



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

Denis Halisson Franzão

**ESTUDO TEÓRICO DO PROCESSO DE ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÃO  
MECÂNICA**

**GUARATINGUETÁ**

2015



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

Denis Halisson Franzão

Trabalho de graduação apresentado para a UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia – Campus de Guaratinguetá, para a conclusão do curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

**GUARATINGUETÁ**

2015

Franzão, Denis Halisson  
F837e      Estudo teórico do processo de alívio de tensões por vibração mecânica  
/ Denis Halisson Franzão – Guaratinguetá, 2015.  
84 f : il.  
Bibliografia: f. 81-84

Trabalho de Graduação em Engenharia de Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.  
Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

1. Tensões residuais 2. Vibração 3. Fadiga I. Título

CDU 620.172



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Estudo Teórico Do Processo De Alívio De Tensões Por Vibração Mecânica

DENIS HALISSON FRANZÃO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO  
REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE

“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS

Coordenador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. ANGELSO CARVALLI FILHO

Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO

UNESP-FEG

Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIDARÇES  
Unesp-Feg

Dezembro de 2015

## **DADOS CURRICULARES**

### **DENIS HALISSON FRANZÃO**

NASCIMENTO 11.09.1985 – ROLÂNDIA/ PR

FILIAÇÃO Wanderley Franzão

Marilsa Aparecida da Silva Franzão

2000/2002 Escola Técnica Estadual Polivalente de Americana

2007/2015 Curso de Graduação

Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade  
Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

## DEDICATÓRIA

De modo especial aos meus pais Wanderley e Marilsa por quem  
tenho infinda admiração, pelo constante apoio  
e incentivo que sempre me deram ao longo de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder o privilégio de estudar nesta instituição de qualidade, por me proporcionar oportunidades de crescimento pessoal e profissional durante este período e por me dar sempre saúde, esperança e fé, o que nos caminhos diversos me guiou com sabedoria.

Agradeço aos meus pais Wanderley e Marilsa, pelo apoio e incentivo ininterruptos que me deram ao longo de toda minha vida e que em momento algum faltaram durante este período de faculdade.

Agradeço também a todos os amigos conquistados durante estes sete anos de vivência em Guaratinguetá – na faculdade, os de república e aqueles que apesar de não serem parte integrante da república também se tornaram membros desta grande família, com quem por diversas vezes precisei contar com o apoio e também dei auxílio em momentos difíceis ao longo desta caminhada.

Ao meu orientador Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho, pelo empenho e dedicação para elaboração deste trabalho, bem como pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

Não poderia deixar de agradecer, finalmente, a todos aqueles que não foram nominalmente mencionados aqui, mas que fizeram e fazem parte do meu sucesso pela conclusão desta etapa de minha vida.

## **RESUMO**

A tensão residual é consequência de processos mecânicos. Ela, se tratada, diminui a vida a fadiga, gera deformações, aumenta o risco de fratura frágil, entre outras consequências. Para aliviar estas tensões existem métodos como tratamento térmico, *shot peening* e o VSR (*Vibratory Stress Relief*). O método tradicional para aliviar as tensões residuais é o tratamento térmico, tendo uma boa aceitação e comprovada eficácia, em nível acadêmico e industrial. Porém este método possui alguns inconvenientes como a modificação das propriedades mecânicas, um alto consumo energético, tempo necessário e a dificuldade para tratar peças de grande porte. As vibrações mecânicas aparecem, neste contexto, como uma alternativa. Este método necessita de mais estudos para aumentar sua confiabilidade, pois possui vantagens como um menor consumo energético, é possível o tratamento de peças de grande porte e as propriedades mecânicas não sofrem alterações tão bruscas. Este trabalho busca contribuir para isto fazendo um *overview* de vários trabalhos mostrando suas características, objetivos e resultados.

Palavras chave: 1. Tensões residuais 2. Vibração mecânica 3. Tratamento térmico.

## ***ABSTRACT***

*The residual stress is a result of mechanical processes. It, if tractive, decreases the fatigue life, generates deformation, increase the risk of brittle fracture, among other consequences. To relief those tensions there are methods such as heat treatment, shot peening and VSR (Vibratory Stress Relief).The traditional method to relieve the residual stresses is heat treatment, having a good acceptance and proven in academic and industrial level. But this method has some drawbacks like alteration of mechanical properties, a high-energy is required, time required and the difficulty to handle large pieces. The mechanical vibrations show up in this concern as an alternative. This method needs further study to increase his reliability, because it has advantages such as lower energy consumption, it is possible to treat large parts and mechanical properties do not suffer such abrupt changes. This work seeks to contribute to it making an overview of several studies showing its characteristics, goals and results.*

*Keywords: 1. Residual stress 2. Mechanical Vibration 3.Heat treatement*

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tipos de solda por fusão, agrupados de acordo com a fonte de energia. ....	24
Tabela 2- Temperatura de trabalho para realizar o recozimento em algumas matérias. Fonte Chiaverine (1986).....	37
Tabela 3 - Tensões residuais no aço ARBL tratado por vibração mecânica. Fonte BRAGA (2011) .....	62
Tabela 4 - Tensões residuais no aço IF tratados por vibração mecânica. Fonte BRAGA (2011). ..	62
Tabela 5 - Valores de tensão obtidos através da difração de raio-X. Fonte SANTOS (2011). ....	64
Tabela 6 - Tensões residuais nas amostras de 4,15mm. Fonte CHUVAS (2012).....	67
Tabela 7 - Tensões residuais nas amostras de 3,3mm. Fonte CHUVAS (2012).....	68
Tabela 8 – Influência da amplitude de vibração na redução da tensão residual. Fonte HASSAM (2014) .....	75

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função do tempo .....	17
Figura 2 – União que ocorreria caso fosse possível aproximar duas peças metálicas da distância	18
Figura 3 - Desenvolvimento de processos de soldagem em ordem cronológica.....	19
Figura 4 – Esquemático da solda por pressão. ....	19
Figura 5 - Máquina de solda de porcas através de pressão e passagem de corrente elétrica.....	20
Figura 6 - Esquemático da solda por fricção. ....	21
Figura 7 - Esquemático da solda por ultrassom.....	23
Figura 8 - Esquemático da solda por fusão.....	23
Figura 9 - Esquemático da solda TIG.....	25
Figura 10 - Equipamentos usados no processo TIG.....	26
Figura 11 - Esquemático da solda MIG/MAG. ....	27
Figura 12 - Soldagem a Arco Submerso ( <i>Welding - SAW Submerged Arc</i> ).....	28
Figura 13 - Soldagem de arames tubulares.....	30
Figura 14 - Diagrama ferro carbono.....	32
Figura 15 - Estrutura Cristalina da Ferrita.....	33
Figura 16 - Gráfico TT para o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.....	34
Figura 17- Esquemático do processo para ocorrer o recozimento.....	37
Figura 18- Dureza o comportamento dos aços 1045 e 4140 após passarem por dois tratamentos térmicos diferentes, sendo eles o de normalização e o de Têmpera.....	41
Figura 19- Sistema massa mola. ....	44
Figura 20– Microestrutura do metal base. ....	50
Figura 21- Microestrutura do aço IF.....	51
Figura 22 - Microestrutura da zona afetada pelo calor (a) e do cordão de solda(b).....	51
Figura 23- Esquema de superposição das tensões de trabalho com as tensões residuais.....	52
Figura 24- Desenho esquemático do espalhamento das ondas de raios-X.....	54
Figura 25- Coordenadas polares. ....	56
Figura 26- Estado de tensão do material em função do declive da curva $2\theta \times \sin^2\psi$ . ....	57

Figura 27- Esquema simplificado de uma ligação de um extensômetro a uma Ponte de Wheatstone. ....	58
Figura 28- Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo. ....	58
Figura 29- Tensões residuais nas amostrando aço ARBL por vibração: longitudinal (a) e transversal (b). ....	62
Figura 30- Tensões residuais nas amostras do aço IF por vibração: longitudinal (a) e transversal (b). ....	63
Figura 31- Equipamento utilizado para realização do processo de alívio de tensão por vibrações mecânicas.....	64
Figura 32- Tensão residual da peça antes da solda.....	66
Figura 33- Tensão residual da peça depois da solda. ....	66
Figura 34- Tensão residual da peça após o processo de vibração. ....	66
Figura 35- Tensões residuais transversais nas amostras de 4,15mm.....	68
Figura 36- Tensões residuais longitudinais nas amostras de 4,15mm.....	68
Figura 37- Tensões residuais transversais nas amostras de 3,30mm.....	69
Figura 38- Tensões residuais Longitudinais nas amostras de 3,30mm. ....	69
Figura 39- Microestrutura do material antes da solda. ....	70
Figura 40- Tensão residual em razão da distância do cordão de solda com vibração após a soldagem.....	71
Figura 41- Tensões residuais longitudinais da amostra com vibração simultânea a soldagem.....	71
Figura 42- Tensões residuais transversais da amostra com vibração simultânea a soldagem.....	71
Figura 43- Microestrutura dos corpos de prova com vibração pós soldagem, onde os indicares A, B, C, D e E identificam as amostras. ....	72
Figura 44- Microestrutura dos corpos de prova com vibração simultânea, onde os indicares A, B, C, D, E, F e G identificam as amostras. ....	73
Figura 45- Tensões residuais após a indução de flexão plástica com vibração em frequências diferentes. ....	74
Figura 46- Influência do número de ciclos na redução da tensão residual. ....	76
Figura 47- Rápido escaneamento para verificação das frequências de ressonância.....	77
Figura 48- Resultados após o pré-tratamento (em verde) comparados com os resultados do primeiro escaneamento (em vermelho). ....	77

Figura 49- Escaneamento com acelerômetro reposicionado.....	78
Figura 50- Picos de ressonância após o segundo tratamento. ....	79
Figura 51- Base das baias, o produto que necessita se reduzir a tensão residual. ....	80
Figura 52- Rápido escaneamento para verificação das frequências de ressonância.....	80
Figura 53- Comparação das frequências de ressonância.....	81

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	10
<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
2.1- Processos de Soldagem .....	16
<b>2.1.1 - Soldagem por pressão .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2 – Soldagem por fusão .....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.1 - Soldagem TIG (<i>Tungsten Inert Gas</i>).....</b>	<b>24</b>
2.2 - Tratamentos Térmicos.....	30
<b>2.2.1 – Recozimento .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2.2 - Normalização .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2.3 - Têmpera .....</b>	<b>40</b>
<b>2.2.4 - Revenimento .....</b>	<b>41</b>
<b>2.2.5 – TATT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensão) .....</b>	<b>42</b>
2.3 – Vibrações Mecânicas.....	42
<b>2.3.1 – Definições importantes .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.2 – Elementos de um sistema vibratório.....</b>	<b>43</b>
<b>2.3.3 – Análise harmônica .....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.4 – Vibrações livres não amortecidas.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3.5 – Vibração forçada não amortecida.....</b>	<b>46</b>
2.4 Alívio de tensões por vibrações sub-ressonantes. ....	47
<b>2.4.1 - Alívio de tensões por vibrações na soldagem .....</b>	<b>49</b>
2.5 Tensões residuais em metais.....	52
<b>2.5.1 - Tensões Residuais geradas na Conformação Mecânica .....</b>	<b>53</b>
<b>2.5.1. Tensões Residuais geradas na Soldagem.....</b>	<b>53</b>
<b>2.5.3 - Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais .....</b>	<b>54</b>
3 – Estudos de caso .....	59

3.1 – Técnica De Alívio De Tensão Por Vibração: Uma Revisão Das Tendências Atuais E Prospectivas Futuras. BAQAR, JAIN, KHANA(2014) .....	59
3.2 – A Vibração como Elemento de Alívio de Tensões Residuais em Cordões de Solda BRAGA (2011) .....	61
3.3 - Estudo Do Alívio Das Tensões Residuais, Em Peça Estampada, Pela Técnica De Vibrações Mecânicas. SANTOS (2011).....	63
3.4 – Redução Da Tensão Residual Por Vibração Em Uma Placa De Aço Carbono. WEISS (1976) .....	65
3.5 - Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de Alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas Soldadas a plasma. CHUVAS (2012).....	67
3.6 – O Efeito Da Vibração Na Microestrutura E Distribuição Da Tensão Residual Em Uma Junta Soldada. WADELL E WALKER (2001) .....	69
3.7 – Alívio De Tensões Por Vibração: Um Estudo Fundamental De Sua Efetividade. DAWSON e MOFFAT(1980) .....	73
3.8 – Fundamento Do Alívio De Tensão Por Vibração. HASSAM(2014) .....	74
3.9 – Rose Corporation (Klauba 2014).....	76
3.10 - M H EBY Manufacturing (KLAUBA 2014) .....	79
4 – Comentários e discussões.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

## 1 – INTRODUÇÃO

As tensões residuais são inerentes dos processos mecânicos como fundição, usinagem, laminação, soldagem, estampagem e muitos outros. Na maioria dos casos este fato tem consequências como:

- Diminuição da vida a fadiga;
- Aumento do risco de fratura frágil;
- Deformações plásticas.

Em alguns casos, estas deformações podem ultrapassar a tolerância fazendo com que as peças tenham que ser retrabalhadas ou até mesmo sucateadas. Com isto tem-se um custo maior e uma efetividade menor.

Macherauch (1977) definiu tensões residuais como tensões autoequilibradas existentes nos materiais, em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo.

Segundo Chuvas (2012) os efeitos negativos das tensões residuais trativas ocorrem, pois elas somam-se as tensões de serviço, ou seja, são somadas as tensões residuais e as tensões provenientes de carregamentos. Outro detalhe citado por Macherauch (1977) é que as tensões de compressão são benéficas, pois inibem a nucleação e a propagação de trincas.

Através da leitura de Chuvas (2012) pode-se entender que após o aquecimento, a zona afetada pelo calor resfria-se de forma não uniforme, o que ocasiona o aparecimento das tensões residuais. O processo é realizado em temperaturas nas quais o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do metal tornam-se muito pequenos, facilitando o escoamento do metal que tende a se expandir com as altas temperaturas.

Macherauch (1977) diz que processos de conformação mecânica como laminação, dobramentos, extrusão, têm como principal mecanismo de geração de tensões residuais a heterogeneidade das deformações plásticas entre as várias regiões dos componentes, por exemplo, suas regiões centrais e superficiais.

Também é possível observar em Macherauch (1977) que existem outros processos que podem gerar tensões residuais, dentre eles estão a têmpera, fundição e nitretação.

Existem métodos para diminuição das tensões residuais como tratamento térmico, *shot penning* que consiste em arremessar pequenas esferas que podem ser de cerâmica, por exemplo, para eliminar ou diminuir as tensões trativas e o VSR (*Vibration Stress Relief*) que consiste na

introdução de vibrações próximas da frequência natural dos produtos soldados para redistribuição das tensões residuais.

No Brasil, o processo utilizado na grande maioria dos casos é o tratamento térmico. A proposta deste trabalho é, fazendo uma revisão de trabalhos sobre o assunto, atestar a eficácia do método de vibrações mecânicas mostrando as vantagens e limitações em comparação com o tratamento térmico para alívio das tensões residuais.

Para tanto este trabalho irá contemplar um estudo teórico das tensões residuais, dos processos de soldagem, dos processos de conformação mecânica, dos tratamentos térmicos, das vibrações mecânicas, mostrando como elas funcionam e como podem aliviar tensões residuais. Além disso, estará presente neste trabalho de graduação uma vasta pesquisa de estudos de caso que comprovando a efetividade do VSR.

## 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho de graduação tem como objetivo principal mostrar, através da análise de trabalhos previamente divulgados, como o VSR (*Vibration Stress Relief*) pode e deve ser usado, tanto para redução dos valores críticos das tensões residuais quanto para garantir a estabilidade dimensional.

Os trabalhos estudados contemplam conformação mecânica (deformação plástica e estampagem) e soldagem. Para tanto se fez uma breve revisão da teoria sobre soldagem, tratamentos térmicos, vibrações mecânicas e tensões residuais.

### 2.1- PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem é um processo gerador de tensões residuais, devido à temperatura que o processo exige e o fato do calor estar concentrado na região do cordão de solda, fato que faz com que o resfriamento da peça gere discordâncias e, portanto, tensões residuais (Chuvas,2012).

Fazendo um relato da história da soldagem, existem relatos de peças obtidas por brasagem ou soldagem por forjamento desde tempos remotos. Por exemplo, há um pingente, Persa, de ouro, no Louvre, que é datado de 4000AC, com indicações de fabricação por soldagem (Modenesi, 2012).

A fabricação de armas foi outra utilização da soldagem na idade média. Isto ocorreu devido ao fato do ferro obtido por redução direta, processo de obtenção do ferro na época, ter um teor de carbono muito baixo e por isso não era possível endurecê-lo por têmpera. Na época, um material com alto teor de carbono era muito caro e escasso, tornando viável a utilização da soldagem com este objetivo (Modenesi, 2012).

“A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação de peças metálicas. Processos de soldagem ou processos afins são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, para a aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte. O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Por outro lado, apesar desta simplicidade, não se pode esquecer que a soldagem pode ser muitas vezes

um processo “traumático” para o material, envolvendo, em geral, a aplicação de uma elevada densidade de energia em um pequeno volume do material, o que pode levar a importantes alterações estruturais e de propriedades dentro e próximo da região da solda.” (MODENESI, 2012).

Em se tratando de um processo de tamanha importância na indústria, sempre existirão estudos para melhoria dos processos de soldagem. Cada produto requer um determinado nível de precisão, acabamento, demanda requerida, entre outros quesitos. De acordo com a exigência do projeto, o processo de soldagem adequado será escolhido levando em conta, além dos requisitos de projeto, os custos de maquinário, tipo de mão de obra necessária, velocidade de produção, custo dos insumos necessários, entre outros fatores.

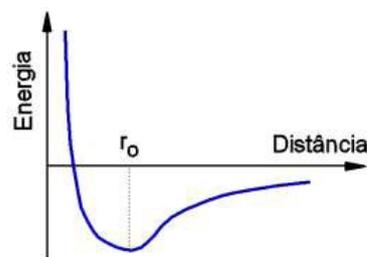
Segundo Brandi (1992) denomina-se soldagem a união de peças metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado deste processo.

Segundo Callister (2000), a soldagem pode ser dividida em dois grandes grupos:

- Soldagem por pressão;
- Soldagem por fusão;

Segundo Modenesi (2012) “De forma simplificada, pode-se considerar que uma peça metálica é formada por um grande número de átomos dispostos em um arranjo espacial característico (estrutura cristalina). Átomos localizados no interior desta estrutura são cercados por um número de vizinhos mais próximos, posicionados a uma distância  $r_0$ , na qual a energia do sistema é mínima.” Conforme pode ser observado na Figura 1.

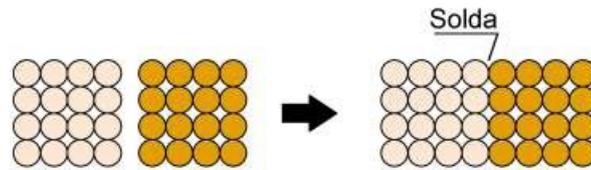
Figura 1 - Variação de energia potencial para um sistema composto de dois átomos em função do tempo



Fonte: (Modenesi, 2012)

Se fosse possível aproximar duas peças metálicas na distância  $r_0$  iriam se unir formando uma única peça, conforme a Figura 2.

Figura 2 – União que ocorreria caso fosse possível aproximar duas peças metálicas da distância

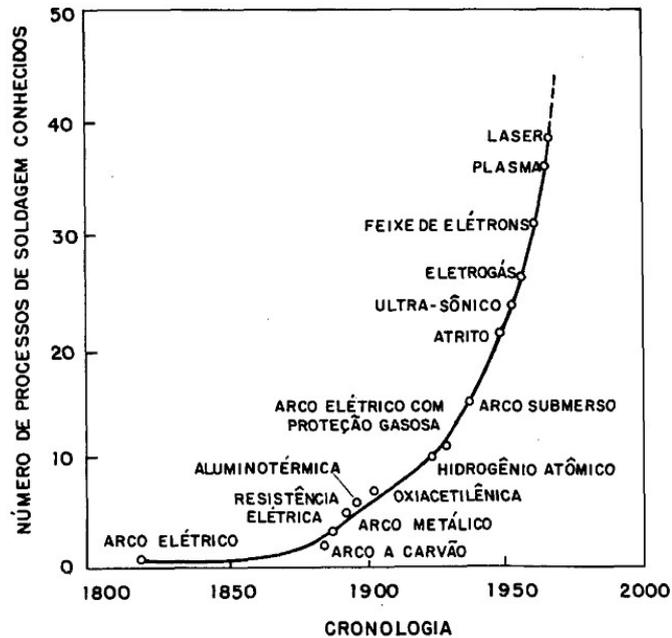


Fonte: (Modenesi, 2012).

“Tal situação é apenas hipotética (salvo condições muito especiais e não aplicáveis à produção industrial), pois a rugosidade das peças não permite a aproximação das peças em tal distância. Portanto os métodos de soldagem se fazem necessários para possibilitar a união de peças metálicas. Mesmo uma superfície comum acabamento cuidadoso apresenta irregularidades da ordem de 50 nm ( $5 \times 10^{-8}$  m) de altura, isto é, cerca de 200 camadas atômicas. Isto impede uma aproximação efetiva das superfícies, o que ocorre apenas em alguns poucos pontos de contato, de modo que o número de ligações formadas é insuficiente para garantir qualquer resistência para a junta.” (MODENESI, 2012).

De acordo com Wainer, Brandi e Mello (1992) a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos pode ser observada na Figura 3, Quase todas estas técnicas são aplicáveis nos dias atuais, de acordo com o investimento que se planeja fazer e com os requisitos do projeto. Além destes métodos existem inúmeros outros, vários destes métodos serão mais bem explicados neste trabalho.

Figura 3 - Desenvolvimento de processos de soldagem em ordem cronológica.



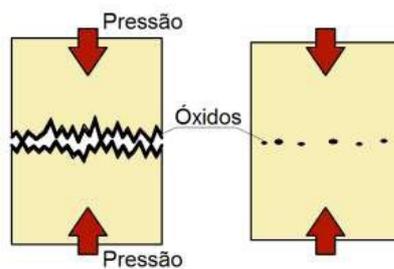
Fonte: Wainer, Brandi e Mello 1992.

### 2.1.1 - Soldagem por pressão

As técnicas de soldagem por pressão consistem na aplicação de elevadas pressões deformando os materiais envolvidos até que as peças se aproximem da distância  $r_0$  e a solda acontece. Em geral calor é aplicado de forma local para facilitar o processo (Callister, 2000).

Esta forma de soldagem é mostrada esquematicamente na Figura 4.

Figura 4 – Esquemático da solda por pressão.



Fonte Modenesi (2012).

Dentre os processos de soldagem por pressão podemos citar:

- Soldagem por resistência elétrica;
- Soldagem por fricção;
- Soldagem por ultrassom;
- Soldagem por explosão;
- Soldagem por difusão;

Algumas particularidades destes processos são importantes de serem citadas:

#### 2.1.1.1 - Soldagem por resistência elétrica

“Nos processos de soldagem por resistência, isto é conseguido pela passagem de uma corrente elétrica elevada em função de uma maior resistência elétrica no contato entre as peças e/ou das conduções de extração de calor na junta.” MODENESI (2012).

Um exemplo muito utilizado na indústria é a solda de porca a projeção, segundo Brandi (1992) no qual as porcas são soldadas a peça através de contato com uma pressão e passagem de corrente elétrica, parâmetros que variam conforme a espessura da peça e o tamanho da porca. Uma máquina de solda a projeção pode ser vista abaixo na Figura 5.

Figura 5 - Máquina de solda de porcas através de pressão e passagem de corrente elétrica.

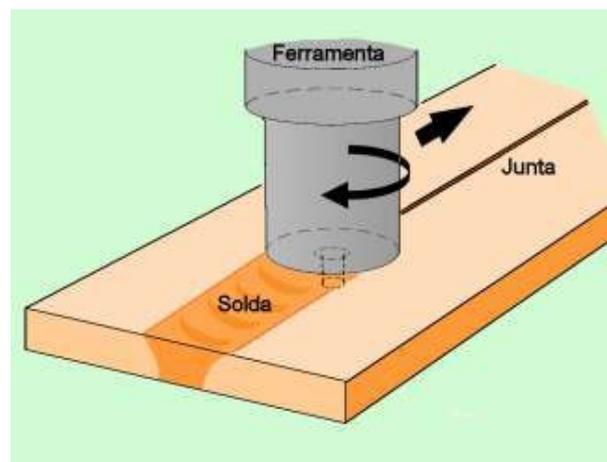


Fonte Logismarket (2013).

### 2.1.1.2 - Soldagem por fricção

Nos processos de soldagem por fricção, o calor é gerado pelo atrito entre as superfícies das peças colocadas em movimento relativo e a deformação final pela aplicação, imediatamente a interrupção do movimento entre as peças, de uma força de compressão. No processo de soldagem por fricção com mistura, o aquecimento e a deformação são conseguidos através de uma ferramenta especial que, em rotação é forçada contra e entre as peças (Brandi, 1992) e pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Esquemático da solda por fricção.



Fonte Modenesi (2012).

### 2.1.1.3 - Soldagem por Ultrassom

Ainda usufruindo da sabedoria de Modenesi (2012) “A soldagem por ultrassom tem como objetivo unir peças por meio de vibrações mecânicas na faixa ultrassônica, associadas à aplicação de pressão”.

De acordo com Ferreira (2014) este tipo de soldagem serve tanto para soldar metais quanto termoplásticos, além de materiais não terrosos, vidro ou mesmo cerâmica; a diferença

entre a soldagem de metais e a de termoplásticos é que no caso dos metais, a soldagem acontece no estado sólido, sem fusão do material de base, enquanto que no caso dos termoplásticos, existe a fusão dos materiais.

Segundo Ferreira (2014) a soldagem por ultrassom produz uma solda limpa, de alta qualidade, não requer material de adição e tem um consumo baixo de energia.

Ainda segundo Ferreira (2014) este processo tem como principais vantagens à possibilidade de soldar chapas pintadas ou oxidadas sem preparação prévia das superfícies, não existindo problemas de deformação, fragilização e formação de compostos intermetálicos de alta resistência nas juntas de metais diferentes (isto ocorre devido à fraca liberação de calor durante o processo), dentre outros. Isto faz com que o tempo e o custo de mão de obra sejam reduzidos.

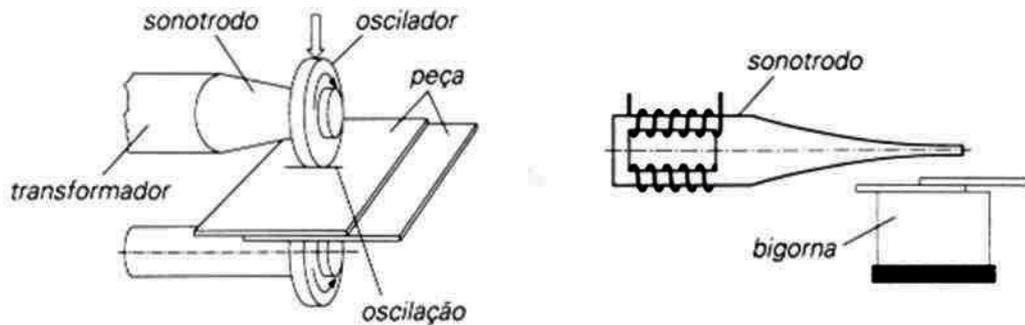
De acordo com Ferreira (2014) na soldagem dos termoplásticos, as vantagens são o elevado ritmo de produção, que pode chegar a 2 000 peças/hora; a possibilidade de soldagens limpas, custo baixo de mão de obra, durabilidade das ligações e ausência de riscos para o operador.

Ainda de acordo com ele, este tipo de soldagem em termoplásticos pode ser uma boa alternativa para processos de fixação mecânica, tais como porcas e parafusos, proporcionando uma maior segurança e um reduzido risco de ação química do adesivo sobre o plástico.

O processo de soldagem por ultrassom é realizado por meio de um gerador de energia elétrica de alta frequência que alimenta transdutores piezelétricos, responsáveis por transformar a energia elétrica em oscilações mecânicas ou vibrações, as quais são transmitidas à peça por meio de um sonotrodo. As vibrações e a força de compressão aplicada à peça provocam um campo de tensões que, por sua vez, dá origem a uma deformação elastoplástica.

Sabe-se que toda superfície apresenta sempre pequenas rugosidades, observáveis em microscópio; durante a soldagem, ocorrem tensões de corte que vão eliminando as rugosidades, até que as superfícies se tocam completamente e então acontece a soldagem. As chapas a soldar são fixadas num suporte chamado bigorna, conforme visto na Figura 7.

Figura 7 - Esquemático da solda por ultrassom.

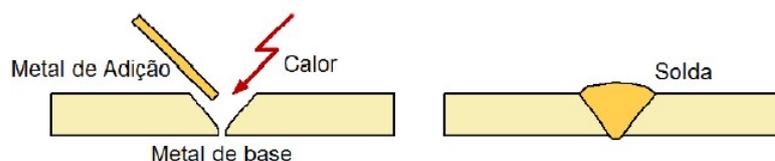


Fonte Infosolda (2014).

### 2.1.2 – Soldagem por fusão

Processos de soldagem por fusão consistem na aplicação localizada de calor na região de união para a sua fusão e do metal de adição (quando este for utilizado), produzindo a ligação pela solidificação do metal fundido e, portanto, a destruição das interfaces conforme Callister (2000). Um esquema de funcionamento deste tipo de solda pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 - Esquemático da solda por fusão.



Fonte Modenesi (2012)

Existe uma infinidade de métodos de solda por fusão, e estes são os processos de união metálica mais utilizados no mundo. Devido à diversidade existente, segundo Modenesi (2012) uma divisão agrupa os processos de acordo com a fonte de energia utilizada para fundir os metais. Isto pode ser observado de acordo com o Quadro 1.

Para um melhor entendimento das aplicações, limitações e os processos em si, alguns destes processos serão mais bem explicados, tais como TIG, GMAW (MIG/MAG) e o processo de arame tubular.

Tabela 1 – Tipos de solda por fusão, agrupados de acordo com a fonte de energia.

PROCESSO	FONTES DE CALOR	TIPO DE CORRENTE E POLARIDADE	AGENTE PROTETOR OU DE CORTE	OUTRAS CARACTERÍSTICAS	APLICAÇÕES
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura $\geq 50$ mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.
Soldagem ao Arco Submerso	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura $\geq 10$ mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão, etc.
Soldagem com Eletrodos Revestidos	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o $\text{CO}_2$	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático	Soldagem de aços carbono com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de chapas
Soldagem MIG/MAG	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + $\text{O}_2$ , Argônio + $\text{CO}_2$ , $\text{CO}_2$	Automática/mecaniz. ou semi-automática. O arame é sólido	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura $\geq 1$ mm. Soldagem de tubos, chapas, etc. Qualquer posição
Soldagem a Plasma	Arco elétrico	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constrito por um bocal	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz
Soldagem TIG	Arco elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aços inox. Passe de raiz de soldas em tubulações
Soldagem por Feixe Eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta Tensão. Peça +	Vácuo ( $\gg 10^{-4}$ mm Hg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto nos casos de evolução de gases ou vaporização excessiva, a partir de 25 mm de espessura. Indústria nuclear e aeroespacial.
Soldagem a Laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Como acima	Como acima. Corte de materiais não metálicos
Soldagem a Gás	Chama oxiacetilênica		Gás ( $\text{CO}$ , $\text{H}_2$ , $\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ )	Manual. Arame adicionado separadamente	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn, Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro

Fonte Modenesi (2012).

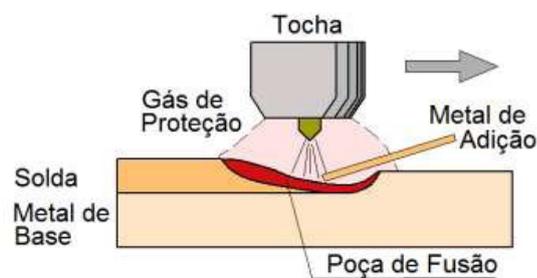
### 2.2.1 - Soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*)

Segundo Modenesi (2012) TIG significa “*tungsten inert gas*”, em português, “Soldagem a Arco com Proteção Gasosa e Eletrodo de Tungstênio” foi assim que ficou conhecido o processo

de soldagem criado no início da década de 1920 e teve seu maior desenvolvimento durante a 2ª Guerra Mundial.

É um processo no qual a coalescência dos metais é obtida através do aquecimento destes por um arco estabelecido entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a junta a ser soldada, Segundo Modenesi (2012). O eletrodo e a zona de solda são protegidos por um gás inerte, normalmente o argônio, ou mistura de gases inertes (Ar e He). Metal de adição pode ser utilizado ou não. Observando a Figura 9, é possível visualizar o funcionamento do esquema.

Figura 9 - Esquemático da solda TIG.



Fonte Fonseca (2004).

Ainda segundo Modenesi (2012) algumas das características deste processo são à solda manual ou mecanizada. No processo manual tem-se o processo de solda a arco que pode ser mais bem controlado.

As suas principais variáveis são: corrente de soldagem, composição, diâmetro e forma do eletrodo, composição do gás de proteção e metal de adição. O equipamento básico do processo consiste de fonte de energia (de CC para a maioria das ligas metálicas), tocha com eletrodo de tungstênio, fonte de gás de proteção (Ar ou He) e um sistema para a abertura do arco (geralmente um ignitor de alta frequência).

Podemos listar as principais vantagens deste processo (também é possível observar os equipamentos necessários na Figura 10) como sendo:

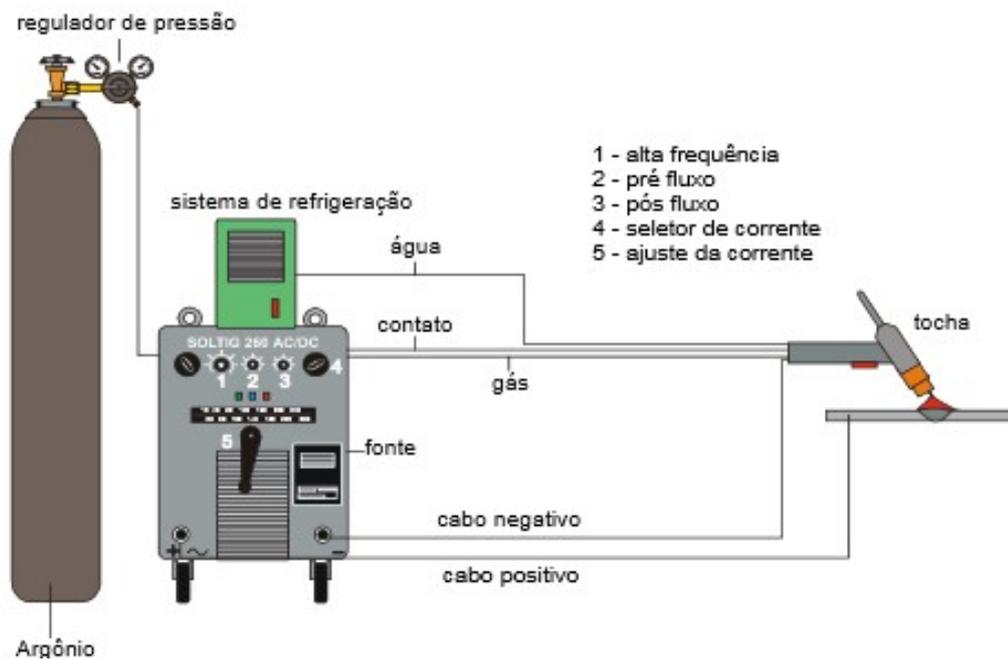
- Excelente controle da poça de fusão;
- Permite soldagem sem o uso de metal de adição;
- Pode ser usado para soldar a maioria dos metais;
- Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento;
- Gera pouco ou nenhum respingo;

- Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem;
  - Permite a soldagem em qualquer posição;
- E tem como principais aplicações:
- Soldagem de precisão ou de elevada qualidade;
  - Soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro;
  - Execução do passe de raiz em tubulações;
  - Soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos;

Apesar de ser um processo muito utilizado na indústria ele possui algumas desvantagens tais como:

- Produtividade relativamente baixa;
- Custo de consumíveis e equipamento é relativamente elevado;

Figura 10 - Equipamentos usados no processo TIG.



Fonte Fonseca (2004).

### 2.1.2.2 - Soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding - GMAW*)

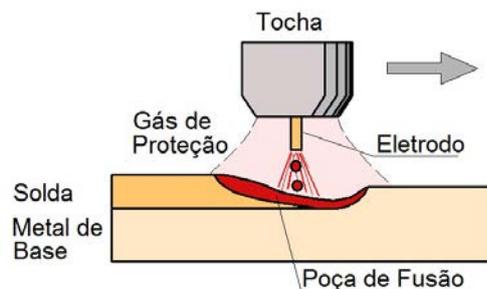
Segundo Modenesi (2012) este é um processo de soldagem a arco que produz a coalescência dos metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça, conforme pode ser visto na Figura 11.

Este processo tem como vantagem a possibilidade de soldagem em qualquer posição, uma alta penetração, não exige tanta habilidade do soldador quanto o processo com eletrodos revestidos (Callister, 2000 e Modenesi, 2012).

Entre as principais desvantagens deste processo estão o custo do equipamento, a dificuldade de se soldar em locais com acesso restrito, a proteção do arco é sensível as correntes de ar e pode gerar uma elevada quantidade de respingos. Este processo é muito utilizado para soldagem de estruturas metálicas, carrocerias, ligas ferrosas e não ferrosas, tubulações, entre outros conforme pode ser entendido em (Callister, 2000).

A proteção do arco e poça de fusão é obtida por um gás ou mistura de gases. Se este gás é inerte, o processo é também chamado de MIG (*Metal Inert Gas*). Se o gás for ativo, o processo é chamado de MAG (*Metal Active Gas*). Em geral o processo é operado de forma semi-automática de modo a obter uma produtividade elevada. A transferência de metal através do arco se dá, basicamente, por três mecanismos: aerossol (*spray*), globular e curto-circuito, dependendo de parâmetros operacionais, tais como o nível de corrente, sua polaridade, diâmetro e composição do eletrodo, composição do gás de proteção e comprimento do eletrodo. O equipamento básico para este processo consiste de tocha de soldagem, fonte de energia de corrente constante, fonte de gás e alimentador de arame, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Esquemático da solda MIG/MAG.



Fonte Modenesi (2012).

#### 2.1.2.4 - Soldagem a Arco Submerso (*Submerged Arc Welding - SAW*)

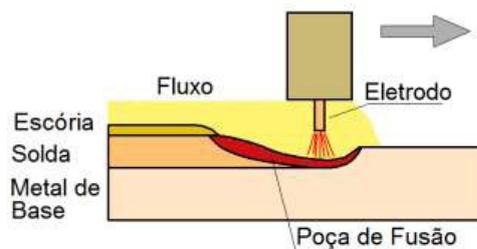
Segundo Modenesi (2012) o processo de soldagem a arco submerso a coalescência dos metais é produzida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e a peça. O arco é protegido por uma camada de material fusível granulado (fluxo) que é colocado sobre a peça enquanto o eletrodo é alimentado continuamente. O fluxo na região próxima ao arco é fundido, protegendo o arco e a poça de fusão e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão. O fluxo fundido ajuda a estabilizar o arco e desempenha uma função purificadora sobre o metal fundido. Como o arco ocorre sob a camada de fluxo, ele não é visível, daí o nome do processo. A Figura 12 é uma ilustração do processo.

Conforme Callister (2000) este processo tem como principais vantagens à alta velocidade de soldagem, uma elevada taxa de deposição, a produção de juntas uniformes e com um bom acabamento superficial, ausência de respingos e fumos, como o arco não é visível ela dispensa proteção contra radiação, é um processo facilmente mecanizado e possui uma produtividade elevada.

Por outro lado ele cita que este processo se restringe às posições de soldagem plana e de filete horizontal, em alguns casos o aporte térmico elevado pode prejudicar as propriedades da junta soldada e é necessária a retirada de escória entre os passes.

Dentre as aplicações para o método, pode ser citada a soldagem de aços carbono de alta e baixa liga, níquel e suas ligas, membros estruturais e tubos de grande diâmetro, fabricação de peças pesadas de aço, recobrimentos, manutenção e reparos.

Figura 12 - Soldagem a Arco Submerso (*Welding - SAW Submerged Arc*)



Fonte Modenesi (2012).

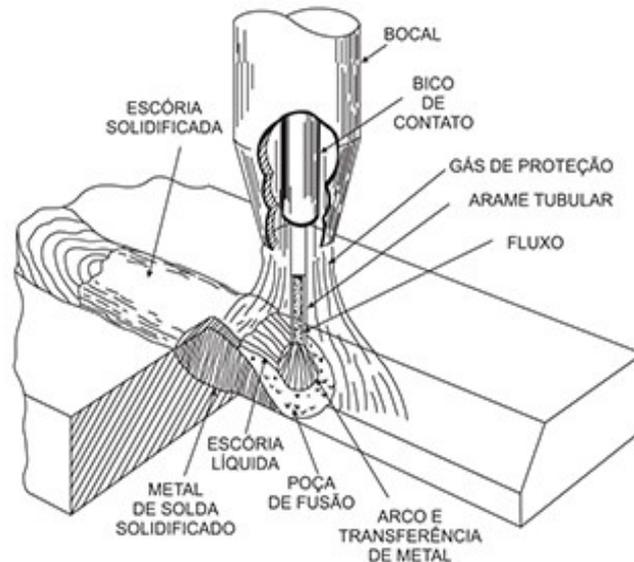
#### 2.1.2.5 - Soldagem com Arame Tubular (*Flux Cored Arc Welding - FCAW*)

Modenesi (2012) escreveu que neste processo a coalescência dos metais é obtida pelo aquecimento destes por um arco entre um eletrodo tubular contínuo e a peça. O eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo que desempenha as funções de estabilizar o arco e ajustar a composição da solda. O processo apresenta duas variações principais: soldagem auto protegida, em que o fluxo interno fornece toda a proteção necessária na região do arco, e soldagem com proteção gasosa, em que a proteção é fornecida por um gás, semelhante ao processo GMAW. Esta proteção gasosa é realizada na maioria das vezes utilizando 100% CO<sub>2</sub> como gás de proteção e em alguns casos utilizando misturas 75%Ar/25% CO<sub>2</sub>. Em ambas as formas, o processo é normalmente operado na forma semi-automática, utilizando basicamente o mesmo equipamento do processo GMAW, conforme site especializado infosolda.

Conforme pode ser entendido de Callister (2000) a soldagem com arame tubular apresenta as vantagens dos outros processos com proteção gasosa, como alta taxa de deposição, grande rendimento que resulta em boa produtividade e qualidade da solda e também as vantagens da soldagem com eletrodo revestido, como alta versatilidade, possibilidade de alterar a composição química do cordão e facilidade para operar no campo. Além disso, a soldagem com arame tubular apresenta melhor estabilização do arco, menor vazão de gás e cordão de melhor aspecto. Ou seja, este é um processo que possui elevada produtividade e eficiência, consegue soldar em todas as posições, tem um custo relativamente baixo, produz juntas soldadas de boa qualidade e aparência. As principais desvantagens deste processo são: o equipamento é relativamente caro, ele pode gerar elevada quantidade de fumos e necessita de limpeza após a soldagem.

Ainda segundo ele dentre suas aplicações pode-se citar a soldagem de aços carbono de alta e baixa liga, soldagem de fabricação e manutenção, soldagem de partes de veículos, e a soldagem na montagem de campo. As altas taxas de deposição e o desenvolvimento de novos consumíveis têm levado as empresas a migrar para este processo. Segmentos como o naval, *offshore*, construção pesada, soldagem de perfis estruturais, *pipeline*, reparo e manutenção estão entre os que mais utilizam soldagem com arames tubulares. Na Figura 13 é possível visualizar um esquema de como funciona este tipo de solda.

Figura 13 - Soldagem de arames tubulares.



Fonte Modenesi (2012).

## 2.2 - TRATAMENTOS TÉRMICOS

Trazendo os tratamentos térmicos para o conceito do trabalho, existem tratamentos térmicos que geram tensões residuais, e tratamentos térmicos que aliviam estas tensões, como o recozimento e o TTAT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensões). Ou seja, dependendo da propriedade mecânica que se deseja melhorar determinado tratamento térmico adequado é escolhido.

“O Tratamento Térmico em metais é conjunto de operações envolvendo aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento sob condições controladas, com o objetivo de melhorar as suas propriedades ou conferir-lhes características pré – determinadas.” TEIXEIRA (1992)

Conforme pode ser visto em Callister (2000) e em Modenesi (2012) há diversos tipos de Tratamento Térmico, na figura abaixo (Figura 20), está representado os Tratamentos Térmicos mais usados, mas têm-se diversos tipos de Tratamento Térmico associados às operações de soldagem, tais como:

- Recozimento;
- Normalização;
- Têmpera;
- Revenimento;
- Solubilização;
- Alívio de Tensões;
- pré-aquecimento;
- Pós-aquecimento.

Segundo Chiaverine (1986) os tratamentos térmicos podem ter como objetivo modificar as propriedades, principalmente as mecânicas, das ligas ou aliviar as tensões para reestabelecer a estrutura cristalina normal. Dentre os principais tratamentos térmicos pode-se citar a têmpera, o revenimento, o recozimento e a normalização. Os fatores que determinam os tipos de tratamentos térmicos são: temperatura, taxas de aquecimento e resfriamento, tempo de permanência em uma determinada temperatura.

Os tratamentos térmicos que serão citados tem no diagrama de fases uma explicação para o que ocorre em nível molecular, para que o material se torne mais adequado às propriedades mecânicas desejadas segundo Callister (2000).

“O entendimento de diagramas de fases para sistemas de ligas é extremamente importante porque existe uma forte correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas e o desenvolvimento de microestrutura de uma liga está relacionado às características de seu diagrama de fases. Em adição, diagramas de fases fornecem valiosa informação sobre fusão, solidificação, cristalização e outros fenômenos.” (CALLISTER, 2000).

Alguns conceitos importantes a serem definidos para o estudo do diagrama de fases são o conceito de limite de solubilidade, fases e microestrutura.

“Para muitos sistemas de ligas e alguma temperatura específica, existe uma máxima concentração de átomos de soluto que podem se dissolver no solvente para formar uma solução sólida; isto é denominado um limite de solubilidade.” (Fonte CALLISTER 2000).

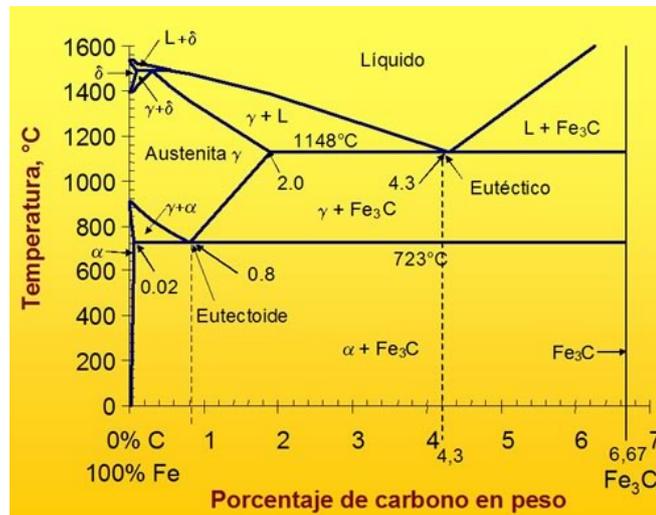
O conceito de fase é também crítico para o entendimento de diagramas de fases. Uma fase pode ser definida como uma porção homogênea de um sistema que tem características químicas e

físicas uniformes. Muitas vezes, as propriedades típicas e, em particular, o comportamento mecânico de um material depende da microestrutura. Microestrutura é assunto para observação microscópica direta, usando microscópios ótico ou eletrônico. Em ligas metálicas, microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, suas proporções e a maneira na qual elas estão distribuídas ou arranjadas.

Segundo Callister (2000) e Modenesi (2012) a microestrutura de uma liga depende de tais variáveis como os elementos de liga presentes, suas concentrações e o tratamento térmico da liga (isto é, a temperatura do tratamento, o tempo de aquecimento até a temperatura do tratamento e a taxa de resfriamento desde a temperatura do tratamento até à temperatura ambiente).”

Para melhor explicar o que acontece durante os tratamentos térmicos, serão utilizadas como exemplo as microestruturas presentes nas ligas ferro-carbono como ferrita, austenita, cementita, perlita e martensita.

Figura 14 - Diagrama ferro carbono.



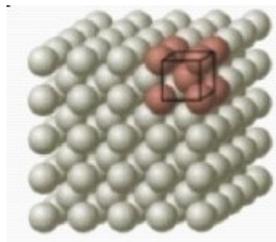
Fonte: [www.textoscientificos.com](http://www.textoscientificos.com).

Segundo Chiaverini (1986) ferrita, também conhecida como  $\alpha$ -ferrita ( $\alpha$ -Fe) ou ferro alfa, é um termo de ciência dos materiais para o ferro puro, com uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado. É esta estrutura cristalina que dá aço e ferro fundido suas propriedades magnéticas, e é o exemplo clássico de um material ferromagnético. .

Ainda segundo Chiaverini (1986) cementita ou carboneto de ferro é um composto químico de fórmula química  $\text{Fe}_3\text{C}$  e estrutura em forma de cristal ortorrômbico. Contém 6,67%

de carbono e 93,33% de ferro. É um material duro e quebradiço e, apesar de ser comumente classificado como cerâmica em sua forma pura, é mais utilizado na metalurgia. É formado diretamente pelo derretimento do ferro fundido branco.

Figura 15 - Estrutura Cristalina da Ferrita.



Fonte <http://pt.slideshare.net/ASMachado/cap1-introducao-itm2011>.

Segundo Modenesi (2012) quando ocorre uma operação de soldagem, surgem nas peças soldadas as tensões residuais, isto porque existe o fenômeno da dilatação térmica, que é causada naturalmente pelo calor gerado durante o processo de soldagem. Esta variação está intimamente ligada à variação de temperatura que se usa no processo. Ela é diretamente proporcional ao calor que a peça recebe na soldagem.

Segundo Chiaverinne (1986) e Modenesi (2012) essa variação de temperatura na peça acaba por provocar um aquecimento diferenciado na peça, causando tensões de contração e expansão na peça. Pelo fato do aquecimento ser desigual, a peça tende a expandir junto ao pico de temperatura e nas suas adjacências esta expansão acaba sendo muito menor.

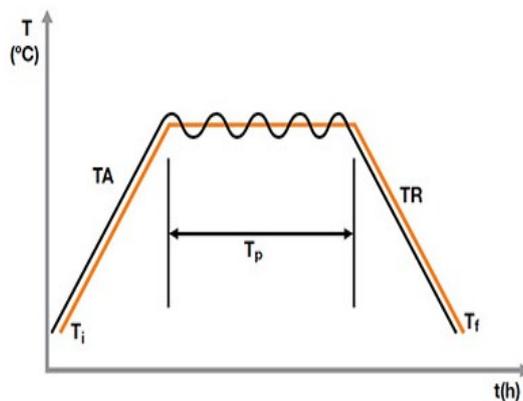
Através da leitura de dois livros sobre o assunto (Callister,2000 e Modenesi, 2012) entende-se que do mesmo modo que, quando a peça de fusão começa a esfriar, o material aquecido passa por um processo de resfriamento e, automaticamente, sua consequente contração gera tensões de tração e compressão na região de interface.

Assim quando a resultante dessas forças de tração e compressão não é nula, surgem, as tensões residuais. A consequência deste fato são as distorções e falhas prematuras na peça.

É neste momento que se faz uso do Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), que tem por finalidade minimizar ou aliviar as tensões da peça, fazendo uma operação de aquecimento na peça após a operação de soldagem.

Segundo Alfaro (1983) o processo deve ser feito através do aquecimento da peça a uma temperatura inferior à temperatura crítica de transformação do material, isto é, antes que haja alguma mudança na fase. Quando a temperatura chega ao seu estado ideal, a peça é mantida aquecida durante um determinado tempo, chamado de “tempo de patamar” ou encharque. Após este tempo de encharque, inicia-se um resfriamento uniforme e controlado da peça, normalmente um resfriamento vagaroso, não superior a 150°C/h. Verifica-se na Figura 20 as principais etapas da operação de alívio de tensão.

Figura 16 - Gráfico TT para o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões.



#### Legenda

TA - Taxa de Aquecimento

TR - Taxa de Resfriamento

T<sub>i</sub> - Temperatura Inicial

T<sub>f</sub> - Temperatura Final

T<sub>p</sub> - Tempo de Patamar

Fonte Alfaro (1983).

As consequências do TTAT são:

- Aumento da ductilidade;
- Diminuição da dureza tanto da zona fundida quanto da zona termicamente afetada;
- Redução de empeno;
- Aumento da resistência à fadiga;
- Aumento da resistência à corrosão sob tensão.

Assim segundo Alfaro (1983) os alívios de tensões são necessários quando o material está sujeito a falhas devido à presença de tensões residuais. Isto acontece com mais frequência nas seguintes condições:

Quando o aço tem um elevado teor de elementos de liga. Nesse caso, para se saber o parâmetro necessário para se avaliar o TTAT é o Carbono Equivalente (C<sub>eq</sub>). Assim a equação um é a mais usada no mercado, segundo o IIW (*International Institute of Welding*) é:

$$C_{eq} = \%C + \%Mn / 6 + (\%Cr + \%Mo + \%V) / 5 + (\%Ni + \%Cu) / 15 \quad (1)$$

O Carbono Equivalente ( $C_{eq}$ ) leva em consideração outros elementos que não seja só o carbono para avaliar a temperabilidade dos aços. Assim quanto maior for o  $C_{eq}$  maior a temperabilidade do material. E consecutivamente quanto maior a temperabilidade do aço, maior é a possibilidade de formação de microestruturas frágeis, como a martensita, na zona fundida e na zona afetada pelo calor. A microestrutura martensítica do aço tem uma alta dureza e baixa ductilidade, aumentando a tendência de fissuração por hidrogênio.

Na soldagem de aços com grandes espessuras as tensões surgem na peça, mas não conseguem provocar deformações. Isso porque, devido a sua espessura ela é muito rígida, fato que provoca uma espécie de travamento, acarretando o surgimento de tensões residuais. Também é necessário levar em conta que, o resfriamento rápido, que acontece pela sua grande espessura, gera uma tendência de formação de microestruturas frágeis.

Segundo Alfaro (1983) peças que são submetidas a carregamentos cíclicos, por causa das tensões de trabalho somadas às tensões residuais, tem sua vida à fadiga reduzida, por exemplo, em eixos automotivos.

Segundo Alfaro (1983) para se definir um Tratamento Térmico de Alívio de Tensões, é necessário seguir o parâmetro da TA (taxa de aquecimento), patamar de Temperatura e a Taxa de Resfriamento (TR). Estes parâmetros são obtidos através das normas vigentes como a ASME seção VIII divisão um. Levando em conta as dimensões da peça que sofrerá o tratamento e a composição química do material.

Já a norma ASME Seção II Parte C tem por base os tratamentos térmicos pós-soldagem em função da classificação AWS do consumível de soldagem. Segundo Alfaro (1983) as propriedades mecânicas do metal depositado junto com o consumível após o tratamento térmico podem ser muito diferentes das propriedades do metal que foi depositado com a solda. Assim, por exemplo, o metal depositado com um eletrodo revestido de classificação E7018 pode apresentar um limite de resistência de 500 MPa na condição como soldado. Mas depois da aplicação de um alívio de tensão, a resistência pode cair para 450 MPa. Desse modo tanto as propriedades mecânicas do metal de solda como as do metal de base devem ser avaliadas. Também se pode usar o exemplo de eletrodos revestidos contendo cromo e molibidênio, tais como o E8018-B2 e E9018-B3, que são classificados pela norma AWS A5. 5 na condição após Tratamento Térmico de Alívio de Tensões. O eletrodo E8018-B2, por exemplo, tem um requisito de limite de

resistência mínimo de 550 MPa após alívio de tensões a 690°C por uma hora. O limite de resistência pode chegar até 825 MPa.

### 2.2.1 – Reozimento

Como o próprio nome já indica, segundo Teixeira (1992), é o processo de aquecimento da peça, até a temperatura onde ocorra a recristalização ou a transformação em uma nova fase.

Segundo Chiaverine (1986) e Modenesi (2012) os principais objetivos do reozimento são o aumento da ductilidade, remover as tensões provenientes de tratamentos mecânicos, regularizar a textura bruta de fusão, eliminar os efeitos causados na estrutura metálica do material causado por qualquer tratamento térmico realizado anteriormente, etc.

Assim Chiaverine (1986) e Modenesi (2012) escreveram que quando se trata de aços, a temperatura deve permanecer em um patamar até um determinado tempo, com a finalidade de homogeneizar a austenita, em sequência deve se fazer um resfriamento lento, sem tirar do forno. Este tratamento térmico produz os seguintes efeitos no material:

- Reduz a dureza do metal;
- Melhora a usinabilidade;
- Remove o encruamento;
- Alivia tensões internas;
- Homogeneiza a microestrutura de peça;

Ainda segundo Chiaverine (1986) após o reozimento a estrutura cristalina resultante é a normal, ou seja, perlita mais cementita para aços hipoeutetóides ou somente perlita para aços eutetóides.

Na Figura 17 verifica-se as faixas de tempos utilizadas em um processo de reozimento.

Figura 17- Esquemático do processo para ocorrer o recozimento.



Fonte Chiaverine (1986)

Conforme pode ser visto na Figura 17 este é um processo lento, para uma diminuição do tempo de espera exigido pelo recozimento pode-se fazer o processo de resfriamento em duas etapas: resfriamento rápido até uma temperatura situada na parte superior do diagrama de transformação isotérmica, e aí esperando o tempo necessário para que o processo cumpra seus objetivos. Isto pode ser chamado de recozimento isotérmico ou cíclico. Para o recozimento ser bem feito torna-se necessário levar em conta os seguintes fatores segundo Callister (2000).

Na Tabela 2 pode-se observar as temperaturas de trabalho para o recozimento de alguns materiais.

Tabela 2- Temperatura de trabalho para realizar o recozimento em algumas matérias. Fonte Chiaverine (1986)

TEMPERATURA DE TRABALHO		
METAL	RECOZIMENTO °C	PONTO DE FUSÃO
Titanio (Ti)	593~732	1800
Platina (Pt)		1769
Aço (Fe+carbono)	746~898,8	1538,8~1648,8
Paládio (Pd)		1552
Ferro (Fe)		1536
Níquel (Ni)	815~926	1455
Cobre (Cu)	371~648	1083
Ouro puro (Au)		1063
Prata pura (Ag)	300	960,5
Latão (Cu + Zn)	426~732	904,4
Bronze (Cu + outras ligas)	426~676	843,3~1037,7
Ouro ligado	648~710	879,4~996
prata Ligada	648,8~650	869,1~917,4
Alumínio	337~354	660,2
Zinco (Zn)		419,4
Chumbo		327
Cádmio		321
Estanho		231,9

- Aquecimento: é preciso que as peças sejam aquecidas quanto possível, uniformemente e que, acima da zona crítica não fiquem partes da peça a temperaturas muito mais altas que outras. O aquecimento ou esfriamento desigual pode ocasionar distorções nas dimensões das peças;
- Temperatura de recozimento: para cada teor de carbono existe uma temperatura mais adequada, que é da ordem de 50 graus acima do limite superior da zona crítica;
- Tempo de permanência a essa temperatura: convém esperar pelo menos alguns minutos no caso de peças pequenas ou delgadas até que sua textura tenha passado integralmente a uma solução sólida homogênea. Nas peças maiores, mais grossas, deve-se esperar ainda que a parte central atinja a temperatura desejada. Recomenda-se para isso, 20 minutos de permanência à temperatura para cada centímetro de espessura da peça.
- Atmosfera do forno: se a atmosfera for oxidante, isto é, tiver tendência para formar muita casca de óxido nas peças, procura-se diminuir o acesso de ar. A mesma providencia se impõe no caso de peças grandes que precisam permanecer muito tempo no forno, ou de peças cuja descarbonetação superficial possa ser um inconveniente. A descarbonetação superficial prejudica seriamente nos casos de aresta de corte, superfícies de estampos, molas, engrenagens, pois as partes que contém menor teor de carbono endurecem menos pela têmpera.
- Esfriamento lento: este se consegue deixando as peças pequenas esfriarem no forno. As peças grandes podem ser imersas na cal em pó, areia bem seca, cinza ou qualquer meio que assegure um esfriamento lento desde o momento em que saem do forno. Esse esfriamento deve tanto mais lento quanto maior for o teor de carbono. Os aços de baixo teor, até cerca de 0,3% podem ser esfriados ao ar tranquilamente; os de teor mais elevados devem ser esfriados no forno, especialmente se forem peças pequenas. Peças volumosas e compactas, embora com alto teor de carbono, podem muitas vezes ficar expostas ao ar tranquilo sem inconvenientes, em virtude da lentidão com que a temperatura cai.

Outro tipo de recozimento é o para alívio de tensões, onde o processo é realizado em temperaturas abaixo da zona crítica. Este procedimento tem como objetivo apenas aliviar as tensões residuais geradas em processos de conformação mecânica, soldagem, corte com chama, etc.

### **2.2.2 - Normalização**

Segundo Modenesi (2012) e Chiaverine (1986) a normalização consiste em aquecer o material até uma temperatura de austenitização e realizar o resfriamento ao ar, e os aços assim tratados dizem-se normalizados. Com a normalização obtém-se comumente uma granulação mais fina do que com o esfriamento no forno.

No estado normalizado, a dureza, bem como os limites, de escoamento e resistência, são um pouco mais elevados do que no estado plenamente recozido, ao passo que o alongamento e a estrição sofrem ligeira diminuição (Modenesi, 2012).

A causa dessas alterações reside no fato de não se processar completamente a separação da ferrita, que deveria separar-se na zona crítica. A austenita transforma-se em uma perlita lamelar muito fina, que contém mais ferrita que a proporção normal (Modenesi, 2012).

A avaliação do teor de carbono pelo aspecto micrográfico torna-se neste caso impraticável, porque a textura se assemelha à de um aço com teor muito mais elevado.

O efeito da normalização é tanto mais intenso, quanto maior for o teor de carbono e o de manganês e quanto menor a espessura da peça.

Corrêa (2013) escreveu um artigo comparando o processo de recozimento com o processo de normalização em aço AISI4140. Através do artigo pode-se observar que a dureza e limite de escoamento menores são encontrados nas amostras recozidas, isto pode ser explicado pelo tempo de resfriamento dos métodos, que no caso da normalização é feita a ar, fato que culmina em um menor crescimento de grãos. Este artigo serve para ilustrar a diferença entre estes processos utilizando uma experiência prática.

### 2.2.3 - Têmpera

Segundo Teixeira (1992), este processo consiste na elevação da temperatura da peça a um determinado patamar até a austenitização do aço, na sequência estabiliza-se a temperatura por um determinado tempo até a homogeneização da austenita e em sequência ocorre um resfriamento de forma abrupta. Este processo objetiva o seguinte:

- Endurecer;
- Aumentar a resistência mecânica;
- Aumentar a resistência ao desgaste;
- Aumentar a resistência ao escoamento.

A têmpera, ao contrário do recozimento e da normalização, objetiva a formação de uma fase chamada martensita, que é dura e frágil. A têmpera caracteriza-se por um resfriamento rápido (alguns segundos) a partir de uma temperatura onde exista 100% de austenita, essa temperatura dependerá da composição do aço. A têmpera é habitualmente realizada utilizando água, salmoura ou óleo. Isso dependerá da composição do aço.

Na Figura 18 pode ser visto em termos de dureza o comportamento dos aços 1045 e 4140 após passarem por dois tratamentos térmicos diferentes, sendo eles o de normalização e o de Tempera.

Figura 18- Dureza o comportamento dos aços 1045 e 4140 após passarem por dois tratamentos térmicos diferentes, sendo eles o de normalização e o de Têmpera.

<p><b>Aço 1045</b>            Fe-(0,43-0,50)%C-(0,60-0,90)%Mn-(0,040máx)%            P-(0,040máx)%S</p>	<p><b>Aço 4140</b>            Fe-(0,38-0,43)%C-(0,75-1,00)%Mn-            (0,035máx)%P-(0,040 máx)%S-(0,20-            0,35)%Si-(0,80-1,10)%Cr-(0,15-0,25)%Mo.</p>
<p>Normalizado            Dureza: 15 HRC</p>  <p>300X</p>	<p>Normalizado            Dureza: 30 HRC</p>  <p>300X</p>
<p>Temperado            Dureza: 55HRC</p>  <p>300X</p>	<p>Temperado            Dureza: 59 HRC</p>  <p>500X</p>

Fonte Teixeira (1992)

#### 2.2.4 - Revenimento

Ainda em Teixeira (1992), este tratamento para aço consiste no processo de aquecer a peça até a temperatura de 450 a 750 C° por um período de 30 minutos a 4 horas. Depois se faz um resfriamento controlado. Este tratamento é indicado para peças que tenham sido produzidas com microestruturas martensíticas. Os objetivos alcançados são os seguintes:

- Aliviar tensões internas;
- Aumentar a tenacidade (diminuir a fragilidade).

Quando se trata de ligas de alumínio, faz-se um envelhecimento com temperaturas que variam entre 100 e 200 C° usando a zona afetada pelo calor para restaurar aumentando a resistência mecânica, que foi modificada pelo processo de soldagem, na região mais dura.

### 2.2.5 – TATT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensão)

É um tratamento muito usado, e segundo Teixeira (1992) ele consiste em aquecer a peça abaixo da temperatura crítica de transformação por um período de tempo, extremamente ligada à proporcionalidade da espessura, seguido de um resfriamento lento, permitido desta forma, reduzir as tensões prejudiciais em um limite mínimo e dentro do aceitável que foi provocado pela operação de soldagem, conformação mecânica ou qualquer processo mecânico gerador de tensões residuais.

## 2.3 – VIBRAÇÕES MECÂNICAS

O método VSR (*Vibratory Stress Relief*) é um dos principais assuntos contidos neste trabalho. Pois se trata de um meio para alívio de tensões que possui muitas vantagens sobre o tratamento tradicional, que é o tratamento térmico.

Apesar disso, por não ter uma bibliografia grande o suficiente, ele não é totalmente reconhecido pelos meios acadêmicos e industriais. Portanto todos os trabalhos relacionados com este assunto dão sua contribuição para a aceitação do método.

Para falar do VSR, uma breve teoria de vibração se faz necessária e com ela alguns conceitos e equações.

Vibrações mecânicas é o estudo dos movimentos oscilatórios. Seus conceitos matemáticos tem associação com fenômenos físicos podendo assim ser experimentados e medidos. Este

assunto esta em uma constante evolução, demandando cada vez mais estudos e gerando uma gama de aplicações muito interessante.

Por definição quando o centro de massa de um corpo oscila ou inverte o seu sentido de movimento diz-se que este corpo está vibrando.

### 2.3.1 – Definições importantes

Para a melhor compreensão do assunto em questão, de acordo com Rao (2008) algumas definições se fazem necessárias:

Vibrações livres – Ocorre quando um corpo vibra, após uma dada condição inicial, apenas com a ação de forças internas.

Vibrações forçadas – Ocorre quando existe ação de forças externas.

Vibrações lineares – O princípio da superposição é válido, pois os coeficientes da equação diferencial que define o movimento são constantes.

Vibrações não lineares – O princípio da superposição não é válido, pois os coeficientes da equação que rege o movimento variam de acordo com algum parâmetro do sistema em estudo.

Frequência natural – É a frequência na qual o corpo responde livremente a uma dada condição inicial.

Grau de liberdade – Número de coordenadas necessárias, suficientes e independentes para descrever o seu movimento.

### 2.3.2 – Elementos de um sistema vibratório

Para se idealizar um sistema consideram-se os seguintes elementos massa, mola e amortecedor.

Considerando-se a segunda lei de Newton, descrita na equação 2 conforme Rao (2008):

$$F(t) = M \cdot \ddot{x} \quad (2)$$

Sendo F a força, M a massa e  $\ddot{x}$  a aceleração atuantes no sistema.

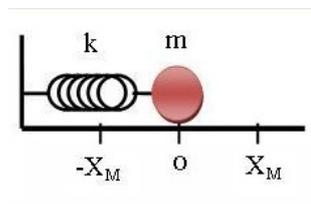
Considerando agora que a mola possui uma constante de elasticidade  $K$ , e considerando a lei de Hooke:

$$F = K \cdot x \quad (3)$$

Sendo  $F$  a força  $K$  a constante de elasticidade da mola e  $x$  o deslocamento ocasionado por aquela força no sistema.

Pode-se ter semelhante ao mostrado na Figura a seguir:

Figura 19- Sistema massa mola.



Fonte Rao (2008).

O amortecedor por sua vez possui o seguinte equacionamento:

$$F = c \cdot \dot{x} \quad (4)$$

Sendo  $F$  a força de amortecimento,  $\dot{x}$  a velocidade e  $c$  o fator de amortecimento.

### 2.3.3 – Análise harmônica

O matemático francês J. Fourier (1768 – 1830) mostrou que pode ser representado por uma série de senos e cossenos harmonicamente representados.

$$x(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) + A_2 \cos(\omega t) + B_2 \sin(\omega t) + A_3 \cos(\omega t) + B_3 \sin(\omega t) + \dots \quad (5)$$

Considerando  $x$  como sendo o deslocamento,  $A_n$  e  $B_n$  constantes,  $\omega$  a velocidade angular e  $t$  o tempo.

Após se trabalhar matematicamente esta série, temos a série de Fourier real:

$$f(t) = a_0/2 + \sum^N (a_n \cos (2\pi nt) + b_n \sen (2\pi nt)) \quad (6)$$

### 2.3.4 – Vibrações livres não amortecidas

Verificando o escrito por RAO (2008), ALMEIDA (1990) e FRANÇA (2006), ocorrem em um sistema onde não há amortecedor como o próprio nome já diz, ou seja, é composto apenas pela massa e pela mola. Portanto a força peso e a força da mola são as únicas que devem ser consideradas no sistema conforme equação sete.

$$M\ddot{x} + Kx = 0 \quad (7)$$

Considerando  $M$  a massa,  $\ddot{x}$  a aceleração,  $K$  constante e  $x$  o deslocamento.

Para a resolução desta equação diferencial, ainda segundo Rao 2008, se faz uso de equações com uma série de senos e cossenos harmonicamente representados e das condições de contorno encontradas:

$$x(t) = A \sen \omega t + B \cos \omega t \quad (8)$$

$$\dot{x}(t) = A\omega \cos \omega t - B\omega \sen \omega t \quad (9)$$

$$\ddot{x}(t) = -A \omega^2 \sen \omega t - B \omega^2 \cos \omega t \quad (10)$$

Considerando que  $A$  e  $B$  são constantes,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\dot{x}$  é a velocidade,  $\ddot{x}$  é a aceleração,  $x$  o deslocamento e  $t$  o tempo.

Levando em conta as equações 7, 8, 9 e 10 e substituindo os seus valores na equação seis teremos:

$$\omega_n = \sqrt{K/M} \quad (11)$$

Sendo que  $\omega_n$  é a frequência natural do sistema,  $M$  é a massa e  $K$  uma constante.

### 2.3.5 – Vibração forçada não amortecida

De acordo com França (2006) a vibração livre não amortecida, não há amortecedor. Porém existe uma força externa agindo no sistema fazendo com que suas equações de movimento, velocidade e aceleração tenham uma nova descrição como pode ser visto em Almeida (1990).

Para exemplificar isto, Rao (2008) destaca um caso particular onde existe uma força harmônica excitando o sistema massa mola.

$$\sum F = M\ddot{x} \quad (12)$$

$$F_0 \text{ sen}\omega t - Kx = M\ddot{x} \quad (13)$$

Considerando que  $F_0$  é a força de excitação,  $K$  é uma constante,  $M$  é massa,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\ddot{x}$  é a aceleração e  $t$  o tempo.

E de forma geral temos a seguinte solução:

$$x(t) = \underbrace{A \text{ sen}\omega t + B \text{ cos}\omega t}_{\text{Solução da equação Homogênea}} + \underbrace{K \text{ sen}\omega t}_{\text{Solução Particular}} \quad (14)$$

Considerando que  $K$ ,  $A$  e  $B$  são constantes,  $\omega$  é a velocidade angular,  $x$  o deslocamento e  $t$  o tempo.

Como é observado na equação, os dois primeiros termos assemelham-se ao caso de vibração livre não amortecida e o terceiro termo representa o caso particular possuindo assim uma frequência de vibração relativa à força externa segundo Rao (2008). Permanecendo este regime podemos escrever as seguintes equações:

$$x(t) = X \text{ sen}\omega t \quad (15)$$

$$\dot{x}(t) = X \omega \text{ cos}\omega t \quad (16)$$

$$\ddot{x}(t) = -X\omega^2 \text{ sen}\omega t \quad (17)$$

Considerando que  $X$  é a amplitude,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\dot{x}$  é a velocidade,  $\ddot{x}$  é a aceleração,  $x$  o deslocamento e  $t$  o tempo.

Após análise das equações 15,16 e 17 combinadas com as equações 13 e 14 tem-se:

$$x(t) = ((F_0 / M) \text{ sem } (\omega t)) / (\omega_n^2 - \omega^2) \quad (18)$$

Onde  $x$  é o deslocamento,  $F_0$  é à força de excitação,  $M$  é a massa,  $\omega$  é a velocidade angular,  $\omega_n$  é a frequência natural e  $t$  o tempo.

E a sua amplitude será:

$$x(t) = ((F_0 / M) \text{ sen } (\omega t)) / (\omega_n^2 - \omega^2) \quad (19)$$

Onde  $X$  é a amplitude,  $F_0$  é à força de excitação,  $M$  é a massa,  $\omega$  é a velocidade angular e  $\omega_n$  é a frequência natural. Como pode ser observado na equação, quando o quadrado da velocidade angular se aproxima do quadrado da frequência natural do sistema a amplitude tende a infinito, causando o colapso do sistema. Tal fenômeno é chamado de ressonância.

## 2.4 ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÕES SUB-RESSONANTES.

Um dos modos de se resolver parte do problema das tensões residuais é a utilização da vibração mecânica que obtém um resultado satisfatório e comprovada economia de energia, conforme visto nos trabalhos de Hassan (2014); Santos (2011); Braga (2011); entre outros que serão vistos no próximo capítulo.

Essa tecnologia é chamada de VSR (*Vibratory Stress Relief*), que vem a ser uma vibração mecânica que se origina de um excêntrico acoplado a um motor elétrico de pequeno porte, que reduz significativamente as tensões residuais oriundas de variações de temperatura, conformação, fadiga ou usinagem dos materiais, segundo Klauba (2014). O resultado desta prática já é comprovado no Brasil, embora sua credibilidade nos meios industriais e acadêmicos ainda é questionada, este fato ocorre porque as instituições normativas ainda não incluíram esta nova tecnologia, conforme citado por Santos (2011).

Segundo Skinner (1987), o tratamento por Vibração Sub Harmônica consiste na indução de movimentos acelerado das moléculas de um material com o intuito de remover tensões internas. Ela é semelhante ao processo de “envelhecimento ou recuperação natural”, pois em ambos os casos os efeitos negativos do uso do calor ocorrem, por exemplo: a escamação, a perda de dureza ou redução das propriedades mecânicas.

O estudo mais profundo praticado sob a Vibração Sub Harmônica iniciou-se com Richard Skinner, com um artigo em 1987, onde ele abordava detalhadamente cada curva de ressonância e como a dissipação da energia ocorre em função da frequência aplicada, considerando como energia dissipada as tensões internas contidas na peça que pode ser removida.

Para Skinner (1987), na maioria das vezes o tratamento térmico de alívio de tensão gera mudanças nas propriedades mecânicas, nas dimensões e na estrutura cristalina dos metais, que estão sendo tratados. Já o processo de Alívio de tensões por Vibração Sub-Harmônica é eficaz, no tocante a esta remoção de tensões internas dos materiais sem que sejam afetadas suas características físico-químicas, o que normalmente ocorre em tratamentos convencionais.

Segundo Crisi; Mendonça (2004) os materiais que podem ser tratados com o processo de Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Harmônica são os seguintes:

- Aços de baixo teor de Carbono, laminados a quente como o ABNT 1018, ABNT 1020, ASTM A 36, ABNT 8620;
- Aços de médio e alto teor de Carbono, como o ABNT 1045, ABNT 1060, ABNT 4140, ABNT 4340;
- Aços-ferramenta, como os da série VW da Villares;
- Ligas de alumínio das séries 356, 2000, 5000 e 6000;
- Aços inoxidáveis como os ABNT 304, ABNT 316, ABNT 410 e ABNT 416;
- Ferros fundidos cinzentos, brancos e nodulares;
- Metais especiais como Au, Ag, Ti, Mg, Inconel, Monel, entre outros, com exceção do Cu e suas ligas;
- Peças com revestimentos endurecidos, forjados e fundidos em geral.

Fazendo uma comparação com o tratamento térmico, segundo Crisi; Mendonça (2004) o processo de Alívio de tensões por Vibração Sub-Harmônica tem as seguintes vantagens:

- Não ocorrem distorções por causa do tratamento;
- O custo do processo 90% menor;
- O tempo do processo 98% menor;
- O tempo de usinagem após tratamento 41% menor;
- O aumento da vida útil em relação à fadiga, 200% maior;

- A ocorrência de distorções 84% menor;
- O aparecimento de trincas de soldagem 95% menor;
- A necessidade de pré-aquecimento antes da soldagem 66% menor;
- O menor nível de porosidades em soldas condicionadas;
- O resultado comprovado na prática.

Segundo Skinner (1987), o processo de Alívio de tensões por Vibração Sub-Harmônica é limitado quando se trata do material cobre. Por razões desconhecidas por ele. Em outras matérias os resultados obtidos são considerados um sucesso.

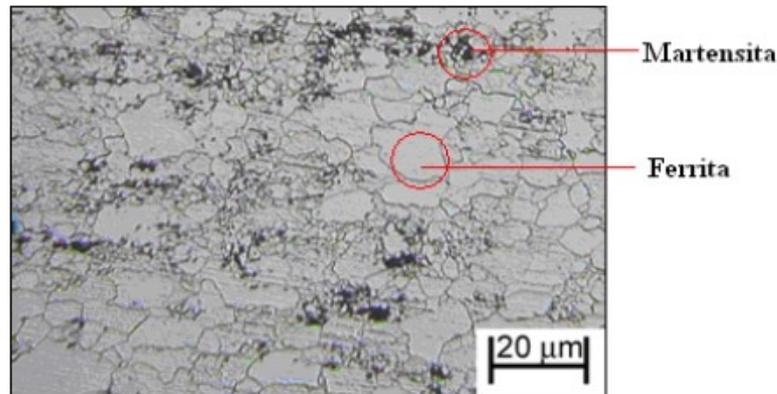
#### **2.4.1 - Alívio de tensões por vibrações na soldagem**

Segundo Macherauch & Wohlfahrt (1977) a presença de tensões residuais, que é um dos grandes problemas na indústria nos processos de fabricação da indústria metal mecânico, é intrínseco nos processos de soldagem (também esta presente na conformação mecânica, usinagem, têmpera, entre outros) levando em conta a execução do cordão de solda, a geometria da junta, o número de passes, composição química dos metais de base e de adição e outros fatores naturais do processo de soldagem.

Dessa forma, o alívio das tensões residuais é necessário para melhorar fatores como a vida a fadiga, por exemplo. Existem vários métodos de tratamento, entre eles o tratamento de vibração mecânica como uma alternativa aos tratamentos térmicos, que tem sido o escolhido na maioria dos casos. O tratamento por vibração mecânica é uma alternativa pelos motivos mais simples que são: custo inferior, menor tempo de aplicação, possibilidade de tratar peças acabadas, entre outros fatores.

Segundo Cindra (2000) a análise feita em aço ARBL mostrou ilhas de martensita dispersas em uma matriz de ferrítica em sua composição na Figura 20.

Figura 20– Microestrutura do metal base.



Fonte CINDRA (2000)

Assim quando se observa a Zona Termicamente Afetada (ZTA), é bom lembrar que a zona afetada pelo calor é uma região afetada pela solda, que ficou de fora do processo de fundição durante o processo de soldagem, ou de operação de corte. Ela é muito significativo quando o calor da solda e o processo de resfriamento, que vem logo após a solda são grandes. Sua magnitude está diretamente ligada ao material base, isto é, o material de enchimento da solda e a quantidade e concentração de calor no processo de soldagem. Assim uma difusividade baixa, provoca uma zona de resfriamento mais lenta provocando uma zona afetada pelo calor maior. A solda a laser gera uma área menor de concentração, limitando o calor e assim resultando em uma pequena zona afetada pelo calor. É bom lembrar, que como já citado anteriormente, o que gera as tensões residuais é o aquecimento e posterior resfriamento de forma não uniforme, por isso quanto menor a zona afetada pelo calor, menores serão as tensões residuais.

Ainda segundo Cindra (2000) um material a ser destacado apresenta a microestrutura do metal com base de aço IF, que são aços que possuem baixos percentuais de elementos intersticiais além de apresentarem uma boa plasticidade, o que o faz ser usado em aplicações de conformação e estampagem. Este metal possuiu características de grãos de ferrita, como se mostra na Figura 21.

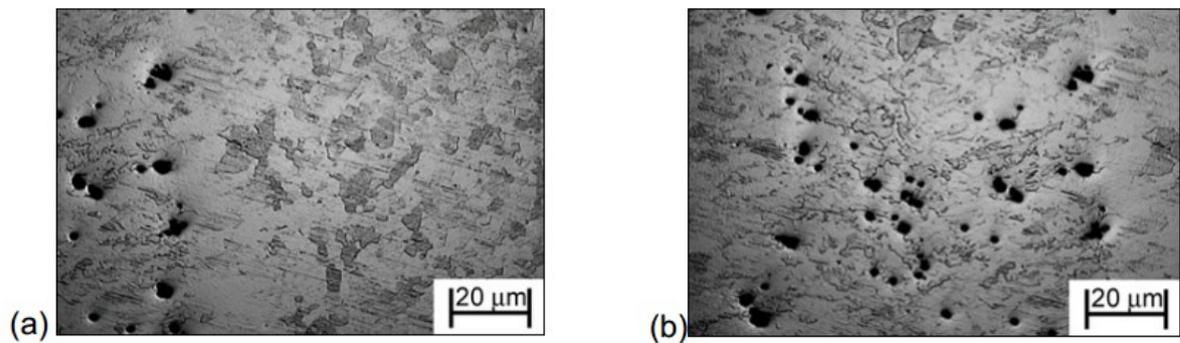
Figura 21- Microestrutura do aço IF.



Fonte CINDRA (2000)

Como pode ser observado na Figura 21, não são encontradas colônias de perlita na microestrutura, o que demonstra o baixo teor de carbono da liga.

Figura 22 - Microestrutura da zona afetada pelo calor (a) e do cordão de solda(b).



Fonte CINDRA (2000)

Já na Figura 22, segundo Cindra (2000), é possível notar uma faixa muito estreita com crescimento de grão ferrítico da microestrutura, No metal de solda tinha micropites na microestrutura isto porque pode ter havido uma presença de micropites pelo fato da inclusão de zinco (aço galvanizado) ou da sensibilidade ao material ao ataque usado (nital 2%) para revelar a microestrutura.

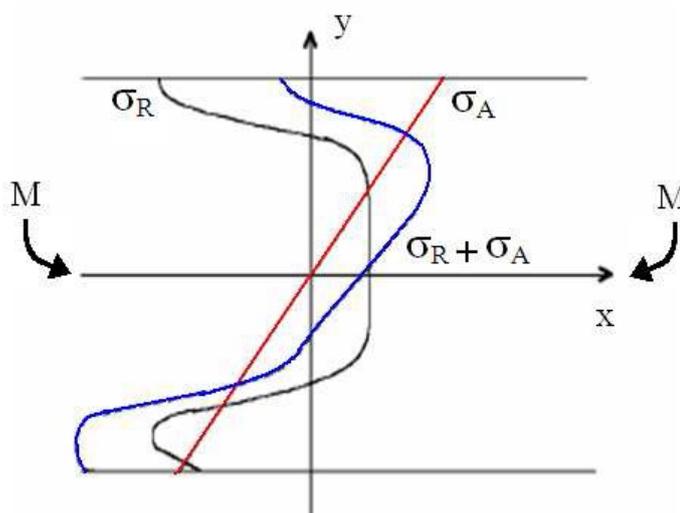
## 2.5 TENSÕES RESIDUAIS EM METAIS

De maneira geral, segundo Silva (2005), pode-se dizer que as tensões residuais são aquelas atuantes nos materiais sem a ação de cargas externas ou gradientes de temperatura. Ainda segundo Silva (2005) elas são geradas por deformações plásticas não uniformes, ou seja, modificações não homogêneas de volume e forma.

Silva (2005) também cita as causas mais comuns do aparecimento das tensões residuais como sendo processo de fabricação, fundição, soldagem, usinagem, modelagem, tratamento térmico, instalação ou montagem de uma estrutura, sobrecargas ocasionais, ajustes do solo em estruturas enterradas, etc.

Chuvas (2012) salienta que os efeitos das tensões residuais são prejudiciais, pois eles elevam o valor da tensão total somando-se as tensões de trabalho. Ela ainda diz que as tensões residuais de compressão são benéficas, pois elas evitam a propagação de trincas e inibem a nucleação. Isto pode ser mais bem visualizado na figura 23.

Figura 23- Esquema de superposição das tensões de trabalho com as tensões residuais.



Fonte James; Lu (1996).

### **2.5.1 - Tensões Residuais geradas na Conformação Mecânica**

Segundo Macherauch & Wohlfahrt (1977) nos processos de conformação mecânica como laminação, dobramentos, extrusão, geram tensão residual principalmente por conta da heterogeneidade das deformações plásticas entre as várias regiões dos componentes, por exemplo, suas regiões centrais e superficiais. Quando as cargas do processo são aliviadas, no esforço de manter a seção transversal da barra plana, as fibras centrais do material, que escoaram menos, tendem a voltar pro seu comprimento inicial e forçam as fibras externas a se encurtarem mais do que elas desejariam, pois como escoaram mais elas se acomodariam a um comprimento maior que o inicial. Assim, são geradas tensões compressivas na superfície e tensões trativas na região central da peça como reação das fibras externas ao esforço das fibras centrais em retornarem ao comprimento inicial.

#### **2.5.1. Tensões Residuais geradas na Soldagem**

Como pode se entender através de Silva (2005) a contração no resfriamento de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a operação de soldagem normalmente representa a principal fonte de tensões residuais no processo de soldagem. Ele ainda cita que como o processo é realizado em temperaturas nas quais o módulo de elasticidade e a resistência ao escoamento do metal tornam-se muito pequenos, o escoamento é facilitado e o metal tende a se expandir com as altas temperaturas. Quando ocorre o resfriamento, o material recupera a sua rigidez sob temperaturas ainda altas e sob condições heterogêneas de temperatura, impedindo que a contração ocorra igual e livremente em todas as regiões. As tensões geradas podem ser da ordem do limite de escoamento do metal. No caso de um passe de solda, o material que resfria anteriormente também impede o novo material depositado de se contrair, produzindo neste, tensões residuais trativas.

Segundo o que pode ser entendido de Cindra (2000) para o caso da geração de tensões devido à transformação de fases na soldagem, as tensões surgem porque a transformação de fases da austenita para ferrita, bainita, perlita ou martensita, ocorre com aumento de volume. Desta forma, o material da zona fundida e da zona termicamente afetada que sofre transformação de fase tende a se expandir e será impedido pela parte do metal fria e não transformada. A magnitude das tensões residuais no cordão de solda está intimamente relacionada com o grau de restrição que a estrutura mecânica oferece. Esta restrição geralmente é total na direção longitudinal dos cordões de solda.

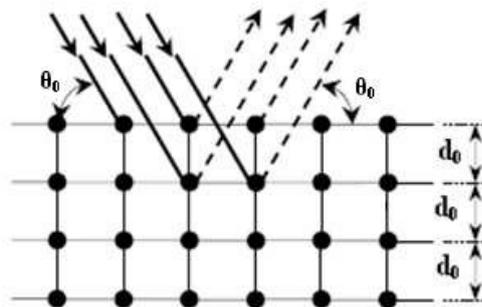
### 2.5.3 - Principais Técnicas de Medição de Tensões Residuais

Segundo Löhe; Vöhringer (2002) as técnicas de medição de tensões residuais dividem-se em destrutivas, semidestrutivas e não destrutivas, de acordo com o nível de dano introduzido no equipamento medido quando de sua aplicação. As técnicas mais usadas utilizam os métodos tradicionais de análise experimental de tensões, aliados à remoção de material da peça avaliada para informar de tensões e deformações existentes antes da instalação do sensor.

#### 2.5.3.1 - Medição da tensão residual pela Técnica da Difração de Raios-X

Segundo Chuvas (2012) e Silva (2005) a tensometria por difração de raios-X tem como princípio a medição do espaçamento entre planos da rede cristalina dos materiais, através do uso de feixes estreitos de raios-X. Este princípio é caracterizado, de uma maneira básica, pela incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo (Figura 24). No estado inicial, não deformado, o material metálico possui distância interplanar entre seus planos cristalinos.

Figura 24- Desenho esquemático do espalhamento das ondas de raios-X.



Fonte Chuvas (2012).

Ainda segundo Chuvas (2012) e Silva (2005) um feixe paralelo de raios-X, de comprimento de onda  $\lambda$ , incide na superfície do material segundo um determinado ângulo de incidência  $\theta_0$ . Este feixe é difratado sob o mesmo ângulo  $\theta_0$ , desde que seja satisfeita a lei de Bragg:

$$n\lambda = 2d_0 \cdot \text{sen}\theta_0 \quad (20)$$

Silva (2005) Chuvás (2012) ainda nos dizem Nessas condições, ao utilizar raios-X monocromáticos ( $\lambda = \text{constante}$ ), o valor do ângulo  $\theta_0$ , referente a uma intensidade máxima de difração, depende da distância interplanar  $d_0$ .

Através da teoria da elasticidade do material sólido, oriunda da mecânica dos sólidos, têm-se as seguintes relações:

$$\text{Tensão:} \quad \sigma = \Delta F / \Delta A \quad (21)$$

$$\text{Deformação:} \quad \varepsilon = \Delta d / d_0 \quad (22)$$

Lei de Hooke (relação entre tensão e deformação) para estado uniaxial:

$$\varepsilon = \sigma / E \quad (23)$$

Onde:  $E$  é o módulo de elasticidade do material.

Com o material sob tensão  $\sigma$ , a distância interplanar  $d$ , varia de um valor  $\Delta d = d - d_0$ , sendo  $d$  a distância interplanar no material tensionado, o que ocasiona a deformação  $d_0$ .

$\varepsilon = \Delta d / d_0$  na rede cristalina do material. Nessas condições, a variação do ângulo de difração é igual a  $\Delta\theta = d - d_0$ , que pode ser medida pela técnica da tensometria por raios-X (Taylor, 1961). Fazendo a diferenciação da lei de Bragg (equação 20) obtêm-se a relação entre a deformação  $\varepsilon$  e o ângulo  $\theta_0$  de difração:

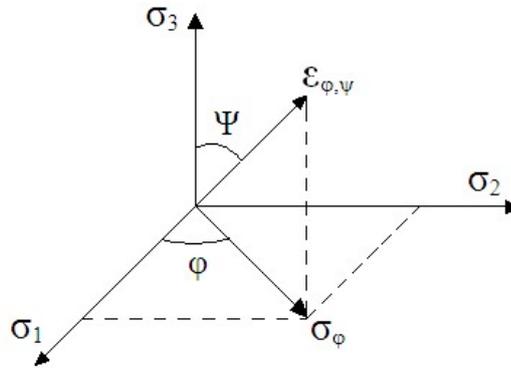
$$\varepsilon = \Delta d / d_0 = - \cot \theta_0 \cdot \Delta\theta \quad (24)$$

Para efeitos de adequação ao estado real de tensões, utilizamos coordenadas polares (Figura 25).

Então, da equação 24 pode-se extrair que:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = (d_{\varphi, \psi} - d_0) / d_0 = \cot \theta_0 \cdot (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0) \quad (25)$$

Figura 25- Coordenadas polares.



Fonte Chuvas (2012).

Sabendo que:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = (\sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi) \cdot \sin^2 \psi - \mu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / E \quad (26)$$

Mantendo fixo o ângulo  $\varphi$ , e determinarmos a diferença entre as deformações em duas direções diferentes, segundo o ângulo  $\psi$ , tem-se:

$$\varepsilon(\varphi, \psi_2) - \varepsilon(\varphi, \psi_1) = \cot g \theta_0 \cdot (\theta_{\varphi, \psi_1} - \theta_{\varphi, \psi_2}) \quad (27)$$

Reescrevendo o primeiro membro da equação 29, também em função da diferença entre as deformações em duas direções diferentes:

$$\varepsilon(\varphi, \psi_2) - \varepsilon(\varphi, \psi_1) = ((1 + \mu) \sigma_{\varphi} \cdot (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)) / E \quad (28)$$

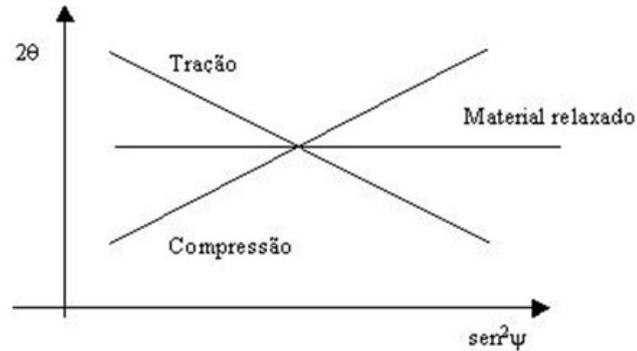
Após todas estas passagens matemáticas, e substituindo-se o primeiro membro da equação 27 pelo segundo membro da equação 28, a equação utilizada no equipamento portátil de medição de tensões residuais é obtida:

$$\sigma_{\varphi} = (E \cdot \cot g \theta_0 \cdot (\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})) / ((1 + \mu) \cdot (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)) \quad (29)$$

Esta equação é válida para quaisquer variações de  $\psi_1$  e  $\psi_2$  que impusermos ao equipamento.

Podemos observar, através da equação 29, que a tensão residual existente no material é diretamente proporcional à derivada de  $2\theta$ , em função de  $\sin^2 \psi$ . Sendo assim, é feita uma representação gráfica dos vários ângulos  $2\theta$  medidos, tendo  $\sin^2 \psi$  como ordenada (Figura 26).

Figura 26- Estado de tensão do material em função do declive da curva  $2\theta \times \sin^2\psi$ .



Fonte Chuvas, 2012.

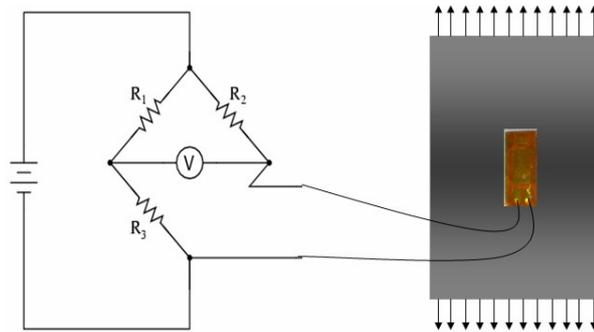
#### 2.5.3.2 - Medição da tensão residual pela Técnica do furo cego ou *hole drilling*

Segundo Löhe; Vöhringer (2002) é a técnica mais utilizada e também considerada uma das melhores para medição de tensões residuais. O método consiste na usinagem de um pequeno furo não passante (cego) na superfície a ser avaliada (na maior parte das vezes é considerada semidestrutiva) para medição do alívio de tensões gerado pela usinagem desse furo.

Segundo Rodrigues (2007) a medição das tensões residuais causadas pelo furo pode ser feita por extensômetros de resistência elétrica, a Fotoelasticidade por Reflexão, a Holografia Eletrônica e o Moiré Interferométrico. Em seu trabalho Rodrigues (2007) fez uso de extensômetros de resistência elétrica.

Ele explica que o extensômetro tem como principal equipamento o condicionador, contendo uma ou mais ponte de Wheatstone, onde se ligam o extensômetro. Este equipamento permite a determinação das mudanças de potencial geradas pelas variações de resistências elétricas dos sensores, induzidas pelas variações de seus comprimentos. Os dados obtidos são transferidos para o *Strain gage*, onde a leitura é feita através de um adesivo, conforme pode ser visto na Figura 27.

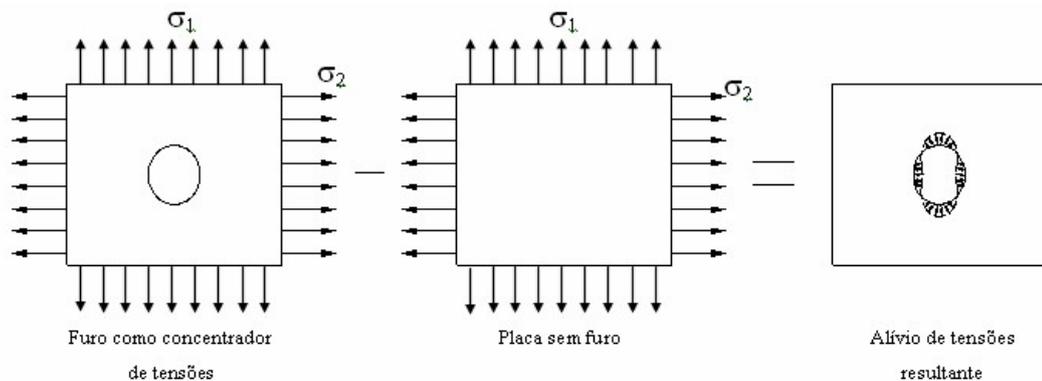
Figura 27- Esquema simplificado de uma ligação de um extensômetro a uma Ponte de Wheatstone.



Fonte Rodrigues (2007).

Rodrigues (2007) usou a teoria desenvolvida por Kirsch em 1898 para determinar o estado de tensões ao redor do furo passante. O autor determinou um estado de tensões para um furo passante (através da teoria de Kirsch), posteriormente calculou o estado de tensões de uma placa plana e, por fim, fez a subtração do estado de tensão da placa plana pela solução do furo passante obtida na teoria, uma ilustração do resultado pode ser observada na figura 28.

Figura 28- Obtenção do estado de tensões resultante do alívio provocado pelo furo.



Fonte: Rodrigues (2007)

A análise extensométrica do furo passante, gera a base de informações necessárias para determinar o comportamento do alívio de deformações, gerado pela execução de um furo em espécime, associando-se as tensões existentes no espécime. Todas as análises foram feitas para um furo passante (fato impraticável na maioria das medições), sendo assim as equações geradas sofrem as adaptações necessárias para o processo de furo cego (Rodrigues, 2007).

### 3 – ESTUDOS DE CASO

Para uma melhor compreensão do método e seus resultados, alguns trabalhos serão citados, explicitando assim a eficácia do método e comparando-o com o tradicionalmente utilizado tratamento térmico.

#### 3.1 – TÉCNICA DE ALÍVIO DE TENSÃO POR VIBRAÇÃO: UMA REVISÃO DAS TENDÊNCIAS ATUAIS E PROSPECTIVAS FUTURAS. BAQAR, JAIN, KHANA(2014)

Este estudo, embora não tenha apresentado um estudo de caso, é muito interessante, pois faz a comparação de métodos para alívio de tensões como:

- Tratamento térmico;
- *Shot Peening*;
- Vibrações Mecânicas (VSR).

Este trabalho afirma que o método térmico é o mais aceito e o mais utilizado no último século. Tem sua eficácia comprovada, porém, devido às características deste processo (como alto custo, longo tempo necessário, perda de resistência mecânica, entre outros), outros processos para alívio de tensões estão necessitando de novos estudos para um pleno desenvolvimento.

Um destes métodos citados pelos autores é o *shot peening*, que consiste em atirar pequenas esferas de um determinado material (que pode ser cerâmica, vidro ou aço) na superfície da peça, induzindo assim tensões compressivas, ou pelo menos, a redução do gradiente das tensões trativas. Com este tratamento tem-se um aumento da vida a fadiga, estabilidade dimensional e melhora a superfície.

Ainda neste texto é possível inferir um pouco da origem histórica do tratamento de alívio de tensão por vibração mecânica. Nele é dito que durante a segunda guerra mundial, os alemães estavam enfrentando problemas com peças muito grandes, que devido ao tamanho não era possível à realização do tratamento térmico e, portanto, não eram aliviadas suas tensões residuais.

Após algum tempo foi observado que o transporte via caminhões daquelas peças, estava produzindo uma estabilidade dimensional.

Continuando a falar do artigo, o autor cita três tipos de alívio de tensão por vibrações mecânicas:

- *Resonant-VSR (R-VSR)*;
- *Sub-Resonant VSR (SR-VSR)*;
- *Sub-Harmonic VSR (SH-VSR)*;

O único denominador comum entre os métodos é que os componentes ficam isolados e sujeitos a ciclos de vibração, o efeito de cada um é monitorado em tempo real.

Falando do R-VSR, como todo elemento possui uma frequência natural inerente, e vibrando nesta frequência acontece o aumento da força de entrada na parte cíclica. Neste processo, os valores de pico da frequência de ressonância são alcançados lentamente, e mantidos durante algum tempo antes de avançar, assim redistribuindo as tensões residuais e diminuindo seu valor máximo. Este processo é aplicado novamente até que se obtenham os valores de tensão desejados.

O SR-VSR é um caso especial do R-VSR. Ele ocorre quando os valores de vibração da frequência natural não são possíveis, utilizando-se assim um valor abaixo dele. Neste método são necessárias dez vezes mais ciclos para obtenção de um resultado semelhante ao R-VSR.

Já o SH-VSR utiliza uma baixa energia de vibração, onde usualmente não podem ser nem ouvidas, e move os átomos um em relação aos outros na estrutura cristalina. Utiliza-se este método quando não é possível realizar nenhum dos outros dois métodos.

Levando em conta os métodos VSR é possível fazer uma lista de vantagens e desvantagens:

- Energia consumida durante o processo muito menor que o no método térmico;
- É possível tratar peças de tamanhos grandes;
- Em tratamentos que envolvem gradientes de temperatura, existe uma zona afetada pelo calor onde os valores das tensões residuais podem atingir valores próximos

ao escoamento, ou até mesmo passá-lo, porém o método VSR pode ser usado simultaneamente para evitar este efeito e a consequente fala;

- Uma menor poluição se comparada com os métodos tradicionais.

Por outro lado, quando mudança na metalurgia do material é desejada este método não é indicado. Outro problema é que não existem estudos suficientes para que a indústria tenha uma aceitação plena do método. Sua aplicação na indústria vem crescendo e cada vez existem mais estudos para embasar o método, mais ele ainda não é uma unanimidade, apesar de suas vantagens.

O autor concluiu que este método esta sendo cada vez mais aceito e utilizado pela indústria, porém, são necessários um número maior de estudos para que ele seja equiparado ao tratamento térmico.

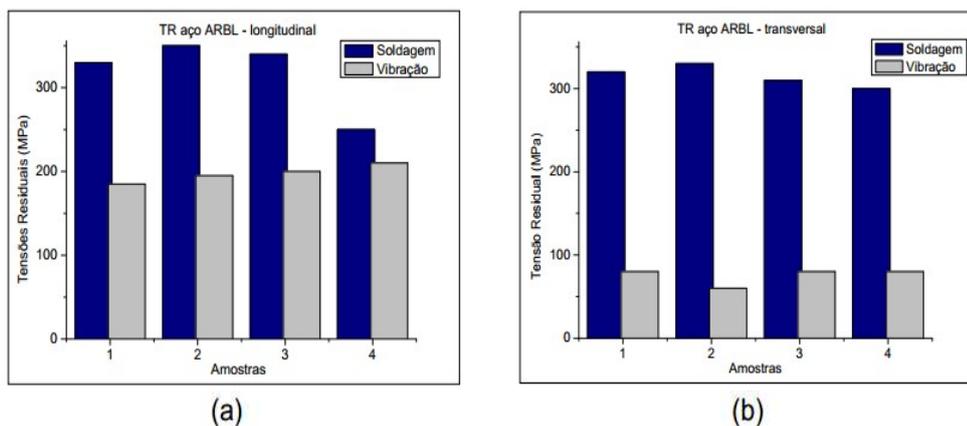
### 3.2 – A VIBRAÇÃO COMO ELEMENTO DE ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CORDÕES DE SOLDA BRAGA (2011)

Neste estudo foram feitas experiências em dois tipos de material, o aço IF (*interstitial-free*) 4 peças medindo 40mm X 300mm e o aço ARBL (alta resistência e baixa liga) 4 peças medindo 40mm X 490mm. Foi feita uma análise residual no metal de base das chapas, antes da soldagem obtendo 20MPa na superfície da chapa de aço ARBL e -100MPa nas chapas de aço IF, a técnica utilizada para todas as tensões residuais foi a difração de Raio-X. E após a soldagem foram analisadas, em todas as amostras na região central do cordão de solda as tensões residuais, tanto da direção longitudinal (L) como na transversal que geraram a tabela abaixo onde estão os valores das tensões residuais após a soldagem e após o tratamento de vibração do aço ARBL. Estes dados podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 29.

Tabela 3 - Tensões residuais no aço ARBL tratado por vibração mecânica. Fonte BRAGA (2011)

Amostra		TR após soldagem (MPa)		TR após vibração (MPa)	
		L	T	L	T
Condição I (14 min)	1	330	320	185	80
	2	350	330	195	60
Condição II (7 min)	3	340	310	200	80
	4	250	300	210	80

Figura 29- Tensões residuais nas amostrando aço ARBL por vibração: longitudinal (a) e transversal (b).



Fonte BRAGA (2011)

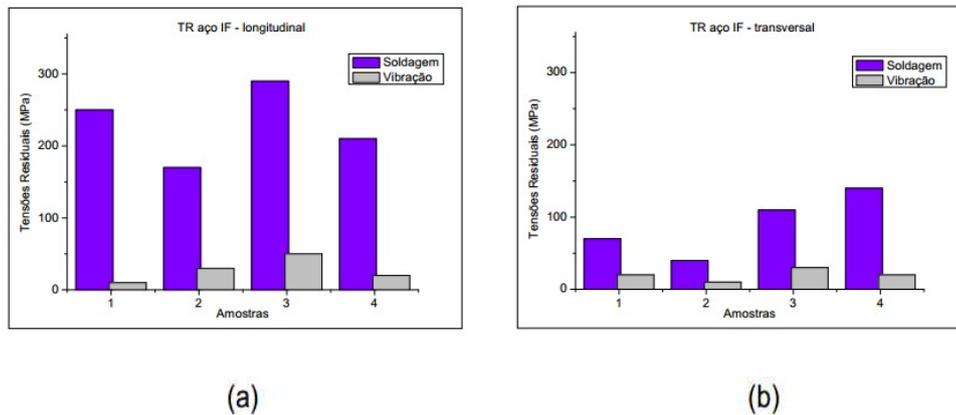
Um estudo semelhante foi realizado com o aço IF, e os resultados podem ser observados a seguir, na Tabela 4 e na Figura 30:

Tabela 4 - Tensões residuais no aço IF tratados por vibração mecânica.

Amostra		TR após soldagem (MPa)		TR após vibração (MPa)	
		L	T	L	T
Condição I (14 min)	1	250	70	10	20
	2	170	40	30	10
Condição II (7 min)	3	290	110	50	30
	4	210	140	20	20

Fonte BRAGA (2011)

Figura 30- Tensões residuais nas amostras do aço IF por vibração: longitudinal (a) e transversal (b).



Fonte BRAGA (2011)

Conforme experimento realizado, fazer uma soldagem a laser neste aço é possível observar que as tensões residuais de maior magnitude acontecem na direção longitudinal (250MPa). Com a vibração mecânica as tensões residuais foram reduzidas de forma significativa em todas as direções, sem influência da magnitude da tensão pós-soldagem.

### 3.3 - ESTUDO DO ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS, EM PEÇA ESTAMPADA, PELA TÉCNICA DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS. SANTOS (2011)

Este trabalho de graduação analisou a redução das tensões residuais por vibração mecânica em peças estampadas. A peça analisada foi uma travessa transversal estrutural, ela tinha a seguinte composição:

**C 0,12; Mn 1,10; Si 0,35; P 0,030; S 0,015; Al 0,020/0,081; Nb0,12; Ti0,20; V 0,12**

A peça sofreu conformação a frio em uma prensa de 800tn, as tensões residuais foram medidas pelo método de difração de raio-X, após isso foram usinados corpos de prova para medir

se a dureza do material tinha sido alterado pelo encruamento e para o teste de tração no sentido da laminação, a 45° e a 90°.

No processo de alívio das tensões residuais foi utilizado o equipamento portátil Meta-Lax. Este sistema pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31- Equipamento utilizado para realização do processo de alívio de tensão por vibrações mecânicas.



Fonte SANTOS (2011).

Para a medição das tensões residuais foram utilizados dois métodos, o mapeamento dos valores relativos da tensão e a difração de raio-X.

Segundo o método de difração de raio-X os resultados obtidos foram:

Tabela 5 - Valores de tensão obtidos através da difração de raio-X.

no	Direção	Valor da tensão medido ( $\sigma$ MPa)		Tensão cisalhante máxima calculada ( $\sigma_{max}$ , MPa)		Redução (%)
		Antes do tratamento	Após o tratamento	Antes do tratamento	Após o tratamento	
1	0°	-130	-130			
	45°	+90	+85	163	155	5
	90°	+160	+40			
2	0°	+190	+150			
	45°	+190	+180	124	108	13
	90°	+15	+30			
3	0°	+300	+180			
	45°	+325	+75	94	84	11
	90°	+195	+130			

Fonte SANTOS (2011).

Este estudo mostra que tensões residuais devido a outros processos mecânicos, no caso estampagem, também podem ser reduzidas através do processo de vibrações mecânicas.

O autor resaltou, justamente, o fato de ter ocorrido redução das tensões residuais de materiais deformados plasticamente, e que não existia estudo teórico anterior a respeito disso. Devido à falta de estudos anteriores neste assunto, ele resalta que seria um assunto importante a ser abordado em trabalhos futuros para comprovação dos dados já obtidos.

### 3.4 – REDUÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL POR VIBRAÇÃO EM UMA PLACA DE AÇO CARBONO. WEISS (1976)

Pela data do artigo, é possível observar que este assunto vem sendo proposto já a um bom tempo por pesquisadores estrangeiros.

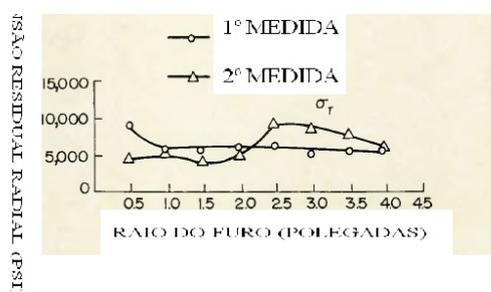
O autor justificou o estudo lembrando que o TTAT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensões) possui alguns inconvenientes como a modificação das propriedades mecânicas, o tempo necessário, deterioração do material, o alto custo, entre outros.

Os corpos de prova eram cilíndricos. Para medir as tensões residuais foi feito uso da técnica de Sachs Boringout, que permite determinar a magnitude da tensão residual em função do raio.

Neste estudo pode ser observado uma efetividade de 60% no raio onde ocorreu a maior tensão residual após a solda, conforme Figura 32, 33 e 34.

O autor concluiu justamente isso, que o pico de tensão residual tem significativa redução. Ele ainda ressaltou que o estudo foi feito em aço carbono AISI 1018, e que outros materiais podem não ter a mesma efetividade.

Figura 32- Tensão residual da peça antes da solda.



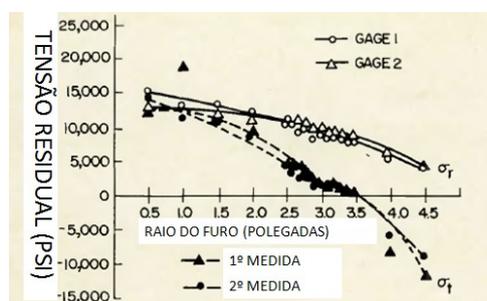
Fonte WEISS (1976)

Figura 33- Tensão residual da peça depois da solda.



Fonte WEISS (1976)

Figura 34- Tensão residual da peça após o processo de vibração.



Fonte WEISS (1976)

### 3.5 - ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE TRATAMENTO DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS POR VIBRAÇÃO MECÂNICA EM JUNTAS SOLDADAS A PLASMA. CHUVAS (2012)

Este trabalho teve como objetivo mostrar a influência dos parâmetros utilizados na redução das tensões residuais. Parâmetros como o cálculo da frequência natural utilizada para as vibrações, espessura do material, aporte térmico, entre outros.

Ele também mostra de forma clara que existe uma redução das tensões residuais, mais em algumas amostras que apresentaram valores de redução significativamente diferentes dos demais. Isto pode ter influência de fatores metalúrgicos para as chapas de mesma espessura, que por sua vez também influencia de forma significativa na redução destas tensões.

O material deste utilizado neste experimento foi o aço DP600 (*Dual Phase*: Ferrita + Martensita), com chapas de 3,3mm de espessura e 4,15mm de espessura. As peças foram soldadas a plasma com processo automatizado e a medição da tensão residual foi feita através do método de difração de Raio-X.

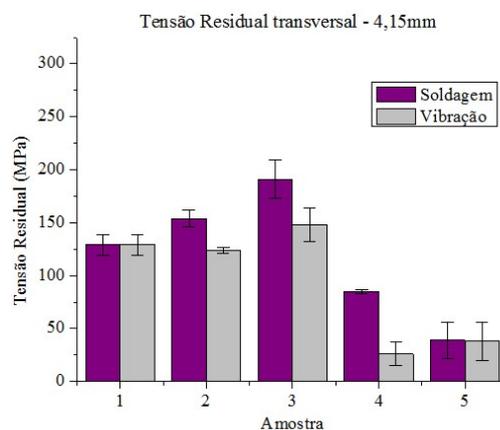
Na Tabela 6 e nas Figuras 35 e 36, é possível observar os resultados obtidos para as placas com 4,15mm de espessura. Já na Tabela 7 e nas figuras 37 e 38 os resultados são das placas de 3,15mm de espessura.

Tabela 6 - Tensões residuais nas amostras de 4.15mm.

Amostra	TR após soldagem (MPa)		TR após vibração (MPa)	
	L	T	L	T
1	42±4	129±10	3±7	129±10
2	33±5	154±8	33±5	124±3
3	41±11	191±18	18±5	148±16
4	33±3	102±2	9±3	26±11
5	-68±18	40±17	-39±8	38±18

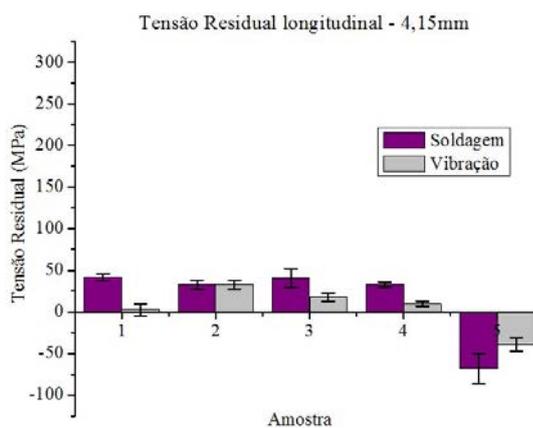
Fonte CHUVAS (2012)

Figura 35- Tensões residuais transversais nas amostras de 4,15mm.



Fonte CHUVAS (2012)

Figura 36- Tensões residuais longitudinais nas amostras de 4,15mm.



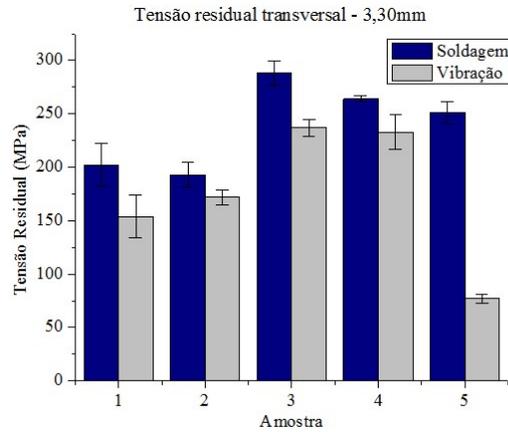
Fonte CHUVAS (2012)

Tabela 7 - Tensões residuais nas amostras de 3,3mm.

Amostra	TR após soldagem (MPa)		TR após vibração (MPa)	
	L	T	L	T
1	127±16	202±20	73±12	155±20
2	101±16	193±12	66±15	172±7
3	88±13	288±11	18±3	237±8
4	161±11	264±3	87±7	233±16
5	231±9	251±10	153±6	77±4

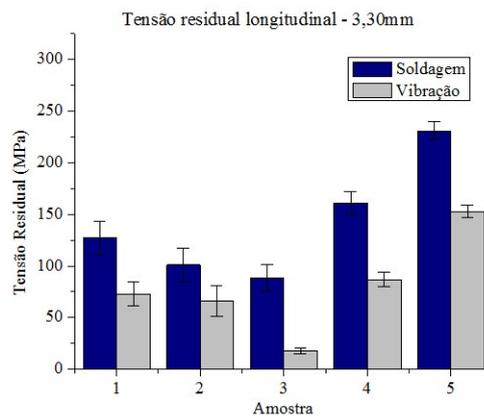
Fonte CHUVAS (2012)

Figura 37- Tensões residuais transversais nas amostras de 3,30mm.



Fonte CHUVAS (2012)

Figura 38- Tensões residuais Longitudinais nas amostras de 3,30mm.



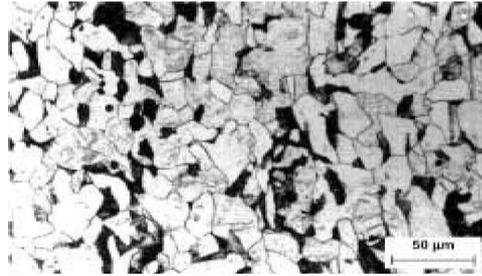
Fonte CHUVAS (2012)

### 3.6 – O EFEITO DA VIBRAÇÃO NA MICROESTRUTURA E DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO RESIDUAL EM UMA JUNTA SOLDADA. WADELL E WALKER (2001)

Este estudo é parte de uma detalhada investigação sobre o alívio de tensões por vibrações mecânicas durante a soldagem e após a soldagem. Um detalhe sobre este estudo é que ele destaca também os efeitos microestruturais resultantes deste processo.

Neste experimento foi utilizado aço laminado a frio BS970080A15, com 6,35mm de espessura e medida após a soldagem de 76,2mm X 259mm, a microestrutura do material pode ser observada na Figura 39. Os corpos de prova foram unidos por solda MIG. Também foi realizado teste de dureza vickers em todos os corpos de prova.

Figura 39– Microestrutura do material antes da solda.



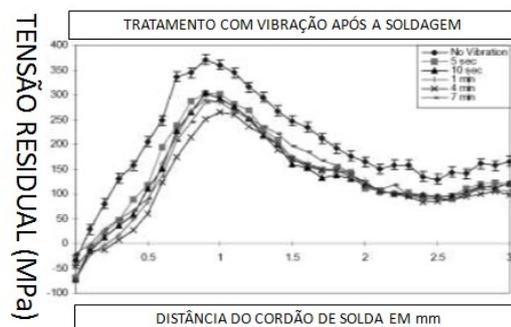
Fonte Wadell e Walker (2001)

Foi feita uma análise microestrutural dos corpos de prova antes de qualquer tratamento, após a soldagem com vibração simultânea e após a soldagem com vibração feita posteriormente. Através de um difrator de raio-X (Proto iXRD), obteve-se os valores das tensões residuais em cada uma das situações.

Conforme pode ser observado no gráfico das Figuras 40, 41 e 42 as tensões residuais também tendem a cair com vibração simultânea à soldagem, o gradiente muda conforme a tensão que é aplicada no material.

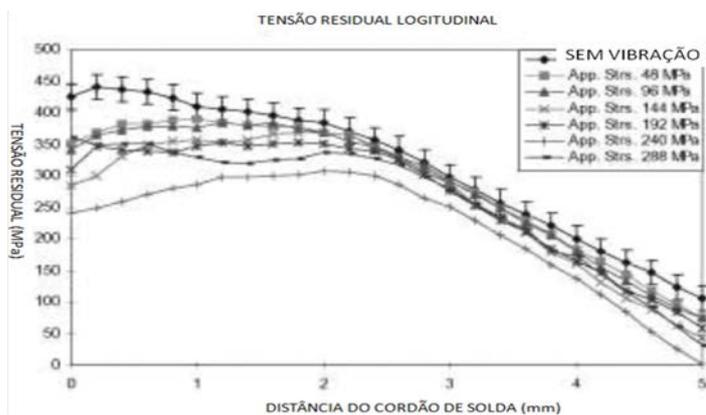
Uma grande diferença existente entre os dois processos é a microestrutura dos materiais. Enquanto que a vibração após a soldagem praticamente não muda a microestrutura do material, o método de vibração simultânea ocasiona uma variação significativa nas propriedades mecânicas, devido a mudanças microestruturais.

Figura 40- Tensão residual em razão da distância do cordão de solda com vibração após a soldagem.



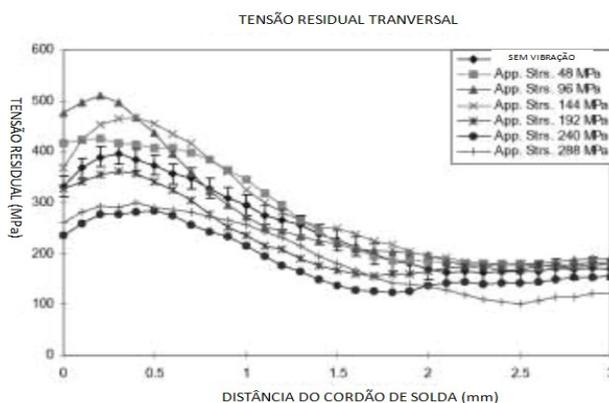
Fonte WADELL (2001)

Figura 41- Tensões residuais longitudinais da amostra com vibração simultânea a soldagem.



Fonte WADELL (2001)

Figura 42- Tensões residuais transversais da amostra com vibração simultânea a soldagem.

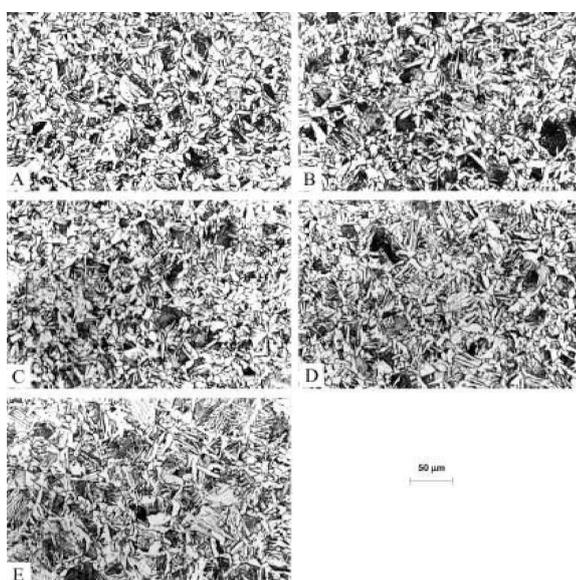


Fonte WADELL (2001)

Como pode ser observado no gráfico das figuras 40, 41 e 42 nos primeiros 5 segundos ocorre uma redução significativa nas tensões residuais em todos os pontos medidos, e após 7 minutos os decremento dessas tensões.

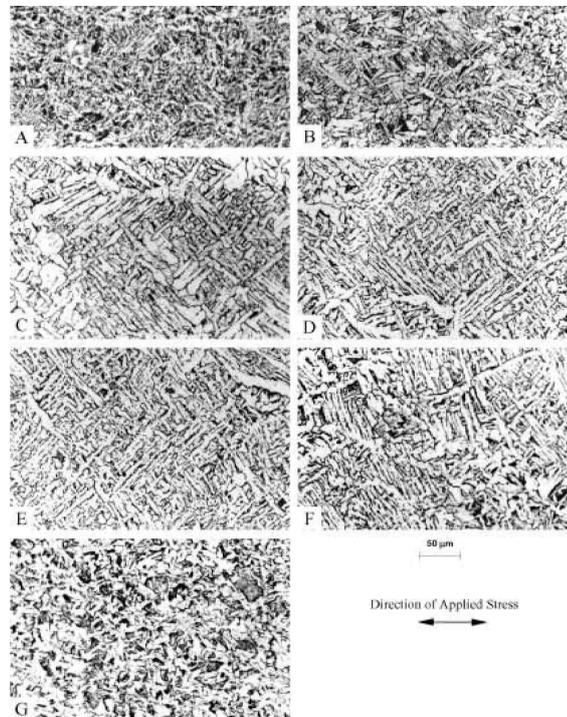
O grande destaque deste trabalho não esta no fato de as tensões diminuírem com o método, o autor buscava uma comparação da metalografia dos corpos de prova que tinham vibração simultânea a soldagem (Figura 44) e com vibração após a soldagem (Figura 43).

Figura 43– Microestrutura dos corpos de prova com vibração pós soldagem, onde os indicares A, B, C, D e E identificam as amostras.



Fonte Wadell, 2001.

Figura 44– Microestrutura dos corpos de prova com vibração simultânea, onde os indicadores A, B, C, D, E, F e G identificam as amostras.



Fonte Wadell, 2001.

### 3.7 – ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÃO: UM ESTUDO FUNDAMENTAL DE SUA EFETIVIDADE. DAWSON E MOFFAT(1980)

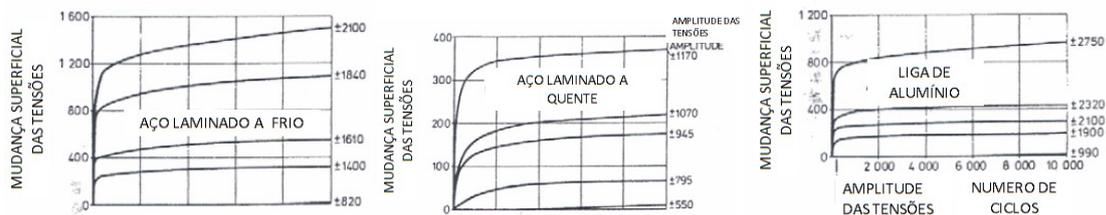
Diferente dos trabalhos apresentados anteriormente, as tensões residuais presentes nos corpos de prova foram induzidas por flexão plástica, outra diferença é a medição das tensões residuais ter sido feito por um teste destrutivo e existiu a comparação dos resultados obtidos em 3 materiais:

- Aço carbono laminado a quente;
- Aço leve estirado;
- Alumínio liga BS 1474 HF 30 TF.

Como pode ser observado na Figura 45, a frequência de vibração muda à tensão residual resultante.

O autor concluiu que a vibração mecânica é eficaz na redução das tensões residuais dos materiais estudados. Outra conclusão alcançada é que para ter efetividade à frequência tem que atingir valores críticos, abaixo disso não existe nenhum efeito. Para a efetividade ocorrer durante a vibração, o limite de vida a fadiga deve ser excedido.

Figura 45- Tensões residuais após a indução de flexão plástica com vibração em frequências diferentes.



Fonte DAWSON (1980)

### 3.8 – FUNDAMENTO DO ALIVIO DE TENSÃO POR VIBRAÇÃO. HASSAM(2014)

Este trabalho mostrou a influência dos parâmetros número de ciclos e amplitude de vibração no alívio de tensões, que foram medidas antes do processo e após a aplicação da técnica.

Primeiro o autor determinou, experimentalmente, o escoamento e o módulo de elasticidade dos corpos de prova e este valor foi comparado com a literatura.

Após isto foi feita uma comparação da influência da amplitude de vibração e os dados foram plotados na Tabela 8.

Após isso, também foram plotados os dados referentes à influência do número de ciclos, conforme visto na Figura 46.

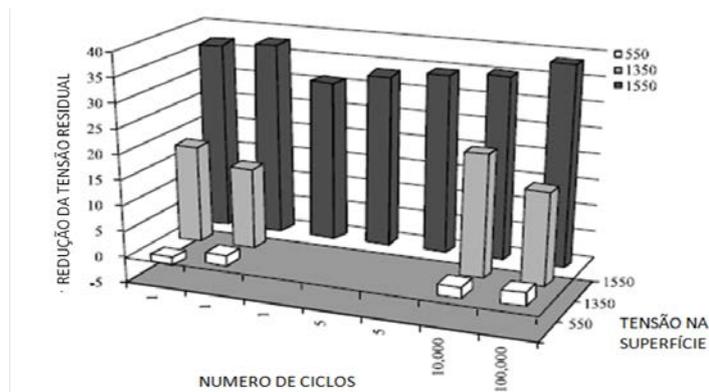
O autor chegou à conclusão que:

- O método de vibrações mecânicas é eficaz;
- Para ter redução na tensão residual, o limite de elasticidade deve ser excedido, depois disso a mudança é linear;
- O número de ciclos não é uma variável crítica;
- Através da literatura atual e da tensão residual inicial é possível prever a redução.

Tabela 8 – Influência da amplitude de vibração na redução da tensão residual. Fonte HASSAM (2014)

ALTA TENSÃO BAIXO CICLO			
Bara 1 Face 1	(1550;1)	36,75	51,04
Bara 1 Face 2	(1550;1)	37,73	34,02
Bara 2	(1550;1)	31,26	55,16
Bara 1	(1550;5)	33,24	54,05
Bara 2	(1550;5)	34,77	56,67
Bara 1	(1550;1)	19,02	28,71
Bara 2	(1550;1)	15,89	30,2
BAIXA TENSÃO BAIXO CICLO			
Bara 1	(1550;1)	-1,37	0,21
Bara 2	(1550;1)	2,11	-3,61
ALTA TENSÃO ALTO CICLO			
Bara 1	(1550,100K)	35,59	44,92
Bara 2	(1550,100K)	38,79	53,71
Bara 3	(1350,100K)	23,83	34,41
Bara 4	(1350,100K)	17,99	33,31
BAIXA TENSÃO ALTO CICLO			
Bara 5	(550,100K)	5,16	-0,29
Bara 6	(550,100K)	6,56	-1,41

Figura 46– Influência do número de ciclos na redução da tensão residual.



Fonte HASSAM (2014)

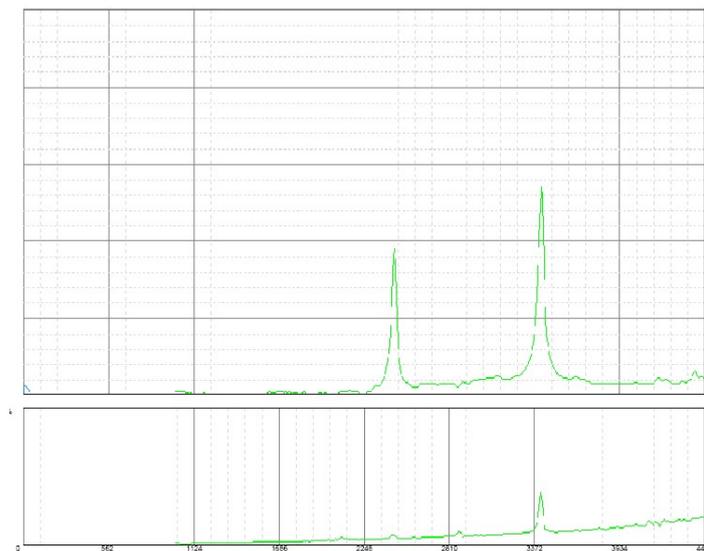
### 3.9 – ROSE CORPORATION (KLAUBA 2014)

Rose Corporation é uma empresa especializada em componentes de grande porte e usualmente utiliza-se da tecnologia VSR.

Neste estudo de caso, presente no site da empresa *VSR Technology Group*, uma peça de aço macio com aproximadamente 60000 lbs (27215,54 Kg).

Esta peça foi devidamente fixada, para minimizar o amortecimento. Com a peça fixada, fez-se um escaneamento da peça identificando dois picos de ressonância. Como pode ser observado na Figura 47.

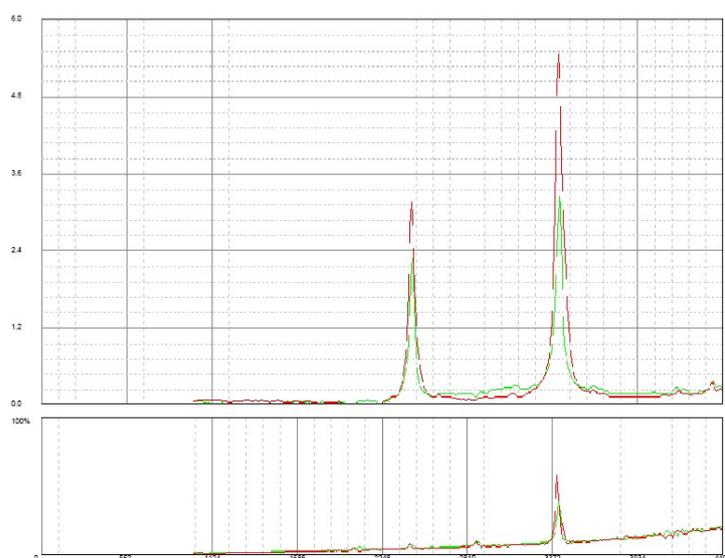
Figura 47- Rápido escaneamento para verificação das frequências de ressonância.



Fonte KLAUBA (2014).

Após este escaneamento inicial, o equipamento foi ajustado conforme necessário e realizado um pré-tratamento. Os resultados deste pré-tratamento são mostrados na Figura 48.

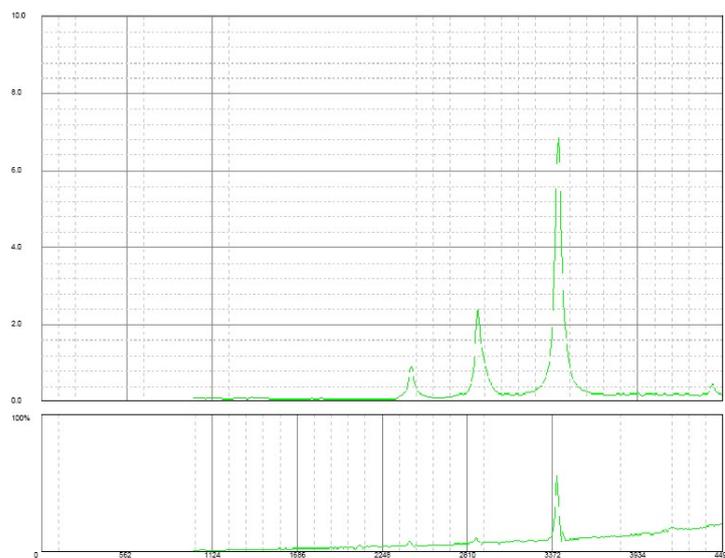
Figura 48- Resultados após o pré-tratamento (em verde) comparados com os resultados do primeiro escaneamento (em vermelho).



Fonte KLAUBA (2014).

Um segundo escaneamento foi executado, sendo possível encontrar um pico ressonante que estava “escondido”, isto foi possível por conta da mudança da posição do acelerômetro, como mostrado na Figura 49.

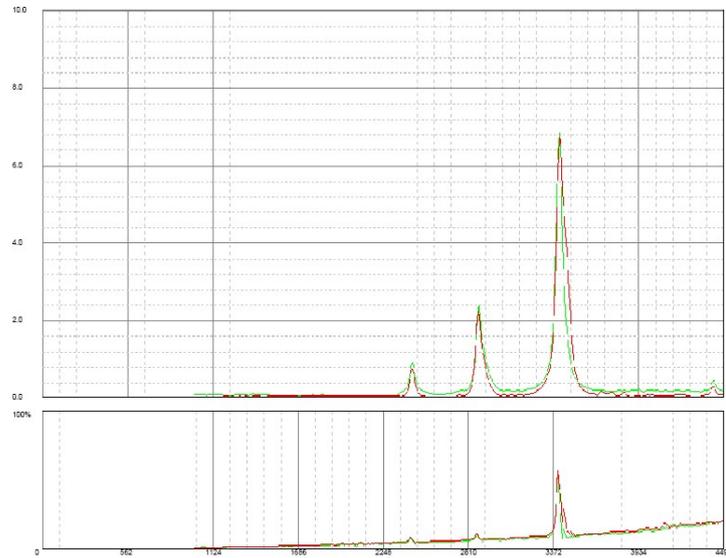
Figura 49- Escaneamento com acelerômetro reposicionado.



Fonte KLAUBA (2014)

Observando esta nova condição, um segundo tratamento foi realizado e os resultados mostrados a seguir na Figura 50.

Figura 50- Picos de ressonância após o segundo tratamento.



Fonte KLAUBA (2014)

Como pode ser observado, este segundo tratamento mostrou uma estabilidade muito grande, as curvas antes e depois (verde e vermelha) são praticamente idênticas, tendo então uma estabilidade dimensional para a usinagem, montagem, transporte e sua utilização conforme conclusão do artigo.

### 3.10 - M H EBY MANUFACTURING (KLAUBA 2014)

M H EBY Manufacturing é uma empresa que dentro de seus produtos está à baia para transporte de cavalos.

Esta empresa lida com peças de grande porte(Figura 51), e que devido aos processos de fabricação precisavam de tratamento térmico para ter estabilidade dimensional. Porém, o transporte, a energia gasta e outros fatores fizeram com alternativas ao tratamento térmico fosse procurada.

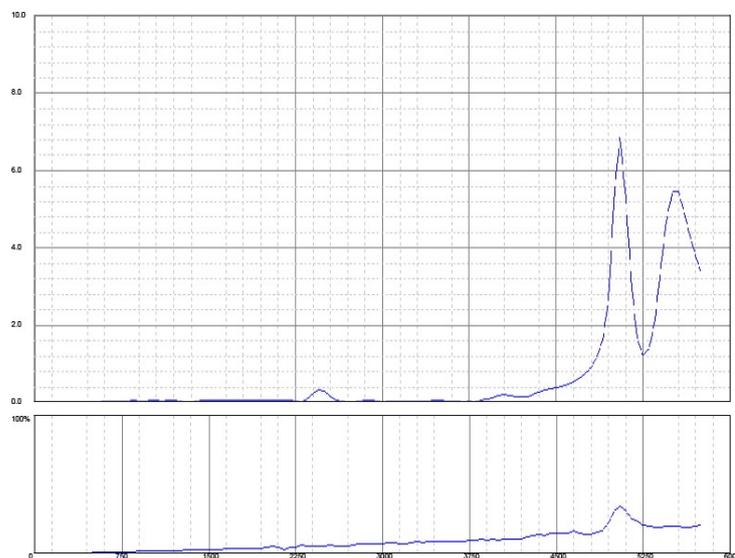
Figura 51- Base das baias, o produto que necessita se reduzir a tensão residual.



Fonte KLAUBA (2014)

A peça é escaneada, e as frequências de ressonância apontadas na Figura 52:

Figura 52- Rápido escaneamento para verificação das frequências de ressonância.

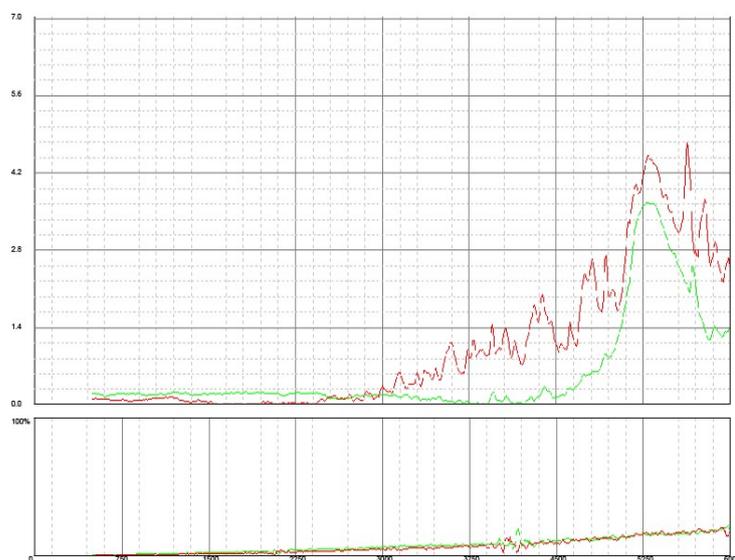


Fonte KLAUBA (2014)

Estes dados são usados para calibrar o aparelho e assim melhorar a usinagem, montagem do conjunto e o próprio uso.

Após o tratamento estas frequências tem um valor menor (Figura 53), fato que indica estabilidade dimensional e uma menor tensão residual, segundo a conclusão do artigo.

Figura 53- Comparação das frequências de ressonância.



Fonte KLAUBA (2014).

#### 4 – COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um estudo teórico que comprova a eficácia do método de alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas. Todo o trabalho realizado sobre o assunto de vibrações mecânicas para alívio de tensões contribui para aumentar a confiabilidade do método fornecendo dados para novos estudos e ajudando com a popularização da técnica.

Para a confecção da dissertação foram abordados teoricamente os assuntos de solda, tratamentos térmicos e como ele funciona para alívio de tensões, vibrações mecânicas e como ela funciona para alívio de tensões. Feito isto, um estudo de caso composto por artigos e dissertações sobre o assunto foi realizado, mostrando dados que sustentam a viabilidade do método e comprovam sua eficácia, como era o objetivo.

O processo de soldagem tem um gradiente de temperatura entre a zona afetada pelo calor e o restante do conjunto soldado muito elevado. Este fato gera tensões residuais e deformações plásticas, tornando assim imprescindível o alívio de tensões. Como se trata de um processo utilizado na indústria em larga escala na indústria e a maior parte dos estudos de casos esta relacionado com conjuntos soldado fez-se necessário uma introdução teórica sobre os processos de soldagem.

Nos estudos de caso estão presentes trabalhos como o de Weiss (1976) até trabalhos como o de Hassam (2014). Apesar da maior parte dos trabalhos serem relacionados a processos de solda em relação à tensão residual, existem trabalhos com peças estampadas, com flexão e conseqüente deformação plástica, com peças de grande porte com problemas de estabilidade dimensional, etc.

Weiss (1976) é o estudo mais antigo presente neste trabalho, e já mostra uma efetividade de 60% na redução de tensões residuais nos locais críticos. O artigo já atenta a vantagens observadas até hoje como a modificação das propriedades mecânicas, o tempo necessário, deterioração do material, o alto custo, entre outros.

Quando se analisa os resultados obtidos por Braga (2011) nota-se que as tensões residuais geradas pela soldagem foram trativas, em ambas as direções. Mas quando submetidas à vibração mecânica as tensões foram aliviadas em cerca de 40% na direção longitudinal e na direção

transversal ocorreu uma redução nas tensões de 80%, tomando como exemplo o aço ARBL. O aço IF também obteve resultados significantes, a respeito de alívio de tensões, após aplicação de tensões residuais sub-ressonantes.

Embora o artigo não traga uma comparação de métodos, fica bem claro que o processo de vibrações mecânicas sub-ressonantes é eficaz para redução de tensões residuais que é justamente a conclusão do autor, que ainda resalta a diferença de magnitude de redução da tensão residual na direção longitudinal entre os dois materiais.

O estudo realizado por Dos Santos (2011) atenta ao fato de que em borá tenham uma magnitude maior nos processos de soldagem, as tensões residuais estão presentes em todos os processos mecânicos. Este trabalho em particular, trata de peças que sofrem deformações plásticas, após o processo de estampagem, e a amplitude das tensões residuais presentes no processo. Como o próprio autor cita, a literatura sobre este assunto é muito pequena e os resultados foram satisfatórios, portanto este assunto merece outros trabalhos, para reinterar a eficácia do método já comprovada pelos resultados obtidos.

Por sua vez, Chuvas (2012) mostrou como a espessura do material pode influenciar os resultados. Ela também salientou que fatores metalúrgicos podem influenciar nos resultados, e pode-se concluir através deste projeto que o método é efetivo, mas tem influência da metalurgia do material, sua espessura, dentre outros fatores que alteram suas propriedades mecânicas. .

Dawson e Moffat (1980) trabalham com tensões induzidas por flexão, trazendo comparações do ocorrido em três materiais:

- Aço carbono laminado a quente;
- Aço leve estirado;
- Alumínio liga BS 1474 HF 30 TF.

Através do trabalho dele, e endoçado pela teoria, é possível concluir que a frequência de vibração tem que atingir um valor mínimo para eficácia do método, e que os materiais em questão tiveram bons resultados com este tratamento.

Olhando para os estudos de caso da Rose Corporation e da M H EBY Manufactory conclui-se que, apesar de não ter sido quantificado, a usinagem, solda, montagem e qualquer

outro processo ficam com uma estabilidade dimensional muito boa após o processo e ocorre uma redução na tensão residual, como observado pelos valores de ressonância presentes no artigo.

Apesar de estes trabalhos terem sido confeccionados em épocas diferentes, utilizando recursos diferentes, focando assuntos diferentes todos eles comprovaram a eficácia do método.

Concluindo, este é um método comprovadamente eficiente possuindo vantagens como, por exemplo:

- Conservar as propriedades mecânicas;
- Tempo de aplicação muito menor em relação aos métodos mais utilizados, inclusive podendo ser aplicado de forma simultânea;
- Baixo custo em relação aos métodos mais utilizados, entre outras coisas.

Apesar de todas as vantagens listadas, o método carece de uma bibliografia mais diversificada, considerando que ainda não tem uma grande aceitação nas indústrias brasileiras.

Portanto trabalhos dos mais diversificados merecem ser realizados, para identificação das vantagens e desvantagens nas mais variadas situações. Com uma maior gama de trabalhos, com certeza a indústria passara a ver aplicações do método para o dia a dia da indústria, como visto no estudo de caso M H EBY Manufactory, onde se tinha um problema de estabilidade dimensional no transporte.

Tendo isto em vista, trabalhos com diferentes materiais, diferentes processos, verificando a influência dos parâmetros e qualquer outra análise que desenvolva uma maior base teórica para aceitação do método são necessários.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, S. C. A. **Estudo da Soldabilidade e Propriedades Mecânicas da Zona Termicamente Afetada dos Aços Inoxidáveis Ferríticos com Nióbio.** Dissertação de Mestrado, CPGEM/UFMG, 1983.

ALMEIDA, M. T. **Vibrações mecânicas para engenheiros.** 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1990.

ALVES, F. **Soldagem por explosão.** Disponível [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). Acesso e, 5 abril de 2014.

I WORKSHOP DE VIBRAÇÃO E ACÚSTICA – AGOSTO/2011. BRAGA, E. M. **A Vibração como Elemento de Alívio de Tensões Residuais em Cordões de Solda.**

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência engenharia de materiais: uma introdução - 8ª Ed.** São Paulo-SP. Editora LTC. 2012 .

CINDRA FONSECA, M. P. **Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante Ciclos de Fadiga.** Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE/UFRJ. 2000.

CINDRA FONSECA, M. P., SANTOS COSTA, W., SANTOS CHAVES, F.R., PARDAL, J.M., MARQUES JUNIOR, A.S. “**Estudo das Propriedades Mecânicas e Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Aço ARBL Bifásico Usado na Indústria Automobilística**”, 8º CIBIMCongresso Iberoamericano de Ingenieria Mecanica, Cusco, 2007.

CHIAVERINE V. **Aços e Ferros Fundidos.** 5º ed. Associação Brasileira de Metais. 1986.

CHUVAS, T. C. **Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de Alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas Soldadas a plasma.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense (2012).

COLEMAN, N. **Máquina de solda de porcas através de pressão e passagem de corrente elétrica.** Logismarket. Disponível: <http://pt.scribd.com>. Acesso 2/02/2014

CRISI; MENDONÇA. **Alívio de Tensões de Soldas por Tratamento Térmico e Vibração: Uma Comparação Entre os Dois Métodos - Alívio de tensões por vibrações sub harmônicas.** Rio de Janeiro-RJ. In: XXX CONSOLDA 2004 -.

DAWSON, R. e MOFFAT, D. G. **Vibratory Stress Relief: A Fundamental Study of Its Effectiveness.** Journal of engineering Materials and Technology – Abril de 1980.

FERREIRA, L. **Soldagem por ultrassom.** Disponível: <http://www.infosolda.com.br/>. Acesso em 03/04/ 2014

FRANÇA, L. N. F.; SOTELO JUNIOR, J. - **Introdução às Vibrações Mecânicas.** São Paulo: Blucher. 2006.

HASSAN, A. H. **Fundamentals of vibratory relief.** Asian Journal of Applied Sciences 7(5): 317-324, 2014

MACHADO, A. S. <http://pt.slideshare.net/ASMachado/cap1-introducao-itm2011-> acessado em 29/12/2015.

MACHADO, A. S. <http://www.textoscientificos.com>. acessado em 9/12/2015

KLAUBA, A. <http://www.vsrtechnology.net/resources/job-stories-reports/> .Acesso em 25/10/2015.

**International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Website:**  
**www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 Certified Journal, Volume 4, Issue 11, November 2014**

JAMES, M.R., LU, J. Introduction. In: LU, J. **Handbook of Measurement of Residual Stresses**.  
 Lilburn, GA: The Fairmont Press, Inc., 1996. pp. 1-4.

LÖHE, D., VÖHRINGER, O. **Handbook of residual stresses and deformation**, ASM  
 International, pp. 54, USA, 2002.

MACHERAUCH, E.,;WOHLFAHRT, H. “**Different sources of residual stress as a result of welding**”,  
 Residual stresses in weld construction and their effects, International Conference, The  
 Welding Institute, pp. 267-282, 1977.

MODENESI, P. J. **Introdução à metalurgia da soldagem**. DEMET/UFMG. Belo Horizonte-  
 MG. 2012. P. 209

**Plain Carbon Steel Weldment**. WRC Bulletin – Fevereiro de 1976.

SKINNER, R. **Um Estudo sobre a Teoria do Alívio de Tensões Sub-ressonante**. São Paulo-  
 SP. UNISANTA. 1987. P 69-75. Vol. 1

RAO, S. **Mechanical vibrations**. São Paulo – SP Pearson Prentice Hall, 2008. P 1- 24 , 101-  
 139. Vol. 4

RODRIGUES, L. D. **Medição de Tensões Residuais em Tubos Visando a Determinação de Esforços em Dutos Enterrados**.  
 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) PUC –RIO,  
 Rio de Janeiro, 2007.

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

SILVA, B. M. **Alívio de tensões residuais em juntas soldadas de caixa espiral de turbina hidráulica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

WEISS, S.; Baker, G. S. ; DAS GUPTA, R. D. WRC Bulletin **Vibrational Residual Stress Relief in a plan steel carbon weldment**

WADELL, A. J. ; WALKER, C. A. **The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution.** Journal of Materials: Design and Applications, Proceedings of the IMechE, Part L, 215 (2). pp. 99-111. ISSN 1464-4207