

1 INTRODUÇÃO

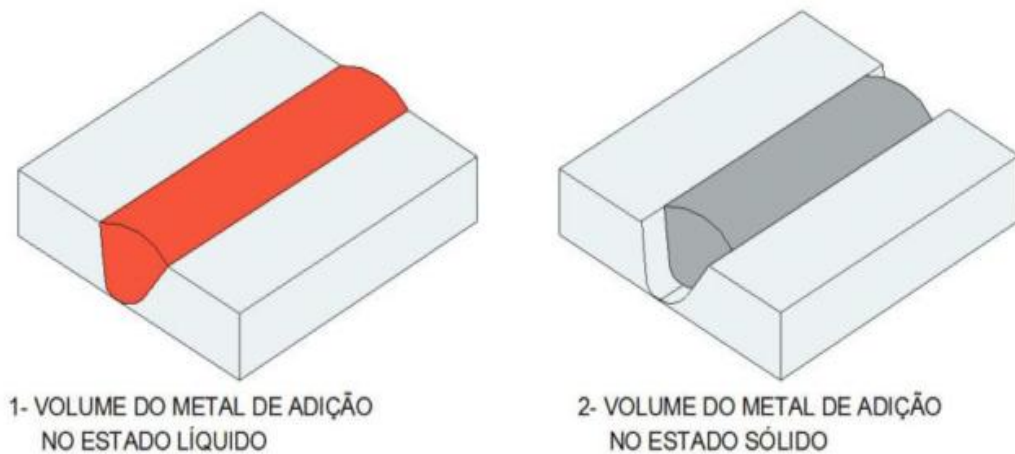
Um dos maiores problemas encontrados na indústria metalmeccânica é a presença de tensões residuais (TR), que são geradas em todos os processos de fabricação. Nas operações de soldagem, principalmente as que envolvem a fusão dos materiais, temos uma variação não uniforme e rápida de temperatura [11].

O desenvolvimento de tensões residuais é um fenômeno intrínseco dos processos de soldagem e ocorre em função dos parâmetros utilizados na execução do cordão de solda, tais como: corrente, tensão, geometria da junta, número de passes, composição química dos metais de base e de adição, e de outros fatores pertinentes ao processo. Isso implica um aquecimento localizado muito alto, que traz como consequência a dilatação da região, a qual sofre restrições das partes adjacentes da junta soldada. As diferentes regiões da junta soldada ao serem submetidas a variações térmicas reagem estabelecendo diferentes expansões e contrações ao longo de toda a extensão afetada. Como resultado, ao final da soldagem teremos tensões residuais e deformações que podem atingir o valor do limite de elasticidade do material. Essas tensões e deformações podem afetar sobremaneira a utilidade e a estabilidade dimensional da peça soldada, que podem ser otimizadas com o conhecimento de suas características e de medidas para sua prevenção e controle. O aparecimento de tensões residuais em peças e estruturas soldadas pode criar diversos problemas, tais como a formação de trincas, maior tendência para a ocorrência de fadiga do material, surgimento de corrosão sob tensão e o aparecimento de fratura frágil [12].

O alívio dessas tensões residuais pode ser assegurado por tratamentos térmicos ou mecânicos. Considerando a relevância dos tratamentos térmicos, quando essa técnica é utilizada, nos casos dos aços, aparecem modificações de caráter metalúrgico, que podem ser desfavoráveis no caso de ciclos repetidos ou de permanência por longos períodos em temperaturas altas.

Uma forma de visualizar o desenvolvimento de tensões internas em uma junta soldada é mostrada na figura abaixo. No instante em que é depositado, o metal de adição está aquecido e no estado líquido, ocupando o volume mostrado na figura 1. Na temperatura ambiente, essa mesma quantidade de metal solidificado ocupa somente o volume mostrado em (2) [2].

Figura 1: Desenvolvimento de tensões internas em uma junta soldada



Fonte: [2]

Para o metal de base, como foram formadas ligações em níveis atômicos durante o processo, o volume ocupado ao final da operação é o mesmo inicial, ficando, portanto sujeito a um nível elevado de tensão e de deformação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos Gerais

Propor uma nova metodologia combinada para alívio de tensões residuais em juntas soldadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar e descrever as tensões residuais e suas características;
- Apresentar e discutir as principais características dos métodos para alívio de tensões residuais já consolidados;
- Propor uma nova combinação de técnicas a fim de se obter um método combinado mais eficiente que os atualmente utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Soldagem

A soldagem é um processo de fabricação largamente utilizado na indústria, devido sua eficiência, integridade elevada e aplicabilidade. Pode-se definir a soldagem como uma operação que visa união de duas ou mais peças, assegurando na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas [8]. Os processos de soldagem podem envolver ou não fusão do material, ou adição de metal.

A soldagem por fusão consiste no aquecimento do metal de solda e do metal adicionado (quando este é usado) até o ponto de fusão gerando o coalescimento localizado da junta. Embora a soldagem por fusão seja um processo operacionalmente simples, ela engloba diversos fenômenos complexos que ocorrem simultaneamente. Três fenômenos acoplados estão presentes em uma junta soldada por fusão: térmico, mecânico e transformação de fase. A interação desses fenômenos pode afetar a integridade estrutural da junta, alterando suas propriedades mecânicas e gerando tensões residuais. (ASTM. 1993).

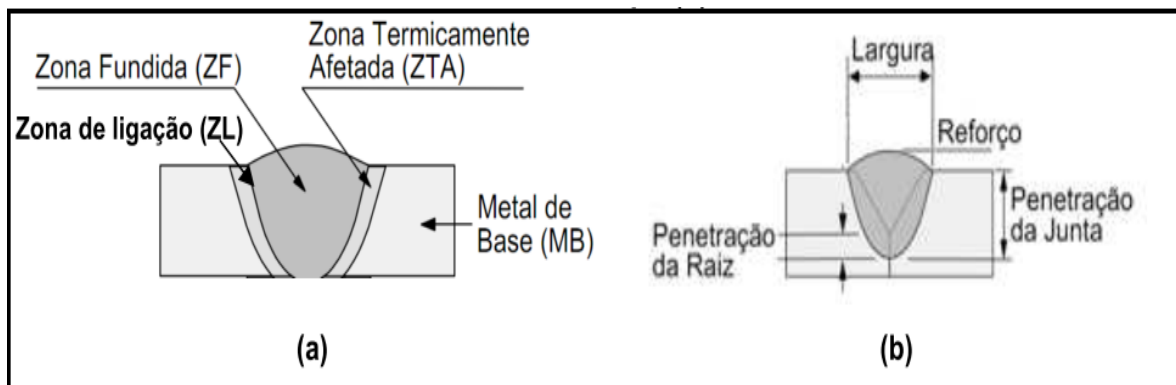
A soldagem por fusão se aplica a grande maioria dos metais, porém as suas diferentes características propiciam diferentes características a junta soldada, seja na eficiência, facilidade ou qualidade. Esse conjunto de características dos metais influencia na soldagem é conhecido como soldabilidade do metal.

Nos processos de soldagem por fusão, a fonte de calor é altamente localizada, promovendo a fusão do metal base e do metal de adição (quando este é utilizado). Ocorre que: a fonte de calor pontual gera um rápido aquecimento localizado, promovendo assim um gradiente térmico nas proximidades da junta. A dilatação térmica decorrente da variação de temperatura provoca deformações trativas em algumas regiões e compressivas em outras. Após o resfriamento, esse mecanismo de tração (dilatação) e compressão (contração) cessa, dando origem a tensões internas, conhecidas como tensões residuais.

2.2 Juntas soldadas

Após o término do processo de soldagem, observa-se a presença da junta soldada que é caracterizada pela presença de quatro regiões distintas que são: Metal de Base (MB), Zona Fundida (ZF); Zona de Ligação (ZL) e Zona Termicamente Afetada (ZTA). O pico de temperatura e as subseqüentes taxas de resfriamento determinam os limites entre as áreas. A ZTA compreende a área afetada pelo calor, onde ocorrem mudanças nas propriedades mecânicas e metalúrgicas, embora não tenha alcançada a temperatura de fusão. Devido esse fato, a ZTA é considerada uma área crítica. Na soldagem de aços, em particular, dependendo da composição química e da história prévia de processamento termomecânico, o aquecimento promovido pela soldagem pode levar a uma sorte de transformações na ZTA que podem ter impacto significativo nas propriedades mecânicas do metal nesta região, seja por transformações de fase ou precipitação de partículas de segunda fase. A figura 2 apresenta as regiões de uma junta soldada e suas dimensões geométricas.

Figura 2: Regiões de uma junta soldada (a) e dimensões geométricas de uma solda de topo (b).



Fonte: [8]

2.2.1 Metal de Base (MB)

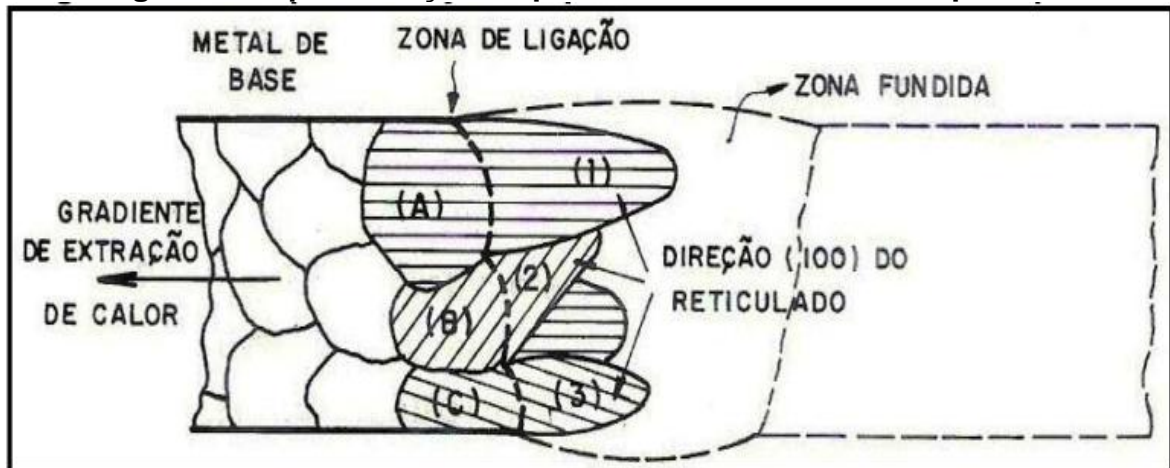
O metal de base é constituído pelo restante da peça que não sofreu nenhuma transformação metalúrgica. Entretanto, esta região pode estar em um estado de alta tensão residual, o que poderá trazer consequências para utilização da peça [6].

Sabe-se que capacidade de um metal ou liga de se deixar soldar nas condições impostas pelo processo de fabricação, em uma estrutura específica e adequada, é conhecida como soldabilidade [8].

2.2.2 Zona de Metal Fundido (ZF)

No caso de soldas autógenas, a zona fundida, também chamada de metal de solda ou cordão de solda é constituída, em sua totalidade, do metal de base levado a fusão e solidificação. Já com o emprego do metal de adição, o metal de solda é constituído de uma mistura de metal de adição e de uma parte do metal de base fundido e solidificado. Geralmente essa zona apresenta diversas regiões, com características que dependem de cada metal de base. Quando o metal de solda for constituído por um único passe de solda, os grãos deverão crescer perpendicularmente por epitaxia a partir dos grãos da ZTA próximos a Zona de Ligação, tomando a forma colunar. A figura 3 ilustra de maneira esquemática o crescimento epitaxial que é a nucleação e crescimento com a mesma orientação cristalina dos grãos da região parcialmente fundida [42].

Figura 3: Representação esquemática do crescimento epitaxial.



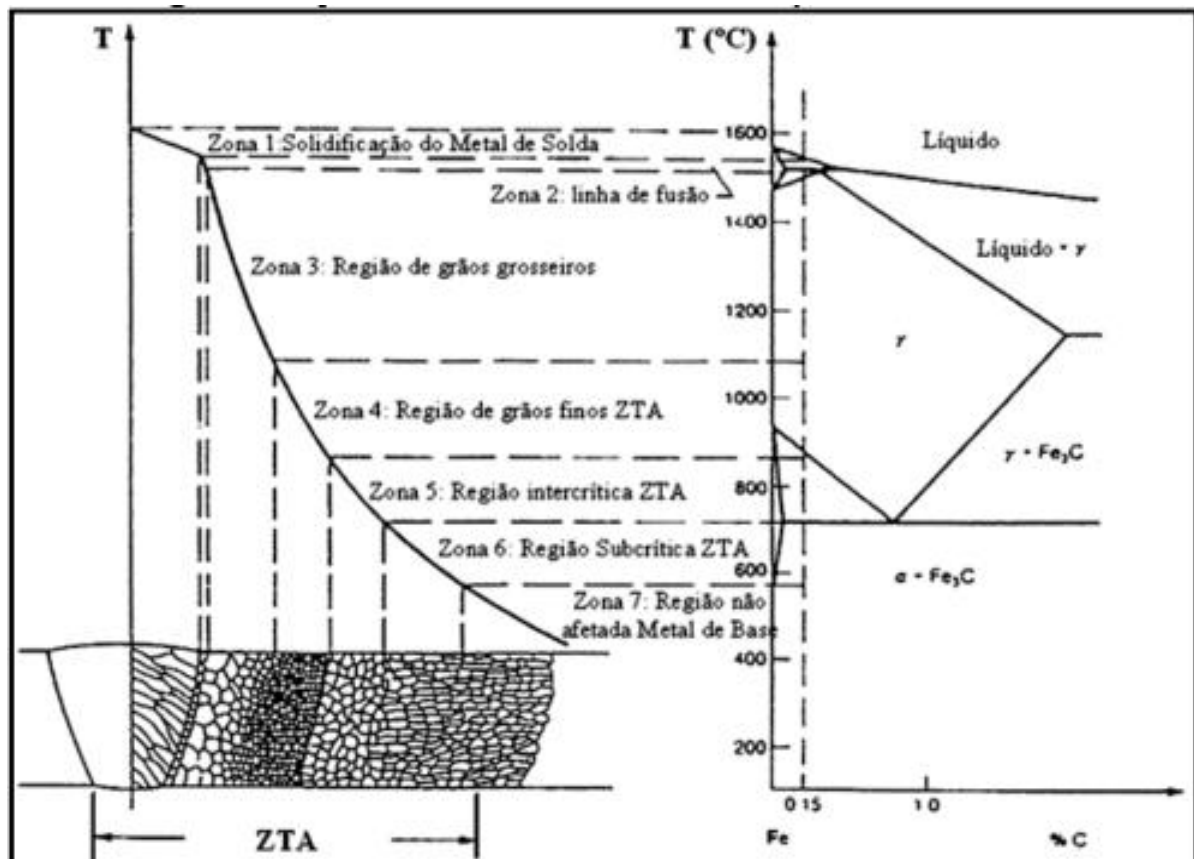
Fonte: [42]

2.2.3 Zona Termicamente Afetada (ZTA)

Como consequência da máxima temperatura alcançada, do tempo de permanência do metal de base na mesma temperatura e das taxas de aquecimento

e resfriamento existe uma região onde não ocorre nenhum tipo de fusão, porém são produzidas alterações alotrópicas no estado sólido, incluindo crescimento de grãos e transformações de fase. Geralmente essa região apresenta diversas sub-regiões que dependem de cada metal de base. As regiões orientadas na ZTA dependem da condição inicial em que o material se encontra. Algumas dessas condições são solubilizadas, envelhecidas, super envelhecidas e recozidas. A figura 4 apresenta de maneira esquemática as regiões da junta soldada caracterizadas por diferentes microestruturas [42].

Figura 4: Regiões da junta soldada caracterizada por diferentes microestruturas.



Fonte: [42]

2.3 Metalurgia da Soldagem

Sabe-se que a microestrutura resultante de uma estrutura soldada de aço depende da velocidade de resfriamento. Durante os processos de soldagem o aporte de calor é muito severo e localizado, gerando um gradiente térmico muito elevado. As dimensões da Zona Termicamente Afetada (ZTA), assim como de cada

uma de suas regiões, são determinadas pelo aporte de calor aplicado durante o processo de soldagem. As fases e morfologias resultantes em cada região, por outro lado, são resultado direto das condições de resfriamento da junta. Elevadas taxas de resfriamento conduzem a formação de exclusiva da martensita, enquanto taxas menores conduzem a combinações de martensita com bainita, ferrita e perlita, respectivamente. Portanto, o conhecimento de tais microestruturas e seu controle desempenha um papel fundamental na avaliação da resistência a fratura de estruturas soldadas em geral. (ASTM, 2003)

2.4 Tensões Residuais

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem freqüentemente em peças submetidas a diferentes processamentos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, têmpera, etc.) e representam um dos principais potenciais para diversos problemas como a formação de trincas, falta de estabilidade dimensional e uma maior tendência para a estrutura sofrer fratura frágil, diminuindo a vida útil do componente além de comprometer seu comportamento [3]; entretanto, também podem atuar benéficamente. Em geral, tensões residuais compressivas na superfície são mais favoráveis, pois aumentam a vida em fadiga de um componente mecânico, e o oposto ocorre com tensões residuais trativas, pois diminuem a vida em fadiga [4].

As tensões residuais apresentam caráter elástico, assim, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material. Também se define as tensões residuais como sendo ordinárias, ou seja, uma tensão trativa irá somar-se com outra tensão trativa, ou ainda, uma tensão trativa irá se subtrair com outra tensão compressiva e vice-versa. As tensões residuais podem ser aliviadas aquecendo o material até uma temperatura a qual a tensão de escoamento do material é igual ou inferior às tensões residuais presentes no material. Ou seja, neste caso as tensões residuais irão causar deformações plásticas (escoamento do material) e serão aliviadas [36].

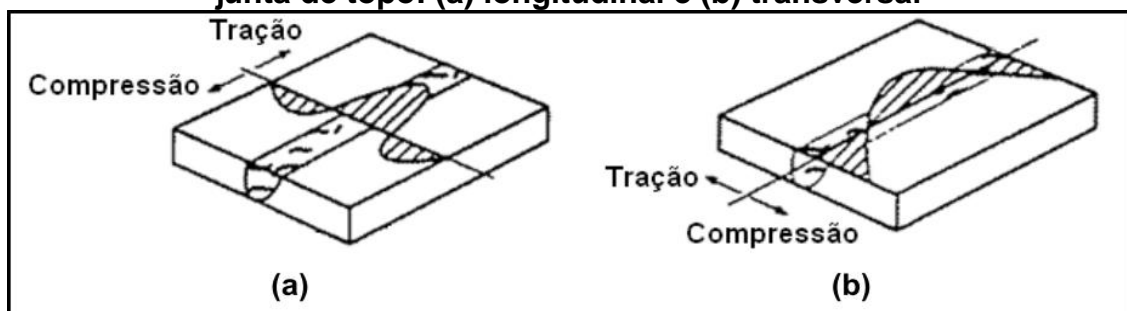
2.4.1 Tipos de Tensões

A classificação mais comum das tensões residuais é quanto à área de abrangência, sendo elas tensões residuais macroscópicas, microscópicas e submicroscópicas.

Como já dito, as tensões residuais são originadas devido a desajustes entre diferentes regiões. Quando esses desajustes atravessam grandes distâncias, por exemplo, aqueles causados por deformação plástica não uniforme ou por acentuados gradientes térmicos, como o que ocorre na soldagem ou tratamento térmico, as tensões residuais resultantes são denominadas macroscópicas, conhecidas também como tipo I [35]. Um padrão típico de tensões residuais longitudinais macroscópicas é encontrado em chapas finas soldadas. Tem-se o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma redução deste valor a medida que se afasta do cordão até que a tensão se torne compressiva, para manter o equilíbrio dos carregamentos internos, considerando-se que as tensões são constantes ao longo da espessura.

As tensões residuais longitudinais são de tração e de grandeza elevada na zona central da junta soldada, normalmente iguais à tensão de escoamento do material nessa zona, sendo equilibradas por tensões de compressão na parte restante da seção. No caso das transversais, verifica-se a ocorrência de tensões trativas de pequena amplitude na parte central da junta, equilibradas por tensões de compressões nos extremos. A figura 5 ilustra a distribuição desses dois tipos de tensões residuais após a soldagem. Na realidade, as distribuições de tensões residuais reais apresentam-se de forma mais complexas dadas o elevado número de variáveis que controlam a sua ocorrência [41].

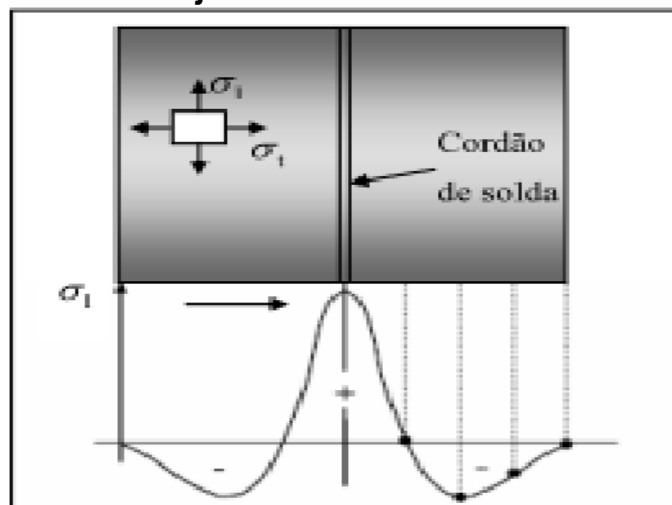
Figura 5: Distribuição de tensões residuais após a soldagem de uma junta de topo: (a) longitudinal e (b) transversal



Fonte: [41]

Já as tensões residuais que variam de grão para grão (tipo II, ou intergranular) ou na escala atômica (tipo III) são tensões microscópicas. Em tais casos, as regiões de desajustes alcançam dimensões micro ou submicroscópicas. Um baixo nível de tensões tipo II quase sempre existe nos metais policristalinos simplesmente pelo fato de que as propriedades térmicas e elásticas de grãos vizinhos orientados diferentes não são as mesmas, e níveis mais elevados ocorrem quando há várias fases ou quando ocorrem transformações de fases. A categoria tipo III ocorre nos materiais metálicos sujeitos a processos que produzam descontinuidades na rede cristalina como: vazios, impurezas, falhas de empilhamento, entre outros. Em um material bifásico, tensões macroscópicas são contínuas ao longo das fases, o que não ocorre com tensões microscópicas tipo II e III. A figura 6 representa um esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada.

Figura 6: Esquema do comportamento das tensões residuais em uma junta soldada

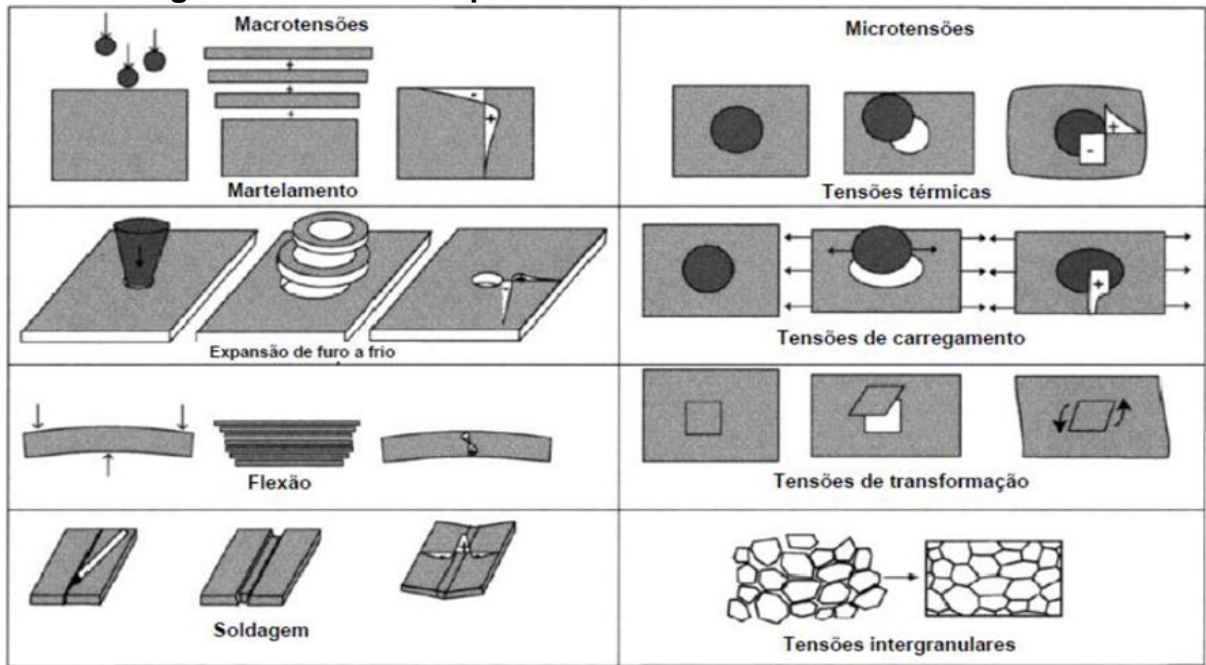


Fonte: [38].

Um cuidado considerável deve haver na escolha da técnica de medição da tensão residual. Saber qual o tipo de tensão é importante ao projeto do componente para melhorar seu desempenho e assegurar-lhe uma integridade estrutural. Por exemplo, em metálicos, tensões tipo II e III são geralmente desprezíveis e a atenção é voltada as tensões macroscópicas tipo I. Como consequência, um comportamento inesperado pode não ser decorrente de medidas erradas de tensões, mas devido a

medição do tipo errado de tensão pela escolha inadequada da técnica. A figura 7 representa os diferentes tipos de macro e micro tensões existente [38].

Figura 7: Diferentes tipos de macro e microtensões residuais



Fonte: [35]

2.4.2 Origem das Tensões Residuais

Uma das principais causas de seu aparecimento é a ocorrência, ao longo de uma seção da peça, de deformações elásticas ou plásticas não uniformes, em escala macro ou microscópicas [4], as quais podem ser originadas por efeitos mecânicos ou térmicos.

Tensões residuais de soldagem também podem ser originadas por transformações de fase, caso durante o ciclo térmico haja transformação de fase localizada que implique em variação volumétrica. A transformação de fase localizada não homogênea pode ocorrer devido as diferentes temperaturas que as regiões do material apresentam durante a soldagem, velocidades de resfriamento diferentes ou variações de composição química [3].

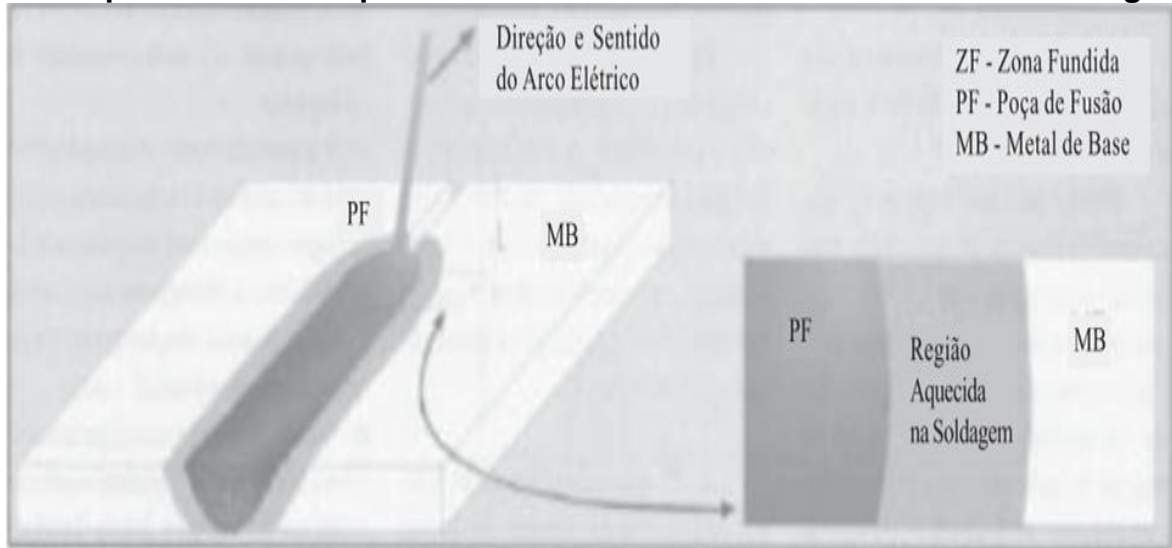
2.4.3 Tensões residuais geradas durante a soldagem.

Tensões residuais de soldagem são conseqüências da variação de temperatura heterogênea no material decorrente da realização da soldagem. As etapas de aquecimento e resfriamento são de suma importância. Se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais (dilatação e contração), estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deverá apresentar nem tensões residuais nem distorções. Contudo, se a variação de temperatura não for uniforme ao longo da peça ou se esta não puder se expandir ou contrair livremente durante o ciclo térmico, tensões residuais e/ou distorções podem se desenvolver. Pode se dizer, portanto, que tensões residuais térmicas são aquelas resultantes de deformações plásticas não uniformes causadas por variações térmicas desiguais ao longo do material [37].

Durante a soldagem por fusão a arco elétrico, por exemplo, ocorre no material de base um aquecimento muito localizado, que faz com que num dado momento, uma pequena porção deste material atinja a fusão, formando a poça de fusão, que posteriormente se solidificará formando a zona fundida.

Como existe uma continuidade no material, a região adjacente à zona fundida atinge uma temperatura bem próxima a de fusão do material. Sabe-se que quando um material metálico é aquecido sofre dilatação, assim como sofre contração quando é resfriado. No entanto, durante a soldagem, o metal aquecido é impedido de se expandir pelas regiões mais frias do material, resultando em tensões residuais de compressão nas regiões próximas a zona de fusão, e tensões residuais de tração nas regiões que impediram sua dilatação (as mais distantes da zona de fusão e mais frias). Caso as tensões residuais superem o limite de escoamento do material, este sofre deformação plástica para alívio de tensões. Caso a mesma porção que foi aquecida e que se encontra comprimida começa a resfriar, então a tendência é de que o material se contraia. Inicialmente a região se alivia da compressão e, como não consegue reduzir seu tamanho, pois o restante do material não permite, ela acaba sendo tracionada. A figura 8 apresenta de maneira ilustrativa a vista geral superior de uma chapa soldada por fusão.

Figura 8: Esquema que representa a vista geral superior de uma chapa soldada por fusão, onde a região fundida e posteriormente solidificada se chama zona fundida ou metal de solda e as adjacências da solda atingem temperaturas muito próximas da temperatura de fusão do metal ou início de fusão da liga.

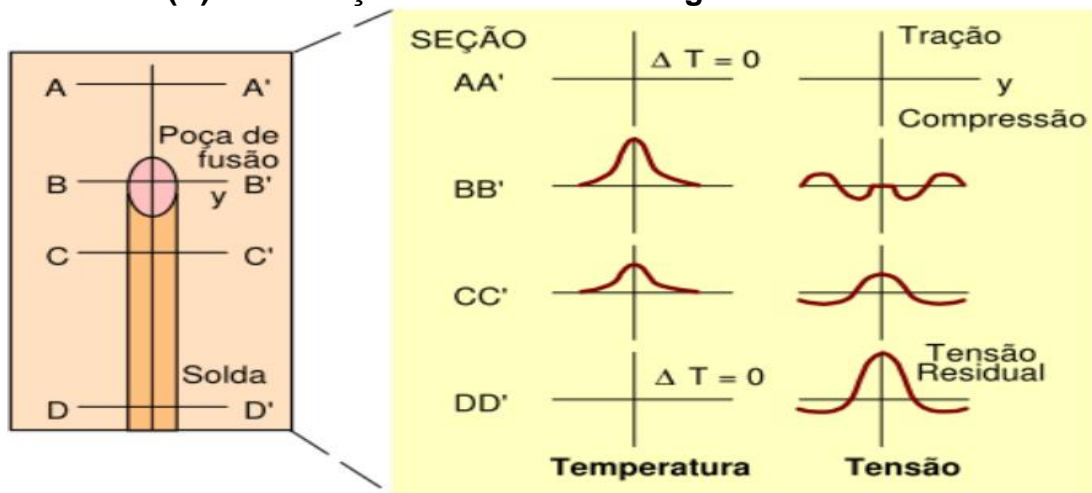


Fonte [40].

As tensões trativas inferiores ao limite de escoamento permanecem ao final da soldagem, sendo essas as residuais [40].

A figura 9 representa de forma ilustrativa a relação entre as tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem.

Figura 9: Representação esquemática da relação entre as tensões residuais e variações de temperatura durante o processo de soldagem. (A) Região da solda. (B) Gradiente de temperatura ao longo do cordão de solda. (C) Distribuição de tensões ao longo do cordão de solda.



Fonte: [3].

O arco elétrico está localizado na origem do sistema de coordenadas da Figura 9 e portanto, há aí metal fundido, representado por uma elipse. A seção AA", distante da fonte de calor, ainda não sofreu variação térmica e está isenta de tensões. Na seção BB', o material aquecido é impedido pelas regiões mais frias da peça de se expandir por dilatação, gerando tensões de compressão nas regiões próximas à zona de fusão e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Na poça de fusão, como o metal está líquido, as tensões são nulas. A seção CC" está se resfriando e solidificando, com tendência à contração, porém é restringida pelas regiões mais afastadas da solda, gerando tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material [3], há distribuições das tensões, considerando apenas o efeito da restrição da contração.

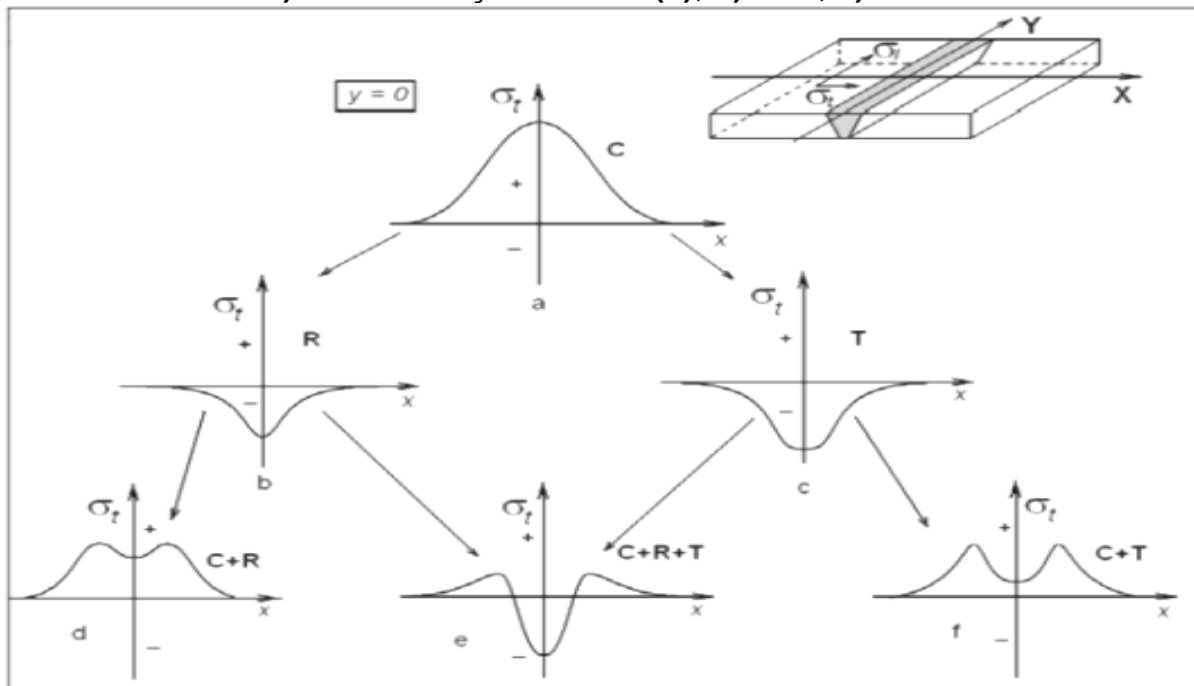
Além do gradiente de temperatura nas direções longitudinal e transversal ao cordão de solda, também há um gradiente ao longo da espessura da peça. Este gradiente pode ocasionar deformação plástica localizada e, conseqüentemente, tensões residuais ao longo da espessura. Quando este gradiente for elevado, como no caso de chapas espessas, o nível de tensão será elevado. Se o resfriamento mais rápido da superfície fosse a única fonte de tensões residuais, seriam obtidas tensões compressivas na superfície e, em equilíbrio, tensões trativas em seu interior. Há distribuição de tensões residuais devido somente o efeito de resfriamento mais rápido da superfície que é representado na figura 10.

Na soldagem, as tensões residuais também são decorrentes de transformações de fases. Os fenômenos de contração e transformação de fase se sobrepõem, e então a quantidade e sinal das tensões residuais dependem fortemente da temperatura na qual a transformação ocorre [4].

No caso de aços, a transformação de austenita para ferrita, bainita ou martensita implica em expansão volumétrica, entretanto, as regiões vizinhas, frias e não transformadas impedem tal expansão, gerando tensões residuais compressivas no material transformado, e trativas na sua vizinhança. Dependendo do módulo de Young (E), rigidez do componente e coeficiente de expansão térmica, tensões compressivas ou até mesmo trativas resultam em expansão volumétrica. Elevadas

tensões residuais de tração são obtidas quando o fim da transformação ocorre em temperaturas relativamente altas. Sendo assim, o limite de escoamento à tração da microestrutura perlítica com ferrita pode ser superado pelas tensões residuais. Conseqüentemente, quanto menor a temperatura de transformação, mais significativos os efeitos das transformações na tensão residual resultante [4].

Figura 10: Representação esquemática da variação de tensões residuais transversais ao longo do cordão de solda provenientes dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+T.



Fonte: [39].

O nível de tensões depende do grau de restrição da estrutura, na direção considerada. Na maioria dos casos, a restrição é total na direção longitudinal do cordão de solda.

Uma vez que as tensões residuais existem na ausência uma sollicitação externa, pode-se afirmar que o sistema é auto-equilibrado e a força e o momento resultante destas tensões, em uma dada seção da peça, devem ser nulos, portanto, as tensões residuais compressivas e trativas são equilibradas [37].

2.4.4 Técnicas de determinação de tensões residuais

A medição de tensões residuais é particularmente difícil, pois, conforme explicado anteriormente, as tensões residuais estão presentes em componentes isentos de qualquer carregamento externo. Como as técnicas tradicionais de medição experimental de tensões em geral se baseiam na mudança de determinadas propriedades antes e depois da aplicação de um carregamento, elas não percebem as tensões residuais.

De uma forma geral, podem-se seguir dois caminhos para obter o valor das tensões residuais: remover material e verificar as tensões aliviadas; comparar as propriedades do componente tensionado com as do componente isenta de tensões [38].

Existem vários métodos para a medição das tensões residuais, entretanto somente alguns são utilizados na prática em componentes que podem apresentar pequenas ou grandes dimensões, como corpos de prova, pontes e aviões. Estes podem ser destrutivos, semi-destrutivos ou não destrutivos e em nenhum deles a tensão desejada é medida diretamente. A análise obtém o valor de deformação elástica do material, e através de fórmulas provenientes da teoria da elasticidade a tensão residual correspondente é calculada.

Cada método apresenta suas aplicações, vantagens, desvantagens e peculiaridades, e os principais parâmetros que devem ser levados na escolha da técnica de medição são: a natureza do componente, tipo de tensões residuais, gradiente de tensões, geometria do componente e o custo final da medição. A tabela 1 apresenta as diversas técnicas para determinação experimental de tensões residuais existentes [38].

Tabela 1: Técnicas para determinação experimental de tensões residuais

Grupo	Técnica
<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de relaxação de tensão 	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas com “strain gages” elétricos • Técnicas com “strain gages” mecânicos • Técnicas com revestimentos frágeis • Técnicas com revestimentos fotoelásticos
<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de difração de Raios X 	<ul style="list-style-type: none"> • Difração em filme • Difração com difratômetro
<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas baseadas em propriedades sensíveis à tensão 	<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas com ultrassom • Técnicas com medidas de dureza • Técnicas magnéticas
<ul style="list-style-type: none"> • Técnicas de fissuração 	<ul style="list-style-type: none"> • Fissuração pelo hidrogênio • Fissuração por corrosão sob tensão

Fonte: [34]

As técnicas de alívio de tensões são baseadas na medida da deformação elástica que ocorre quando uma parte de um corpo de prova contendo tensões residuais é removida. A mudança de forma resultante da deformação pode ser medida por diferentes sensores. Assim, dependendo do tipo de sensor usado, de sua forma de colocação e de remoção do material, diferentes técnicas são definidas. Quando sensores elétricos (“strain gages”) ou mecânicos são usados, as deformações elásticas associadas à remoção de material podem ser determinadas quantitativamente e, com a aplicação de equações da teoria da elasticidade, as tensões residuais inicialmente existentes no material podem ser determinadas. Embora sejam técnicas destrutivas, estas são as mais usadas para a determinação das tensões [34].

As técnicas de difração de raios X baseiam-se na determinação dos parâmetros cristalinos de pequenas regiões da peça e na associação de eventuais variações destes parâmetros com as deformações elásticas presentes no material submetido a tensões residuais. Essa técnica permite medir deformações superficiais em pequenas áreas ($\approx 3 \mu\text{m}$) de diâmetro e não é destrutiva. Contudo, tende a ser mais demorada e menos precisa que a anterior.

Técnicas baseadas em propriedades sensíveis a tensão, de forma similar a anterior, medem a alterações de alguma propriedade qualquer do material e as associam com as deformações elásticas presentes na região de medida. São

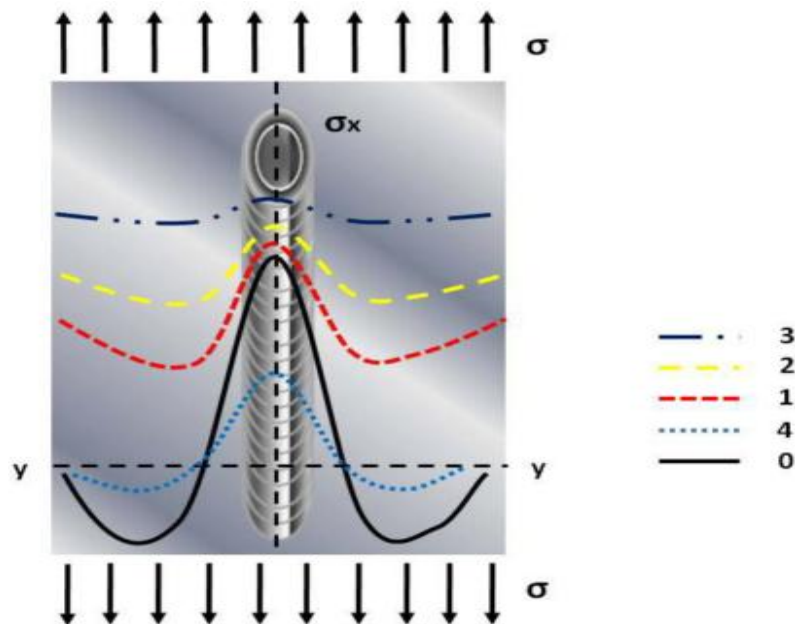
também, técnicas não destrutivas. Técnicas com ultrassom baseiam-se na determinação de alterações no ângulo de polarização de ondas ultrassônicas polarizadas, na taxa de absorção de ondas sonoras ou na velocidade de propagação do som para estimar o estado de tensão do material. Técnicas de dureza são baseadas em pequenas variações na dureza do material com a presença de tensões elásticas. Técnicas magnéticas baseiam-se em variações de propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos (basicamente aços) com as tensões elásticas. Destas técnicas, apenas a última tem aplicação fora do laboratório, existindo dispositivos portáteis para a determinação não destrutiva de tensões residuais.

Finalmente, técnicas de fissuração são baseadas na avaliação qualitativa do padrão de fissuração desenvolvido em corpos de prova colocados em ambientes capazes de formar, no corpo de prova, trincas induzidas pelo estado de tensões do corpo de prova. As trincas são em geral, desenvolvidas por fragilização pelo hidrogênio ou por corrosão sob tensão [34].

2.4.5 Efeitos das Tensões Residuais

Quando um componente soldado contendo uma distribuição inicial de tensões residuais é submetido a um carregamento de tração, as tensões residuais se somam diretamente às tensões do carregamento, enquanto não ocorrem deformações plásticas no componente. Assim, as regiões da solda, nas quais as tensões residuais de tração são mais elevadas, atingem condições de escoamento plástico antes do resto do componente. O desenvolvimento de deformações plásticas, localizadas principalmente na região da solda, tende a diminuir as variações dimensionais que eram as responsáveis pela existência de tensões residuais. Dessa forma, quando o carregamento externo é retirado, o nível dessas tensões é reduzido. Isto é, as variações dimensionais ocorridas na soldagem e responsáveis pelas tensões residuais são, pelo menos parcialmente, removidas pela deformação plástica causada pelo carregamento posterior. A figura 11 apresenta o esquema da distribuição de tensões em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes e distribuição de tensões após a liberação do carregamento [12].

Figura 11: Distribuição de tensões em um componente com uma solda de topo submetido a carregamentos crescentes (curvas 1,2 e 3) e distribuição de tensões residuais após a liberação do carregamento.



Fonte: [12]

Aspectos relevantes relativos ao efeito das tensões residuais em um dado componente:

- A presença de tensões residuais é mais importante para fenômenos que ocorrem com baixos níveis de tensão (inferiores ao limite do escoamento) como a fratura frágil, a fragilização pelo hidrogênio e a corrosão sob tensão.
- Em estruturas de materiais dúcteis submetidas a um carregamento, quanto maior for o nível de tensões aplicadas, menor será o efeito das tensões residuais. Quando o nível de carregamento for suficientemente elevado, parte da peça pode escoar e como resultado, as tensões residuais são reduzidas.
- Em estruturas de materiais frágeis submetidas a um carregamento, tensões residuais de tração podem precipitar a ocorrência de falha por fratura frágil.
- Se a estrutura é carregada além de seu limite de escoamento, as suas tensões residuais se tornam desprezíveis.
- Métodos que utilizam alguma forma de solitação mecânica podem ser usados para diminuir as tensões residuais de um componente soldado [34].

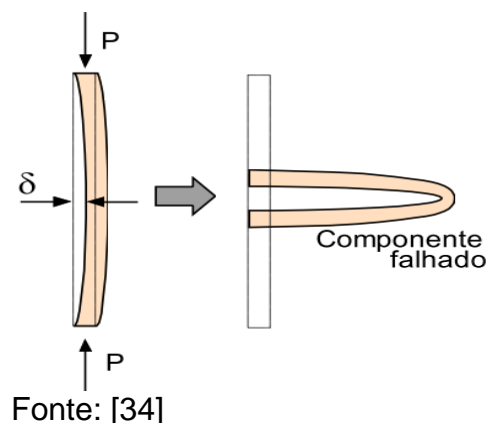
2.4.6 Efeitos Específicos da Presença de Tensões Residuais em um Componente Soldado.

A presença de tensões residuais pode em componentes soldados pode alterar significativamente a resistência à fratura, a vida em fadiga e a capacidade destes materiais em suportar carregamento.

2.4.6.1 Flambagem de Componentes Soldados.

Considerando um perfil estrutural, um aspecto importante para a sua aplicação é a sua rigidez, isto é, a sua capacidade de resistir a cargas laterais (não axiais). A rigidez depende de vários fatores, particularmente as propriedades mecânicas no material do perfil e das suas dimensões e da forma de sua seção transversal. Ela depende também das tensões aplicadas na direção axial do perfil. Nesse sentido, tensões axiais de tração enrijecem o perfil enquanto tensões de compressão o tornam mais flexível, isto é, menores forças transversais são necessárias para causar uma dada deformação lateral no perfil. Finalmente, quando a tensão axial de compressão for suficientemente elevada, uma força lateral infinitamente pequena pode causar uma deformação lateral (δ) grande do perfil. Esta instabilidade é um risco em componentes estruturais que atuam sob compressão, particularmente naqueles longos e delgados e é conhecida como flambagem (ou cambagem ou, em inglês “buckling”). Em algumas situações, a flambagem pode levar a falha rápida e inesperada de um componente submetido a uma tensão, em geral, menor que o escoamento do material. Em algumas situações. Embora não chegue a causar a falha final do componente, a flambagem pode levar ao aparecimento de intensas distorções na estrutura [34].

Figura 12: Flambagem de uma coluna



Uma vez que as tensões residuais são de compressão em regiões mais afastadas da solda (e de tração próxima desta), as tensões residuais nessas regiões podem reduzir a resistência a flambagem de estruturas soldadas. Como estruturas tendem a apresentar também distorções e como a flambagem está associada com deformações perpendiculares ao eixo ou plano do componente e a aplicação de cargas fora do centro, conforme mostrado na figura 12 as distorções causadas por soldagem ou outros processos podem comprometer seriamente a resistência a flambagem.

Em juntas soldadas feitas chapas outros componentes de pequena espessura, a distorção por flambagem resultante das tensões térmicas e residuais pode também ocorrer dando à junta um aspecto irregular ou “enrugado”.

2.4.6.2 Falha por fadiga

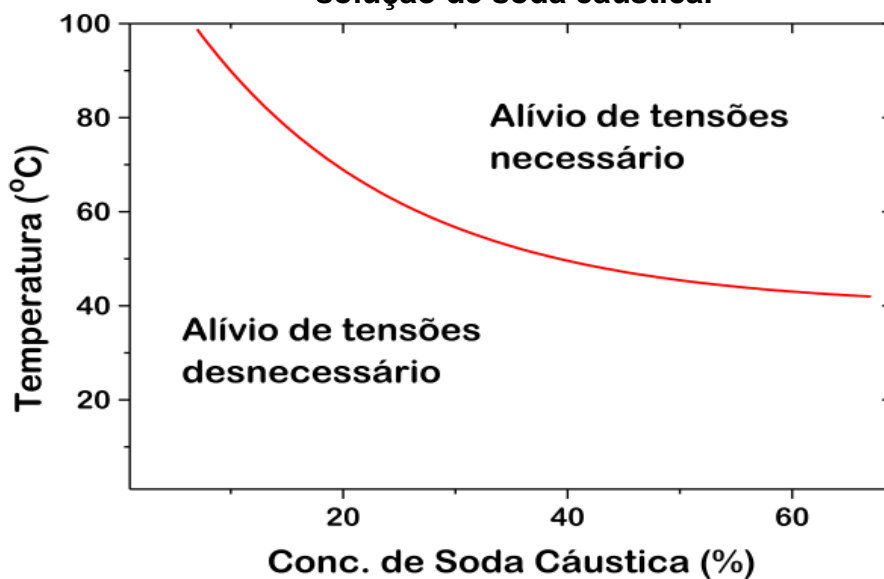
Em um sentido amplo, fadiga envolve a deterioração de propriedades de um material devido à aplicação neste de esforços mecânicos de intensidade variável. Mais restritamente, é um mecanismo de falha que envolve a nucleação e o crescimento de trincas no material devido a esforços mecânicos variáveis, um exemplo conhecido para os leigos é a quebra de um pedaço de arame pela sua flexão alternada de forma repetida. Contudo, é importante salientar que a fadiga é a forma mais comum de falha em componentes mecânicos submetidos a tensões que variam com o tempo, estando associada com grandes desastres e acidentes. Nestes casos, a fadiga tende a se desenvolver com cargas inferiores ao limite de escoamento do material e por períodos de tempo superiores a um ano (mas que podem ser muito menores).a maior parte deste tempo tende a ser gasto na nucleação inicial da trinca e assim, qualquer fator que facilite esta nucleação (como por exemplo, defeitos superficiais) pode reduzir grandemente o tempo de vida esperado de uma peça.

2.4.6.3 Corrosão sob tensão

Na presença de um ambiente agressivo, trincas de corrosão podem se desenvolver de forma acelerada devido à presença de tensões de tração. No caso

de aços estruturais ao carbono ou de baixa liga, por exemplo, este fenômeno é desencadeado pelo contato com hidróxidos ou com sulfeto de hidrogênio. Em estruturas soldadas, as tensões residuais são muitas vezes suficientes para o desenvolvimento de corrosão sob tensão dependendo do material e do ambiente. Neste sentido, por exemplo, certos códigos impõem limitações quanto à dureza máxima da ZTA (por exemplo, inferior a 325 HV) como uma forma de limitar o nível de tensões residuais e prevenir a corrosão sob tensões em tubulações soldadas para transporte de petróleo (ambiente que pode apresentar teores perigosos de H₂S). O gráfico da figura 13 apresenta as condições que exigem tratamento térmico de alívio de tensões em juntas soldadas em aços carbono de forma a evitar corrosão sob tensão em solução de soda cáustica [34].

Figura 13: Condições que exigem tratamento térmico de alívio de tensões em juntas soldadas em aços carbono de forma a evitar corrosão sob tensão em solução de soda cáustica.



Fonte: [34]

2.4.6.4 Fratura frágil

A fratura final de um componente metálico quando uma trinca, que pode ter se desenvolvido por diferentes mecanismos (por fadiga, por exemplo) atinge um tamanho suficientemente grande, pode ocorrer de duas formas básicas, do ponto de vista metalúrgico: (1) dúctil ou (2) frágil. No primeiro caso, o crescimento da trinca é controlado por deformação plástica e tende a exigir uma quantidade relativamente elevada de energia. Na fratura frágil, por sua vez, a quantidade de deformação

associada tende a ser muito pequena e o crescimento da trinca é basicamente controlado pela quebra de ligações dentro dos grãos (clivagem) ou ao longo de seus contornos. Este processo necessita de uma quantidade muito menor de energia para a sua ocorrência.

Do ponto de vista mecânico, a fratura pode ocorrer de forma estável ou instável. No primeiro caso, a quantidade de energia disponível em um dado momento (na forma de energia elástica armazenada no material e de trabalho feito pelas solicitações mecânicas externas) não é capaz de fornecer a energia necessária para o crescimento da trinca. Desta forma, é necessário aumentar a quantidade de energia disponível, por exemplo, elevando a solicitação externa, para a trinca crescer (lentamente). Quando a quantidade de energia disponível no sistema é suficiente para manter o crescimento da trinca, sem a necessidade de se aumentar esta quantidade de energia, a fratura se torna instável, com a trinca crescendo de forma rápida e descontrolada até a ruptura final. Na fratura final de um componente, em geral, a propagação da trinca ocorre inicialmente de forma estável podendo mudar para instável. Obviamente, como a fratura frágil necessita, para sua propagação, de uma quantidade muito menor de energia (do que a fratura dúctil), situações em que a trinca se propaga de forma frágil podem se tornar instáveis (fratura rápida e incontrolável) mais facilmente com um maior potencial para a ocorrência de acidentes.

A fratura frágil pode ocorrer em componentes metálicos em situações quando a deformação plástica (associada com desenvolvimento de uma ruptura dúctil) é inibida. Isso pode ocorrer por fatores metalúrgicos (por exemplo, pela formação de constituintes frágeis ou pela presença de precipitados e inclusões) ou mecânicos (por exemplo, em estruturas de grande espessura ou muito rígidas). Em aços estruturais e em outras ligas metálicas de estrutura cristalina CCC, adicionalmente, uma menor temperatura de operação e o aumento do tamanho de grão são fatores que favorecem a fratura frágil.

Em estruturas soldadas, a fratura frágil é particularmente perigosa devido a diversos fatores, destacando-se:

- Uma estrutura soldada é monolítica, não apresentando interfaces (como em uma estrutura rebitada ou parafusada) que possam

interromper a propagação da trinca. Assim, a fratura pode se iniciar em uma área restrita e se propagar por grandes distâncias.

- A região de solda apresenta alterações estruturais caracterizadas, frequentemente, por um aumento do tamanho de grão em relação ao metal de base, o que, em alguns materiais, tende a diminuir a tenacidade do material.
- A região de solda pode apresentar diversas discontinuidades ou defeitos, tais como trincas, inclusões de escoria e deficiência (falta) de fusão, que podem atuar como concentradores de tensão e pontos de iniciação de fratura.
- Tensões residuais elevadas de tração existem na região da solda. Estas tensões, eventualmente associadas com as tensões devido às solicitações externas, podem ser suficientemente elevadas para causar a fratura frágil.

Assim, no projeto de estruturas soldadas em geral deve-se levar em consideração a presença das tensões residuais e, em muitas situações, é necessário se tomar medidas para a redução ou eliminação destes. Existem diversos exemplos de falha por fratura frágil de componentes soldados, muitos com grande perda material e de vida humanas.

2.4.6.5 Formação de trincas em soldas

Trincas são frequentemente formadas em soldas. Estas trincas podem ser associadas basicamente a dois fatores: (a) uma solicitação, isto é tensões mecânicas de tração e (b) uma incapacidade (fragilização), muitas vezes momentânea, do material de acomodar esta solicitação deformando-se plasticamente. Fragilização da região da solda e de regiões adjacentes à solda pode ocorrer por diversos motivos (formação de filmes de líquido em contornos de grão, crescimento de grão, presença de hidrogênio dissolvido no material, precipitação, etc) durante e após a soldagem.

2.4.6.6 Instabilidade Dimensional

Quando um componente soldado e usinado ou submetido à outra operação de remoção de material. Para restaurar o equilíbrio de forças e de momento, o componente sofre pequenas distorções que causam uma redistribuição das tensões residuais. Este processo é usado para a medição de tensões residuais pelo método da relaxação de tensões, mas pode causar problema na usinagem de precisão de componentes com tensões residuais.

2.4.7. Procedimento para Determinação de Alívio de Tensões

Para determinarmos a necessidade do emprego do tratamento térmico de alívio de tensões, utiliza-se como base o código ASME, seção VIII, divisão 1, edição de 1992, pois é o mais largamente empregado, além de ser uma norma de fácil obtenção. Para obter os dados principais das normas AWS, ASME ou Brithis Standard é fornecida a tabela 2 [43]:

Tabela 2: Parâmetros de TTAT conforme normas internacionais

PARÂMETROS DE TRATAMENTO TÉRMICO DE ALÍVIO DE TENSÕES	UNIDADE	ASME	AWS	BS
TEMPERATURA INICIAL DE CONTROLE (Ti)	°C MAX	427	315	400
TAXA DE AQUECIMENTO (TA)	°C/HORA MÁX	222	220	220
TAXA DE RESFRIAMENTO (TR)	°C/HORA MÁX	278	260	275
TEMPERATURA DE PATAMAR (*)	°C	595	590 a 650	580 a 620
TEMPO DE PERMANÊNCIA	HORA	(**)	(**)	(***)
TEMPERATURA FINAL DE CONTROLE (Tf)	°C MIN	427	315	400
DIFERENÇA DE TERMOPARES NO AQUEC. (≠a,r)	°C MAX	139	140	150
DIFERENÇA ENTRE TERMOPARES NO PATAMAR (≠p)	°C MIN	83	83	40
DISTÂNCIA ENTRE TERMOPARES (d)	A CADA (m) MAX	4,6	4,6	4,5

(*) APLICÁVEL PARA AÇOS AO CARBONO

(**) 1 HORA para cada 25,4 mm de Espessura Nominal **En**.

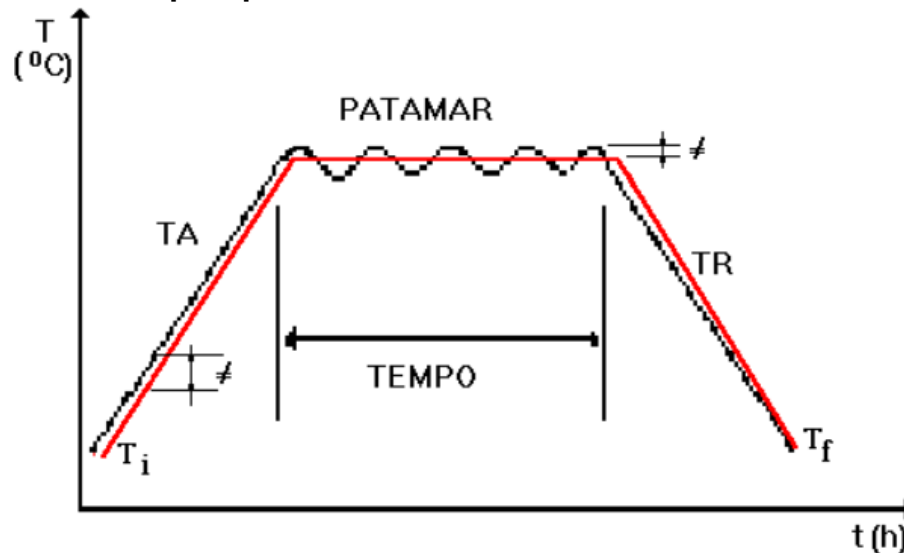
(***) 1 hora para cada 25,0 mm de Espessura Nominal **En**.

Fonte: [43].

Para proceder ao cálculo do ciclo térmico é necessário conhecer as dimensões do equipamento e adequar as condições de fabricação e dimensões do forno e o tipo de material do equipamento, além disso, devemos levar em consideração se o nosso equipamento pode ser transportado em uma única peça até o local da montagem, se temos capacidade de manuseio na fabrica, etc. afim de que possamos optar pelos métodos de tratamento térmico de alívio de tensões.

Escolhido método ou os métodos, pode haver mais de um em um único equipamento, passa-se em seguida para a determinação da espessura nominal, que é o parâmetro para o cálculo do parâmetro tempo e temperatura de patamar. Para determinar a taxa de aquecimento (TA) e taxa de Resfriamento (TR) temos que saber qual a maior espessura envolvida, para vasos sob pressão seria entre casco ou tampo, outros parâmetros contemplados no procedimento são: Temperatura inicial de controle (T_i), temperatura final de controle (T_f), diferenças de temperatura entre termopares no Aquecimento ou Resfriamento (\neq_a , r), diferenças de temperatura entre termopares no patamar (\neq_p), a figura 14 apresenta o gráfico dos principais parâmetros a serem considerados para determinação de um tratamento de alívio de tensões.

Figura 14: Principais parâmetros de um tratamento de alívio de tensões



Fonte: [9]

3 MÉTODOS PARA CONTROLE E ALÍVIO DE TENSÕES RESIDUAIS

Muitas técnicas para controle e alívio das tensões são utilizadas para melhorar o desempenho a fadiga de componentes estruturais.

Após a soldagem, as tensões residuais podem ser aliviadas por métodos térmicos e mecânicos, entre os quais temos: martelamento, encruamento, vibração, recozimento para alívio de tensões, recozimento a alta temperatura e alívio de tensões a baixa temperatura. A tabela 3 apresenta os diversos métodos para alívio e controle de tensões residuais utilizadas [8].

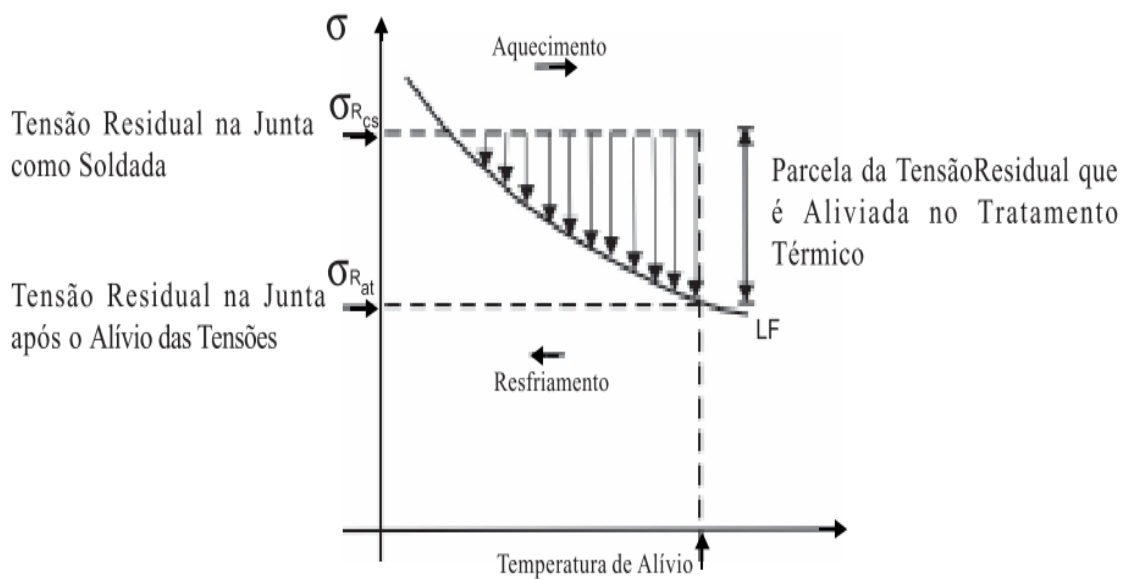
Tabela 3: Métodos para alívio de tensões residuais

Procedimento		Descrição	Característica	Limitações
A	Martelamento	Martelamento do metal depositado e de suas adjacências durante ou após a soldagem.	Método simples pode causar refino de grãos.	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	São aplicadas na estrutura causando uma ressonância de baixa frequência ocasionando 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 a 900°C (aços austeníticos) seguido de resfriamento lento. Pode ser local ou total.	Muito utilizado e bastante eficiente.	Inaplicável para grandes estruturas e difícil 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 e difícil de ser executado no campo. Custo elevado.
	Alívio de tensões a baixas temperaturas	Aquecimento do local da solda a 150-200°C em uma largura total de 60 a 130 mm.	Adequado para grandes estruturas.	O alívio de tensões é baixo.

Fonte: [13]

Quanto aos métodos térmicos, o nível de tensões residuais em uma junta soldada pode ser diminuído reduzindo-se a quantidade de calor fornecido a junta ou o peso do material depositado. Na prática, isto pode ser feito otimizando-se o desenho do chanfro e evitando-se depositar material em excesso. A seleção de processos de maior eficiência térmica é uma possível alternativa de controle. A figura 15 apresenta o gráfico do comportamento do material quando aquecido e sofre alívio de tensões.

Figura 15: Como ocorre o alívio de tensões quando se aquece o material



Fonte: 40

3.1 Martelamento (Hammer Peening)

Também chamado de PEENING, é muito empregado em soldas de manutenção, onde o controle de deformações é um fator determinante, por ser um processo de alívio de tensões mecânico tem função limitada, e deve ser aplicado com muito critério, por pessoal treinado.

Geralmente o martelamento é empregado imediatamente após ser efetuado o cordão de solda, devendo ser feito por martelo de bola em um único sentido, com a aplicação da carga de impacto constante, justamente para aliviar por igual as tensões.

Apesar da técnica do martelamento para alívio de tensões ter sido estudada na década de 40 por Degarmo [15] e Morris [16], os procedimentos propostos não eram aceitos, o que impedia a sua inclusão em códigos de construção metálica. Com o decorrer dos anos houve, novos estudos do processo, sendo que hoje nas normas a técnica é aceita, mas não há indicações detalhadas da sua forma de aplicação.

As maiores vantagens dessas técnicas ocorrem em componentes soldados, sujeitos a fadiga ou corrosão sob tensão, pois promove a introdução de um campo de tensões residuais de compressão. É uma técnica aplicada localmente, a componentes sem dano, que inclusive podem ter saído da linha de produção, ou componentes já danificados (durante as tarefas de reparos), permitindo assim aumentar a segurança e a vida útil do componente.

Segundo Tomkings [17], como efeito das pancadas aplicadas esta técnica produz indentações que atingem o seu máximo efeito benéfico até a profundidade de 0,6 mm. Além do já referido, conforme Haagensen [18], o martelamento permite alterar a geometria do cordão de solda de forma a reduzir o fator de concentração e tensões, quando aplicado sobre o cordão de solda e, como tal, permite obter melhorias de cerca de 60% na vida de iniciação de fadiga.

Para realizar-se o martelamento são necessários equipamentos fundamentais: a ponteira do martelamento (punção ou agulhas), martelo pneumático e um compressor pneumático. Na figura 16, pode-se distinguir o martelo com a sua respectiva ferramenta de trabalho.

Figura 16: Martelo de punção com uma ponteira deformável



Fonte: [16]

Quanto ao efeito do método de martelamento na redução de tensões residuais, as normas de fabricação em soldagem condenam o martelamento do primeiro e último passe, o que compromete a eficácia do processo em aliviar tensões. Entre os autores verifica-se em geral um consenso em relação à eficácia do processo, pois a maioria [15] e [16] acredita que o método para ser efetivo, no tocante ao alívio de tensões, o último passe deverá ser martelado e, além disso, reconhecem o martelamento a frio como sendo o mais efetivo [16].

3.2 Encruamento

O encruamento é o processo de endurecimento do metal, quando este é deformado plasticamente. Ocorre basicamente porque os metais se deformam plasticamente por movimento de discordâncias e estas interagem diretamente entre si ou com outras imperfeições, ou indiretamente com o campo de tensões internas de várias imperfeições e obstáculos. Estas interações levam a uma redução na mobilidade das discordâncias, o que é acompanhada pela necessidade de uma tensão maior para provocar maior deformação plástica. O fenômeno de encruamento para um metal é influenciado por diversos fatores, como: Estrutura cristalina, Natureza química do metal, Pureza do metal, Orientação do cristal metálico, Temperatura no processo de deformação, Forma e dimensão do cristal e Condições superficiais do cristal metálico [19].

Relativamente aos aços pré-deformados é importante ter em consideração dois aspectos. Por um lado, a pré-deformação resulta também numa diminuição da tenacidade do aço, ou seja, da capacidade de absorção de energia do material quando submetido a impactos violentos. Por outro lado um aço pré-deformado quando submetido a uma temperatura da ordem de algumas centenas de graus (tipicamente entre 300 e 600 °C) recristaliza, ou seja, de uma forma simples, a rede de deslocação criada durante a deformação plástica a que o material foi submetido é eliminada. Em consequência a tensão de cedência do material regressa ao seu valor original: o material amacia. Desse modo os aços pré-esforçados são de difícil soldabilidade, uma vez que na vizinhança da soldagem, ocorre amaciamento e uma diminuição das propriedades mecânicas do material [19].

3.3 Vibrações Ressonantes (VSR)

É um método baseado na ressonância vibratória, onde as peças são submetidas a vibrações de baixa frequência e alta amplitude por um período de tempo com base no peso da peça. Isto permite que as tensões residuais sejam reduzidas. O método é usado por pesquisadores em todo o mundo em alívio de tensão, usando a vibração.

Vibrações de baixas frequências são usadas como um condutor para fornecer energia de alta amplitude para uma fabricação metálica ou peças de máquinas. A vibração produz uma carga que sobrepõe no padrão de tensão existente que resulta na redução da tensão residual. Isto resulta num produto dimensionalmente mais estável e reduz as distorções que frequentemente ocorrem nas peças fabricadas.

Vibrações ressonantes têm sido indicadas como sendo o melhor meio para redução de tensões residuais por vibração. A vibração de frequência ressonante tem muito mais redistribuição de tensão, comparada com o método de frequência sub-ressonante ou sub-harmônica. São as vibrações de baixa frequência as portadoras de energia de alta amplitude, que são muito eficientes na redução das tensões residuais de peças e soldas metálicas.

Existem algumas limitações como em qualquer processo metalúrgico e/ou mecânico. O processo não é recomendado para trabalhos severamente a frio, é para as peças mais largas, compridas ou estrutura com vigas abertas a vibração, podendo necessitar de aplicações em diversos pontos, requerendo um maior tempo. Nas situações de soldagem onde a vibração é usada durante o processo de soldagem, esta condição é mais compatível com os processos: SMAW, GMAW e GTAW, onde outros processos de soldagem podem apresentar problemas de logística.

O processo pode ser usado em uma gama de materiais ferrosos, não ferrosos, aço carbono, aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, manganês, níquel etc. estes são alguns metais que podem ser tratados em variedade de condições tais como: fundidos, forjados, estampados, soldados, esmerilhado, polido ou usinado. A figura 17 apresenta a imagem do equipamento típico para alívio de tensões por vibrações.

Figura 17: Equipamento típico para alívio de tensões por vibrações



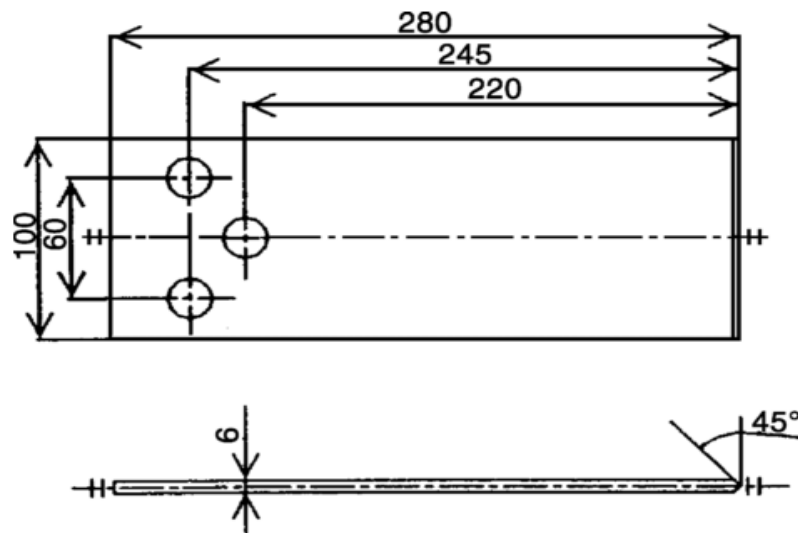
Fonte: 10

A vibração é utilizada para melhorar a rugosidade da superfície usinada de materiais metálicos e corte de metal duro (Batzer et al. 2001). Os autores propuserem um novo método para alívio de tensões usando vibração. Neste método, as cargas vibracionais são impostas durante a soldagem. Os autores examinaram o método utilizando vibração harmônica com a frequência perto da natural de espécie fundamental (Aoki e Nishimura, 1997), a vibração ultrassônica (Nishimura et al. 1999) e demonstraram que a tensão residual próxima a tração do cordão é reduzida usando cargas vibratórias durante a soldagem. Neste papel, a vibração aleatória é utilizada como carga vibracional. Vibração aleatória contém ampla gama de componentes de frequência e seu efeito sobre a redução da tensão residual é examinada. Se este método é eficaz, a carga pode ser aplicada com vibração independente da frequência natural da estrutura e cargas harmônicas que podem ter ruído. Primeiro, ruído branco, que contém todos os componentes de frequência é igualmente utilizado. Duas placas finas são soldadas. A soldagem é completada através de uma passagem em cada lado da ranhura em forma de X. Tensão residual é medido em algumas regiões. Foram realizadas experiências com ruído branco, e ruído branco filtrado de frequência central é a frequência natural fundamental do método que será utilizado [20].

No experimento de (Aoki et al. 2005), para redução de tensão com a técnica do ruído branco, que é um processo aleatório representativo, tem efeitos significativos na redução de tensões residuais para uma amostra com as seguintes especificações:

A Figura 18 , demonstra as dimensões da amostra, que é fabricada em aço laminado para uso geral (JIS SS400). A fim de eliminar a tensão residual induzida pelo material, que foi recozido a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,durante 1 h e arrefeceu-se num forno até $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. A ranhura é em forma de X e do ângulo do chanfro é de 45 ° . Abertura de raiz é de 0,2 mm. As duas chapas finas utilizadas para se agarrar e apoiar no dispositivo é influenciado pela vibração aleatória durante a soldagem. A vibração do agitador é transmitida por meio de braços ligados ao agitador. As amostras são soldadas com um gás carbono e a máquina de solda blindada e automática. Soldagem é realizada em um único passe sobre cada lado da amostra. Como vibração aleatória, o ruído branco é usado, a vantagem da técnica do ruído branco é que a sintonização de frequência não é necessária [20].

Figura 18:Esquema que representa as dimensões da amostra

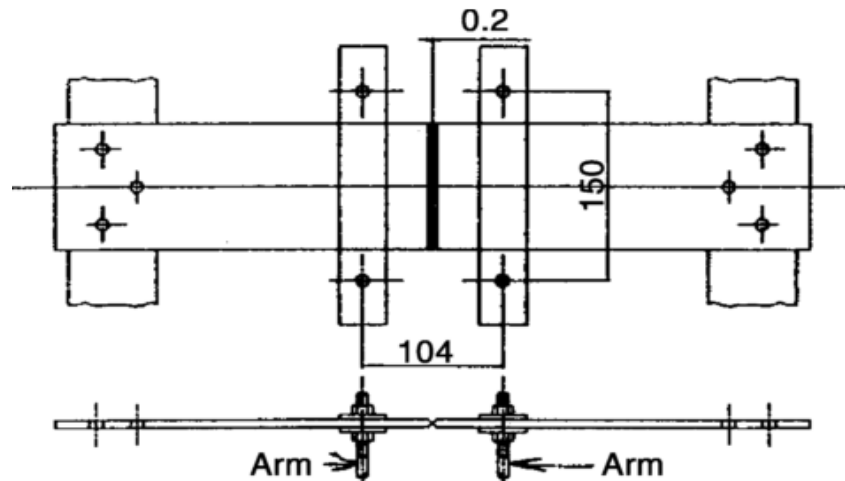


Fonte:[20]

A frequência natural fundamental do experimento como mostrado na Figura 18 é de 36 Hz. Deste modo, o ruído branco, que possui a função de densidade de potência espectral constante de 0 a 500 Hz é utilizada. A amplitude da vibração é determinada pela corrente indicada pelo amplificador do agitador. A Tabela 4 mostra

relação entre a corrente indicada no amplificador e valor médio quadrático de aceleração da ponta do eletrodo antes da soldagem que será realizada com velocidade de soldagem de 30 cm / min. Diâmetro do fio de 1,2 mm, a tensão é corrente 20V e é de 150 A.

Figura 19:Configuração Experimental



Fonte:[20]

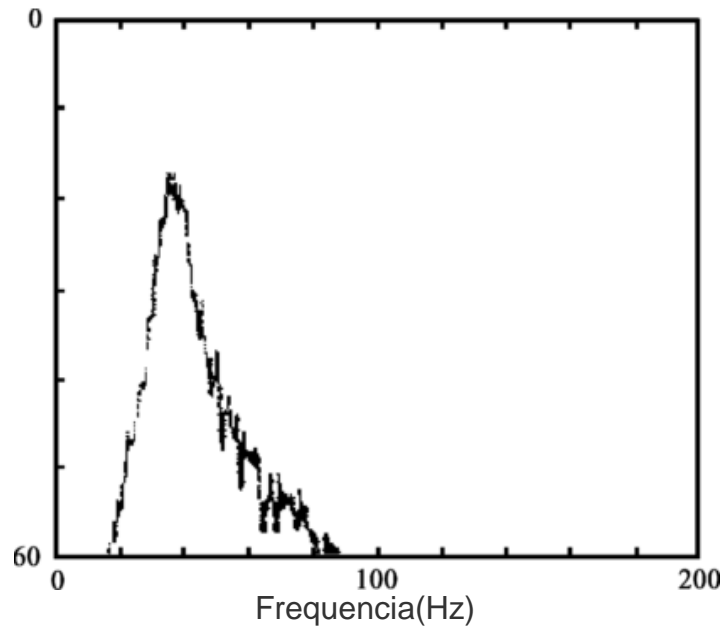
Tabela 4:Relação entre corrente indicada no amplificador e valor médio quadrático da aceleração na ponta do eletrodo antes da soldagem

Corrente (A)	0.5 – 1.0
Aceleração(G)	0.9 – 1.5

Fonte: [20]

As amostras, como mostrado na figura 20 são utilizadas. Como vibração aleatória, o ruído branco usado, agora é filtrado. A frequência natural fundamental da amostra é central, com o valor de 36 Hz. O ruído branco que tem a função de densidade espectral de potência constante de 0 a 500 Hz é filtrada. Filtro tem a frequência central na frequência natural fundamental da amostra, 36 Hz e 24 dB / oitava taxa de redução. A Figura 20 mostra o poder da função de ruído branco filtrado na densidade espectral. A amplitude da vibração é determinada pela corrente indicada pelo amplificador do agitador. Quando a corrente indicada no amplificador do agitador é de 1,0 A, o valor médio da raiz quadrada de aceleração da ponta da amostra antes da soldadura é de 1,6 G. A tensão residual é medida em diversos pontos do cordão.

Figura 20: Imagem que representa o poder da função do ruído branco filtrado na densidade espectral



Fonte:[20]

3.4 Pré-aquecimento durante a deposição de passes

A execução de pré-aquecimento durante a deposição dos passes de soldagem, reduzem a velocidade de resfriamento e facilitam a acomodação das tensões [23 - 24].

3.5 Aumento do Aporte de Calor

O aumento do aporte de calor pode ter o mesmo efeito do pré-aquecimento durante a deposição de passes, entretanto, características indesejáveis podem ocorrer, como o crescimento pronunciado de grãos, induzindo a formação de microestruturas frágeis e de baixas temperaturas de transformação, como a martensita, que causa prejuízos à tenacidade [23 - 24].

3.6 TIG dressing

Essa técnica vem se destacando na literatura por apresentar custo intermediário, cujos aumentos, proporcionados no limite no limite de fadiga em

amostras de tamanho reduzido, variando de 23 a 160%, justificaram o seu emprego em estruturas de grande porte, como pontes, vigas e vasos sob pressão [31-32].

Os benefícios alcançados estão relacionados à redução da concentração de tensão da junta, uma vez que através de um passe de refusão, dado sem o emprego de metal de adição, utilizando o equipamento padrão para soldagem manual.

Além dos excelentes resultados alcançados e o seu custo, também podemos citar a capacidade de automação como vantagens desse método. Como desvantagens, podem ser citadas a necessidade de treinamento especial do operador e a dificuldade em se estabelecer um critério de inspeção para garantir que o processo tenha sido conduzido satisfatoriamente [33].

3.7 Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT)

Consistem numa prática comum das normas de construção de estruturas de aços, tais como vasos sob pressão, tubulações para exploração e transporte de petróleo e plataformas marítimas, para reduzir as tensões residuais produzidas durante o ciclo térmico de soldagem e aumentar a tenacidade da junta soldada, evitando o risco de falhas catastróficas durante o uso desses tipos de estruturas [25 - 26].

O benefício deste tipo de tratamento, para estruturas a serem carregadas ciclicamente, somente é conseguido se forem induzidas tensões compressivas ou se os níveis das tensões trativas são reduzidos, as quais constituem tensões altamente prejudiciais ao desempenho à fadiga. Quando as tensões trativas são induzidas, há pouca ou nenhuma diferença entre o desempenho a fadiga de juntas na condição como soldada e juntas tratadas [27].

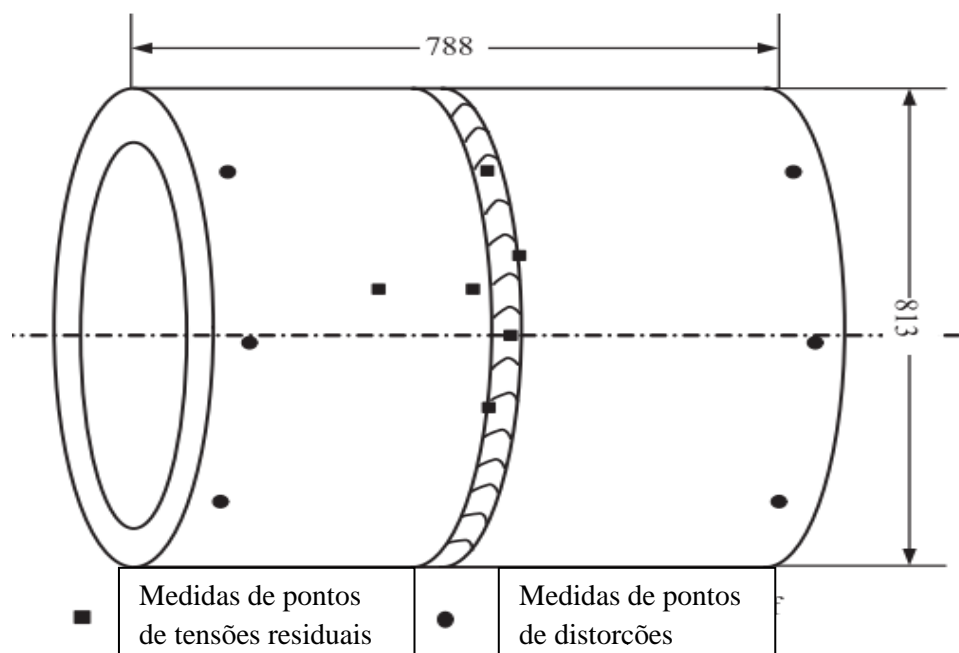
3.8 Vibração de Solda Condicionada (VWC)

É uma nova técnica de soldagem, que consiste na vibração da peça por um vibrador durante o processo de soldagem, ao qual foi desenvolvido com base no método de Vibração Ressonante (VSR), seus principais objetivos são o refinamento

de grãos, redução de tensões residuais e deformações soldagem e melhoria nas propriedades da junta soldada. Em comparação a outros métodos oferece boas qualidades, menor custo, operação mais conveniente mais curto período de fabricação.

No estudo realizado por (Xu et al. 2006), aplica o método (VWC) na soldagem de tubos e estuda seus efeitos sobre as tensões residuais originadas, que foram medidas através da técnica da perfuração do furo cego, após a soldagem e resfriada a temperatura ambiente. A soldagem foi realizada com multipasses em toda extremidade da circunferência do tubo e os resultados obtidos pelo experimento foram analisados e comparados com a soldagem normal a arco submerso. A Figura 21 representa o esquema da geometria dos tubos soldados para o experimento.

Figura 21: Geometria das extremidades das circunferências dos tubos soldados



Fonte: [21]

4 NOVA PROPOSTA DE TÉCNICA COMBINADA

Atualmente existem estudos e aplicações de técnicas combinadas para alívio e controle de tensões residuais. A combinação dessas técnicas vem trazendo resultados bastante interessantes, pois demonstra um aumento significativo dos percentuais de redução das tensões residuais.

4.1 Análise de Técnicas combinadas

No trabalho desenvolvido por (Zhipeng e Xinguan) [45], foi realizada a combinação entre o tratamento de campo magnético pulsado (MT) e corrente pulsada (CT). Tanto o método MT quanto o CT, foi desenvolvido para melhorar as propriedades mecânicas de algumas ligas, tais como: dureza da superfície, redução no atrito, prolongar a vida do material e desgaste em fadiga, resistência à corrosão e também retardar o crescimento de fissuras em estudos realizados.

A técnica do campo magnético pulsado (MT) consiste na aplicação de campos magnéticos pulsantes específicos para ligas à temperatura ambiente e estudos relatam que houve melhora nas propriedades mecânicas devido a liberação de tensões residuais devido a aplicação desse método. Nas aplicações da técnica (MT), os percentuais de redução de tensões foram entre 4 e 13%.

O tratamento corrente pulsada (CT) foi desenvolvido com base em estudos de eletro plasticidade de materiais de metal. As grandes quantidades de materiais metálicos apresentam maior plasticidade quando correntes elétricas de alta densidade estão fluindo através. Se a corrente elétrica foi cessada, a plasticidade cai para o nível normal.

O método de corrente pulsada foi avaliado por alterar as propriedades mecânicas, tais como o aumento da resistência à fadiga, diminuindo a densidade de defeitos, amolecimento, de endurecimento e assim por diante. Este método tem sido utilizado em trefilação, recuperação para moldes, reduzindo o stress residual e sinterização de ligas refratárias. Quando aplicado esse método proporciona uma redução em torno de 40% na redução das tensões residuais.

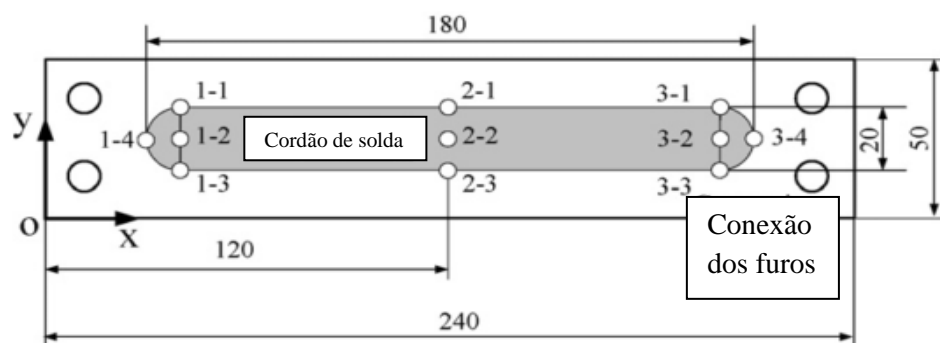
Na aplicação da combinação dos métodos de campo magnético pulsado e corrente pulsada proposto por (Zhipeng e Xinguan) [45], houve uma redução significativa nas tensões

existentes. A explicação desse efeito interessante seria que deslocamentos associados com a tensão foram afetados pelo campo magnético e da corrente de maneiras diferentes e a combinação dos dois métodos proporciona uma condição mais eficiente para mover e direcionar deslocamentos, ocasionando a redução na tensão.

No experimento foram utilizados os seguintes parâmetros: As amostras de pré-tensão induzidas foram feitas através de soldagem por arco, chapas de aço 16 Mn com dimensões 240 mm x 50 mm x 10 mm foram soldadas com H08Mn2Si. Soldagem a arco de dióxido de carbono foi utilizado com solda 180A atual, soldagem 25 V de tensão e velocidade de soldagem 10 mm / s e seis amostras foram preparadas.

A figura 22 representa de forma esquemática uma amostra com tensão residual, indicando as direções de soldagem que são definidas como vetor x, vetor y é perpendicular ao cordão de soldagem e do vetor Z na direção da espessura. Foi utilizado o método de difração de raios-X para medir a tensão residual após polimento mecânico e eletrolítico. Em cada amostra, 11 pontos situados no início, meio e fim do cordão de solda foram medidos nas direções x e y, designado por x e y.

Figura 22: Esboço da amostra com tensão residual



Fonte: [45]

O tratamento de campo magnético pulsado (MT) foi aplicado com um eletro ímã e a amostra foi fixada ao longo da direção do campo magnético, A intensidade máxima de campo magnético era de aproximadamente 2,1 Ton. e da frequência do pulso foi de 0,5 Hz e um total de 25 pulsos foram utilizados.

O tratamento corrente pulsada (CT) foi realizado com um transformador de tensão, pois houve oscilação da corrente utilizada durante o tratamento durante a aplicação. A corrente de pico foi de cerca de 3000A e cada pulso durou 0.02 s e a amostra foi tratada 5 vezes e cada vez que foram utilizadas 15 pulsos.

Depois da aplicação dos métodos, as tensões residuais foram medidas novamente nos mesmos pontos medidos antes do experimento e observaram-se alterações nas tensões em ambos os sentidos x e y.

Os valores de tensões medidos mudaram bastante, após aplicação do tratamento do campo magnético pulsado (MT), a tensão média residual no sentido X diminuiu cerca de 10%, enquanto que na direção Y permaneceu a mesma. Depois do Tratamento corrente pulsada (CT), as tensões residuais médias ao longo de ambas as direções aumentaram cerca de 20%. No entanto, depois do tratamento combinado, as tensões residuais médias ao longo de ambos os campos direção e perpendicularmente diminuíram cerca de 60%.

Após ambos os tratamentos de campo magnético pulsado (MT) e tratamento corrente pulsada (CT), as tensões locais foram alterados de diferentes maneiras, alguns pontos aumentando, enquanto outros pontos diminuindo ou permanecendo iguais. No entanto, todos os pontos levantados mostram uma diminuição evidente depois do tratamento combinado (MC-T). Uma vez que os resultados similares foram repetidos, confirma-se que (MC-T) é mais eficaz do que o MT ou CT para redução das tensões residuais locais.

4.2 Método Proposto: Técnica de Vibração combinada com Técnica de Dissipação de Calor

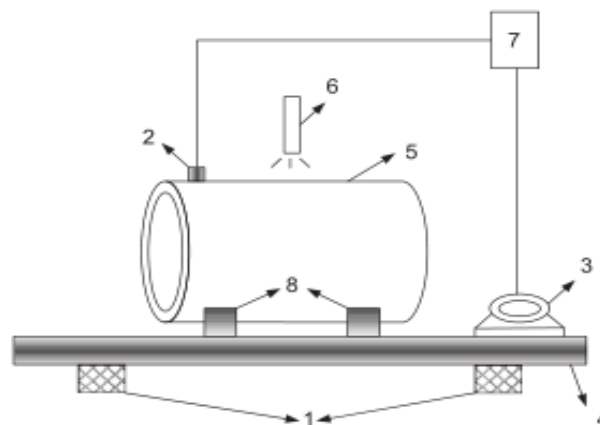
Após análise criteriosa dos diversos métodos para controle e alívio de tensões e de algumas combinações entre eles utilizadas atualmente, levando-se em consideração todas suas características, particularidades, vantagens e desvantagens e suas eficiência em valores percentuais quanto a redução das tensões residuais, propõe-se uma combinação entre o método de vibração combinado com a técnica de um dissipador de calor.

O principal fator que motivou escolha método de vibração e da técnica do dissipador para combinação está relacionado com o objetivo de sua aplicação que é uma maior eficiência para o controle e alívio de tensões residuais sem comprometer as propriedades do material em questão. Porém existem diversos outros critérios que foram considerados tais como:

- O método da vibração é bastante aplicado e utilizado em todo o mundo por pesquisadores como estudo.
- Em comparação a outros métodos requer menos investimentos para ser aplicada, boa relação (custo x benefício).
- Não oferece riscos de poluição.
- O processo pode ser utilizado para uma gama de materiais (ferrosos, não ferrosos, aço carbono, aço inoxidável, alumínio, ferro fundido, manganês, níquel etc.).
- Possibilidade de otimização (custo período para aplicação).
- É bem conveniente para a operação, pois pode ser aplicado em qualquer etapa do processo de fabricação.

A figura 23 representa o diagrama esquemático da soldagem de um tubo em aço utilizando o método da vibração de solda condicionada (VWC), identificando todo aparato utilizado no procedimento: 1 - Amortecedor de borracha; 2 - Sensor de aceleração; 3 - Vibrador; 4 - Plataforma de testes; 5 - Peça soldada; 6 - Tocha de soldagem; 7 - Controle revestido e 8 - Sistema para Transporte

Figura 23: Diagrama esquemático da VWC

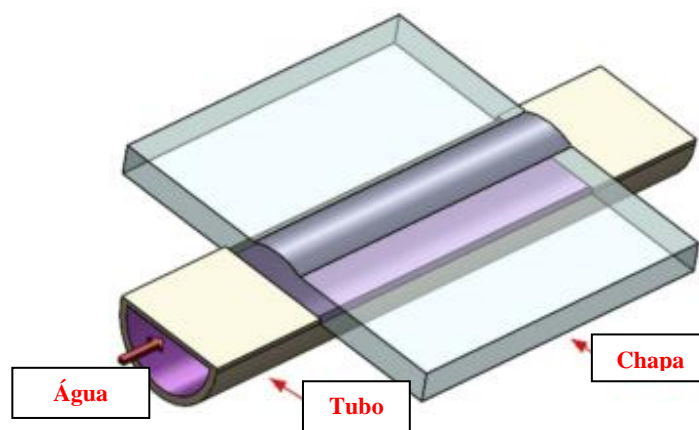


Fonte: [21]

Quanto ao dissipador de calor também oferece bons resultados quanto ao percentual de redução de tensões, oferece baixo investimento para sua aplicação, fácil manuseio, operação e controle no parâmetro de extração de calor.

A figura 24 mostra um processo de soldagem utilizando um sistema de dissipador de calor, o que resultará em um maior controle na extração de calor.

Figura 24: Esquema de soldagem com dissipador de calor



Fonte: [22]

Como o método da vibração apresenta bastante eficiência quando aplicado, dependendo da região pode reduzir de 20 a 50% as tensões residuais existentes, juntamente com os resultados obtidos pelo sistema de dissipação de calor, pois haverá um controle maior dos parâmetros que influenciam a geração das tensões no cordão de solda.

Os estudos referentes às propriedades do material são de extrema importância para se alcançar os resultados esperados, também o correto ajuste do sistema composto pelo vibrador, material a ser aplicado o método e o dissipador de calor que terá que ser localizado sob o cordão para que se tenha maior controle das trocas de calor ocorridas.

Com características da técnica de vibração associadas as da técnica de dissipação de calor durante a soldagem, espera-se resultados muito melhores em comparação com aplicação das técnicas de forma individual e até mesmo em relação a técnicas combinadas já aplicadas atualmente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Atualmente já estão sendo estudados e utilizados alguns métodos combinados para controle e alívio de tensões residuais em juntas soldadas, tendo-se o conhecimento de resultados muito melhores dos aplicados de forma original, porém apresentam algumas desvantagens que limitam ou dificultam sua aplicação em algumas situações. Os resultados dessas combinações e os resultados da combinação proposta serão apresentados a seguir.

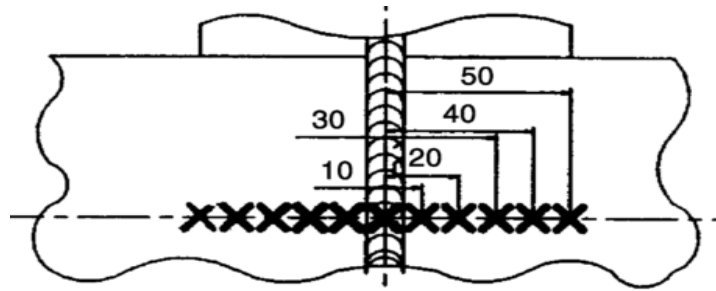
Refusão TIG e Martelamento

Em comparação a técnica de refusão TIG, as melhorias do tratamento de martelamento são em média duas vezes maiores [28]. Porém, alguns problemas inerentes a esta técnica constituem desvantagens para que a operação seja bem sucedida, como a necessidade de martelamento de toda a superfície sujeita ao trincamento por fadiga. Além disso, os martelos pneumáticos são pesados e de difícil manuseio, exigindo grande esforço do operador para controlar sua posição, que pode saltar e ocasionando falta de tratamento em algumas regiões. Para garantir bons resultados é necessário martelar diversas vezes o cordão. Outra limitação a esta técnica é a falta de possibilidade de tratamento na região da raiz da solda de juntas de topo, quando é susceptível ao trincamento por fadiga [29 - 30].

Vibração aleatória com ruído branco e ruído branco filtrado

A tensão residual no primeiro lado soldado na direção longitudinal apresenta tensão residual da amostra soldada sem carga vibracional, elevadas tensões residuais trativas são medidas na região próxima ao cordão e mostra tensão residual com carga vibracional relativamente baixa, o valor médio quadrático da aceleração na ponta da amostra antes da soldagem é de 0,9 G. Tensões residuais trativas próximas ao cordão são reduzidas em 26%, com tensão residual trativa com carga vibracional relativamente altas, valor médio quadrático da aceleração é de 1,5 G, a tensão residual perto do cordão também é reduzida em 34%. Ou seja, a tensão residual diminui com o aumento da amplitude de vibração, demonstrado na figura 25.

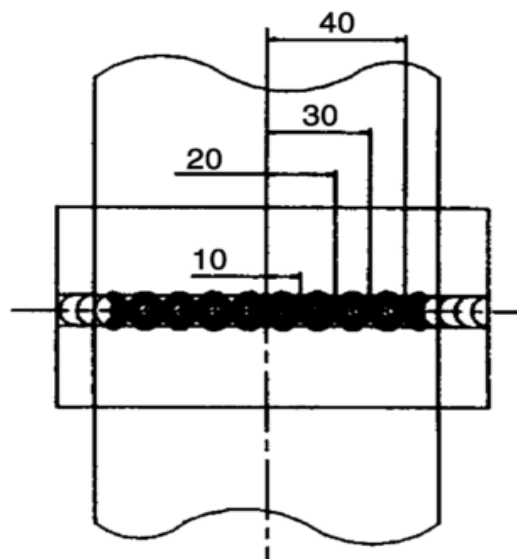
Figura 25: Representação da Tensão residual na direção longitudinal



Fonte: [20]

O esquema a seguir, mostra a tensão residual no primeiro lado soldada sobre o cordão, a tensão residual da amostra soldada sem carga vibracional, a tensão residual trativa é medida próximo do centro do cordão, a tensão residual com carga vibracional é relativamente pequena. Tensão residual tração perto do centro do cordão é reduzida, em pontos a cada 10 mm do centro de o cordão, as tensões residuais são reduzidas em 35% e mostra a tensão residual com carga relativamente grande vibracional. Tensão residual tração próximo do centro do cordão também é significativamente reduzida. Em pontos a cada 10 mm distantes do centro do cordão a tensão residual é reduzida em 50%. Próximo ao centro do grão, a tensão residual diminui com o aumento da amplitude de vibração, mostrado na figura 26.

Figura 26: Representação da Tensão residual sobre o cordão



Fonte: [20]

Como tensões residuais São Medidas duas Vezes e são encontrados praticamente os mesmos valores, os limites de confiança de 63,8% São também obtidos. O pico de tensões residuais de Tração (no cordão ou no Centro do cordão)

e os Limites de Confiança de 63,8% registrados, medidos tensões residuais São confiáveis desde que os limites de confiança de 63,8% sejam respeitados.

Tendo em vista a frequência natural fundamental da amostra e a vibração aleatória, o efeito do ruído branco foi filtrado sobre a redução de tensão residual é examinada.

Os resultados do experimento atestam tensões residuais tanto no sentido longitudinal quanto na primeira região soldada da amostra apresentam-se sem carga vibracional. Elevadas tensões residuais trativas são medidas próximas a ambos os lados da região do cordão com carga vibracional. Tensões residuais trativas próximas ao cordão de solda são reduzidas em 22 e 14% no primeiro e no segundo lado soldado, respectivamente.

Método de Soldagem(VWC) e Soldagem Normal.

As tensões residuais axiais e as tensões residuais na superfície externa do tubo são trativas e na espessura da parede dos passes da extremidade da circunferência dos tubos soldados. O valor de pico do pico da tensão residual é na zona de fusão.

O processo (VWC) pode reduzir a tensão residual na superfície externa da circunferência em aproximadamente 30%. No entanto, tem apenas um ligeiro efeito sobre a tensão residual axial na superfície externa. Isso ocorre porque durante soldagem dos tubos na extremidade das circunferência, não há retenção na direção axial e os tubos podem deformar livremente de modo que o valor de pico da tensão axial é pequena. O valor de pico tensão axial é de cerca de 190 MPa na soldagem normal e é menor do que a resistência ao escoamento (250 MPa). No entanto, o metal de solda. No entanto, metal de solda foi contida na direção tubo, resulta em contração e de deformação plástica, que não recuperam após o resfriamento até à temperatura ambiente. Tem-se o valor de pico da tensão anular residual elevado, com valor de 300 Mpa e está em excesso. O método VWC utiliza o campo de soldagem termica para tensões dinamicas e redução de tensões residuais durante a solidificação do processo . Além disso, através VWC, uma tensão dinâmica é sobreposta com as tensões residuais, até limite de elasticidade e ocorre a

deformação plástica da estrutura local. A deformação plástica em primeiro lugar, ocorre na máxima tensão residual. Portanto, a técnica reduz a tensão residual na extremidade do tubo e na região axial apresenta apenas um ligeiro efeito sobre a tensão residual axial.

Soldagem com tecnologia de dissipador de calor

A tecnologia chamada soldagem de dissipador de calor pode gerar redução nas tensões residuais e deformação. Mais recentemente, foram realizados estudos aplicando-se a técnica em uma simulação numérica e investigação experimental de temperatura de tensões residuais em GTAW e constatou que as tensões residuais e tensões compressivas mesmo perto da zona gerados tiveram redução considerável.

A técnica consiste em desenvolver um mecanismo para colocar o dissipador sob o cordão o objetivando ter um controle maior em relação as trocas de calor e consequentemente redução das tensões residuais geradas no cordão durante o processo de soldagem.

Método combinado de Vibração e com técnica de dissipação de calor

Através da nova técnica proposta esperam-se resultados muito mais satisfatórios em alguns quesitos que são levados em consideração para aplicação de uma técnica combinada. As duas técnicas já apresentam bons resultados quando aplicadas na forma original, pois com a vibração aliada ao sistema de dissipação de calor, haverá melhores resultados tanto nas tensões residuais longitudinais como axiais.

Como há a possibilidade de otimização do processo também haverá melhores rendimentos no objetivo da aplicação e quanto a inserção do dispositivo de dissipação de calor tem-se um controle maior na extração de calor da junta soldada, fazendo com que controle-se parâmetros térmicos que possivelmente afetem de forma negativa as propriedades do material utilizado na aplicação e obtendo-se redução nas tensões residuais muito melhores das combinações utilizadas atualmente.

A tabela 5 apresenta a comparação em percentual de redução das tensões residuais após aplicação dos métodos combinados.

Tabela 5: Comparação entre os percentuais de redução de tensões na aplicação dos métodos combinados

Métodos	1-Campo magnético Pulsado (MT) e 2-corrente pulsada (CT)	1-Vibração ruído branco 2-Ruído filtrado	Vibração de solda condicionada	1-Vibração e 2-Dissipação de calor
Percentual de Redução	1 – 04 a 13% 2 – 20 a 60%	1 – 26 a 34% 2 – 35 a 50%	30%	1 – 20 a 50% 2 – 40 a 60%

6 CONCLUSÕES

O estudo das características como classificação, origem e efeitos das tensões residuais nas juntas soldadas foi muito importante para o entendimento da aplicação método mais adequado para controle e alívio dessas tensões e conseqüentemente sua eficiência, pois cada situação possui suas particularidades que definem a aplicação da técnica.

A apresentação e discussão dos diversos métodos existentes, o conhecimento da eficiência de cada um deles, suas vantagens e desvantagens e o estudo ou aplicação de algumas técnicas combinadas já desenvolvidas, serviram de base para determinação da proposta da nova combinação, objetivando uma maior eficiência e uma melhor adequação com a relação Custo X Benefício.

Considerando o experimento de (Xi et al.2006), o método (VWC) pode reduzir as tensões residuais de argola na superfície externa e as tensões residuais máximas, mas a técnica tem apenas um ligeiro efeito sobre as tensões axiais residuais na superfície exterior. As tensões residuais são inferiores a resistência à deformação, quando o método é utilizado, o que melhora a segurança de estruturas soldadas.

Aplicando-se a tecnologia de dissipador de calor durante o processo de soldagem a tensão residual pode reduzir consideravelmente. Em comparação com o modelo sem dissipador de calor, o valor em percentagem é de aproximadamente 20% do pico de tensão longitudinal. O dissipador de calor aumenta a taxa de resfriamento da solda e conseqüentemente diminui o tempo de espera durante o arrefecimento do material. Com o aumento do comprimento de contato, o esforço transversal é diminuído e um aumento adicional do comprimento de contato não tem nenhum efeito evidente sobre a redução da tensão longitudinal.

Aliando-se as vantagens da técnica de vibração com a do dissipador de calor, espera-se alcançar resultados bastante satisfatórios quanto a redução de tensões residuais próximos ou melhores do que as combinadas que são utilizadas atualmente.

Através da elaboração desse trabalho foi proposta uma nova técnica combinada para o controle e alívio de tensões residuais.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Construção do dispositivo para aplicar técnica proposta, simular a técnica e comparar resultados com as demais técnicas combinadas disponíveis na literatura.
- Propor outras combinações de técnicas e aplicá-las.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COFIÑO, Rachel C. **Análise das tensões residuais em uma junta soldada em condição over match** - São Bernardo do Campo, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso - Centro Universitário da FEI.
- [2] **cursos. unisanta.br/mecanica/ciclo10/guia-pratico-soldagem**
- [3] MODENESI, Paulo J. **Efeitos Mecânicos do ciclo térmico**. 2008. Dissertação – Universidade Federal de Minas Gerais, Pampulha, 2008.
- [4] TOTTEN, G; HOWES, M; INOUE, T. **Handbook of residual stress and deformation of steel**. Ohio: ASM Internacional, 2003.
- [5] PONTES, Mariana K.G. **Estudo da Compatibilidade de metalúrgica de juntas soldadas de metais dissimilares utilizados no setor de petróleo e gás**. 2012. Dissertação – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2012.
- [6] MACHADO, I.G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**. Porto Alegre: [s.n.]
- [7] MARQUES, L.F.N. **Estudo da Fadiga de Juntas Soldadas do aço Naval**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- [8] MARQUES, P.V. MODENESI, P.J. BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. 2 ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- [9] JR, L.G. **Curso Tratamento Térmico de Alívio de Tensões em Juntas Soldadas**. São Paulo, 1994, ABS, FATEC, SP.
- [10] BRAGA, E.M. **A Vibração como Elemento de Alívio de Tensões Residuais em Cordões de Solda**.
- [11] CINDRA FONSECA, M.P. (2000), **"Evolução do Estado de Tensões Residuais em Juntas Soldadas de Tubulação Durante ciclos de Fadiga"**, Tese de Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ.
- [12] T.N NGUYEN, M.A. WAHAB, **The effect of residual stresses on fatigue of butt welded joints**, Welding JOURNAL, pp.55s-61s, March 1996.
- [13] OKUMURA, T.& TANIGUCHI, C. (1982), **Engenharia de Soldagem e Aplicações**, LTC, Capítulo 5.

- [14] BERGAMO, R.T. **Avaliação da Eficácia do martelamento para o alívio de tensões e soldas de aços**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [15] DEGARMO, P.; JONASSEN, F.; MERIAM, J.C. – **The Effect of Upon Residual Welding Stresses** – Welding Journal Research Supplement – October 1946 – 616s – 623s.
- [16] MORRIS, J.L. – **Extent of Peening Weld Deposit for Estress Relief** – Welding Journal Research Supplement – March 1948 – 148s – 158s.
- [17] TOMKINGS,A.B – **A Review of Alternative Techniques for Improving Properties of Weldments** – Research,Development and Testing for Industry – Worldwide – November 1993.
- [18] HAAGENSEN, P.J. – **LLW’S Round Robin and Desing Recommendatinos for Improvent Methods** – Proc LW. 50Th Annual Conference – San Francisco – pp.305 – 316 – 1997.
- [19] GONÇALVES, M.C. MARGARIDO, F. COLAÇO, R. - **Materiais de construção** – Guia de utilização, Aços. Cap.3 pp.52 – 75 – 2005.
- [20] AOKI, S.; NISHIMURA, T.; HIROI, T. **REDUCTION Method for Residual Stress of Welded Joint Using Random Vibration**. Tokyo Metropolitan College of technology, 1-10-40 Higashi-Ohi, Shinagawa-Ku, Tokyo 140-0011, Japão, 2005.
- [21] XU, JJ. ; CHEN, LG.; Ni, CZ. **EFFECTS of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes**.Institute of Welding.School of Materials Science and Engineering, Jiaotong University, Shanghai 200030, China, 2006.
- [22] JIANG, W.; ZHANG, Y.; WOO, W. **USING heat sink technology to decrease residual stress in 316L stainless steel welding joint**: Finite element simulation. College of Chemical Engineering, China University of Petroleum ,Qingdao 266555,PR China.Neutron Science Division,Korea Atomic Institute,Daejeon 305-353,Republic of Korea,2012.
- [23] LEE,S.;KIM,B.C.;LEE,D.Y.**FRACTURE mechanism in coarse grained HAZ of HSLA steel welds**.Matallurgica,v.23,n.6,p.995-1000,1989.
- [24] KIKUTA, Y.; ARAKI, T.; YONEDA, M.**RELATIONSHIP between microstructure and toughness in weld metal its reheated zone of high strength steel**. Technology Reports of the Osaka University, v.37, n.1874, p.75-83.aug.1986.

- [25] COSTA, H.R.M. BOTT, I.S. OURO, C.R. **AVALIAÇÃO do efeito de múltiplos tratamentos térmicos de alívio de tensões na microestrutura e propriedades mecânicas de um metal de solda ferrítico**. In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 19, Águas de São Pedro, SP, ABS p.97-110, 1993.
- [26] GOMES, S.I.N. SANTANNA, P.C. KOBAYASHI, Y. **EFEITO do tratamento térmico de alívio de tensões na tenacidade ao impacto de metais depositados obtidos por arco submerso com adição de pó metálico**. In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 19, Águas de São Pedro, SP, ABS p.111-126, 1993.
- [27] MADDOX, S.J. **INFLUENCE of tensile residual stresses on the fatigue behavior of welded joints in steel**. ASTM, STP 7766.p.63-96, 1982.
- [28] BOOTH, G.S. **THE INFLUENCE of simulated North Sea environmental conditions on the constant amplitude fatigue strength of welded joints**. Offshore Technology paper, Oct 3420, 1979.
- [29] BOOTH,G.S. ;WILDE,J.G. **FATIGUE considerations in offshore steel structures in the north sea – The need to design against the possibility of fatigue failure** .the welding Institute Research Bulletin .v.19,p.101-104,Mar.,1978.
- [30] KNIGHT,J.W. **IMPROVING the fatigue strength of fillet welded joints by grinding and peening** .Welding Research International ,v.6,n.6,p.519,1978.
- [31] RUDOLPH, J.; SCHMITT, C.; WEIB, E. **FATIGUE lifetime assessment procedures for welded pressure vessel components** .International Journal of Pressure Vessels and Pipin, v.79, p.103-112, 2002.
- [32] ISOURA, K. **MAINTENANCE program of Shinkansen Structures**, IABSE Symposium, n.2, p.639-647, Lisbon, 1989.
- [33] KIRKHOPE,K.J.;BELL,R.;CARON,L.;BASU,R.I.;MA,K.T. **WELD detail fatigue life improvement techniques** .Part 1:review .Marine Structures ,n.12,p.447-474,1999a.
- [34] MODENESI, P.J. MARQUES P.V. e SANTOS, D.B. **Introdução a Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais; Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Mai.2006.
- [35] WITHERS, P.J. e BHADESHIA, H.K.D.H **Residual stress, Part 1 – Measurement Techniques. Material Science and Technology**, 2001, vol.17, p.355-365.
- [36] DONATO, Gustavo H.B. **Efeitos de Heterogeneidades Mecânicas sobre Forças Motrizes de Trinca em Juntas Soldadas: Determinação Experimental de**

Tenacidade e Extensão de Metodologias de Avaliação de Criticidade de Defeitos. 2008.284 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

[37] AGGEN,G.; AKSTENS, Frank W.; ALLEN,C.Michael; AVERY,H.S.;BABU,P. ; BAYER, Alan M.;BELLO,Félix;BHAT,Shrikan P;AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL.**ASM Handbook**: Volume 6:Welding ,Brazing, and Soldering . USA: ASM International. 1998.

[38] PUC RIO. **Técnicas de Medição de Tensões Residuais.** Disponível em:<[HTTP://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br](http://www.lambda.maxwell.ele.puc-rio.br)>

[39] ESTEFEN, Segan; GUROVA, Tatiana; CASTELO, Xavier; LEONTIEV, Anatoli. Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção.

[40] ZEEMANN, Annelise. **Tensões Residuais de Soldagem.** 2003. Disponível em:<[HTTP://www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br)>.

[41] BONNET, P. **Matériaux et Procédés :Fatigue dès Metaux.**France:Institut Supérieur de Mécanique de Paris.(SUPMECA 3).

[42] WAINER, E. BRANDI S.D. MELO, F.D.H. **Soldagem:** Processos e Metalurgia. [s.l. s.n.], 1992.

[43] PANIGHEL, M. CHAGAS, F. RIBEIRO, J. **Tratamento Térmico Alívio de Tensões.** Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade – São Paulo, SP. 2003.

[44] BATZER, S.A.GOUSKOV, A.M., VORONOV, S.A., 2001. **Modeling Vibratory drilling dynamics.** Trans.ASME, J.Vibrat. Acoust. 123 (4), 435-443.

[45] ZHIPENG, C. e XINGUAN, H. **Residual stress reduction by combined treatment of pulsed magnetic Field and pulsed current.** Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China, 2011.