

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

**ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO EM
JUNTAS SOLDADAS**

Taubaté – SP

2017

Willian Rinco Pereira

**ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO EM
JUNTAS SOLDADAS**

Monografia apresentada para obtenção
do Certificado de Especialização pelo Curso de
Engenharia de Soldagem do departamento de
Engenharia da Universidade de Taubaté,

Área de Concentração: Pós Graduação
Orientador: Prof Antônio Carlos Tonini

Taubaté – SP

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo
SIBi – Sistema integrado de Bibliotecas – UNITAU**

P436a Pereira, Willian Rinco

Alívio de tensões residuais por vibração em uma junta soldada. / Willian Rinco Pereira . - 2017.

38f. : il.

Monografia (especialização) - Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Orientação: Prof. Me. Antônio Carlos Tonini, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Alívio de tensões residuais. 2. Junta soldada
3. Vibração. 4. Vibratory Weld Conditioning (VWC).
5. Vibratory Stress Relief (VSR). I. Título.

Willian Rinco Pereira

**ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO EM
JUNTAS SOLDADAS**

Monografia apresentada para obtenção do
Certificado de Especialização pelo Curso de
Engenharia de Soldagem do departamento de
Engenharia da Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Pós Graduação
Orientador: Prof. Antônio Carlos Tonini

Data: 30/04/2017

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Antônio Carlos Tonini
Assinatura: _____

Universidade de Taubaté

Prof. Me Ivair Alves dos Santos
Assinatura: _____

Universidade de Taubaté

Prof. Me Fábio Santejani
Assinatura: _____

Universidade de Taubaté

Dedico este trabalho à minha família, Nilcélio, Michele e Ana que me deram todo o apoio e suporte para a conclusão deste curso e agradeço a Deus pela oportunidade da vida. Dedico em especial a minha mãe, que mesmo não estando fisicamente comigo, me manda energia com muito carinho lá do céu.

AGRADECIMENTOS

Aos professores do curso que sempre nos auxiliaram e facilitaram o caminho. Em especial, agradeço ao Prof. Msc. Ivair Santos que sempre solícito, incentivou e ajudou a todos sem distinção.

Ao professor orientador Antônio Carlos Tonini pela atenção e ensinamentos dentro e fora da sala de aula.

Aos professores Américo Scotti e Volodymyr Ponomarov pela atenção e materiais de consulta enviados que contribuíram para a presente pesquisa.

A UNITAU que abriu suas portas oferecendo suas instalações.

A FATEC Pindamonhangaba pelas aulas práticas e laboratórios de metalografia.

Aos alunos do curso de pós-graduação em engenharia de Soldagem pelas amizades e parcerias ao longo do curso.

*“É melhor trucidar uma criança no berço a
acalantar desejos que não se trasmutam em atos”*

William Blake

RESUMO

São várias as atividades de montagem e reparos que utilizam processos de soldagem. Estes processos, inevitavelmente, introduzem tensões nas juntas, o que pode comprometer a integridade do componente e/ou da estrutura soldada. Para se retirar estas tensões ou ao menos reduzir seu valor de maneira a garantir a integridade estrutural, faz-se um alívio dessas tensões usualmente através de tratamentos térmicos. Porém há alguns anos, vem-se desenvolvendo métodos alternativos para ocasiões onde não há possibilidade de se fazer tais tratamentos devido às dimensões dos componente/estruturas e/ou tamanho dos fornos, além dos requisitos de produtividade cada vez mais exigentes. Este artigo tem por objetivo, estudar e analisar o alívio de tensões residuais através do processo de vibração em componentes soldados. Desta forma, procurou-se iniciar tal estudo levantando-se informações de como as tensões são induzidas aos componentes soldados, bem como os métodos mais conhecidos de medição, aplicabilidade, princípios de funcionamento dos processos vibracionais e as influências destes nas propriedades mecânicas dos componentes soldados pós-vibração.

Palavras-chave: Alívio de tensões residuais, junta soldada, vibração, Vibratory Weld Conditioning (VWC), Vibratory Stress Relief (VSR).

ABSTRACT

There are several assembly and repair activities that use welding processes. These processes inevitably introduce stresses in the joints, which can compromise the integrity of the component and / or the welded structure. In order to remove these stresses or at least reduce their value in order to ensure structural integrity, these voltages are usually relieved by heat treatments. However, for some years, alternative methods have been developed for occasions where there is no possibility of making such treatments due to the dimensions of the components / structures and / or size of the furnaces, in addition to the increasingly demanding productivity requirements. This article aims to study and analyze the residual stress relief through the vibration process in welded components. Thus, we attempted to initiate such a study by raising information on how stresses are induced on welded components, as well as on the best known methods of measurement, applicability, principles of operation of vibrational processes and their influence on the mechanical properties of welded components Post-vibration.

Keywords: Residual stress relief, weld joint, vibration, Vibratory Weld Conditioning (VWC), Vibratory Stress Relief (VSR).

LISTA DE FIGURAS

1. Figura 01: Distorção em soldas de filete.....	14
2. Figura 02: Distribuição de tensões em um cordão de solda numa chapa.....	14
3. Figura 03: Distribuição de tensões em um cordão de solda.....	15
4. Figura 04: Campos de tensão nos eixos X e Y.....	16
5. Figura 05: Distribuição de tensões.....	16
6. Figura 06: Tensões Longitudinais e Tensões Transversais numa chapa soldada	16
7. Figura 07: Técnicas de soldagem para minimizar distorções.....	20
8. Figura 08: Martelamento – Shot Peening.....	21
9. Figura 09: Técnica de Ressoldagem.....	21
10. Figura 10: Frequências obtidas no tratamento vibracional Sub-harmônico.....	23
11. Figura 11: Equipamento Meta-Lax. Fabricante Bonal Inc.....	24
12. Figura 12: Equipamento Formula 62 - Empresa SRE	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. OBJETIVO.....	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	12
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1. DESENVOLVIMENTO DE TENSÕES EM UMA JUNTA SOLDADA.....	13
2.2. TIPOS DE TENSÕES RESIDUAIS.....	17
2.3. TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	18
2.4. TÉCNICAS PARA REDUZIR TENSÕES RESIDUAIS EM UM CORDÃO DE SOLDA	20
2.5. ALÍVIO AS TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO.....	22
2.5.1. TIPO DE TRATAMENTO DE ALÍVIO DE TENSÕES.....	22
2.5.2. ORIGEM E DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA.....	22
2.5.3. CURVAS DE RESSONÂNCIA.....	22
2.5.4. INÍCIO DA TECNOLOGIA E EMPRESAS FABRICANTES.....	23
2.5.4.1. BONAL META-LAX.....	23
2.5.4.2. SRE – FORMULA 62.....	25
2.5.4.3. LIMITAÇÕES DO PROCESSO.....	26
2.6. VIBRATORY STRESS RELIEF (VSR) E VIBRATORY WELD CONDITIONING (VWC).....	27
3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO.....	28
3.1. REVISÃO DA LITERATURA.....	28
4. NORMAS DE FABRICAÇÃO E ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	29
5. RESULTADOS PESQUISADOS.....	30
6. CONSIDERAÇÕES.....	33
7. CONCLUSÃO.....	34
8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS E CONSULTADAS.....	35

1. INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem são particularmente preocupantes, pois são introduzidas tensões nos materiais soldados que podem comprometer a integridade do componente e/ou estrutura. No processo de soldagem de fusão à arco elétrico, é gerado um intenso gradiente térmico resultando em tensões que poderão ter como efeitos a instabilidade dimensional através de distorções, redução da resistência à fadiga, falhas prematuras entre outros.

Por isso, processos que reduzem os níveis de tensões residuais são indispensáveis para estabilidade dimensional, prevenção de falhas prematuras e catastróficas, inviabilidade produtiva entre outros fatores que envolvem segurança, custo e qualidade de fabricação.

Dividem-se os processos de alívio de tensões em mecânicos e térmicos. Há também quem desenvolva uma combinação dos dois processos a fim de se obter as vantagens de ambos.

O alívio térmico ocorre quando a tensão de escoamento, da mesma forma que a tensão Limite de resistência, diminui com a temperatura, o que significa que o material conseguirá se deformar com um valor de tensão menor. Num aquecimento de um dado material em que a tensão residual seja próxima ao limite de escoamento, esta tensão superaria o limite de escoamento e o material se deformará promovendo o alívio da tensão. Os tratamentos térmicos de alívio de tensões dependem principalmente do tempo e da temperatura, além da resistência mecânica e a composição química.

O alívio promovido mecanicamente está relacionado à energia dada ao material que poderá se reorganizar estruturalmente em níveis menores de energia.

Em alguns processos como o de martelamento ou shot peening, tensões compressivas são introduzidas ao material beneficiando-o em propriedades como resistência à fadiga, prevenção de trincas entre outras.

1.1 Objetivo

O principal objetivo desta pesquisa é analisar o processo de formação das tensões residuais oriundos do processo de soldagem, um dos processos mais utilizados nas etapas de fabricação. Para se compreender melhor o assunto, procurou-se estabelecer uma sequência de estudo, tendo um início, o desenvolvimento e um final. Desta forma, será exposto como as tensões residuais se originam e seus desdobramentos em um cordão de solda, desde o aquecimento até o resfriamento à temperatura ambiente. Serão expostas também algumas formas de medição das tensões residuais e alternativas para reduzi-las.

1.2 Justificativa

A eficiência do processo produtivo condiciona a competitividade em um mercado globalizado. Visando sempre melhorar a produtividade, empresas estão sempre buscando reduzir custos para se tornarem cada vez mais competitivas. É neste contexto que o presente trabalho irá estudar alternativas para reduzir custos referentes à qualidade, apresentando um método mecânico através das vibrações induzidas a peça onde o tratamento térmico não representa a melhor viabilidade.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho se divide em 8 capítulos, sendo o primeiro dedicado a introdução. A revisão bibliográfica está localizada no segundo capítulo. O terceiro capítulo contém o procedimento metodológico. O quarto capítulo relaciona as normas e códigos de fabricação consultados para esta pesquisa. O capítulo cinco contém uma compilação dos trabalhos pesquisados e seus respectivos resultados. O Sexto capítulo contém as considerações após a pesquisa. O capítulo sete contém a conclusão e o oitavo as referências bibliográficas usadas e consultadas para a confecção da presente monografia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão expostos como se originam as tensões residuais em uma junta soldada, as distribuições das tensões nos eixos X e Y, as principais técnicas de medição das tensões residuais e os métodos vibracionais.

2.1 Desenvolvimento das Tensões Residuais em uma junta soldada.

Em um cordão de solda encontraremos, não importando o tipo de processo de soldagem, tensões e deformações. Parte desta deformação está associada com tensões residuais e outra parte são tensões permanentes.

A escolha do processo de soldagem influencia na magnitude do conjunto Tensões – Deformações através da escolha dos parâmetros do processo, tais como temperatura de pré-aquecimento, corrente, tensão, vazão de gás, velocidade de soldagem, entre outros. Há influência também da quantidade de metal depositado na junta, onde os chanfros que receberão o material depositado devem ser considerados. Os chanfros estão diretamente ligados ao acesso do soldador ou robô à junta e à área de depósito para o metal de solda.

No início de um cordão de solda, há o aquecimento para promover a fusão dos materiais, sendo este aquecimento localizado e não uniformemente distribuído. A temperatura e o tempo de exposição a ela varia o nível das tensões de próximas a zero até próximo do limite de escoamento dos materiais. Tensões residuais próximas ao limite de escoamento podem causar trincas, instabilidades como flambagem e redução da resistência à fadiga, diminuindo a vida útil dos componentes e/ou estruturas soldadas, aumentando os custos de reparo e produtividade devido à interrupção do ciclo produtivo.

Ao se depositar um cordão de solda numa chapa, pode-se em alguns casos, observar uma curvatura que é o efeito visível da distorção. Esta curvatura significa o encurtamento do material base adjacente ao cordão de solda. (MODENESI, 2008).

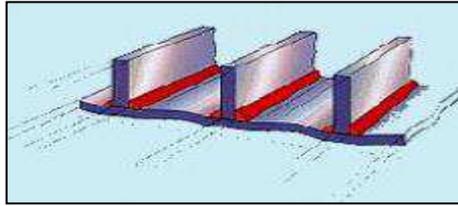


Figura 01 – Distorção em soldas de filete

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

Devido ao aquecimento não uniforme e conseqüente gradiente de temperatura, o cordão tem a tendência a encurtar mais do que o metal base e isto induz a uma tensão residual trativa no cordão e uma flexão residual na chapa, comprimindo desta maneira as fibras adjacentes.

Não há um consenso entre os pesquisadores sobre em qual regime se originam as tensões residuais. Alguns classificam como elástico, outros como plástico e até mesmo uma mistura dos dois denominada elasto-plástico.

As deformações plásticas não uniformes resultantes da transformação de fases nos metais, também contribuem para o desenvolvimento das tensões residuais, pois envolvem alterações volumétricas, como por exemplo, a transformação da austenita em martensita.

As tensões surgem devido às restrições às movimentações atômicas na estrutura cristalina e os rearranjos atômicos promovidos mecanicamente ou termicamente reduzem o valor desta tensão.

A distribuição de tensões em uma chapa soldada envolve campos de tensões complexos, onde se tem deformações elásticas e plásticas, gradientes extremos de temperatura, transitório de temperatura (variação com o tempo), dependência das propriedades físico-químicas com a temperatura e a heterogeneidade na forma e propriedades microestruturais (MODENESI, 2008).

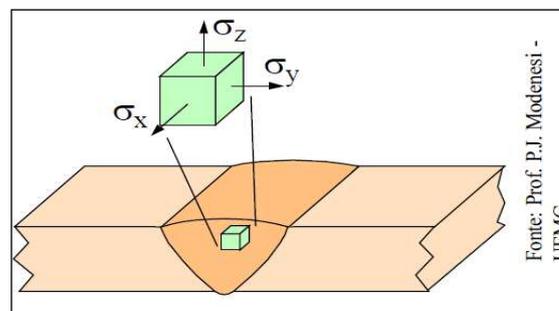


Figura 2 – Distribuição de tensões em um cordão de solda numa chapa

Fonte: (Prof. P.J. Modenesi - UFMG)

Na seção A-A que se encontra fora do cordão de solda, não há variação de temperatura ou geração de tensão de tração.

Na seção B-B que corta a poça de fusão (zona fundida), se tem a maior variação de temperatura e o início das tensões de compressão e tração nas adjacências do cordão de solda.

Na seção C-C onde a deformação plástica ocorreu durante a soldagem, observa-se uma redução da temperatura e níveis maiores de tensões tanto de tração como de compressão.

Já na seção D-D onde a solda já resfriou, verifica-se o nível máximo de tensões de tração e compressão.

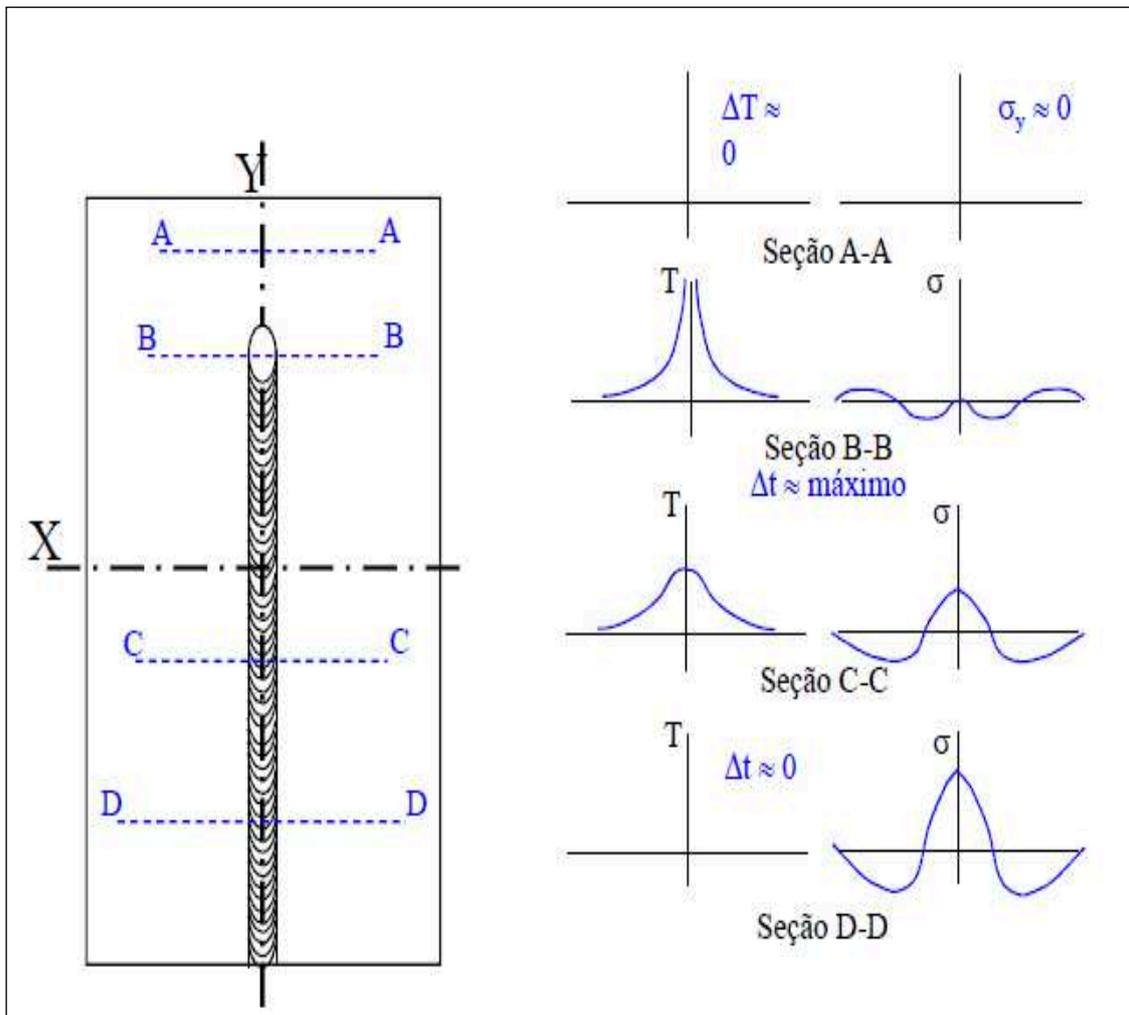


Figura 3 – Distribuição de tensões em um cordão de solda

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

Campo de tensão σ_x ao longo dos eixos X e Y

Campo de tensão σ_y ao longo dos eixos X e Y

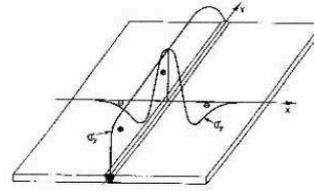
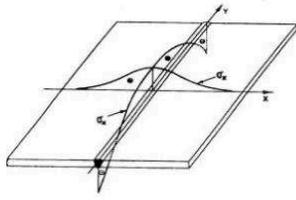


Figura 4 – Campos de tensão nos eixos X e Y

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

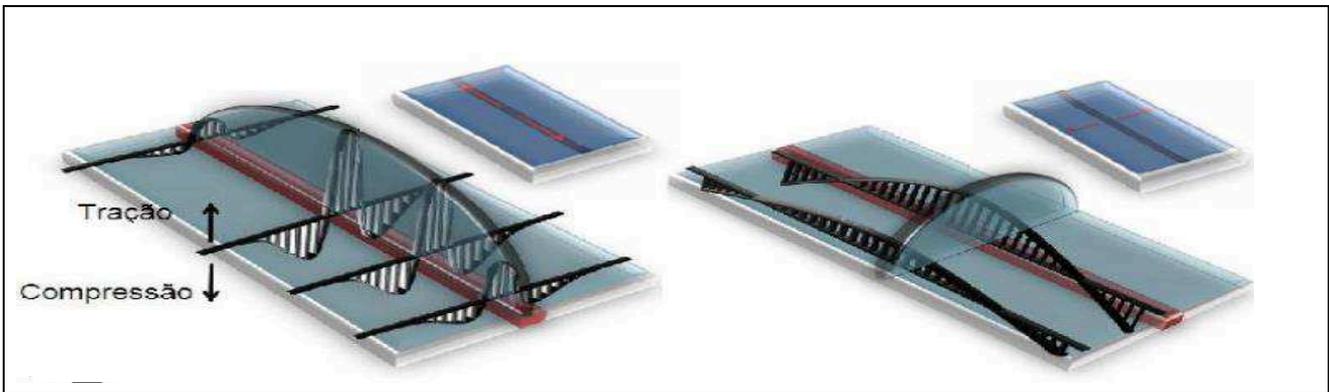


Figura 5 – Distribuição de tensões

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

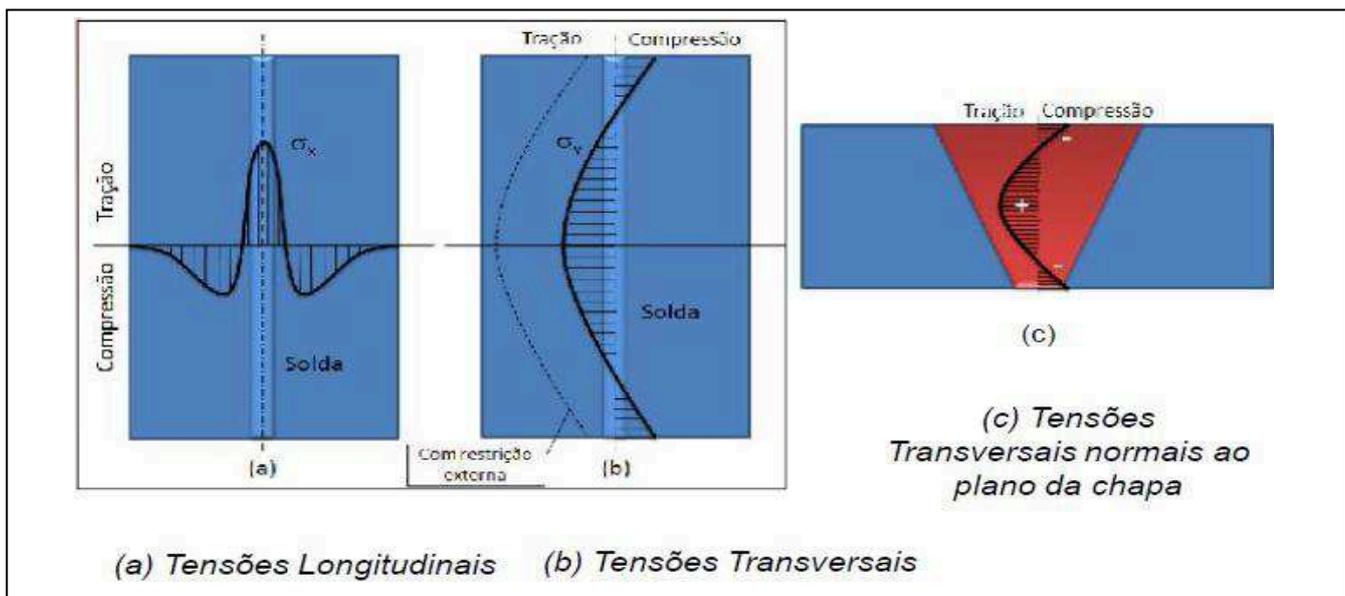


Figura 6 – Tensões Longitudinais e Tensões Transversais numa chapa soldada

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

2.2 Tipos de tensões residuais

A classificação das tensões residuais usualmente encontradas na literatura é, segundo a área de abrangência, dividida em macroscópicas, microscópicas e sub microscópicas.

As tensões residuais macroscópicas, ou do tipo I, se estendem por grandes porções volumétricas, quando comparadas ao tamanho do grão. São oriundas das deformações de origem mecânica e térmica. Nas tensões residuais microscópicas ou do tipo II, a referência é voltada para o grão ou conjunto de grãos e surgem das diferenças de propriedades dos micros constituintes e da anisotropia dos grãos. Tensões sub microscópicas ou tipo III se encontram entre as distâncias atômicas no interior do grão. Na literatura quase todos os trabalhos de pesquisa são sobre tensões macroscópicas.

É de suma importância o entendimento desta classificação ao querer mensurar estas tensões, pois as técnicas de medição são apropriadas aos tipos de tensões.

Em 1988, Jian Lu, pesquisador francês editou o Handbook of Measurement of Residual Stresses a pedido do Comitê de tensões residuais da SEM (Society for Experimental Mechanics) contando com a colaboração de pesquisadores de vários países. Este livro descreve técnicas e procedimentos experimentais, vantagens e desvantagens de cada método, tornando-se uma das referências mais citadas nos trabalhos pesquisados.

Existem três tipos de técnicas de medição das tensões residuais: Destrutivas, quando se compromete ou impossibilita o uso do corpo de prova, Semi destrutiva quando há avaria e não comprometimento da integridade do componente ou estrutura e Não destrutivas que não necessita remoção de material e não causam danos para medição das tensões residuais. Em nenhuma destas técnicas, o valor da tensão é medida de maneira direta.

2.3 Técnicas de medição das tensões residuais

Podemos ainda dividir as técnicas em aplicáveis em condições de serviço e aplicáveis em condições experimentais. Aplicadas em condições de serviço se enquadram as técnicas mais comumente usadas: Raio-X, Furo Cego, Ultrassom, Difração de neutrões e Holografia. As técnicas aplicadas em condições experimentais são: Extensometria, Fotoelasticidade e Técnicas de Moiré. Estas técnicas experimentais são onerosas e demoradas, fornecem valores em poucos pontos e se restringem a poucos tipos de materiais.

A AWS (American Welding Society) classifica os métodos em três principais grupos: Difração de Raios-X, Análise de fraturas e Relaxação de tensões usando ou não extensômetros elétricos ou mecânicos.

Os métodos do Furo cego (Hole drilling) e o método do Anel (Ring Core) são uns dos mais usados para medição das tensões residuais e são classificados semi destrutivos. (MODENESI, 2008)

O equipamento utilizado pode ser de laboratório ou portátil, sendo aplicável a uma grande quantidade de materiais.

No método do Furo Cego, uma roseta especial de três elementos de strain-gages é fixada na chapa no local onde se deseja fazer a medição.

É feito um furo não passante (cego) com profundidade aproximadamente igual ao diâmetro, geralmente com valores entre 0,8 e 3,2 mm. A roseta medirá o alívio das deformações superficiais no material nas regiões adjacentes ao furo. A precisão do furo determinará a precisão do ensaio.

No método do anel, um anel de diâmetro 15 a 150 mm é perfurado. A medição da deformação aliviada é feita na superfície do material remanescente localizado dentro do anel. A profundidade de perfuração varia de 25 a 150% do diâmetro interno. Em comparação ao método do Furo cego, o método do anel é mais sensível pois envolve um alívio de quase 100% das deformações superficiais. Porém o anel possui um tamanho relativamente grande, causando conseqüentemente maior avaria do que o furo cego.

As vantagens desses dois métodos são a rapidez, simplicidade, atende uma grande quantidade de materiais, equipamento portátil e técnica amplamente disponível. A difícil interpretação dos dados e a sensibilidade limitada são características negativas destes métodos.

O método de remoção de camadas é usado em componentes de estrutura plana. Geralmente é um método rápido e seu princípio é simples. Remove-se camadas de um lado da peça plana contendo tensões residuais. Estas se tornam desequilibradas, tendo como consequência a deformação da peça, de modo a se reequilibrar estaticamente. Após várias remoções de camadas e posterior medição, pode-se deduzir o estado de tensão original da peça. A deformação normalmente representada por uma curva pode ser medida usando microscopia óptica, varredura de laser e extensometria. As vantagens deste método são a simplicidade, aplicação para grande quantidade de materiais e a possibilidade de ser usado em conjunto com outras técnicas. Todavia, é um método destrutivo limitado às formas planas.

Difração de raios-X é uma técnica baseada nas deformações elásticas dentro de um material policristalino. Um estado de tensões faz variar a distância entre planos cristalinos devido à deformação elástica. A técnica tem como objetivo medir as distâncias interplanares e a partir dessas medições calcular as tensões residuais presentes. A maior desvantagem desta técnica são as limitações devido à forma do componente, precisando de uma área onde se possa efetuar a leitura que só será possível se o feixe de raio-X for difratado para o detector (LU, 1996).

Difração de nêutrons e de raios-X possuem os mesmos princípios físicos. Difração por nêutrons consegue ter uma penetração maior comparada aos raios-X possibilitando avaliar as tensões internas ao longo da espessura e com isso mapear tridimensionalmente as tensões residuais.

São utilizadas quando da validação dos modelos numéricos. Porém é uma técnica onerosa comparada aos raios-X.

Métodos ultrassônicos se utilizam das variações de propagação da onda em materiais sólidos com relação ao nível de tensão dos mesmos. Consegue-se analisar tensões no interior do material com instrumento portátil, relativo baixo custo, rápido, porém com as desvantagens de baixa resolução espacial e influência das microestruturas podendo afetar a velocidade da onda percorrendo o sólido, comprometendo a precisão deste método. (LU, 1996)

Os métodos magnéticos são não destrutivos, barato, simples, rápido e portátil, porém só aplicáveis em materiais ferro magnéticos, tendo que separar os sinais referentes à microestrutura, dos sinais referentes à tensão. (LU, 1996).

2.4 Técnicas para reduzir as tensões residuais em um cordão de solda.

Para reduzir as tensões e conseqüentes deformações, podemos atuar na fase do projeto definindo chanfros e o volume do cordão de solda e também na fase de fabricação, utilizando menor energia de soldagem, pré-deformação dos componentes, gabaritos, ponteamtos e dispositivos de montagem. O estado de tensões residuais não é considerado nos cálculos de dimensionamento, tornando-se necessária a sua análise.

Deve ser prevista uma seqüência de soldagem que equilibre as tensões, e para isso existem algumas técnicas como deposição para trás ou reverso (skip welding e back step welding), em cascata, com soldadores simultâneos e soldar o mais próximo da linha neutra do conjunto ou em simetria para melhor distribuição das tensões.

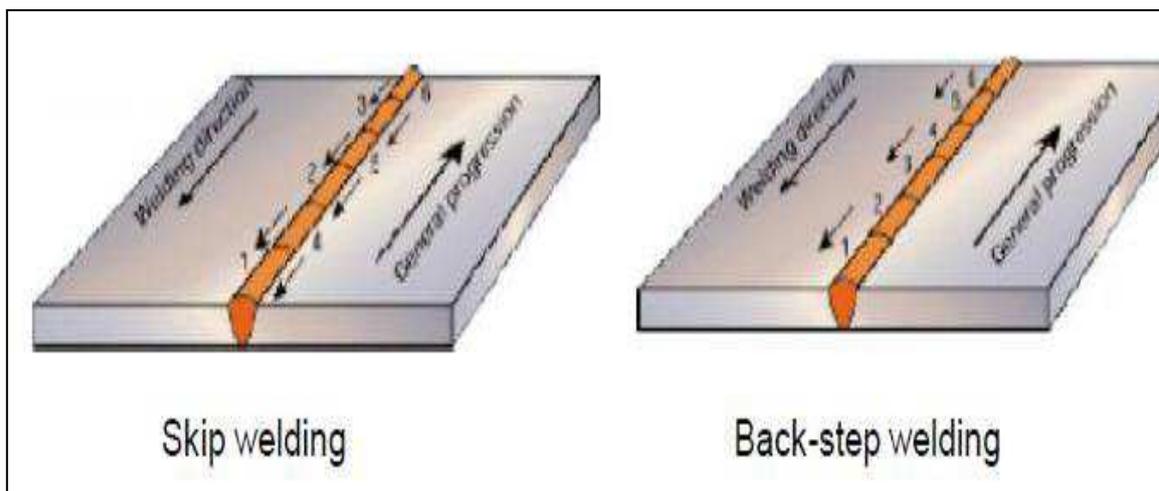


Figura 7 – Técnicas de soldagem para minimizar distorções
 Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

Iniciar soldagem das juntas longitudinais e depois das circunferenciais. Utilizando um passe de raiz em uma junta de topo, minimiza a deformação angular, mas quanto maior o número de passes, sem passe de raiz, maior a deformação.

Martelamento ou Peening é recomendado em soldas de manutenção, já que introduz tensões compressivas que auxiliam em peças sujeitas à fadiga.

Utilizado imediatamente após o cordão, com um martelo de bola em um único sentido, com impacto constante para haver um alívio mais homogêneo da peça.



Figura 8 – Martelamento – Shot Peening

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

A técnica da ressoldagem permite corrigir deformações como o embicamento por exemplo. Abre-se por goivagem um chanfro no lado convexo do embicamento e o preenche com solda novamente. O cálculo do chanfro irá determinar as forças que reverterão o embicamento, porém sem muita precisão.

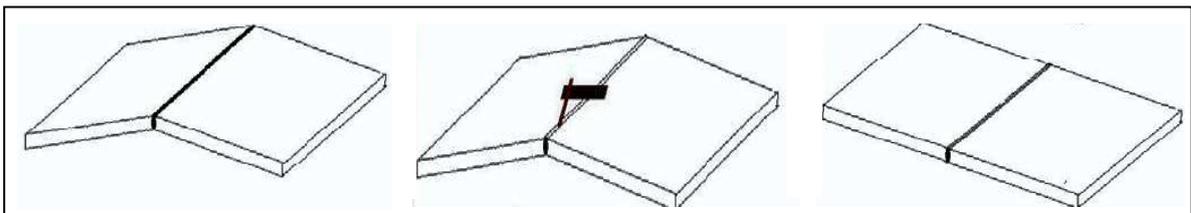


Figura 9 – Técnica de Ressoldagem

Fonte: (Material didático IIW – MFAB 3- Prof. Américo Scotti - 2015)

Dressing é uma técnica onde se utiliza uma ponteira rotativa com profundidade de penetração entre 0,5 e 1,0 mm para minimizar os pontos concentradores de tensão localizados ao pé do cordão de solda, região de interface entre o cordão e o metal base. É também conhecido como adoçamento, pois suaviza as imperfeições do cordão.

2.5 Alívio das tensões residuais por vibração

2.5.1 Tipos de tratamentos de alívio de tensões

As tensões residuais podem ser aliviadas por dois métodos diferentes, sendo o tratamento térmico o mais amplamente usado e consolidado, e em alguns casos, dependendo da aplicação, são normatizados. O outro tratamento é mecânico, sendo o principal foco do presente estudo, o tratamento mecânico através de vibrações induzidas.

O alívio de tensões é um processo de escoamento de material através da redução das restrições de movimentação das linhas de discordância, seja pela aplicação de calor, diminuindo o limite de escoamento, seja por vibrações ou até mesmo pela eliminação das restrições mecânicas.

2.5.2 Origem e desenvolvimento da tecnologia.

O alívio de tensões residuais por vibração teve sua origem antes da década de 50, ainda no período da segunda guerra mundial. Os avanços se intensificaram após a crise energética dos anos 60. As defesas alemã e norte americana estudavam a aplicação de vibração nas asas dos aviões alemães e cascos dos navios americanos, tentando levá-los a quebra. A predição era que se aprovados nos testes não falhariam em serviço. Estes testes de fadiga levaram os cientistas e engenheiros a concluir que eles poderiam usar as vibrações para eliminar as tensões residuais de peças soldadas e fundidas de uma maneira diferente do tratamento térmico convencional (MARTINS, 2012).

2.5.3 Curvas de Ressonância

Quando a vibração é aplicada ao componente tensionado, pode-se encontrar a curva de ressonância em um gráfico da amplitude pela frequência. Este gráfico apresentará um pico que será denominado pico de ressonância e corresponde a frequência de ressonância ou frequência natural.

Frequências de ressonância são chamadas harmônicas e valores abaixo desta frequência são denominadas sub-ressonantes ou sub-harmônicas.

Independente da escolha da frequência do tratamento, o dispositivo vibratório consiste em um oscilador acoplado à peça, tendo a frequência de oscilação, o período de oscilação e a carga aplicada como variáveis do processo.

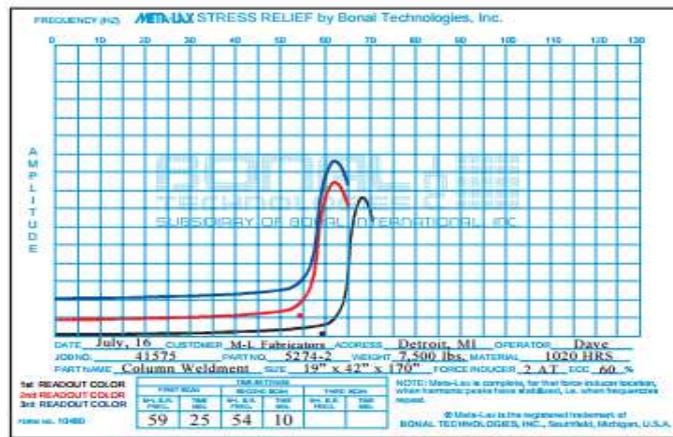


Figura 10 – Frequências obtidas no tratamento vibracional Sub-harmônico.

Fonte: (Site www.bonal.com, acesso em jan 2017)

Um sistema vibratório produz ondas de choque fazendo com que a estrutura do corpo metálico se acomode em um nível de energia mais baixo, devido à reorganização cristalina proporcionada pela energia vibracional. (BONAL, 2008)

A estrutura atômica não difere a energia recebida termicamente da mecanicamente, apenas se utiliza dela para seu rearranjo interno.

Existem diferentes linhas de pesquisa quanto à frequência empregada nos tratamentos de vibração. Essas pesquisas são divergentes quanto aos melhores resultados no emprego da frequência sub-ressonante e da frequência ressonante.

2.5.4 Início da tecnologia e empresas fabricantes

2.5.4.1 Bonal Meta-lax

No final dos anos 60, August G. Hebel Jr. e A. George Hebel III da Bonal Corporation desenvolveram a tecnologia em que utilizavam frequências Sub-harmonicas que para alívio de tensões que seria posteriormente patenteadado como Meta-Lax (Metal Relaxation).

Na época, os equipamentos de alívio de tensão por vibração não eram confiáveis e através da melhoria do processo visava-se 100% de confiabilidade.

Com a evolução dos estudos, os pesquisadores concluíram que para se ter os resultados esperados, era necessário conhecer qual a frequência harmônica do objeto tensionado e utilizar uma frequência sub-harmônica no tratamento.

Com a aplicação de vibrações sub-ressonantes, é promovida a redistribuição das tensões presentes no componente, levando a curva harmônica ou ressonante a se movimentar. Quando o corpo está livre das tensões residuais ocorre a estabilização da curva na localização de sua frequência natural (BONAL, 2015).

Esta frequência é mantida para permitir que ocorra a redistribuição e o equilíbrio das tensões internas (BONAL, 2015; HEBEL, 2004).

Hoje os equipamentos Meta-Lax são vendidos em todos os Estados Unidos e em 50 países através de rede de distribuidores. (Site BONAL, acesso em 2017).

Dentre seus clientes estão a NASA, Boeing, Allied Signal, Sandia National Lab, Stewart Warner na área aeroespacial, Giddings & Lewis, Cincinnati Inc, Continental Machine, Komo Machine, Toyoda USA na área de construção de máquinas e ferramentais, GM, Daimler Chrysler, Ford Motor Company, Allison Transmission, CTW brake rims Inc. na área automotiva, além de vários outros clientes em diversas áreas de atuação segundo informa o site.



Figura 11 – Equipamento Meta-Lax. Fabricante Bonal Inc.

Fonte: (Site www.bonal.com , acesso em jan 2017)

2.5.4.2 SRE Stress Relief Engineering – Formula 62

Diferente da Bonal, a SRE Stress Relief Engineering, outro fabricante, utiliza a frequência harmônica em seus tratamentos mecânico sendo o início de suas pesquisas em 1962. A SRE está em todos os Estados Unidos além de 74 países e tem segundo informa o site, milhares de clientes, entre eles a GM, Alcoa Aluminium, Boeing, Ingersoll-Rand Co., Bell Helicopter, Rockwell International, entre várias outras de diversos segmentos.

O tempo é de 15 a 30 minutos por local tratado e o tempo em média para se atingir a frequência de ressonância é de aproximadamente 2 minutos. Quando a frequência de ressonância for alcançada, a peça é posta em vibração por um período de tempo determinado com base no peso e na aplicação.

O tempo de tratamento pode variar de 10 minutos a uma hora ou mais, dependendo do tamanho da peça. Em estruturas muito grandes, longas ou com espaço aberto, pode ser necessário aplicar o FORMULA 62 em vários locais, o que requer mais tempo. As peças podem ser vibradas por períodos de tempo mais longos sem sofrer nenhum dano por fadiga ou perda de resistência à tração.

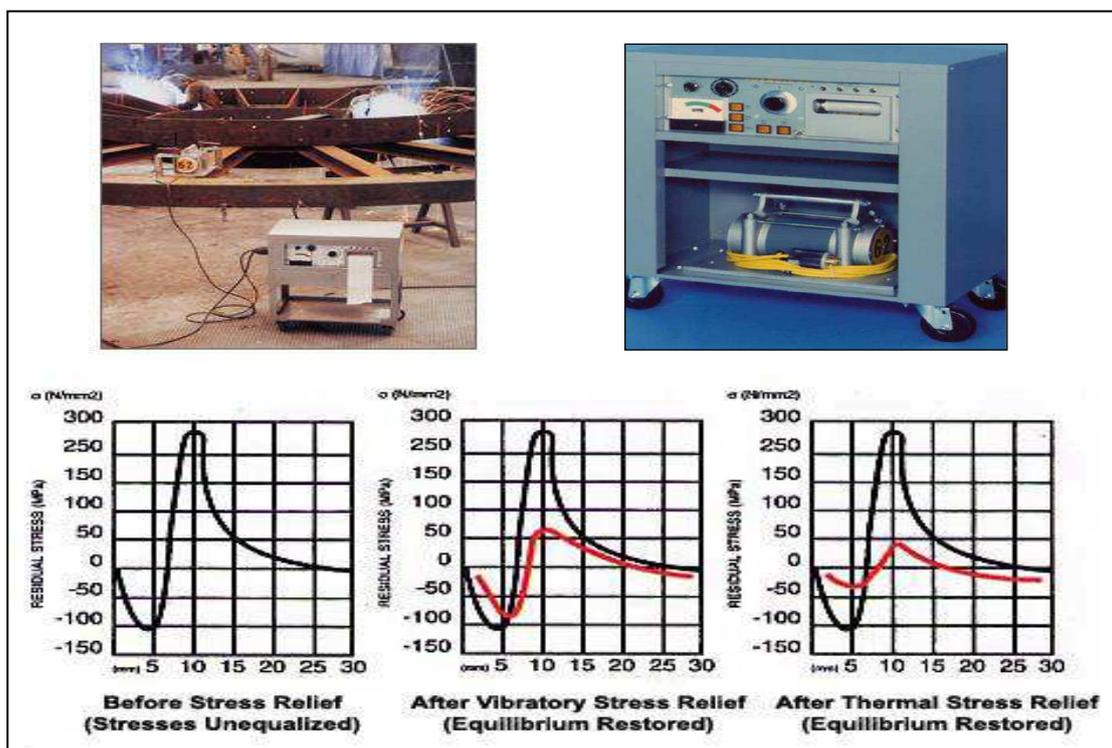


Figura 12 – Equipamento Formula 62 - Empresa Stress Relief Engineering

Fonte: (Site www.formula62.com acesso em jan 2017)

Existem duas regras que devem ser seguidas para todas as aplicações:

- isolar a peça, o melhor possível, de modo que fique livre para vibrar;
 - a unidade do vibrador deve estar conectada diretamente com a peça, a fim de transferir totalmente a energia da vibração apenas para a peça em tratamento.
- (Stress Relief Engineering Company - SRE)

O processo "FORMULA 62" pertencente a SRE pode ser usado em uma ampla faixa de metais ferrosos e não-ferrosos, inclusive aço carbono, aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, manganês e em uma ampla variedade de formatos.

2.5.4.3 Limitações do Processo

O Processo não é eficaz para materiais laminados a frio, extrudados, endurecidos por deformação, trabalhados a frio e endurecidos por precipitação. Objetos muito pequenos em grandes quantidades podem ser tratados termicamente em lotes com muito mais facilidade, a menos que o próprio processo térmico possa causar danos às peças. O processo vibratório é usado unicamente para alívio de tensões residuais em metais e não substitui qualquer outro tipo de tratamento térmico (inclusive tratamento térmico pós-solda).

O processo vibratório não altera as propriedades mecânicas ou metalúrgicas do material. Como a alta temperatura pode danificar os metais, ela deve ser controlada e aplicada até a temperatura crítica, na qual ocorrem as transformações de fases. Essa é a base para a existência de normas, que definem a temperatura necessária para o tratamento sem provocar danos.

O método de vibrações não substitui todas as práticas de alívio de tensão por tratamento térmico, embora seja frequentemente aprovado pelo fabricante.

Em alguns casos, a empresa SRE recomenda o uso dos tratamentos térmicos para aplicações nucleares, vasos de pressão, geração de energia e petroquímica. Nesses casos, os custos gerados pelo processo são superados pelos benefícios. (Stress Relief Engineering Company).

2.6 Vibratory Stress Relief (VSR) e Vibratory Weld Conditioning (VWC)

São conhecidos dois tipos de mecanismos de funcionamento do tratamento por vibração mecânica. Alívio de Tensão por Vibração – VSR (*Vibratory Stress Relief*) e o Condicionamento por Vibração – VWC (*Vibratory Weld Conditioning*). A diferença está na etapa do processo em que se fornece a energia ao componente em forma de vibração.

Pelo processo de VSR, aplica-se energia vibracional após a soldagem, introduzindo assim sub-harmônicos de alta concentração de tensões. Essa energia é usada para redistribuir as tensões residuais, reduzindo assim os seus valores, fazendo com que a curva harmônica mude apresentando um novo comportamento. (BONAL, 2008; SHANKAR, 1982).

Pode-se relacionar o processo VSR ao alívio de tensão por tratamento térmico, uma vez que ambos induzem movimento acelerado interno no metal para causar o alívio de tensões. Também pode ser cabível comparar ao "envelhecimento natural" em que ambos não causam efeitos colaterais do tipo: escala de calor, amolecimento, ou redução das propriedades mecânicas. Uma vantagem é que o processo VSR geralmente dura de 30 minutos a 2 horas para aplicação e não causa distorção. Este processo é aplicado em materiais acabados e prontos, geralmente em peças que foram reparadas, componentes de grande porte (SHANKAR, 1982).

O condicionamento de solda por meio de vibrações sub-harmônicas (VWC) é a aplicação do mesmo processo de alívio de tensões (VSR), executado simultaneamente com o processo de soldagem. Primeiramente é feita a análise da curva de ressonância da peça a ser soldada. Descobre-se a frequência ideal para aliviar as tensões e esta é aplicada durante a soldagem. Desse modo, as tensões térmicas são eliminadas durante a solidificação da solda.

Outro benefício evidenciado é a possibilidade do aumento da corrente de soldagem e, conseqüentemente, o aumento da velocidade de solda, permitindo uma penetração maior. Metalurgicamente, o condicionamento produz uma solda com estrutura de grãos mais uniforme, com acabamento mais fino, melhorando assim as propriedades mecânicas e aumentando a resistência contra fadiga (HEBEL, 1989).

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Para melhor compreensão do tema, procurou-se fazer uma pesquisa recorrendo à teoria oriunda da literatura disponível e aos trabalhos publicados de outros pesquisadores.

Desta forma procurou-se abranger as várias áreas de atuação da tecnologia do alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas e suas principais aplicações e restrições.

Dentre as normas e código de fabricação, investigou-se as principais, no intuito de se conhecer e verificar parâmetros do processo e responsabilidades do engenheiro de soldagem.

3.1 Revisão da literatura

A revisão da literatura foi feita com base nos trabalhos mais recentes de pesquisadores nacionais e internacionais, de modo a se aproximar das novidades da tecnologia do alívio de tensões empregado ao redor do mundo.

Foi realizada uma revisão dos trabalhos publicados onde o tratamento mecânico por vibração foi um dos métodos usados para o alívio de tensões residuais. Foi respeitada a opinião e metodologia de pesquisa dos pesquisadores e uma apresentação dos resultados será apresentada ao longo desta monografia.

4. NORMAS DE FABRICAÇÃO E ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS

Os processos de fabricação inevitavelmente deixam tensões residuais nos materiais trabalhados e dependendo da criticidade da utilização, alguns deles necessitam de tratamentos que melhorem suas propriedades mecânicas para seus respectivos fins.

Algumas normas e códigos de fabricação foram analisados, dentre eles:

AWS Welding Handbook - 9ª edição Volume.1 (2001), AWS D1.1 (2010), AWS D1.6 (2007), AWS D14 e D14.1, AWS D14.4M (2012) ,ASME II (2013), ASME VIII partes 1 (2013) e 2 (2013), ASME B31.1 (2010) e EN1993 1-1 (2005).

Pode se dizer que na grande maioria das normas e códigos o alívio de tensões é especificado através dos tratamentos térmicos sendo parametrizados utilizando-se a composição química dos elementos, a espessura, tipos de material, carbono equivalente entre outras variáveis. Os valores são apresentados em textos, tabelas e gráficos e são usados de referência para se criar um procedimento para o tratamento térmico que controlará principalmente a temperatura e o tempo de exposição a ela.

Poucas informações sobre o alívio das tensões residuais tratadas mecanicamente são encontradas nas normas e códigos de fabricação. Na presente pesquisa foi localizado nas normas AWS D14 / D14.1 e D14.4 M, um tópico referente a VSR apresentando um pequeno conteúdo sobre esta técnica.

Não há nada proibitivo nas normas em relação ao alívio de tensões por vibração como procedimento. As normas AWS D14 e D14.1 (item 7) citam que esta técnica pode ser extremamente útil para a garantia da estabilidade dimensional durante o processo de fabricação e só é validado quando da aprovação pelo engenheiro responsável. Quando previstos em contrato, os procedimentos de alívio por vibração deverão seguir as recomendações do fabricante do equipamento sendo registrados e monitorados os parâmetros. A norma AWS D1.6 / D1.6M (2007) diz que as tensões podem ser removidas mecanicamente desde que especificada e aprovada pelo engenheiro responsável.

5. RESULTADOS PESQUISADOS

De acordo com a literatura disponível, a maioria dos trabalhos pesquisados para a elaboração deste trabalho aborda o alívio de tensões residuais por vibração como um método que possibilita vantagens quando comparado aos métodos térmicos, tendo suas limitações, mas que ainda carecem de maiores e mais aprofundadas pesquisas para consolidar a aceitação.

Devido a essa falta de consolidação do processo de alívio das tensões residuais, através da vibração ressonante ou sub-ressonantes, as principais normas não determinam parâmetros do processo assim como há nos processos térmicos de alívio das tensões residuais.

No estudo de Crisi e Mendonça (2004) foi feita uma comparação entre os métodos mecânicos e térmicos de alívio de tensões. Os resultados mostraram que nas amostras tratadas termicamente houve uma redução na resistência à tração e aumento no alongamento. A amostra tratada mecanicamente por vibração não sofreu alteração nestas propriedades, e também a energia no teste de impacto para os dois casos praticamente foram as mesmas. A dureza resultante para os tratamentos térmicos e mecânicos foram próximas, concluindo assim que houve a redução das tensões residuais.

Hussein et. al. (2011) utilizou a VSR em corpos de prova soldados e os comparou com corpos de prova soldados sem tratamento mecânico.

Os corpos de prova que foram tratados por vibração não apresentaram trincas em nenhuma das amostras e as amostras não tratadas apresentaram trincas com 3 mm de comprimento.

Qinghua, Ligong, Chunzhen (2007), utilizaram o processo à arco submerso (SAW) chegando as seguintes conclusões: Reduções significativas na deformação de solda e na tensão residual foram obtidas pela aplicação de vibração à solda. O limite de elasticidade e a resistência à tração da junta soldada não são muito diferentes na condição sob vibração e sem vibração. A estrutura microscópica mudou dramaticamente após vibração (V-SAW). A energia vibratória quebra o crescente dendrítico do grão na solda e na ZTA e fragmenta a microestrutura Widmanstatten.

Xu, Chen, Ni (2006) analisaram os efeitos da VWC (vibratory weld conditioning) nas tensões residuais de tubos soldados. VWC pode reduzir as tensões residuais superficiais externas e as tensões residuais máximas; Mas a VWC tem apenas um pequeno efeito nas tensões axiais residuais na superfície exterior.

As tensões residuais são inferiores à resistência à elasticidade quando se utiliza VWC, o que melhora a segurança das estruturas soldadas. Muitos fabricantes atuais eliminaram o alívio do estresse térmico em grandes partes, seja por razões econômicas e / ou de desempenho. Esses fabricantes abrangem uma multidão de indústrias, incluindo máquinas especializadas, aeronaves, vagões, rolos e transportadores e equipamentos de mineração, (BAQAR, JAIN, KHANNA 2014).

Outro instituto pesquisador desta tecnologia do emprego das vibrações como alívio de tensões residuais se localiza na Polônia.

O instituto de Soldagem Instytut Spawalnictwa a fim de aprofundar os estudos sobre o tratamento mecânico de alívio de tensões por vibração, realizou e publicou várias pesquisas onde afirma que a eficácia do tratamento se refere apenas a estabilidade dimensional e não inclui a redução do nível de tensão residual. Em alguns trabalhos, foram realizados experimentos onde são feitas medições extensométricas durante o processo vibratório.

Segundo Sedek, Weglowsky (2012), o fenômeno de ressonância não aumentou significativamente as amplitudes de tensões e leves deformações foram detectadas após o procedimento vibratório.

As peças foram submetidas a cargas variáveis de diferentes amplitudes num experimento onde o processo de envelhecimento natural foi feito por 800 dias (SEDEK, WEGLOWSKY 2012).

Durante este período, através de extensômetros se mediu as deformações nas regiões próximas à solda após os primeiros dias. Depois após semanas e após cada três semanas. Isto foi feito para se aumentar a confiabilidade nos estudos (SEDEK, WEGLOWSKY 2012).

Durante o envelhecimento natural, as peças de teste deformaram espontaneamente devido às tensões de soldagem. A deformação foi então referida como deformação retardada (SEDEK, WEGLOWSKY 2012).

Sedek *et. al.* (2016) conclui que o processo vibratório deve ser aplicado para se assegurar a estabilidade dimensional onde a mesma for requerida dentro ou não do ciclo produtivo. Conclui também que as reduções de tensões residuais são comparadas ao envelhecimento natural questionando as pesquisas dos fabricantes dos equipamentos.

As tensões induzidas por vibrações aceleram processos de micro relaxamento e transformações de fase à temperatura ambiente e, como resultado, produz tensões retardadas que não estão estudadas nas pesquisas dos fabricantes de equipamentos de vibração (SEDEK, WEGLOWSKY 2012).

Grigoryants *et. al.* (2014) apresenta um estudo do sistema LFVT – Low-frequency vibrational treatment, que em muitos casos, segundo afirma a pesquisa, pode substituir o tratamento térmico especialmente em componentes ou estruturas de grande porte.

O mecanismo de envelhecimento vibracional em zonas localizadas pode ser descrito como: As tensões residuais se formam em sólidos cristalinos como resultado da deformação plástica dos cristais. Para estabilizar o estado de tensão, os componentes recebem um impulso de energia.

As tensões adicionais, formadas neste processo, são somadas às residuais iniciais e, por conseguinte, as mudanças se formam na rede cristalina do material policristalino e são acompanhadas por distribuição de tensões.

O tratamento vibratório resulta num curto período de tempo na formação de um grande número de ciclos de carregamento à potência e frequências dadas e controladas, resultando na rápida estabilização do estado de tensão.

A eficiência do envelhecimento vibracional é determinada pelo grau de deformação plástica do metal, que depende da carga aplicada em vibrações, determinada pela magnitude e área de aplicação da força, gerada pelos efeitos vibratórios, e também pela forma geométrica do componente.

6. CONSIDERAÇÕES

Há basicamente duas visões sobre a eficácia dos processos vibratórios como alívio de tensões residuais. Uma delas, representados pelos fabricantes de sistemas de vibração, afirmam que a redução das tensões residuais é explicada pelas tensões plásticas presentes durante a vibração, particularmente nas condições de ressonância ou muito próximas a ela (ressonantes ou sub-ressonantes).

A outra visão questiona esta redução nos níveis de tensão residual e afirma que o alívio das tensões residuais por vibração em um cordão de solda deve ser usado apenas como um processo que garante a estabilidade dimensional principalmente entre as etapas produtivas.

Na opinião dos pesquisadores do Instytut Spawalnictwa (Instituto de Soldagem), essa discrepância de opiniões não serve para a popularização industrial dos processos vibratórios para alívio de tensões residuais e que na verdade devem ser chamados de processos de vibração para estabilidade dimensional de conjuntos, componentes e estruturas.

Segundo o mesmo instituto, nenhuma das publicações apresentadas pelos fabricantes de equipamento de vibração apresentaram testes complexos combinando a dependência do nível das tensões de soldagem sobre o nível das tensões desenvolvidas por excitações dinâmicas. Estes estudos não apresentam medições confiáveis de esforços de soldagem em vários estados de um objeto, carecendo de uma abordagem mais profunda.

7. CONCLUSÃO

Dentre os estudos e pesquisas, há um consenso quando se compara o tratamento vibracional com o tratamento térmico em relação ao uso de energia e ao tempo de tratamento, sendo o alívio de tensões por vibração o tratamento superior nestes dois quesitos.

Outro ponto de superioridade é a possibilidade de se fazer tratamentos vibracionais em estruturas de grande porte onde não são possíveis se tratar termicamente, fazendo com que o tratamento vibracional seja mais econômico devido a utilização de menor energia e tempo envolvidos no processo e também por uma logística muito mais simples quando comparado com os tratamentos térmicos convencionais.

A divergência entre os estudos apresentados e a quantidade de literatura existente sobre o assunto faz com que os métodos vibracionais para alívio de tensões residuais não sejam recomendados e aceitos pela maioria das normas de fabricação.

Sendo assim, se fazem necessárias ainda mais pesquisas nesta área para consolidação das técnicas e aceitação das mesmas pelas instituições normativas e conseqüentemente pelo mercado.

8. REFERÊNCIAS UTILIZADAS E CONSULTADAS

ALMEIDA, L.F.C.B, **Avaliação da influência da aplicação da vibração mecânica na microestrutura e em características mecânicas de juntas de aço inoxidável martensítico CA6MN soldadas pelo processo FCAW**, dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2015

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS – ASM, **Weld Integrity and Performance**, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS – HANDBOOK: Volume 2, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, Materials Park, Ohio, USA, 1990 (6 th printing: 2000).

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, **Welding Handbook**, 9 ed. Vol. 1, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1 e D1.1M**. Structural Welding Code, 2010.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.6 e D1.6M**. Structural Welding Code 2007.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D14.1/D14.1M**. An American national standard specification for welding of industrial and mil cranes and other material handling equipmen,. 2012.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, **Section II**, 2013.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, **Section VIII**, Rules of Constrution of Pressure Vessels Division 1, 2013.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code, **Section VIII**, Rules of Construction of Pressure Vessels Division 2, 2013.

ASME Boiler and Pressure Vessel Code **B31.3 Process Piping**, 2012.

BAQAR, JAIN, KHANNA, **Vibratory Stress Relief Techniques: A Review of Present Trends and Future Prospects**, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, vol. 4, Issue 11, 2014

BONAL TECHNOLOGIES INC., Disponível em <http://www.bonal.com/>, 2008 - Acesso janeiro de 2017

BONAL TECHNOLOGIES, **META-LAX Vibration Stress Relief**. Disponível em:< <http://www.meta-lax.com/>> - Acesso em janeiro de 2017

CRISI, G. S.; MENDONÇA, D. P. **Alívio de tensões em soldas realizado por tratamento térmico e por vibração: uma comparação entre ambos os métodos**. CONSOLDA Congresso Nacional de Soldagem, ABS. Rio de Janeiro. CONSOLDA, 2004

CRISI, G. S.; MENDONÇA D. P.; Stress relief of welds by heat treatment and Vibration: a comparison between the two methods. **The Library Vibratory Stress Relief**. p. 1 – 8, 2006.

DELGADO Jr. et al, **Experimental study of residual deformations derived from the welding process**, junho 2014.

EQUIPAMENTO FÓRMULA 62. Stress Relief Engineering SRE. Disponível em: <http://www.stressreliefengr.com/>, acesso em janeiro 2017.

EN 1993-1-1 Eurocode 3: **Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**, 2005.

GRIGORYANTS et. al., **Technology of low-frequency vibrational treatment of welded structures in engineering**, Welding International, 2015

HEBEL, T. E. **Heat Treating, Stress relieving**. p 1, 2, 3, 4 set. 1989.

HEBEL, G. A. III; **Vibrational Conditioning of Metals**, Heat Treating Progress Magazine, U.S., Vol. 4, April, 2004.

HUSSEIN A.R., JAIL N.A., TALIB A. R. A., **Improvement of Mechanical Welding Properties by using induced Harmonic Vibrations**, Journal of Applied Sciences, 2011.

JIJIN XU, LIGONG CHEN, CHUNZHEN NI, **Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes**, Institute of Welding, School of Materials Science and Engineering, Shanghai, 2006.

LUH, G. C.; HWANG, R. M.; Evaluating the effectiveness of vibratory stress relief by a modified hole-drilling method. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer-Verlag. Taiwan, n.14, p.815-823, 1998.

MARTINS, C.A.P.; MORILLA, J.C., VILLANI, P.V. et al. **Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Ressonantes**. 2012. Trabalho apresentado no XXXVIII Congresso Nacional de soldagem – ABS Ouro Preto, Minas Gerais.2012.

MARTINS, C.A.P.; **Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Harmônicas – Histórico sobre a Origem desta Tecnologia, sua Introdução no Brasil, Descrição do Processo, Utilização e Aplicação**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós Graduação (Gestão de Negócios – Foco na Qualidade) Universidade Paulista – UNIP Santos, São Paulo.2004.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., **Soldagem - Fundamentos e Tecnologia**, 3ª Edição Atualizada, 2009.

MODENESI, P. J.; **Efeitos Mecânicos do Ciclo Térmico**. 2008. – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008. Disponível em: http://www.demet.ufmg.br/grad/disciplinas/emt019/tensao_residual.pdf. Acesso em janeiro de 2017.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. 2012. – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/metalurgia.pdf> acessado em dezembro 2016.

MACIEL, L.F.C, **Efeitos da Vibração Simultânea nas propriedades Mecânicas de Juntas de Aço ASTM A131 Soldadas pelo processo FCAW**, dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

NETO, A, B, **Alívio de Tensões em tubos a partir da aplicação de vibração mecânica**, dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016

QINGHUA, L.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N.; **Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning**, Institute of Welding, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China, 27 October 2006.

SANTOS, C. H., **Estudo do Alívio das tensões residuais, em peça estampada, pela técnica de vibrações mecânicas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SCOTTI, A, MFAB 3 – **Tensões e Deformações**, LAPROSOLDA, Universidade Federal de Uberlândia, (Apostila do Curso de pós graduação em Engenharia de Soldagem, IW/ABS/UNITAU), 2015.

SEDEK P.: **Vibratory stabilization of welded constructions – experiments and conclusions**. IIW International Conference: Stress relieving heat treatments of welded steel constructions, 6-7.07.1987, Sofia, Bulgaria.

SEDEK P.: **Vibration Treatment – effective method of improving the dimensional stability of welded structures: investigation and practice**. International Conference: Welded structures,.1995, Kiev, Ukraine.

SEDEK, STANISLAW, WEGLOWSKY **Application of mechanical vibration in the machine building technology**, 2012.

SEDEK et al, **Vibratory Stabilisation – Constant Development for Industrial Practice**, 2016.

SHAIKH,S.N, **Vibratory Residual Stress Relieving- A Review**

Department of Mechanical Engineering, M.E.S.College of Engineering, S.P. Pune University, Pune, India), IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 5 th National Conference, RDME 2016.

SHANKAR, S., **Vibratory Stress Relief of Mild Steel Weldments**, A dissertation submitted to the faculty of the Oregon Graduate Center in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy in Materials Science.1982.

SKINNER, R. D. **An investigation Into the Theory Behind Sub-Ressonant Stress Relief – Uma Pesquisa sobre a Teoria de Alivio de tensões por Vibrações Sub-Ressonantes**. p. 10, 1987.