



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DEMECP

**THALYSON FURTADO TAVARES**

**ANÁLISE DE FALHAS UTILIZANDO MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO  
DESTRUTIVOS EM SOLDAS.**

São Luís

2017

**THALYSON FURTADO TAVARES**

**ANÁLISE DE FALHAS UTILIZANDO MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO  
DESTRUTIVOS EM SOLDAS.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Orientador: Prof. Ms. Wellinton de Assunção**

São Luís

2017

Tavares, Thalyson Furtado.

Análise de falhas utilizando métodos de ensaios não destrutivos em soldas. / Thalyson Furtado Tavares. – São Luís, 2017.  
99 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica,  
Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. Me. Wellinton de Assunção.

1. Análise de falhas. 2. Ensaios não destrutivos. 3. Líquidos penetrantes. 4. Ultrassom. 5. Soldas. I. Título.

CDU 620.179.111

**THALYSON FURTADO TAVARES**

**ANÁLISE DE FALHAS UTILIZANDO MÉTODOS DE ENSAIOS NÃO  
DESTRUTIVOS EM SOLDAS.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovação em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

***Prof.º Ms. Wellinton de Assunção (Orientador)***

Mestre em Engenharia Mecânica  
Universidade Estadual do Maranhão

---

***Prof.º Thiago Aguiar Santos***

Universidade Estadual do Maranhão

---

***Amadeu Santos Nunes Júnior***

Engenheiro Mecânico

Em memória das minhas avós  
maternas e paternas Maria Rita e  
Esperança Tavares, que enquanto  
estavam vivas sempre sonharam ver e  
compartilhar comigo este sonho a  
qual estou alcançando.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois é Ele o motivo de toda honra, toda glória e todo o louvor, e por guiar meus passos antes mesmo de nascer.

A minha família, especialmente a meu pai, a minha mãe, a minha irmã e a todos aqueles que me ajudaram a conquistar o meu sonho.

A família Eng. Mecânica 11122, a quem eu levarei eternamente no meu coração e na minha memória, e por compartilhar comigo momentos únicos e inesquecíveis.

Ao meu professor orientador Wellinton de Assunção, a quem eu considero um mentor nesta minha caminhada durante esses anos de UEMA.

Aos inspetores de END Theonas e Marcel, que me ajudaram a enxergar um horizonte até então pouco explorado, mas com um potencial enorme.

A empresa W-Inox Alumínio, por ter disponibilizado seu espaço para a realização do processo de soldagem;

Enfim, a todos aqueles que direta e indiretamente me ajudaram e torceram pela conquista dos meus objetivos.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso ou pessoas fracassadas. O que existe são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”

Augusto Cury

## RESUMO

A falha é um evento indesejado onde todas as oficinas e indústrias temer quando este aparece, pois, o mesmo compromete todo um processo a que está incluído, principalmente em uma das atividades mais comuns na área de engenharia mecânica, que é a soldagem. Por isso, procura-se então incorporar as ferramentas da qualidade neste processo para que, ao ser analisado sucintamente, seja diminuindo então, a probabilidade de ocorrência destas falhas em atividades como soldagem. Ao trabalhar com este tipo de análise, procurou-se o ramo dos métodos de END para as análises de soldas, e por fim buscou-se uma ferramenta que investigasse a raiz do problema, para que após a investigação do mesmo, procurar trabalhar então em cima das causas raiz para se evitar ao máximo, a presença destes eventos indesejados.

**Palavras-chave:** Análise. Falhas. CheckList. Ensaios Não Destrutivos. Líquidos Penetrantes. Ultrassom. Soldas.

## ABSTRACT

Failure is an unwanted event where all workshops and industries fear when it appears, as it compromises a whole process to which it is included, especially in one of the most common activities in the field of mechanical engineering, which is welding. Therefore, it is sought to incorporate the quality tools in this process so that, when analyzed, the probability of occurrence of these failures in activities such as welding will be reduced. When working with this type of analysis, we sought the branch of the NDT methods for the analysis of welds, and finally we sought a tool that investigated the root of the problem, so that after the investigation of the same, look for to work in Root causes to avoid the presence of these unwanted events.

**Keywords:** Analysis. Failures. ChecksList. Nondestructive.. Liquids. Penetrating. Ultrasound. Welding.

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Escala de Severidade .....   | 21 |
| Tabela 2 - Escala de Probabilidade de Ocorrência.....   | 21 |
| Tabela 3 - Escala de Capacidade de Detecção .....   | 22 |
| Tabela 4 – Parâmetros adotados na soldagem para o CP 01, utilizando o eletrodo E-6013. ...                | 75 |
| Tabela 5 – Parâmetros na soldagem (fornecidos da ALUMAR) para o CP 02, utilizando o eletrodo E-7018. .... | 75 |
| Tabela 6 – Check-list das condições de trabalho.....  | 87 |

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura de uma árvore de falha .....  | 24 |
| Figura 2 - Ferreiro Medieval .....   | 25 |
| Figura 3 - Acidente com a Caldeira em Connecticut – Ilustração.....  | 26 |
| Figura 4 - Descarrilamento de trem nos EUA - Foto .....  | 27 |
| Figura 5 – Radiologia de Roentgen .....  | 28 |
| Figura 6 - Aparelhagem de Ultrassom.....   | 29 |
| Figura 7 – Professor Paulo Gomes de Paula Leite .....  | 31 |
| Figura 8 – Capa do livro “Curso de Ensaaios Não Destrutivos”.....  | 32 |
| Figura 09 – Ilustração do mecanismo da ação capilar.....   | 38 |
| Figura 10 – Preparação e limpeza da superfície .....   | 39 |
| Figura 11 – Tempo de penetração do líquido na abertura .....   | 40 |
| Figura 12 – Remoção do excesso de líquido na superfície.....   | 40 |
| Figura 13 – Aplicação do revelador e observação da indicação.....  | 41 |
| Figura 14 – Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura. ....                                 | 42 |
| Figura 15 – Ilustração gráfica do processo de formação de uma concavidade (a) e de uma convexidade (b) ..... | 46 |
| Figura 16 – Variação da Pressão Capilar e a Tensão Superficial .....   | 47 |
| Figura 17 – Relação do ângulo de molhagem com poder de molhagem e forma da gota.....                         | 48 |
| Figura 18 – Pontos de Fulgor de alguns líquidos .....  | 49 |
| Figura 19 – Tipos de Líquidos Penetrantes. ....  | 51 |
| Figura 20 – Na ordem, Penetrante Tipo II A, Penetrante Tipo II C, Penetrante Tipo I B ou D .....             | 51 |
| Figura 21 – Princípio básico da Inspeção de Materiais por Ultrassom .....                                    | 56 |
| Figura 22 – Ilustração em gráfico da propagação de uma onda ultrassônica .....                               | 56 |
| Figura 23 – Ilustração da propagação de uma onda longitudinal.....   | 58 |
| Figura 24 – Ilustração da onda longitudinal .....  | 58 |
| Figura 25 – Ilustração da onda transversal .....   | 59 |
| Figura 26 – Ilustração da propagação de ondas transversais durante o modo de vibração das partículas.....    | 60 |
| Figura 27 – Ilustração de uma propagação da onda superficial de Creeping.....                                | 60 |
| Figura 28 – Ilustração das Ondas de Superfície (Rayleigh e “Love”).....                                      | 61 |
| Figura 29 – Soldagem por eletrodo revestido.....   | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 30 – Perfis de solda inadequáveis .....   | 66 |
| Figura 31 – Problemas que são geralmente encontrados na solda .....  | 67 |
| Figura 32 – Variáveis do cordão e os perfis do mesmo.....  | 68 |
| Figura 33 – Perfis do cordão de solda variando com as tensões e o arco.....  | 68 |
| Figura 34 – Valores particulares para a variável $\eta$ .....  | 72 |
| Figura 35 – Compra a retalho do aço SAE 1020 no estabelecimento “Salão do Ferro” .....   | 74 |
| Figura 36 – Fazendo o chanfre no CP 01 .....   | 76 |
| Figura 37 – Soldagem do CP 01 concluída .....  | 76 |
| Figura 38 – CP 01 com a soldagem concluída e desbastada (com o cordão de solda isolado e desbastado também, e o O CP 02, doado pela empresa ALUMAR S.A. para fins de estudo e pesquisa). ..... | 77 |
| Figura 39 – CP’s 01 e 02 com o LP em sua superfície.....   | 78 |
| Figura 40 – CP’s 01 e 02 com o revelador sob a sua superfície.....   | 78 |
| Figura 41 – Aparelho de ultrassom utilizado .....  | 79 |
| Figura 42 – Realizando o ensaio ultrassónico no CP 01 com o transistor duplo cristal .....   | 80 |
| Figura 43 – Realizando o ensaio ultrassónico no CP 02 com o transistor angular de 60°.....   | 81 |
| Figura 44 – Inspeção após o ensaio de LP no CP 01 detectando a presença de porosidades...82  |    |
| Figura 45 – Ângulo aproximado de visão da porosidade encontrada no CP 01.....  | 83 |
| Figura 46 – Inspeção após o ensaio de LP no CP 01 detectando a presença de trincas e porosidades. ....   | 83 |
| Figura 47 – Ângulo aproximado de visão da trinca encontrada no CP 02 .....   | 83 |
| Figura 48 – Inspeção do CP 01 com o auxílio do aparelho de ultrassom .....   | 85 |
| Figura 49 – Ângulo aproximado de visão da descontinuidade indicada na tela do aparelho de ultrassom.....   | 85 |
| Figura 50 – Inspeção do CP 02 com o auxílio do aparelho de ultrassom .....   | 86 |
| Figura 51 – Ângulo aproximado de visão do defeito indicado na tela do aparelho de ultrassom. ....  | 86 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- FMEA – Failure Mode and Effect Analysis (Análise de Modo e Efeito de Falha)
- APQR - Advanced Product Quality Planning (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto)
- BINDT - British Institute of Non-Destructive Testing (Instituto Britânico de Ensaio Não Destrutivos)
- RPN – Risk Priority Number (Número de Prioridade de Risco)
- FTA - Fault Tree Analysis (Análise da Árvore de Falhas)
- END – Ensaio Não Destrutivos
- NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)
- TPM – Total Productive Maintenance (Manutenção Produtiva Total)
- ISO – International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
- ASNT – American Society for Nondestructive Testing (Associação Americana de Ensaio Não Destrutivos)
- NDT - Nondestructive Testing (Ensaio Não Destrutivos)
- ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
- ABENDI – Agência Brasileira de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção
- CP – Corpo de Prova

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\delta$  = tensão superficial do líquido

$\theta$  = ângulo de contato.

$\lambda$  = comprimento de onda

$\eta t$  = rendimento térmico do processo

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>13</b> |
| <b>1.1. Justificativa</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>1.2. Objetivos</b> .....   | <b>15</b> |
| 1.2.1. Objetivo Geral .....   | 15        |
| 1.2.2. Objetivos Específicos .....  | 15        |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>2.1. FMEA – Análise de Modo e Efeito de Falha</b> .....                      | <b>16</b> |
| 2.1.1. Breve Histórico sobre o FMEA .....                                       | 16        |
| 2.1.2. Definição de Confiabilidade .....  | 17        |
| 2.1.4. Definição de Falha .....   | 17        |
| 2.1.5. Definições e Funções do FMEA .....                                       | 17        |
| 2.1.5.1. <i>RPN (Risk Priority Number)</i> .....                                | 20        |
| 2.1.5.2. <i>Análise de Árvore de Falhas – Failure Tree Analysis (FTA)</i> ..... | 22        |
| <b>2.2. Métodos de Ensaios Não Destrutivos</b> .....                            | <b>25</b> |
| 2.2.1. Breve Histórico .....  | 25        |
| 2.2.2. Introdução dos Ensaios não Destrutivos (END) na indústria .....          | 27        |
| 2.2.3. A História dos Ensaios não Destrutivos no Brasil .....                   | 31        |
| 2.2.4. Surgimento da ABENDI.....  | 35        |
| <b>2.3. Líquidos Penetrantes</b> .....  | <b>36</b> |
| 2.3.1. Introdução e Breve Histórico .....                                       | 36        |
| 2.3.2. Descrição de um END por Líquido Penetrante .....                         | 37        |
| 2.3.3. Princípio Básico .....   | 39        |
| 2.3.4. Vantagens e Limitações/Desvantagens deste Ensaio .....                   | 42        |
| 2.3.5. Propriedade dos Produtos e Elementos Físicos .....                       | 44        |
| 2.3.5.1. <i>Propriedades Físicas do Penetrante</i> .....                        | 44        |
| 2.3.5.2. <i>Sensibilidade do Penetrante</i> .....                               | 50        |
| 2.3.5.3. <i>Propriedades do Revelador</i> .....                                 | 51        |
| 2.3.5.4. <i>Impurezas e Contaminantes nos Produtos Penetrantes</i> .....        | 54        |
| <b>2.4. ULTRASSOM</b> .....   | <b>55</b> |
| 2.4.1. Introdução e Breve Histórico .....                                       | 55        |
| 2.4.2. Princípios Físicos .....   | 56        |
| 2.4.3. Tipos de Ondas .....   | 57        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.5. PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO.....</b> | <b>62</b> |
| 2.5.1. Introdução .....                                      | 62        |
| 2.5.2. Aplicações do processo smaw .....                     | 63        |
| 2.5.3. Revestimentos .....                                   | 63        |
| 2.5.4. Descontinuidades em Juntas Soldadas.....              | 65        |
| 2.5.5. Parâmetro de Soldagem .....                           | 67        |
| <b>3. MATERIAIS E METODOLOGIA .....</b>                      | <b>72</b> |
| <b>3.1. Materiais.....</b>                                   | <b>73</b> |
| 3.1.1. Corpo de Prova .....                                  | 73        |
| 3.1.2. Definição dos parâmetros de soldagem .....            | 74        |
| 3.1.3. Ensaio por Líquidos Penetrantes .....                 | 77        |
| 3.1.4. Ensaio por Ultrassom .....                            | 79        |
| <b>3.2. Preparação do check-list.....</b>                    | <b>81</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCURSSÕES .....</b>                     | <b>82</b> |
| <b>4.1. Inspeção pelo END por Líquido Penetrante .....</b>   | <b>82</b> |
| <b>4.2. Inspeção pelo END por Ultrassom.....</b>             | <b>84</b> |
| <b>4.3. Check-list (Lista de Verificação).....</b>           | <b>86</b> |
| <b>5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>             | <b>91</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                      | <b>93</b> |

## INTRODUÇÃO

A análise de falha é um dos métodos bastante utilizados dentro do meio tecnológico a fim de prever uma possível irregularidade que possa vir a ocorrer dentro de um equipamento elétrico, mecânico, podendo causar assim a falha do mesmo, e em se tratando de falha, este é um fato que se é bastante evitado, pois a presença deste pode causar consequências bastante negativas em um ciclo a qual este participa.

Quando se estuda uma maneira de prevenir possíveis falhas ou defeitos, a primeira ferramenta que vem em mente é a FMEA, pois o grau de utilização dela na indústria, seja qual área for, é bem elevado. Quando se usa esta ferramenta, descobre-se por meio de análise e investigação, possíveis defeitos ou modos de falhas potenciais, por isso é este método é padrão em fase de planejamentos e implantação de projetos e processos, contida no manual APQR (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto).

Para executar este tipo de análise, dispõe-se de muito métodos e formas presentes que foram criadas e aprimoradas a fim de fazer uso do mesmo, e dentre estes, podemos destacar aqui o Método de Ensaio Não Destrutivos. De acordo com o Instituto Britânico de Ensaio Não Destrutivos (BINDT), estes ensaios são utilizados para detectar e avaliar falhas nos materiais. Dentre as causas que resultam na falha deste material, pode-se citar as trincas, deformação plástica, variações das propriedades estruturais, entre outros, onde a presença destes podem ocasionar a perda do material.

Pereira (2013) afirma que o frequente uso dos ensaios não destrutivos se tornou bastante habitual na indústria moderna, pois este tipo de ensaio visa garantir a qualidade dos produtos e consequentemente, a confiabilidade no uso da mesma. Com o passar dos tempos, este método de ensaios que não destroem o material tem passado por constante evolução, auxiliando os ensaios destrutivos e em alguns casos até a substituição do mesmo.

Com base nisto, realizar-se-á então neste trabalho, um estudo aprofundado sobre este tipo de ensaio em soldas, buscando auxílio de meios alternativos e de equipamentos da área de END, sendo acompanhado por profissionais da área, para assim obter melhores resultados, de maneira mais rápida e precisa. Após a coleta de análise, dar-se-á o prosseguimento para utilizada uma das ferramentas do FMEA, a chamada Check-list, onde a mesma ajudará na investigação das causas raiz, para assim poder procurar meios de prevenir falhas que possa vir a ocorrer nos materiais, prejudicando assim uma máquina ou equipamento onde o mesmo está incluído.

## 1.1. Justificativa

Analisar as falhas dos materiais e equipamentos é uma necessidade para o moderno modelo sistema de gestão da produção. Usando o sistema de acompanhamento e de controle das principais falhas nos componentes produtivos, o tempo de máquina e de equipamento parado é reduzido.

O processo de soldagem é um dos mais utilizados em oficinas e indústrias, como também no mundo da manutenção, por causa disto, Da Silva e Tapia (2014) afirmam que a aplicação da ferramenta FMEA no início do processo é altamente indicado, pois a partir desta ferramenta que poderá ser possível identificar as falhas potenciais de maneira sistemática, junto com meios de prevenir, ou na melhor das hipóteses eliminar o risco que está associado a estas falhas.

Os métodos de ensaios, sendo eles destrutivos ou não destrutivos, são importantes para avaliar as características daquilo que está sendo estudado, independente do material, para assim utilizar os resultados destes na prevenção de acidentes, manutenção da qualidade, redução de custos, entre outros. Os ensaios não destrutivos, como já foi falado anteriormente, servem para detectar e avaliar as falhas dos materiais, podendo ter com consequência final, a perda do material.

Percebe-se que o quão importante é a aplicabilidade destes métodos, pois os resultados destes podem ser usados em aplicações mais amplas, entre elas, a das soldagens. Sabe-se que estas passam por intensos esforços quando são utilizados em seu meio ideal, e o estudo deste pode servir para a detecção de inúmeras falhas que podem ocorrer podendo assim causar graves consequências, e o uso de softwares podem ajudar em larga escala nesse tipo de pesquisa.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo Geral

Fazendo o uso de uma das ferramentas do FMEA, analisar uma eventual ocorrência de falha ou de uma descontinuidade em um corpo de prova que passou pelo processo de soldagem usando o método de Ensaio Não Destrutivo.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Pesquisar trabalhos na área de ensaios não destrutivos;
- Analisar a solda utilizando o método de END por líquidos penetrantes e ultrassom;
- Analisar o que causou a presença de uma falha/descontinuidade no corpo de prova;
- Utilizar a ferramenta de FMEA chamada de check-list para a busca das causas raiz do problema;
- Com base nas causas raiz, procurar maneiras de prevenir qualquer evento indesejado, ou então trabalhar com base nas normas regulamentadoras para que o conjunto de fatores (ambiente, soldador e processo de soldagem), funcionem de maneira correta e coesa, para se tornar então um fator determinante para a eliminação das falhas.

## REFERENCIAL TEÓRICO

### 1.3. FMEA – Análise de Modo e Efeito de Falha

#### 2.1.1. Breve Histórico sobre o FMEA

O FMEA – Análise de Modo e Efeito de Falha, teve os seus primeiros registros de criação em meados da década de 50 por militares americanos, mas o seu potencial de utilização em várias áreas fez com que esta ferramenta fosse difundida por empresas como Crysler, Ford e General Motors, para melhorar o planejamento e execução de projetos e serviços maximizando em larga escala, a utilização dos mesmos.

A sistemática do FMEA originou-se em meados dos anos 50, dentro da base militar americana e da indústria aeronáutica da mesma, que tinha com um de seus objetivos principais a identificação de potenciais problemas, focando nos modos e efeitos de falha bem como o seu grau de austeridade em equipamentos militares. Já em meados dos anos 70, com este método bastante difundido pela empresa Ford, o mesmo passou a redobrar a atenção com os registros dos modos potenciais de falha, visando minimizar e reduzir as ocorrências de falha, melhorar o desempenho dos produtos, projetos e os seus processos de manufatura. Posteriormente, em meados dos anos 90, com a larga escala do campo da TQM (Gestão da Qualidade Total, traduzida do inglês), passou a estar definitivamente e obrigatoriamente presente dentro do quadro de ferramentas da qualidade como requisito de normas, dentre estas, podemos citar as normas ISO 9000 e a QS 9000.

O método de análise de modo e efeito de falha (FMEA) procura a prevenção de falhas que possa vir a ocorrer em um processo ou produto a ser revisado ou executado. Segundo Fernandes e Rebelado (2006), este método foi desenvolvido pela empresa norte americana NASA (National Aeronautics and Space Administration) na década de 1960, que teve com um de seus principais objetivos, a busca de forma sistemática das falhas potenciais em sistemas, processos ou serviços, para assim identificar seus efeitos, buscar as possíveis causas e assim definir as ações para corrigir e prevenir os mesmos. O seu uso de forma mais sistemática e abrangente só foi iniciado de fato quando a famosa empresa Ford Motor Company começou a utilizar este método no seu processo de fabricação e produção de seus automóveis no início da década de 1970, e assim, espalhou a sua utilização por toda a sua rede de fornecedores com a norma QS 101. Bonanoni et al (2010).

### 2.1.2. Definição de Confiabilidade

Durante do estudo da metodologia de Análise de Modo do Tipo e Efeito de Falha, mais conhecido pela sigla FMEA (do inglês Failure Mode and Effect Analysis), que é uma ferramenta largamente utilizada para buscar evitar, por meio de análise, falhas potenciais e consequentemente proposta de melhoria, não se pode falar deste método sem citar o conceito da Confiabilidade, onde neste se mede a probabilidade de falha na relação produto/processo.

A Confiabilidade tem se tornado uma ferramenta bastante frequente no mundo da Qualidade, pois a partir dela se mede o grau de confiança que o cliente irá ter quando este for adquirir um produto. É de conhecimento dos profissionais que trabalham na área da indústria que a falha que irá ocorrer dentro de um processo ou sistema, e dentro de um produto, mesmo que inúmeros trabalhos de manutenção preventiva ocorram dentro de um meio. Porém, quando estas alterações acontecem, o consumidor este que este problema seja rapidamente resolvido, seja ele por meios de termos de garantia ou por assistências técnicas conveniadas com a empresa, ou que tenham certificação de qualidade. Por isso a importância da aplicação de diversos métodos de prevenção de falhas, como por exemplo o FMEA, pois não se pode eliminar uma falha por completo, mas se pode ter um controle da mesma. Lembrando que quando melhor a ocorrências de falhas dentro de um processo/produto, maior será o nível de Confiabilidade que o consumidor irá possuir.

### 2.1.4. Definição de Falha

Segundo Vieira (2008), a falha é a deficiência que um item possui de exercer um determinado trabalho a qual este foi previsto a executar. As falhas podem ser definidas como eventos que determinam a inadequação de um recurso ao uso. Slack et al. (2009) afirma que embora muitos processos produtivos sejam indiferentes as falhas, algumas destas podem ser cruciais para a ocorrência de um desastre, acumulando consequências em larga escala, como por exemplo, uma falha da turbina de um avião quando este encontra-se em vôo, ou até mesmo a falha do sistema de freios de um veículo quando este se encontra em movimento.

### 2.1.5. Definições e Funções do FMEA

Segundo Helman e Anderi (1995), O FMEA é um método analítico, que consiste basicamente na identificação de prováveis modos de falha e determina o efeito de cada uma

sobre o processo de um sistema, seja ele um simples protótipo, seja ele um produto ou até mesmo um processo. Este método se baseia em um conjunto de estudo e pesquisa de causas fundamentais dos problemas envolvendo processos ou produtos, onde o objetivo é analisar as falhas críticas e elaborar um plano de ação para prevenir as falhas detectadas. Neste caso então, este método é padronizado para detectar e eliminar problemas ou falhas substanciais com uma probabilidade de ocorrência alta dentro de um processo, de uma forma sucinta e completa.

Durante o estudo e desenvolvimento do mesmo, este método é formalmente projetado, pois permite a execução de várias etapas, dentre elas, destaca-se:

- Estabelecer um padrão para determinados procedimentos;
- Durante a verificação de todo o histórico de um determinado ciclo ou processo, fazer um registo de análise de falhas durante a vida útil do mesmo, pois este poderá ser usado futuramente para que caso houver a incidência ou a reincidência de algum problema, as ações ou manutenções corretivas possam ser feitas baseadas nesse registo, buscando minimizar ainda mais uma possível falha que possa vir a ocorrer;
- Verificar os projetos de melhoria, fazer um planejamento para que estes projetos possam estar sendo constantemente executados.

Toleto (2002) afirma que o FMEA pode ser especificado como uma estrutura regularizada onde a sua utilização é aconselhável a grupos multidisciplinares, para aumentar, com a união e a sincronização de pessoas próximas dotadas de conhecimento, com um grau de atenção e percepção, para assim fazer uma análise já propondo posteriormente a solução de falhas e defeitos.

Rozenfeld (2006) comenta que para casos relacionados a criação de novos produtos, deve-se ter em mãos uma pesquisa do desenvolvimento do projeto do produto, pois com base nestes dados, revelar-se-á então aquilo que realmente será necessário e aquilo que provavelmente irá satisfazer nas necessidades do cliente. Pode ser usado também para melhorar os processos existentes dentro de um ambiente de trabalho, utilizando-se desta ferramenta que está sendo utilizada.

Quando se estuda essa ferramenta, é possível alguns pontos interessantes sobre os principais objetivos que esta ferramenta oferece para quem o utiliza, como por exemplo:

- Com base na análise de modo e efeito de falha, onde a mesma busca propor ações que visam a melhoria contínua, que possam vir a ocorrer falhas em determinados projetos, ou em um processo, explorando assim a confiabilidade, onde a presença desta em larga escala torna-se fundamental dentro de um ciclo a qual esta participa;

- Analisando os históricos e registros anteriores, identificar todos os modos de falha em potencial dentro de um produto, ou mesmo de um processo, todas as ocorrências com grau de severidade alta, e trabalhar no estudo das mesmas para assim combater, minimizar ou eliminar através de correções, antes que elas venham de fato a acontecer.
- A presença dentre os inúmeros ambientes de trabalho, ajuda a combater as mais variadas alterações que estão presentes no cotidiano das mesmas, e a utilização constante destas ferramentas ajuda em larga escala o processo ou um ciclo a qual este se encontra envolvida, com isso, a mesma busca minimizar problemas e maximizar resultados.

O modelo do FMEA oferece um alicerce para estudo e aplicação destes em determinados fins de projeto por causa da sua estruturação, e posteriormente como resultado da aplicação deste método a busca pela possibilidade de falhas dentro de um sistema.

Como o sistema FMEA, quando se busca a qualidade de desenvolvimento e planejamento de um determinado projeto, esta é avaliada exaustivamente na fase de desenvolvimento e planejamento. Observa-se que quando utilizamos este método, busca-se um amadurecimento das ações de quem está gerenciando o projeto, explorando ao máximo as vantagens que este sistema pode oferecer. Este sistema mostra toda a estrutura do projeto, os riscos e as probabilidades de falhas que possam ocorrer, e como está sendo trabalhado as maneiras de diminuir estes riscos, com base nas teorias, experiências, cálculos, ensaios e verificação.

Segundo Vicent e Honeck (2004), a Análise do Modo e Efeito de Falha é um método utilizado para buscas de falhas de possam vim a ocorrer em um produto, e elaborar meios de prevenir estas falhas antes que elas possam ocorrer. Tais autores enfatizam que o FMEA basicamente é utilizado dentro de um ciclo ou de um meio para buscar, identificar, buscar soluções que possam evitar falhas, e assim os resultados destes de refletirem no produto ou no serviço final, aumentando assim a confiança dos clientes. Estes autores, quando dissertam sobre este assunto, orientam a executar o FMEA passando pelos seguintes estágios, respectivamente:

- Selecionar a equipe;
- Revisar todo o processo;
- Elaborar o Brainstorming;
- Construir a planilha do FMEA;
- Seguir corretamente todas as etapas do processo, definindo critérios para classificar os itens mais rigorosos, suas ocorrências e detecções;

- Averiguar e avaliar as informações disponíveis;
- Incrementar medidas de correção junto com a equipe;
- Concluir as medidas de correção e registrar as mesmas.
- Seguindo a teoria dos autores Vicent e Honeck (2004), estes orientam que uma planilha do FMEA deve conter os seguintes itens, exemplificados na figura em anexo:
- Estrutura do Projeto.
- Modos de Falha Potenciais: Deve ser descrita de modo contextualizado, sendo que neste modo existem 5 tipos (completa, parcial, intermitente, falha por excesso e pela função indesejada)
- Efeitos de Falha Potenciais: Este deve ser descrito da maneira em que os clientes iriam relatar;
- Causas Potenciais: Nesta etapa, descrever quais causas podem ter gerado ou influenciado o surgimento da falha;
- Controles atuais: Deve-se fazer um controle preventivo para poder ajudar na redução dos modos de falhas que podem vir a ocorrer.

#### *1.3.5.1. RPN (Risk Priority Number)*

O valor RPN é utilizado para a medição do risco de uma determinada falha, onde ao chegar nesta etapa, se tem o conhecimento de todas as falhas, e assim organizar as mesmas com relação ao grau de risco que estas representam para um produto/processo. Este grau de risco, que pode ser representado por números, é determinado pela multiplicação dos valores atribuídos aos parâmetros severidade, ocorrência e detecção, no presente momento da etapa de elaboração do brainstorming. Costumeiramente, tais valores que são atribuídas a estes parâmetros representam uma escala numérica que vai do valor 1 até o valor 5, onde o valor 1 representa o menor valor, ou o menos grave, e o valor 5 que representa o maior valor, ou o mais grave.

Quando se classifica cada modo de falha para as características que serão mostradas adiante (Severidade, Probabilidade de Ocorrência e Capacidade de Detecção), os autores Vicente e Honeck (2004) mostram como calcular o RPN, ou o NPR (Número de Priorização de Riscos). Os mesmos afirmam que para calcular o RPN, deve-se multiplicar os valores de Severidade, Probabilidade de Ocorrência e Capacidade de Detecção, para que quando for feita a comparação dos valores de RPN com os valores do modo de falha pré-estabelecido, trabalhar em cima destes valores para assim suprimir as possibilidades de ocorrências de falha. Tais ações

permite ter como resultados a diminuição da severidade, da probabilidade de ocorrência e do aumento da capacidade de detecção.

Baseado nas tabelas 1, 2 e 3 de Vicent e Honeck (2004), foi feita uma exemplificação dos parâmetros atribuídos aos valores de RPN:

Tabela 1 - Escala de Severidade

| <b>Severidade</b> | <b>Descrição</b>  | <b>Peso</b> |
|-------------------|---|-------------|
| Muito elevada     | Quando ocorre uma falha que possa vir a comprometer a segurança de um processo/projeto, podendo ou não resultar um resultado dentro das conformidades do mesmo. | 5           |
| Elevada           | Quando ocorre uma falha bastante considerável, podendo comprometer todo um processo/projeto, reduzindo a qualidade do produto e o desempenho do mesmo           | 4           |
| Moderada          | Falha não tão grave, mas que como consequência desta, ocorre uma redução da performance do processo/projeto   | 3           |
| Baixa             | Quando a falha não compromete a qualidade do processo/projeto, mas pode ser uma dor de cabeça para com os clientes mais exigentes.                              | 2           |
| Nenhuma           | Quando não há ocorrência de falhas, ou uma falha com um grau bem máximo, sendo imperceptível aos olhos dos clientes.  | 1           |

Fonte: Adaptado de Vicent e Honeck (2004).

Tabela 2 - Escala de Probabilidade de Ocorrência

| <b>Ocorrência</b> | <b>Descrição</b>   | <b>Peso</b> |
|-------------------|--|-------------|
| Muito elevada     | A presença da falha é constante, bastante regular, e acontece em todos dos setores de um determinado processo/projeto                              | 5           |
| Elevada           | Quando a falha ocorre de uma maneira bastante regular, causando consequências grandes na produção, performance e qualidade de um processo/projeto. | 4           |
| Moderada          | Quando a presença da falha se apresenta algumas vezes, de maneira ocasional.   | 3           |
| Baixa             | Quando a presença de falhas acontece esporadicamente, mas que não implica em consequências ruins na produção.                                      | 2           |
| Nenhuma           | Quando a presença de falha dentro de um processo/projeto é quase inexistente.  | 1           |

Fonte: Adaptado de Vicent e Honeck (2004).

Tabela 3 - Escala de Capacidade de Detecção

| <b>Detecção</b> | <b>Descrição</b>  | <b>Peso</b> |
|-----------------|---|-------------|
| Nenhuma         | Quando não há procedimentos de detecção para prevenir que um produto seja autorizado a entrar no mercado.                         | 5           |
| Baixa           | Quando não há procedimentos de detecção, porém, uma falha foi encontrada incapacitando um produto de ser liberado para o mercado. | 4           |
| Moderada        | Quando há um procedimento dissimulado de inspeção.  | 3           |
| Elevada         | Quando há constantes procedimentos de inspeção para avaliarem a falha.  | 2           |
| Muito elevada   | Quando há procedimentos de inspeção para buscar o não aparecimento de falhas de modo geral.                                       | 1           |

Fonte: Adaptado de Vicent e Honeck (2004).

#### 1.3.5.2. Análise de Árvore de Falhas – Failure Tree Analysis (FTA)

De acordo com Simões Filho (2008), a Análise de Árvores de Falhas - AAF, (traduzida do inglês Failure Tree Analysis - FTA) foi criada a pedido da Força Aérea Americana para fins de avaliação do sistema de controle do Míssil Balístico Minuteman, gerenciado por Watson, onde este trabalhava no “Laboratórios Bell Telephone” no ano de 1961.

De acordo com Herman (1995) este método é caracterizado por uma técnica gráfica que mostra várias combinações de falhas, seja estas humanas, ou do material, provocando um possível impacto dentro de um sistema. Tal autor conceitua a FTA como um método sistemático e padronizado, onde este método é qualificado para receber bases objetivas ante as funções diversas, sendo esta análise de modo de falhas em sistemas, requisitos fundamentais e/ou contratuais, demonstração de atendimento e justificação de alterações em sistema.

Pedroni (2008) afirma que o campo de aplicação da FTA é bem vasto, com inúmeras ferramentas de trabalho, onde as principais servem para:

- Ajudar na análise e identificação das falhas de um sistema, passando a estabelecer um método padronizado de análise;
- Estabelecer aspectos de maior relevância de um sistema relacionados a uma falha particular;

- Aperfeiçoar a compreensão do tomador de decisões quanto ao comportamento do sistema;
- Aperfeiçoamento de um determinado produto ou processo já em estado de operação, partindo da identificação das causas das falhas, trabalhando para evitar a ocorrência dos mesmos em uma situação futura.

Pedroni (2008) continua afirmando que durante a fase de construção da árvore de falha, onde esta é elaborada do modelo gráfico, que é caracterizado pelos encadeamentos de diferentes eventos, onde o Evento de Topo é dado como resultado. A análise deve ser feita de modo bem detalhada, para que os eventos ou causas básicas possam ser atingidos, pois estes não podem ser mais aprofundados ou investigados. Por isso que a maioria da literatura chama estas causas básicas como “limite de resolução da árvore”.

#### 2.1.5.1. *Etapas da FTA*

Herman (1995) dividiu a estrutura dessa técnica nas etapas a seguir:

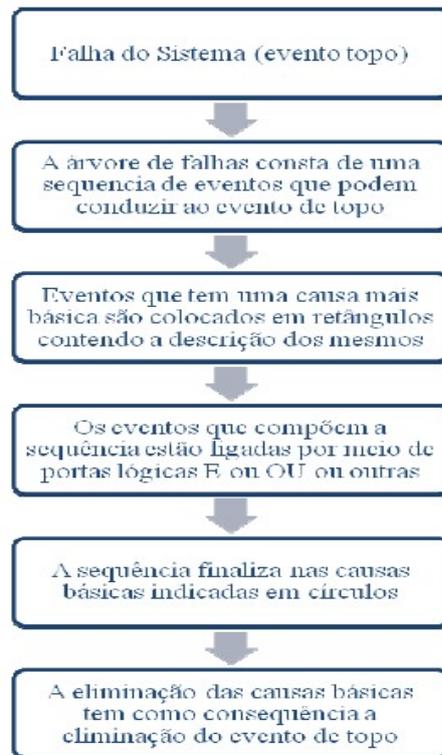
- Etapa 1 – Definição do sistema, suas fronteiras e interfaces e diagrama de blocos funcional;
- Etapa 2 – Definir o evento topo da FTA;
- Etapa 3 – Elaboração da FTA;
- Etapa 4 – Levantamento dos dados de falhas dos eventos;
- Etapa 5 – Indicação dos cortes mínimos;
- Etapa 6 – Avaliação qualitativa das FTA;
- Etapa 7 – Avaliação quantitativa das FTA;
- Etapa 8 – Avaliando as relevâncias dos cortes mínimos;
- Etapa 9 – Análise dos resultados atingidos;
- Etapa 10 – Conclusões.

#### 2.1.5.2. *Estrutura da Árvore de Falhas*

Segundo Pedroni (2008) a árvore de falhas apresenta uma lógica onde a ocorrência de um evento não esperado, ou uma falha, devem aparecer no topo ligados aos eventos mais básicos, por intermédio de símbolos de eventos e portas lógicas. A árvore será finalizada com os eventos

que são considerados como causas básicas ou fundamentais. A figura a seguir retrata então o modelo de uma estrutura de árvore de falha.

Figura 1 – Estrutura de uma árvore de falha



Fonte: Herman (1995)

#### 2.1.6. Check-list

Segundo Souza (1995), para elaborar um levantamento dos riscos por meio de um check-list, deve-se listar os itens de maior relevância, ou também listar os passos do processo sob análise, pois ao ultrapassar esta etapa, deve-se então elaborar as conclusões de cada item ou passo do check-list.

Souza (1995) continua afirmando que este método possui um grau de aproveitamento alto para checar e vistoriar itens que pertencem a procedimentos padronizados, possuindo uma relação com manutenção de equipamentos, ou a segurança do trabalho, entre outros. Este método é de grande ajuda após a análise de outras técnicas de análise de risco, onde os resultados serão transformados em itens de um determinado check-list para inspeção dos serviços ou processos.

Em contrapartida, Cardela (1999) afirma que a utilização deste método se torna desfavorável pois quando não há a inclusão de passos não lembrados no check-list, estes não serão analisados, ficando então uma lacuna nesta análise, pois o passo não lembrado durante a utilização deste método pode ser de extrema importância.

#### **1.4. Métodos de Ensaio Não Destrutivos**

##### **2.2.1. Breve Histórico**

Historicamente, os ensaios não destrutivos surgiram pela necessidade de se prevenir de falhas que poderiam vir a ocorrer, ou até mesmo de falhas que já aconteceram. Resumindo, a implantação destes métodos de avaliação e inspeção são demasiadamente importantes para se prevenir de resultados diferentes do esperado. Os primeiros relatores que se tem em livros e bibliografias da área são da utilização do “ensaio sonoro” para diferenciar diferentes tipos de metais. Este processo utilizava o som da lâmina da espada de Damascus, (semelhante à ação de uma martelada), que no caso seriam os metais. Esta técnica sonora foi utilizada por diversos ferreiros durante décadas.

Figura 2 - Ferreiro Medieval



Fonte: Souza (2010, p. 07).

Segundo Souza (2010), alguns acontecimentos históricos alavancaram a necessidade de se aplicar estes métodos, acontecimentos estes que serão citados abaixo:

- Em meados de março de 1854, ocorreu um grave acidente em Connecticut, um Estado norte-americano. De acordo com o laudo técnico, uma falha ocorrida em uma caldeira fez com que várias pessoas fossem vitimadas. Em consequência desta fatalidade, acelerou-se então o processo de implantação de métodos de inspeção e END, e dez anos após o ocorrido, foi aprovado pelo Estado de Connecticut a *Boiler Inspection Law* (Manual de Inspeção das Caldeiras, traduzido do inglês).

Figura 3 - Acidente com a Caldeira em Connecticut – Ilustração



Fonte: Souza (2010, p. 10).

- Também nos Estados Unidos, ocorreu uma fatalidade que contribuiu para a implantação dos métodos de inspeção e END, onde na época foi noticiado por fontes locais que relataram o incidente que resultou em um descarrilamento de trem. Em consequência deste fato, foi implantado um sistema que detecta a presença do campo magnético indutivo de corrente elétrica, onde o Dr. Elmer e H.C. Drake foram os responsáveis pelo desenvolvimento do mesmo.

Figura 4 - Descarrilamento de trem nos EUA - Foto



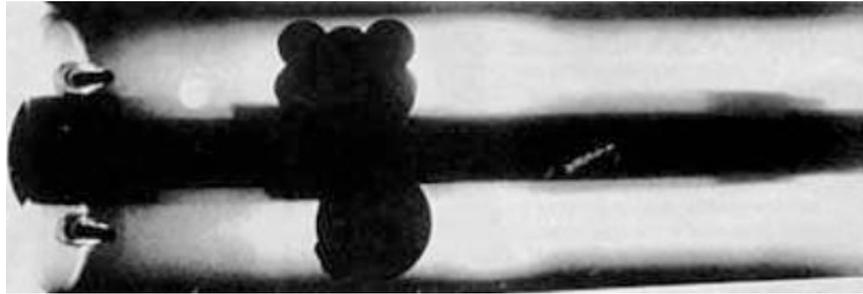
Fonte: Souza (2010, p. 12).

### 2.2.2. Introdução dos Ensaios não Destrutivos (END) na indústria

Os primeiros relatos históricos da aplicação dos Ensaios não destrutivos na indústria partiram de Wilhelm Conrad Roentgen, onde o mesmo fez uma importante descoberta dos Raios-X no dia 08 de novembro de 1895, no seu laboratório na Universidade de Wurzburg, na Alemanha. Tal fato histórico ganhou grande repercussão internacional, onde inclusive teve seu espaço em destaque descrito em uma matéria na *Evaluation*, revista da ASNT – American Society for Nondestructive Testing (NDT), no ano de 1995. Em consequência destes fatos, os principais jornais do mundo na área publicaram ainda as características desses novos raios e a habilidade do mesmo de passar através de carne e outros materiais. Com isso, percebeu-se que desde a aparição da utilização dos Raios-X até a presente data da publicação destes feitos, a grande repercussão desta tecnologia do mundo médico, por influência também das notícias bastante otimistas, embora o patriarca desta descoberta justamente com outros pesquisadores tenha mostrado a imagem de “coisas” nos Raios-X, como espingarda e bússola. Tal fato aconteceu muito antes da utilização não-médico dos Raios-X tornar-se importante.

Na figura a seguir, é mostrada a radiografia utilizada por Roentgen de seu rifle de caça. Analisando bem a imagem, observa-se um pequeno defeito no cano, abrindo então novos horizontes para a utilização deste método no mundo industrial: a utilização dos Raios-X como controle de qualidade de peças.

Figura 5 – Radiologia de Roentgen



Fonte: Portal da Radiologia (2010, p.01)

As bibliografias da área referente as primeiras utilizações dos Ensaios não Destrutivos relatam que foi durante a Primeira Guerra Mundial que se iniciou o uso dos Raios-X na indústria, infelizmente para métodos ilícitos, ou seja, relacionados a armamentos. Alguns registros provam a existência de inspeções presentes na Alemanha na década de 1920. Por mais que os constantes esforços presentes naquela época buscassem alavancar este método, a utilização dos Raios-X em END não se converteu em um importante aporte comercial até a temporada da Segunda Guerra Mundial. O que existiu de concreto na época é que houve muitas investigações muito bem elaboradas e executadas para demonstrar a utilização deste método para o exame de materiais.

O Portal da Radiologia (2010) cite que, paralelo a estes fatos, nos Estados Unidos, técnicos da END mencionam as pesquisas iniciais de Horace Lester, no Arsenal Watertown, como o precursor do nosso uso atual dos Raios-X em END (Lester, 1922, 1923). O trabalho de Lester foi demasiadamente importante pois o mesmo explicou sucintamente que os Raios-X tem em uma de suas inúmeras utilizações, a possibilidade de localizar falhas internas em estruturas metálicas, soldas, fundidos, entre outras, pois a presença destas falhas poderia causar um grave problema, levando a ter consequências indesejadas. Afirma-se que as contribuições de Lester foram também importantes por causa da sua posição preeminente no campo metalúrgico.

Prosseguindo com a história de desenvolvimento dos métodos de END, direcionou-se as pesquisas para o método de ensaio por líquidos penetrantes, que teve seus primeiros registros de utilização antes da primeira guerra mundial, em uma área especialmente voltada para indústria ferroviária, no setor de inspeção de eixos. Em consequência das constantes buscas de aprimoramento deste método de END, tal método teve um grande arranque em meados de 1942 nos Estados Unidos, pois foi desenvolvido o método de penetrantes fluorescentes, pois este último melhorava em larga a percepção da falha de quem o analisava. Por isso que neste

período, o ensaio passou a ser empregado nas indústrias aeronáuticas, pois tal ramo industrial trabalha com ligas não ferrosas, e é de conhecimento do profissional que atua na área que os métodos primordiais de ensaios não destrutivos, no caso os Raios-X, não se aplicavam a materiais não magnéticos, por isso a necessidade de se trabalhar com métodos de detecção de defeitos superficiais diferentes dos ensaios por partículas magnéticas.

Após a segunda guerra mundial, tanto o método de Raios-X como os de Líquidos Penetrantes foram se desenvolvendo, graças as barreiras que estes iam encontrando devido à complexidade de cada situação em que estes iam se deparando, fazendo com que novas pesquisas fossem feitas, novos resultados serem encontrados, e estes melhoramentos enfim serem aplicados para o aprimoramento de novos produtos, e na descoberta de novos métodos de END, sendo todos eles bastante utilizados dentro do ramo industrial, seja ele de pequena, média ou larga escala.

Figura 6 - Aparelhagem de Ultrassom



Fonte: Souza (2010, p.15)

A imagem acima retrata um dos processos primordiais criado e desenvolvido dentro do campo dos Ensaio não Destrutivos (END). Tal método se utiliza da inspeção da qualidade de materiais e equipamentos, que como o próprio nome já diz, o faz sem a necessidade de destruir o material ou até mesmo provocar uma alteração em suas características iniciais. Este ensaio é um dos mais importantes para se fazer a fundamentação da qualidade do produto inspecionado, que por meio dos Raios-X ou gama, é apresentado uma imagem interna da peça inspecionada, onde nenhum outro ensaio não destrutivo tinha a capacidade de fazer.

A descoberta da utilização do método dos Raios-X dentro do campo dos Ensaio não Destrutivos teve como alguns dos seus principais responsáveis pelo desenvolvimento as indústrias aeronáuticas, as indústrias de petróleo e petroquímica, siderúrgicas, bélicas (para inspeção de armamentos, e os inúmeros equipamentos e acessórios utilizados neste campo), as indústrias no ramo de geração de energia, entre outros. Analisando sucintamente a história dos END's, percebe-se que a Radiologia industrial foi o “carro-chefe” no campo dos Ensaio não Destrutivos, pelo fato deste método possuir aplicabilidades em larga escala, não somente nos que foram citados anteriormente.

Muitas pesquisas tiveram seu processo de aprimoramento bastante aceleradas, pois como a utilização de ensaios que não precisam necessariamente destruir o material fisicamente, muitas falhas passaram a ser detectadas antes que o material fosse utilizado em definitivo dentro de um projeto, evitando assim que o material aplicado causasse consequências graves, grandes prejuízos ou até mesmo acidentes de grandes proporções (nesse caso, no ramo da indústria aeronáutica e naval).

De acordo com Souza (2010), é possível fazer uma ordem cronológica dos principais acontecimentos que sinalizam como fatos marcantes na área de Ensaio não Destrutivos:

**AC** – O primeiro relato histórico bastante conhecido, porém pouco atentado é destacado na Bíblia, onde Deus, no seu processo de criação da Terra, ao finalizá-la faz a inspeção visual e a conclui dizendo: “ *Então Deus contemplou toda a sua criação, e eis que tudo era muito bom.* ”

**1800** – Willian Herschel fez a primeira observação termográfica.

**1831** – A primeira observação de indução eletromagnética feita por Michael Faraday.

**1840** – Primeira imagem infravermelha produzida pelo filho de “Herschel”, “John Herschel”

**1868** – Primeira referência em partículas magnéticas, Saxby.

**1879** – Eddy currents, “Hugues”.

**1895** – Descoberta do raio-X por “Wilhelm Conrad Roentgen”.

**1922** – Radiografia industrial para metais, “Lester”.

**1929** – Primeiros experimentos utilizando transdutores de quartzo para criar vibrações ultrassônicas em materiais, “Sokolov” na Rússia.

**1935/1940** – Técnicas penetrantes desenvolvidas nos EUA por “Firestone”.

**1950** – Emissão Acústica, “Kaiser”.

### 2.2.3. A História dos Ensaaios não Destrutivos no Brasil

Os Ensaaios não Destrutivos no Brasil tiveram sua história iniciada na década de 1940 pela Marinha Brasileira, para o ramo da construção naval, com a utilização dos Raios-X, segundo o professor Paulo Gomes de Paula Leite, no artigo “A Origem dos END no Brasil”, publicado na Revista dos END, em 1989. Observando a introdução deste método aqui neste país, constata-se que este seguiu na mesma trilha que foi iniciada na Europa e nos Estados Unidos, onde tal método foi criado e desenvolvido pela necessidade de se estudar falhas em materiais, buscando assim resultados bem satisfatórios para os padrões da época.

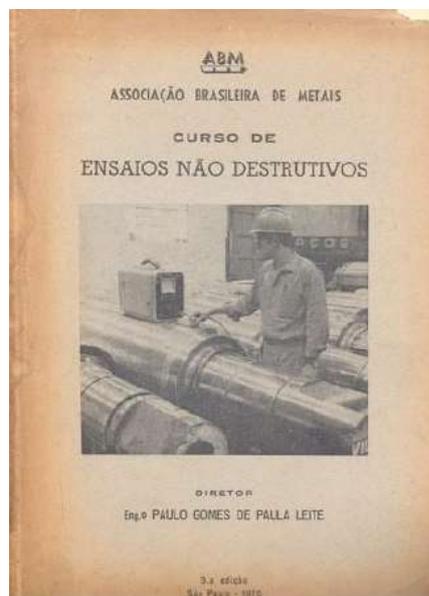
Segundo algumas bibliografias que retratam da biografia deste professor, o mesmo é considerado como o Pioneiro, o patriarca da utilização deste método de ensaio no Brasil. Tais relatos sobre a vida do mesmo indicam que ele serviu aproximadamente 50 anos no Arsenal da Marinha do Rio de Janeiro (Ilha das Cobras), e durante todo esse tempo de serviço, um fato marcante que o destacou bastante foi a utilização dos Raios-X nos equipamentos da repartição onde trabalhava, assim também como as diversas palestras em instituições públicas e privadas de todo o Brasil, tornando-se um verdadeiro propagador dos Ensaaios não Destrutivos. Aliado a este trabalho de disseminação dos END, o mesmo escreveu o primeiro livro de END editado aqui no Brasil pela Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), e no decorrer da história, tornou-se ainda sócio honorário e fundador da Agência Brasileira de Ensaaios não Destrutivos,

Figura 7 – Professor Paulo Gomes de Paula Leite



Segundo a ABENDI, este professor teve uma trajetória profissional de fundamental importância para que os ensaios não destrutivos tivessem um desenvolvimento bastante acentuado fazendo com que tais fatos o tornassem uma pessoa de bastante conceito nesta área. A história que este professor construiu para que estes métodos fossem introduzidos no nosso país o tornou um ícone, um precursor, uma figura lendária na introdução e desenvolvimento dos END no Brasil.

Figura 8 – Capa do livro “Curso de Ensaaios Não Destrutivos”



Fonte: Revista Abendi (2011, p. 12)

No artigo “A Origem dos END no Brasil”, publicado na Revista dos END, em 1989, ele ressalta alguns pontos importante que aconteceram em meados da década de 40 que trata da trajetória da implantação dos END nas indústrias brasileiras. O mesmo retrata que durante a época citada anteriormente (inícios dos anos 40), grande parte dos técnicos tivesse que obter um esforço muito grande, muita das vezes sozinhos, para fazer as inspeções de raios-x em obras de grande responsabilidade, muito provavelmente, tais esforços em realizar os ensaios da maneira correta se dava pelo fato que a mão-de-obra e a estrutura que os mesmos tinham era fraca e escassa, pouco material de trabalho e também muita pouca mão de obra qualificada (vale ressaltar também que a indústria brasileira naquela época era bastante ultrapassada, aquém dos padrões dos Estados Unidos e da Europa). Por isso, estes inúmeros fatores faziam com que o trabalho de fazerem os ensaios fossem feitos com bastante sacrifício.

Contudo, destaca-se que o trabalho feito por estes técnicos na construção dos contratorpedeiros classe “M” que seriam utilizados na Segunda Guerra Mundial “obtiveram um

ótimo desempenho em missões de guerra, não havendo qualquer acidente em soldas de alta responsabilidade de suas estruturas e equipamentos”, e paralelo ao fato do Brasil está na participando da Segunda Guerra junto aos seus aliados liderados pelos Estados Unidos, todo o aparato industrial juntos com os equipamentos de raios-x presentes naquele lugar também eram usados para fornecerem serviços a indústrias privadas, fabricando peças e equipamentos que seriam utilizados em diversas localidades em nosso território, satisfazendo então a demanda do mesmo. (Revista Abendi, 2006, p. 16-17)

Outros acontecimentos registrados dentro das bibliografias do ramo que tratam das primeiras atividades da indústria brasileira utilizando o método de ensaios não destrutivos ocorreu em fevereiro de 1943, no Rio de Janeiro, onde certo navio norte-americano chamado “Cincinnati” aportou no cais desta cidade apresentando problemas mecânicos internos. A perícia inicial descobriu o problema com a flange de aço molibdênio de sua praça de máquinas vazando junto ao parafuso de fixação. Para se obter uma análise mais suscinta do que causou de fato o problema no flange de molibdênio, esta peça foi retirada e enviada ao Laboratório de Radiologia, e assim realizar uma bateria de exames. Terminada a análise, a perícia concluiu com base no resultado das imagens obtidas dentro do laboratório que no interior do flange, havia um defeito na fundição, e como consequência deste último, originava um vazamento do interior da válvula para um furo desse flange. Após a descoberta da falha, toda a válvula foi reparada, onde todo este serviço acontecia sob a supervisão do chefe de máquinas deste navio.

Concluindo este relato, todo o serviço executado dentro desse referido navio foi liberado em menos de 24 horas, não apresentando mais os antigos problemas e entregue para seguir em alto mar. Tal fato serviu como combustível para a aplicação em maior escala deste tipo de método aqui no país.

O jornal Diário do Comércio teve um papel importante na história dos ensaios não destrutivos no Brasil, porque em 1963 publicou em São Paulo no seu respectivo jornal o trabalho realizado na área de END pela empresa Metaltest Cia. Brasileira de Ensaios e Industrial, criada e estabelecida em meados de abril de 1959, sendo a primeira a trabalhar com este método no país.

Relatos de Raimar Schmidt, que começou a trabalhar neste ramo em 1969, conta que um dos problemas mais encontrados na caminhada inicial dos END no Brasil era a falta de qualificação generalizada sobre este método, começando da parte dos gerentes, dos que comercializavam e finalizando nos usuários ou mesmo, ou seja, um entrave para que os END se desenvolvessem de maneira mais rápida, por isso a necessidade recorrente da ajuda dos profissionais do exterior, especialmente dos técnicos dos Estados Unidos e da Europa.

Prosseguindo com a história dos END no país, na primeira metade da década de 70, o ex-presidente da ABENDI e no momento atual membro do conselho deliberativo e sócio-diretor da Inter-Metro Oswaldo Rossi Jr. fundou a segunda empresa de ensaios não destrutivos no Brasil, a chamada NDT - Sociedade Civil de Engenharia e Inspeções, atualmente NDT do Brasil. O mesmo comenta que esta empresa iniciou suas atividades na área de ultrassom, e posteriormente, começou a fazer inspeções radiográficas. Este conclui dizendo que “foi uma época muito interessante, com demanda elevada de serviços, motivada pelo início da boa expansão industrial”.

Alcides Taveira comenta os impactos positivos que a indústria brasileira teve ao iniciar o processo de implantação dos END se deu pela crescente exigência das indústrias neste país, que buscavam constantemente pela melhoria da qualidade de seus produtos, tanto física quanto técnica. Ele ressalva que toda a indústria brasileira cresceu em termos de qualidade, algo que não estava muito presente por aqui, mas que todo esse projeto forçou todas as indústrias a passarem por este processo de melhoramento dos produtos, aliado ao conceito de qualidade.

Após a crescente utilização dos END no Brasil, observou-se que o ambiente se tornou bastante promissor para o ramo. Segundo Renato dos Santos Pereira, cada vez mais, se havia a necessidade de vencer as barreiras tecnológicas da construção de equipamentos para a indústria química, petroquímica, nuclear, ferroviária e siderúrgica, entre outras, pois historicamente falando, o Brasil sempre foi atrasado em relação aos aparatos de tecnologia, como também na área da indústria, sendo recorrente citado nos livros de história e geografia que a industrialização no Brasil foi historicamente tardia ou retardatária. Por isso que nos anos 70, o Brasil teve que se enquadrar dentro do panorama tecnológico mundial, todavia que grandes equipamentos de alta complexidade iriam ser construídos pelas nossas indústrias, pois muitos projetos estavam em pauta para serem executados, como a construção de novas refinarias, novas usinas hidroelétricas, novas usinas siderúrgicas, plataformas marítimas, como também a parceira em Brasil e Alemanha para a criação do programa nuclear que estaria sendo iniciado.

Percebe-se que o crescimento dos END coincidiu com o desenvolvimento em larga escala da industrialização brasileira, onde grandes obras da indústria nacional estavam se iniciando, e paralelo a isso, a necessidade de qualificação e certificação da qualidade, para se encaixar nos parâmetros de qualidade que eram exigidos na execução dos ensaios não destrutivos no exterior, e por consequência destes fatos, provocou-se um aumento da segurança de operação destes equipamentos.

Waldir Algarte Fernandes descreve algum dos acontecimentos que fizeram com que a grande e estatal PETROBRAS começasse a ganhar corpo no cenário deste país. Ele conta que

final da década de 1970, começo da de 1980, tal empresa começou a construir uma das primeiras plataformas de petróleo da Bacia de Campos, e com isso, a empresa passou a buscar no mercado profissionais que eram qualificados e certificados. Ele relata que a PETROBRAS criou um centro de certificação de processos e pessoal de Ensaio Não Destrutivo em São José dos Campos, o SL/SEQUI (Setor de Certificação, Qualificação e Inspeção dos Serviços de Logística de Engenharia), através do Serviço de Engenharia. Percebe-se nesse caso toda uma preocupação da empresa em formar profissionais qualificados e certificados para poder atuarem junto a empresa na construção de seus projetos, onde durante este processo, a mesma exigia do profissional um treinamento teórico e prático sobre determinados tipos de ensaios.

Tal processo de certificação de determinados funcionários foi de fundamental importância, pois algumas empresas fornecedoras de produtos e serviços para a PETROBRAS não tiveram despesas para os inspetores de Ensaio Não Destrutivo, e isso se tornou referência para a implantação dos END, e estes métodos foram decisivos pois fizeram com que este tomasse autossuficiente em petróleo.

#### 2.2.4. Surgimento da ABENDI

A Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção – ABENDI, teve a sua criação e evolução muito por causa da implantação dos END no Brasil. Um dos sujeitos responsáveis pela sua criação, Oswaldo Rossi Jr. conta com uma participação ativa de mais de 25 anos, e o mesmo afirma que nos anos de 1978 havia empresas nacionais e outras vindas do exterior e, com a crescente utilização dos END, surgiu a necessidade de aglutinação dos técnicos. Em meados de 1978, a PETROBRAS já se encontrava em pleno desenvolvimento, onde seus planos de crescimento cresciam cada vez mais, e paralelo a isso, houve a necessidade de organizar e aglutinar o setor de END. Com base no crescente mercado dos END aliado a uma empresa que estava se tornando uma gigante nacional, já ganhando também status de Multinacional, a ASNT (The American Society for Nondestructive Testing) iniciou uma investida junto ao mercado brasileiro, e com isso, houve uma reação interna fazendo com que a ABENDE fosse criada, e junto com ela aliou-se os técnicos, os que estavam interessados no ramo e também um forte apoio e adesão das indústrias, e dentre elas a forte PEROBRAS. Portanto, em 1979, a ABENDE foi fundada, com um misto de patriotismo saudável e um auto reconhecimento daqueles iniciavam e participavam dessa história.

## 1.5. Líquidos Penetrantes

### 2.3.1. Introdução e Breve Histórico

No ramo dos métodos de Ensaio não Destrutivos, existem inúmeros destes que são utilizados para determinados fins, visando é claro a busca por determinados tipos de falhas em materiais sem necessariamente destruí-los, fazendo-o passar pelo processo de deformação plástica. Os variados tipos de END foram surgindo ao longo dos anos, pela necessidade que a indústria teve de fazer um melhoramento da qualidade de seus produtos, executando teste de qualidades de matérias para poder evitar o máximo possível de defeitos. Historicamente, o primeiro método que deu a largada no mundo dos END foi o Ensaio por Inspeção Visual, seguido por Ultrassom, este ganhando bastante destaque em meados da Segunda Guerra Mundial, e partir dele outros métodos foram surgindo, como o de Líquidos Penetrantes, o de Inspeção Visual, por Correntes Parasitas, por Partículas Magnéticas, o de Magnetoelástico, com Termografia, entre outros.

Aprofundando o estudo sobre o método de ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes, este se desenvolveu no início da década de 40, com a utilização do penetrante visível, onde dentro do mesmo tinha um corante, e neste corante era necessário que possuísse cores fortes, para obter uma melhor visualização e análise daquilo que se estava pesquisando, por isso o vermelho começou a ser a cor mais usada, inclusive até nos dias atuais. A larga expansão da indústria aeroespacial fez que o método de ensaio por líquido penetrante alcançasse um desenvolvimento em larga escala, em consequência da necessidade de se examinar materiais não magnéticos.

De modo geral, faz-se o uso do método de ensaio por líquidos penetrantes para procurar descobrir discontinuidades superficiais em materiais. Os primeiros registros na história recente dos END por líquidos penetrantes se deram pela utilização de um método bastante similar usado pela indústria ferroviária logo quanto esta começou a despontar. De acordo com esses registros, o processo se dava pela diluição com querosene de um óleo pesado, esse último muito encontrado em oficinas onde se realizam a manutenção ferroviária. Seguindo com o procedimento, o resultado da diluição era depositado em grandes tanques onde seriam colocados os componentes que passariam pelo processo de inspeção, podendo ser rodas, eixo, mancal, entre outros. Depois que o tempo de imersão fosse concluído, todos os componentes eram retirados dos tanques, impreterivelmente limpos e sua superfície recoberta com uma camada fina de pó de giz em suspensão com álcool pois, em consequência da evaporação do

álcool, uma fina camada de pó branco na superfície era formada. Passada esta etapa, o componente passava por um processo de vibração para assim facilitar a saídas de óleo de trincas superficiais que poderiam existir, fazendo com que fosse criada uma mancha bem no local da cobertura branca. Vale ressaltar que este método, conhecido como método do óleo e giz, não era muito confiável por causa da inexistência do controle dos materiais utilizados, como o óleo, o querosene e o giz, e acrescentando ainda mais, este mesmo teste não era capaz de detectar pequenas trincas de defeitos superficiais.

Com o passar do tempo, foram se desenvolvendo testes mais precisos e com o nível de confiabilidade cada vez maior, e em consequência disto, em 1930 este método do óleo e giz acabou sendo substituído pelo método de partículas magnéticas. Visando melhorar o teste de óleo e giz, em 1942 nos Estados Unidos, Roberto C. Switzer depois de vários anos estudando e pesquisando uma maneira de aprimorar este teste, o mesmo desenvolveu a então conhecida técnica de END por líquidos penetrantes, para se trabalhar com materiais que em sua composição tinha ligas de metais não ferrosos, como por exemplo alumínio e titânio, onde estes citados não podem ser trabalhados por partículas magnéticas, tendo a indústria aeronáutica com a pioneira do ramo na exploração desse potencial método de END.

### 2.3.2. Descrição de um END por Líquido Penetrante

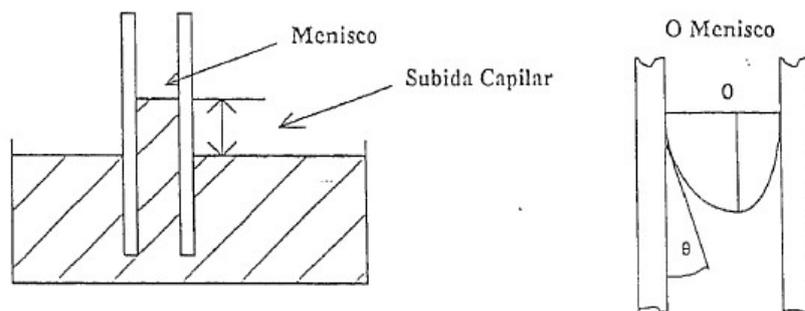
Atualmente, o método de ensaios por líquidos penetrantes é um dos melhores e um dos mais recomendados dentre os END para se fazer a detecção de descontinuidades abertas que podem existir na superfície nos mais diversos materiais desprovidos de porosidade, ou seja, materiais que são isentos na existência de poros em sua superfície. Exemplificando estes materiais com as características citadas no contexto anterior, temos como exemplos os materiais ferrosos e os materiais não ferrosos, as ligas metálicas e cerâmicas, determinados tipos de plásticos ou materiais organo-sintético, e os vidros. Ressalta-se que para a constatação de vazamentos em tubos, tanques, soldas ou componentes, o método por líquidos penetrantes também é largamente utilizado.

Para se entender o procedimento da utilização deste método de END, precisa-se saber antes o fenômeno teórico por trás de todos esse processo onde o líquido penetrante adentra através das falhas de um determinado material, fenômeno este chamado de capilaridade. Segundo Peter (2002), a Capilaridade é um fenômeno de atração e repulsão onde ocorre o contato do líquido com o sólido, onde o resultado desta ação faz com que este líquido suba ou desça, mesmo que molhe ou não a parede. Quando se há uma constante tendência dos líquidos

subirem nos tubos capilares, esta se chama capilaridade ou ação capilar, e a consequência desta ação ocorrer por causa da tensão superficial. Por isso que o fenômeno da capilaridade acontece com bastante frequência na natureza, por causa que a ação das forças que interveem neste fenômeno depende de alguns fatores, e dentre estes podemos citar dois, que são a tensão superficial e a viscosidade do líquido. Observa-se que a facilidade que o líquido tem de entrar numa cavidade se dá pela função da ação capilar.

Segundo Neves (1998), para se entender melhor este efeito, será ilustrado abaixo através de uma figura, onde um tubo de diâmetro pequeno será invertido num reservatório, contendo líquido. Ao realizar este trabalho, observar-se-á que o líquido subirá no tubo, até ao ponto onde o equilíbrio entre a pressão capilar e a pressão atmosférica será atingido.

Figura 9 – Ilustração do mecanismo da ação capilar.



Fonte: Neves (1998).

Expressando esta ilustração pelo modelo matemático, ver-se que a pressão capilar é dada por:

$$P = \frac{2 \times \delta \cos \theta}{D} \quad (1)$$

Onde:

P = pressão capilar;  $\delta$  = tensão superficial do líquido; D = diâmetro do tubo;  $\theta$  = ângulo de contato.

Analisando a fórmula, a mesma mostra que quando ocorre um aumento da tensão superficial, ou então uma diminuição do ângulo de contato ou até mesmo a diminuição do diâmetro do tubo, faz com que ocorra um aumento da pressão capilar e em consequência, a altura do tubo capilar.

### 2.3.3. Princípio Básico

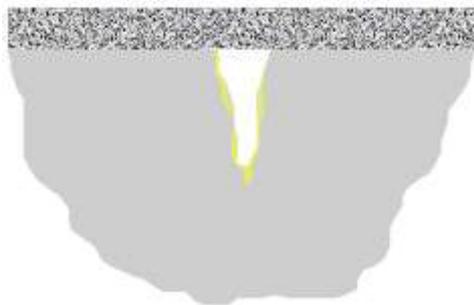
No emprego prático do Líquido Penetrante dentre os END no objetivo final de quem a esta utilizando, será feito o procedimento onde o método consiste em fazer penetrar na abertura da descontinuidade do líquido. Feito isso, será feita a remoção do excesso de líquido na superfície, e, por conseguinte, faz-se sair da descontinuidade o líquido retido através de um revelador. Tal procedimento faz com que a imagem da descontinuidade fique então desenhada sobre a superfície.

Para melhor entender o emprego deste método, a Andreucci (2016) descreve as seis etapas principais deste ensaio:

#### m) Preparação da superfície – Limpeza Inicial;

Devemos ressaltar alguns detalhes imprescindíveis que precedem a aplicação desta etapa. A superfície deve ser limpa e seca, não existindo, portanto, água, óleo ou outro contaminante, pois caso exista, ou seja, constatado a presença de contaminantes ou excesso de rugosidade, ferrugem entre outros, tornará então o ensaio não confiável.

Figura 10 – Preparação e limpeza da superfície



Fonte: Andreucci (2016).

#### g) Aplicação do Penetrante;

Constitui-se na aplicação de um líquido chamado penetrante, onde normalmente este tem uma coloração vermelha, para que seja formado um filme sobre a superfície, onde o fenômeno por trás do trabalho realizado por este líquido chama-se capilaridade, penetrando assim na descontinuidade. Ressalta-se que para este procedimento, deve ser dado um tempo até que a penetração se complete.

Figura 11 – Tempo de penetração do líquido na abertura



Fonte: Andreucci (2016).

h) Remoção do excesso de penetrante;

O trabalho a ser realizado nesta etapa consiste na retirada do excesso de penetrante existente na superfície, onde esta retirada terá o auxílio de produtos, e estes produtos devem ser compatíveis com o tipo de líquido penetrante aplicado, para que assim a superfície fique isenta de qualquer resíduo sobre a sua superfície.

Figura 12 – Remoção do excesso de líquido na superfície



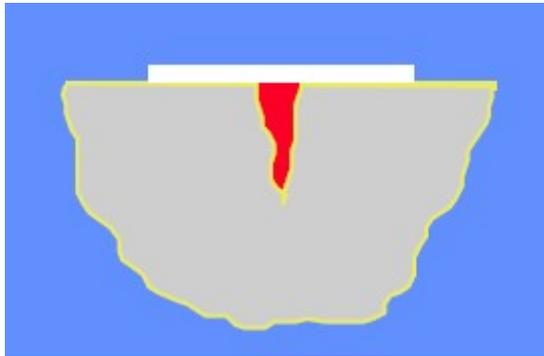
Fonte: Andreucci (2016).

i) Revelação

Nesta etapa, será feita a aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície. Uma das características deste revelador geralmente usados no cotidiano é seu aspecto de um pó fino (talco) de coloração branca. A aplicação deste pode variar, podendo estar seco ou em suspensão, em algum líquido. O trabalho deste revelador consiste em absorver o penetrante das

descontinuidades, fazendo assim a sua revelação. Deve ser previsto um determinado tempo para que todo este processo seja concluído, para que esta etapa seja finalizada com sucesso.

Figura 13 – Aplicação do revelador e observação da indicação



Fonte: Andreucci (2016).

#### j) Avaliação e Inspeção

Prosseguindo com as etapas de aplicação de um END por líquido penetrante, as indicações começam a serem observadas após a resposta do penetrante via leitura visual, por meio da mancha causada pela absorção do penetrante que estava contido na abertura, sendo estas manchas objeto de avaliação.

Para fazer esta análise, a inspeção deverá ser feita em um ambiente sob boas condições de luminosidade, caso o penetrante seja do tipo visível (cor contrastante com o revelador), ou sob luz negra, em um ambiente escurecido, caso o penetrante seja do tipo fluorescente.

Após seguir com indicações de ambiente para ser fazer uma boa análise, ressalta-se que a interpretação dos resultados obtidos da análise deve ser baseada no Código de Fabricação da Peça ou compatível com a norma aplicável, ou até mesmo com a especificação técnica exigida pelo cliente.

Avançando com os procedimentos desta etapa, é de fundamental importância que seja preparado um relatório escrito mostrando as condições do ensaio, tipo e identificação da peça ensaiada, a decorrência da inspeção como também as condições de aprovação ou até mesmo a rejeição da peça.

Observa-se que esta etapa é a mais demorada de todas devido a sua complexidade, principalmente quando a peça apresenta uma série de defeitos. Conseqüentemente, deve ser executado um reparo imediato das indicações rejeitadas fazendo um novo teste para se obter um novo resultado, procedimento este o mais recomendado diante destas circunstâncias.

Figura 14 – Absorção do líquido, pelo revelador, de dentro da abertura.



Fonte: Andreucci (2016).

#### k) Limpeza pós ensaio

Passado a execução de todas as etapas anteriores, será executado então a última etapa, não menos importante, mas de fundamental importância, quase que obrigatória, onde será feita a limpeza de todos os resíduos de produtos, que podem vir a prejudicar tanto o inspetor ou quem está realizando este ensaio, quanto uma etapa posterior de trabalho da peça (soldagem, usinagem, entre outros).

#### 2.3.4. Vantagens e Limitações/Desvantagens deste Ensaio

Como todo ensaio não destrutivo, este também tem as suas particularidades, as suas vantagens, como também as limitações ou desvantagens. Todo método aplicado na indústria compatível com sua utilização não é como um todo completo, pois como já foi mencionado, tem as suas limitações. Contudo, é de fundamental importância que saibamos tais limitações, para poder contornar um possível problema caso seja encontrado, ou quando este método não satisfaz com as exigências do operário/técnico, como também do supervisor destas análises.

Analisando este método de END por Líquidos Penetrantes, a Andreucci (2016) lista uma série de vantagens que se têm ao trabalhar com este tipo de ensaio:

- 1) Considerada como uma das suas principais vantagens, que é a sua simplicidade. Pois quando se começa a trabalhar com este END, percebe-se a praticidade que se tem ao elaborar este método e interpretar os seus resultados, não exigindo do técnico uma qualificação extensa, onde com o aprendizado simples e tomando os devidos cuidados, todo esse processo decorrerá normalmente;

- 2) Quando se faz uma análise visual os resultados deste ensaio, esta é comparada com uma fotografia do defeito, pois os mesmos serão detectados pelo penetrante. Após este momento, todo cuidado básico deve ser tomado pelo inspetor, como por exemplo, a limpeza, o tempo de penetração, entre outros, pois qualquer deslize na preparação e na análise resultará em prejuízos, descaracterizando assim todo o processo;
- 3) A partir do momento em que o ensaio por líquido penetrante é escolhido pelo técnico, sob a supervisão do inspetor, este é ciente de que não existe uma limitação para o tamanho e a forma da peça que será submetida a este tipo de ensaio, contudo, ressalta-se mais uma vez que estas mesmas peças após terem passado por este método, devem ser susceptíveis à limpeza e sua superfície não pode ser muito rugosa e nem porosa;
- 4) Ao escolher este ensaio para se fazer uma análise de defeito, sabe-se que o poder de alcance que este método possui de revelar uma descontinuidade (trinta) extremamente fina é substancial (da ordem de 0,001 mm de abertura), sendo estas trintas imperceptíveis a olho nu.

Após listar as vantagens que este método de END por Líquido Penetrante tem a oferecer, este também tem as suas limitações, pois todo ensaio não possui total vantagem a que o utiliza. Mais isso não quer dizer que tais limitações desfavoreçam este ensaio, pelo contrário, abre um vasto número de escolhas de método de END onde provavelmente um destes irá resolver o problema no ambiente onde este será instalado e manuseado.

Segundo Andreucci (2016), existe uma série de limitações que este ensaio apresenta, onde estas limitações devem ser conhecidas pelo técnico antes de operá-la em algum setor, seja este em uma oficina, ou uma indústria, entre outros, que são:

- 1) Este método detecta apenas as descontinuidades abertas para a superfície, pois o um de seus principais componentes, o penetrante, tem que entrar na descontinuidade (caso ela exista) para assim ser revelado. Por esta razão, a descontinuidade não deve ser preenchida com nenhum material estranho, sob o risco de comprometer os resultados deste ensaio;
- 2) Para o bom andamento do processo, a superfície do material não pode ser porosa ou absorvente, pois não haveria possibilidade de remover totalmente o excesso do penetrante, provocando então um mascaramento de resultados, desqualificando o processo;
- 3) Na etapa de aplicação do penetrante, o procedimento de emprego do penetrante deve ser executada em uma faixa de temperatura, permitida ou recomendada pelo fabricante dos produtos. No caso da existência de superfícies muito frias (abaixo de 5 °C) ou

muito quentes (acima de 32 °C), as mesmas tornam-se inadequadas para este tipo de ensaio. Para isso, o técnico deve recorrer a produtos ou técnicas especiais.

- 4) Para a realização deste ensaio, algumas aplicações de peças em inspeção fazem com que a limpeza das mesmas seja efetuada de mais completa possível após o término do ensaio (no caso de equipamentos ou peças para a indústria alimentícia, material que novamente irá passar pelo processo de soldagem posteriormente, entre outros), e isso gera uma complicação bastante complexa, pois este fato pode torna-se limitativo ao exame, principalmente quando a limpeza for difícil de fazer, sem esquecer também aquelas peças de geometria complicada.

### 2.3.5. Propriedade dos Produtos e Elementos Físicos

#### *1.5.5.1. Propriedades Físicas do Penetrante*

Um dos componentes essenciais dentro deste método de ensaios não destrutivos se chama Penetrante, onde este componente irá executar uma das etapas mais importante deste ensaio, que é o de fazer a detecção de falhas ou defeitos que podem estar presentes em um determinado material. Segundo Andreucci (2016), a palavra “penetrante” carrega em seu nome um significado que este exerce dentro deste método de END, ou seja, de possuir uma propriedade essencial que este produto deve ter, a sua grande capacidade de penetrar em aberturas finas. Todo e qualquer produto penetrante deve ser produzido para que tenha boas propriedades e que atenda a uma série de requisitos listados abaixo:

- m) O penetrante deve possuir uma extrema capacidade de penetrar em aberturas finas durante um curto espaço de tempo;
- n) O penetrante dever ter a habilidade de manter-se em aberturas consideravelmente grandes;
- o) Após a aplicação do penetrante no material, este deve ser facilmente limpo;
- p) Não possuir características como evaporação rápida e secar rapidamente;
- q) Durante o processo de aplicação do revelador, este deve sair das descontinuidades onde foi penetrado em um curto espaço de tempo;
- r) Possuir uma habilidade de espalhar-se nas superfícies, criando assim camadas finas;

- s) O brilho tem que ser um fator bem notável, pois com o auxílio dela que será possível detectar possíveis falhas. Ressalta-se que o fabricante deve fazer a constatação da concentração do corante vermelho no penetrante baseado na Lei de Beer;
- t) Durante a exposição ao calor, luz e/ou luz negra, o penetrante não deve sofrer alterações, permanecendo então constante a estes fatores;
- u) O penetrante não deve ter qualquer reação com a sua embalagem e principalmente com o material a ser testado;
- v) Não pode ser facilmente inflamável, podendo causar consequências graves mesmo seguindo todo o aparato necessário para executar este ensaio;
- w) Não sofrer alterações depois de certo período estocado e tampouco durante o seu uso;
- x) O fator tóxico do penetrante não pode estar em níveis elevados/
- y) Como é característico de todo o processo, possuir um custo relativamente baixo.

Depois da análise das principais características dos penetrantes, é importante saber também que estas características andam correlacionadas com alguns outros fatores extremamente importantes, fatores estes que contribuem diretamente com o bom andamento do trabalho dos penetrante, que são:

#### i. Viscosidade

De acordo com Andreucci (2016), a viscosidade tem um grau de importância na velocidade com que o penetrante entre no defeito, ou seja, se o penetrante é mais viscoso, então consequentemente ele demorará mais para poder penetrar nas descontinuidades. Porém, se o penetrante for menos viscoso, este terá a tendência de não permanecer por muito tempo sobre a superfície, sendo isto o fato a ser considerado de forma negativa, pois o tempo insuficiente para a penetração comprometerá com os resultados deste ensaio, e se o penetrante não tiver o tempo necessário para realizar o trabalho, muitas falhas deixaram de ser detectadas. Contudo, há de se ressaltar que esta propriedade não é um fator determinante para qualificar se o penetrante é bom ou ruim, ou seja, na sua capacidade de penetrar nas descontinuidades. Se seguirmos a lógica, chegaríamos a conclusão de que um líquido menos viscoso é melhor do que um líquido mais viscoso, só que ao citar o exemplo da água, onde esta tem baixa viscosidade, mas não é um bom penetrante, veríamos que esta seria uma exceção à regra. Por mais que estes detalhes possam causar uma certa “confusão” para quem estuda o assunto, devemos lembrar

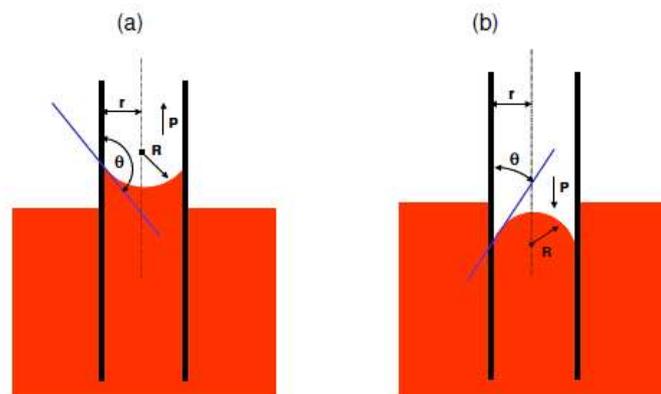
que ainda sim a viscosidade influencia na eficiência do penetrante, não como um fato principal, mas como um fator com grau de importância alto como já foi falado anteriormente.

## ii. Tensão Superficial

Segundo Andreucci (2016), conceitua-se tensão superficial como uma força que está presente na superfície de líquidos em estado de repouso. Esta tensão superficial é resultado das fortes ligações intermoleculares, onde estas dependem das diferenças elétricas entre as moléculas, podendo ser definida como a força por unidade de comprimento (N/m) que duas camadas superficiais exercem uma sobre a outra.

Andreucci (2016) prossegue afirmando que este efeito é bastante observado na água e no mercúrio, e como já foi falado anteriormente, é observado com a ajuda de um fenômeno chamado Capilaridade. Exemplificando em poucas palavras o efeito da capilaridade, dar-se o fato de que o líquido quando presente dentro de um tubo capilar (preferencialmente muito fino), ocorre que a atração entre as moléculas do líquido e as moléculas do material do tubo podem acontecer de uma maneira maior ou menor do que a força de coesão interna do tubo, tendo como consequência a formação de uma concavidade (a) ou uma convexidade (b) na superfície do líquido, pois o fator que faz com os mesmos aparecem se dá pelo efeito de tensão superficial nos líquidos, onde toda a complexidade deste processo será ilustrada na figura abaixo:

Figura 15 – Ilustração gráfica do processo de formação de uma concavidade (a) e de uma convexidade (b)



Fonte: Andreucci (2016).

Analisando matemática este efeito, percebe-se as forças que envolvem o efeito da tensão superficial são aquelas que estão associadas com a ação da capilaridade ou pressão de superfície (P), demonstrada abaixo pela seguinte fórmula:

$$P = \frac{2 \cdot \gamma}{R} \quad (2)$$

onde  $\gamma$  é a tensão superficial

Continuando com a análise da figura acima (a), o líquido adentra no tubo capilar mostrando uma forma côncava formando um ângulo “ $\theta$ ” de contato com as paredes do tubo maior que  $90^\circ$ . Partindo para a segunda parte da figura acima (b), o líquido adentra no tubo capilar mostrando uma forma convexa formando um ângulo de contato com as paredes de tubo menor que  $90^\circ$ . Sabendo que o  $\text{Cos}(\theta) = r/R$ , a equação da pressão será reescrita da seguinte forma:

$$P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{r} \quad (3)$$

Com base nesses dados, observamos que a pressão da capilaridade (P) aumenta diretamente com a tensão superficial ( $\gamma$ ) do penetrante e inversamente proporcional ao raio do tubo. Por isso, quanto melhor a propriedade de capilaridade do líquido penetrante, maior será a tensão superficial, provando então que estes dois fenômenos se colocam entre os fatores principais em um líquido penetrante.

Figura 16 – Variação da Pressão Capilar e a Tensão Superficial

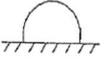
| Tensão Superficial<br>$\gamma$ (N.m <sup>-1</sup> ) | Raio do Tubo Capilar<br>r | Pressão Capilar - P<br>(Pa) |
|---|---------------------------|-----------------------------|
| 0,025   | 1,0 mm                    | 50                          |
| 0,035   | 1,0 mm                    | 70                          |
| 0,025   | 0,1 mm                    | 500                         |
| 0,035   | 0,1 mm                    | 700                         |
| 0,025   | 0,01 mm                   | 5000                        |
| 0,035   | 0,01 mm                   | 7000                        |
| 0,025   | 1 $\mu\text{m}$           | 50000                       |
| 0,035   | 1 $\mu\text{m}$           | 70000                       |

### iii. Molhabilidade

Segundo Andreucci (2016) esta é a propriedade onde o líquido deve ter a capacidade de se espalhar por sobre a superfície, se necessário por completo, buscando evitar que este líquido se aglomere em porções ou gotas. Quanto melhor a capacidade de molhabilidade de um líquido, melhor será o penetrante, pois esta característica está correlacionada com a tensão superficial. Por causa disto, os agentes tensoativos são incluídos na formulação do penetrante.

Neves (1998) afirma que o ângulo de contato  $\theta$  serve para a medição do poder de molhagem do líquido. A tabela abaixo fará a relação do ângulo de contato com o poder de molhagem e a forma da gota.

Figura 17 – Relação do ângulo de molhagem com poder de molhagem e forma da gota.

| Ângulo de Contacto | Poder de Molhagem | Forma da Gota  |
|--------------------|-------------------|--|
| Menor que 90°      | Alto              |  |
| 90°                | Moderado          |  |
| Maior que 90°      | Baixo             |  |

Fonte: Neves (1998)

Seguindo com as recomendações da Neves (1998), o ângulo de contato depende diretamente das propriedades físicas do líquido e da água. Cita-se como exemplo a água, onde o ângulo de contato aumenta com o engorduramento da superfície.

### iv. Volatibilidade

Segundo a Andreucci (2016) a propriedade da volatibilidade, generalizando-a, diz que um penetrante não deve ter a volatibilidade como uma de suas características, ou seja, a capacidade que a mesma tem de passar para o estado de vapor. Contudo, deve-se considerar que esta propriedade para os derivados de petróleo é bastante aceitável, pois quanto maior a volatibilidade, maior a viscosidade. Como a recomendação técnica afirma que é desejável ter

uma viscosidade média, então os penetrantes devem ser em sua composição uma taxa mediana de volatilidade.

Em contrapartida, a quantidade de volatilidade influenciará negativamente na utilização final do penetrante, ou seja, quanto mais volátil o penetrante menor será o tempo disponível para a penetração poder acontecer. Contudo, quando o penetrante adentra ao interior do defeito, ele tende a se volatilizar.

#### v. Ponto de Fulgor

Segundo Andreucci (2016), o ponto de fulgor é a temperatura na qual há uma quantidade de vapor na superfície do líquido, onde a presença de uma chama pode inflamá-lo. Por isso, um penetrante com boas qualificações deve ter um ponto de fulgor acima de 90°.

Na tabela a seguir, esta mostrará os pontos de fulgor de determinados líquidos, para efeito de comparação. Tal propriedade se mostra importante pelo fato de algumas recomendações como segurança estar relacionada com a utilização do produto.

Figura 18 – Pontos de Fulgor de alguns líquidos

| LIQUIDO         | Ponto de Fulgor |
|-----------------|-----------------|
| Acetona         | - 18° C         |
| Nafta           | - 1° C          |
| Alcool metílico | 12° C           |
| Alcool etílico  | 14° C           |
| Glicerina       | 160° C          |

Fonte: Andreucci (2016).

#### vi. Inércia química

Segundo Andreucci (2016), é de fundamental importância que esta propriedade esteja dentro da composição de qualquer tipo de penetrante, pois este deve ser inerte e não corrosivo com o material onde o penetrante deverá ser aplicado, e isto inclui também para com a embalagem onde o penetrante é armazenado.

Andreucci (2016) faz uma relação mais específica com certos tipos de materiais, onde os produtos oleosos aparentam não apresentar perigo, exceto quando estes entram em contato com a água, pois nesse caso irá se formar uma mistura alcalina. Ressalta-se que durante uma inspeção de alumínio ou magnésio, deve-se observar a limpeza final feita por quem está fazendo

o uso deste ensaio, pois a falta desta pode acarretar futuramente após um certo período de corrosão na forma de “pitting”. No caso da aplicação de penetrantes em materiais com ligas à base de níquel, recomenda-se um penetrante que contenha baixos teores de alguns elementos prejudiciais.

#### vii. Habilidade de dissolução

De acordo com Andreucci (2016), recomenda-se que o penetrante deve vim incorporado ao seu produto corantes ou fluorescentes que devam estar o máximo possível dissolvido, ou seja, o penetrante com boas qualificações deve ter como uma de suas características a capacidade de manter dissolvido estes agentes.

#### viii. Toxidez

Por fim, Andreucci (2016) recomenda que todo e qualquer penetrante não pode possuir em uma de suas características a toxidez e o odor exagerado, e por último, porém não menos importante, não dever ser em hipótese nenhuma causar irritação na pele.

#### *1.5.5.2. Sensibilidade do Penetrante*

De acordo com Andreucci (2016), esta característica se dá pela habilidade que o penetrante deve possuir de detectar discontinuidades, caso estas existam. Para casos onde há uma variabilidade de penetrante quanto ao fato de ser mais sensível ou menos sensível, o primeiro detecta melhor os defeitos do que o segundo, quando há a presença de discontinuidades em particular. Por isso, existem uma série de fatores que afetam a sensibilidade de um penetrante, e alguns destes serão citados abaixo:

- a) Habilidade de penetrar nas discontinuidades;
- b) Habilidade de ser removido da superfície, exceto as que estão sobre o defeito;
- c) Possui a capacidade de ser absorvido pelo revelador;
- d) Possuir a capacidade de ser visto mesmo após ser absorvido pelo revelador, mesmo em quantidades pequenas.

Por isso, existe no âmbito dos END por líquido penetrante, determinadas normas técnicas que visam classificar os líquidos penetrantes quanto à visibilidade e tipo de remoção. A norma ASTM E-165 determina a classificação dos penetrantes de acordo com a tabela a seguir:

Figura 19 – Tipos de Líquidos Penetrantes. Obs.: A figura 19 demonstra a classificação conforme Código ASME Sec. V – SE-165 ou ASMT E-165

| TIPOS<br>quanto à visibilidade | MÉTODOS |                                   |          |
|--------------------------------|---------|-----------------------------------|----------|
|                                | Água    | Pós-Emulsificável                 | Solvente |
| "TIPO I"<br>(Fluorescente)     | A       | B (Lipofílico)<br>D (Hidrofílico) | C        |
| "TIPO II"<br>(Luz normal)      | A       | -                                 | C        |

Fonte: Andreucci (2016).

Andreucci (2016) continua afirmando que quando se trabalha com líquidos penetrantes, estes devem ser analisados quanto aos teores de contaminantes, como por exemplo, o enxofre, o flúor e o cloro, quando a aplicação destes forem efetuadas em materiais de titânio, com ligas a base de níquel, e em materiais inoxidáveis austeníticos. Quando se parte para a próxima etapa do procedimento de análise de falhas e/ou defeitos utilizando LP, estes devem estar de acordo com a norma aplicável de inspeção do material ensaiado, onde todas estas normas estão devidamente regulamentadas.

Figura 20 – Na ordem, Penetrante Tipo II A, Penetrante Tipo II C, Penetrante Tipo I B ou D



Fonte: Andreucci (2016).

### 1.5.5.3. Propriedades do Revelador

Quando se começa a operar um determinado tipo de ensaio não destrutivo por líquido penetrante, deve-se conhecer as propriedades de um dos principais componentes deste ensaio, componente este que irá fazer umas das funções mais importante deste processo, que é a de revelar as possíveis falhas que podem existir em um material. Segundo Andreucci (2016) é possível enumerar algumas das características de maior valor presentes em um revelador, que são:

- a) Possuir a habilidade de absorver o penetrante na descontinuidade;
- b) Desempenhar a função de ser uma base por onde o penetrante se propague – granulação fina;
- c) Desempenhar a função de servir para que o penetrante cubra a superfície evitando provocar uma possível imprecisão com a imagem do defeito, formando assim uma camada fina e uniforme;
- d) Possuir a habilidade de ser facilmente removível;
- e) O penetrante em hipótese nenhuma não deve conter em sua composição substâncias que possam vir a prejudicar o operador, como também ao material que passará pela etapa de inspeção (neste último caso, aconselha-se verificar se o revelador é compatível com as características do material onde este será aplicado).

De acordo com Andreucci (2016), para fazer a aplicação do revelador em um determinado tipo de material usando END por líquidos penetrantes, torna-se necessário que o operador conheça as classificações dos reveladores, pois estes irão aumentar a nitidez das indicações que serão dadas pelo penetrante. Por isso, alguns deles serão explicados a seguir:

- a) Pós secos

O revelador com esta característica se dá pelo fato da sua composição não ser a base de um líquido qualquer, como o próprio nome já o diz. Historicamente, estes foram os primeiros reveladores que foram usados com penetrantes fluorescentes, e atualmente continuam a serem usados no âmbito deste END, especificamente. A composição destes reveladores nos primórdios era basicamente de talco e giz. Porém, como o decorrer do tempo, os reveladores mais preferíveis no mercado nesta característica constituem de uma composição bastante cuidadosa de pós.

Seguindo com o entendimento da composição destes pós, os mesmos devem ser leves e macios, sendo necessários que estes tenham a capacidade de aderir em superfícies metálicas contento esta uma camada fina, pois caso ocorra que estes reveladores tenham aderido em excesso, seriam difíceis de serem removidos, por isso busca-se evitar esta possibilidade. Por serem bastante leves, torna-se necessário um cuidado maior para que estes não flutuem no ar, pois isto ocasionaria a poeira. O operador que trabalha com este tipo de revelador deve ter os cuidados necessários para se proteger, sob risco de causar problemas para si. Ressalta que os

reveladores na característica de pós-secos têm o seu uso muito restrito, por causa da sua falta de confiabilidade.

b) Suspensão aquosa de pós reveladores

Andreucci (2016) afirma que normalmente, este revelador é utilizado em inspeção pelo método fluorescente. O efeito da suspensão provoca o aumento da velocidade da aplicação pois, pelo tamanho da peça, pode-se mergulha-la na suspensão. Prosseguindo com o ensaio, a peça é seca em estufa após a aplicação do revelador, pois com a secagem em estufa, consegue-se diminuir o tempo de secagem. Recomenda-se que este método seja aplicado quando se tem a presença de uma inspeção automática. Para o efeito da suspensão, o último deve conter agentes dispersantes, inibidores de corrosão, agentes que facilitam a remoção posterior, ou seja, tudo aquilo que ajudará numa melhor análise dos resultados.

c) Solução aquosa

Segundo Andreucci (2016), a solução faz com que sejam diminuídas as probabilidades de possam vim a ocorrer com a suspensão (dispersão, entre outros). Os estudos e as aplicações destes na prática chegaram à conclusão de que materiais solúveis em água não são bons reveladores. Para se evitar a evaporação, recomenda-se incluir na solução o inibidor de corrosão, e também deve-se controlar a concentração.

d) Suspensão do pó revelador em solvente

De acordo com Andreucci (2016) este é um dos métodos com um maior poder de eficiência para se obter uma camada adequada (fina e uniforme) sobre a superfície. Como já foi visto anteriormente, os solventes são facilmente voláteis, pois é pouca a possibilidade de ocorrer um escorrimento do revelador mesmo em superfícies na posição vertical. Por isso, a utilização destes deve ser feita por meio da pulverização.

Em se tratando dos solventes, estes precisam evaporar em um curto espaço de tempo, para assim ajudar na retirada do penetrante existente nas discontinuidades, conseguindo assim uma mobilidade maior. Exemplificando alguns tipos de solventes, podemos citar alguns como o álcool e os solventes clorados (não inflamáveis). Como o pó também está presente neste âmbito,

considera-se que o pó possui as mesmas características do já estudado anteriormente método do pó seco.

#### *1.5.5.4. Impurezas e Contaminantes nos Produtos Penetrantes*

Segundo Andreucci (2016), quando se utiliza os produtos penetrantes (penetrantes, reveladores e solventes) em materiais em aço inoxidável austeníticos, titânio, ligas a base de níquel, como também as outras ligas com sua utilidade em situações envolvendo altas temperaturas, procura-se ao máximo evitar as impurezas e os contaminantes principalmente para enxofre, halogênios e materiais alcalinos pois, a presença das impurezas provocam fatores indesejados como a fragilização ou corrosão nesses materiais em altas temperaturas, como também outras condições que influenciam no aparecimento de possíveis danos.

De acordo com Andreucci (2016), na utilização do LP para análise de defeitos ou danos em quaisquer tipos de peças, procura-se saber que em materiais penetrantes podem ser encontrados quantidades significativas de impurezas, sendo estas não voláteis e que podem reagir com a peça, sendo que a presença de umidade e temperaturas elevadas, estas reações são vistas com mais frequência. Sabe-se que a presença de impurezas presente nos produtos penetrantes necessita ter o seu teor analisado pelo método laboratorial, seguindo estritamente as recomendações da norma aplicável. Com base nas normas ASMT e ASME, estas exigem a 1% o peso de uma amostra do resíduo de enxofre nos materiais de aço inoxidáveis a base de níquel, como exigem também o valor de 1% em peso de uma amostra de resíduo de Fluor+Cloro em materiais com aço inoxidável duplex, austeníticos e titânio.

Por fim, ressalta-se que todo o trabalho para busca de defeitos ou avarias em materiais utilizando o END por líquido penetrante será em vão se o inspetor não atentar para as recomendações e para as normas aplicáveis. É necessário que o operador ou o técnico, sob a supervisão do inspetor de líquidos penetrantes, antes de iniciar o processo de inspeção dos materiais, verificar e solicitar o certificado de controle de contaminantes dos produtos que serão utilizados, com o objetivo de constatar se os produtos são compatíveis ou atendem às restrições das impurezas.

## 1.6. ULTRASSOM

### 2.4.1. Introdução e Breve Histórico

Dentre os métodos de END existentes, tem-se um método que como o próprio nome já o diz, este está relacionando com o uso dos sons. O ensaio por Ultrassom é caracterizando, assim como os outros ensaios, pela detecção de falhas, defeitos ou descontinuidades internas que podem estar presentes nos mais diversos tipos de materiais, independente da composição dos mesmos.

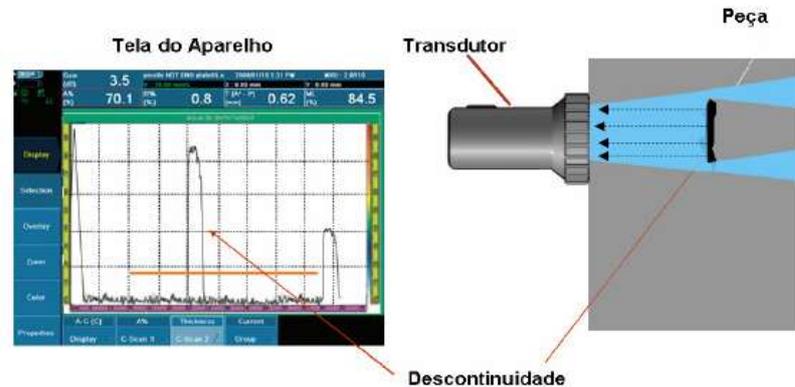
Segundo Andreucci (2016), quando se utiliza o som ou os seus derivados para fins diversos, percebe-se o tão completo é este método pois existe uma infinidade dos sons, alguns perceptíveis ao ouvido humano, outros não, independente dos os mesmos serem excessivamente graves ou agudos. Contudo, o fato de determinados sons não serem detectados por ouvidos humanos ou aparelhos aditivos não caracteriza a incapacidade, mas sim por possuírem vibrações mecânicas baixíssimas, de até 20 HZ (classificada como infrassom) ou com frequências altíssimas, de até 20 KHZ (classificadas com ultrassom), onde a infrassom e a ultrassom são inaudíveis.

Andreucci (2016) continua afirmando que os sons produzidos em determinados tipos de ambientes, independente das características como forma e espaço que estes possuem, são refletidos ou refletem nas paredes destes ambientes, e também, o som pode ser transmitido a outros ambientes. Por isso, percebe-se o quão comum é a ocorrência destes fenômenos no nosso cotidiano, por mais simples que seja, e que os estes fatos constituem os fundamentos do ensaio ultrassônico de materiais. Voltando um pouco ao passado, os testes executados em eixos ferroviários, ou então em sinos, eram realizados por meio dos testes de martelo, onde o som reproduzido em consequência destas marteladas acusava possíveis presenças de rachaduras ou trincas grosseiras, sendo que estes defeitos tinham um som característico.

Fazendo um breve comentário sobre a utilização deste tipo de ensaio por ultrassom, Andreucci (2016) afirma que o processo de buscar por possíveis falhas em um material utilizando o som pode entendido de uma maneira bem simples. Uma onda sonora reflete ao se encontrar com uma barreira qualquer, e fazendo uma correlação com uma onda ultrassônica ou vibração quando as mesmas percorrem em um meio elástico (concreto, plástico, metal), estas também irão refletir quando se encontrarem com as falhas ou descontinuidades internas dentro de um material. Buscando o auxílio de aparelhos especiais, torna-se possível detectar as reflexões oriundas do interior da peça que está sendo examinada, buscando então as

descontinuidades. Na figura abaixo, será mostrada o feixe sônico do transdutor, onde este ao se encontrar com a falha, acarretou uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, endereçando o sinal ao aparelho, e o resultado foi mostrado na tela em forma de um pulso ou eco.

Figura 21 – Princípio básico da Inspeção de Materiais por Ultrassom



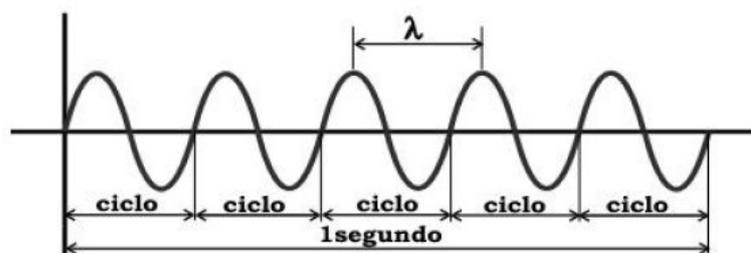
Fonte: Andreucci (2016).

#### 2.4.2. Princípios Físicos

Segundo Cerqueira (2009) o fenômeno acústico que equivale ao movimento de propagação de ondas sonoras criadas por um corpo que vibra em um meio qualquer se chama som, onde estas ondas sonoras podem se propagar em meios sólidos, líquidos ou gasosos. Estas ondas também são chamadas de ondas periódicas, e dentre as inúmeras classificações, cita-se as audíveis e as inaudíveis, pois as mesmas dependem do número de ciclos que acontece nas unidades de tempo, estas chamadas de frequência, onde se a frequência for maior do que 20.000 Hz, a mesma será classificada com ultrassom.

De acordo com Santin (2003) o comprimento da onda (representado pela letra grega  $\lambda$ ) será representado pela distância de duas cristas ou vales sucessivos, onde o pico ou altura da crista ou do vale irá corresponder a amplitude da onda, representado pela figura abaixo:

Figura 22 – Ilustração em gráfico da propagação de uma onda ultrassônica



Fonte: Cerqueira (2009).

Sabe-se que é possível calcular o comprimento da onda, bastando conhecer a velocidade de propagação ( $V$ ) da onda de um determinado material a ser inspecionado, e a frequência ( $f$ ) que está sendo utilizada. Com base nisso, segue então a fórmula abaixo:

$$V = \lambda \cdot f \quad (4)$$

### 2.4.3. Tipos de Ondas

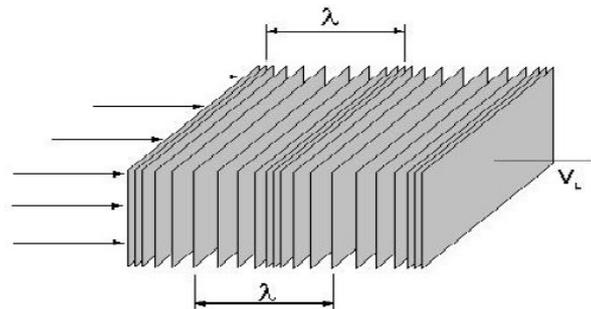
De acordo com Andreucci (2016) só é possível executar o teste ultrassônicos de materiais com o auxílio de ondas mecânicas ou acústicas propagadas no meio em inspeção, diferentemente da técnica radiográfica, onde esta durante a execução do teste tem o auxílio das ondas eletromagnéticas ou radiação ionizante. Seja qual for a onda mecânica, esta é constituída de oscilações de partículas discretas no espaço em que se propaga. Quando ocorre a passagem da energia acústica num determinado espaço, esta provoca uma reação nas partículas que compõe este espaço, fazendo com que as mesmas executem o movimento de oscilação em volta da posição de equilíbrio, onde a amplitude do movimento é diminuída com o tempo em consequência da perda de energia adquirida pela onda.

Segundo Cerqueira (2009) as ondas se propagam de quatro modos diferentes em materiais sólidos, ressaltando o fato de que o deslocamento das partículas, que fazem parte do meio que a onda está se propagando. Por isso que as ondas ultrassônicas são classificadas em ondas longitudinais, ondas transversais, ondas superficiais (Rayleigh e Creeping) e ondas de Lamb.

#### a) Ondas Longitudinais

Segundo Cerqueira (2009) as ondas longitudinais também recebem o nome de ondas de compressão, onde a mesma possui uma aplicação enorme no âmbito industrial. Estas ondas transitam pelo material por uma série alternada de compressão e rarefação onde as partículas transmitem a vibração de um lado para o outro, seguindo a direção de propagação da onda. De acordo com Metals Handbook Vol 17 (1997) a velocidade de propagação das ondas longitudinais é de aproximadamente 6000 m/s no aço, 1500 m/s na água e 330 m/s no ar. Na imagem abaixo, será ilustrado a propagação de uma onda longitudinal.

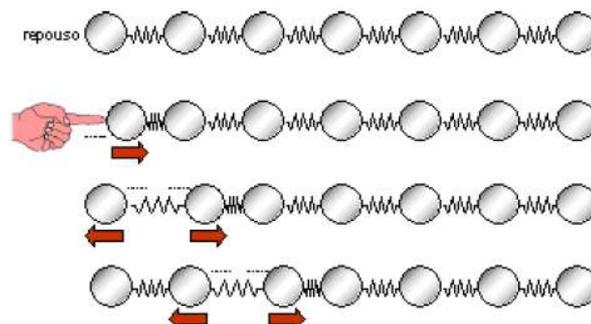
Figura 23 – Ilustração da propagação de uma onda longitudinal.



Fonte: Santin (2003).

Segundo Andreucci (2016) as ondas longitudinais são ondas onde as partículas oscilam em direção a propagação da onda, sendo capaz de ser transmitidas a sólidos, líquidos e gases. Na imagem a seguir, observa-se que o primeiro plano de partículas sofre uma vibração fazendo com que esta transfira sua energia cinética para os planos de partículas mais próximos, e a última passará a oscilar também. Por isso que todo o meio elástico vibra no mesmo caminho de propagação da onda longitudinal, e em consequência, surgirá as “zonas de compressão” e as “zonas diluídas”. O comprimento de onda ( $\lambda$ ) será representado pelas distâncias entre as duas zonas de compressão.

Figura 24 – Ilustração da onda longitudinal



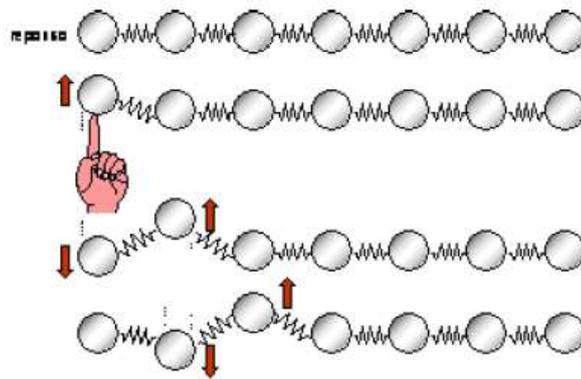
Fonte: Andreucci (2016).

## b) Ondas Transversais

Segundo Andreucci (2016) a onda transversal, também chamada de ondas de cisalhamento, é descrita quando as partículas de um espaço vibram na direção perpendicular ao de propagação. Com base neste fato, observa-se que os planos de partículas permanecem com as distâncias iguais em ambas, movendo-se unicamente na vertical. Observando esta onda,

percebe-se que as partículas oscilam na direção transversal a direção de propagação, mas podendo ser difundida apenas em sólidos. As características das ligações entre partículas destes meios tornam as ondas transversais quase que inaptas para se propagarem em líquidos e gases. Calcula-se o comprimento da onda pela distância entre dois “vales ou dois “picos””. Metals Handbook vol 17 (1997) afirma que a velocidade de propagação em ondas transversais é de aproximadamente 3200 m/s em aço, 2300 m/s em cobre e 1100 m/s em acrílico.

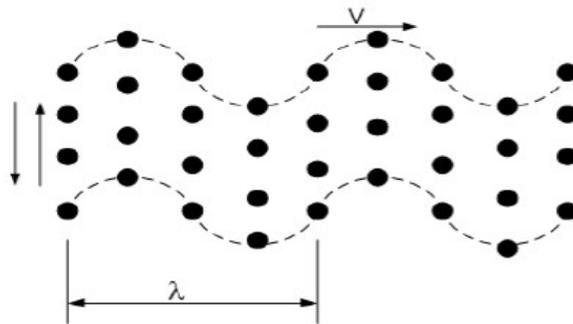
Figura 25 – Ilustração da onda transversal



Fonte: Andreucci (2016).

De acordo com Cerqueira (2009) as ondas transversais, também conhecida como ondas de cisalhamento ou corte, são aquelas onde o descolamento das partículas ocorre de maneira perpendicular à direção de propagação da onda. É preciso que exista uma força de atração entre as partículas vizinhas para que possa existir uma propagação deste tipo de onda, pois em espaços do tipo líquidos e gasosos não haverá propagação deste tipo de onda, em consequência da reduzida força de coesão entre as partículas que ocupam estes espaços. Metals Handbook vol 17 (1997) afirma que a velocidade das ondas transversais é calculada pela metade da velocidade das ondas longitudinais para um mesmo espaço. A ilustração abaixo mostrará a propagação de uma onda transversal.

Figura 26 – Ilustração da propagação de ondas transversais durante o modo de vibração das partículas

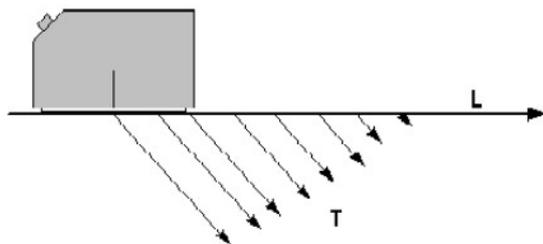


Fonte: Cerqueira (2009)

### c) Ondas Superficiais

Segundo a Metals Handbook (1997) as ondas superficiais caracterizam-se pela propagação nas superfícies sólidas ou gasosas. Sua aplicabilidade se dá pela detecção de pequenas trincas superficiais e discontinuidades que estão sob a superfície do material que está sendo estudado ou inspecionado. É de conhecimento do técnico que trabalha neste ramo que a propagação de inspeção deste tipo de onda equivale a um comprimento de onda. Para realizar a inspeção de componentes com o formato bastante complexo utilizando as ondas superficiais, é necessário que seja avaliado as condições de reflexão nas extremidades, caso contrário, estas poderão gerar sinais que causarão dificuldade na sua análise. Quando se estuda as ondas superficiais, descobre-se que existe dois tipos de ondas, que são as ondas de Rayleigh e as ondas de Creeping. A primeira é gerada quando há um deslocamento na superfície de uma onda transversal, já a segunda é obtida por meio da onda longitudinal sob a superfície. Na figura abaixo, será retratada a propagação de uma onda superficial de Creeping:

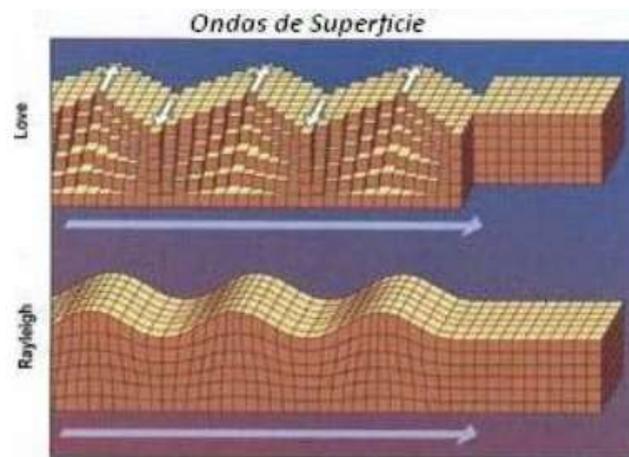
Figura 27 – Ilustração de uma propagação da onda superficial de Creeping



Fonte: Santin (2003).

De acordo com Andreucci (2016) as ondas superficiais, ou também chamadas de ondas de Rayleigh, são denominadas assim pela capacidade que estas possuem de se propagarem sob uma determinada superfície dos sólidos. Por causa da presença do complexo movimento oscilatórios das partículas sob a superfície, a velocidade de propagação da onda superficial entre duas fases diferentes é por volta de 10% a menos que a de uma onda transversal. Em se tratando de onda superficial, onde esta não contém a componente normal, a propagação desta será em movimento paralelo a superfície e transversal em relação ao sentido de propagação, receberá então o nome de ondas de “Love”. Ressalta-se que a sua aplicabilidade é reduzida ao exame de camadas finas de material que recobrem outros materiais.

Figura 28 – Ilustração das Ondas de Superfície (Rayleigh e “Love”)



Fonte: Vitorino (2010).

Andreucci (2016) continua afirmando que existem também as ondas de “Lamb”, que são ondas superficiais que se propagam com comprimento de onda perto da espessura da chapa a ser ensaiada, onde nesta situação, a inspeção não será restringida apenas para a superfície, mas o material em sua totalidade.

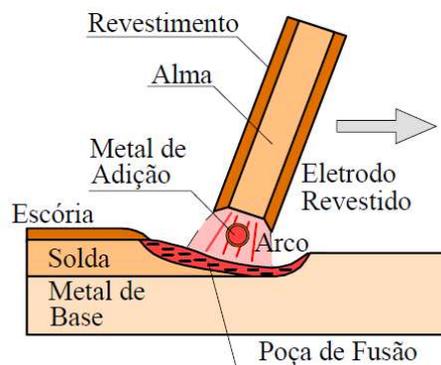
As ondas de Lamb comentadas por Metals Handbook (1997) vão mais além, afirmando que a caracterização de propagação desta onda é referente aos seguintes parâmetros de material a ser inspecionado, que são: espessura, estrutura, densidade e propriedades elásticas. Sobre estas ondas, Cerqueira (2009) fala que elas são classificadas como simétricas e assimétricas, onde a utilização desta é no controle de qualidade na fabricação de chapas.

## 1.7. PROCESSO DE SOLDAGEM POR ELETRODO REVESTIDO

### 2.5.1. Introdução

Segundo Áquila (2012) a soldagem por eletrodo revestido é uma soldagem a arco elétrico, onde o objetivo desta é a união de materiais, resultado do calor provocado entre o eletrodo e a peça, ressaltando que o eletrodo é consumível no processo de soldagem. Sabe-se que a constituição de um eletrodo é de uma alma metálica revestida por uma mistura de materiais, pois no momento da solidificação do material estas protegem o cordão de solda, ocasionando então uma cobertura chamada de escória. Tal revestimento é de fundamental importância na poça de fusão e no arco elétrico, por isso recomenda-se ter o conhecimento dos tipos de revestimento. A figura abaixo ilustrará o processo de soldagem por eletrodo revestido, chamado também de soldagem smaw.

Figura 29 – Soldagem por eletrodo revestido



Fonte: Áquila (2012).

De acordo com Cerqueira (2009) a soldagem smaw (Shielded Metal Arc Welding), como também é chamada a soldagem por eletrodo revestido, constitui-se na abertura e manutenção de um arco elétrico entre o material que passará pelo processo de soldagem e o eletrodo revestido, onde durante este processo será fundida de forma conjunta a peça e o eletrodo revestido, observando que neste processo o metal fundido do consumível é transferido para a peça, causando a formação da poça de fusão, que resultará na solidificação, formando então o metal de solda. Vale ressaltar ainda que a poça de fusão deve ser protegida da atmosfera pelos gases provenientes da fusão do revestimento do consumível.

### 2.5.2. Aplicações do processo smaw

É de conhecimento de quem trabalho neste ramo que o processo por eletrodo revestido é largamente utilizado no âmbito industrial, por causa que esta possui uma enorme versatilidade do processo em termos de ligas soldáveis e faixa de espessuras, conforme Áquila (2012), onde estas são aplicáveis em valores que variam entre 1,5 mm e 30 mm, como é o caso deste trabalho, e em qualquer posição de soldagem. Este processo contém uma enorme variabilidade de aços-carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, ferros fundidos, níquel e cobre.

Contudo, ressalta-se que para o bom andamento deste processo, onde pretende-se alcançar uma qualidade aceitável, o soldador deve possuir uma boa qualificação e experiência, onde estes fatos foram determinantes para alguns fatores que serão mostrados no resultado deste trabalho. O soldador deve possuir um poder de habilidade e concentração, independente que o mesmo esteja trabalhando com equipamentos ou acessórios recomendados, buscando então uma solda de alta qualidade.

### 2.5.3. Revestimentos

De acordo com Áquila (2012) o revestimento é constituído por combinações de compostos orgânicos e materiais, que possui a função específica na poça de fusão e no arco elétrico, onde como exemplo, podemos citar a formação de escória com agentes desoxidantes, viabilizar a estabilidade do arco elétrico, na criação de gases de proteção da poça de fusão e na adição de componentes e ligas metálicas. Sabe-se que os elementos que constituem os gases da proteção da poça são os que constituem gases como ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ), pois os elementos que estabilizam o revestimento são aqueles que se desintegram no arco elétrico formando então gases com potencial de ionização pequeno. Ressalta-se que o revestimento deve ter elementos que provoquem a taxa de deposição, como também possuir uma posição ativa na poça.

Áquila (2012) continua afirmando que o processo de formação da escória sucede pela formação de um filme líquido formado na parte superior do banho de solda, sem possuir necessariamente a relação com o banho, por causa da existência de elementos escorificantes. Outra vantagem presente nos elementos encontrados no revestimento é o de agente fluxante, onde este fornece proteção contra oxidação, e fazendo a retirada do oxigênio encontrado no banho de solda.

Machado (2007) e Wainer (2002) apud Áquila (2012) citam alguns elementos encontrados que constituem alguns desses revestimentos:

- 1) Actinolita – colabora com a formação de escória;
- 2) Açúcar – estimula a aglomeração;
- 3) Alumina – assim como a actinolita, colabora com a formação de escória
- 4) Argilas – também ajuda na formação de escória, e aumenta a extrudabilidade;
- 5) Asbestos – ajuda na formação de escória;
- 6) Cal – elemento bastante conhecido que serve como agente fluxante;
- 7) Calcita – melhora a estabilidade do arco, e ajuda na formação de gases;
- 8) Carbonato de Cálcio – também melhora a estabilidade do arco e ajuda na formação de gases;
- 9) Carbonato de lítio, bário e zircônio – melhora a estabilidade do arco;
- 10) Carboxi-metil-celulose – promove a aglomeração;
- 11) Celulose – colabora na geração de gases;
- 12) Dextrina – aumenta a aglomeração;
- 13) Dióxido de manganês – colabora na formação de escória;
- 14) Dolomita – colabora na formação de gases;
- 15) Feldspato – colabora na formação de escória;
- 16) Pó de ferro, ferro-ligas e outras ligas – ajusta a composição química, na desoxidação, na formação de escória e no aumento da taxa de deposição;
- 17) Fluorita – faz a desoxidação e colabora com a formação de escória;
- 18) Glicerina – melhora a extrudabilidade;
- 19) Goma arábica – instiga a aglomeração;
- 20) Grafita – ajusta a composição química;
- 21) Ilmenita – ajuda na formação de escória;
- 22) Mica – melhora a extrudabilidade;
- 23) Mischmetal – faz a eliminação de impurezas;
- 24) Oxalato de potássio – aumenta a estabilidade do arco;
- 25) Óxido de ferro – colabora da formação de escória;
- 26) Silica – ajuda na formação de escória e promove a aglomeração;
- 27) Silicato de potássio – melhora a estabilidade do arco, colabora com a formação de escória e promove a aglomeração;
- 28) Silicato de sódio – Colabora com a formação de escória;
- 29) Talco – melhora na extrudabilidade;
- 30) Titanato de potássio, rutilo e dióxido de titânio – melhora a estabilidade do arco e colabora da formação de escória;

- 31) Wolastonita – colabora na formação de escória;
- 32) Zirconita – melhora a estabilidade do arco.

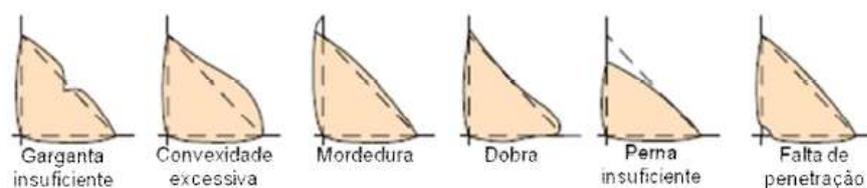
#### 2.5.4. Descontinuidades em Juntas Soldadas

Segundo Modenesi (2001), a descontinuidade é definida como o tipo de intermitência de uma junta soldada. Por isso, para se definir o conceito de descontinuidade, deve-se observar a falta de homogeneidade de características metalúrgicas de um material ou de uma solda. Com base nisso, ressalta-se que a ocorrência da falta de uma exigência de qualidade será denominada descontinuidade, onde algumas destas será mostrada abaixo:

- a) Trincas induzidas pelo hidrogênio: segundo Filho (2008) deve-se saber que a trinca é consequência de diversos fatores, e dentre estes é por causa da existência do hidrogênio dissolvido no metal fundido. A ocorrência deste tipo de trinca é resultado da temperatura que o material se encontra, onde a temperatura deste material se encontra próxima da temperatura ambiente, especialmente na ZAC. No decorrer da sua formação, esta tende a aumentar de forma lenta e descontínua, ressaltando que estas trincas podem ser superficiais, longitudinais ou transversais.
- b) Contaminação do metal de solda por hidrogênio: de acordo com Filho (2008) este tipo de caso sobrevém da dissociação no arco elétrico das moléculas de gás hidrogênio, onde estas são introduzidas na junta soldada por intermédio do ar atmosférico, como também por outras fontes de contaminação. O hidrogênio deve ser absorvido pela poça de fusão, por causa da elevada solubilidade gasosa do aço no estado líquido, para assim permanecer no metal de solda, após passar pela solidificação.
- c) Falta de Fusão: Modenesi (2001) afirma que este caso ocorre pela falta de união por fusão entre o metal de adição e o metal de base. Inúmeros podem ser os casos que ocasionem este fato, porém, para este tipo de descontinuidade podem ser o aquecimento inadequado do metal de base, ou também a manipulação e/ou manuseio do metal de adição, como também a utilização da baixa energia de soldagem e pela ausência de limpeza da junta. Quando ocorre a falta de fusão, esta pode ocasionar um concentrador de tensões, tendo como consequência o aparecimento de trincas e a redução da seção efetiva de solda, aumentando em larga escala a probabilidade de quebra por esforços mecânicos. Vale ressaltar que a utilização de velocidade de soldagem elevada também pode ocasionar a falta de fusão.

- d) Falta de Penetração: segundo Modenesi (2001) a ocorrência deste fato é resultado da falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta. As consequências da falta de penetração são várias, porém dentre estas devemos citar uma redução na seção útil de solda fazendo com que esta seja prejudicada quando a mesma for submetida à esforços mecânicos, outro caso que pode ocorrer é que esta pode ser com concentrador de tensões, e outros fatores diversos como a baixa energia de soldagem e a manipulação inadequada do eletrodo.
- e) Mordedura: Modenesi (2001) afirma que estas são pequenas reentrâncias agudas que surgem causadas pela ação do alto calor gerado pelo arco elétrico entre o metal de base e o passe de solda. Sabe-se que a existência de mordeduras causará um enfraquecimento da junta soldada em consequência da criação de uma redução da seção existente. Dentre os inúmeros fatores que ocasionam a mordedura, cita-se a velocidade de soldagem muito alta como uma das causas de aparecimento desta descontinuidade.
- f) Porosidade: De acordo com Modenesi (2001) o aparecimento das porosidades é ocasionado pelo aprisionamento dos gases na parte posterior da poça de fusão, no decorrer da solidificação da solda. As porosidades, que é composta de poros, geralmente apresentam o aspecto geométrico em formato esférico, associados na maior parte dos casos com o hidrogênio. Dentre os inúmeros fatores que podem provocar a presença da porosidade, cita-se o aparecimento destes relacionados aos parâmetros inadequados pré-definidos pelo soldador, como também problemas no equipamento de soldagem.
- g) Alterações na geometria do cordão de solda: Para Modenesi (2001), estas alterações agem como concentradores de tensão, possibilitando a ocorrência de trincas. A associação desta descontinuidade se dá normalmente a problemas operacionais, como a utilização de parâmetros incorretos e a fragilidade do processo. A figura a seguir mostrará os principais tipos de perfis de solda não aceitáveis:

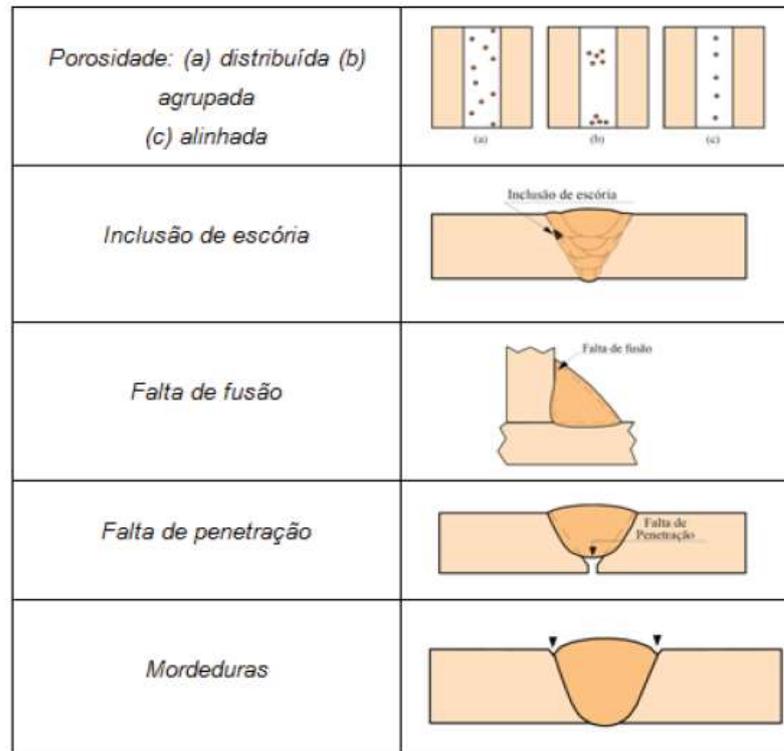
Figura 30 – Perfis de solda inadequáveis



Fonte: Adaptado de Modenesi (2001).

A figura a seguir mostrará um quadro com as principais discontinuidades presentes no processo de soldagem:

Figura 31 – Problemas que são geralmente encontrados na solda



Fonte: Adaptado de Modenesi (2001).

#### 2.5.5. Parâmetro de Soldagem

O procedimento de soldagem por eletrodo revestido, ou o também chamado de soldagem smaw, possui diversos parâmetros que influenciam no seu funcionamento e na geometria do cordão. Sabe-se que uns possuem mais influência dos que outros, mas todos têm um papel determinante que venha a provocar uma possível falha ou discontinuidade que possa vir a ocorrer em um certo material. A seguir, será listado alguns dos principais parâmetros de soldagem.

##### a) Corrente de Soldagem

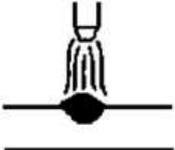
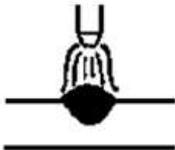
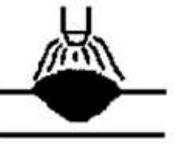
Estudando os parâmetros de soldagem, Infosolda apud Ziedas et al (1997) afirma que a corrente de soldagem é um dos principais fatores no controle do volume da poça fusão e da

penetração no metal de base, ou seja, quando ocorre o aumento do valor da corrente, o volume da poça de fusão, a largura da poça de fusão e a penetração tendem a aumentar.

De acordo com Reis e Scotti (2007) há uma relação de proporção entre a corrente e a penetração do cordão de solda, ou seja, quando maior for a corrente, maior será a largura e a penetração deste cordão.

Segundo Áquila (2012) quando se aumenta apenas a corrente, considerando todas as variáveis do processo constantes, resultará numa maior penetração do cordão de solda, como também uma maior profundidade. A tabela abaixo retratará as variações do cordão de solda e de suas propriedades, relacionando as mesmas com a variação da corrente.

Figura 32 – Variáveis do cordão e os perfis do mesmo.

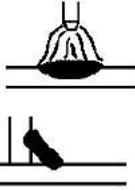
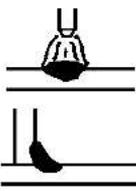
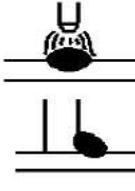
| Velocidade de Alimentação | Baixa   | Média  | Alta  |
|---------------------------|---|--|---|
| Corrente                  | Baixa   | Média  | Alta  |
| Taxa Deposição            | Pequena   | Média  | Grande  |
| Penetração                | Baixa   | Média  | Alta  |
| Perfil do Cordão          |  |  |  |

Fonte: Áquila (2012).

#### b) Tensão na soldagem

De acordo com Áquila (2012) existem diferentes características com relação a tensão, contudo, é possível atingir propriedade significativas no arco com a variação da mesma, onde o aumento do aporte térmico é o principal deles. Acrescenta-se que este parâmetro pode causar alargamento e achatamento do cordão, como também um aumento da largura da poça de fusão. Ressalta-se que quando ocorre uma variação muito elevada deste parâmetro pode ocasionar, entre tantos problemas, como o aumento da ZTA (Zona Termicamente Afetada), surgimento da porosidade, dos respingos e das mordeduras. Acrescenta-se também que com a diminuição da tensão, recomenda-se aumentar a altura do cordão e seu estreitamento. Na ilustração abaixo, será mostrado as diferenças no cordão quando ocorre a variação da tensão:

Figura 33 – Perfis do cordão de solda variando com as tensões e o arco

| Tensão           | Alta  | Média  | Baixa   |
|------------------|---|--|---|
| Arco             | Longo   | Médio  | Curto   |
| Perfil do Cordão |  |  |  |

Fonte: Áquila (2012)

### c) Polaridade

Áquila (2012) afirma que este parâmetro é uma propriedade que estipula o sentido da passagem de corrente elétrica por um determinado trecho de um circuito elétrico, ou melhor dizendo, a passagem do potencial de um extremo para o outro. Na polaridade, esta é classificada como direta ou inversa, onde a passagem deve ocorrer sempre do polo negativo para o polo positivo, independente da polaridade ser direta ou inversa. A referência da polaridade direta é sempre o eletrodo e a peça como polo positivo, onde o eletrodo é o polo negativo. A referência da polaridade inversa é considerada sempre o eletrodo como o polo positivo e a peça como polo negativo.

Infosolda apud Soldagem Coleção Senai – 1ª ed. (1997) complementa que na polaridade inversa, ocasionara uma maior penetração, em contrapartida, na polaridade direta permitirá menor penetração, mas com uma taxa de fusão maior. No caso particular da corrente alternada (CA), são médias as penetrações e as taxas de fusão, porém, há uma vantagem em poder utilizar eletrodos maiores e correntes mais altas.

### d) Diâmetro do eletrodo

De acordo com Infosolda apud Soldagem Coleção Senai – 1ª ed. (1997) o diâmetro do eletrodo, como também a espessura do metal irá indicar a faixa ideal de corrente ideal para o seu uso. Quando ocorre a seleção do eletrodo, deve-se considerar a espessura do material a ser soldado, o perfil da junta empregada e a posição de soldagem. Ressalta-se que quando um eletrodo for grande demais para determinada espessura de metal de base a soldar, provavelmente ocorrerá uma perfuração da peça, pois o eletrodo de diâmetro maior determina que uma corrente mínima seja elevada, e o calor será mais elevado.

Infosolda apud Soldagem Coleção Senai – 1ª ed. (1997) confirma afirmando que quando a situação envolve soldagem por juntas chanfradas, considerar-se-á a medida do chanfro para a escolha de um eletrodo com capacidade para acessar a raiz da junta. Na situação onde a soldagem acontece na posição horizontal, vertical ascendente ou descendente, ocorrerá a exigência da utilização de eletrodos com diâmetro pequeno por causa da complexidade em ter o controle da poça de fusão.

e) Velocidade de Soldagem

De acordo com Behene (2014) a velocidade de soldagem é caracterizada pelo deslocamento na horizontal do eletrodo sobre a peça, de uma extremidade a outra da respectiva peça que está passando pelo processo de soldagem. Sabe-se que esta velocidade possui uma influência direta no calor que é transferido para a peça por unidade de comprimento, onde no mundo da solda esta é conhecida como energia de soldagem. Por isso, observa-se que quando há o aumento da velocidade de soldagem, haverá também um menor calor imposto, onde este calor imposto é calculado pela equação abaixo:

$$\text{Calor imposto} = \frac{\eta t \cdot U \cdot I}{V_{\text{soldagem}}} \quad (5)$$

Onde:

$\eta t$  = rendimento térmico do processo;

U = tensão do arco (V);

I = corrente (A);

$V_{\text{soldagem}}$  = velocidade de soldagem [mm/min].

Behene (2014) continua afirmando que quando o parâmetro velocidade de avanço aumenta, ocorrerá que o calor imposto irá diminuir, e como consequência menos material será fundido ou adicionado, onde o cordão de solda terá menor volume e um menor nível de penetração. Foi observado na equação anterior que é necessário ajustar o nível de corrente e velocidade de soldagem, para assim conseguir um cordão com a geometria e a penetração pretendida.

Behene (2014) finaliza afirmando que este parâmetro, além de ser muito complexo, também deve ser analisado no ambiente fora das oficinas e indústrias, ou seja, quando se

relaciona este parâmetro ao ponto de vista econômico, esta interfere no tempo de produção, ou numa linha de produção onde esta está contida e, em se tratando de tempo, existe nas indústrias hoje uma relação volume de produção e tempo de produção, onde o equilíbrio destas são fundamentais dentro do contexto de produção em uma indústria, por isso deve-se olhar este parâmetro muito além do próprio contexto. Como por exemplo, quanto maior a velocidade de soldagem, menor será o tempo de penetração, quando se leva para o contexto de velocidade alta para uma alta produção, e isto irá comprometer com a integridade do material soldado, provocando o aparecimento de futuras falhas neste material. E isto sem contar com outros parâmetros que dependem da velocidade de soldagem com tipo de junta, espessura, ajuste da corrente, entre outros. Por isso, deve haver o equilíbrio dos parâmetros, para que o processo de criação do cordão de solda seja executado sem a presença de defeitos, evitando assim a qualidade indesejada do cordão.

#### f) Energia de Soldagem

Modenesi et. al. (2006) afirma que durante o processo de soldagem, existe a necessidade de haver uma enorme geração de energia na forma de calor, para que transcorra então a fusão e a solidificação dos materiais que serão soldados. Sabe-se que durante a transferência de calor, esta tende a causar alterações de temperatura nos materiais que passarão pelo processo de soldagem, sendo concebido elevados gradientes de temperatura na região da poça de fusão e em regiões vizinhas a esta. Quando se estuda a energia de soldagem, percebe-se a complexidade que existe em medir a intensidade de uma fonte de calor, portanto, conclui-se que esta energia de soldagem é um dos parâmetros mais utilizados para a medição desta energia, onde a mesma possui uma correlação direta com as variáveis da fonte de soldagem.

Segundo AWS D1.1 (2004) afirma que a energia de soldagem é conceituada com a quantidade de energia que é imposta por determinada unidade de comprimento do cordão de solda pelo deslocamento de uma fonte de calor, ou seja, a energia efetivamente transferida é a energia de soldagem, sendo esta energia representada pela fórmula abaixo:

$$E = \eta \times \frac{U \times I}{v} \quad (6)$$

Onde os termos correspondem à:

- E: Energia de Soldagem (KJ/mm);  
 $\eta$ : Rendimento do arco  
 U: Tensão de soldagem (V)  
 I: Corrente de Soldagem (A)  
 v: Velocidade de soldagem (mm/s)

SSAB (2004) ressalta afirmando que é benéfica a energia de soldagem baixa para casos onde a soldagem for aplicada em aços com até 700 MPa de resistência ao escoamento, assegurando assim que as propriedades mecânicas do material não sofram qualquer tipo de alteração.

De acordo com Kou (2003) o rendimento do arco ou o percentual de rendimento, como também é chamado, é um fator adimensional de rendimento, pois este necessita do modo de como o processo é aplicado, dos parâmetros de soldagem que são utilizados, das propriedades dos materiais, do formato da peça, ou seja, todo um aspecto relacionado ao processo, do tipo de soldagem e o do material que está contido neste processo. Com base nesses fatores, a tabela a seguir mostrará valores para  $\eta$  em função do processo:

Figura 34 – Valores particulares para a variável  $\eta$

| Processo  | H         |
|-----------|-----------|
| SMAW      | 0,65-0,85 |
| GMAW      | 0,65-0,85 |
| GTAW(CC+) | 0,50-0,80 |
| GTAW(CA)  | 0,20-0,50 |
| SAW       | 0,80-0,99 |
| Oxi-gás   | 0,25-0,80 |

Fonte: Kou (2003)

## MATERIAIS E METODOLOGIA

No decorrer deste capítulo, será descrito de forma organizada e detalhada todos os materiais utilizados e todos os procedimentos empregados para que este trabalho fosse desenvolvido e executado para fins de estudo e pesquisa.

## 1.8. Materiais

### 3.1.1. Corpo de Prova

O corpo de prova (CP) utilizado para fins de estudo e análise nesta monografia tem como objetivo de avaliar a probabilidade de ocorrência de possíveis descontinuidades ou falhas que possam vir a ocorrer após o processo de soldagem no tipo de aço a ser mostrado no decorrer deste trabalho, utilizando as técnicas de ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e ensaios ultrassônicos.

O corpo de prova utilizado neste trabalho pode ser visto na figura 36. O CP constitui-se de uma chapa de aço SAE 1020, onde este é um dos aços carbonos com maior presença em oficinas e indústrias mecânicas, e tem como uma de suas principais características a excelente relação custo benefício comparados com outros tipos de aços a que são associados e com a mesma finalidade, além de possuir também boa plasticidade e soldabilidade. Os corpos de provas possuem uma espessura de 0,63” (16mm) e 0,59 “ (15mm) respectivamente, e os mesmos CP tinham um comprimento de (190mm) e (150mm) por (220mm) e (210mm) de largura, respectivamente, e o objeto de inspeção foi a junta soldada entre estes corpos de provas partidos ao meio pelo processo de corte.

Ao iniciar a procura pelo material para poder idealizar e projetar o corpo de prova, procurou-se então a busca por este material nas proximidades da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, por causa da elevada presença de oficinas e sucatas que prestam serviços para as empresas de pequeno, médio e grande porte daqui da cidade de São Luís, e por este motivo, não se encontrou dificuldade em encontrar o material seria objeto de estudo e análise deste trabalho.

Em um estabelecimento localizado no bairro do São Cristóvão, nesta cidade, como o nome de “Salão do Ferro” foi solicitado junto ao mesmo a compra deste tipo de aço. Prontamente, o pessoal de atendimento sinalizou que o aço estava disponível para vender, com a ressalva de que este seria vendido a retalho, pois eram os únicos disponíveis no momento. Após o fim da transação, os aços SAE 1020 foram adquiridos e levados para a outra oficina onde este material passaria pelo processo de corte e soldagem, e posteriormente soldagem, para assim, ser definido o primeiro CP (CP 01). O segundo CP (CP 02) foi disponibilizado pela empresa ALUMAR S.A. (por intermédio do inspetor de END Theonas, lotado desta empresa), também localizada nesta cidade. As imagens a seguir mostraram respectivamente as peças a

retalho, passadas pelo processo de corte e o segundo CP entre pela empresa anteriormente citada já no ponto de passar pela etapa de análise.

Figura 35 – Compra a retalho do aço SAE 1020 no estabelecimento “Salão do Ferro”



Fonte: Autor (2017).

Após a compra deste aço, o mesmo foi levado para uma oficina, para que esses pedaços de aço a retalho mostrado na figura passasse por uma seleção afim de se escolher um destes que seria cortado em duas partes iguais, para assim poder continuar com o processo de criação do primeiro CP.

### 3.1.2. Definição dos parâmetros de soldagem

Após o corte, a peça foi para a empresa “W-Inox Alumínio”, também localizada nesta cidade, para que esta peça passasse pelo processo de soldagem, sendo esta uma das etapas deste trabalho, que visa analisar possíveis descontinuidades ou falhas presentes no cordão de solda.

Antes porem de entrar em sua totalidade no processo de soldagem, foi preciso estabelecer os parâmetros de soldagem, para que o soldador fizesse o processo com base nos parâmetros que foram pré-estabelecidos, afim de se obter com mais previsão, variáveis que poderiam levar o cordão de solda e o material a possíveis falhas em um futuro vindouro.

Definindo então os parâmetros de soldagem para o processo por eletrodo revestido, o também chamado processo smaw, foram definidos de acordo com os EPS pré-existentes, para o CP 01, mostrados na tabela abaixo:

Tabela 4 – Parâmetros adotados na soldagem para o CP 01, utilizando o eletrodo E-6013.

| <b>Parâmetros</b> | <b>Raiz</b>                        |
|-------------------|------------------------------------|
| Corrente          | 250 A                              |
| Tensão            | 30 V                               |
| Polaridade        | Direta DC +<br>(Eletrodo positivo) |
| Chanfro           | 3 mm                               |
| Vel. de avanço    | 7,68 mm/s                          |
| Diâm. do eletrodo | 5 mm                               |

Fonte: Autor (2017).

Tabela 5 – Parâmetros na soldagem (fornecidos da ALUMAR) para o CP 02, utilizando o eletrodo E-7018.

| <b>Parâmetros</b> | <b>Raiz</b>                        |
|-------------------|------------------------------------|
| Corrente          | 180 A                              |
| Tensão            | 21 V                               |
| Polaridade        | Direta DC +<br>(Eletrodo positivo) |
| Chanfro           | 3 mm                               |
| Vel. de avanço    | 6,30 mm/s                          |
| Diâm. do eletrodo | 3,2 mm                             |

Fonte: ALUMAR

Feito isto, os dados foram passados para o soldador, que tomou conhecimento dos parâmetros e iniciou o processo primeiro fazendo então o chanfre, o passo que antecede o material antes do mesmo passar então pela soldagem smaw. A figura a seguir mostra o soldador fazendo o chanfre no CP 01.

Figura 36 – Fazendo o chanfre no CP 01



Fonte: Autor (2017).

Prosseguindo então com a realização da soldagem do CP 01, o soldador então realizou a solda smaw sobre este corpo de prova, seguindo estritamente os parâmetros que foram entregues. O equipamento utilizado pelo soldador para realizar o processo de soldagem pertence a mesma empresa a que foi citada anteriormente, a “W-Inox Alumínio”. A máquina de solda utilizada foi a INVERT MXI – 180ED, da marca BAMBOZZI, onde a mesma estava numa bancada própria da oficina, e soldador coberto parcialmente pelos equipamentos de proteção (ressalta-se que além do conhecimento teórico/técnico, o soldador precisa obedecer às normas de segurança) começou a soldagem do CP 01.

Prosseguindo, o soldador procedeu e concluiu com o processo de soldagem do corpo de prova.

Figura 37 – Soldagem do CP 01 concluída



Fonte: Autor (2017).

Em seguida, após o corpo de prova passar pelo processo de soldagem smaw, a mesma seguiu então para a outra bancada, para assim passar pela fase onde o CP iria ser submetido a limpeza da superfície, sendo que a escova rotativa ajudaria o soldador a realizar este serviço.

A próxima etapa se dá pelo desbaste total da superfície da peça, onde o cordão de solda praticamente desaparece e o corpo de prova se assemelha a uma chapa comum de aço. A princípio, não faria sentido o desbaste total da peça, incluindo o cordão de solda, contudo, a pedido de um dos técnicos em END da empresa ALUMAR S.A. (que forneceu o CP 02 para análise de falha), o mesmo solicitou este procedimento pois este caso se encaixa em uma das inúmeras situações em que o cordão de solda precisa estar desbastando. Nesta empresa, utiliza-se muito das Caldeiras de Vapor, onde estas servem para produzir vapor através do aquecimento da água, onde este vapor irá alimentar, como por exemplo, máquinas térmicas. Quando se realiza soldagens na região de dentro da fornalha da caldeira, é necessário que o cordão de solda seja isolado ou desbastado, porque durante o fluxo do material da queima (existe a presença de resíduos sólidos em uma escala elevada), estes ao se encontrar com o excesso de cordão de solda, provocando possíveis turbulências, vindo a desgastar o tubo, por isso, a necessidade do cordão de solda passar por este procedimento.

Figura 38 – CP 01 com a soldagem concluída e desbastada (com o cordão de solda isolado e desbastado também, e o O CP 02, doado pela empresa ALUMAR S.A. para fins de estudo e pesquisa).



Fonte: Autor (2017).

### 3.1.3. Ensaio por Líquidos Penetrantes

Nesta etapa do trabalho, os corpos de provas foram submetidos a análise de descontinuidades ou falhas que poderiam estar presentes após o processo de soldagem. Por isso, com a ajuda do inspetor em END por líquidos penetrantes Theonas, lotado da empresa ALUMAR S.A. começamos a preparar o ambiente para que fosse iniciado então este ensaio.

Quando iniciamos os preparativos, o inspetor seguiu os passos da literatura presente neste trabalho, no caso, de acordo com o Andreucci (2016). Primeiramente, colocamos uma mesa limpa no centro da garagem da residência do Theonas, e assim colocamos os dois CP sob a mesa, para assim limpar os mesmos com o solvente, com a finalidade de remover impurezas ou

partículas que poderiam estar presentes sob os CP após o processo de soldagem. Feito isso, com um pano de algodão branco extremamente limpo, completamos a limpeza dos dois corpos de provas.

Em seguida, os CP 01 e posteriormente o CP 02 tiveram as suas superfícies a aplicação do líquido penetrante, e com isso, foi necessário esperar 10 minutos para que o LP realizasse a sua função.

Figura 39 – CP's 01 e 02 com o LP em sua superfície



Fonte: Autor (2017).

Após os 10 minutos, os corpos de provas foram lavados completamente com água, para a retirada do LP sobre a peça, e esperou-se mais 10 minutos para que estes corpos secassem completamente, com o auxílio também de um pano limpo e seco. Feito isso, o inspetor então colocou sobre a mesa o CP 01, e em seguida o CP 02, para aplicar o revelador, onde foi necessário aguardar mais um período para que fosse concluído o processo do revelador sob a superfície da peça.

Figura 40 – CP's 01 e 02 com o revelador sob a sua superfície



Fonte: Autor (2017).

E finalizando o processo de ensaios por LP, os corpos de provas formam novamente lavados com água para que todo o revelador fosse removido da peça, e por último, a peça passou por mais uma limpeza, desta vez com um pano seco de cor branca junto com o solvente.

#### 3.1.4. Ensaio por Ultrassom

Assim como no tópico anterior, nesta etapa os corpos de provas foram submetidos a análise de descontinuidades ou falhas que poderiam estar presentes após o processo de soldagem. Por isso, com a ajuda do inspetor em END por ultrassom Marcel, foi preparado o ambiente para que este ensaio fosse realizado.

Ao iniciar com os procedimentos, o inspetor Marcel também inspetor seguiu os passos da literatura presente neste trabalho, no caso, de acordo com o Andreucci (2016). Partindo então para a preparação do espaço, na residência deste inspetor, uma mesa no terraço foi escolhida para colocar os equipamentos necessários junto com os corpos de provas. Para a realização do ensaio de ultrassom, o inspetor utilizou o aparelho da marca MITCH, de modelo 350B, contento esta uma mini tela que mostra em plano cartesiano os resultados das análises. Acompanhado a este aparelho, veio também três transistores de características diferentes: 01 duplo cristal, 01 angular de 60° e 01 angular de 70°.

Figura 41 – Aparelho de ultrassom utilizado



Fonte: Autor (2017).

Prosseguindo com o ensaio, o CP 01 foi colocado sobre a mesa, e em seguida com um pincel, o inspetor passou o acoplante sobre o corpo de prova, onde a função deste acoplante é impedir que quaisquer tipos de barreira que impeça a comunicação entre o corpo de prova e o

transistor. Ressalta-se que este acoplante é base de água, logo ele reagirá com o material da peça, por isso a importância em limpar completamente o ensaio após a realização do mesmo.

Figura 42 – Realizando o ensaio ultrassônico no CP 01 com o transistor duplo cristal



Fonte: Autor (2017).

Feito a primeira parte do ensaio, partiu-se então para a segunda etapa, seguindo com os mesmos requisitos e procedimentos feitos com o CP 01. Com o pincel, o acoplante foi despejado do CP 02 buscando promover a homogeneização da superfície do corpo de prova que receberá os transdutores e evitar a penetração de ar durante o ensaio. Ressaltou o inspetor mais uma vez que a limpeza do material após o ensaio é extremamente necessária e obrigatória, para poder evitar qualquer tipo de reação do material com o acoplante.

Figura 43 – Realizando o ensaio ultrassônico no CP 02 com o transistor angular de 60°.



Fonte: Autor (2017).

### 1.9. Preparação do check-list

Para a realização do check-list, será levado em consideração os fatores com o grau de relevância alto que influenciarão no surgimento de possíveis descontinuidades ou falhas no cordão de soldas nos respectivos corpos de provas 01 e 02. Sabe-se que existem inúmeros fatores que comumente ou não, fazem que com a presença destas descontinuidades sejam consequência dos mesmos, por isso a necessidade de selecionar apenas aqueles com maior grau de relevância. Com base nisto, para o check-list foi selecionado três fatores de grande relevância que podem influenciar ou não, nos resultados mostrados no capítulo 4 deste trabalho. Os fatores são:

- 1) Condições de Trabalho;
- 2) Conhecimento do Operador;
- 3) Parâmetros de Soldagem.

## RESULTADOS E DISCURSSÕES

Completados as análises realizados nos corpos de provas e dos resultados observados, onde boa parte deles está contida nas bibliografias dos principais autores da área, tais resultados serão postos aqui neste capítulo, onde através de uma árvore de falhas, uma ferramenta do FMEA, será possível prevenir ou evitar descontinuidades ou falhas que serão encontradas nos corpos de provas.

### 1.10. Inspeção pelo END por Líquido Penetrante

A partir das figuras mostradas a seguir, serão mostradas as descontinuidades ou falhas encontradas por meio do ensaio de líquidos penetrantes, via inspeção visual, cumprindo com um dos objetivos deste trabalho.

Observando a figura a seguir, o inspetor em END afirmou baseado com as normas da ABENDI que caso haja apenas um defeito ou descontinuidades na peça que não atenda o critério de aceitação, está será considerada reprovada, sendo necessário solicitar o procedimento de reparo ou descarte da mesma. Com base na norma ASME SEC. I A-270 (caldeiras), a análise detectou várias imperfeições no cordão de solda.

Figura 44 – Inspeção após o ensaio de LP no CP 01 detectando a presença de porosidades.



Fonte: Autor (2017).

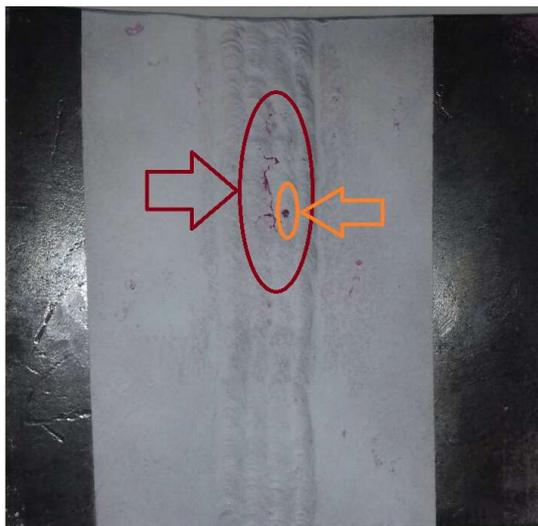
Figura 45 – Ângulo aproximado de visão da porosidade encontrada no CP 01



Fonte: Autor (2017).

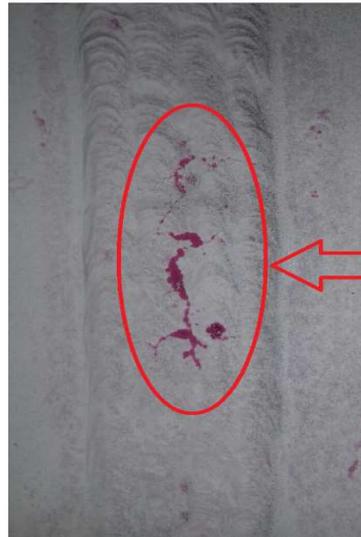
Para o CP 02, o ensaio por LP detectou a presença de uma trinca e a presença de uma porosidade, onde o inspetor por END afirma mais uma vez que baseado nas normas da ABENDI que caso haja apenas um defeito ou discontinuidades na peça, está será reprovada no ensaio, sendo necessário solicitar o procedimento de descarte da mesma. Com base na norma ASME SEC. VII DIV.1 AP .8 (vasos de pressão), esta afirma que indicações detectadas como trincas, independente do tamanho da trinca, são inaceitáveis.

Figura 46 – Inspeção após o ensaio de LP no CP 01 detectando a presença de trincas e porosidades.



Fonte: Autor (2017).

Figura 47 – Ângulo aproximado de visão da trinca encontrada no CP 02



Fonte: Autor (2017).

### 1.11. Inspeção pelo END por Ultrassom

A partir das figuras que serão mostradas a seguir, retratar-se-ão as descontinuidades ou falhas encontradas por meio do ensaio de ultrassom, com o auxílio de um equipamento, cumprindo também com um dos objetivos deste trabalho.

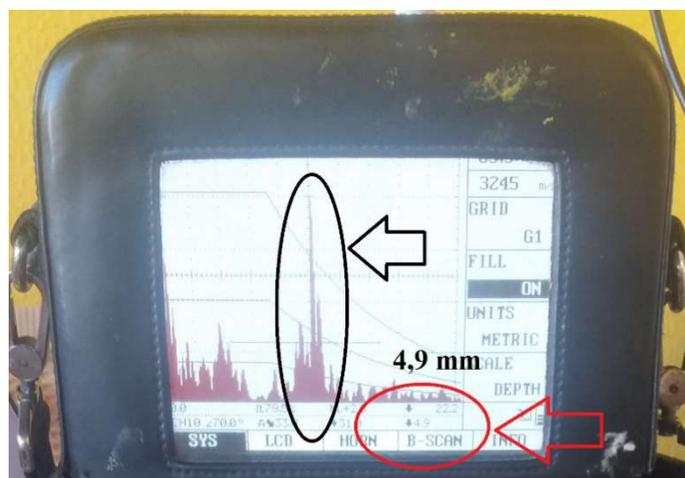
Observando a figura a seguir, o inspetor em END afirmou baseado com as normas da ABENDI que caso haja apenas um defeito ou descontinuidades na peça, está será reprovada no ensaio, sendo necessário solicitar o procedimento de descarte da mesma. Com base na norma ASME Sec. IX QW-191-2, o corpo de prova 01 foi reprovado pois apresentou um comprimento de 4,9 mm, e indicações que ultrapassem os limites aceitáveis são consideradas inaceitáveis de acordo com a norma.

Figura 48 – Inspeção do CP 01 com o auxílio do aparelho de ultrassom



Fonte: Autor (2017).

Figura 49 – Ângulo aproximado de visão da descontinuidade indicada na tela do aparelho de ultrassom.



Fonte: Autor (2017).

Para o CP 02, o ensaio por ultrassom encontrou um defeito na região paralela ao local onde foi detectada a trinta no ensaio por LP no CP 01. Ao observa este detalhe, inspetor em END mais uma vez afirmou que baseado com as normas da ABENDI que caso haja apenas um defeito ou descontinuidades na peça, está será reprovada no ensaio, sendo necessário solicitar o procedimento de descarte da mesma. Com base na norma ASME Sec. IX QW-191-2, o corpo

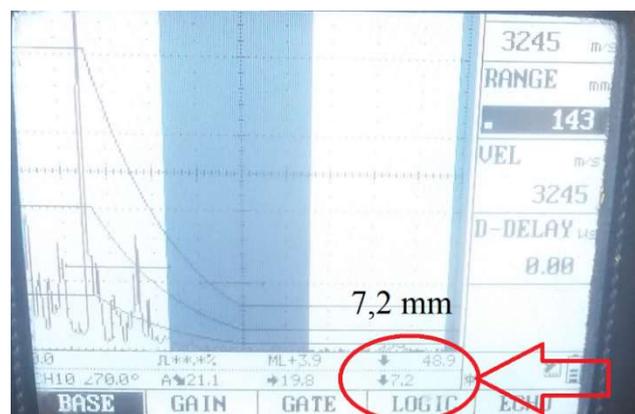
de prova 01 foi reprovado pois apresentou um comprimento de 7,2 mm, e indicações que ultrapassem os limites aceitáveis são consideradas inaceitáveis de acordo com a norma.

Figura 50 – Inspeção do CP 02 com o auxílio do aparelho de ultrassom



Fonte: Autor (2017).

Figura 51 – Ângulo aproximado de visão do defeito indicado na tela do aparelho de ultrassom.



Fonte: Autor (2017).

## 1.12. Check-list (Lista de Verificação)

Após a análise dos resultados dos dois corpos de provas, que passaram pelos métodos de ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e por ultrassom, foi desenvolvido então o

check-list, onde este foi baseado nos requisitos das normas Norma Regulamentadora Nº 12 – Máquinas e Equipamentos, e a Norma Brasileira, NBR-9175.

Como já foi retratado no capítulo anterior, três fatores dentre os de maior grau de relevância foram selecionados para passagem pelo check-list.

- 1) O primeiro deles é a Condições de Trabalho que o local proporciona ao soldador, conforme a tabela abaixo:

Tabela 6 – Check-list das condições de trabalho

| LOCAL DA EMPRESA: “W-Inox Alumínio”  |     |     |
|--|-----|-----|
| ASSINALE COM UM X O ITEM VERIFICADO  |     |     |
| ITENS VERIFICADOS  | SIM | NÃO |
| Ventilação do local  |     | X   |
| Extintor de incêndio   | X   |     |
| A máquina encontra-se eletricamente aterrada   | X   |     |
| Existe sinalização de advertência  |     | X   |
| Presença de água ou umidade excessiva  |     | X   |
| Há risco de incêndio ou explosão   |     | X   |
| Válvulas de retrocesso e corta chamas  | X   |     |
| Disponibilidade de EPI's   | X   |     |
| O eletrodo está armazenado em um local adequado?   |     | X   |
| Iluminação   | X   |     |
| A empresa possui algum tratamento para os resíduos sólidos, líquidos e gasosos?          |     | X   |
| A higiene e conservação do refeitório e dos equipamentos de água potável são observadas? | X   |     |
| É utilizado EPI adequado ao risco?   |     | X   |

Fonte: Autor (2017).

Com base na NRº 12 e na NBR-9175, conclui-se que esta empresa não se adequa aos parâmetros exigidos, e por mais que estas sejam muito extensas, algumas destas possuem um grau de relevância maior e podem afeta na atividade final, no caso, na execução da soldagem dos corpos de provas. Dentre os itens que podem interferir na soldagem dos corpos de provas, o item “O eletrodo está armazenado em um local adequado” precisa ser corrigido para não evitar futuros problemas que possam vim a ocorrer por consequência desta irregularidade.

- 2) Prosseguindo com a análise dos resultados encontradas nos corpos de provas, que passaram pelos métodos de ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e por ultrassom, onde estes CP's foram reprovados, prossegue-se então a investigação de

possíveis causas que levam os corpos de provas a serem reprovados, e dentre os fatores primordiais de relevância que comumente podem influenciar diretamente no resultado, existe o fator Operador de Soldagem, ou o soldador, como é popularmente chamado. Durante a investigação das falhas, concluiu-se que o soldador pode ser influência direta na reprovação dos CP's por meio das análises de END, e com base nisso, buscou-se a norma NR-18, onde esta regulamenta os profissionais da área operacional sobre as normas de Segurança em Soldagem e Corte. Portanto, o check-list a seguir mostrada algumas causas potenciais que tiveram influência direta para a reprovação dos corpos de provas.

Tabela 7 – Check-list do Operador de soldagem

| NOME DO OPERADOR: “P.C” (por questões de ética, o operador não pode ter seu nome revelado).   |     |     |
|---|-----|-----|
| ASSINALAR COM UM X O ITEM VERIFICADO  |     |     |
| ITENS VERIFICADOS   | SIM | NÃO |
| O soldador é habilitado e qualificado para a função de solda?   |     | X   |
| O soldador estava usando corretamente o Equipamento de Proteção Individual (EPI)?   |     | X   |
| O soldador estava seguindo todos os procedimentos necessários para a realização de seu trabalho?  | X   |     |
| O soldador possui o aparato técnico para a soldagem (saber a regulagem dos parâmetros, controle de ângulo, conhecimento dos materiais de adição e da base)? |     | X   |
| Além do conhecimento técnico, o soldador possui cuidados visuais e uma habilidade manual razoável?  | X   |     |

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a norma regulamentadora NR-18, conclui-se que o operador de soldagem não atendeu aos requisitos mínimos, pois segundo esta norma, a não execução dos procedimentos de segurança regidos pela norma podem influenciar diretamente nas falhas que foram detectadas por meio dos ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e por ultrassom. Sob o conhecimento das falhas ou discontinuidades encontradas, podemos relacionar estas a alguns dos itens listados no check-list da tabela anterior. Por exemplo, no item “O soldador possui o aparato técnico para a soldagem (saber a regulagem dos parâmetros, controle de

ângulo, conhecimento dos materiais de adição e da base)”, este item que não foi encontrado pelo soldador pode ter influência direta no surgimento das falhas encontradas no CP 02, mais precisamente, a trinca, pois o surgimento desta pode se dá pela má escolha de solda por parte do soldador, o cordão de solda feito pelo operador é pequeno, dentre outros fatores.

- 3) Seguindo com a última etapa de análise dos resultados encontradas nos corpos de provas que passaram pelos métodos de ensaios não destrutivos por líquidos penetrantes e por ultrassom, onde estes CP's foram reprovados, iniciou-se então com a investigação da última etapa pré-estabelecida dos fatores de grande relevância que possuem influência direta com a reprovação dos copos de provas após os testes por meio dos END, por isso, alguns itens foram listados abaixo, com algumas causas potenciais que tiveram influência direta para a reprovação dos corpos de provas.

Tabela 8 – Check-list dos parâmetros de soldagem

| LOCAL DA EMPRESA: “W-Inox Alumínio”  |     |     |
|--|-----|-----|
| ASSINALAR COM UM X O ITEM VERIFICADO   |     |     |
| ITENS VERIFICADOS  | SIM | NÃO |
| Todos os parâmetros de soldagem pré-estabelecidos tiveram embasamento nos trabalhos mais recentes? | X   |     |
| O chanfre foi feito com as medidas previstas no parâmetro de soldagem?                             |     | X   |
| A corrente foi utilizada de acordo com parâmetro pré-estabelecido pelo requisitante do serviço?    | X   |     |
| O aço 1020 que seria objeto de estudo estava em uma qualidade aceitável?                           | X   |     |
| A velocidade de avanço foi dimensionada corretamente?  | X   |     |

Fonte: Autor (2017).

Para a investigação dos itens desta check-list, foi necessário argumentar com mais profundidade cada uma das perguntas, pois as respostas das mesmas podem levar ao entendimento e conhecimento sobre as causas que tiveram de forma direta um grau de influência alto sobre das descontinuidades ou falhas que foram encontradas no cordão de solda por meio dos END por líquido penetrante e pelo método de ultrassom.

Então, sobre o primeiro item, onde este questiona: **“Todos os parâmetros de soldagem pré-estabelecidos tiveram embasamento nos trabalhos mais recentes?”**

A resposta é sim. Durante o estudo dos parâmetros de soldagem contidos no referencial teórico deste trabalho, tais parâmetros estavam contidos dentro de uma margem de aceitação, onde estes parâmetros foram baseados nos trabalhos mais recentes de soldas envolvendo a técnica de ensaios não destrutivos por LP e por ultrassom. Por isso, nenhum parâmetro foi escolhido de maneira aleatória ou por simples interesse do autor deste trabalho.

Sobre o segundo item, questiona-se: **“O chanfre foi feito com a medida previstas no parâmetro de soldagem?”**

A resposta é não. Segundo Modenesi (2008) o chanfre é um corte efetuado na junta para poder facilitar a obtenção de uma solda com a penetração desejada. Quando o chanfre é feita de maneira diferente aos parâmetros pré-estabelecidos, isto ocasionará uma falta de penetração e qualidade de solda baixa, casos estes que foram relatados pelos inspetores de END.

Sobre o terceiro item, questiona-se: **“A corrente foi utilizada de acordo com parâmetro pré-estabelecido pelo requisitante do serviço?”**

A resposta é sim. Por mais que má regulagem da corrente possa ocasionar descontinuidades como a presença da porosidade, como a que foi encontrada no CP 01, o soldador aplicou estritamente o valor da corrente que estava pré-estabelecido nos parâmetros de soldagem

Sobre o terceiro item, questiona-se: **“O aço 1020 que seria objeto de estudo estava em uma qualidade aceitável?”**

A resposta é sim. Quando foi localizado o estabelecimento “Salão do Ferro” onde foram negociados a compra das chapas de aço 1020, os aços estavam em uma ala separada dos restantes, onde a área estava livre da presença de umidades ou contaminantes que poderiam entrar em contato com o material.

Sobre o quarto item, questiona-se: **“A velocidade de avanço foi dimensionada corretamente?”**

A resposta é sim. Por mais que a má regulagem da velocidade de avanço possa ocasionar o surgimento das descontinuidades mais comuns como a falta de fusão, presença de mordeduras e porosidades, como também as trincas (este último presente no CP 02), este parâmetro foi pré-estabelecido de acordo com parâmetros utilizados nos trabalhos mais recentes da área de soldagem envolvendo o aço 1020.

## CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após várias sessões de estudo e pesquisa do tema abordado neste trabalho, consultando também os trabalhos mais recentes que foram produzidos, percebeu-se um alto poder que o método de END veem apresentando, e com a crescente melhora deste método nos últimos anos, os resultados obtidos através deste método foram se tornando mais reais e precisos, satisfazendo quem o utiliza para determinados fins onde estes ensaios são aplicados.

Um dos objetos de estudo deste trabalho, a FMEA mais uma vez se tornou eficaz na busca de potenciais modos de falhas nas situações aqui mostradas, pois uma análise e investigação profunda foi feita para desvendar estas causas, o que provocava o aparecimento das mesmas e como proceder para eliminar parcialmente ou completamente a existência de eventos indesejáveis que certamente comprometem todo um processo a qual esta é contida.

Outro ponto que é extremamente necessário citar é sobre como os processos de soldagem e ferramenta do FMEA chamada Check-list trabalharam de forma conjunta e coesa para determinar as possíveis causas raiz do problema. Todas as etapas do processo de soldagem foram alvo de investigação por meio desta ferramenta poderosa que certamente, conseguiu apontar as prováveis causas que ocorreram, ou por consequência da má condição de trabalho, ou por imperícia/má qualificação do soldador ou até mesmo por erros da definição dos parâmetros de soldagem.

Com base nos resultados das análises que foram mostrados neste trabalho, conclui-se que o uso da ferramenta FMEA (por meio do Check-list), se coloca como uma das mais utilizadas no mercado, que trabalhando de forma conjunta com os processos de soldagem, onde a coleta das análises deste processo é feita pelo método de END mostram que tais ferramentas irão ter presença constante para quem trabalha na área. Foi observado, baseado na coleta de resultados, que as indústrias cada vez mais utilizarão estas ferramentas no seus respectivos locais de trabalho, pois as mesmas buscam cada vez a ocorrência de “zero falhas” em um processo, e como a presença de um evento indesejado pode parar um serviço, fazendo com que a indústria perca capital, estas irão investir cada vez mais nesta área, para que o nível de ocorrência de falhas fique próximo das chamadas “zero falhas”.

No decorrer do estudo deste trabalho, percebeu-se a presença de aspectos que ainda podem ser estudados e trabalhados, pois executando tais recomendações, estas além de aumentar o banco de dados dos estudos referentes a área que foi abordada neste trabalho, influenciará na abrangência de outras áreas, como a ferramenta FMEA, e também melhorará os processos que visam a busca de falhas ou descontinuidades ou defeitos na soldagem, utilizando

os END, ramo que ainda tem muito a melhorar e crescer no mercado. Citar-se-á alguns aspectos como:

- Introduzir a ferramenta FMEA com uma abrangência maior no campo da Soldagem, pois percebeu-se inúmeros pontos falhos no processo de soldagem deste trabalho, e tal ferramenta ajudará prevenir que estas falhas no processo possam acontecer;
- Aumentar o campo de aplicação do FMEA, não se restringindo apenas na Soldagem, mas também em áreas como o setor automotivo, aplicando a FTA em componentes automotivos com freio, amortecedor, pneus, entre outros, prevenindo e amenizando possíveis falhas recorrentes.
- Utilizar a END com mais abrangência para a busca de falhas, como a radiografia, as partículas magnéticas, e também a termografia, métodos estes que possuem um potencial enorme para se realizar tal busca.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁQUILA, Vitor. Soldagem por Eletrodo Revestido. Escola de Soldagem L&A – Centro de Formação de Soldadores. Salvador, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. METALS HANDBOOK, Vol 17, Nondestructive Evaluation and Quality Control, 15 ed. 1997.

ANDREUCCI, Ricardo, "Ensaio por Ultrassom", ABENDE, Julho 2016

ANDREUCCI, Ricardo. Ensaios por Líquidos Penetrantes: São Paulo: ABENDE, 2016

ANDREUCCI, Ricardo. Ensaios não destrutivos: São Paulo: ABENDE, 2014

ATKINS, PETER. Físico Química volume 1, 2002.

BEHENE, Lucas. Estudo da alteração de parâmetros do processo de soldagem plasma com alimentação de vareta em substrato de aço ASTM 743 tipo CA6NM / Lucas Behene. – Curitiba, 2014.

BONANOMI, Roberto Carlos. Aplicação da Teoria Grey e FMEA - Análise dos Modos de Falhas e Efeitos na Priorização de Riscos de Projetos de Desenvolvimento de Software Produto. Revista Gestão Industrial, Ponta Grossa, v. 06, n. 04, 2010.

CERQUEIRA, Alexsinaldo da Silva. "Avaliação da técnica de ultrassom Phased Array na inspeção de juntas soldadas dissimilares e cladeadas com diferentes espessuras de amanteigamento." (2009).

DA SILVA, Luiza; TAPIA, Jaiser. ANÁLISE DOS MODOS E EFEITOS DAS FALHAS–FMEA: O CASO DAS IMPORTAÇÕES COM RECURSOS ORÇAMENTÁRIOS NA UFSM FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS–FMEA: THE CASE OF IMPORT WITH BUDGET RESOURCES ON UFSM. (2014).

FERNANDES, José Márcio Ramos; REBELATO, Marcelo Giroto. Proposta de um método para integração entre QFD e FMEA. *Gestão & Produção*, São Carlos, v. 13, n. 2, Mai. 2006.

FILHO, C. A. *Metalurgia da soldagem*. Belém: Editado pelo autor, 2008.

HELMAN, Horacio; ANDERY, Paulo Roberto Pereira. *Análise de falhas (Aplicação dos métodos de FMEA e FTA)*. Belo Horizonte, MG: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, 1995. 156 p. (Ferramentas da Qualidade, v. 11).

INFOLSODA. *Processos de Soldagem – Soldagem por eletrodo revestido*. Disponível em: <[http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos\\_solda/soldagem-por-eletrodo-revestido.pdf](http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/processos_solda/soldagem-por-eletrodo-revestido.pdf)> Acesso em: 01.07.2017.

KOU, S. 2003. *Welding Metallurgy*. 2ed. New Jersey: John Wiley & Sons.

Mac Master R; "Non Destructive Testing Handbook, N.York, Ronald Press, MODENESI, Paulo Jr., "Soldagem e Inspeção em juntas soldadas", UFMG, novembro 2001.

MACHADO, Ivan Guerra. *Soldagem & técnicas conexas: processos*. Porto Alegre, 2007.

MODENESI, P. J. *Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas*. Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

MODENESI, Paulo J.; MARQUES, Paulo V.; SANTOS, Dagoberto B.; *Introdução à metalurgia da soldagem*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Belo Horizonte, 2006.

MODENESI, P. J. *Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem*. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, julho 2008.

NEVES, Celeste. *Garantia de Qualidade na Empresa Metalúrgica Progresso*, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 1998.

PEDRONI, Patrick Guedes. ANÁLISE DE FALHAS DAS FRATURAS DE TRILHOS: O CASO DA FERROVIA DO AÇO/, Rio de Janeiro, RJ, Instituto Militar de Engenharia, 2008

PEREIRA, João Adriano Vieira. Estudo e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos. Líquidos penetrantes, Ultrassons, Radiografia digital-Técnica tangencial medição de espessuras. 2013.

Portal da Radiologia. História do END no Brasil, 2010. Disponível em: < [http://portaldaradiologia.com/HistoriadoENDnoBrasil/2010?page\\_id=531#none](http://portaldaradiologia.com/HistoriadoENDnoBrasil/2010?page_id=531#none) > Acesso em 14 de maio de 2017.

REIS, R. O.; SCOTTI, A.; Fundamentos e prática da soldagem a plasma. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

Revista ABENDI. A História dos Ensaios Não Destrutivos no Brasil, São Paulo: Vol II, Nº 15, Julho/2006.

ROZENFELD, Henrique. et al. Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria de processo. São Paulo, SP: Saraiva, 2006.

SANTIN, J. L. Ultrassom Técnicas e Aplicação e Técnicas. Pró END Consultoria Ltda. Curitiba, 2003.

SIMÕES FILHO, S. (2006), “Análise de árvore de falhas considerando incertezas na definição do evento básico”. Tese de doutorado apresentada ao Curso de Doutorado em Engenharia Civil da COPPE/UFRJ.

SLACK, Nigel; CHAMBERS, Stuart; ROBERT, Johnston. Administração Da Produção. 3ª Ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SOUZA, Evandro Abreu de. O treinamento industrial e a gerencia de riscos. Uma proposta de instrução programada. Capítulo 2. Dissertação de Mestrado -. UFSC, 1995. Engenharia de Produção. Disponível em: < [http://www.eps.ufsc.br/disserta/evandro/capit\\_2/cap2\\_eva.htm](http://www.eps.ufsc.br/disserta/evandro/capit_2/cap2_eva.htm) > Acesso em: 03 de junho de 2017.

SOUZA, Ricson Rocha: Ensaaios Não Destrutivos - Controle de Qualidade e END. Grupo de Mecânica Aplicada - GMAP, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

SSAB. Sheet Steel Joining Handbook. Joining of high strength steels, New York: Tunnplat AB, 2004.

Structural Welding Code – Steel, Código AWS D1.1 –, Ed. 2015

TOLEDO, J.C. Metodologias para Análise e Melhoria da Qualidade. Apostila, GEPEQ/DEP/UFSCar. São Carlos, 70 p., 2002.

VINCENT, David W.; HONECK, Bill. Risk Management Analysis Techniques for Validation Programs. Journal of Validation Technology, vol. 10, n. 3, p. 235-251, Maio, 2004.

VIEIRA, Sebastião Ivone. Manual de Saúde e Segurança do Trabalho. 2ª edição. São Paulo: LTR, 2008.

VITORINO, Gonçalo Manuel de Sousa Henriques. Modelação das Ondas de Rayleigh. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa. 2010.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; HOMEM DE MELLO, Fábio Décourt. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Edgart Blucher, 2002.

ZIEDAS, Selma e TATINI, Ivanisa, Soldagem – Coleção Tecnologia – Senai, 1ª ed., São Paulo, 1997.