

PAULA MORAES DE FREITAS OLIVEIRA

Estudo dos efeitos da vibração mecânica no alívio de tensões de juntas soldadas

Paula Moraes de Freitas Oliveira

Estudo dos efeitos da vibração mecânica no alívio de tensões de juntas soldadas

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof Dr. Angelo Caporalli Filho

O48E	Oliveira, Paula Moraes de Freitas Estudo dos efeitos da vibração mecânica no alívio de tensões de juntas soldadas / Paula Moraes de Freitas Oliveira – Guaratinguetá, 2019. 73 f. : il. Bibliografia: f. 68-73 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho 1. Tensões residuais. 2. Juntas soldadas. 3. Vibração. I.Título. CDU 620.172
------	--

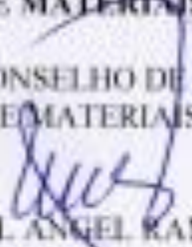
Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

PAULA MORAES DE FREITAS OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS"

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


Prof. Dr. MIGUEL ANGEL RAMÍREZ GIL
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANGELO APORALI FILHO
Orientador UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP-FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

PAULA MORAES DE FREITAS OLIVEIRA

NASCIMENTO	05.05.1991 – São José dos Campos / SP
FILIAÇÃO	João Ricardo de Freitas Oliveira Elisabete Caria Moraes
0000/2019	Curso de Graduação em Engenharia de Materiais Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

Dedico este trabalho aos meus pais, Elisabete
Caria Moraes e João Ricardo de Freitas
Oliveira.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Angelo Caporalli Filho, pelos valiosos ensinamentos e pelo suporte, amizade e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Elisabete Caria Moraes e João Ricardo de Freitas Oliveira, por sempre me incentivarem nos estudos e a dar o melhor de mim, e também pelo apoio, amor, compreensão e lições.

Aos meus irmãos, Sandra Moraes de Freitas Oliveira e Flávio Bueno Marcondes Oliveira, por estarem sempre ao meu lado.

Ao Vitor Altomani Pellegrin, por toda ajuda, dedicação, conselhos e parceria nesta caminhada.

À todos os professores e técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) da FEG/UNESP, pelos ensinamentos compartilhados.

À todos os funcionários da FEG/UNESP, que tornam possível o ensino público superior de excelente qualidade.

“Onde quer que haja mulheres e homens, há sempre o que fazer, há sempre o que ensinar, há sempre o que aprender.”

Paulo Freire

RESUMO

Os processos de soldagem são amplamente utilizados na indústria. Estes processos são responsáveis pela formação de tensões residuais, que causam alteração na estrutura do material, ocasionando mudanças nas suas propriedades mecânicas. Estas mudanças podem afetar negativamente a vida útil do material. São aplicados tratamentos a fim de aliviar as tensões residuais, com o objetivo de manter sua estrutura e, consequentemente, suas propriedades mecânicas. Os tratamentos utilizados podem ser térmicos ou mecânicos, sendo o primeiro o mais usual. Entretanto, os tratamentos mecânicos mostram-se muito eficientes, possuem uma boa produtividade e também são uma alternativa para peças com estruturas muito grandes ou complexas, que não cabem nos fornos utilizados nos processos de tratamento térmico. O presente Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo estudar e analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, os resultados do processo de vibração mecânica para o alívio de tensões de peças soldadas. O processo de vibração mecânica pode ser realizado durante ou após o processo de soldagem, sendo o primeiro processo o “*Vibratory Weld Conditioning*” (VWC), e o segundo o “*Vibratory Stress Relief*” (VSR). Assim, estudou-se os tipos de tensões residuais, os métodos de alívio mais utilizados e suas aplicabilidades, o comportamento das tensões em material soldado, os princípios dos processos vibracionais e a influência do método vibracional nas propriedades mecânicas dos materiais soldados. Pode-se notar, pelo estudo de casos, que os processos VWC e VSR apresentam resultados positivos na maioria dos experimentos analisados, portanto, o método de vibração mecânica se mostra promissor, portanto um maior aprofundamento no estudo da área se mostra necessário.

PALAVRAS- CHAVE: Alívio de tensões residuais. Vibração mecânica. Junta soldada. *Vibratory Weld Conditioning* (VWC). *Vibratory Stress Relief* (VSR).

ABSTRACT

Welding processes are widely used in industry. These processes are responsible for the formation of residual stresses, which cause changes in the material structure, modifying its mechanical properties. These changes may adversely affect material life. Treatments are applied to relieve residual stresses in order to maintain their structure and, consequently, their mechanical properties. The treatments used can be thermal or mechanical, the first being the most usual one. However, the mechanical treatments are very efficient, have good productivity and also are an alternative for parts with very large or complex structures that do not fit in the furnaces used in the heat treatment processes. This paper aims to study and analyze, through a literature review, the results of the mechanical vibration process for stress relief in welded parts. The mechanical vibration process can be performed during or after the welding process, the first being Vibratory Weld Conditioning (VWC) and the second being Vibratory Stress Relief (VSR). Thus, the types of residual stresses, the most used relief methods and their applicability, the behavior of stresses in welded material, the principles of vibrational processes and the influence of the vibrational method on the mechanical properties of welded materials were studied. It can be noted that the VWC and VSR processes have positive results in most of the analyzed experiments, therefore, the mechanical vibration method is promising, so further study of the area is necessary.

KEYWORDS: Residual stress relief. Mechanical vibration. Welded joint. Vibratory Weld Conditioning (VWC). Vibratory Stress Relief (VSR).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Macrotensões residuais	17
Figura 2 – Microtensões residuais	17
Figura 3 – Defeitos cristalinos que causam a presença de tensões submicroscópicas	18
Figura 4 – Representação dos três tipos de tensão residual em um material bifásico depois do processo de têmpera.....	19
Figura 5 – Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada.....	21
Figura 6 – Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem	21
Figura 7 – Tensões residuais típicas em soldagem de chapas	22
Figura 8 – Representação esquemática de uma junta soldada.....	24
Figura 9 – Crescimento dos grãos em relação ao gradiente máximo de temperatura	24
Figura 10 – Região subcrítica.....	26
Figura 11 – Microestruturas típicas da zona termicamente afetada de aços carbono.....	27
Figura 12 – Distribuição de tensões residuais no método de remoção de camadas	29
Figura 13 – Curvas TTT (tempo – temperatura – transformação)	38
Figura 14 – Faixas de temperaturas usuais de alguns tratamentos térmicos de aços	39
Figura 15 – Parte dos clientes da Meta-Lax	42
Figura 16 – Modelos dos painéis de Controle da Meta-Lax.....	43
Figura 17 – Modelo dos indutores de força da Meta-Lax	43
Figura 18 – Equipamento da SRE utilizando o processo Formula 62	44
Figura 19 – Equipamento da SRE utilizando o processo Formula 62.....	45
Figura 20 – Curvas de comportamento harmônico inicial	48
Figura 21 – Micrografia ZAC AB1 – CP2: VWC (200x)	51
Figura 22 – Micrografia ZAC AB1 – CP4: VSR (200x).....	52
Figura 23 – Micrografia ZAC AB1 – CP6: Sem Vibração (200x).....	52
Figura 24 – Microdureza (HV) nas regiões do cordão A	53
Figura 25 – Valores médios obtidos nos ensaios de impacto Charpy-V para cada condição .	55
Figura 26 – Micrografia da zona fundida da amostra com soldagem convencional	56
Figura 27 – Micrografia da zona fundida da amostra tratada pelo processo VSR	57
Figura 28 – Micrografia da zona fundida da amostra tratada pelo processo VWC.....	57
Figura 29 – Representação dos pontos nos quais foram calculadas as tensões teóricas no tubo	58

Figura 30 – Distribuição das tensões residuais (<i>springback</i> – efeito da recuperação elástica) em Mpa, no sentido da circunferência do tubo após o Teste Hidrostático	59
Figura 31 – Distribuição das tensões residuais (<i>springback</i> – efeito da recuperação elástica) em função das tensões de escoamento (σ_y) sentido da circunferência do tubo após o Teste Hidrostático	59
Figura 32 – Tensões residuais transversais nas amostras de 3,30mm	60
Figura 33 – Tensões residuais longitudinais nas amostras de 3,30mm	61
Figura 34 – Percentual do alívio de tensões nas amostras de 3,30mm.....	61
Figura 35 – Ensaio de tração para as amostras tratadas vibracionalmente, com diferentes frequências, e para a amostra não tratada	62
Figura 36 – Mapa das tensões área 1 antes do tratamento vibracional.....	63
Figura 37 – Mapa das tensões área 1 após o tratamento vibracional	63
Figura 38 – Mapa das tensões área 2 antes do tratamento vibracional.....	64
Figura 39 – Mapa das tensões área 2 após o tratamento vibracional	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais métodos de medição de tensão residual.....	34
Tabela 2 – Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais, levando em consideração os problemas do material e os problemas geométricos da região analisada.....	35
Tabela 3 – Cont. Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais, levando em consideração os problemas do material e os problemas geométricos da região analisada	36
Tabela 4 – Métodos para alívios de tensões residuais	41
Tabela 5 – Valores absolutos das tensões.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	RELEVÂNCIA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	QUESTÃO DA PESQUISA E OBJETIVOS	15
1.2.1	Questão da pesquisa.....	15
1.2.2	Objetivos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	TENSÕES RESIDUAIS	16
2.2	TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM.....	19
2.3	DESENVOLVIMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM UMA JUNTA SOLDADA	23
2.3.1	Regiões da junta soldada	23
2.4	TIPOS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS	27
2.5	TRATAMENTO DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS	37
2.6	ALÍVIO DAS TENSÕES POR VIBRAÇÃO MECÂNICA	39
2.6.1	Tipos de tratamentos de alívio de tensões.....	39
2.6.2	Origem da tecnologia	41
2.6.3	Desenvolvimento da tecnologia	42
2.6.4	Limitações do processo	45
2.6.5	Curvas de ressonância	45
2.6.6	<i>Vibratory Stress Relief (VSR).....</i>	<i>46</i>
2.6.7	<i>Vibratory Weld Conditioning (VWC)</i>	<i>49</i>
3	ESTUDO DE CASOS	51
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	67
4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
4.2	RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	68
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

As tensões residuais são geradas durante os procedimentos de produção, etapa por etapa, e são um dos grandes problemas que a indústria enfrenta. Os estudos sobre as ações das tensões residuais nas características mecânicas dos materiais vem se intensificando nos últimos anos (SANT'ANNA, 2016).

Os procedimentos de soldagem são amplamente empregados na indústria. Sabe-se que a soldagem é o processo de união de metais mais utilizado pela indústria. Os processos de soldagem são aplicados nas mais diversas áreas, tanto em estruturas simples, como em elementos que exigem elevado nível de segurança (SANT'ANNA, 2016; MACHADO, 1996).

A soldagem é o procedimento de produção responsável pela união de materiais mais aplicado na indústria em geral. A união de dois materiais pelo processo de soldagem pode ser realizada das através fusão dos materiais em contato direto, através da fusão dos materiais com adição de outro material fundido, ou através de simples contato, nas fases sólida ou semi-sólida (MACHADO, 1996).

As tensões residuais são as tensões que estão presentes em um corpo mesmo quando todas as cargas externas já foram removidas (KOU, 2002).

As tensões residuais podem ser afetadas por uma série de fatores, como por exemplo, geometria da peça, propriedades e fabricação do material, processo de soldagem utilizado, tratamento térmico pós soldagem realizado, além das condições de serviço (LEGGATT, 2008).

Distorções são causadas pelas tensões residuais, o que causa o comprometimento da integridade do material. Com o estudo das tensões residuais geradas na soldagem, é possível diminuir o custo e o tempo do processo. As tensões residuais são responsáveis por comprometer a segurança da peça (OLIVEIRA, 2015).

Para realizar a medição das tensões residuais em juntas soldadas, são utilizadas técnicas não-destrutivas, como o método de difração de raio-X e o método da difração de nêutron, técnicas semi-destrutivas, como o método do furo cego, e técnicas destrutivas, como o método da remoção de camadas e o método do seccionamento (LUH; HWANG, 1998).

O tratamento por vibração mecânica mostra-se uma alternativa aos tratamentos térmicos, que são amplamente utilizados. O método de vibração mecânica possui um menor custo e menor tempo. As tensões removidas pelo processo de vibração não reaparecem, sendo definitivamente removidas (BRAGA, 2011).

A técnica de vibração mecânica para alívio de tensões residuais teve seu início na década de 1950, porém no Brasil seu início foi no ano de 2001. Esta técnica se mostra eficiente para aliviar tensões internas provenientes dos processos de soldagem. Com o uso da frequência e do tempo adequado, é possível reduzir significativamente as tensões residuais nas estruturas soldadas (JIJIN; LINGONG; CHUNZHEN, 2006).

Recentemente, ampliou-se o estudo das aplicações da vibração mecânica na área da engenharia, como estruturas, turbinas, motores, projetos de máquinas, sistemas de controles e fundações (RAO, 2008).

São utilizados dois métodos de vibração: *Vibratory Weld Conditioning* (VWC) e do processo *Vibratory Stress Relief* (VSR). No primeiro método, a vibração mecânica é realizada simultaneamente ao processo de soldagem. Já no segundo método, a vibração é realizada após o processo de soldagem. Ambos métodos utilizam-se do mesmo tipo de equipamento (ALMEIDA, 2015).

O processo de vibração mecânica resulta em uma melhoria da microestrutura e conseqüentemente das propriedades mecânicas de materiais soldados, por meio do refinamento de grãos. Sabe-se que grãos mais finos podem trazer benefícios às propriedades mecânicas dos materiais (KAINTH; GUPTA, 2015).

1.1 RELEVÂNCIA DA PESQUISA E JUSTIFICATIVA

O avanço da tecnologia nos processos de fabricação mostra-se necessário na indústria, para gerar produtos com um menor dano ambiental, menor custo e maior produtividade.

Os processos de soldagem são amplamente aplicados na indústria, com destaque para a indústria automotiva, aeroespacial e microeletrônicos. O processo de soldagem é responsável pelo surgimento de tensões residuais.

As tensões residuais comprometem diretamente a estrutura de um material, sendo responsáveis por alterar, muitas vezes negativamente, as propriedades mecânicas do mesmo. Portanto, é de grande importância o estudo de métodos que reduzam, de forma significativa, as tensões residuais, para preservar a integridade e reduzir o risco de falhas na peça.

O procedimento mais empregado para o alívio de tensões é o tratamento térmico, porém este possui uma série de restrições, como a limitação do tamanho dos fornos, alto uso de energia, tempo extenso de processo e possíveis alterações indesejáveis de determinadas propriedades mecânicas dos materiais. Com o uso da vibração mecânica, esses problemas são

solucionados, pois o equipamento é simples e portátil, sendo possível levar até a peça ou estrutura que necessita do tratamento.

Esta tecnologia ainda não é amplamente pesquisada no Brasil, apesar de se mostrar eficiente e viável.

Este trabalho surge da necessidade de se fazer um estudo comparativo entre os efeitos do uso da vibração mecânica, durante ou após o processo de soldagem, nas tensões residuais.

Com este trabalho, busca-se uma contribuição na literatura na área do uso das vibrações mecânicas para o alívio de tensões residuais em juntas soldadas, visando uma melhoria contínua nos processos de fabricação, em busca de uma maior qualidade dos materiais processados através de uma técnica que não agride o meio ambiente e possui maior viabilidade econômica.

1.2 QUESTÃO DA PESQUISA E OBJETIVOS

1.2.1 Questão da pesquisa

Com base nos conceitos apresentados, questiona-se:

Quais são os efeitos da vibração mecânica para o alívio das tensões residuais em juntas soldadas?

Quais são os benefícios que este método pode trazer para as propriedades mecânicas de um material?

1.2.2 Objetivos

O objetivo do presente trabalho é realizar um estado da arte, através do levantamento teórico, cujo conteúdo contemple material sobre o campo de pesquisa, e, por meio de estudos de casos, material para realização de análises e tomadas de decisão relacionadas ao emprego da técnica de vibração mecânica para o alívio de tensões residuais em juntas soldadas, pelo emprego do processo *Vibratory Weld Conditioning* (VWC) e do processo *Vibratory Stress Relief* (VSR).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TENSÕES RESIDUAIS

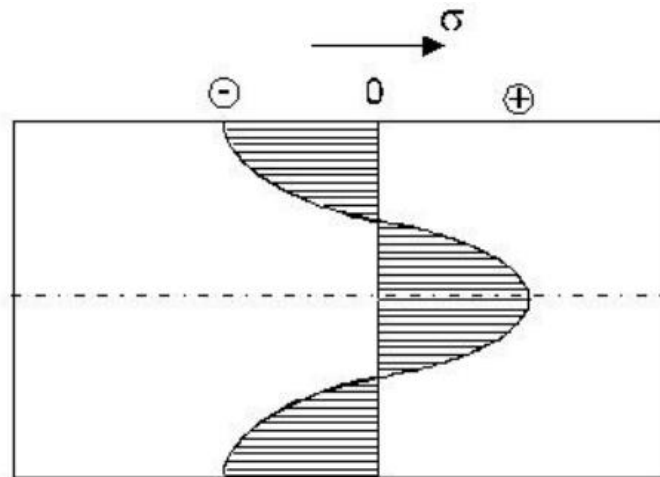
As tensões residuais podem ser definidas como as tensões que permanecem em um material quando todas as cargas externas são retiradas e quando não há um gradiente de temperatura. As tensões residuais podem variar conforme os carregamentos mecânicos que a peça é submetida em seu uso (SOUSA, 2012).

As tensões residuais podem ser causadas por efeitos térmicos, por carregamentos mecânicos ou por transformações metalúrgicas, ou pela combinação desses fatores (SOUSA, 2012). Estas tensões resultam da resposta elástica de determinado material a uma distribuição heterogênea de deformações não elásticas, como por exemplo, deformações causadas por deformações plásticas, expansão térmica, transformação de fases e precipitação (COHEN; NOYAN, 1987).

O estudo das tensões residuais é de extrema importância pois possuem alta influência nas características mecânicas e físicas do material. Não é possível determinar se uma peça possui tensões residuais apenas por observação de sua aparência. A área de abrangência das tensões residuais é utilizada para a sua classificação, podendo ser macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas (SOUSA, 2012; CARVALHO 2004; SALAZAR 2008):

- Macroscópicas, também chamadas de tensões residuais do primeiro tipo: se apresentam distribuídas uniformemente em áreas extensas, podendo atravessar a amostra inteira, portanto, costumam se estender por vários grãos do material. São provenientes de tensões térmicas e de deformações plásticas resultantes de cargas aplicadas no material (CARVALHO, 2004). Segundo Salazar (2008), as tensões macroscópicas são quantidades tensoriais, com direção e magnitude principais, que variam de acordo com a região interna do componente. A escala de tamanho destas tensões pode atingir alguns milímetros, como pode ser observada na Figura 1.

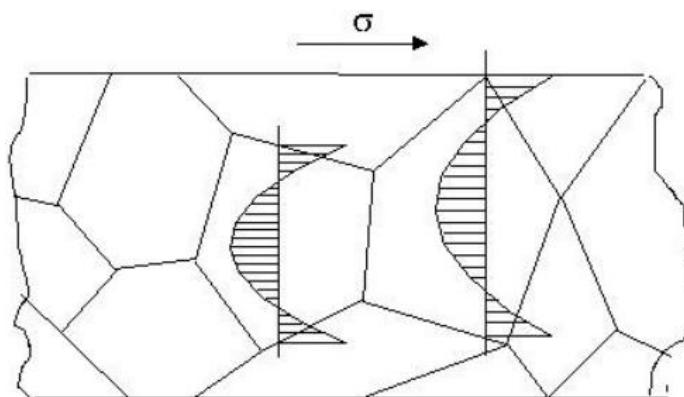
Figura 1: Macrotensões residuais



Fonte: Kraus e Trofimov (1998).

- Microscópicas, também chamadas de tensões residuais do segundo tipo: se estendem uniformemente por áreas pequenas, em um grão ou um grupo de grãos. São provenientes das propriedades anisotrópicas dos grãos e também da desigualdade entre as propriedades térmicas e elásticas dos componentes presentes na composição do material. Segundo Salazar (2008), este tipo de tensão é detectável apenas se ocorrerem uma série de perturbações elementares em diferentes regiões de uma mesma peça. A escala de tamanho destas tensões pode atingir alguns micrometros (Figura 2).

Figura 2: Microtensões residuais

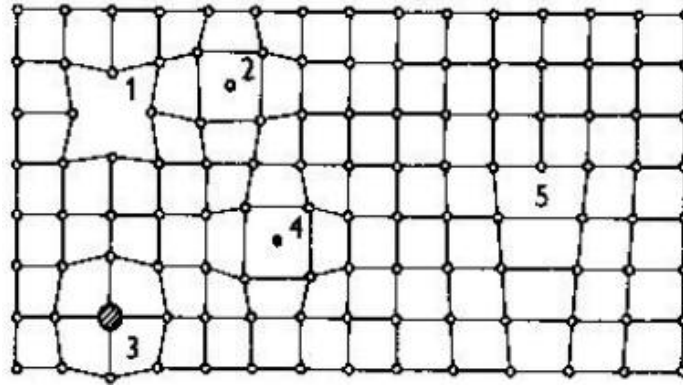


Fonte: Kraus e Trofimov (1998).

- Submicroscópicas, também chamadas de tensões residuais do terceiro tipo: se estendem uniformemente por áreas submicroscópicas, portanto, entre distâncias atômicas no interior dos grãos. São geradas pela presença de defeitos cristalinos presentes no material

(Figura 3), como defeitos de arranjo de rede, contornos de grãos, discordâncias, átomos intersticiais e deslocamentos atômicos (GUROVA, 1997).

Figura 3: Defeitos cristalinos que causam a presença de tensões submicroscópicas



Fonte: Kraus e Trofimov (1998)

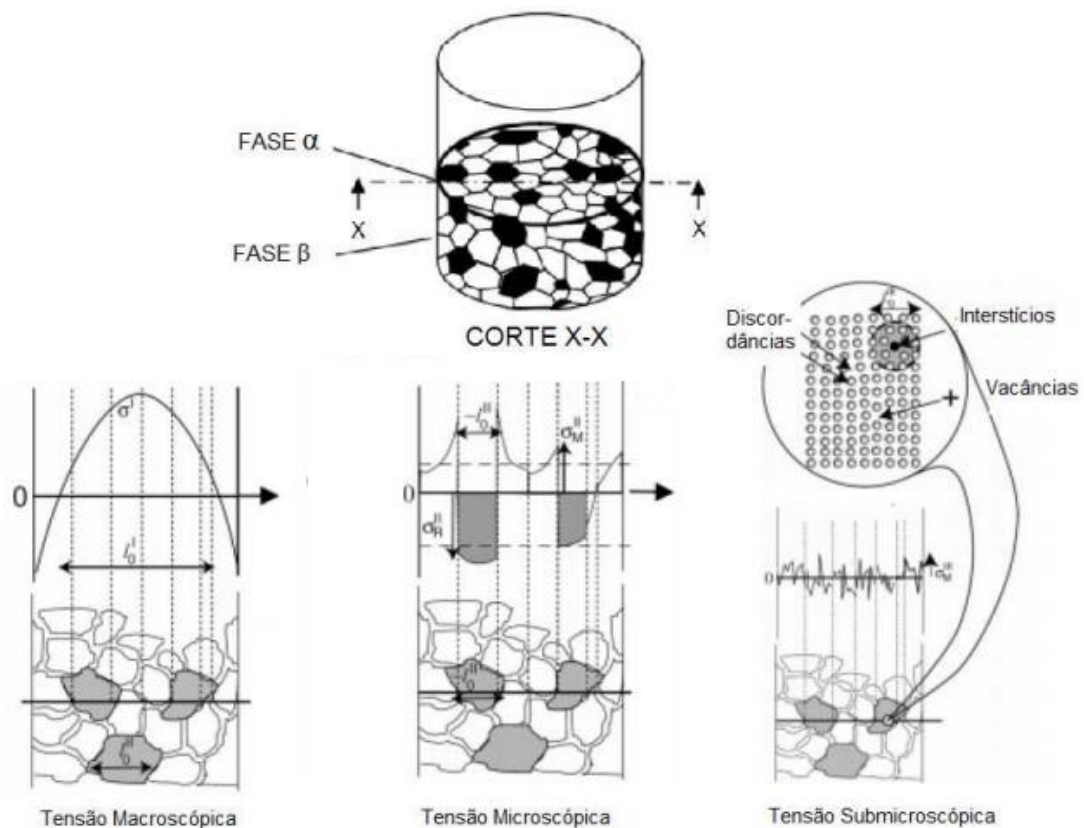
Através da superposição dos três tipos de tensões, é possível determinar a tensão residual em certo ponto de um material, mediante as equações 1 e 2:

$$\sigma_R = \sigma' + \sigma'' + \sigma''' \quad (1)$$

$$\sigma_R = \sum_i^m \sigma^i = \sigma(x, y, z) \quad (2)$$

A Figura 4 a seguir apresenta esquematicamente os três tipos de tensões residuais (macroscópica, microscópica e submicroscópica) e de sua superposição em um material bifásico, que possui em sua constituição as fases α e β , após o processo térmico de têmpera (LISCIC, 2007). Pode-se notar que as tensões residuais do primeiro, do segundo e do terceiro tipo se encontram ao longo do corte x-x de uma seção plana da amostra.

Figura 4: Representação dos três tipos de tensão residual em um material bifásico depois do processo de têmpera



Fonte: Adaptado de Liscic (2007).

2.2 TENSÕES RESIDUAIS EM SOLDAGEM

As tensões residuais são geradas também nos processos de soldagem. Estas tensões residuais se localizam nas juntas soldadas, sem que haja atuação de forças externas, e se formam durante o processo de soldagem (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

No processo de soldagem, ocorre a fusão do metal, e posteriormente, no início da solidificação da poça de fusão, surgem tensões térmicas que se localizam próximas ao cordão de solda. Tal fato ocorre por causa dos gradientes de temperatura, que podem variar de acordo com o tempo e com a posição. No processo de resfriamento da solda, as tensões térmicas ainda não estão estabilizadas e prosseguem variando, sendo limitadas pela tensão de escoamento a quente do material. No processo de resfriamento, até atingir a temperatura ambiente, há também a ocorrência de fenômenos metalúrgicos e mecânicos, como transformação de fase e deformação plástica. Todos esses fatores podem contribuir para o surgimento das tensões residuais na junta soldada (AWS, 1997).

Grande parte dos estudos na área de tensões residuais em soldagem são sobre tensões residuais macroscópicas. As tensões residuais microscópicas e submicroscópicas influenciam as tensões residuais macroscópicas, porém ainda tem-se pouco estudo sobre estas. No processo de soldagem por fusão, há a formação de diversas regiões microscópicas distintas, a depender das condições de aquecimento e posteriormente resfriamento em que o material possui em cada região de sua junta soldada, também a depender da composição química do material, especialmente se é utilizado material de adição na soldagem. É comum que estas regiões microestruturais apresentem grãos de tamanhos distintos, além de fases, morfologia e orientações cristalográficas distintas. Porém, também podem ocorrer defeitos no interior do material, como falta de fusão no material de base, porosidade no interior da zona fundida, falta de penetração e inclusão de escória. (AWS, 1997).

As tensões residuais que se originam devido ao processo de soldagem ocorrem devido a uma série de fatores, como os parâmetros utilizados na execução do cordão da solda, número de passes, geometria, composição química dos metais de base e de adição, entre outros (SOUSA, 2012).

As principais fontes de geração das tensões residuais são a contração, que ocorre no processo de resfriamento do material, a transformação de fases metalúrgicas, a restrição à dilatação térmica, e ao resfriamento, que ocorre de forma desigual, sendo mais rápida nas superfícies da peça soldada (FONSECA, 2000).

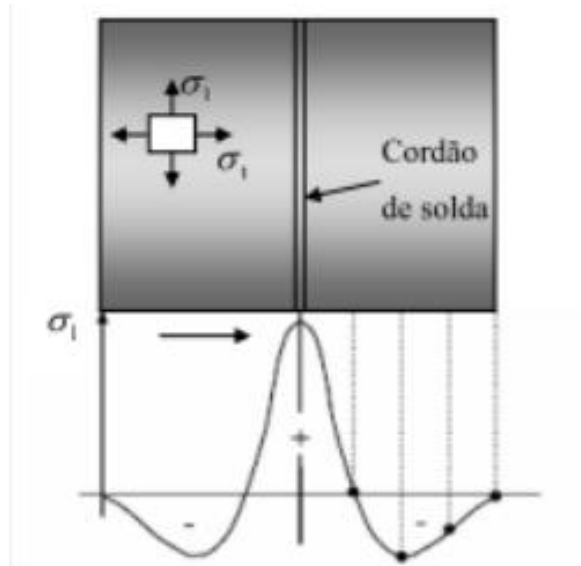
Dentre essas fontes citadas, a que mais contribui para a formação das tensões residuais no processo de soldagem é a contração do material, que ocorre devido ao gradiente de temperatura, onde a região com temperatura elevada é contida pela região de temperatura menos elevada, o que resulta na plastificação do local. Assim, o nível de tensão residual depende também de suas deformações plásticas acumuladas, que variam de acordo com a região da amostra (COHEN; NOYAN, 1987).

As tensões residuais que se originam pela transformação de fases do material são geradas no cordão da solda e na zona termicamente afetada da junta, onde pode-se notar a presença das fases martensita, ferrita e bainita, que decorrem da transformação da austenita. As novas fases formadas possuem um volume específico de valor mais elevado, o que causa uma tendência à expansão. Esta expansão é contida pelo resto do material, e este processo gera tensões compressivas (GUROVA, 1997).

As tensões residuais que se originam por consequência do resfriamento, que ocorre de forma mais rápida nas superfícies do material soldado, possuem caráter heterogêneo ao longo da espessura da peça, principalmente em peças de maior espessura. Este gradiente de

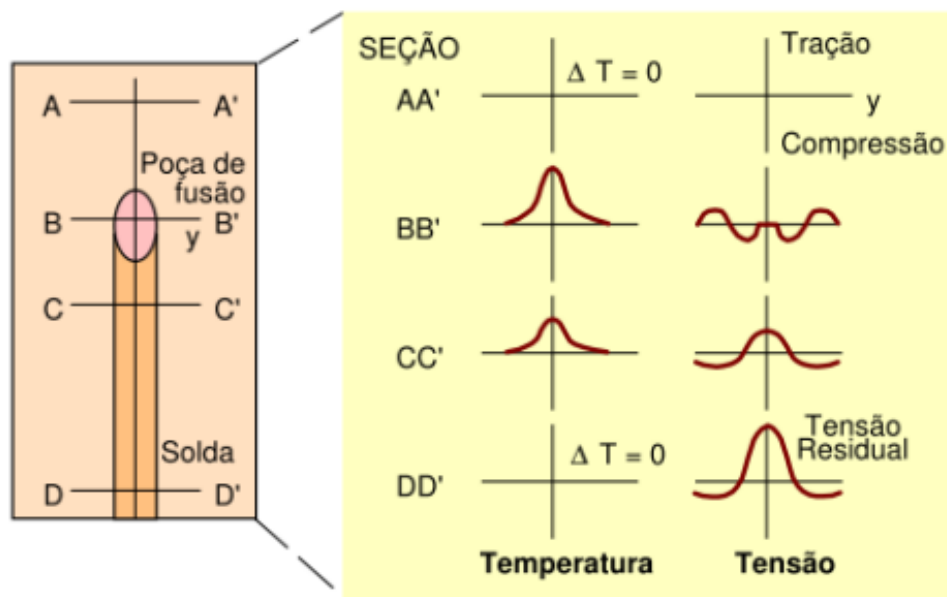
temperatura que se é gerado devido a um resfriamento desuniforme resulta em uma deformação plástica localizada, que dão origem em tensões compressivas na superfície e tensões trativas no interior da peça (Figuras 5 e 6) (SOUSA, 2012).

Figura 5: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada



Fonte: Sousa (2012).

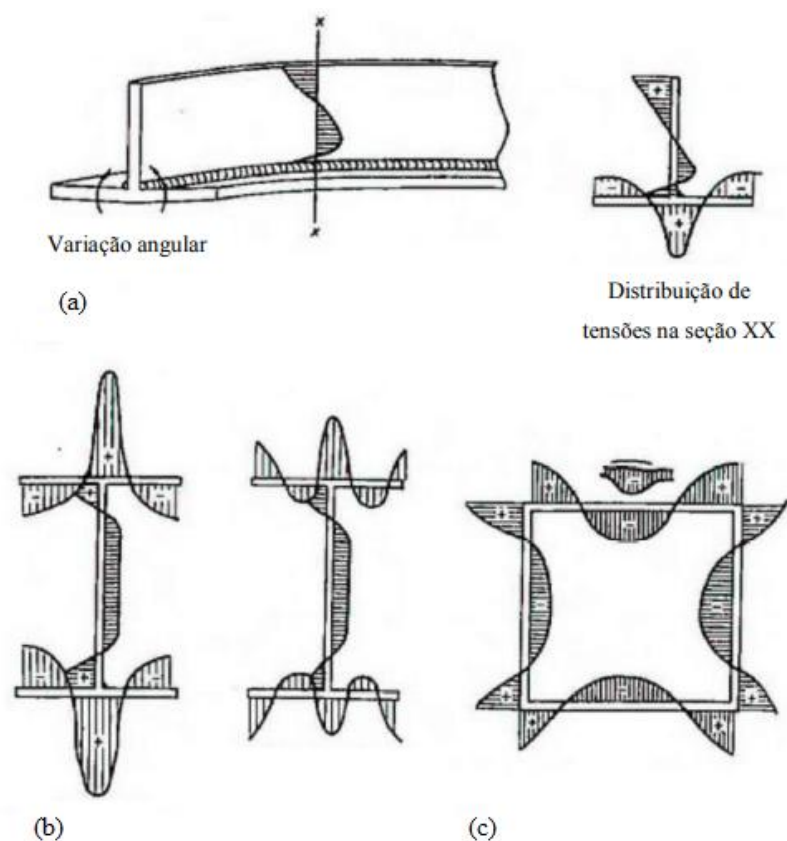
Figura 6: Representação esquemática da relação entre tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem



Fonte: Modenesi (2008).

As tensões residuais resultantes do processo de soldagem podem resultar na produção de distorções, além de possivelmente diminuir o tempo de vida útil da peça. As distorções são ocasionadas devido à desuniformidade do resfriamento da região soldada, gerando a contração em determinada área, que causa a presença de tensões na secção do cordão de solda. As tensões elásticas que surgem devido a essas tensões, provocam distorções no material. Tanto a distorção, quanto as tensões residuais, influenciam no comportamento dos materiais. Portanto, as tensões residuais podem contribuir significativamente nas falhas por fadiga do material. As tensões residuais em soldagem de chapa mais comuns estão representadas na figura 7 a seguir (ASM, 2000):

Figura 7: Tensões residuais típicas em soldagem de chapas



Fonte: Adaptado de ASM (2000).

A figura 7 aborda acerca das tensões residuais típicas em soldagens de chapas, entre elas, estão: (a) perfil "T". (b) perfis "H". (c) caixa soldada. Tensão de compressão (-); tensão de tração (+) (ASM, 2000).

2.3 DESENVOLVIMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM UMA JUNTA SOLDADA

São encontradas tensões e deformações em todas as peças que passam pelo processo de solda, seja ele qual for. Uma parcela da deformação é determinada pelas tensões permanentes, enquanto a outra parcela é determinada pelas tensões residuais. O tipo de processo de soldagem utilizado possui uma grande influência nas tensões e deformações que a peça final tem (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

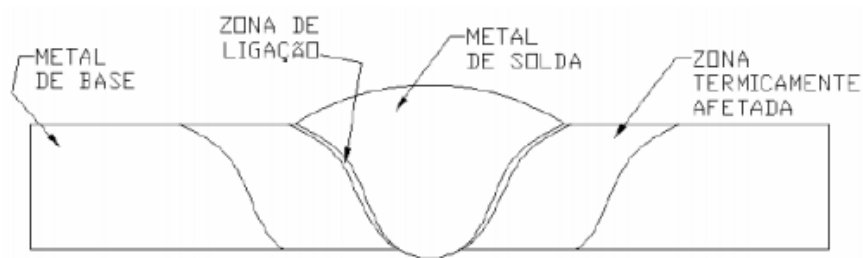
No processo de soldagem, no início do cordão de solda, ocorre o aquecimento que gera a fusão dos metais. Este aquecimento se dá de forma desuniforme, pois é localizado. O tempo e a temperatura utilizados faz com que o nível das tensões atinja um valor próximo do limite de escoamento do material. As tensões residuais que se encontram próximas ao limite de escoamento podem diminuir a vida útil da peça ou estrutura soldada, pois podem causar trincas e redução dos valores de resistência à fadiga (MISCHENKO; SCOTTI, 2018; OLIVEIRA, 2015).

No depósito de um cordão de solda em uma chapa, é possível notar, em determinados casos, uma curvatura resultante do processo de distorção. A curvatura se dá pelo encurtamento do material base adjacente ao cordão de solda. Como o aquecimento ocorre de forma desuniforme, formando assim um gradiente de temperatura, o cordão tende a encurtar mais que o material base, o que induz uma tensão residual trativa no cordão e uma flexão residual na chapa, o que causa a compressão das fibras adjacentes. Os pesquisadores ainda não entraram em acordo sobre em qual regime as tensões residuais se originam. Uma parte dos pesquisadores o classificam como regime elástico, outra parte como regime plástico, e a outra parte como uma mistura de regime plástico e regime elástico, denominado regime elasto-plástico (OLIVEIRA, 2015; SOUSA, 2012).

2.3.1 Regiões da junta soldada

Nas juntas soldadas, pode-se classificar as regiões de acordo com sua microestrutura. As regiões são (Figura 8): zona fundida, também chamada de metal de solda, zona termicamente afetada (ZTA), também chamada de zona afetada pelo calor (ZAC) e zona de ligação. A composição química do metal de adição e do metal de base, além das condições térmicas que o processo foi realizado, influenciam nas características microestruturais das regiões (MACIEL, 2014).

Figura 8: Representação esquemática de uma junta soldada



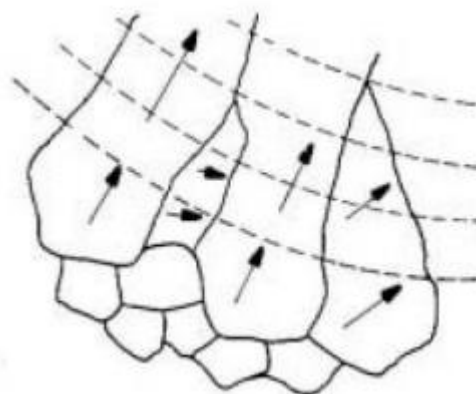
Fonte: Maciel (2014).

- Zona fundida

A zona fundida, também chamada de metal de solda, é a região onde ocorre a fusão de solda e a diluição entre o metal de solda e o metal de base, no processo de soldagem.

Nesta região ocorre o crescimento competitivo de grãos. No processo de solidificação, há uma tendência dos grãos crescerem em direção perpendicular à interface líquido/sólido, que é a direção do gradiente máximo de temperatura, e assim, é a direção da força máxima para o processo de solidificação do metal. Porém, há grãos que crescem na sua direção preferencial de crescimento. Durante o processo de solidificação, os grãos que possuem maior tendência de crescimento na direção do gradiente máximo de temperatura acabam barrando o crescimento de outros grãos, que não tem sua orientação de crescimento voltada para o gradiente máximo de temperatura (Figura 9) (KOU, 1987).

Figura 9: Crescimento dos grãos em relação ao gradiente máximo de temperatura



Fonte: Kou (1987).

- Zona Afetada pelo Calor

A Zona Afetada pelo Calor (ZAC) é a região do metal de base que não foi fundida, e que teve sua microestrutura, e consequentemente suas propriedades, alteradas, devido ao ciclo térmico de soldagem. Na Zona ZAC as temperaturas de pico são superiores à temperatura crítica do material, e inferiores à temperatura de fusão (MARQUES, 2009).

No processo de soldagem, a Zona Afetada pelo Calor passa por dois ciclos térmicos, na presença de variações de temperaturas de pico ao longo da de toda ZAC, o que gera diferentes níveis de tensão residual ao longo da junta (MARQUES, 2009).

A Zona Afetada pelo Calor, assim como o metal de solda e as regiões que foram afetadas pelo gradiente de temperatura, possui tenacidade à fratura menor do que o metal de base, o que aumenta o risco de fraturas. A resistência à fratura na Zona Afetada pelo Calor pode ser alterada por meio de uma alteração nas propriedades microestruturais do metal de base (MOREIRA, 2008).

As regiões da zona termicamente afetada e da linha central da solda sofrem alterações microestruturais relacionadas ao metal de base. A microestrutura nesta região torna-se mais grossa do que microestrutura do metal de base. Portanto, a microestrutura na linha central é a da zona termicamente afetada, em ambos os lados da linha de junção, tendo como fator de diferenciamento o tamanho dos grãos. O tamanho de grão na região da solda é maior e diminui conforme se afasta da junta de solda até o metal de base (GOMES FILHO, 2007).

As propriedades químicas na Zona Afetada pelo Calor não podem ser modificadas, como na zona fundida, portanto, utiliza-se elementos de liga, como aços com teores de carbono, para adequar as propriedades mecânicas necessárias (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Segundo Mondenesi, as regiões da zona termicamente afetada pode ser classificadas, de acordo com a sua granulação, em: região de granulação grosseira, região de granulação fina, região intercrítica e região subcrítica (GOMES FILHO, 2007).

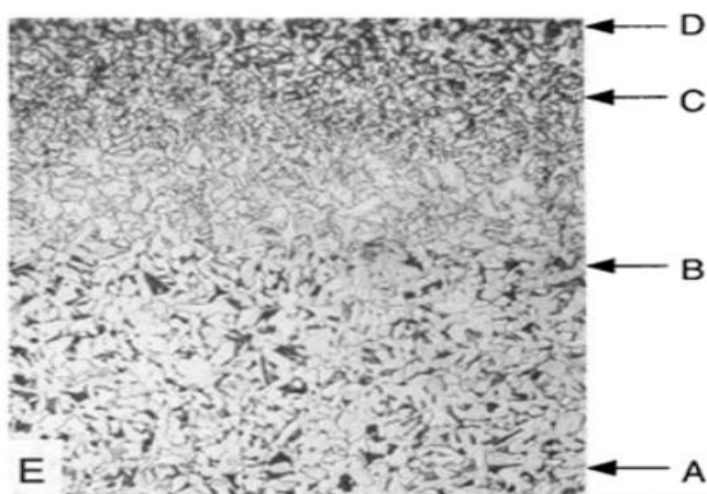
A região de granulação grosseira possui um grande tamanho de grão austenítico e se forma junto à linha de fusão. Costuma ser uma região crítica na zona termicamente afetada, pois possui elevada dureza e perda de tenacidade, o que a torna mais suscetível à trincas. Possui microestrutura com elevado nível de componentes aciculares, como martensita e bainita, o que ocorre pelo aumento que ocorre na temperabilidade da área. (MODENESI, 2012).

A região de granulação fina possui microestrutura ferrítica e/ou perlítica grãos pequenos, pois não foi atingida por todo o calor aplicado no processo. Esta região possui altos valores de tenacidade e resistência mecânica. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

Na região intercrítica, apenas uma parte da estrutura se transforma em austenita, e acaba se decompondo ao decorrer do processo de resfriamento. Isto ocorre devido a uma maior distância da região de foi fundida. Em regiões com o teor de carbono seja maior do que o teor médio do aço e o esfriamento ocorra de forma rápida, pode-se notar a formação de martensita, portanto, esta região apresenta áreas de alta dureza e áreas de baixa dureza (MODENESI, 2012).

Já a região subcrítica (Figura 10) é a área mais afastada na zona fundida, e sofre uma pequena esferoidização das lamelas de cementita da perlita, o que pode causar uma redução na resistência mecânica. Tal fato não é simples de comprovar com os ensaios de tração, pois a esferoidização ocorre apenas em uma pequena faixa do material (WAINER., 1983).

Figura 10: Região subcrítica



Fonte: Kou (2003)

A Figura 10, evidencia o interior da região subcrítica, em que pode ser compreendida em: (A) Região do metal base, (B) região intercrítica, (C) região de granulação fina e (D) região de granulação grosseira (KOU, 2003). A Figura 11 por sua vez, retrata as microestruturas típicas da zona termicamente afetada em aços de carbono, bem como suas etapas de evolução mediante a sua exposição no calor:

Figura 11: Microestruturas típicas da zona termicamente afetada de aços carbono



Fonte: Wainer (1992).

- Zona de ligação

Na zona de ligação, o metal de base sofre fusão parcial durante o processo de soldagem. É nesta região que se dá o início da solidificação do metal de solda, e conseqüentemente, o crescimento dos grãos, que se direcionam para a região central da solda, o que forma o metal de solda. Este crescimento é chamado de epitaxial (KOU, 1987).

2.4 TIPOS DE MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS

O *Handbook of Measurement of Residual Stresses* foi editado pelo pesquisador francês Jian Lu, em 1996, com o auxílio de pesquisadores de diversos países, e descreve vantagens e desvantagens de cada método, além de técnicas e procedimentos experimentais, tornando-se uma referência utilizada amplamente nos estudos na área (LU, 1996).

No início das pesquisas relacionadas às tensões residuais, eram utilizadas técnicas destrutivas para as medições destas tensões. Com o passar do tempo, os métodos foram aprimorados, e atualmente tem-se que apenas uma técnica de medição não deva abranger todas as situações, porém, a combinação entre as técnicas gera um resultado confiável (SUTERIO, 2005).

A tensão residual não é medida de forma direta, e sim é obtida através da medição da

deformação ou de grandezas secundárias, como o ruído magnético ou a velocidade ultrassônica (WITHERS *et al.*, 2008).

São utilizadas três técnicas de medição das tensões residuais: Destrutivas, semi destrutivas e não-destrutivas. Na técnica destrutiva, há o comprometimento ou impossibilitação do uso de corpo de prova. Na técnica semi destrutiva, ocorre avaria e o não comprometimento da integridade do componente. Já na técnica não-destrutiva, não há danos para medição das tensões residuais. O valor da tensão é não é medida de maneira direta em nenhuma destas três técnicas (SUTERIO, 2005).

Pode-se também dividir as técnicas em aplicáveis em condições de serviço e aplicáveis em condições experimentais. As técnicas aplicáveis em condições de serviço são as mais comumente utilizadas, e são: raio-x, ultrassom, furo cego, difração de neutrôns e holografia. Já as técnicas aplicáveis em condições experimentais são: fotoelasticidade, extensometria, e técnicas de moiré. As técnicas experimentais são dispendiosas, se restringem a poucos tipos de materiais e fornecem valores em poucos pontos (WITHERS *et al.*, 2008).

- Método do furo cego

Na técnica de furo cego, também conhecida como *Hole Drilling*, é realizada a usinagem de um furo pequeno na peça. As deformações que ocorrem na superfície são captadas por extensômetros elétricos. As tensões residuais podem ser calculadas, a partir dos valores das deformações medidas pelos extensômetros, através do uso de formulações numéricas (KANDIL, 2001).

No método do furo cego, um extensômetro é acoplado próximo à região em que o furo será usinado, com a função de medir a deformação que é originada pelo alívio de tensões gerados no processo de usinagem. Por meio de equações, que utilizam a teoria da elasticidade, é possível relacionar as deformações com as tensões residuais. O método do furo cego tem ampla utilização na indústria (LU; CHEN; NI, 2007).

Esta técnica é considerada semidestrutiva, pois o dano causado, ou seja, o furo, é muito localizado, portanto não compromete o funcionamento do equipamento, na maioria das vezes (KANDIL, 2001).

A primeira etapa desta técnica é a preparação da superfície, seguida da colagem, cabeamento e do teste das roscas. Então, é realizado o alinhamento da guia de furação, seguido do balanceamento calibração. Posteriormente, é realizada a execução do furo, seguido do tratamento dos dados, pela norma ASTM E837 (KANDIL, 2001).

As tensões residuais que atuam nos planos ortogonais r e θ que passam por um ponto $P(r, \theta)$ qualquer, em uma placa em estado biaxial de tensões, definido pelas tensões principais σ_1 e σ_2 , podem ser expressas através das seguintes equações 3, 4 e 5 :

$$\sigma_t = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} * \cos(2\theta) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} * \cos(2\theta) \quad (4)$$

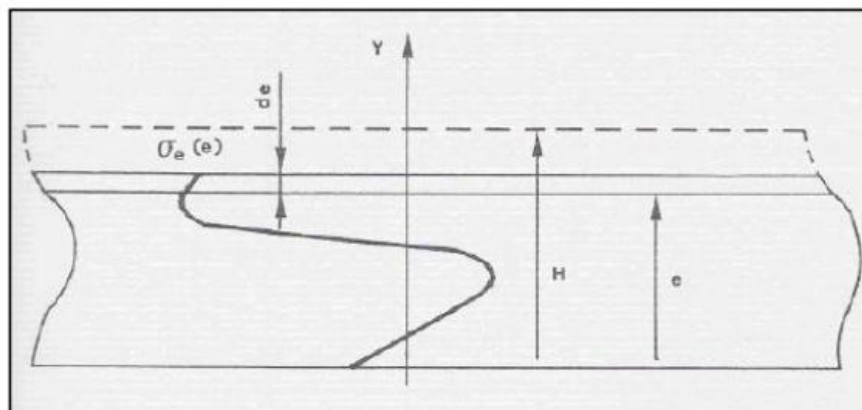
$$\tau_{t\theta} = -\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} * \sin(2\theta) \quad (5)$$

- Método da remoção de camadas

O método de remoção de camadas, também chamado de método da deflexão, consiste na extração de camadas de uma amostra com tensões residuais e na realização de medições de deformação, relacionando-as com a tensão depois da remoção sucessiva de cada camada. Esta técnica é geralmente utilizada em componentes planos (FLAVENOT, 1996).

A peça possui um perfil de distribuição de tensões, no qual as forças internas e os momentos se encontram em equilíbrio, como mostra a figura a seguir (FLAVENOT, 1996):

Figura 12: Distribuição de tensões residuais no método de remoção de camadas



Fonte: Flavenot (1996).

A deflexão pode ser relacionada às tensões residuais que já existiam na camada usinada, através da equação 6:

$$\sigma(e) = -\frac{4}{3}E \frac{e^2}{L^2} \frac{df}{de} \quad (6)$$

onde:

E – módulo de elasticidade de material;

de – espessura da camada sendo usinada;

e' – espessura do componente antes da remoção de uma camada cuja espessura é de;

e – espessura do componente depois da remoção de uma camada cuja espessura é de;

L0 – comprimento sob o qual a deflexão está sendo medida;

f – deflexão;

df – variação da deflexão produzida pela usinagem de uma camada de espessura de.

• Método do seccionamento

O método do seccionamento é similar à técnica da remoção de camadas. A criação de superfícies livres permite deformação do componente. As tensões residuais são obtidas através medição da abertura da chapa (UEDA, 1996).

O seccionamento pode ser efetuado em diversas regiões, até não haver mais relaxamento das tensões (AZAROFF, 1968).

Pode-se medir as tensões de várias formas por esta técnica. É comum o emprego do relaxamento das tensões ou deformação inerente, e pode-se notar a incompatibilidade entre a fonte da tensão residual e a deformação. Tensões residuais térmicas, também denominadas deformações inerentes, podem ocorrer quando uma amostra livre de tensões é submetida a uma mudança da temperatura (UEDA, 1996).

As tensões residuais são mensuradas através da medição da abertura da chapa. Pode-se relacionar a tensão longitudinal à abertura, δ , através da equação 7:

$$\sigma_1 = \frac{Et\delta}{2L^2(1 - \nu^2)} \quad (7)$$

onde:

E – módulo de elasticidade;

ν – coeficiente de Poisson;

t – é a espessura do componente .

- Método da difração de raios-X

O método de difração de raios-X determina as tensões residuais por meio o estudo da natureza da estrutura cristalina dos materiais. Este método considera espaçamento entre os planos da rede cristalográfica como parâmetro de medida de deformação (AZAROFF, 1968).

Este método baseia-se na Lei de Bragg, na qual para determinado comprimento de onda (λ) existe apenas um espaçamento (d) entre planos atômicos paralelos, denominado distância interplanar, e um ângulo (θ), que é denominado ângulo de interferência construtiva (FONSECA, 2000).

Os princípios básicos desta técnica são embasados na teoria da difração de raios-X em materiais cristalinos e na teoria da elasticidade do material sólido.

Com a distribuição regular dos átomos na amostra, as ondas tendem a interferir entre si de forma semelhante à difração de luz visível. Se a condição implicada pela lei de Bragg for implicada, as intensidades destas ondas se somam segundo uma interferência construtiva, como a equação 8 a seguir demonstra:

$$2d\sin\varphi = n\lambda \quad (8)$$

onde:

d – distância interplanar;

φ - ângulo entre feixe incidente e o plano difrator;

λ - comprimento de onda,

n – um inteiro.

- Método da difração de nêutrons

O método da difração de nêutrons possui o mesmo fundamento da difração de raios-X, que é mensurar a variação da distância interplanar ocasionada pela presença de tensões, sendo estas residuais ou não (FONSECA, 2000).

A Lei de Bragg também é utilizada neste método para relacionar distâncias atômicas e deformação (FONSECA, 2000).

A profundidade de penetração dos feixes de nêutrons é maior do que os feixes de raios-

X. Portanto, esta técnica permite medições em maiores profundidades do que a difração de raios-X (HOLDEN, 1996).

Esta técnica utiliza um reator nuclear como fonte de nêutrons, o que dificulta sua aplicação em campo. Porém, seus resultados em laboratório são altamente eficientes (FONSECA, 2000).

A relação entre os parâmetros envolvidos e a lei de Bragg é representado pela equação 9:

$$\lambda = \frac{hT}{mL} = 2d\sin\varphi \quad (9)$$

onde:

h – constante de Planck;

m – massa do nêutron;

L – distância da fonte até a o detector.

- Método ultrassônico

O método ultrassônico tem como fundamento a variação da velocidade propagação de ondas em um meio devido a presença de tensões (HOLDEN,1996).

Esta técnica é responsável por medir o nível de tensões residuais por meio da variação da velocidade da onda ultrassônica, ao percorrer determinado material tensionado e pelo estabelecimento da constante acusto-elástica do material inspecionado, relação ao material livre de tensão (RAJ, 1997).

Neste método, é utilizado um transdutor, responsável pela emissão de ondas, que atravessam determinada região do materia e são detectadas por outro transdutor (RAJ, 1997).

A variação da velocidade propagação de ondas em um meio devido a presença de tensões residuais pode ser descrita através da equação 10:

$$V = V_0 + K\sigma \quad (10)$$

onde:

V0 – velocidade de propagação da onda no meio isento de tensões;

σ – tensão atuante;

K – constante elastoacústica , parâmetro que depende do material.

- Método magnético

O método magnético tem como fundamento a anisotropia magnética que é ocasionada devido ao campo de tensões. Com a ação destas tensões, o campo magnético induzido inicialmente é alterado. Tal alteração pode ser convertida em valores de tensão, através do efeito de ruído Barkhausen (RAJ, 1997).

Esta técnica é empregada em materiais ferromagnéticos e em varreduras em peças que estão sob carregamento, para identificar os locais com maiores valores de tensão, porque os sinais são muito influenciados pela microestrutura e pela condição das tensões que estão presentes (RAJ, 1997).

No método magnético, utiliza-se duas técnicas diferentes: a técnica do ruído de Barkhausen e a técnica da magneto-estricção. A técnica do ruído de Barkhausen baseia-se na mudança na microestrutura magnética, que é gerada pela presença de tensões. Já a técnica da magneto-estricção baseia-se nas medições da indução magnética e da permeabilidade do material (FONSECA, 2000)

O método magnético pode ser aplicado para medir as tensões residuais de peças usinadas, nas quais geralmente as tensões são limitadas pela camada superficial das peças, que pode ser notado nas Tabelas de 1 a 3 (FONSECA, 2000).

Tabela 1: Principais métodos de medição de tensão residual

CLASSIFICAÇÃO	PRINCIPAIS MÉTODOS	COMENTÁRIOS
Semi-destrutivos	Método do furo cego	Execução de um furo de 0,8 a 3,2 mm de diâmetro. Método normalizado pela ASTM-E-837
Destrutivos	Método da remoção de camadas (Método da deflexão)	Camadas retiradas por ataque químico. Pode estar aliada ao Método difração de raio x.
	Método do seccionamento	Cortes parciais longitudinais ou transversais ao eixo de peças assimétricas, ex.: cilindros
Não-destrutivos	Método da difração de raio x	Variação das distâncias entre os planos atômicos. Técnica normalizada pela SAE-J784a
	Método da difração de nêutrons	Semelhante ao método de difração de raio X, no entanto, com inspeção em todo o volume
	Método ultrassônico	Variação da velocidade de ondas ultrassônicas no interior do material.
	Método magnético	Relação entre propriedades magnéticas, permeabilidade, indução e efeito Barkhausen.

Fonte: Suterio (2015).

Tabela 2: Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais, levando em consideração os problemas do material e os problemas geométricos da região analisada

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnético
Hipoteses básicas	Tensão biaxial e uniforme na superfície do furo	Tensão biaxial e uniforme de um retângulo de dimensões grandes em relação a espessura	Campo de tensão 3-D	Padrão: material policristalino de grãos finos, isotrópico e homogêneo	Material policristalino, isotrópico e homogêneo	Material isotrópico e homogêneo, tensão homogênea no caminho acústico entre o transmissor e o receptor	Material ferromagnético
Tipos de tensões residuais analisadas	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica	Macroscópica Microscópica sub-microscópica	Macroscópica Microscópica sub-microscópica
Parâmetros medidos	Deformação ou deslocamento superficial	Deformação ou deflexão	Deformação ou deslocamento superficial	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Mudança no espaçamento interplanar do material policristalino	Variação da velocidade da onda ultrasônica	Amplitude de ruído Barkhausen ou permeabilidade magnética
Área de análise mínima (uso padrão)	0,5 mm ²	1000 mm ² 100 mm ²	100 mm ²	0,5 mm ²	4 mm ²	0,1 mm ² (método da alta frequência) 30 mm ² (método convencional)	1 mm ² (método de Barkhausen) 100 mm ² (método de permeabilidade magnética)
Profundidade mínima de análise	20 µm	20 µm	1 a 2 mm	Dezenas de micrometros	1 mm	15 µm a 300 µm	100 µm
Custo do equipamento [US\$]	10.000 a 50.000	1.000	15.000	100.000 a 200.000	Alguns milhões	40.000 a 200.000	10.000 a 60.000
Incerteza típica	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 MPa	± 20 MPa	± 30 MPa	± 10 a 20 MPa	± 10 a 20 MPa
Profundidade de inspeção	0,02 a 15 mm	0,1 a 3 mm	Todas profundidades dentro de 1 mm	1 a 50 µm	2 a 50 mm	0,15 a 3 mm	0,1 a 1 mm

Fonte: Lu (1996).

Tabela 3: Cont. Comparação de diferentes técnicas de medição de tensões residuais, levando em consideração os problemas do material e os problemas geométricos da região analisada

Descrição	Furo cego	Deflexão	Seccionamento	Difração de Raio X	Difração de Nêutrons	Ultra-som	Magnético
Problemas para o caso de estrutura e grãos grandes	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim
Sensibilidade à deformação ao encruamento	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Média	Alta	Alta
Análise em material de múltipla fase	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases	Tensão em cada fase se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão em cada fase se a menor fase exceder uma certa fração de volume	Tensão média em todas as fases	Tensão média em todas as fases ferromagnéticas
Medidas de materiais amorfos	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnético
Medidas em partes com baixo raio de curvatura	Possível, $r > 5$ mm	Possível com método de "Sachs"	Difícil	Possível, $r > 5$ mm	Possível, medidas abaixo da superfície	Difícil, necessidade de sensor especial	Possível, $r > 5$ mm
Medidas de materiais amorfos	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnético
Medidas de materiais amorfos	Possível	Possível	Possível	Impossível	Impossível	Possível	Possível em fases ferromagnético
Medidas em partes com baixo raio de curvatura	Possível, $r > 5$ mm	Possível com método de "Sachs"	Difícil	Possível, $r > 5$ mm	Possível, medidas abaixo da superfície	Difícil, necessidade de sensor especial	Possível, $r > 5$ mm
Medidas em camadas (espessuras da camada)	Maior que 50 μ m	2 a 3 μ m	Maior que 2 mm	Todas as espessuras	Maior que 2 mm	0,1 a 3 mm	0,01 a 1 mm

Fonte: Lu (1996).

2.5 TRATAMENTO DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Dois métodos são utilizados para realizar o alívio das tensões residuais. O primeiro, é o tratamento térmico, que é o mais utilizado e consolidado, podendo ser normatizados, a depender da aplicação. O segundo, é o tratamento mecânico, que é o principal foco do presente estudo, que se dá através de vibrações induzidas (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

Durante o processo de alívio de tensões ocorre o escoamento de material por meio da redução das restrições de movimento das linhas de discondâncias, por meio de vibrações, aplicação de calor ou eliminação das restrições mecânicas (BIANCALANA NETO, 2016).

O tratamento térmico utilizado em metais é um conjunto de operações que envolvem aquecimento, determinado tempo de permanência em uma dada temperatura e um posterior resfriamento, sob condições controladas, que resultam em mudanças nas suas propriedades (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

Os principais tipos de tratamentos térmicos relacionados à soldagem são:

- Recozimento

O recozimento é o processo de aquecer o material até uma determinada temperatura onde ocorre a recristalização e/ou transformação em uma nova fase. Durante a fase de aquecimento, a austenita é homogeneizada. Este tratamento resulta em um material com menor dureza, melhor usinabilidade, além de aliviar tensões internas, remover o encruamento e homogeneizar a microestrutura da peça. Este processo também facilita o trabalho a frio. Existem quatro tipos de recozimento: recozimento pleno, recozimento isotérmico, recozimento subcrítico e recozimento intercrítico (também chamado de esferoidização) (BIACALANA NETO, 2016).

- Normalização

A normalização é o processo de aquecer o material a uma temperatura um pouco acima da temperatura de austenitização, seguido de resfriamento em ar parado ou agitado. O resultado deste tratamento é um grão mais refinado, o que proporciona uma maior resistência mecânica do material. É indicado antes da têmpera e do revenimento (SOUSA, 2012).

- Revenimento

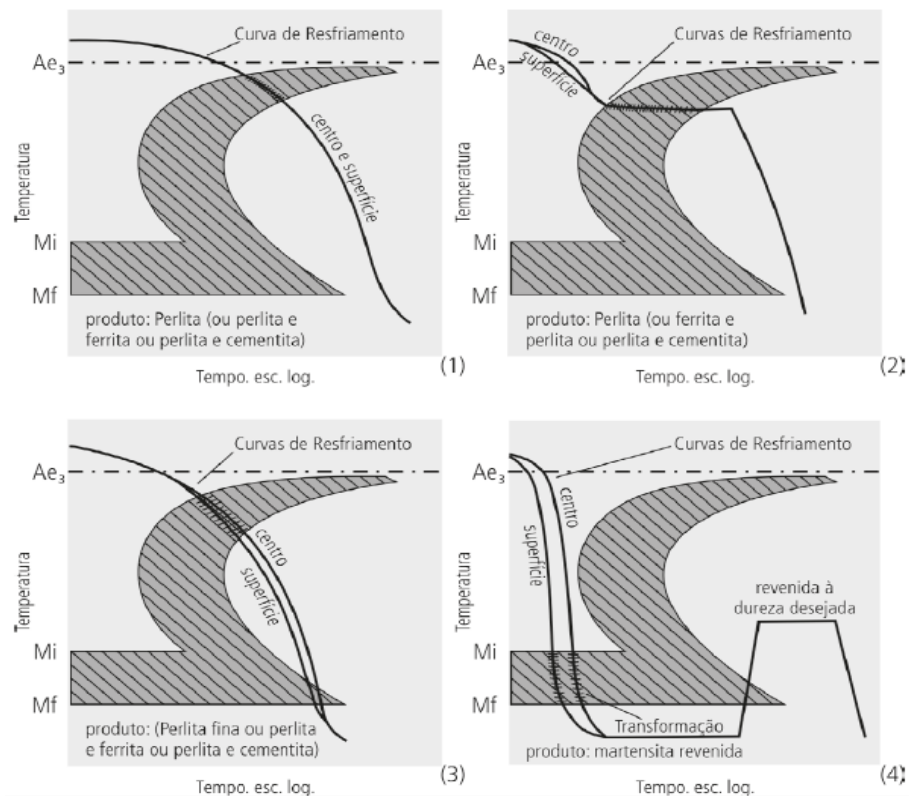
O revenimento é um tratamento que consiste no aquecimento do material em temperaturas entre 450° a 750°C, onde o mesmo é mantido por um determinado período de tempo, seguido de um resfriamento controlado. Este processo tem como resultados alívio das tensões internas e o aumento da tenacidade (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

- Têmpera

A têmpera é o tratamento térmico (Figura 15) no qual eleva-se a temperatura de um metal até que ele atinja uma completa austenitização, seguido de um resfriamento rápido, para que haja a formação da fase martensítica. Com este processo, há o aumento da dureza e do limite de resistência à tração mecânica (MISCHENKO; SCOTTI, 2018).

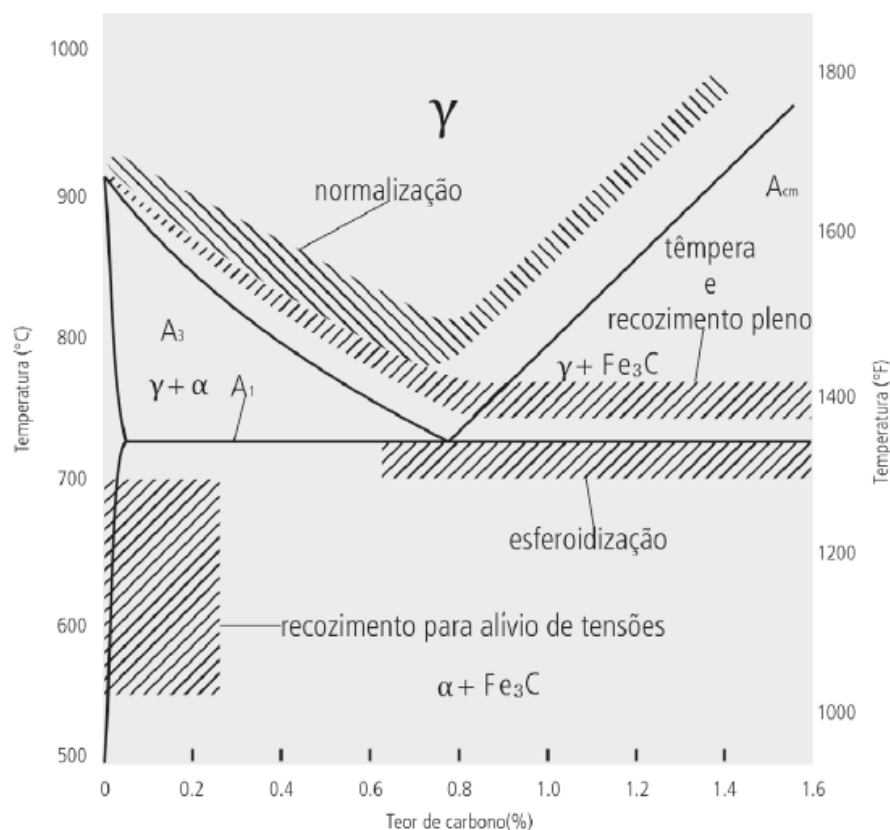
A Figura 13 apresenta as Curvas TTT (tempo-temperatura-transformação) dos tratamentos de recozimento pleno (1), recozimento isotérmico (2), normalização (3) e têmpera seguida de revenimento (4) para um aço-carbono eutetoide.

Figura 13: Curvas TTT (tempo-temperatura- transformação)



Fonte: Vendramine (2012).

Figura 14: Faixas de temperaturas usuais de alguns tratamentos térmicos de aços



Fonte: Oliveira (2007).

2.6 ALÍVIO DAS TENSÕES POR VIBRAÇÃO MECÂNICA

2.6.1 Tipos de tratamentos de alívio de tensões

Pode-se aliviar as tensões residuais por duas maneiras. A primeira é o tratamento térmico, que é o método mais utilizado, e em determinados casos, são normatizados. A segunda maneira é o tratamento mecânico (STRIFE; PASSOJA, 1980).

Durante o alívio de tensões, ocorre o escoamento de material por meio da redução das restrições de movimentação das linhas de discordância presentes na estrutura, o que pode ocorrer por meio das vibrações, por meio do aumento da temperatura, que reduz o limite de escoamento, ou por meio da eliminação das restrições mecânicas (SUN; SUN; WANG, 2004).

Os tratamentos térmicos pós processo de soldagem tem como objetivo o revenimento para que a tenacidade aumente e a dureza diminua, o que confere uma melhoria nas propriedades mecânicas, como por exemplo, a resistência à fratura (STRIFE; PASSOJA, 1980). A temperatura atingida, o tempo do processo a composição química e a resistência

mecânica do material são fatores que afetam diretamente a condição do alívio das tensões (BRAGA, 2011).

No processo de alívio de tensões por tratamento térmico, é realizado um aquecimento uniforme e controlado de um metal, que possui tensões residuais, em determinada temperatura, que deve ser inferior à temperatura crítica, por um tempo estabelecido, passando posteriormente por um resfriamento controlado e uniforme, o que consiste no alívio das tensões residuais sem que haja alterações microestruturais (BRAGA, 2011).

Nos tratamentos térmicos, o tempo de aquecimento e a temperatura utilizada dependem da microestrutura inicial do material, de sua composição química, da geometria e do tamanho da peça que recebe o tratamento. O alívio das tensões residuais que se originam devido ao processo de soldagem temperaturas pouco superiores à temperatura ambiente, mas é aconselhável um aquecimento lento até pelo menos 500 °C para garantir melhores resultados (ALMEIDA, 2015).

Após a realização de tratamento térmico, o nível das tensões residuais resultantes depende da taxa de resfriamento utilizada. O ideal é um resfriamento uniforme, pois um resfriamento desuniforme pode gerar tensões adicionais, fazendo com que o tratamento não seja tão eficiente (STRIFE; PASSOJA, 1980).

Os tratamentos mecânicos para alívio das tensões residuais são por meio de martelamento, encruamento ou vibração. No método de martelamento, é realizado o martelamento do metal depositado e suas adjacências, durante o processo de soldagem ou após o mesmo. No método de encruamento, a junta soldada é deformada plasticamente, por meio de aplicação de cargas de tração. Já pelo método de vibração, são aplicadas vibrações na estruturas, que causam uma ressonância de baixa frequência, resultando em uma deformação plástica parcial da estrutura (BRAGA, 2011).

Já os tratamentos térmicos para o alívio das tensões residuais são recozimento para alívio de tensões, recozimento a alta temperatura e alívio de tensões a baixas temperaturas. No recozimento para alívio de tensões, é realizado um aquecimento a 600-700°C para aços ferríticos ou 900°C para aços austeníticos, seguidos de um lento resfriamento. No recozimento a alta temperatura, é realizado um aquecimento a 900-950°C, para aços ferríticos, seguido de um lento resfriamento. Já no alívio de tensões a baixa temperatura, é realizado o aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130 mm (BRAGA, 2011).

A tabela 4 a seguir demonstra os métodos utilizados para o alívio de tensões residuais:

Tabela 4: Métodos para alívios de tensões residuais

Procedimento		Descrição	Características	Limitações
(a)	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem.	Método simples, pode causar refino de grão.	Inadequado para materiais de baixa ductilidade.
	Encruamento	A junta soldada é deformada plasticamente pela aplicação de cargas de tração.	Bastante eficiente para tanques esféricos e tubulações.	Inadequado para estruturas complicadas pela dificuldade de aplicar tensões uniformes.
	Vibração	Vibrações são aplicadas na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência o que ocasiona deformação plástica parcial da estrutura e alívio de tensões.	Operação simples.	Inadequado para chapas grossas ou grandes estruturas. Alívio de tensões não é uniforme.
(b)	Recozimento para alívio de Tensões	Aquecimento a 600 - 700°C (aços ferríticos) ou 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente.	Inaplicável para grandes estruturas edíficil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Recozimento a alta temperatura	Aquecimento a 900-950°C (aços ferríticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Podem eliminar completamente as tensões residuais.	Inaplicável para grandes estruturas edíficil de ser executado no campo. Custo muito elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130mm.	Adequado para grandes estruturas	O alívio de tensões é baixo.

Fonte: Braga (2011).

No presente trabalho, o foco é o tratamento mecânico, por meio de vibrações mecânicas induzidas.

2.6.2 Origem da tecnologia

A tecnologia de alívio das tensões residuais por meio da vibração mecânica teve seu início anterior à década de 1950, tendo um crescimento após a crise energética que ocorreu na década de 1960, devido à Segunda Guerra Mundial. Pesquisadores dos Estados Unidos estudaram os efeitos da tecnologia nos cascos dos navios, enquanto pesquisadores da Alemanha estudaram os efeitos da mesma tecnologia nas asas dos aviões. Através destes estudos e dos testes de fadiga realizados, foi possível concluir que a utilização da vibração mecânica para a redução das tensões residuais em peças se mostra eficiente para materiais

soldados, sendo esta uma alternativa ao tratamento térmico usado convencionalmente (MARTINS *et al.*, 2012).

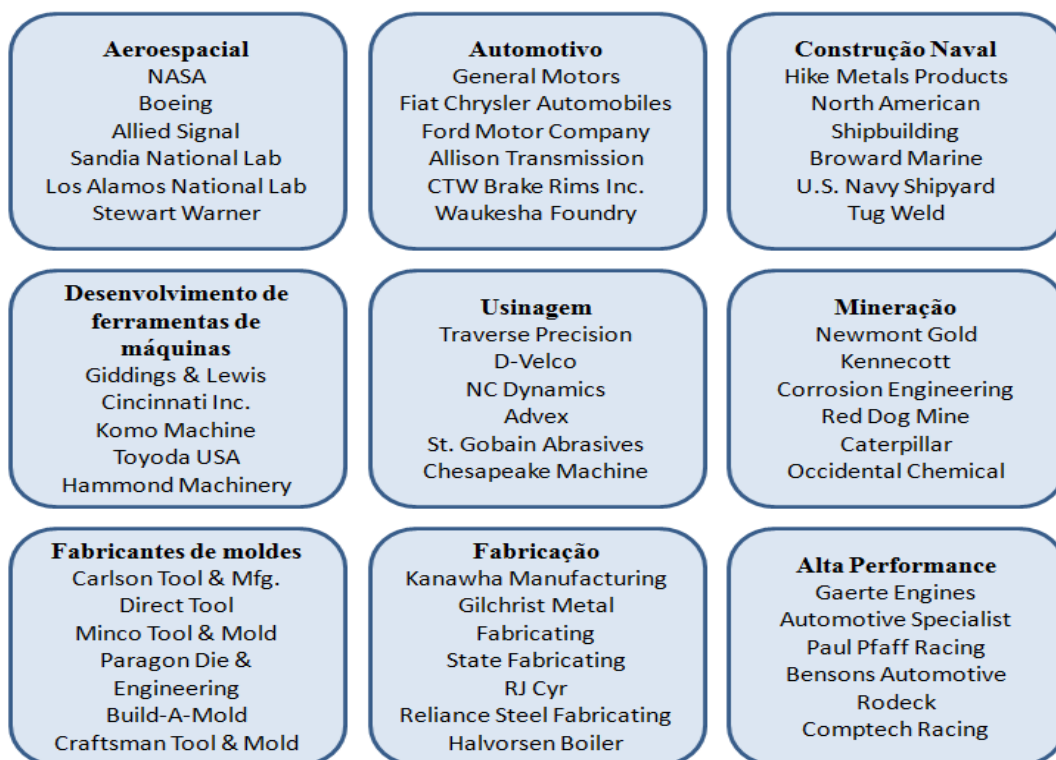
2.6.3 Desenvolvimento da tecnologia

G. Hebel Jr. e A. George Hebel III, da *Bonal Corporation*, no final da década de 1960, desenvolveram a tecnologia que empregava o uso de frequências sub-harmônicas para o alívio de tensões residuais. Tal equipamento foi patenteado posteriormente, como Meta-Lax (Metal Relaxation) (HEBEL, 1989).

Através de estudos, concluiu-se que para aumentar a confiabilidade do método, era necessário ter ciência de qual frequência harmônica o objeto tensionado possuía, e assim utilizar uma frequência sub-harmônica no processo (HEBEL, 2004).

Atualmente, os equipamentos Meta-Lax são vendidos em 51 países, através de uma rede de distribuidores. Diversas empresas ao redor do mundo utilizam este equipamento, como a figura 15 a seguir mostra e as Figuras 16 e 17 evidenciam seus produtos comercializados (BONAL TECHNOLOGIES, 2019):

Figura 15: Parte dos clientes da Meta-Lax



Fonte: Bonal Technologies (2019).

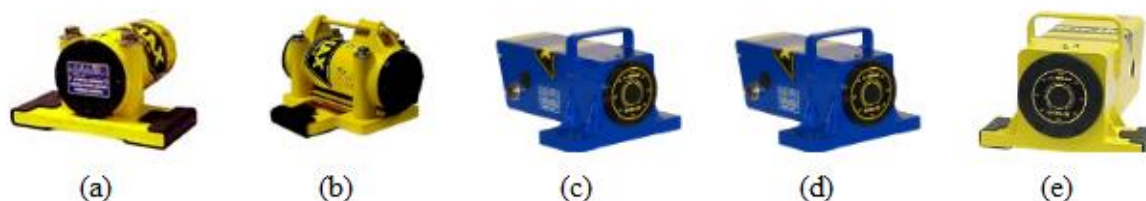
Figura 16: Modelo dos painéis de Controle da Meta-Lax



Fonte: Bonal Technologies (2019).

A Figura 16 evidencia os modelos de painéis fabricados e comercializados pela empresa Meta-Lax, classificados através dos seguintes modelos: (a) Series 2800; (b) Series 2401; (c) Series 2001.

Figura 17: Modelo dos indutores de força da Meta-Lax



Fonte: Bonal Technologies (2019).

A figura 17 evidencia os modelos dos indutores de força fabricados e comercializados pela empresa, classificados em: (a) 1 F (27-115 kg); (b) FD (3.175 kg); (c) V8 (55-9.000 kg); (d) 2A (70-18.160 kg); (e) 3A (9.080 kg).

A *Stress Relief Engineering* (SRE) é um fabricante que, diferentemente da Bonal (que utiliza frequências sub-harmônicas), utiliza frequências harmônicas em seus tratamentos. Esta fabricante surgiu no ano de 1962 (Figura 18) (SRE, 2008).

Segundo o site da fabricante, a SRE possui clientes em 75 países, tendo grandes nomes, como Boeing, General Motors, Citroen, Avibras, Mitsubishi Motors-Japan, Firestone Tire & Rubber, Eaton Corp., Walt Disney World Ent., Hyundai Shipbuilding, e no Brasil, Aerospacial S.A (SRE, 2008).

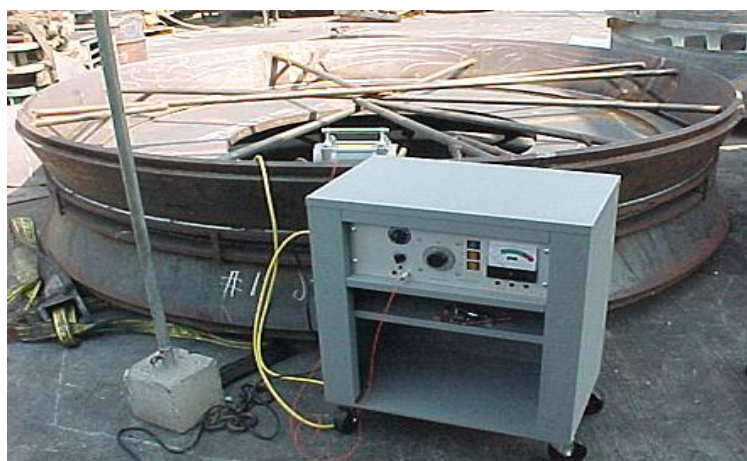
Segundo o fabricante, o tempo do processo varia de 15 a 30 minutos a cada local tratado. O tempo médio para que se atinja a frequência de ressonância é de 2 minutos. Após alcançar a frequência de ressonância, mantém-se a peça sobre vibração por determinado

tempo, que depende da aplicação e de seu peso. A aplicação do processo de vibração, chamado de Formula 62, pode ser realizada em vários locais diferentes de uma mesma peça, se esta tiver um grande tamanho. Este processo também pode ser automatizado, onde a vibração é adicionada em 3 ciclos de velocidades diferentes, sendo cada ciclo de cinco minutos. Tal procedimento é utilizado para peças de até 10 toneladas. Para peças acima deste peso, recomenda-se utilizar o processo duas vezes, totalizado em 30 minutos (SRE, 2008).

Deve-se atentar a isolar a peça, para que esta possa vibrar livremente. A peça também deve estar ligada diretamente a unidade do vibrador, para que a energia da vibração seja completamente transferida para a peça tratada.

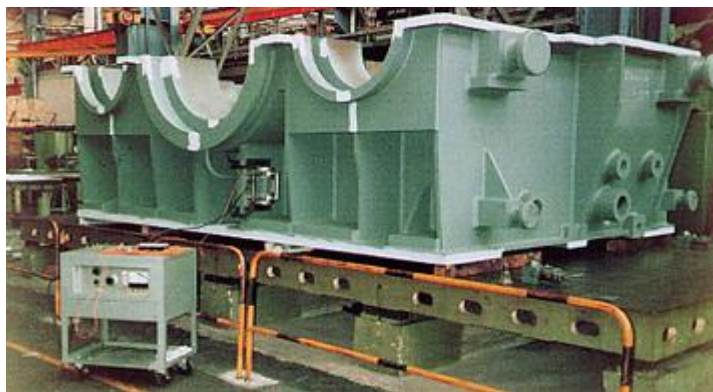
O Formula 62 é um processo que pode ser utilizado para uma variedade de metais ferrosos e não-ferrosos, como aço inoxidável, aço carbono, ferro fundido, alumínio, ferro, manganês, entre outros. Também pode ser utilizado para peças com uma grande variedade de formatos. Para peças pequenas e peças fundidas de formato irregular, utiliza-se um equipamento uma mesa vibratória chamada Loadmaster 2000, a qual tem um sistema de suspensão pneumático ajustável para o isolamento da peça, que opera em qualquer suprimento de ar comprimido da fábrica (Figura 19)(SRE, 2008).

Figura 18: Equipamento da SRE utilizando o processo Formula 62



Fonte: Sre (2008).

Figura 19: Equipamento da SRE utilizando o processo Formula 62



Fonte: Sre (2008).

2.6.4 Limitações do processo

O processo estudado não é eficiente quando utilizado em materiais trabalhados a frio, laminados a frio, extrudados, endurecidos por precipitação e por deformação.

Este processo é utilizado com o único fim de aliviar as tensões residuais, portanto, não substitui o tratamento térmico para a alteração de propriedades mecânicas e metalúrgicas do material. Em alguns casos, a SRE recomenda o uso do método térmico para aplicações nucleares, vasos de pressão, geração de energia e petroquímica, pois se torna economicamente mais viável. (SRE, 2008).

Em algumas chapas grossas ou em estruturas muito grandes, o alívio de tensões não é feito de forma uniforme (BRAGA, 2011).

2.6.5 Curvas de ressonância

A ressonância mecânica pode ser determinada como a tendência de um sistema físico para oscilar em sua amplitude máxima. A tendência para oscilar depende da proximidade da frequência de excitação das frequências naturais do sistema. Nestas frequências, pequenas amplitudes de excitação são capazes de produzir elevadas amplitudes de vibração do sistema, o que pode conduzir ao seu colapso (RAO, 2008).

A ressonância amplifica de maneira significativa as vibrações presentes no sistema, pois ela gera grandes deslocamentos. Em grande parte dos projetos, a presença de grandes deslocamentos em sistemas mecânicos não é desejável, pois é responsável pela formação de tensões e deformações, o que pode levar a falha da peça (BOROBIA, 2012).

As frequências de ressonância são também chamadas de frequências harmônicas. Os valores abaixo da frequência harmônica são chamadas de sub-harmônicas ou sub-ressonantes (RAO, 2008).

Nesta tecnologia, é utilizado um sistema vibratório que é capaz de produzir ondas de choque, o que acomoda a estrutura do corpo metálico em um nível de energia inferior. Tal fato ocorre por causa da reorganização cristalina, que ocorre devido a energia vibracional. A estrutura atômica não difere a energia recebida mecanicamente da energia recebida termicamente, apenas a utiliza para seu rearranjo estrutural. O dispositivo vibratório é formado por um oscilador acoplado à peça, e as variáveis do processo são o período de oscilação, a frequência de oscilação e a carga aplicada (RAO, 2008).

Os pesquisadores divergem quanto à frequência utilizada nos tratamentos mecânicos de vibração. A divergência se dá quanto ao tipo da frequência utilizada, ressonante ou sub-ressonante, para melhores resultados.

2.6.6 *Vibratory Stress Relief (VSR)*

No processo de alívio de tensão por vibração, também conhecido como *Vibratory Stress Relief* (VSR), a energia vibracional é aplicada após o processo de soldagem (BONAL, 2008).

A aplicação de vibrações sub-ressonantes promove uma redistribuição das tensões residuais que se encontram na peça, fazendo com que a curva harmônica ou ressonante se mova. Após a redistribuição das tensões, com a eliminação das tensões residuais, tem-se a estabilização da curva na localização de sua frequência natural (BONAL, 2008).

No processo VSR, as vibrações mecânicas são utilizadas para reduzir as tensões residuais. Este método se baseia na ressonância vibratória, onde as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência, por determinado tempo. Este tratamento gera resultados satisfatórios. Quando comparados com os tratamentos térmicos, apresentam uma economia de custos, devido ao menor uso de energia e de horas do processo (MARTINS, 2012). Com o processo VSR é possível também reduzir as tensões internas sem alterar outras propriedades mecânicas da peça. As tensões residuais que forem eliminadas por meio deste processo não reaparecem posteriormente, e este processo não representa riscos de contaminação do meio ambiente, que é uma questão essencial atualmente (HAHN, 2002).

Geralmente, os tratamentos térmicos são realizados em grandes fornos, por meio da combustão de combustíveis fósseis, o que gera danos graves ao meio ambiente, tanto por se tratar de uma fonte de energia não renovável, como pela poluição do ar. Uma alternativa

eficiente é o uso do VSR, pois este processo possui um baixo custo de energia e não polui o meio ambiente (HAHN, 2002).

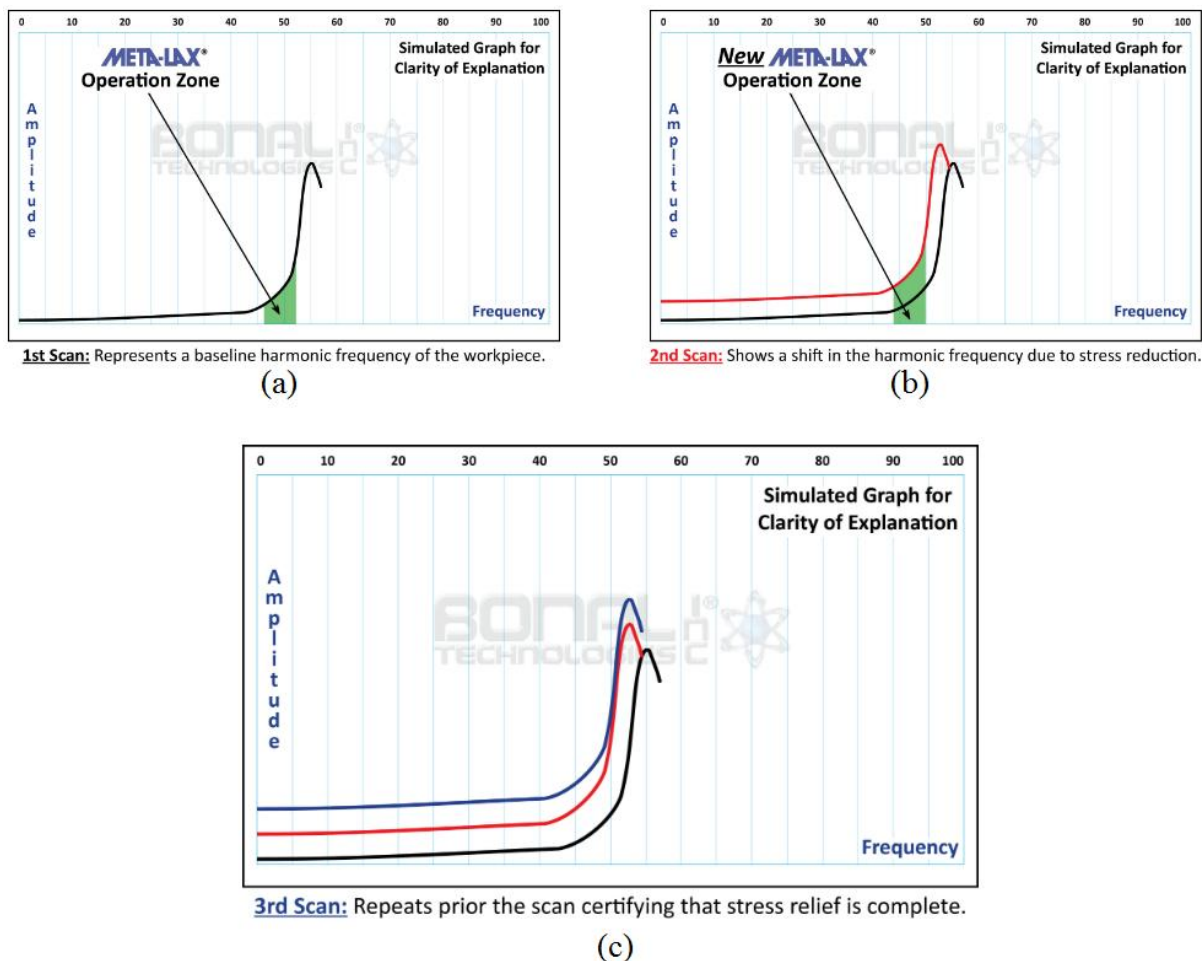
O equipamento utilizado é formado por um vibrador resistente com velocidade regulável, que fica acoplado a peça a ser tratada. Este vibrador é ligado a um sistema eletrônico de controle, que detecta as vibrações através de um sensor e manda o sinal para o painel eletrônico (JUCIUS, VALIULIS, CERNASEJUS, 2010).

O processo VSR pode ser aplicado em diversos materiais ferrosos e não ferrosos, como aço inoxidável, aço carbono, alumínio, níquel, ferro fundido, manganês, entre outros. Pode-se aplicar esse processo em materiais soldados, fundidos, estampados, usinados, forjados ou esmerilhados (BRAGA, 2009).

São utilizados 3 métodos de VSR: ressonante (R-VSR), sub-ressonante (SR-VSR) e sub-harmônico (SH-VSR) (ROBBINS, 2004).

Para este processo, pode-se utilizar o equipamento Meta-Lax, assim como para o processo *Vibratory Weld Conditioning*, porém neste, a vibração ocorre durante a soldagem, enquanto no VSR, a vibração ocorre após a soldagem, como pode ser percebido na Figura 20 (BONAL, 2019).

Figura 20: Curvas de comportamento harmônico inicial



Fonte: Bonal Technologies (2019).

A figura 20 evidencia o comportamento da curva de harmônico em três situações, entre elas: (a); após o primeiro ciclo (b); e estabilizado ao fim do tratamento (c) (BONAL TECHNOLOGIES, 2019).

A redução das tensões residuais, causada pelo uso da energia vibracional, além da redistribuição, implicam uma mudança na curva harmônica, como pode-se notar na Figura 20 (b). Com o alívio das tensões residuais, a curva harmônica se estabiliza em seu estado de frequência natural, como pode-se notar na Figura 20 (c), na curva mais acima.

Tanto o processo VSR quanto o alívio de tensão por tratamentos térmicos induzem um movimento acelerado interno no metal para aliviar as tensões residuais. O processo VSR também pode ser comparado ao processo de envelhecimento natural, pois ambos processos não geram escala de calor, redução das propriedades mecânicas e amolecimento. O processo VSR não causa distorção, e é aplicado em peças finalizadas, comumente em peças reparadas e componentes de grande porte (SHANKAR, 1982).

2.6.7 *Vibratory Weld Conditioning (VWC)*

O processo *Vibratory Weld Conditioning* (VWC) é o processo de soldagem sob vibração, e assim como o VSR, apresenta resultados experimentais positivos em juntas soldadas, em relação às propriedades mecânicas (SUN, 2004).

A aplicação das vibrações mecânicas gera uma energia, que é responsável por produzir uma carga que sobrepõe no padrão de tensões iniciais, resultando na redução das tensões residuais. Tal fato tem como resultado uma peça dimensionalmente mais estável, além da redução das distorções que são comuns em peças soldadas (BRAGA, 2009).

No processo VWC, aplica-se a energia vibracional sub-harmônica à peça ao mesmo tempo que se realiza a soldagem. Neste processo, apenas uma curva, previamente calibrada de acordo com o peso da peça, é obtida. O processo de soldagem sob vibração é responsável por trazer benefícios para a zona termicamente afetada (ZTA) e para o metal de solda. Uma das principais vantagens de utilizar o VWC é minimizar, ou até mesmo eliminar, a quebra e a distorção de solda (WU, 2000).

Pode-se citar como benefícios do processo VWC: redução de trincas na solda, redução da distorção da junta, melhoria da vida em fadiga, melhoria da ductilidade da junta, aumento de tenacidade à fratura da junta, redução do pré-aquecimento, redução da porosidade, maior qualidade do cordão de solda, maior profundidade de penetração da solda, redução do aporte térmico e redução do tempo do processo de soldagem (QINGHUA, 2006)

O VWC também tem como benefício o aumento de produtividade, pelo fato do processo de soldagem aumentar de velocidade, tornando assim possível o aumento da amperagem, o que resulta em uma melhor penetração na raiz da solda. O processo de soldagem sob vibração gera uma distribuição granular mais uniforme e fina na junta soldada, o que melhora suas propriedades mecânicas, além de sua vida em fadiga. Este processo pode eliminar a necessidade de posteriores processos para o alívio de tensões residuais após a soldagem (WU, 2000).

No processo VWC, o metal líquido, presente na poça de fusão, causa uma melhoria na estrutura do grão solidificado do metal de solda. Portanto, o crescimento colunar não ocorre, o que gera a formação de uma estrutura com grãos mais finos. Pode-se observar uma distribuição mais uniforme do tamanho de grãos ao longo do metal de solda (PUCKO, 2009).

Este processo também se mostra responsável por uma grande alteração na estrutura microscópica do material, pois a vibração mecânica faz com que os grãos colunares no metal de solda se quebrem. Sabe-se que uma velocidade maior de soldagem resulta em uma maior

remoção de calor, durante o processo de solidificação. Portanto, quanto maior a taxa de arrefecimento, menor o tamanho do grão. Um grão menor gera melhores propriedades mecânicas. (LU, 2007).

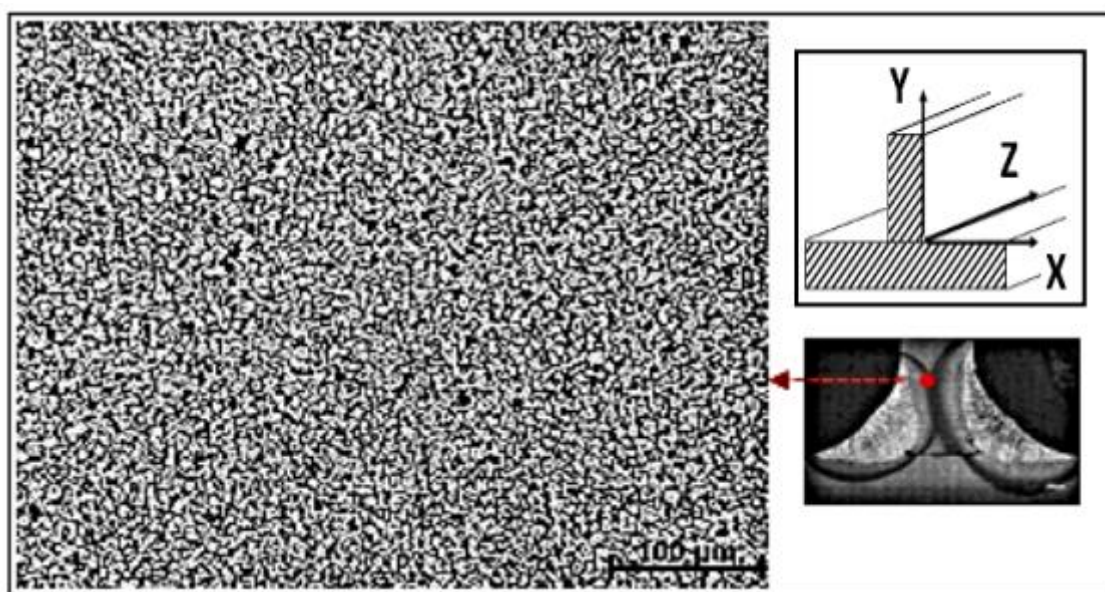
3 ESTUDO DE CASOS

A seguir, apresenta-se os resultados encontrados através da análise dos artigos científicos coletados considerados mais relevantes para o presente estudo.

- PEREIRA, W. R. **Avaliação do efeito da vibração mecânica aplicada em uma junta em ângulo soldada pelo processo arco submerso**. 2018.

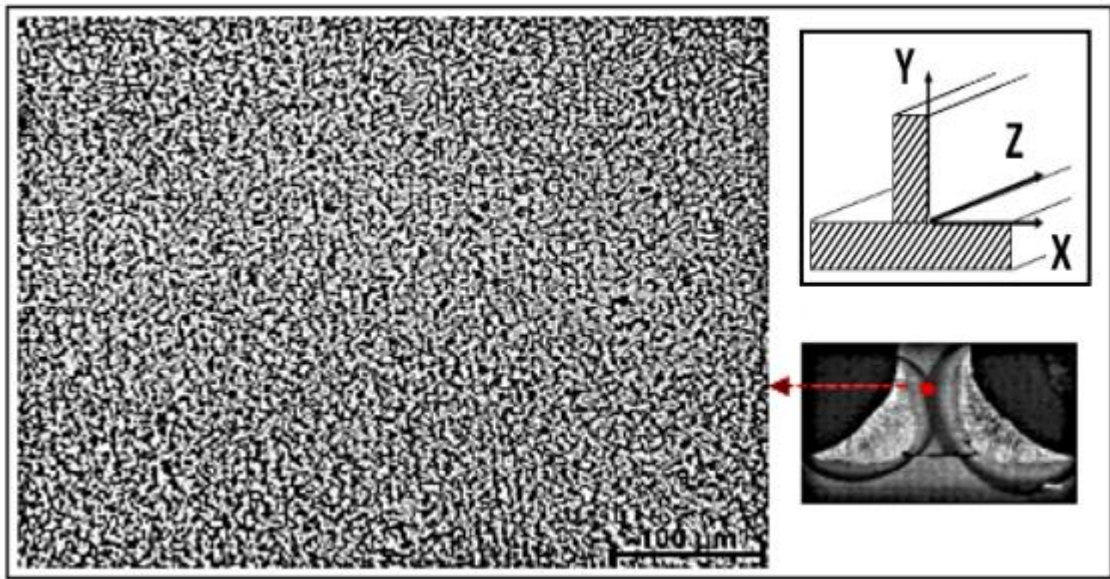
Neste estudo, utilizou-se o tratamento de vibração mecânica em uma junta em ângulo, soldada pelo processo arco submerso. Foram utilizadas amostras tratadas por VSR, VWC (Figura 21), e amostras sem tratamento. Realizou-se a micrografia, macrografia, ensaio de microdureza Vickers, ensaio por partículas magnéticas e ensaio visual. Notou-se que a amostra tratada pelo método VWC apresentava uma menor penetração e maior largura dos cordões de solda. O processo vibracional induzido à soldagem age na poça de fusão, o que induz a agitação do metal na fase líquida. Para as amostras tratadas por VSR (Figura 22) e VWC, foi possível observar próximo à zona de ligação a presença de uma estrutura mais refinada. Já na amostra que não foi tratada mecanicamente, notou-se a presença de grãos colunares mais finos. Pode-se notar também que a dureza das amostras tratadas por vibração apresentaram uma redução da dureza, com destaque para o processo VWC. E o processo sem vibração (Figuras 23 e 24).

Figura 21: Micrografia ZAC AB1 - CP2: VWC (200x)



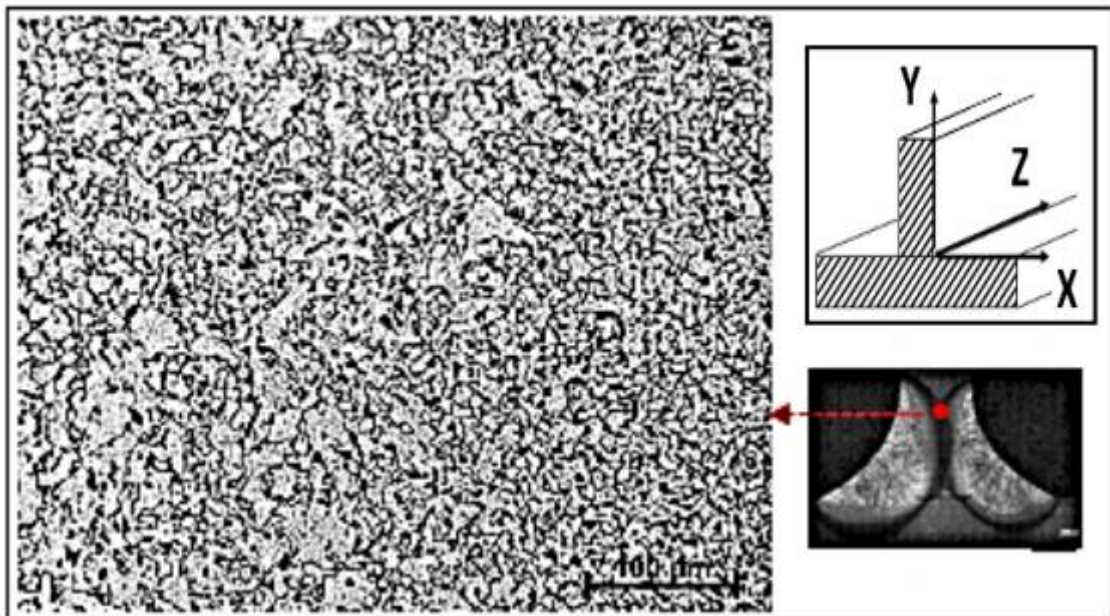
Fonte: Pereira (2018).

Figura 22: Micrografia ZAC AB1 - CP4: VSR (200x)



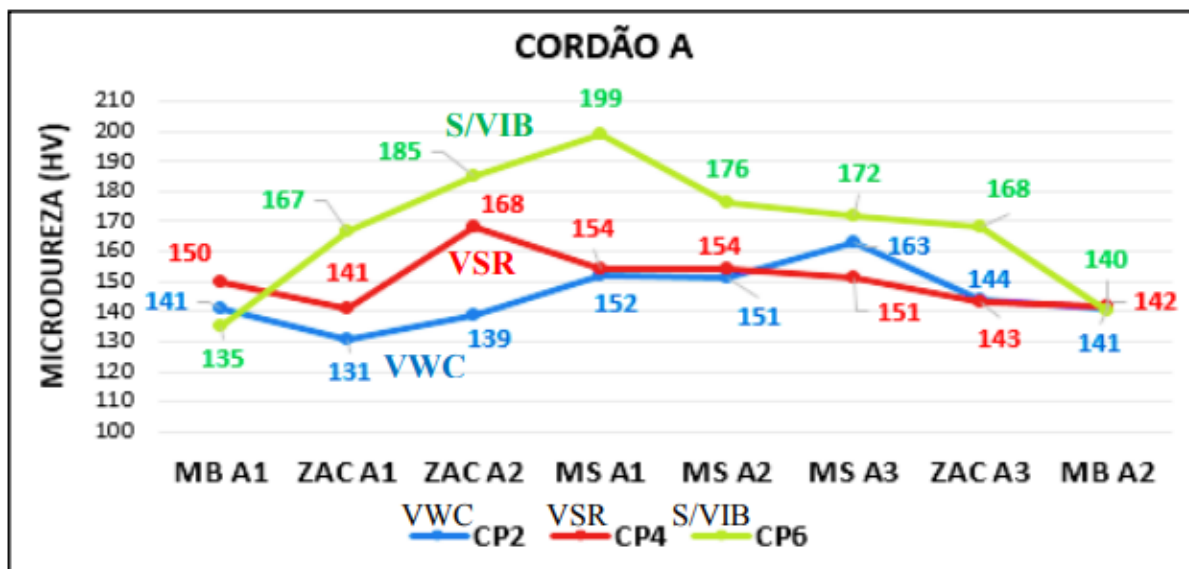
Fonte: Pereira (2018).

Figura 23: Micrografia ZAC AB1 – CP6: Sem Vibração (200x)



Fonte: Pereira (2018).

Figura 24: Microdureza (HV) nas regiões do cordão A



Fonte: Pereira (2018).

- BIANCALANA NETO, A. **Alívio de tensões em tubos a partir da aplicação de vibração mecânica**. 2016.

Neste estudo, utilizou-se o equipamento Formula 62, para a aplicação da vibração mecânica em tubos de teste do tipo *casing*, na frequência ressonante. Foram utilizadas duas condições: com o indutor a 90° e a 180° da linha de solda. Foi possível notar que as tensões residuais circunferenciais foram reduzidas em torno de 16%. Através da realização de ensaios de tração, dureza e Charpy-V, foi possível notar que o método de vibração não resultou em mudanças nos valores de dureza, tração e tensão de escoamento, porém, notou-se uma mudança nos valores de energia absorvida, no ensaio Charpy-V, particularmente na região de solda, o que aponta a presença de deformações plásticas, devido ao processo vibracional.

- FONSECA, L. N. **Caracterização macro e microestrutural e comportamento mecânico de juntas em aço USI-SAR-80T soldadas pelo processo GMAW com auxílio de processos vibracionais**. 2016.

Neste estudo, foram utilizadas amostras do aço USI-SAR-80T soldadas pelo processo GMAW e tratadas pelo método vibracional, algumas durante e outras após a soldagem. Posteriormente, realizou-se a micrografia, macrografia, ensaio de tração, ensaio de impacto Charpy, ensaio de dobramento e ensaio de dureza Vickers. Através dos resultados, pode-se notar que ambos os métodos vibracionais resultaram em uma redução nas deformações

térmicas presentes nas juntas soldadas. O tratamento VSR gerou uma redução da amplitude de deformações de 49,7% , e o VWC, 59,4%.

- ALMEIDA, L. F. C. B. **Avaliação da influência de aplicação de vibração mecânica na microestrutura e em características mecânicas de juntas do aço inoxidável martensítico CA6NM soldadas pelo processo FCAW**. 2015.

Este estudo utilizou quatro amostras do aço inoxidável martensítico CA6NM. As amostras foram soldadas pelo processo de soldagem com arame tubular (FCAW), sendo uma tratada pelo método VWC, uma tratada pelo método VSR, uma tratada termicamente e a última não sofreu nenhum tratamento. Foram realizados os seguintes ensaios mecânicos posteriormente com as amostras: microdureza Vickers, tração, dobramento e impacto Charpy-V. Também foram realizadas macrografias e micrografias.

Pelos ensaios de microdureza Vickers, notou-se que as amostras tratadas vibracionalmente não tiveram redução nos valores de dureza, comparados à amostra não tratada. Já a amostra tratada termicamente teve seu valor de microdureza reduzido em até 10%.

Os ensaios de tração das quatro amostras tiveram resultados semelhantes.

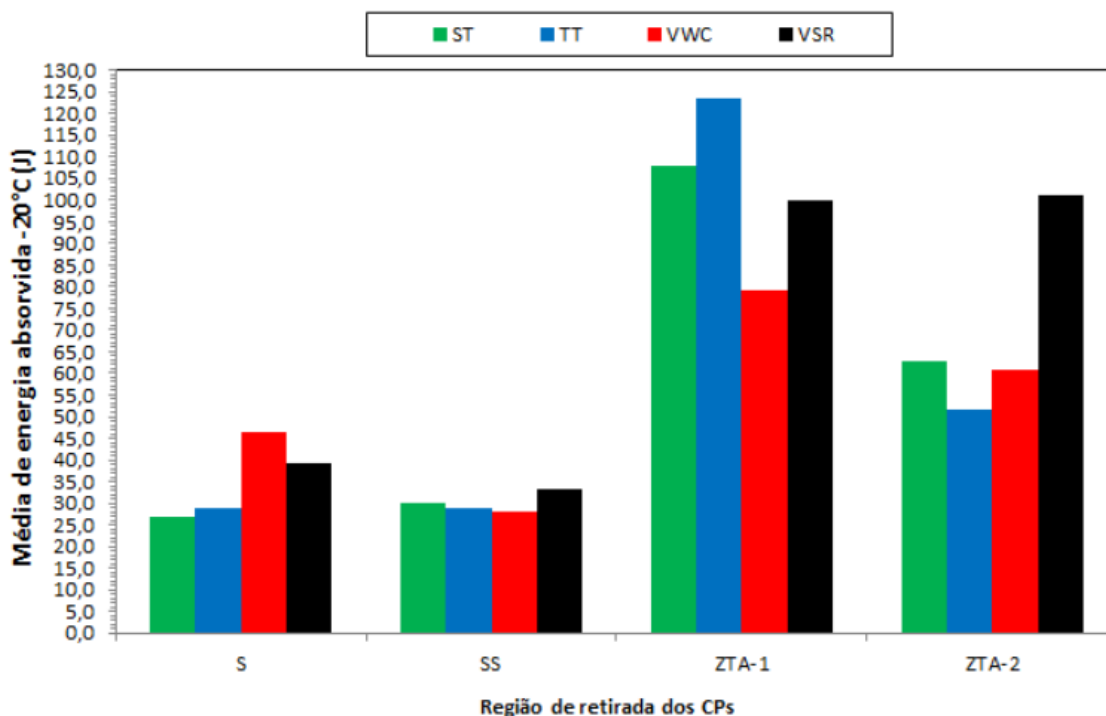
Nos ensaios de dobramento, as seguintes amostras não apresentaram nenhum defeito, como trinca: tratada termicamente (TT), VWC e VSR. Já a amostra que não passou por nenhum tratamento, apresentou trinca.

Nos ensaios de impacto Charpy-V, as amostras tratadas pelos métodos VWC e VSR apresentaram bons resultados, com destaque para o último método, que apresentou valores adequados e de forma mais homogênea.

Pela microestrutura, pode-se notar que a amostra não tratada não possui diferenças significativas das amostras tratadas por vibração mecânica. Para as amostras tratadas termicamente, notou-se a precipitação de austenita finamente dispersa na matriz martensítica.

A figura 25 a seguir mostra o resultado dos ensaios de impacto Charpy-V, para as amostras sem tratamento (ST), as amostras tratadas termicamente (TT), as amostras tratadas pelo método *Vibratory Weld Conditioning* (VWC) e as amostras tratadas pelo método *Vibratory Stress Relief* (VSR). As regiões de retirada das amostras são: S (3/4 da espessura da junta), SS (1,5 mm da superfície da amostra), ZTA 1 (entre 1/2 e 1/4 da espessura da junta na ZTA do lado esquerdo) e ZTA 2 (entre 1/2 e 1/4 da espessura da junta na ZTA do lado direito).

Figura 25: Valores médios obtidos nos ensaios de impacto Charpy-V para cada condição



Fonte: Almeida (2015).

- MACIEL, L. F. C. **Efeitos da vibração simultânea nas propriedades mecânicas de juntas de aço ASTM A131 soldadas pelo processo Arame tubular (FCAW)**. 2014.

Neste estudo, foram utilizadas juntas de aço ASTM A131 soldadas pelo processo arame tubular (FCAW). Utilizou-se amostras tratadas por VWC, amostras tratadas por VSR e também amostras sem tratamento. Após o processo de soldagem, foi realizada a macrografia e micrografia das amostras, além dos ensaios de tração, microdureza e impacto Charpy.

Através da macrografia, notou-se uma descontinuidade de falta de penetração da raiz da junta, além de um acúmulo de escória na raiz da solda, para todas as amostras.

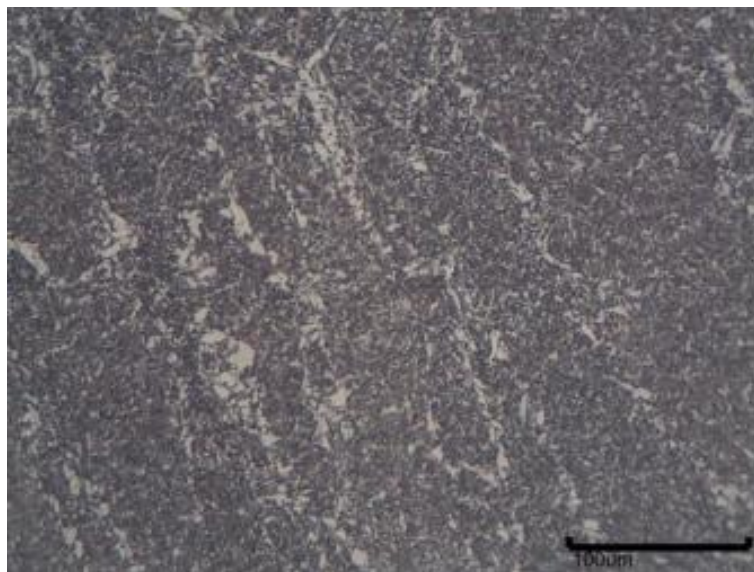
Por meio da micrografia, na zona termicamente afetada foi possível observar, nas amostras tratadas por VWC, grãos de perlita mais refinados e alguns grãos pequenos de ferrita equiaxial. Pode-se associar este fato com a condição cíclica de fusão de solidificação gerada pelo uso vibração mecânica durante o processo de soldagem. Na zona fundida, as amostras tratadas pelo método VWC apresentaram grãos menores. Tal fato relaciona-se à mesma condição cíclica presente na região da zona termicamente afetada, que ocorre devido aos efeitos ocasionados pela vibração. Já no metal de base, não foi possível observar diferenças significativas entre as amostras (Figura 26).

Pelo ensaio de tração, notou-se que as amostras não tiveram ganhos notáveis referentes à resistência mecânica e tensão de escoamento, mas as amostras tratadas pelo método VWC apresentaram um aumento significativo no alongamento das juntas (Figura 28).

Pelos ensaios de microdureza, foi possível observar que as amostras tratadas pelo método VWC foram as únicas a apresentar alteração notável nos valores de microdureza. Nestas amostras, foi possível notar uma redução de 8,2% e 6,6% nos perfis de microdureza e uma redução em torno de 11%, na zona termicamente afetada, quando comparado aos valores obtidos com a soldada pelo processo convencional. As amostras tratadas pelo método VSR não apresentaram mudanças significativas nos valores de microdureza (Figura 27).

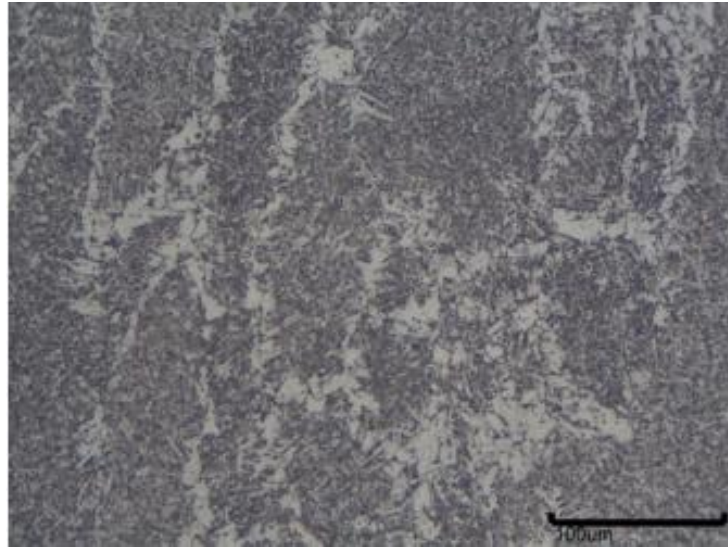
Por meio do ensaio Charpy, foi possível notar que as amostras tratadas pelo método VSR e VWC apresentaram maior tenacidade, quando comparadas à amostra soldada pelo processo convencional. Apesar de ambos os métodos (VSR e VWC) apresentarem resultados notáveis no ensaio Charpy, o VWC se mostrou o mais eficiente.

Figura 26: Micrografia da zona fundida da amostra com soldagem convencional



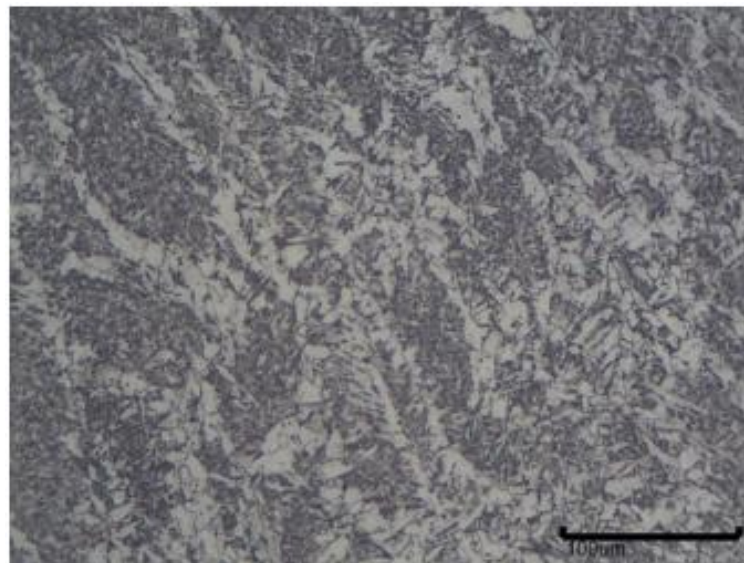
Fonte: Maciel (2014).

Figura 27: Micrografia da zona fundida da amostra tratada pelo processo VSR



Fonte: Maciel (2014).

Figura 28: Micrografia da zona fundida da amostra tratada pelo processo VWC



Fonte: Maciel (2014).

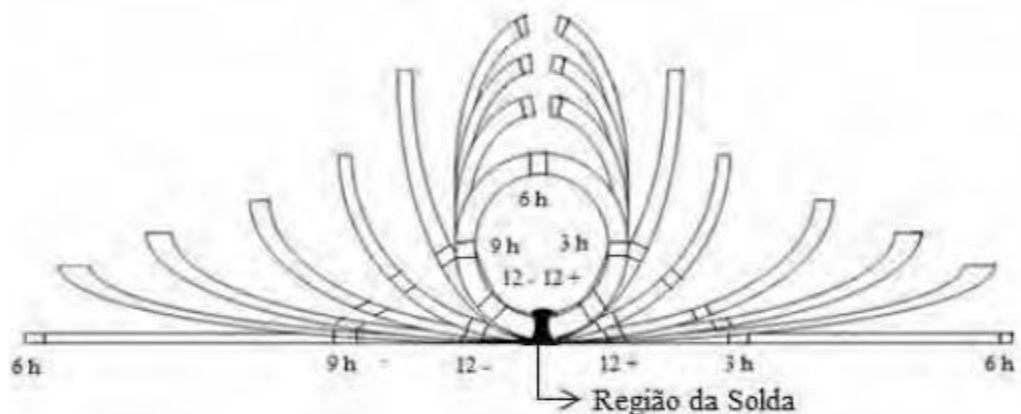
- SAKTHIVEL, P.; SIVAKUMAR, P. **Effect of Vibration in Tig And Arc Welding Using AISI 316 Stainless Steel**. 2014.

Sakthivel e Sivakumar estudaram os efeitos da vibração mecânica, em amostras de aço inoxidável AISI 316 soldadas pelo processo de arco elétrico e TIG, na estrutura do material e em suas propriedades mecânicas. Os autores observaram que a realização dos processos de soldagem em conjunto com a vibração mecânica resultam em grãos mais finos e uniformes.

- **AMARAL, A. G. B. Análise de tensões com ultrassom em tubos soldados por resistência elétrica. 2012.**

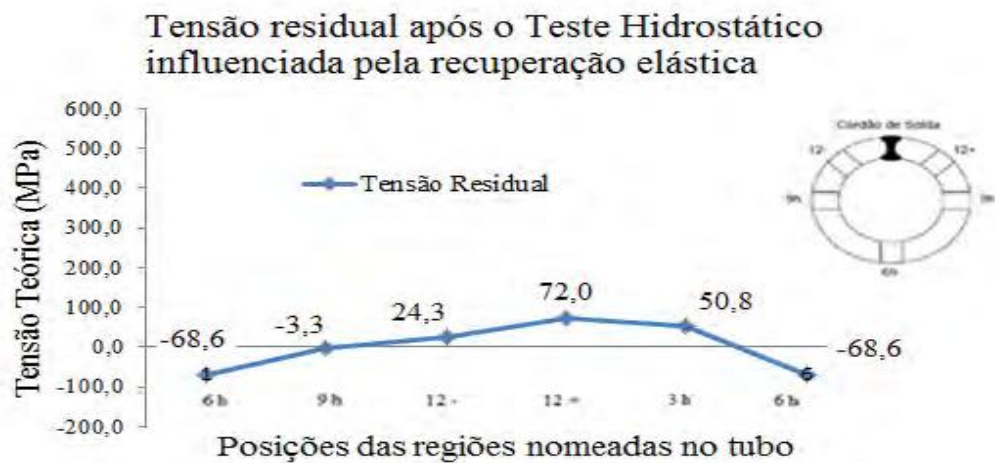
Neste trabalho, o autor avaliou o comportamento do efeito acustoelástico que ocorre no processo de fabricação, para obter informações das tensões residuais por meio do método de ultrassom, em tubos de aço API 5L X70, fabricados pelo processo ERW. Através do teste hidrostático, o autor notou que a diferença nos tempos de percurso da onda ultrassônica implicou uma redução em todos os pontos medidos no tubo. Tal redução pode ter ocorrido devido a um rearranjo das tensões residuais, através da ocorrência de pequenas deformações localizadas. O autor observou valores de tensões residuais trativas do tubo na ordem de 24,3 a 72 MPa nas posições 12+, 12- e 3h e tensões residuais de compressão na ordem de 69 MPa na posição 6h. Já a posição 9h não apresentou valores significativos de tensões residuais.

Figura 29 : Representação dos pontos nos quais foram calculadas as tensões teóricas no tubo



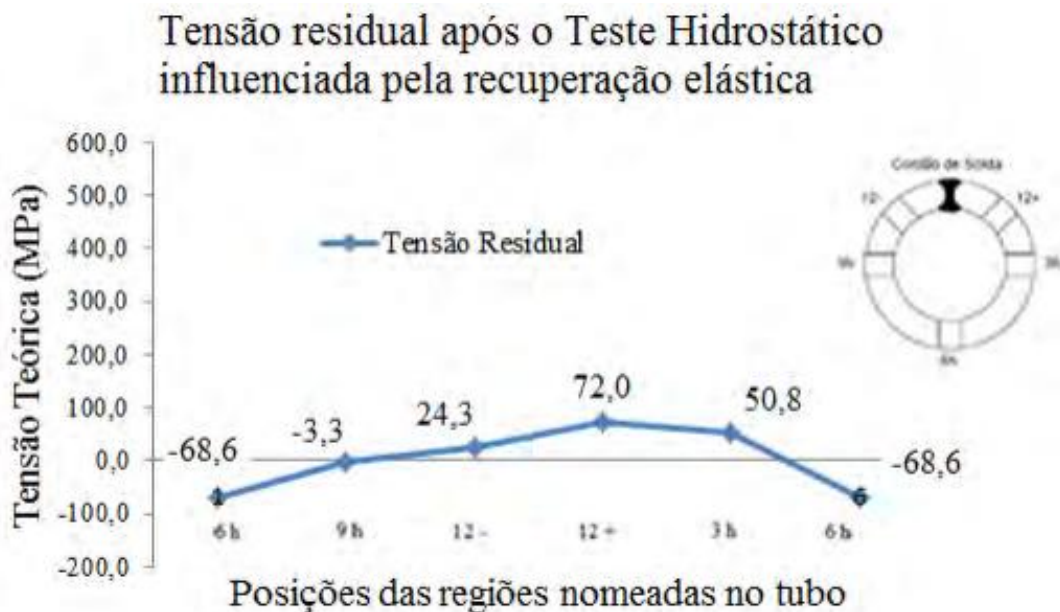
Fonte: Amaral (2012).

Figura 30: Distribuição das tensões residuais (*springback* - efeito da recuperação elástica), em Mpa, no sentido da circunferência do tubo, após o Teste Hidrostático



Fonte: Amaral (2012).

Figura 31 : Distribuição das tensões residuais (*springback* - efeito da recuperação elástica) em função das tensões de escoamento (σ_y) sentido da circunferência do tubo após o Teste Hidrostático



Fonte: Amaral (2012).

- **CHUVAS, T. C. Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma. 2012.**

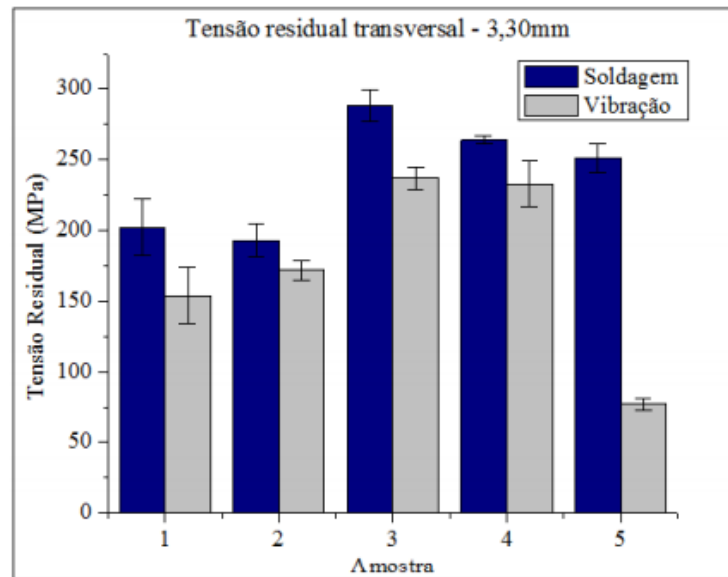
Neste trabalho, os autores utilizaram amostras de aço DP600, que foram soldadas pelo processo a plasma. O tratamento vibracional foi aplicado após o processo de soldagem. As

tensões residuais foram medidas nas direções transversal e longitudinal, na superfície do cordão de solda, pelo método de difração de raios-X.

Os autores notaram que o tratamento de vibração mecânica no alívio das tensões residuais no aço estudado teve efeito expressivo na direção transversal do cordão de solda, apresentando maior nível de redução nas amostras de 3,30mm (por volta de 50%).

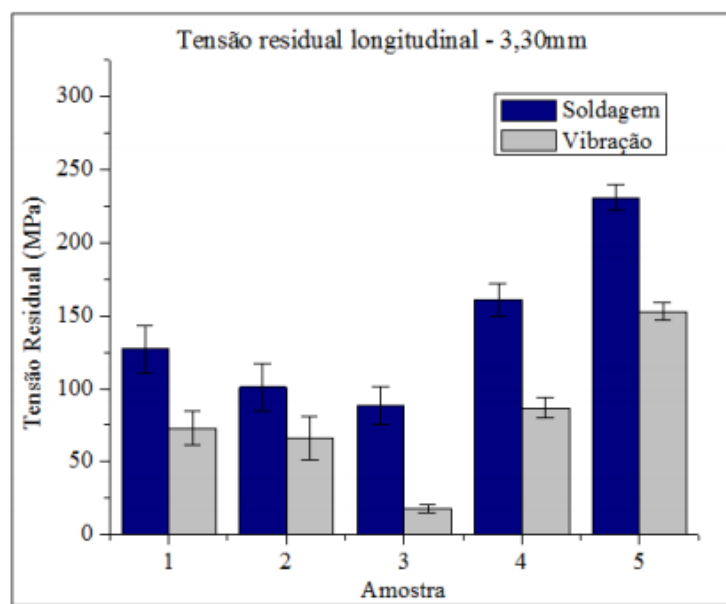
Os autores também observaram uma notável diferença na magnitude da redução das tensões entre as amostras analisadas. Tal fato pode ser relacionado ao efeito da espessura e percebidos nas Figuras de 32 a 34:

Figura 32: Tensões residuais transversais nas amostra de 3,30mm



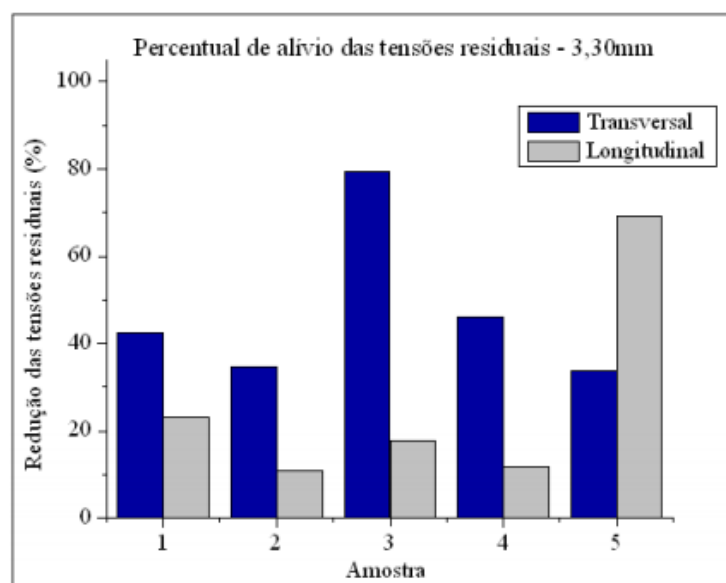
Fonte: Chuvas (2012).

Figura 33: Tensões residuais longitudinais nas amostra de 3,30mm



Fonte: Chuvas (2012).

Figura 34: Percentual do alívio de tensões nas amostras de 3,30mm



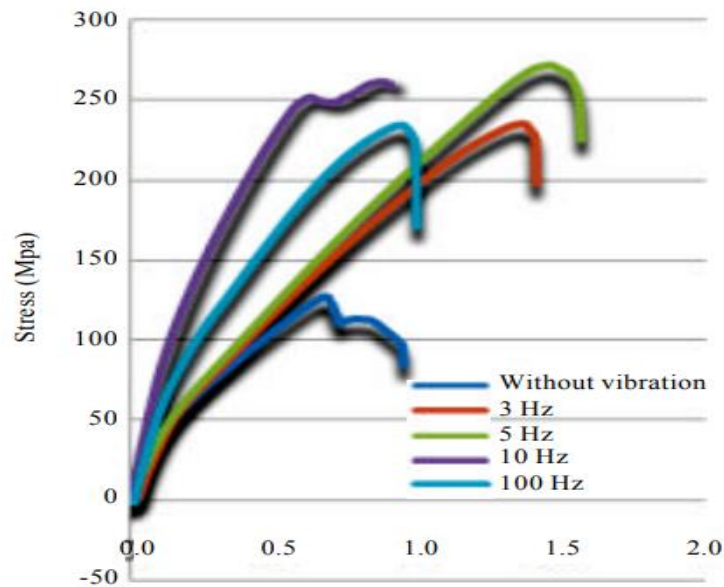
Fonte: Chuvas (2012).

- **HUSSEIN A.R., JAIL N.A., TALIB A. R. A. Improvement of Mechanical Welding Properties by using induced Harmonic Vibration. 2011.**

Neste estudo, utilizou-se o método de alívio de tensão por vibração (VSR). Foram comparadas amostras do aço fresado JIS G 3101 SS400, soldadas, seguidas do processo de vibração mecânica e amostras soldadas sem tratamento mecânico posterior. Os autores observaram, através do ensaio de tração, que as amostras tratadas pelo processo de vibração

mecânica não tiveram trincas, já as amostras não tratadas apresentaram trincas com 3 mm de comprimento (Figura 35). Portanto, o método se mostrou eficiente para o alívio das tensões residuais.

Figura 35: Ensaio de tração para as amostras tratadas vibracionalmente, com diferentes frequências, e para a amostra não tratada



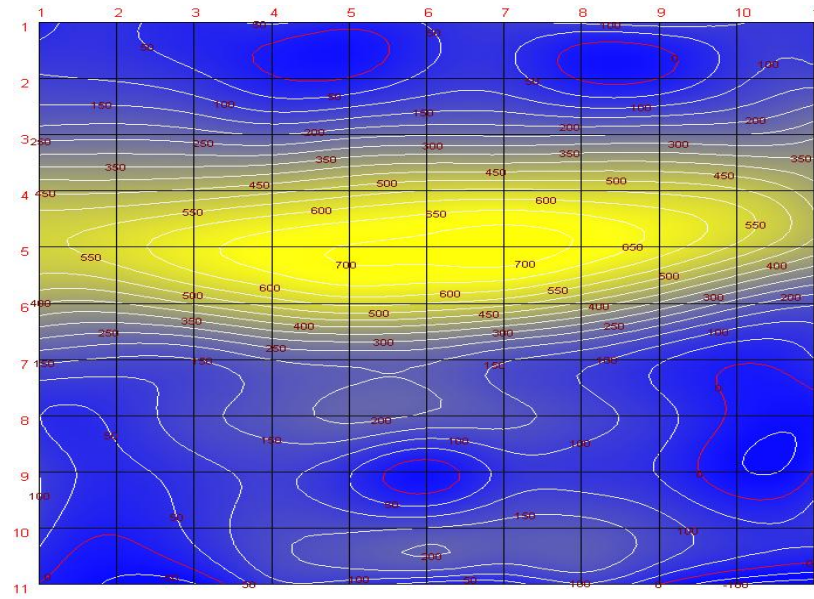
Fonte: Hussein; Jail; Talib (2011).

- **SANTOS, C. H. Estudo do alívio das tensões residuais em peça estampada pela técnica de vibrações mecânicas. 2010.**

Neste trabalho, foi realizado o estudo do alívio das tensões residuais em uma peça estampada a frio por meio do uso de vibrações abaixo da frequência de ressonância. O autor utilizou dois métodos para a medição das tensões residuais: mapeamento dos valores relativos da tensão cisalhante máxima e medição dos valores absolutos das tensões residuais.

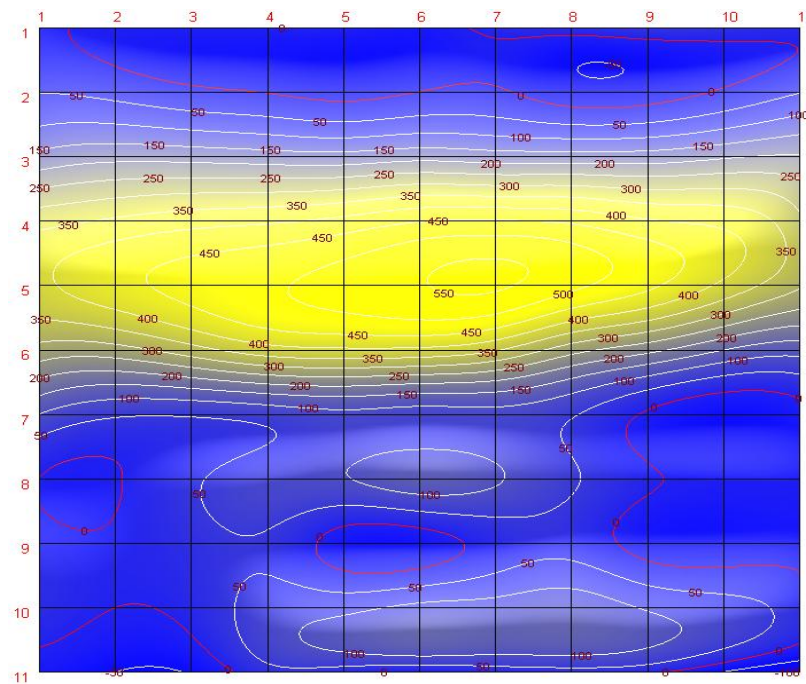
Através do método magnético, o autor obteve as figuras de 36 a 39:

Figura 36: Mapa das tensões área 1 antes do tratamento vibracional



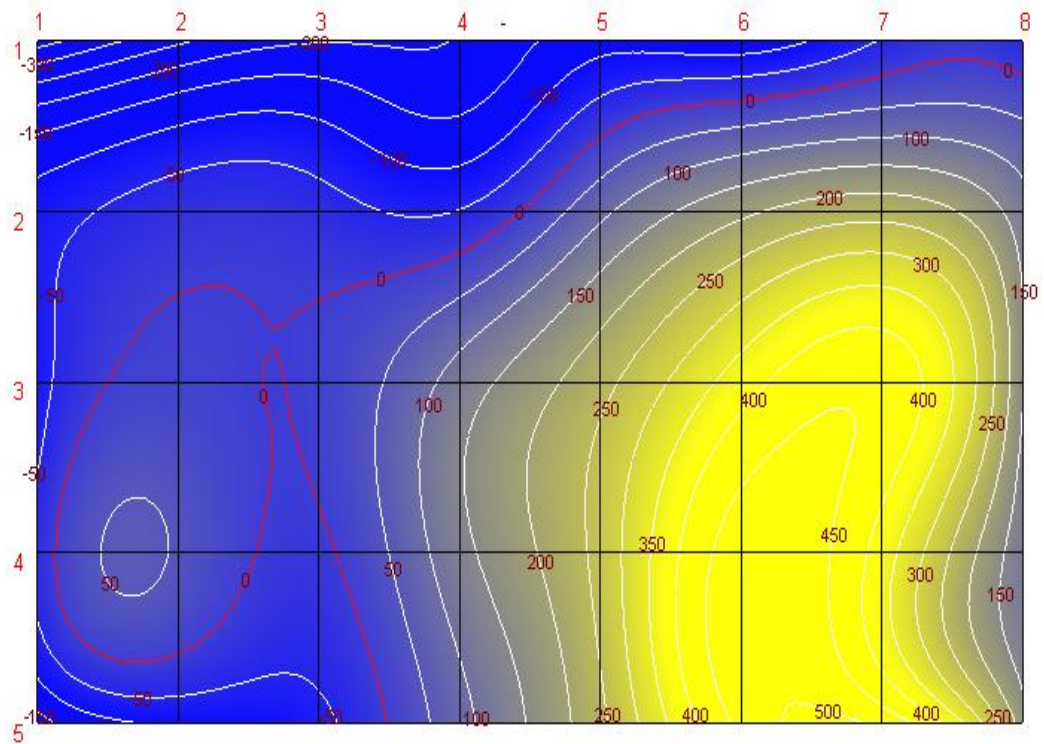
Fonte: Santos (2010).

Figura 37: Mapa das tensões área 1 após o tratamento vibracional



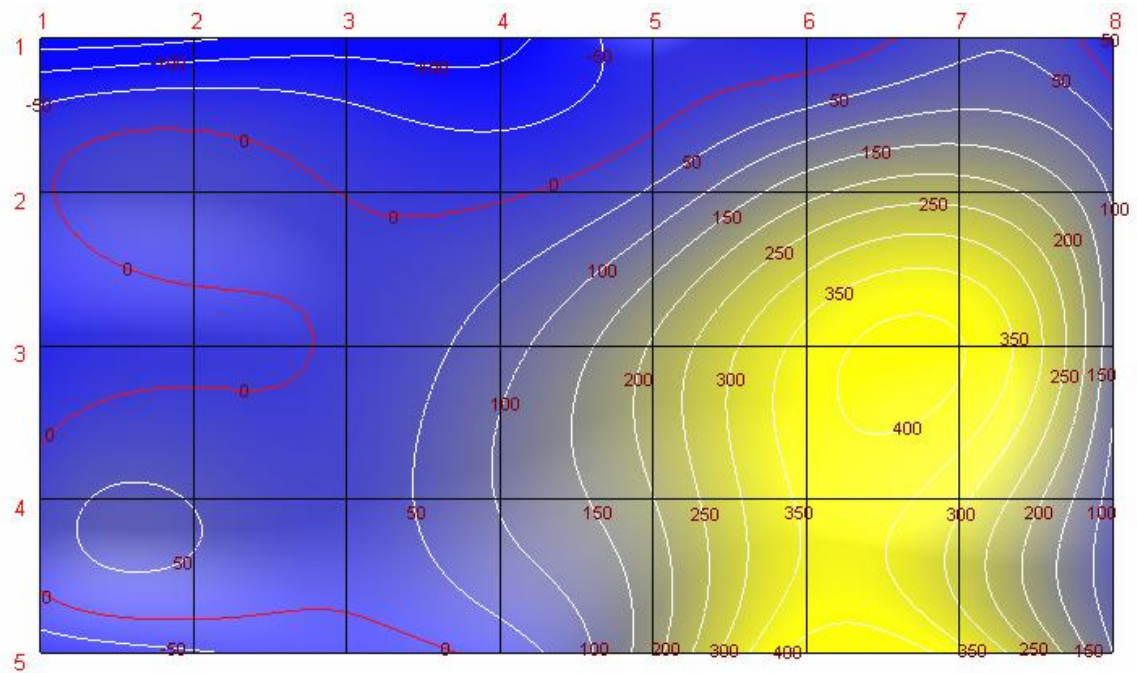
Fonte: Santos (2010).

Figura 38: Mapa das tensões área 2 antes do tratamento



Fonte: Santos (2010).

Figura 39: Mapa das tensões área 2 após o tratamento



Fonte: Santos (2010).

Através do método de raios-X, o autor obteve os seguintes valores de tensões residuais (Tabela 5):

Tabela 5: Valores absolutos das tensões

Ponto	Direção	Valor da tensão medido (σ MPa)		Tensão cisalhante máxima calculada (σ_{max} MPa)		Porcentagem de 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 (2010).

O autor concluiu que o uso de vibração mecânica para o alívio das tensões residuais foi eficaz para o alívio de tensões presentes no regime elástico. Já as tensões que permanecem na peça ocorrem devido às deformações plásticas provenientes do processo de conformação por estampagem.

- **JIJIN XU; LIGONG CHEN; CHUNZHEN NI. Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes. 2006.**

Neste trabalho, os autores analisaram os efeitos do processo *Vibratory Weld Conditioning* (VWC) nas tensões residuais, em tubos soldados. O VWC se mostrou capaz de reduzir tanto as tensões residuais superficiais externas quanto as tensões residuais máximas. Porém, para o alívio das tensões axiais residuais na superfície exterior, o método não se mostrou tão eficaz. Com o uso deste método, os autores observaram que as tensões residuais são inferiores à resistência à elasticidade, o que confere maior segurança para a integridade das estruturas soldadas.

- **QINGHUA, L.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning. 2006.**

Neste estudo, os autores utilizaram o processo de soldagem sob vibração (VWC) para melhorar a qualidade de uma válvula soldada pelo processo de arco submerso (SAW). Após o processo, os autores observaram uma redução nos valores da tensão residual e da deformação de solda. Os autores observaram também uma grande mudança na estrutura microscópica do material, devido à quebra do crescente dendrítico do grão na solda e na zona termicamente afetada (ZTA), o que causa a fragmentação de Widmanstätten. Porém, foi possível observar que os valores de resistência à tração e do limite de elasticidade não apresentaram mudanças significativas com o uso do método.

- **CRISI, G. S.; MENDONÇA, D. P. Alívio de tensões em soldas realizado por tratamento térmico e por vibração: uma comparação entre ambos os métodos. 2004.**

Neste trabalho, comparou-se os métodos térmicos e mecânicos para o alívio das tensões residuais. As amostras tratadas termicamente apresentaram um aumento no alongamento e uma redução na resistência à tração. Já a amostra tratada com vibração mecânica não apresentou mudança nestas propriedades. Em ambos os métodos, a energia no teste de impacto foram semelhantes, assim como a dureza resultante. Em ambos os métodos, pode-se notar um alívio nas tensões internas.

- **HAHN, W. F. Vibratory residual stress relief and modifications in metals to conserve resources and prevent pollution. 2002.**

Hahn estudou o uso de ressonâncias para o alívio de tensões residuais. O processo VSR se mostrou extremamente eficaz para o alívio das tensões internas.

A redução de tensão interna por meio do processo vibracional se mostrou mais eficaz para peças com menor nível de tensões residuais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo estudar e analisar os efeitos do uso da vibração mecânica para o alívio de tensões residuais em juntas soldadas, a fim de verificar o desempenho, a viabilidade e a eficácia do método vibracional. Assim, os resultados pesquisados possibilitam uma melhor avaliação do uso do método, e em quais condições ele se mostra mais eficiente.

Os efeitos do uso da vibração mecânica foram avaliados tanto na microestrutura do material, quanto em suas propriedades mecânicas.

Pela análise dos resultados estudados, é possível notar um destaque do tratamento vibracional aplicado durante a soldagem, chamado de *Vibratory Weld Conditioning* (VWC). O outro tratamento analisado é o *Vibratory Stress Relief* (VSR), que é aplicado após o processo de soldagem. Este tratamento também apresentou resultados positivos no alívio destas tensões, em alguns casos. Também foram comparadas amostras tratadas pelos processos térmicos convencionais e amostras sem tratamento. Em alguns estudos, não foi possível notar ganhos significativos com o uso dos tratamentos térmicos e/ou vibracionais.

Verificou-se que o emprego do método vibracional teve como resultado, em alguns casos, o refinamento do grão. Tal fato contribui para o alívio das tensões internas.

As alterações microestruturais geradas pelo processo de soldagem afetam diretamente as propriedades mecânicas, portanto, o uso da vibração mecânica mostra-se eficiente para a preservação destas propriedades.

O uso da vibração mecânica para o alívio de tensões residuais se mostrou um método importante e viável para a fabricação de soldas de alta qualidade, o que é fundamental para a indústria. Este método é, portanto, uma alternativa vantajosa quando comparada ao uso dos tratamentos térmicos, pois apresenta menor gasto energético, e, conseqüentemente, econômico, além de uma possuir logística mais simples. Também pode-se destacar o fato de ser uma opção que não agride o meio ambiente.

Portanto, é necessário um aprofundamento nas pesquisas nesta área, pois os resultados encontrados nos estudos apresentados são divergentes, e a quantidade de estudos nesta área ainda é relativamente baixa.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para as futuras pesquisas nesta área, recomenda-se:

- Verificar a influência dos tratamentos VSR e VWC para os diferentes tipos de processo de soldagem;
- Utilizar amostras tratadas por ambos os tratamentos, VSR e VWC, além das amostras tratadas apenas por VSR, VWC, tratadas termicamente ou não tratadas;
- Verificar a influência dos tratamentos VSR e VWC sobre as tensões residuais em juntas soldadas, em todas as regiões das juntas soldadas.
- Avaliar a influência que tempo após o processo de soldagem possui nos resultados do método VSR.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, L.F.C.B. **Avaliação da influência da aplicação da vibração mecânica na microestrutura e em características mecânicas de juntas de aço inoxidável martensítico CA6MN soldadas pelo processo FCAW**. Orientador: prof. Dr. Carlos Ângelo Nunes. 2015. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, 2015.

AMARAL, A. G. B. **Análise de tensões com ultrassom em tubos soldados por resistência elétrica**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho. 2012. 120f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

AOKI, S.; NISHIMURA, T.; HIROI, T. Reduction method for residual stress of welded joint using random vibration. **Nuclear Engineering Design**, v. 2, 235p., p. 1441-1445, 2005.

ASM - AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Properties and selection: nonferrous alloys and special: purpose materials**. Materials Park, Ohio: ASM, 2000.

ASM - AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Weld Integrity and Performance**. Materials Park, Ohio: ASM, 1997.

AZAROFF, L.V. **Elements of X-ray: Crystallography**. New York: Mac. Graw Hill, 1968. 120p.

BENEGRA, M. **Viabilidade do Cálculo das Tensões Residuais pela Técnica de Identação Instrumentada em Filmes Finos de Nitreto de Titânio**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Martins de Souza. 2005. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2005.

BENITEZ, D. B. **Metodologia de análise da influência das tensões residuais no comportamento à fratura**. Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves. 2002. 135f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

BIANCALANA NETO, A. **Alívio de tensões em tubos a partir da aplicação de vibração mecânica**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho. 2016. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

BONAL TECHNOLOGIES INC. **Meta-lax vibration stress relief: the proven alternative to thermal stress relief**. 2008. Disponível em: <http://www.meta-lax.com/>. Acesso em: 10 set. 2019.

BOROBIA, J. P. **Elemento de máquinas y vibraciones**. 3. ed. Argentina: McGraw-Hill, 2012.

BRAGA, E. M. A. **Vibração como elemento de alívio de tensões residuais em cordões de solda**. In: WORKSHOP DE VIBRAÇÕES E ACÚSTICA DA REGIÃO NORTE, 1., 2011, Tucuruí. **Anais [...]** Tucuruí/PA: ABS, 2011.

CALLE, M. A. G. **Análise numérico computacional das tensões induzidas pelo jateamento com granalha**. Orientador: Prof. Dr. Edison Gonçalves. 2004. 215 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CARVALHO, A. L. M. **Efeito das tensões residuais na fratura e resistência a fadiga da liga de alumínio 7050-T7451**. Orientador: Prof. Dr. Herman Jacobus Cornelis Voorwald. 2004. 230 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá. 2004.

CHUVAS, T. C. **Estudo da influência dos parâmetros de tratamento de alívio das tensões residuais por vibração mecânica em juntas soldadas a plasma**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, 2012.

COHEN, J. B.; NOYAN, I. C. **Residual stress: measurements by diffraction and interpretation**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1987.

CRISI, G. S.; MENDONÇA, D. P. **Alívio de tensões em soldas realizado por tratamento térmico e por vibração: uma comparação entre ambos os métodos**. 2004. In: CONSOLIDA CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 2004, Rio de Janeiro. **Anais [...]** Rio de Janeiro/RJ: ABS, 2004.

FLAVENOT, J. F. Layer removal method. In: LU, J. *et al.* **Handbook of measurement residual stresses**. Lilburn: Fairmont Press, 1996. cap. 3, p. 35-37.

FONSECA, L. N. **Caracterização macro e microestrutural e comportamento mecânico de juntas em aço USI-SAR 80 T soldadas pelo processo GMAW com auxílio de processos vibracionais**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Paulista, Guaratinguetá, 2016.

FONSECA, M. P. C. **Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga**. Orientador: Prof. Dr. Antônio Augusto Couto. 2000. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

GOMES FILHO, O. **Influência da corrente elétrica, da força de recalque e do tratamento térmico de revenimento na soldagem topo a topo por centelhamento de serras de fita bimetalica**. Orientador: Prof. Dr. Sérgio Duarte Brandi. 2007. 45 f. Dissertação (Mestrado Tecnologia em Metalurgia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GUROVA, T. **Variação do Estado de Tensões Residuais introduzidas por Shot-Peening, durante Deformação Plástica por Tração Uniaxial, em aços**. Orientador: Prof. Dr. João Marcos Alcoforado Rebello. 1997. 188f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 1997.

HAHN, W. F. Vibratory residual stress relief and modifications in metals to conserve resources and prevent pollution. **Center of Environmental and Energy Research (CEER)**, Alfred, NY: Alfred University, 2002.

HEBEL, G. A. Vibrational conditioning of metals. **Heat Treating Progress Magazine**. U.S., v. 4, abr. 2004.

HEBEL, T. E. Heat Treating: Stress Relieving. **Metal Casting**. p.1-4. Set. 1989.

HOLDEN, T. M.; ROY, G. The application of neutron diffraction to the measurement of residual stress and strain. In: LU, J. *et al.* **Handbook of measurement residual stresses**. Lilburn: Fairmont Press. c. 6, p. 133-135. 1996.

HUSSEIN A.R.; JAIL N.A.; TALIB A. R. A. Improvement of mechanical welding properties by using induced harmonic vibrations. **Journal of Applied Sciences**, v. 11, p. 348-353. 2011.

JJIN, X.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N. Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 84, n. 2007, p. 298-302. 2006.

JUCIUS, A.; VALIULIS, A. V.; CERNASEJUS, O. Effects of vibration energy input on stress concentration in weld and heat-affected zone of S355J2 steel. **Solid State Phenomena**, v. 165, p. 73-78, 2010.

KAINTH, M.; GUPTA, D. A review: effect of vibration mechanical properties of welded joints. **IJME - International Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, n. 1, 2015.

KANDIL, F.A.; LORD, J.D.; FRY, A.T.; GRANT, P.V. **A review of residual stress measurement methods**. NPL Materials Center, Reino Unido, 2001.

KRAUS, I. TROFIMOV, V. V. **Rentgenová tenzometrie**. Praha: Academia Praha. 1998.

KOU, S. **Welding metallurgy**. 2. ed. New Jersey: Editora John Wiley & Sons, 2003. 466 p.

KOU, S. **Welding metallurgy**. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2002. 387 p.

KOU, S. **Welding metallurgy**. New York: John Wiley & Sons, 1987. 365 p.

LEGGATT, R. H. Residual stresses in welded structures. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 85, n. 3, p. 144-151, 2008.

LISCIC, B.; TENSI, H. M.; LUTY, W. Theory and technology of quenching. New York, Springer Verlag, 1992. In: TOTTEN, G. E. **Steel heat treatment: metallurgy and technologies**. 2. ed. Local: Taylor & Francis Group, 2007. 820 p.

LU, J. **Handbook of measurement of residual stresses**. Society for Experimental Mechanics (U.S). Lilburn, GA: Fairmont Press, 1996.

LU, Q.; CHEN, L.; NI, C. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning. **Materials Science and Engineering: A**, v. 457, n. 1, p. 246-253, 2007.

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

MACHADO, I. G. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre, 1996. 447 p.

MACIEL, L. F. C. **Efeitos da vibração simultânea nas propriedades mecânicas de juntas de aço ASTM A131 soldadas pelo processo Arame tubular (FCAW)**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho. 2014. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MARTINS, C.A.P. *et al.* **Alívio de tensões e condicionamento de solda por vibrações sub-ressonantes**. 2012. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, 38., 2012, Ouro Preto. **Anais [...]** Ouro Preto/ MG: ABS, 2012.

MISCHENKO, A.; SCOTTI, A. Tensões residuais em soldagem a arco: uma visão holística. **Revista Soldagem e Inspeção**, v. 23, n. 1, São Paulo, 2018.

MODENESI, P. J. **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**. Apostila da Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008.

MOREIRA, H. S. **Estudo da influência dos parâmetros de soldagem MIG e da morfologia do cordão no comportamento à fadiga de juntas soldadas de um eixo traseiro veicular**. Orientador: Prof. Dr. Cláudio G. Schön. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

OLIVEIRA, L. A. **Susceptibilidade à corrosão sob tensão da junta dissimilar de aço inoxidável Aisi 310 e aço inoxidável duplex 2304 com o metal de adição E3091**. 2015. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 8., 2015, Salvador. **Anais [...]** Salvador/ BA: ABS, 2015.

OLIVEIRA, A. R. **Tratamento térmico**. Belém/PA: IFPA, 2007.

PEREIRA, W. R. **Avaliação do efeito da vibração mecânica aplicada em uma junta em ângulo soldada pelo processo arco submerso**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho. 2018. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

PUČKO, B. Heat treatment and surface engineering of tools dies. **Materials and manufacturing processes**, v. 24, n. 7-8, p. 766-771, 2009.

QINGHUA, L.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N. Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning. Institute of Welding, School of Materials Science and Engineering,

Shanghai Jiaotong University. **Materials Science and Engineering A**, v. 457, n. 1-2, p. 46-253, 2006.

RAJ, B.; JAYAKUMAR, T. Methodologies for characterization of defects, stresses and microstructures in pressure vessels and pipes. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 73, n. 2, pp. 133-146, 1997.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas** 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice-Hall, 2008.

ROBBINS, M. E. **Topics in vibratory stress of weldments**. Master of science (Mechanical Engineering). Faculty of Rensselaer: Hartford. United States: Pensselaer Libraries, 2004.

SAKTHIVEL, P.; SIVAKUMAR, P. Effect of Vibration in Tig And Arc Welding Using AISI 316 Stainless Steel. **International Journal of Engineering, Research and Science & Technology**, v. 3, n. 4, nov. 2014.

SALAZAR, C. E. V. **Avaliação através da inspeção magnética da condição superficial de anéis de rolamento de aço DIN 100Cr6 após torneamento duro a seco**. Orientador: Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese. 2008. 184 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

SANT'ANNA, A. M. S. **Comportamento mecânico, tensões residuais e caracterização microestrutural de juntas soldadas pelo processo ERW de aço API 5L X65**. Orientadores: Profª. D. Sc. Maria da Penha Cindra Fonseca e Prof. D. Sc. João Marcos Alcoforado Rebello. 2016. 168f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense – PGMEC, Niterói, 2016.

SANTOS, C. H. **Estudo do Alívio das tensões residuais em peça estampadas pela técnica de vibrações mecânicas**. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli. 2010. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

SHANKAR, S. **Vibratory stress relief of mild steel weldments**. Advisor: Thesis. Prof. William E. Wood. 1982. 128f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Materials Science) – Faculty of the Oregon Graduate Center in partial fulfillment, Oregon, 1982.

SOUSA, D. A. **Determinação de tensões residuais em materiais metálicos por meio de ensaio de dureza**. Orientador: Prof. Dr. Frederico Ozanan Neves. 2012. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João Del-Rei, São João Del-Rei, 2012.

SRE – STRESS RELIEF ENGINEERING. **Vibratory stress relief**: resonant vibration method for reducing residual stresses in welded or machined fabrications, 2008. Disponível em: <http://www.stressreliefengr.com/>. Acesso em: 05 set. 2019.

STRIFE, J. R.; PASSOJA, D. E. The effect of heat treatment on microstructure and cryogenic fracture properties in 5Ni and 9Ni Steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 11, p. 1343–1350, 1980.

SUN, M. C.; SUN, Y. H.; WANG, R. K. Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel. **Material Letters**, v. 58, n. 7-8, p.1396-1399, mar. 2004.

SUTERIO, R. **Medição de tensões residuais por endentação associada à holografia eletrônica**. Orientador: Prof. Dr. Eng, Armando Albertazzi Gonçalves. 2005. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

UEDA, Y. Sectioning methods. In: LU, J. *et al.* **Handbook of measurement residual stresses**. Lilburn: Fairmont Press, 1996. cap. 4, p. 49-53.

VENDRAMINE, C. F. **Levantamento da curva TTT do aço 15b30 com análise dos constituintes ferrita e perlita**. Orientador: Prof. Rodrigo Magnabsco. 2012. 119f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Centro Universitário da FEI, São Bernardo do Campo, 2012.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo: E. Blücher, 1992.

WAINER, E. **Soldagem**. 19.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1983.720p.

WITHERS, P.J. *et al.* Recent advances in residual stress measurement. **International Journal of Pressure Vessels and Piping** , v.85, UK, 2008.

WU, W.; LIN, D.; CHEN, S. Mechanical properties of weldment affected by various vibration frequencies. **Journal of Materials Science Letters**, v. 8, p. 1829-1831, 2000.