Funcional [FRs]:** é o mínimo conjunto de requisitos independentes que caracterizam completamente as necessidades funcionais do produto (ou software, organizações, sistemas etc.) no domínio funcional.
- **Restrições [Cs]:** são os limites das soluções admissíveis. Pode ser de dois tipos:
 - **Restrições de Entrada:** são impostas nas especificações do produto;
 - **Restrições de Sistema:** são impostas pelo sistema no qual a solução deverá funcionar.
- **Parâmetros de *Design* [DPs]:** são as principais características físicas no domínio físico que caracterizam o projeto que satisfaz as FRs especificadas.
- **Variáveis de Processo [PVs]:** são as principais variáveis no domínio de processo que caracterizam o processo que pode controlar as DPs especificadas.

2.14 Mapeamento

Uma vez identificado os atributos que o cliente busca em um determinado projeto, estes devem ser traduzidos em FRs. Esta operação deve ser executada em um ambiente neutro, ou seja, a definição dos FRs não pode ser influenciada por soluções existentes ou pré-determinadas.

Uma vez definidos, inicia-se o mapeamento no domínio físico com o intuito de conceber um projeto cujos DPs satisfaçam os FRs definidos anteriormente. O processo de mapeamento é do tipo uma entrada e muitas saídas, ou seja, para um dado FR, pode haver vários DPs que o satisfaçam. Desta forma, o objetivo é buscar um DP que não influencie outros FRs e que ao mesmo tempo obedeça às restrições de projeto.

Durante o mapeamento de processo de um conjunto de FRs do domínio funcional para o físico, as decisões de *design* devem ser baseadas no Axioma da Independência. Quando há muitas soluções que satisfazem o Axioma da Independência, o Axioma da Informação pode ser utilizado para a definição da melhor solução. Desta forma, sistemas com apenas um FR que possuem um DP aceitável sempre satisfazem o Axioma da Independência, necessitando apenas satisfazer o Axioma da Informação.

O postulado básico da utilização de axiomas no desenvolvimento de projeto é que há axiomas fundamentais que governam o processo de *design*. Dois axiomas foram identificados através da análise dos elementos comuns presentes em todo bom projeto.

O primeiro axioma é chamado de Axioma da Independência. Este define que a independência dos requisitos funcionais [FRs] deve ser sempre mantida, sendo que os FRs são definidos como o menor conjunto de requisitos independentes que caracterizam os objetivos de projeto. De acordo com a figura 2.22, o axioma da independência é aplicado no início do processo de *design*, onde se buscam as soluções possíveis para as necessidades do cliente.

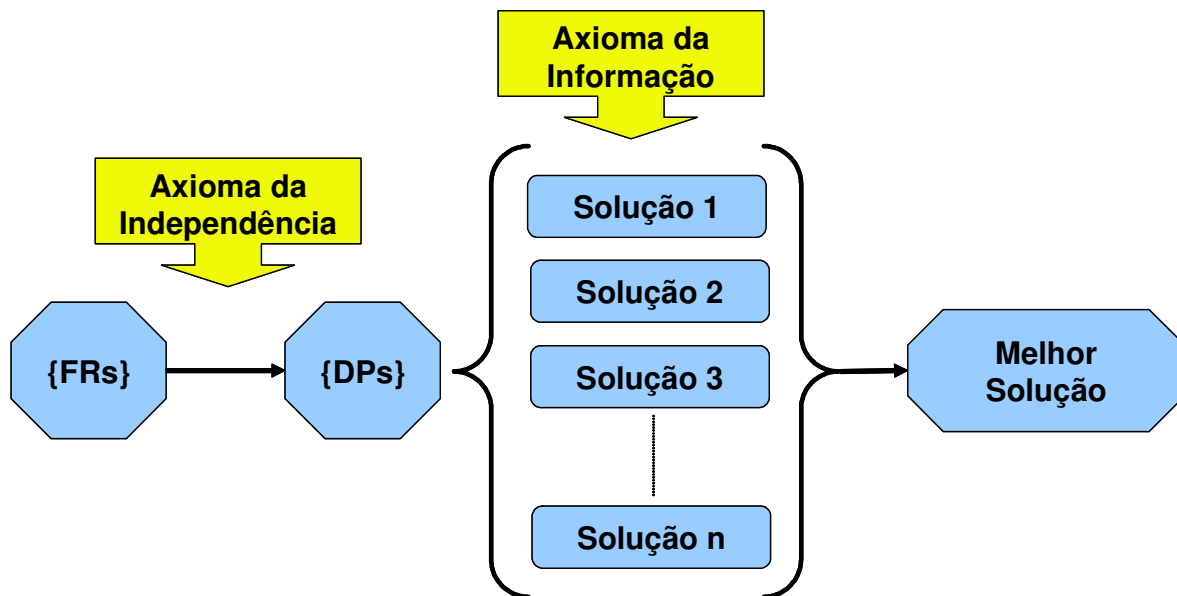


Figura 2.22: Axiomas do Processo de Projeto Axiomático.

O segundo axioma é chamado de Axioma da Informação, e define que dentre os projetos que satisfazem o Axioma da Independência, aquele que possuir o menor conteúdo de informação, é a melhor solução, conforme mostra a figura 2.22. Sabendo que o conteúdo de informação é definido em termos de probabilidade, pode-se afirmar também que o segundo axioma define que o projeto com melhor probabilidade de sucesso é aquele com a melhor solução. Deste modo, pode-se afirmar que o projeto ideal é aquele cujo valor de conteúdo de informação é zero, pois desta forma os requisitos de projeto seriam atingidos independentemente da ordem e/ou valores de suas variáveis (SUH, 2001).

2.15 Axioma da Independência

Um conjunto de FRs é a descrição dos objetivos de *design*. O Axioma da Independência estabelece que quando há dois ou mais FRs, a solução de projeto [DPs] deve satisfazer cada FR independentemente.

Baseado no conceito de domínios, a solução de *design* adequada a certo conjunto de FRs será obtida através do mapeamento entre os domínios funcional e físico. Durante este processo, é necessário definir DPs plausíveis para cada FR, o que, dependendo do número de FRs, pode tornar-se difícil, já que o Axioma da Independência não pode ser violado.

O processo de mapeamento entre domínios pode ser expresso de forma matemática, baseando-se nos vetores característica que definem os objetivos e soluções de *design*. Deste modo, em um dado nível do desenvolvimento do projeto, o conjunto de requisitos funcionais, que define os objetivos específicos de um determinado *design*, constitui o vetor {FR} no domínio funcional. Similarmente, o conjunto de parâmetros de *design*, que satisfaz estas FRs, constitui o vetor {DP} no domínio físico. A relação entre os dois vetores pode ser escrita da seguinte forma:

$$\{FR\} = [A] \{DP\} \quad (2.2)$$

Onde [A] é chamada de “Matriz de *Design*”, a qual relaciona os FRs e DPs e caracteriza o *design* do produto. Assim, dado um projeto com três FRs e três DPs, a matriz de *design* pode ser expressa da seguinte forma:

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Desta forma, utilizando a equação (1.2), os FRs podem ser expressos da seguinte forma:

$$FR_1 = A_{11}DP_1 + A_{12}DP_2 + A_{13}DP_3 \quad (2.4)$$

$$FR_2 = A_{21}DP_1 + A_{22}DP_2 + A_{23}DP_3 \quad (2.5)$$

$$FR_3 = A_{31}DP_1 + A_{32}DP_2 + A_{33}DP_3 \quad (2.6)$$

Generalizando tem-se:

$$FR_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} DP_j \quad (2.7)$$

Onde n = número de DPs

Há dois casos especiais de matriz de *design*: A matriz diagonal e a triangular. A matriz diagonal caracteriza-se por possuir todos $A_{ij} = 0$, exceto aqueles onde $i = j$.

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A matriz triangular caracteriza-se por possuir os valores acima ou abaixo da diagonal iguais a zero. Deste modo, pode haver dois tipos: Triangular Inferior e Triangular Superior.

$$\text{Triangular Inferior: } [A] = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\text{Triangular Superior: } [A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ 0 & A_{22} & A_{23} \\ 0 & 0 & A_{33} \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Segundo SUH (2001), para satisfazer o Axioma da Independência, a matriz de *design* ter que ser diagonal ou triangular. Quando a matriz de *design* $[A]$ é diagonal, cada FR pode ser satisfeito independentemente dos valores e ou seqüência de cada DP. Este tipo de *design* é chamado de “*Design* Desacoplado” (*Uncoupled design*). Quando a matriz é triangular, a independência dos FRs somente será atendida se os DPs estiverem numa determinada seqüência. Este tipo de *design* é chamado de “*Design* Semi-acoplado” (*Decoupled design*). Qualquer outra

forma de matriz de *design* é chamada de matriz cheia e gera um *design* do tipo “Acoplado” (*Coupled design*).

Os elementos da matriz de *design* [A] podem ser tanto constantes quanto funções. O projeto será caracterizado como linear se os elementos da matriz possuírem valores constantes, e de não-linear caso os valores sejam representados por funções.

Design do tipo acoplado possui vários problemas, já que as soluções obtidas são quase sempre únicas e com pouca robustez. Ou seja, o design deste tipo está suscetível às variações do ambiente em que está inserido, bem como às variações dos DPs. Deste modo, os FRs não serão plenamente satisfeitos.

2.16 Restrições

Além dos requisitos funcionais, uma solução de *design* proposta também deve atender fatores externos, ambientais e de processo. Esses fatores extras são conhecidos como restrições [Cs], já que provêm os limites das soluções de *design* admissíveis [DPs]. Diferentemente das FRs, as restrições não precisam ser independentes. Há dois tipos:

- Tipo Entrada (*Input*): são referentes aos objetivos gerais do projeto, ou seja, toda solução de *design* proposta deve obedecer a estas restrições.
- Tipo Sistema (*System*): são referentes a um *design* específico, ou seja, são resultados da escolha de uma determinada solução de *design*.

2.17 Decomposição

Quando há falta de detalhes no último nível do *design*, a equação de *design* obtida representa apenas uma intenção. Desta forma, é necessário decompor o último nível e obter o detalhamento necessário. Esse processo de decomposição, ou “zig-zag”, pode ser realizado

repetidas vezes, até a obtenção do detalhamento necessário. É importante frisar que independentemente da quantidade de níveis decompostos, todos devem manter a intenção de design do último nível.

Conforme mostra a figura 2.23, este processo pode ser simplificado da seguinte forma: dado um FR no domínio funcional, procura-se no domínio físico conceituar um projeto e determinar seu correspondente DP. Feito isso, retorna-se ao domínio funcional e se criam, no próximo nível, os requerimentos FR1 e FR2 que coletivamente satisfaçam o FR do nível superior. Estes requerimentos são os FRs do DP do nível superior. Deste modo, retorna-se ao domínio físico e se definem os parâmetros de design DP1 e DP2, os quais satisfaçam respectivamente os requerimentos FR1 e FR2. Este processo de decomposição continua até que o FR possa ser satisfeito sem necessidade de decomposições adicionais, ou seja, quando todos os níveis atingem seu estado final.

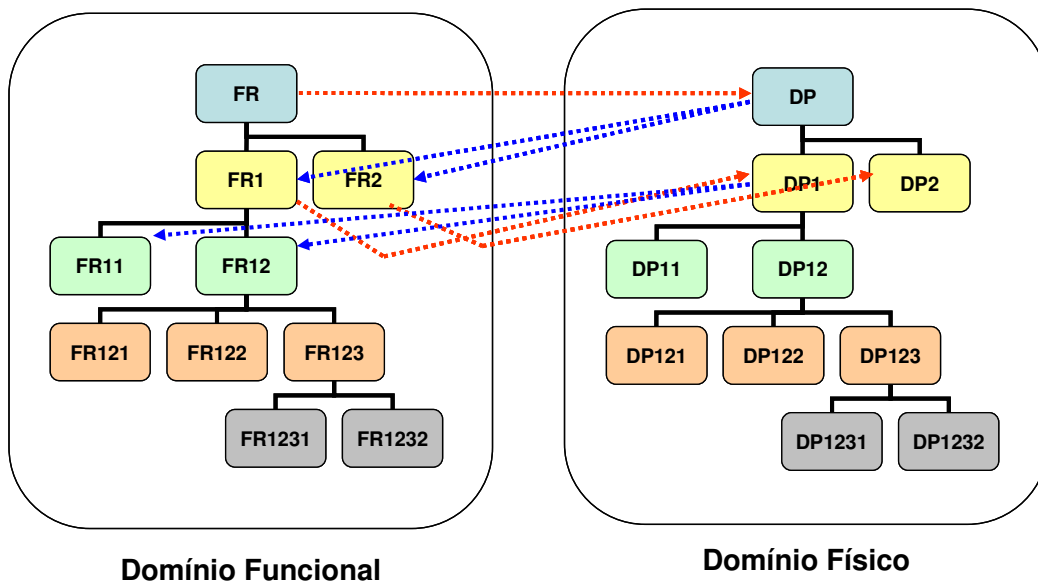


Figura 2.23: Exemplo do Processo de Decomposição.

2.18 Axioma da Informação

Segundo SUH (2001), diferentes projetistas desenvolverão soluções diversas para uma tarefa definida por um mesmo conjunto de FRs, sendo que todas estas poderão atender o Axioma da Independência. Entretanto, uma solução dentre todas será a melhor. O Axioma da Informação provê uma medida quantitativa do desempenho de um determinado projeto, sendo assim, uma ótima ferramenta de seleção. Além disso, o Axioma da Informação fornece a base teórica para o processo de otimização e robustez de projeto.

Dentre as soluções de projeto que são igualmente aceitas do ponto de vista funcional, uma destas será superior em relação às outras em termos de probabilidade de sucesso dos objetivos de *design* definidos pelos requisitos funcionais. O Axioma da Informação estabelece que o projeto com maior probabilidade de sucesso é a melhor solução.

Assim, também se pode afirmar que o axioma da informação está intrinsecamente relacionado ao conteúdo da informação do projeto, o que pode ser expresso pela seguinte fórmula:

$$I_i = \log_2 \frac{1}{P_i} = -\log_2 P_i \quad (2.11)$$

Onde:

I_i é o conteúdo de informação de um dado FR_i ;

P_i é a probabilidade de satisfazer FR_i .

No caso geral de m FRs, o conteúdo de informação para todo o sistema $[I_{sys}]$ pode ser expresso da seguinte forma:

$$I_{sys} = -\log_2 P_{\{m\}} \quad (2.12)$$

Onde:

$P_{\{m\}}$ é a probabilidade conjunta de satisfazer todos os m FRs do sistema.

Quando todos os FRs são estatisticamente independentes, como no caso de um *design* desacoplado, temos:

$$P_{\{m\}} = \prod_{i=1}^m P_i \quad (2.13)$$

Assim, I_{sys} pode ser expresso da seguinte forma:

$$I_{\text{sys}} = \sum_{i=1}^m I_i = -\sum_{i=1}^m \log_2 P_i \quad (2.14)$$

Quando todos os FRs não são estatisticamente independentes, como no caso de um *design* semi-acoplado, temos:

$$P_{\{m\}} = \prod_{i=1}^m P_{i\{j\}} \text{ para } \{j\} = \{1, \dots, i-1\} \quad (2.15)$$

Onde:

$P_{i\{j\}}$ é a probabilidade condicional de satisfazer FR_i dado que todo $\{\text{FR}_j\}_{j=1, \dots, i-1}$ correlato também seja satisfeito.

Neste caso, o I_{sys} pode ser expresso como:

$$I_{\text{sys}} = -\sum_{i=1}^m \log_2 P_{i\{j\}} \text{ para } \{j\} = \{1, \dots, i-1\} \quad (2.16)$$

O Axioma da Informação estabelece que o melhor projeto é aquele que possui o menor conteúdo de informação. Deste modo, o conteúdo de informação é zero quando todas as

probabilidades são iguais a 1, e é infinito quando a probabilidade de um ou mais FRs é igual a zero. Portanto, se a probabilidade é pequena, há necessidade de mais informações para satisfazer os requisitos funcionais.

Um projeto é complexo quando a probabilidade de sucesso é baixa, isto é, quando o conteúdo de informação necessário para satisfazer os FRs é alto. Esta característica pode ocorrer quando as tolerâncias são pequenas, exigindo grande precisão. Outro fator determinante é a quantidade de subsistemas que compõem um sistema, pois conforme o aumento desta quantidade, maior a probabilidade de um dos subsistemas não atender aos requisitos. Neste sentido, a medida quantitativa da complexidade de um sistema é o conteúdo de informação, pois sistemas complexos exigem mais informação para fazer o sistema funcionar.

Capítulo 3

Método e Materiais

3.1 Introdução

Neste capítulo, primeiramente é apresentado o planejamento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, são detalhados todos os materiais e equipamentos utilizados ao longo da realização deste estudo.

3.2 Metodologia científica

Por se tratar de um estudo cuja concepção e implementação será realizada em estreita associação com a resolução de um problema coletivo, no caso a análise de *design* de um processo de solda de tanques soprados, no qual pesquisador e participantes representativos estarão envolvidos de modo cooperativo e participativo, o procedimento técnico escolhido é o de pesquisa-ação.

Segundo GIL (1996), na pesquisa-ação, diferentemente de outros tipos de pesquisa, não é possível distinguir uma ordenação cronológica de suas etapas, já que ocorre uma constante intersecção entre as mesmas. Esta característica é principalmente determinada pela dinâmica do relacionamento, presente durante toda a pesquisa, entre os pesquisadores, os grupos interessados e o objeto de estudo.

Deste modo, o que se pode apresentar é um conjunto de ações que, embora não ordenadas cronologicamente, podem ser consideradas como etapas. São elas:

- Fase Exploratória;
- Formulação do Problema;
- Construção de Hipóteses;
- Realização do Seminário;
- Seleção de Amostra;
- Coleta de Dados;
- Análise e Interpretação de Dados;
- Elaboração do Plano de Ação;
- Divulgação dos Resultados.

THIOLLENT (2004) propõe doze etapas para a pesquisa-ação, mas por não ter sido encontrada diferença significativa entre as duas propostas de estrutura que justificasse seu uso, o modelo proposto por GIL (1996) será utilizado e sempre que possível, com a explanação de como o método foi adequado à prática da pesquisa.

3.2.1 Fase Exploratória

Esta fase tem como objetivo identificar e compreender o contexto no qual o pesquisador e a pesquisa estão inseridos, bem como as expectativas dos grupos interessados e o tipo de auxílio que estes podem oferecer ao longo do processo de pesquisa.

Nestes termos, foi verificada a presença de um pesquisador (o autor desta dissertação), bem como sua capacidade em utilizar a metodologia de design axiomático em uma máquina de solda de componentes plásticos. Os grupos interessados, representados principalmente por engenheiros e técnicos da área de manufatura e tecnologia de tanques soprados, puderam colaborar com o conhecimento técnico e prático do processo estudado. A viabilidade da pesquisa foi totalmente confirmada, já que havia total reciprocidade e apoio entre o pesquisador e os grupos em efetuar o trabalho.

3.2.2 Formulação do Problema

O objetivo desta etapa é garantir que o problema seja definido com a maior precisão possível. Além disso, vale ressaltar que, diferentemente da pesquisa clássica, uma proposta de resolução para o problema encontrado também se faz necessária.

Deste modo ficou definido que o tema consiste na utilização da metodologia de projeto axiomático como ferramenta analítica para verificação e correção de um *design* no processo de solda de tanques de combustível soprados.

3.2.3 Construção de Hipóteses

Como o próprio nome diz, esta fase caracteriza-se pela criação de hipóteses. Segundo THIOLENT (2004), neste tipo de pesquisa, não é necessário um controle rígido da hipótese. Esta deve estar presente mais como um elemento de delineamento do que meta propriamente dita.

Assim a hipótese definida é:

- A metodologia de projeto axiomático pode ser utilizada como ferramenta analítica de um *design* já definido.

Uma reflexão sobre esta hipótese pode ser encontrada na conclusão.

3.2.4 Realização do Seminário

A realização do seminário tem como meta reunir os principais pesquisadores e representantes significativos dos grupos de interesse, para que se possa propor, discutir e aprovar as diretrizes da pesquisa-ação.

Não se pode dizer que houve a realização de seminários nesta pesquisa, já que esta contou com a participação direta de um pequeno número de pessoas. Houve sim reuniões semanais,

normalmente com a participação de no máximo três pessoas, onde atividades como parametrização do problema, interpretação de dados, busca de soluções e definições de ações, foram propostas, discutidas e aprovadas. Esta interação entre o pesquisador e os grupos de interesse foi de fundamental importância no delineamento do projeto.

3.2.5 Seleção da amostra

THIOLLENT (2004) comenta que a delimitação do campo de observação empírica, no qual o tema de pesquisa se desenvolve, deve ser objeto de discussão entre os interessados e os pesquisadores.

Técnicas de amostragem e representatividade devem ser utilizadas quando o tamanho do campo delimitado for muito grande, o que não foi o caso do presente estudo.

A seleção do campo foi feita através da utilização do critério de intencionalidade. Segundo GIL (1996), uma amostra intencional, cujos indivíduos foram selecionados a partir de certas características tidas como relevantes pelo pesquisador e colaboradores, mostra-se mais adequada para a obtenção de dados de natureza qualitativa; o que é o caso da pesquisa ação. Deste modo foi escolhida uma máquina de solda cujo índice de rejeito e *downtime* (tempo de parada) eram elevados. Os colaboradores escolhidos foram aqueles que tinham conhecimento técnico das particularidades do processo e/ou da máquina.

3.2.6 Coleta de Dados

Tendo como base as diretrizes originadas pelos seminários, a coleta de dados foi efetuada utilizando-se a técnica de entrevista individual aplicada de modo aprofundado. Com respeito à informação, também foram utilizados documentos e dados já existentes.

3.2.7 Análise e Interpretação dos Dados

Neste estudo, a análise e a conseqüente interpretação dos dados ocorreram através de discussões entre os colaboradores e o pesquisador sobre os dados obtidos.

3.2.8 Elaboração do Plano de Ação

THIOLLENT (2004) considera que para atingir seus objetivos a pesquisa-ação deve se concretizar em alguma forma de ação planejada, que indique com precisão o objeto de análise, a definição da ação e a avaliação das suas conseqüências. Deste modo, a elaboração do plano de ação consiste em definir o seguinte:

- Quem são os atores ou as unidades de intervenção?
- Como se relacionam os atores e as instituições: convergência, atritos, conflito aberto?
- Quem toma as decisões?
- Quais são os objetivos tangíveis da ação e os critérios de sua avaliação?
- Como dar continuidade à ação?
- Como assegurar a participação da população e incorporar sugestões?
- Como controlar o conjunto do processo e avaliar resultados?

Na presente pesquisa, pode-se afirmar que os principais atores foram os engenheiros e técnicos da área de sopro de tanques e o próprio pesquisador, já que este além de desempenhar um papel de consultor, também teve um grande envolvimento e responsabilidade para com os resultados. O relacionamento entre estes e a organização se deu de forma cooperativa, tendo a busca de soluções e entendimento do problema como metas comuns.

Os atores principais foram os responsáveis pelas decisões sobre as ações necessárias para a correção e melhoria do processo de solda, mas toda e qualquer intervenção que alterasse de forma

drástica o processo vigente, só era colocada em prática tendo a permissão da alta gerência da organização.

A participação dos colaboradores, bem como suas sugestões, foi conseguida através de reuniões semanais, onde se discutiam tópicos definidos pelo pesquisador. A continuidade da ação se deu através da integração do conhecimento adquirido na pesquisa nos documentos de controle de processo, tais como folhas de operação, procedimentos de troca de ferramentas (*setup*) e especificações de máquinas.

A avaliação dos resultados e seu controle foram feitos através do acompanhamento dos índices de rejeito e *downtime* do objeto de estudo, traduzidos em “eficiência de *design*”, no caso um processo de solda de uma célula de produção de tanques de combustível soprados.

3.2.9 Divulgação dos resultados

Para THIOLLENT (2004), além do retorno da informação aos grupos participantes, também é possível, mediante acordo prévio entre os mesmos, divulgar a informação externamente em diferentes setores interessados.

Acredita-se que a presente dissertação, por si só, com o intuito de restituir a informação necessária para permitir um efeito de “visão de conjunto”, que não é possível ao nível da simples captação de informação, já fez a divulgação externa.

3.3 Material e equipamento

Os tanques de combustível utilizados na análise foram confeccionados, através do processo de moldagem por extrusão e sopro, numa máquina de coextrusão contínua da marca alemã Krupp-Kautex, modelo KSB 2-241/120-D-COEX, fabricada em 1996, com duplo porta molde e capacidade total de extrusão de 1.100 kilos/hora através de seis extrusoras.

Este modelo de máquina é originalmente concebido para soprar tanques multicamadas (COEX), sendo que há uma extrusora para cada tipo de material. A máquina utilizada possui duas extrusoras de diâmetro grande ($\Phi 150\text{mm}$), uma de diâmetro mediano ($\Phi 90\text{mm}$) e três de tamanho pequeno ($\Phi 60\text{mm}$), identificadas pelas letras: A, B, C, D, E e F, respectivamente.

Devido ao fato do processo analisado focar em um produto de camada única (*monolayer*), ou seja, composto por apenas um tipo de plástico, apenas as extrusoras A, B e C foram utilizadas. Na figura 3.1 se pode observar uma foto do equipamento referido. A área demarcada mostra a localização das extrusoras utilizadas. A figura 3.2 mostra o movimento do porta-moldes no modo de operação *double clamp*, ou moldagem dupla.



Figura 3.1: Máquina de Sopro Krupp-Kautex, modelo KSB 2-241/120-D-COEX

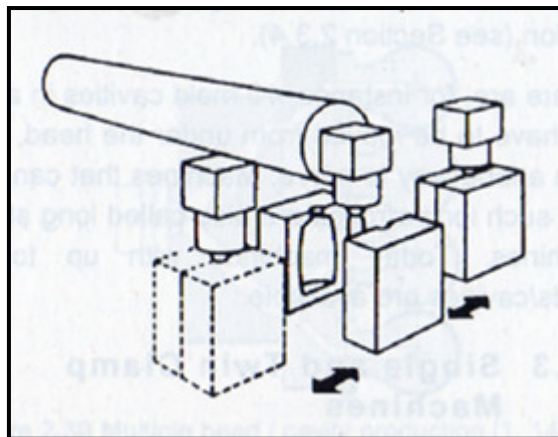


Figura 3.2: Operação de *Double-Clamp* (THIELEN, 2001).

O material utilizado no processo de sopro foi o polietileno de alta densidade (PEAD) GM7746, fabricado pela petroquímica Ipiranga. Utilizou-se também, em menor quantidade, o pigmento preto composto por 50% de PEAD e 50% de negro de fumo, da marca Cromex. A proporção de utilização de cada material foi de 99,5% e 0,05% respectivamente.

Cada produto soprado possuía um peso da ordem de 5,400 kilogramas, sendo que a mangueira de fundido (parison) possuía um peso da ordem de 7,900 kilogramas. A espessura de parede do produto soprado varia entre 3 e 9 mm, dependendo da região avaliada.

Após o processo de sopro, todo tanque foi colocado na máquina de resfriamento a ar, da marca canadense Sherdil Precision Inc., com capacidade para 12 tanques/ciclo. Para tanto há doze estruturas de calibração, também conhecidas como calibradores, onde os produtos serão acomodados e pressurizados. Neste caso, o resfriamento será efetuado principalmente pela troca de ar no interior do produto e pela convecção com o ar livre. Variáveis como pressão de entrada e saída, temperatura do ar, regulagem dos calibradores e padronização dos mesmos e manutenção das borrachas de vedação têm grande influência na qualidade dimensional do produto, podendo assim influenciar a qualidade de operações subseqüentes.

O ciclo completo de resfriamento é da ordem de 16 minutos, mantendo os tanques pressurizados entre 0,3 e 0,5 bar a uma temperatura de 20 graus Celsius. Devido a forma de movimentação e abastecimento do tanque nas cavidades de resfriamento, este tipo de máquina é vulgarmente conhecido como “carrossel” de resfriamento. No primeiro quadro da figura 3.3 se pode observar uma foto da máquina mencionada, bem como o sentido de movimento dos calibradores (setas em vermelho). O segundo quadro da figura 3.3 mostra em detalhes um dos berços de calibração.

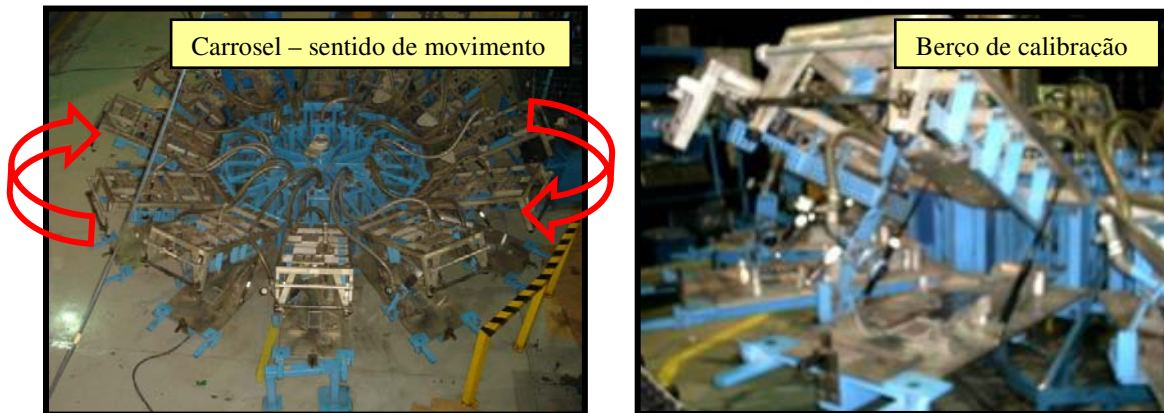


Figura 3.3: Máquina de Resfriamento a Ar Sherdil Precision.

O processo de solda foi executado numa máquina da marca canadense KVT, modelo 22194, fabricada em 1996. Conforme mostra a figura 3.4, esta máquina possui duas estações de solda, identificadas como estação 1 e 2 , onde as seguintes operações são realizadas:

- Estação 1
 - Usinagem do furo do *sending unit*;
 - Solda do *nipple* de enchimento;
- Estação 2
 - Usinagem dos furos do *nipple* de ventilação;
 - Solda do *nipple* de enchimento;

Na figura 3.4 também se podem observar as localizações dos cabeçotes de usinagem e solda da máquina mencionada.

Como o objetivo do presente estudo é analisar um processo já existente, não houve nenhuma simulação e/ou construção de amostras. Toda a análise foi baseada na condição real de produção, sendo que os dados necessários para a avaliação de *design* foram obtidos de relatórios de manutenção, processo e produção, bem como de manuais técnicos das máquinas utilizadas.

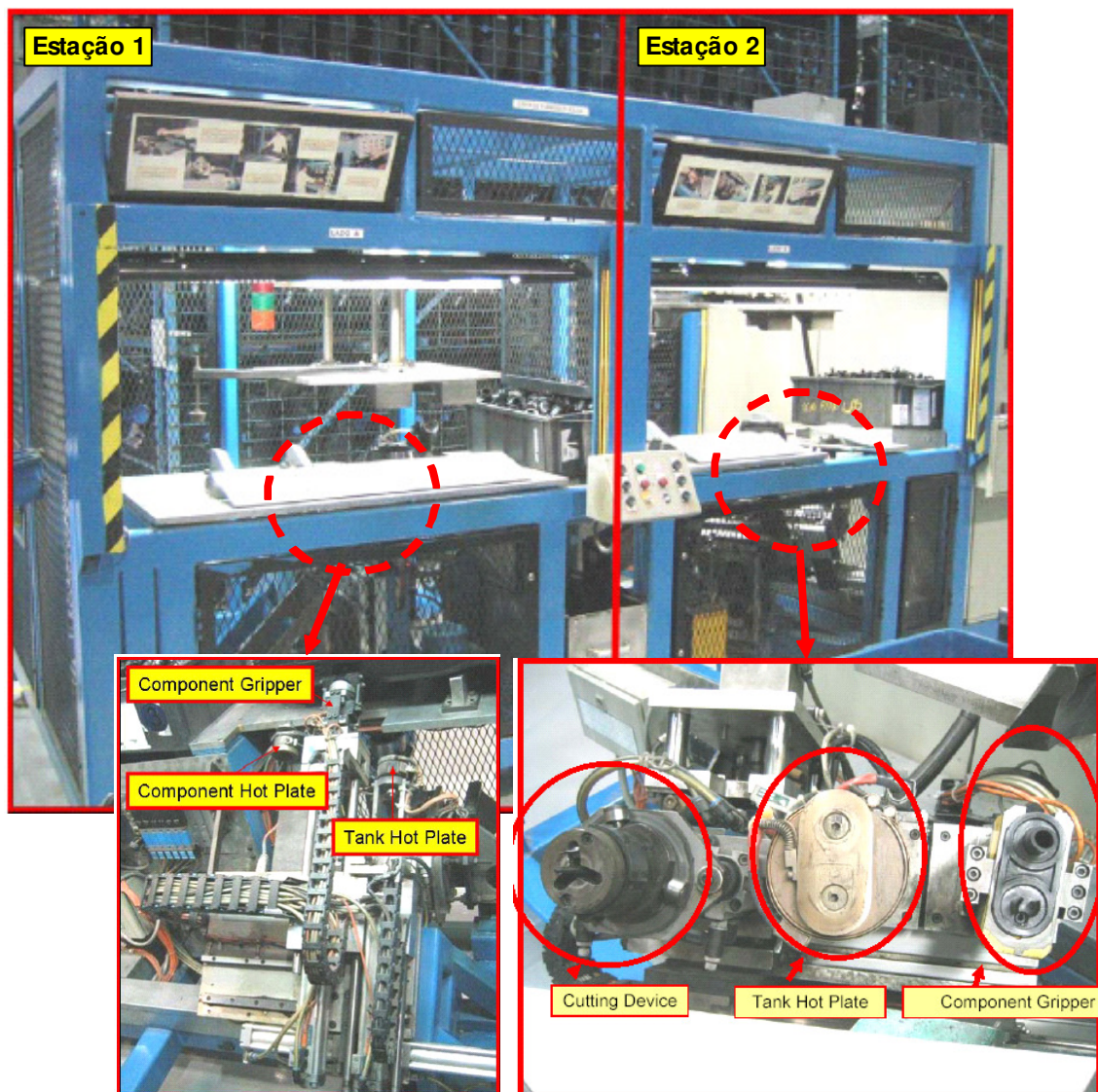


Figura 3.4: Máquina de solda KVT, modelo 22194.

Capítulo 4

Aplicação da metodologia

4.1 Introdução

Neste capítulo, a metodologia de projeto axiomático é utilizada com o intuito de auxiliar o entendimento de um processo de solda existente numa empresa localizada no Vale do Paraíba (Empresa VDP). Os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia de projeto axiomático irão orientar ações de melhoria no processo existente, a fim de torná-lo mais eficaz e produtivo.

4.2 Empresa VDP

O presente trabalho foi desenvolvido num processo de solda de uma empresa multinacional, localizada no Vale do Paraíba, entre os anos de 2005 e 2007. A empresa, a qual será nomeada VDP, produz componentes em polietileno de alta densidade (PEAD), através do processo de sopro-extrusão, para a indústria automobilística.

Altos tempos de parada (*downtime*), bem como um alto nível de rejeito (*scrap*), podem ser citados como as razões que motivaram a empresa VDP a incentivar uma alteração do processo vigente. A dificuldade de estabilização do processo e a constante necessidade de intervenção do departamento de manutenção levantaram a suspeita de que o *design* da máquina de solda poderia estar sendo um grande fator contribuinte da baixa eficiência deste processo.

A carteira de produtos da empresa VDP pode ser dividida em duas categorias: tanques de combustível e tubos de enchimento (*Filler pipes*), conforme mostra a figura 4.1.

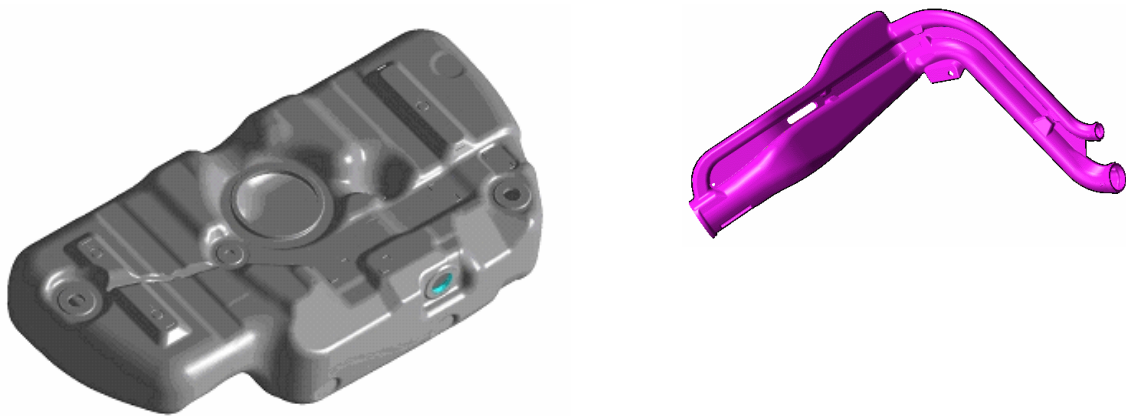


Figura 4.1: Exemplo de Tanque e Tubo de Enchimento

O presente estudo terá como foco principal o processo de solda de tanques de combustível, o qual, assim como o processo de fabricação de tubos de enchimento, possui as seguintes etapas básicas: sopro, solda e montagem. A figura 4.2 demonstra, em detalhes, o fluxo de produção do processo estudado. A análise se concentrará somente nas etapas de sopro e solda.

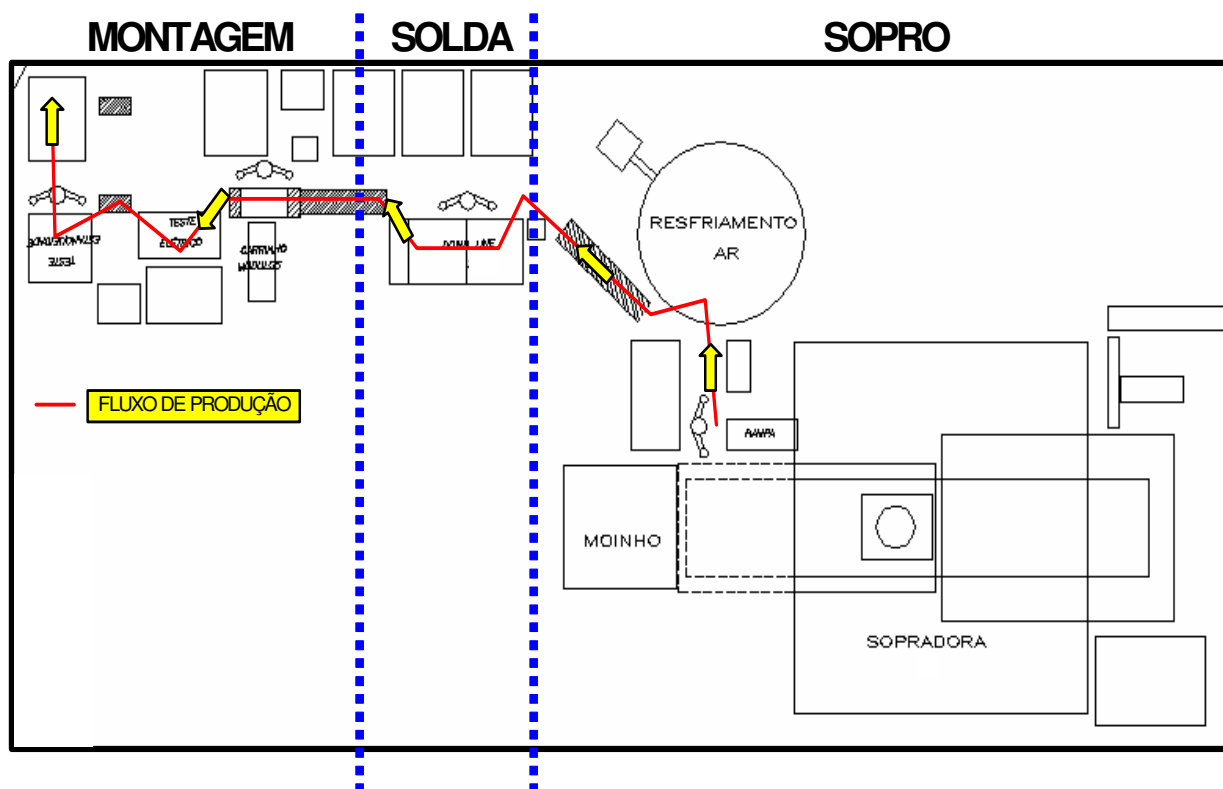


Figura 4.2: Fluxo de Produção.

4.3 Voz do cliente

A primeira etapa no processo de análise do processo de solda é entender as necessidades e restrições do cliente. Como se trata de um produto automotivo de alto risco de segurança, cujo objetivo é armazenar combustível, as seguintes necessidades devem ser atendidas:

- Ausência de vazamentos; e
- Baixa variação de processo.

Traduzindo a voz do cliente em requerimentos funcionais temos que:

FR1: Tanque soldado sem vazamentos, ou seja, tanque com solda aprovada nos testes de qualidade estabelecidos pela engenharia de produto.

Onde o parâmetro de design definido através de FR1 é:

DP1: Meios de produção existentes.

Baseando-se nas variáveis FR_1 e DP_1 , a seguinte equação de design pode ser escrita:

$$\{FR_1\} = [X] \{DP_1\} \quad (4.1)$$

Onde $[X]$ representa um elemento não nulo. Através da equação acima, pode-se concluir que o nível de informação presente é insuficiente para entendermos o processo vigente, já que a solução DP1 (Meios de produção) é muito abrangente. Desta forma, a FR_1 deve ser decomposta em mais um nível.

A decomposição e construção da matriz de *design* do processo de solda de tanques soprados visam primordialmente a análise do *design* da máquina de solda, bem como seu processo. Assim, com o intuito de simplificar e orientar este processo, as seguintes premissas foram tomadas:

- Não considerar variações no produto decorrentes de ajustes mecânicos e/ou alterações de parâmetros no processo de sopro;
- Não considerar variação nas propriedades químicas do material de sopro (PEAD).

Durante o processo de decomposição, houve uma grande preocupação em apenas “descrever” o *design* do processo vigente, evitando a interferência deste processo por “achismos” e conhecimento informal, bem como por práticas e técnicas de outros processos. Para tanto, o processo de decomposição foi baseado em dados técnicos da máquina e em práticas e informações consolidadas pela empresa.

O processo de decomposição seguiu o fluxo de produção e teve como foco três áreas macros: sopro, resfriamento e solda. Deste modo, pode-se averiguar a interferência dos processos subseqüentes ao processo de solda.

A decomposição do FR₁ (Tanque soldado sem vazamentos), considerando-se as restrições descritas anteriormente, fornece os seguintes FRs:

FR₁: Tanque soldado sem vazamentos

FR₁₁: Tanque com espessura de parede conforme especificação (> 3mm).

FR₁₂: Dimensional do tanque conforme especificação.

FR₁₃: Solda de boa qualidade.

Utilizando-se do processo de zig-zag, obtêm-se os seguintes DPs:

DP₁: Meios de Produção

DP₁₁: Sopradora.

DP₁₂: Sistema de resfriamento.

DP₁₃: Máquinas de solda (*downlines*).

A matriz de *design*, que relaciona as FRs e DPs provenientes da decomposição, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & O & O \\ X & X & O \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \end{Bmatrix} \quad (4.2)$$

As equações de *design* baseadas na matriz de design são:

$$FR_{11} = A_{11} \times DP_{11} \quad (4.3)$$

$$FR_{12} = A_{21} \times DP_{11} + A_{22} \times DP_{12} \quad (4.4)$$

$$FR_{13} = A_{31} \times DP_{11} + A_{32} \times DP_{12} + A_{33} \times DP_{13} \quad (4.5)$$

A matriz de *design* obtida é do tipo triangular, sendo assim, este processo é do tipo semi-acoplado. Quando a matriz é triangular, a independência dos FRs somente será atendida se os DPs estiverem numa determinada seqüência.

Pode-se observar que o fluxo de produção do processo estudado esta adequado, já que o mesmo possibilita a independência dos requisitos de *design*. Considerando-se as premissas adotadas para a confecção da matriz de *design*, as equações que descrevem este processo podem ser escritas da seguinte forma:

$$FR_{12} = A_{22} \times DP_{12} \quad (4.6)$$

$$FR_{13} = A_{32} \times DP_{12} + A_{33} \times DP_{13} \quad (4.7)$$

Desta forma, o FR inicial, tanque sem vazamento, sofrerá influência apenas das máquinas de resfriamento e solda. Como o intuito é entender os acoplamentos deste processo, uma nova decomposição se faz necessária.

FR₁₂: Manter dimensional do tanque conforme especificação

FR₁₂₁: Manter temperatura do molde em $16^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

FR₁₂₂: Manter a pressão dos manômetros do carrossel em 0,5 psi.

FR₁₃: Solda de boa qualidade

FR₁₃₀₁: Acomodar tanque no berço de solda conforme Folha operacional (FO).

FR₁₃₀₂: Fixar tanque na posição correta (*downline #1*).

FR₁₃₀₃: Utilizar componente (*filler neck*) dentro da especificação da Eng^a de Produto.

FR₁₃₀₄: Fixar componente (*filler neck*) na posição correta.

FR₁₃₀₅: Alinhar *hot plate* com componente (*filler neck*).

FR₁₃₀₆: Alinhar *hot plate* com posição de solda do tanque.

FR₁₃₀₇: Aquecer componente (*filler neck*).

FR₁₃₀₈: Aquecer posição de solda do tanque.

FR₁₃₀₉: Manter tempo de abertura (*open time*) menor que 5 segundos.

FR₁₃₁₀: Unir componente (*filler neck*) com tanque

FR₁₃₁₁: Acomodar tanque no berço de solda conforme F.O.

FR₁₃₁₂: Fixar tanque na posição correta (*downline #2*).

FR₁₃₁₃: Alinhar sistema de corte com posição de solda.

FR₁₃₁₄: Fazer furos na posição de solda.

FR₁₃₁₅: Utilizar componente (*breather vent*) dentro da especificação da Eng^a de Produto.

FR₁₃₁₆: Fixar componente (*breather vent*) na posição correta.

FR₁₃₁₇: Alinhar *hot plate* com componente (*breather vent*).

FR₁₃₁₈: Alinhar *hot plate* com posição de solda do tanque.

FR₁₃₁₉: Aquecer componente (*breather vent*).

FR₁₃₂₀: Aquecer posição de solda do tanque.

FR₁₃₂₁: Open time menor do que 5 segundos.

FR₁₃₂₂: Unir componente (*breather vent*) com tanque.

Utilizando-se do processo de *zig-zag*, obtêm-se os seguintes DPs:

DP₁₂: Sistema de resfriamento

DP₁₂₁: *Chiller*.

DP₁₂₂: *Blower + Tubulação + Válvulas esfera*.

DP₁₃: Máquinas de solda

DP₁₃₀₁: Ajuste manual do *Clamp* da *downline* #1.

DP₁₃₀₂: *Clamp* da *downline* #1.

DP₁₃₀₃: Inspeção de recebimento (*filler neck*).

DP₁₃₀₄: *Gripper* do componente (*filler neck*) da *downline* #1.

DP₁₃₀₅: Ajuste manual do apoio do *hot plate*.

DP₁₃₀₆: Ajuste manual da unidade de *hot plate* do tanque.

DP₁₃₀₇: *Hot plate* do componente (*filler neck*).

DP₁₃₀₈: *Hot plate* do tanque da *downline* #1

DP₁₃₀₉: Temporizador via interface homem/máquina (IHM).

DP₁₃₁₀: Pistão por acionamento proporcional.

DP₁₃₁₁: Ajuste manual do *Clamp* da *downline* #2.

DP₁₃₁₂: *Clamp* da *downline* #2.

DP₁₃₁₃: Ajuste manual do Sistema de usinagem.

DP₁₃₁₄: Sistema de usinagem.

DP₁₃₁₅: Inspeção de recebimento (*breather vent*).

DP₁₃₁₆: *Gripper* do *breather vent* da *downline* #2.

DP₁₃₁₇: Ajuste manual do *Gripper* do da *downline* #2, eixo X.

DP₁₃₁₈: Ajuste manual do *Gripper* do da *downline* #2, eixo Y.

DP₁₃₁₉: *Hot plate* do *Breather Vent*.

DP₁₃₂₀: *Hot plate* do tanque da *downline* #2.

DP₁₃₂₁: Temporizador via interface homem/máquina (IHM).

DP₁₃₂₂: Pistão por acionamento proporcional.

A matriz de *design*, que relaciona as FRs e DPs provenientes da decomposição, pode ser descrita da seguinte forma:

$$\begin{Bmatrix} FR_{121} \\ FR_{122} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ FR_{1322} \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} DP_{121} \\ DP_{122} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ DP_{1322} \end{Bmatrix} \quad (4.8)$$

Sendo que a matriz $[A]$ é representada pelos seguintes valores:

[illegible]

Analisando-se a matriz acima, pode-se afirmar que se trata de uma matriz triangular, ou seja, o processo estudado possui um *design* do tipo “semi-acoplado” (*Decoupled design*), onde a independência dos FRs somente será atendida se os DPs estiverem numa determinada seqüência.

Conforme demonstra a equação 4.9, foram encontrados 26 acoplamentos, sendo que entre estes, 10 estão diretamente relacionados ao sistema de resfriamento e 16 às máquinas de solda.

As seguintes soluções de *design* demonstraram acoplamento:

DP₁₂: Sistema de resfriamento

DP₁₂₁: *Chiller* (5 acoplamentos);

DP₁₂₂: *Blower* + Tubulação + Válvulas esfera (5 acoplamentos).

DP₁₃: Máquinas de solda

DP₁₃₀₁: Ajuste manual do *Clamp* da *downline* #1. (2 acoplamentos);

DP₁₃₀₂: *Clamp* da *downline* #1 (1 acoplamento);

DP₁₃₀₃: Inspeção de recebimento (*filler neck*) (3 acoplamentos);

DP₁₃₀₄: *Gripper* do componente (*filler neck*) da *downline* #1 (1 acoplamento);

DP₁₃₁₁: Ajuste manual do *Clamp* da *downline* #2 (3 acoplamentos);

DP₁₃₁₂: *Clamp* da *downline* #2 (2 acoplamentos);

DP₁₃₁₅: Inspeção de recebimento (*breather vent*) (3 acoplamentos);

DP₁₃₁₆: *Gripper* do *breather vent* da *downline* #2 (1 acoplamento)

Este resultado confirmou as expectativas dos técnicos de processo e manutenção, já que havia uma grande freqüência de retrabalhos e ajustes de alguns destes periféricos.

Baseando-se nos documentos de controle de produção diário do período de 2005 a 2007, o qual possui os seguintes dados:

- Volume produzido / produto;
- Quantidade de peças aprovadas por operação / produto;
- Quantidade de peças rejeitadas por operação / produto;
- Descrição de rejeito por operação / produto;
- Horas padrão / operação;
- Horas utilizadas / operação;
- Descrição das horas utilizadas / operação;
- Descrição de paradas / operação.

Buscou-se estimar o conteúdo de informação deste sistema (I_{sys}), para que se pudesse avaliar o nível de complexidade deste processo. Apesar da riqueza de informações presentes no documento citado, o mesmo carece de uma descrição mais específica dos rejeitos e paradas. Deste modo, houve uma grande dificuldade na correlação dos dados com FRs específicos.

O grupo de análise formado por técnicos de processo, manutenção e produção, com base nos dados disponíveis e com o intuito de facilitar o cálculo da probabilidade de sucesso do *design* existente, agrupou as DPs da seguinte forma:

$$\bullet \text{ Grupo 1} = DP_{121} + DP_{122}; \quad (4.10)$$

$$\bullet \text{ Grupo 2} = DP_{1301} + DP_{1302} + DP_{1304}; \quad (4.11)$$

$$\bullet \text{ Grupo 3} = DP_{1311} + DP_{1312} + DP_{1316}; \quad (4.12)$$

O fato dos dados utilizados estarem intimamente relacionados a cada operação do processo, no caso resfriamento e soldas da estação 1 e 2, justifica o agrupamento escolhido.

Com o intuito de formular a probabilidade de sucesso dos grupos citados, foi utilizado o conceito de *Overall Equipment Effectiveness* (OEE), que é o produtório de três diferentes índices de um dado equipamento - a taxa de disponibilidade, a taxa de eficiência e taxa de qualidade (LEAN RESOURCE CENTER, 2001).

Deste modo, foi definido que a probabilidade de sucesso de cada grupo seria função do produto da taxa de qualidade e disponibilidade de cada grupo, a qual receberia a denominação de “eficiência de design” daquele grupo.

Os DPs relacionados ao recebimento (DP₁₃₀₃ e o DP₁₃₁₅) foram desconsiderados, pois não houve registros de falha ou parada no período analisado relacionados a problemas de qualidade dos componentes descritos (*Filler Neck* e *Breather Valve*).

Desta forma, para $\{i\}=\{1,2,3\}$, a eficiência de *design* foi definida da seguinte maneira:

$$Q_i = \frac{VA}{(VA + R_i)} \quad (4.13)$$

$$D_i = \frac{UE_i}{(UE_i + PD_i)} \quad (4.14)$$

$$ED_i = Q_i * D_i \quad (4.15)$$

Onde:

- Q_i = Taxa de qualidade do grupo i ;
- VA = Soma de peças produzidas aprovadas;
- R_i = Quantidade de peças rejeitadas decorrentes do *design* do grupo i ;
- D_i = Taxa de disponibilidade do grupo i ;
- UE_i = Horas efetivas de funcionamento do sistema analisado;
- PD_i = *Downtime* decorrente do *design* do grupo i ;
- ED_i = Eficiência de *design* de cada grupo i .

Os valores de ED_1 , ED_2 e ED_3 traduziriam a própria probabilidade de sucesso de cada grupo. Deste modo, para $\{j\} = \{1,...,i-1\}$, temos que:

$$P_{\{m\}} = \prod_{i=1}^m P_{i\{j\}} \quad (4.16)$$

Onde:

$P_{i\{j\}}$ é a probabilidade de satisfazer FR_i dado que todo $\{FR_j\}_{j=1,...,i-1}$ correlato também seja satisfeito.

Neste caso, o I_{sys} , para $\{j\} = \{1,...,i-1\}$, pode ser expresso como:

$$I_{sys} = -\sum_{i=1}^m \log_2 P_{i\{j\}} \quad (4.17)$$

Assim, baseado nas fórmulas anteriores, pode-se construir as seguintes tabelas:

	2005			
	Q1-05	Q2-05	Q3-05	Q4-05
Disponibilidade - Grupo #1	92,2%	99,6%	94,1%	93,3%
Disponibilidade - Grupo #2	97,8%	98,9%	97,2%	98,1%
Disponibilidade - Grupo #3	97,8%	98,9%	97,2%	98,1%
Índice de Qualidade - Grupo #1	99,2%	98,4%	96,7%	96,9%
Índice de Qualidade - Grupo #2	99,5%	99,0%	97,8%	98,2%
Índice de Qualidade - Grupo #3	99,6%	99,0%	97,8%	98,2%
Eficiência de Design - Grupo #1	91,5%	97,9%	91,0%	90,4%
Eficiência de Design - Grupo #2	97,3%	97,9%	95,0%	96,3%
Eficiência de Design - Grupo #3	97,4%	97,9%	95,1%	96,3%
Rejeito (Teórico) - Grupo #1	8,5%	2,1%	9,0%	9,6%
Rejeito (Teórico) - Grupo #2	2,7%	2,1%	5,0%	3,7%
Rejeito (Teórico) - Grupo #3	2,6%	2,1%	4,9%	3,7%
I acoplamentos - Grupo #1	0,128	0,030	0,136	0,146
I acoplamentos - Grupo #2	0,039	0,031	0,074	0,055
I acoplamentos - Grupo #3	0,039	0,031	0,073	0,055
I sistema	0,206	0,092	0,283	0,255

Tabela 4.1: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2005.

2006				
	Q1-06	Q2-06	Q3-06	Q4-06
Disponibilidade - Grupo #1	100,0%	99,4%	93,9%	91,1%
Disponibilidade - Grupo #2	95,4%	98,1%	98,9%	97,5%
Disponibilidade - Grupo #3	95,4%	98,1%	98,9%	97,5%
Índice de Qualidade - Grupo #1	98,7%	99,5%	98,7%	99,0%
Índice de Qualidade - Grupo #2	99,5%	99,7%	98,8%	99,2%
Índice de Qualidade - Grupo #3	99,5%	99,7%	98,9%	99,2%
Eficiência de Design - Grupo #1	98,7%	98,9%	92,6%	90,3%
Eficiência de Design - Grupo #2	94,9%	97,8%	97,7%	96,7%
Eficiência de Design - Grupo #3	94,9%	97,8%	97,8%	96,8%
Rejeito (Teórico) - Grupo #1	1,3%	1,1%	7,4%	9,7%
Rejeito (Teórico) - Grupo #2	5,1%	2,2%	2,3%	3,3%
Rejeito (Teórico) - Grupo #3	5,1%	2,2%	2,2%	3,2%
I acoplamentos - Grupo #1	0,019	0,016	0,110	0,148
I acoplamentos - Grupo #2	0,076	0,032	0,033	0,048
I acoplamentos - Grupo #3	0,076	0,032	0,032	0,047
I sistema	0,171	0,081	0,175	0,243

Tabela 4.2: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2006.

2007				
	Q1-07	Q2-07	Q3-07	Q4-07
Disponibilidade - Grupo #1	94,6%	92,5%	94,3%	94,5%
Disponibilidade - Grupo #2	99,5%	98,9%	99,4%	99,2%
Disponibilidade - Grupo #3	99,5%	98,9%	99,4%	99,2%
Índice de Qualidade - Grupo #1	98,5%	98,9%	98,9%	99,0%
Índice de Qualidade - Grupo #2	99,4%	99,4%	99,4%	99,4%
Índice de Qualidade - Grupo #3	99,5%	99,3%	99,5%	99,4%
Eficiência de Design - Grupo #1	93,2%	91,5%	93,3%	93,5%
Eficiência de Design - Grupo #2	98,9%	98,3%	98,8%	98,6%
Eficiência de Design - Grupo #3	98,9%	98,3%	98,9%	98,6%
Rejeito (Teórico) - Grupo #1	6,8%	8,5%	6,7%	6,5%
Rejeito (Teórico) - Grupo #2	1,1%	1,7%	1,2%	1,4%
Rejeito (Teórico) - Grupo #3	1,1%	1,7%	1,1%	1,4%
I acoplamentos - Grupo #1	0,101	0,128	0,101	0,096
I acoplamentos - Grupo #2	0,016	0,024	0,017	0,020
I acoplamentos - Grupo #3	0,015	0,025	0,017	0,020
I sistema	0,133	0,177	0,134	0,136

Tabela 4.3: Cálculo do Conteúdo de Informação do Sistema (Isys) – Ano base 2007.

Baseado nos dados presentes na tabela 4.1, a figura 4.3 demonstra que as expectativas do grupo se confirmaram, pois as eficiências de *design* dos grupos analisados estavam numa clara

tendência de queda, o que justificou o início deste estudo. O que é demonstrado também pelo aumento do índice de informação do sistema (I sistema).

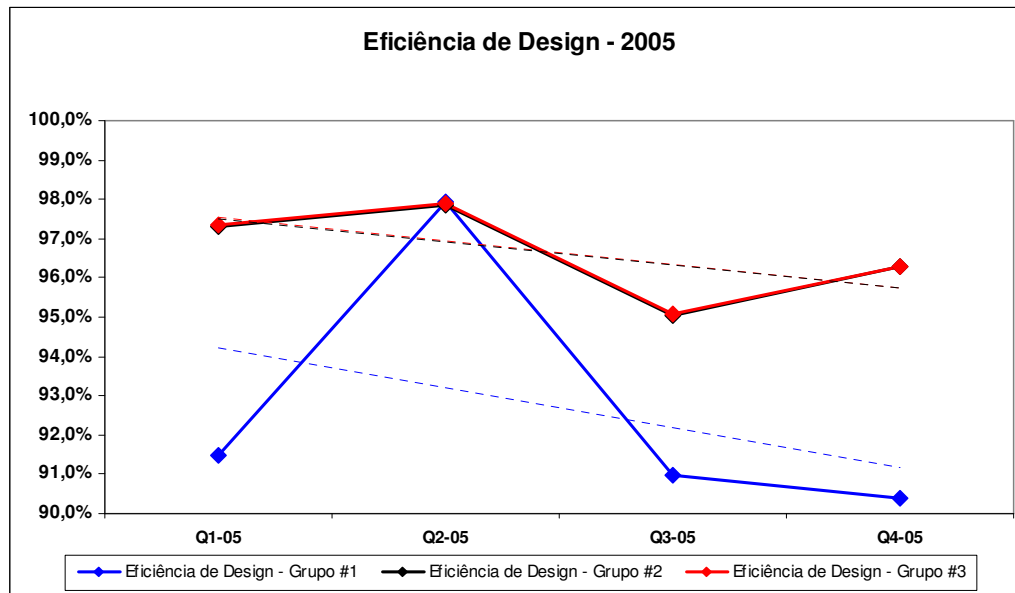


Figura 4.3: Eficiência de *Design* (2005).

Apesar dos valores de eficiência parecerem elevados, o rejeito teórico gerado anualmente por este sistema, considerando-se um volume de produção de 90.000 peças/ano, é da ordem de 11.000 peças anuais, o que é um valor bem elevado para os padrões da empresa.

Outro ponto relevante é que estas eficiências referem-se somente aos defeitos de projeto da máquina de resfriamento e da máquina de solda. Deste modo, a quantidade total de defeitos do sistema pode ser maior se considerar as falhas advindas de erros operacionais.

A melhoria de eficiência do grupo #1 (máquina de resfriamento) no segundo semestre de 2005 ocorreu devido a um plano de melhoria (*kaizen*), mas como se pode observar na figura 4.3, os ganhos obtidos não foram mantidos, já que a manutenção dos mesmos demandava um supercontrole por parte dos departamentos de produção e processo.

No ano de 2006, a matriz de *design* já havia sido concluída e seu uso teve início, principalmente na máquina de solda. Baseado nos índices presentes na tabela 4.2, a figura 4.4

mostra que as eficiências referentes à máquina de solda (grupos #2 e #3) mantiveram uma tendência de crescimento, conforme o plano de ação estabelecido era implementado.

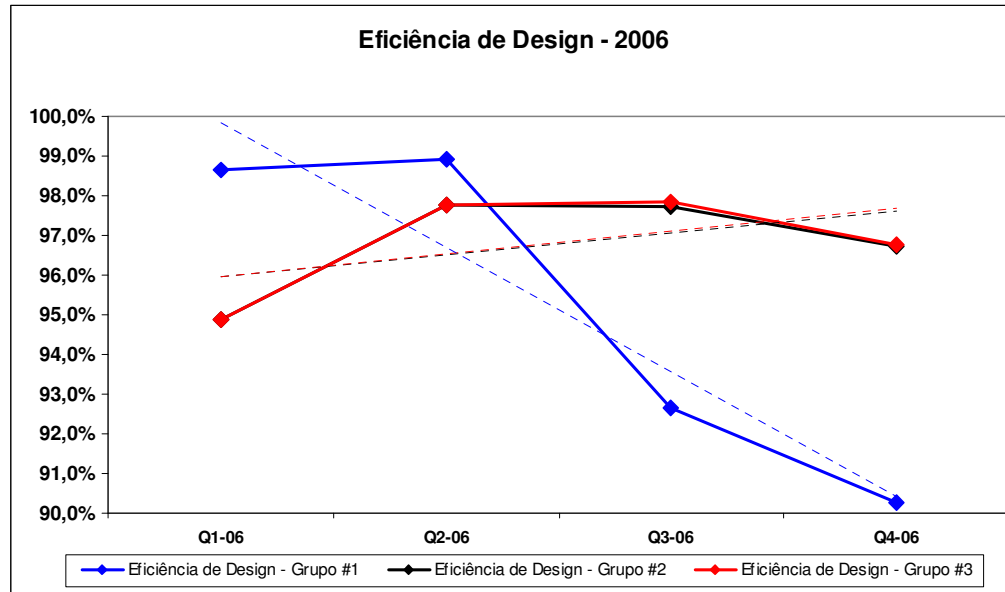


Figura 4.4: Eficiência de *Design* (2006).

No início de 2006 foi realizado um novo plano de melhoria na máquina de resfriamento, o que explica o ganho de eficiência do grupo #1, mas novamente os resultados não foram mantidos, conforme se pode observar na figura 4.4. Apesar da matriz de *design* estar completa, num primeiro momento o foco ficou na operação de solda. Deste modo, as ações tomadas neste plano de ação não buscaram resolver problemas de *design*, o que explica sua ineficácia no longo prazo, o que reflete diretamente no conteúdo de informação do sistema (I sistema), o qual apresenta uma tendência de aumento, conforme mostra a tabela 4.2.

Com base nos dados da tabela 4.3, a figura 4.5 mostra a eficácia das ações estabelecidas, bem como a manutenção dos resultados, obtida no equipamento de solda (grupos 2 e 3).

No ano de 2007, o plano de ação referente à máquina de resfriamento foi baseado na matriz de *design*. Como se pode observar na figura 4.5, as ações obtiveram um resultado satisfatório, já que o processo manteve-se estável e com uma tendência de melhora. A tabela 4.3 mostra que o

conteúdo de informação do sistema (I sistema) permanece relativamente estável e com médias inferiores aos anos de 2005 e 2006, conforme mostram as tabelas 4.1 e 4.2.

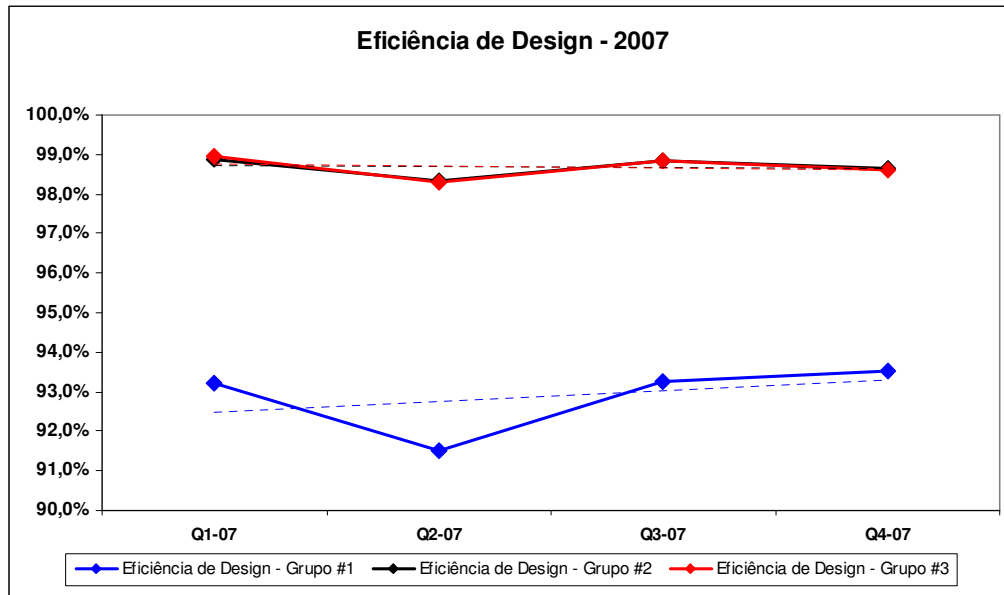


Figura 4.5 – Eficiência de *Design* (2007).

Capítulo 5

Conclusão

Através da construção da matriz de *design* de um processo de solda existente, o presente estudo teve como objetivo identificar as falhas de projeto (acoplamentos) do mesmo. Num segundo momento, através do uso da metodologia de projeto axiomático e dos documentos de controle de produção dos anos de 2005 a 2007, os valores de conteúdo de informação dos acoplamentos existentes foram calculados. Com base nestes, foi elaborado um plano de correção e melhoria do *design* existente.

A média do Isistema para cada ano foi calculada com base nos dados presentes nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 do capítulo anterior. Conforme demonstra a figura 5.1, o conteúdo de informação médio do sistema analisado (Isistema), que era de 0,209 em 2005, passou para 0,145 em 2007. Deste modo, pode-se afirmar que a aplicação prática da metodologia de projeto axiomático como ferramenta analítica é eficaz, já que o plano de ação elaborado reduziu o conteúdo de informação do sistema, ou seja, tornou-o mais robusto e eficaz.

Pode-se dizer também que sua utilização é simples, desde que a empresa possua e disponibilize a participação de pessoas especializadas no *design* estudado. O fato de não haver necessidade de intervir no meio produtivo com paradas e/ou testes, contribui para seu baixo custo. Assim, conclui-se que a hipótese inicialmente formulada é válida, mas tem restrições, já que o conhecimento técnico é fundamental para o seu sucesso.

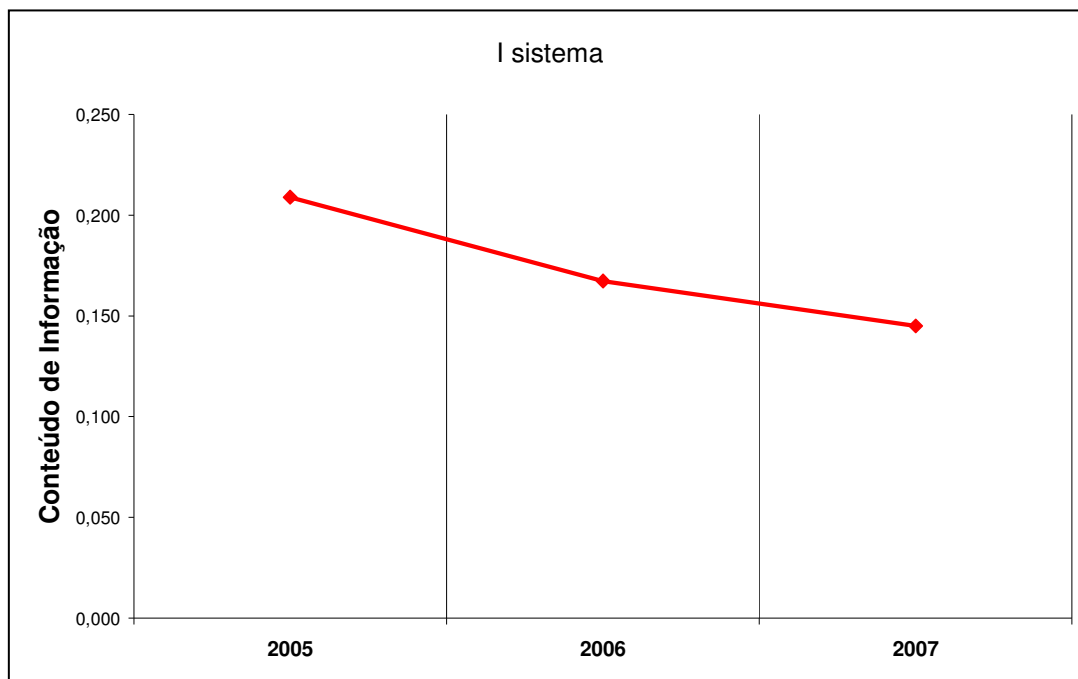


Figura 5.1 – Evolução do Conteúdo de Informação do Sistema

Outro ponto positivo da utilização do projeto axiomático como ferramenta analítica é o ganho e homogeneização de conhecimento pelo grupo no processo de mapeamento e construção da matriz de *design*, fortalecendo assim, o corpo técnico da empresa. O conhecimento dos índices de informação de cada periférico do sistema analisado permite focar nos problemas mais significativos, otimizando assim o processo de melhoria.

Atualmente, com base nos valores encontrados para este sistema, pode-se afirmar que o desacoplamento do sistema de resfriamento reduz os problemas de *design* desta linha em 70%. Desta forma, uma sugestão de melhoria para este processo seria a adoção de pós-resfriamento em tanque d'água com um único berço de resfriamento.

Assim, haveria uma redução na variabilidade dimensional causada pelo sistema atual, o qual possui 12 berços de resfriamento a ar, reduzindo assim os rejeitos e paradas desta etapa do processo.

Referências Bibliográficas

BENATAR, A. et al. *Plastic Pocket Power: Welding*. Hanser Publishers, Munich, 2001.

BONAZZA, B.; Simon, C. *Hot Plate Welding Procedures for Multi-Layer HDPE Fuel Tanks*. Walbro Corporation. May, 1998.

EDISON WELDING INSTITUTE (EWI). *Hot Plate Welding Fundamentals*. Edison Welding Institute. Ver.2.1, October, 2002.

GIL, A. C. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 3ª ed. Atlas. São Paulo, 1996.

JOSHI, A. M. *Welding of Plastics*. Disponível em: <<http://www.metalwebnews.com/howto/plastics/welding-plastics.pdf>>. Acesso em: 20/11/2005.

LEAN RESOURCE CENTER. *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*. Ford Motor Company. 2001. Disponível em: <web.lean.ford.com>. Acesso em: 06/12/2007.

NATROP, J. *Basics of Hot Plate Welding for the Finishing of Plastic Fuel Tanks*. Bielomatik. Neuffen, Germany, 1999.

POLISUL. *Manual de Moldagem por Sopros – Polietileno de Alta Densidade*. Maio, 1995.

POOPAT, B.; Wu, CY.; Benatar, A. *Optimization of Contact Hot Plate Welding of HDPE*. The Society of Plastics Engineers' Annual Technical Conference - ANTEC99, pp. 1386-1390, 1999.

SAVRANSKY, S.D. *TRIZ: A Supercompressed Introduction*. 1996. Disponível em: <<http://www.trizexperts.net/WhatIsTRIZ.htm>>. Acesso em: 15/10/2007.

SUH, N.P. *Axiomatic Design: Advances and Applications*. Oxford University Press, New York, 2001.

SUH, N.P. *A Theory of Complexity and Applications*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. Draft #2, 2003.

THIELEN, M. *Plastic Pocket Power: Extrusion Blow Molding*. Hanser Publishers, Munich, 2001.

THIOLLENT, M. *Metodologia da Pesquisa-Ação*. Editora Cortez. São Paulo, 2004.

TRUSCOTT, W.T. *Six Sigma: Continual Improvement for Businesses*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.

Bibliografia

CALARGE, F.A. *Uma Proposta de Modelamento de Gestão Sistêmica da Qualidade Baseada na Abordagem do Axiomatic Design*. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica/ UNICAMP. Campinas, 2000.

CALARGE, F.A. *Visão Sistêmica da Qualidade*. Editora ArtLiber, 2001.

CARVALHO, M.A.; Back, N. *Uso dos Conceitos Fundamentais da Triz e do Método dos Princípios Inventivos no Desenvolvimento de Produtos*. 3º Congresso Brasileiro de Gestão de Desenvolvimento de Produto. Florianópolis, SC - 25-27 Setembro de 2001.

COCHRAN, D.S.; Reynal, V.A. *Understanding Lean Manufacturing According to Axiomatic Design Principles*, Cambridge, 1996.

KAZMER, D.O. *Axiomatic Design Of The Injection Molding Process*. First International Conference on Axiomatic Design, Cambridge, MA – June 21-23, 2000.

LINDHOLM, D.; Tate, D.; Harutunian, V. *Consequences Of Design Decisions In Axiomatic Design*. Journal of Integrated Design and Process Science, Vol. 3, No.4, december 1999.

LOBO, C.E. *Aplicação do Projeto Axiomático para o desenvolvimento de Sistemas de Medição de Desempenho para Manufatura*. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica/ UNICAMP. Campinas, 2003.

.

SALUSTRI, F. A.; Venter, R. D. *An Axiomatic Theory of Engineering Design Information*. Engineering with Computers, 8(4):197-211, 1992.

SILVA, E.L.; Menezes, E.M. *Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação*. Laboratório de Ensino a Distância da UFSC. 3ª ed.rev. atual. Florianópolis, 2001.

WHELAN, T. *Manual de Moldagem por Sopros da Bekum*. 1ª ed. Hamburg. Fevereiro 1999.