

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem

DÉBORA SILVA DE SOUSA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM  
COMPONENTES SOLDADOS**

Belo Horizonte

2016

Débora Silva de Sousa

## **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DAS TENSÕES RESIDUAIS EM COMPONENTES SOLDADOS**

Monografia apresentada ao curso de Especialização em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense

Belo Horizonte

2016

S725a

Sousa, Débora Silva de.

Análise do comportamento das tensões residuais em componentes soldados [manuscrito] / Débora Silva de Sousa. – 2016.

71 f., enc.: il.

Orientador: Alexandre Queiroz Bracarense.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da UFMG, como requisito à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Soldagem.”

Bibliografia: f. 69-71.

1. Soldagem. 2. Tensões residuais - Medição. I. Bracarense, Alexandre Queiroz, 1959-. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 621.791



Universidade Federal de Minas Gerais  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**  
Curso de Especialização em Soldagem

Ata 1ª/2016 da Defesa de Monografia de Especialização

No dia **01 de março de 2016**, às 10:00h, a Comissão Examinadora se reuniu para avaliar o trabalho:

**Título:** "Análise do Comportamento das Tensões Residuais em Componentes Soldados"

**Aluno:** Débora Silva de Sousa – Matrícula: 2013677965

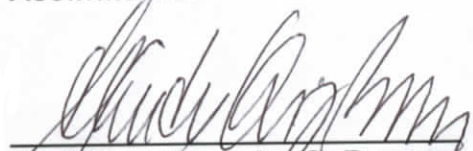
**Local:** Laboratório de Robótica, Soldagem e Simulação – LRSS, Depto. Eng<sup>a</sup> Mecânica – Prédio da EEUFMG Av. Antônio Carlos, 6627 – Campus da UFMG, Pampulha – Belo Horizonte.

**Parecer:**

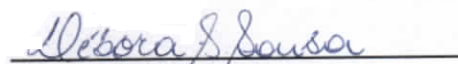
A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo(a) candidato(a) durante 50 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 60 minutos, é de parecer FAVORÁVEL à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 90 e SEM (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de — dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada pelo Prof. — e homologada pelo orientador.

**Assinaturas:**

  
Prof. Dr. Alexandre Q. Bracarense  
DEMEC/EEUFMG – Orientador

  
Prof. Dr. Silvério Ferreira S. Junior  
CDTN – Avaliador

  
Aluno: Débora Silva de Sousa

*"O valor dos grandes homens mede-se pela importância dos  
serviços prestados à humanidade."*

*Voltaire*

## RESUMO

A soldagem é uma das principais técnicas executadas na fabricação de estruturas e/ou equipamentos em todo o mundo. Na busca pelo aprimoramento dos processos de fabricação é de grande importância o conhecimento dos aspectos que podem influenciar na vida útil do equipamento ou peça fabricada.

Dentre os efeitos resultantes do processo de soldagem, destaca-se a tensão residual, decorrente da utilização de grande aporte térmico. A existência de tensões residuais pode prejudicar ou ajudar no desempenho do material, dependendo de sua aplicação.

O objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento das tensões residuais em componentes soldados. Quatro condições foram avaliadas, em todas foi utilizado o processo de soldagem GMAW e como consumível o ER 70S-6 com 1,2mm de diâmetro. Após a soldagem, realizou-se o tratamento por vibração em dois corpos de prova, o tratamento térmico para alívio de tensões em um corpo de prova e outro corpo de prova foi avaliado após a soldagem.

As análises realizadas nos corpos de prova soldados apresentaram tensões residuais compressivas ao longo do cordão de solda, e tensões residuais trativas na ZTA. Este comportamento pode ser explicado pelas transformações de fase ocorridas no ciclo térmico da soldagem, que causam dilatação no volume da microestrutura, induzindo tensões residuais superficiais compressivas na região da solda e, trativas na região termicamente afetada.

**Palavras-chave:** tensão residual, soldagem, medição de tensões residuais.

## ABSTRACT

Welding is a process widely used for the manufacturing of structures and/or equipment all over the world. In pursuit of improving the manufacturing processes, it is extremely important to know how some aspects can influence the useful life of equipment or parts.

Among the effects of the welding process it stands out the residual stress from the use of large heat input. Those residual stresses can harm or help the performance of the material, depending on its application.

The purpose of this study was to evaluate the behavior of residual stresses in welded components. Four conditions were analyzed, all of them using the GMAW welding process and a 1.2 mm diameter ER 70S-6 consumable. After the welding, it was performed a treatment by vibration in two test specimens, the heat treatment for stress relieving in one test specimen and another test specimen was analyzed after welding.

The analysis held on the welded test specimens indicated compressive residual stresses along the weld fillet and trative residual stresses in the HAZ. That behavior can be explained by the phase transformations occurred in the welding thermal cycle, which cause volume expansion of the microstructure, inducing surface compressive residual stresses in the weld region and trative ones in the heat-affected area.

**Keywords:** residual stress, welding, residual stresses measurement.

## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1 - Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldagem de chapas finas.....	17
FIG. 2 - Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo (b). .....	19
FIG. 3 - Desenvolvimento de tensões longitudinais durante a soldagem.....	21
FIG. 4 - Difração de raios x e a equação de Bragg. ....	27
FIG. 5 - Geometria Bragg-Brentano de um difratômetro de raios x, mostrando as diferentes fendas utilizadas. ....	28
FIG. 6 - Apresentação geral do Ruído Magnético Barkhausen. ....	29
FIG. 7 – Sistema básico para a geração do RMB. ....	30
FIG. 8 - Aquecimento e resfriamento controlado.....	31
FIG. 9 - Processo de corte a gás.....	36
FIG. 10 - Equipamento utilizado no corte. ....	37
FIG. 11 - Execução do oxi-corte.....	37
FIG. 12 - Lixamento das peças após o corte.....	37
FIG. 13 - Lixamento das peças após o corte.....	37
FIG. 14 - Chapa após corte e lixamento.....	38
FIG. 15 - Comparação entre a chapa após polimento e a chapa após o corte .....	38
FIG. 16 - Robô utilizado para automatização da soldagem.....	39
FIG. 17 - Fonte do robô.....	39
FIG. 18 - Utilização do backing cerâmico .....	40
FIG. 19 - Corpo de prova preparado para soldagem.....	40
FIG. 20 - Sequência de soldagem realizada. ....	40
FIG. 21 - Peça após soldagem.....	41
FIG. 22 - Peça fixada à mesa de soldagem para evitar distorção. ....	41
FIG. 23 - Especificação do procedimento de soldagem. ....	42
FIG. 24 - Gráfico de Tratamento Térmico. ....	44
FIG. 25 - Vibrador acoplado ao corpo de prova. ....	45
FIG. 26 – Equipamento típico para alívio de tensões por vibração. ....	45



FIG. 27 - Difratoômetro Portátil utilizado para análises das tensões residuais.....	47
FIG. 28 – Equipamento utilizado para realização do teste por Ruído Magnético Barkhausen. ....	48
FIG. 29 – Esquematização do teste por Ruído Magnético Barkhausen .....	49
FIG. 30 – Esquematização do teste por Difração de Raios X. ....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.....	25
-----------------------------------------------------------------------------	----

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Perfil de Tensão Longitudinal - Posição Início .....	51
GRÁFICO 2 - Perfil de Tensão longitudinal - Posição Centro .....	51
GRÁFICO 3 - Perfil de Tensão Longitudinal - Posição Final .....	52
GRÁFICO 4 - Perfil de Tensão Transversal - Posição Início.....	52
GRÁFICO 5 - Perfil de Tensão Transversal – Posição Centro.....	53
GRÁFICO 6 - Perfil de Tensão Transversal - Posição Final .....	53
GRÁFICO 7 – Perfil de ruído magnético na solda 01, coluna 01 lado esquerdo.....	55
GRÁFICO 8 - Perfil de ruído magnético na solda 01, coluna 01 lado direito.....	55
GRÁFICO 9 - Perfil de ruído magnético na solda 02, coluna 01 lado esquerdo. ....	56
GRÁFICO 10 - Perfil de ruído magnético na solda 02, coluna 01 lado direito.....	56
GRÁFICO 11 - Perfil de ruído magnético na solda 03, coluna 01 lado esquerdo.....	57
GRÁFICO 12 - Perfil de ruído magnético na solda 03, coluna 01 lado direito.....	57
GRÁFICO 13 - Perfil de ruído magnético na solda 04, coluna 01 lado esquerdo.....	58
GRÁFICO 14 – Perfil de ruído magnético na solda 04, coluna 01 lado direito.....	58
GRÁFICO 15 – Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 01. ....	59
GRÁFICO 16 - Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 02. ....	59
GRÁFICO 17 - Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 03. ....	60
GRÁFICO 18 – Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 01. ....	60
GRÁFICO 19 - Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 02. ....	61
GRÁFICO 20 - Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 03. ....	61
GRÁFICO 21 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 01. ....	62
GRÁFICO 22 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 02. ....	62
GRÁFICO 23 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 03. ....	63
GRÁFICO 24 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 01. ....	63
GRÁFICO 25 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 02. ....	64
GRÁFICO 26 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 03. ....	64

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta T$  – Diferença de temperatura

$T$  – Temperatura final

$T_0$  – Temperatura inicial

$\Delta l$  – Variação do comprimento

$l$  – Comprimento final

$l_0$  – Comprimento inicial

$\alpha$  – Coeficiente de dilatação térmica linear

$Fe$  – Ferro

$O$  – Oxigênio

$O_2 / O_3$  – Molécula de oxigênio

$kJ$  – Kilojoules

$Ar$  – Argônio

$CO_2$  – Dióxido de carbono

$^{\circ}C$  – Graus Celsius

$h$  – Hora

$Hz$  – Hertz

$sen$  – Seno

$psi$  - Libra por polegada quadrada

$\theta$  – Ângulo teta

$d$  - distância interplanar

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	14
2.1	Tensões residuais .....	14
2.1.2	Classificação das tensões residuais.....	16
2.1.2.1	<i>Macroscópicas</i> .....	16
2.1.2.2	<i>Microscópicas</i> .....	17
2.1.2.3	<i>Sub-microscópicas</i> .....	18
2.2	Tensões relacionadas à soldagem.....	18
2.2.1	Principais fontes de tensões residuais na soldagem.....	22
2.2.1.1	<i>Contração de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem.</i> 22	
2.2.1.2	<i>Transformação de fase</i> .....	23
2.2.1.3	<i>Resfriamento superficial mais elevado em relação ao restante da espessura.</i> ...	23
2.3	Técnicas de avaliação das tensões residuais.....	24
2.3.1	Difração por Raios-X.....	26
2.3.1.1	Conceitos fundamentais .....	26
2.3.1.2	Difratômetros de raios x .....	27
2.3.2	Ruído Magnético Barkhausen .....	29
2.3.2.1	<i>Definição do RMB</i> .....	29
2.4	Métodos de alívio de tensão residual.....	31
2.4.1	Tratamento térmico de alívio de tensões.....	31
2.4.2	Alívio de tensão por vibração .....	33
3	METODOLOGIA .....	35
3.1	Objetivo .....	35
3.2	Processo experimental .....	35
3.2.1	Corte e preparação dos corpos de prova .....	35
3.2.2	Soldagem dos corpos de prova.....	38
3.2.3	Tratamento térmico de alívio de tensões.....	43
3.2.4	Alívio de tensões por vibração .....	45
3.2.5	Difração de raios-x .....	46
3.2.6	Ruído Magnético Barkhausen .....	48

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
5	CONCLUSÕES.....	66
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	68
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	69

## **1 INTRODUÇÃO**

A soldagem é um processo de fabricação amplamente utilizado em diversos setores industriais tendo, na maioria das vezes, uma influência significativa no custo e no desempenho do produto. (FBTS, 2009).

Na busca pelo aprimoramento dos processos de fabricação de componentes soldados, é importante o entendimento dos efeitos resultantes dos processos de soldagem, os quais geram imperfeições na fabricação de peças e/ou equipamentos, e se apresentam na forma de tensões residuais e distorções.

O conhecimento das tensões residuais é de suma importância e pode determinar a vida útil do equipamento e/ou peça fabricada. A determinação das informações sobre as tensões residuais pode ser obtida durante as etapas de fabricação, possibilitando a correção preventiva de possíveis falhas, facilitando o controle da qualidade dos produtos fabricados.

As tensões residuais aparecem em peças submetidas a diferentes processos de fabricação, dentre eles a fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, dobramento, entre outros. Porém, este estudo dará ênfase ao processo de soldagem, no qual ocorrem deformações térmicas, transformações de fase e têmpera. Desta forma, a determinação do estado de tensões residuais em componentes soldados é um fator complexo.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A soldagem por fusão é caracterizada pelo aquecimento de regiões localizadas das peças, permanecendo o restante destas em temperaturas muito inferiores. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas esta dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas no material aquecido. Como consequência, ao final do processo de soldagem, tensões internas (tensões residuais) e mudanças permanentes de forma e de dimensões (distorções) ocorrem na peça. Tanto as tensões residuais como as distorções podem afetar de modo importante a utilidade e o desempenho da estrutura soldada, sendo fundamental o conhecimento de suas características e de medidas para a sua prevenção e controle (MODENESI, 2008).

### **2.1 Tensões residuais**

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as suas solicitações externas são removidas. Essas tensões aparecem frequentemente 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 (MODENESI, 2008).

Uma das principais causas do aparecimento das tensões residuais é a ocorrência de deformações plásticas não uniformes ao longo de uma secção da peça, causadas por efeito térmico e mecânico. (MODENESI, 2008). Então, para que



estas tensões permaneçam na estrutura após a remoção dos esforços externos, alguma região do componente por menor que seja foi solicitada além do limite elástico do material. Assim sendo, pode-se afirmar que se não ocorrem deformações plásticas, não serão geradas tensões residuais (CARMO, 2006). Como as tensões residuais apresentam caráter elástico, o valor máximo que estas tensões podem atingir é a tensão de escoamento local do material.

As tensões residuais podem ser prejudiciais ou não, dependendo do tipo de serviço a que o produto foi projetado e do tipo de tensão residual presente. Em alguns casos podem alterar consideravelmente as características do material, como a capacidade de resistir a carregamentos, resistência à fratura e vida em fadiga.

As tensões residuais juntam-se à tensão de carregamento em serviço, imposta ao equipamento, podendo acrescentar ou diminuir o valor efetivamente aplicado à peça em função da natureza trativa ou compressiva das tensões residuais (VIEIRA SOARES, 1998).

Tensões residuais trativas podem ser perigosas quando tensões aplicadas ao componente também forem trativas, a soma das tensões trativas pode contribuir para a iniciação e o crescimento de trincas de fadiga. Já as tensões residuais compressivas se opõe a direção de carregamento trativo, neste caso, a tensão residual compressiva amortiza o nível de tensão aplicada e inibe a iniciação e a propagação de trincas. Da mesma forma se a peça apresentar tensão residual compressiva e o carregamento de serviço também for compressivo, o valor da tensão compressiva será acrescido. (VIEIRA SOARES, 1998).

### **2.1.2 Classificação das tensões residuais**

As tensões residuais são comumente classificadas, em relação à sua área de abrangência, em três tipos principais:

- Macroscópicas (Tipo I)
- Microscópicas (Tipo II)
- Sub-microscópicas (Tipo III)

#### **2.1.2.1 *Macroscópicas***

São tensões também chamadas de tensões residuais do tipo I, as quais podem se estender por vários grãos do material. Essas tensões afetam um grande volume do material, podendo atingir as dimensões do equipamento. São provenientes de deformações causadas por fontes mecânicas, térmicas ou químicas e se apresentam de forma bem uniforme nos grãos.

As macro-tensões possuem a característica de auto-compensação, ou seja, elas assumem um estado de equilíbrio e qualquer alteração do componente faz com que as tensões se reorganizem, alcançando uma nova configuração de equilíbrio.

Dependendo da distribuição, sentido e intensidade das tensões residuais tipo I, os efeitos gerados podem tanto ampliar como reduzir os efeitos do carregamento aplicado em serviço.

Um exemplo deste tipo de tensão é encontrado em chapas finas soldadas, onde são observadas tensões residuais longitudinais, conforme apresentado na FIG. 01.

Tem-se o valor máximo de tensão trativa no cordão de solda e ocorre uma redução deste valor na medida em 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 (PUC-RIO, 2006).

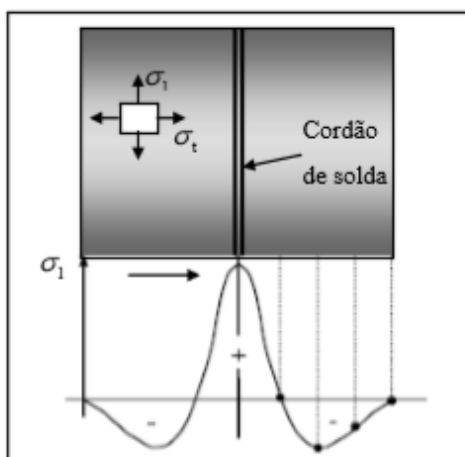


FIG. 1 - Esquema do comportamento das tensões residuais nas vizinhanças de uma união por soldagem de chapas finas.

Fonte: PUC-RIO, 2006.

### 2.1.2.2 *Microscópicas*

São tensões residuais também conhecidas como tipo II. Elas se apresentam distribuídas uniformemente ao longo de um grão. São tensões originadas em deformações plásticas microestruturais localizadas em uma pequena área do material em equilíbrio com grãos vizinhos. Se o estado de equilíbrio for modificado, podem ocorrer alterações macroscópicas do corpo resultando em uma evolução do estado de tensões, mudando do tipo II para o tipo I.

### **2.1.2.3 Sub-microscópicas**

Tensões também conhecidas como tensões residuais do tipo III ou micro tensões localizadas. São tensões que se apresentam dentro de uma pequena porção do grão, em distâncias interatômicas. São resultantes de processo que geram descontinuidades na rede cristalina como vazios, impurezas, entre outros.

## **2.2 Tensões relacionadas à soldagem**

Em uma estrutura soldada as tensões e distorções podem gerar diversos problemas como a formação de trincas, uma maior tendência da estrutura a apresentar fratura frágil, falta de estabilidade dimensional e dificuldade no ajuste de peças ou componentes devido à sua mudança de forma.

Segundo MODENESI (2008), em seu estudo sobre os efeitos mecânicos do ciclo térmico, quando um material é aquecido, suas dimensões aumentam proporcionalmente à variação de temperatura ( $\Delta T = T - T_0$ ), isto é:

$$\Delta l = l - l_0 = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

Onde ( $\Delta l$ ) é a variação do comprimento inicial ( $l_0$ ) e  $\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear.

Considerando uma estrutura livre de restrições dimensionais, aquecida uniformemente, a peça se expandirá em todas as direções, ao final da aplicação de calor e resfriamento a estrutura terá se contraído uniformemente para retornar as suas dimensões originais. Nestas condições ao final do ciclo termal não serão

observados efeitos mecânicos relevantes, ou seja, o objeto ficará livre de tensões residuais e distorções. Entretanto, se a peça for aquecida de forma não uniforme e existirem restrições à expansão e contração, tensões residuais e distorções podem se desenvolver na estrutura (FBTS, 2009).

MODENESI (2008) considera as tensões residuais presentes em uma estrutura soldada durante a sua fabricação e seu uso, de dois tipos:

1. Tensões residuais produzidas na soldagem de seus membros sem restrição.
2. Tensões de reação resultantes da ligação entre os diversos membros da estrutura e entre estes e outras estruturas.

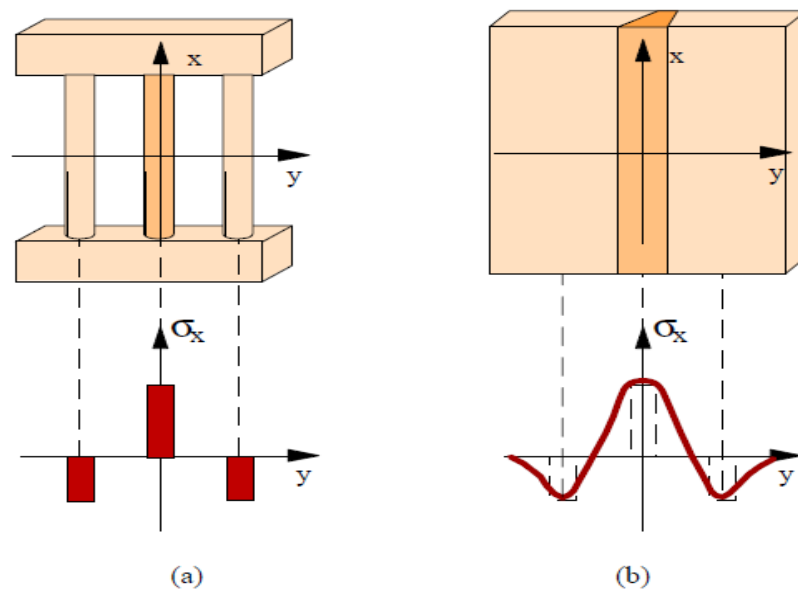


FIG. 2 - Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas na montagem de três barras (a) e as tensões longitudinais formadas ao longo da direção transversal ( $y$ ) a uma solda de topo (b).

Fonte: MODENESI (2008)

A FIG. 3 ilustra o desenvolvimento das tensões residuais longitudinais durante a soldagem, devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada.

Na seção AA', muito distante da poça de fusão e ainda não aquecida pela fonte de calor, não existem variações de temperatura e o material ainda está isento de tensões. Na seção BB', junto à poça de fusão, o material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, assim, tensões de compressão em regiões próximas à ZF (Zona de Fusão) e tensões de tração nas regiões um pouco mais afastadas. Quando o seu limite de escoamento é atingido, o material aquecido deforma-se plasticamente em compressão. Na poça de fusão, como o material está no estado líquido, as tensões são nulas. Com o resfriamento e após a solidificação da solda, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da solda. Assim, na seção CC' surgem tensões de tração junto ao cordão e de compressão nas regiões mais afastadas. Estas tensões aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida. Após o resfriamento completo, seção DD', as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material. (MODENESI, 2008).

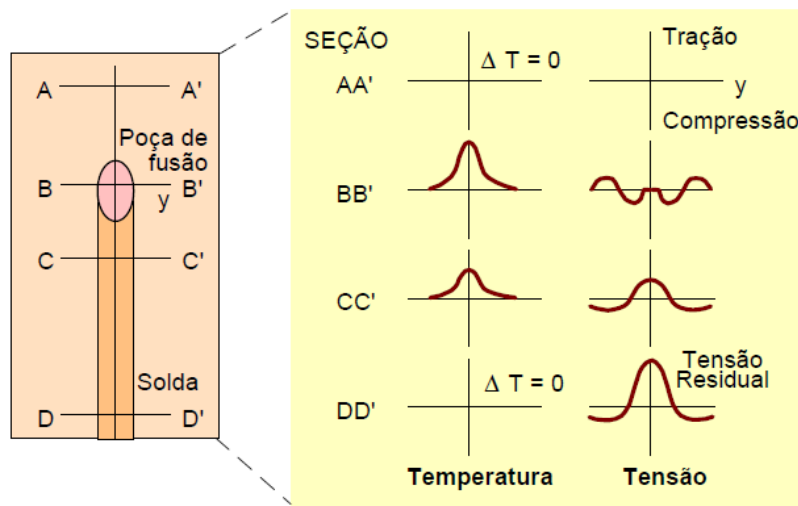


FIG. 3 - Desenvolvimento de tensões longitudinais durante a soldagem.

Fonte: MODENESI (2008)

O calor aplicado durante a soldagem tende a aliviar estas tensões e a deformação final é uma combinação daquela devida às tensões internas. Muitas vezes estas tensões se opõem à deformação causada pela soldagem e assim reduzem a deformação resultante, outras vezes os efeitos são exatamente o oposto e elas se somam. É extremamente difícil antecipar como secções conformadas reagem ao calor de soldagem, uma vez que o arranjo das tensões internas é desconhecido; um trecho de uma secção pode se comportar de maneira inteiramente diferente de outro trecho da mesma secção. No caso de chapas e barras, entretanto, as tensões que o trabalho da conformação causa é conhecido, e o comportamento do material pode ser previsto. Por exemplo, uma chapa que tenha sido conformada para um formato curvo tende ao endireitamento, quanto às tensões de conformação são aliviadas localmente pelo calor da soldagem, mas, no resfriamento, podem acabar produzindo maior encurvamento. É, portanto difícil estimar precisamente em que extensão o movimento ocorre. (FBTS, 2009)

## **2.2.1 Principais fontes de tensões residuais na soldagem**

As tensões residuais na soldagem são tensões internas em equilíbrio que permanecem no material após a execução da operação de soldagem. Estas tensões são geradas por escoamentos parciais localizados que ocorrem durante o ciclo térmico da soldagem. Podem ser tanto trativas como compressivas, dependendo da região considerada (zona fundida, zona afetada pelo calor, material de base) e de alguns fatores tais como aporte térmico, pré-aquecimento, grau de restrição da junta, quantidade de passes de solda, velocidade de soldagem, etc. (MARQUEZE, 2002).

Segundo GUROVA (2006) as principais fontes de tensões residuais na soldagem são: contração no resfriamento, transformação de fase e resfriamento superficial mais intenso. Dentre estas fontes, a principal causadora de tensões residuais na soldagem é a contração no resfriamento, devido ao aquecimento de forma não uniforme em diferentes regiões no material, resultante do processo de soldagem.

### **2.2.1.1 *Contração de regiões diferentemente aquecidas e plastificadas durante a soldagem.***

Inicialmente a região aquecida apresenta baixa tensão de escoamento a quente, o material passa a deformar-se plasticamente. Com continuação do resfriamento e conseqüente diminuição da temperatura, a tensão de escoamento que era baixa começa a elevar-se, fazendo com que a região ao contrair-se passe a se opor a deformação plástica a tração. Esse processo instala tensões residuais



trativas na região que foi aquecida e tensões compressivas nas regiões menos afetadas pelo calor (GUROVA, 2006).

Como consequência deste fenômeno que ocorre no aquecimento, o material tende a se deformar buscando aliviar as tensões residuais. A intensidade das tensões também está relacionada ao grau de restrição da junta soldada e são proporcionais à extensão da zona plastificada (GUROVA, 2006).

#### **2.2.1.2      *Transformação de fase***

Durante o ciclo térmico da soldagem, transformações microestruturais ocorrem e geram tensões devido à dilatação do volume do material, decorrente da transformação da austenita para ferrita, bainita, perlita ou martensita. Esses efeitos geram tensões residuais de compressão na região transformada.

#### **2.2.1.3      *Resfriamento superficial mais elevado em relação ao restante da espessura.***

Um resfriamento mais elevado na superfície do que no restante da espessura de um determinado material gera tensões residuais. Este fato ocorre devido ao resfriamento de forma não homogênea ao longo da espessura do material. As diferenças de temperatura nas orientações longitudinais e transversais podem causar deformação plástica localizada, gerando assim tensões residuais ao longo da espessura.

Em chapas espessas esses efeitos podem gerar um nível elevado de tensões residuais quando a junta soldada apresentar elevado gradiente de temperatura ao longo da espessura e baixo limite de escoamento nesta faixa de temperaturas.

### 2.3 Técnicas de avaliação das tensões residuais

Atualmente existem várias técnicas para avaliação das tensões residuais em componentes soldados. As técnicas disponíveis podem ser classificadas em dois grupos: as técnicas destrutivas e não destrutivas.

A técnica destrutiva para medição das tensões residuais é feita com base no estado de equilíbrio do material. O processo ocorre modificando o estado de equilíbrio para então realizar a medição das tensões residuais do componente através de um relaxamento destas tensões. Porém, este método apenas possibilita avaliar a consequência da relaxação das tensões e não quantifica o quanto a tensão foi relaxada.

As principais técnicas de medição destrutivas de tensões residuais são: Tensões inerentes ou estimativa de *Eigenstrain*, Furo cego, Deflexão e *Ring core*.

As técnicas não destrutivas para medição de tensões residuais são realizadas tendo como base as propriedades físicas ou cristalográficas do material. Os métodos mais utilizados são a difração de raios-X, nêutrons, ultrassônico e magnético. As técnicas de difração de raios-X e nêutrons são feitas baseadas na medida da tensão no espaçamento interplanar de um material policristalino. O método de difração de raios-X apresenta uma excelente precisão, porém é limitado a análise de apenas tensões residuais superficiais do componente em questão. A portabilidade do equipamento também é outra restrição, não permitindo medidas em campo. A técnica de medição por difração de nêutrons tem como base a medida dos espaçamentos interatômicos, assim como a técnica de medição por raios-X.

A tabela a seguir mostra algumas vantagens e desvantagens dos principais métodos de medição de tensão residual, bem como sua aplicação.

Tabela 1 - Comparação entre os métodos de medição de tensões residuais.

<b>Método</b>	<b>Magnético</b>	<b>Ultrassom</b>	<b>Raios- X</b>	<b>Furo Cego</b>
Vantagens	Velocidade e facilidade de uso. Unidade portátil.	Velocidade e facilidade de uso. Permite a medição de tensões internas.	Metodologia bem estabelecida e precisa	Metodologia bem estabelecida e precisa.
Desvantagens	Somente para materiais ferríticos. Fornece as diferenças entre tensões principais, não os valores absolutos. Sensível a microestrutura do material	Não aplicável a metais de solda. Sensível a microestrutura do material.	Pode precisar de proteção contra a radiação. Unidade deve ser fixa em relação ao componente.	Semi-destrutivo localmente. Resultados demorados.
Penetração Máxima	1,0 mm	Superficial: 1,0 mm Interna: 150,0 mm	0,01 mm	2,0 mm (com strain-gages comerciais)
Tipo de Tensão Medida	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1, 2 e 3	Tipos 1 e 2 ou 1 e 3	Tipo 1
Parâmetro Medido	Amplitude do efeito "Barkhausen noise" ou permeabilidade magnética	Variações da velocidade da onda ultra-sônica	Alteração no espaçamento interplanar de materiais policristalinos.	Deformação superficial ou deslocamentos
Problemas para o caso de materiais com grãos grandes e textura grosseira	Sim	Sim	Sim	Não
Sensibilidade para endurecimento por deformação plástica	Alta	Alta	Alta	Baixa
Precisão Normal	±20,0 MPa	±20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa	10,0 a 20,0 MPa

Fonte: GUROVA, 2006.

As técnicas utilizadas para avaliações de tensões residuais realizadas neste estudo são a difração por raios X e o Ruído Magnético Barkhausen.

## 2.3.1 Difração por Raios-X

### 2.3.1.1 Conceitos fundamentais

A técnica de difração de raios x é um dos principais métodos utilizados na caracterização microestrutural de materiais cristalinos, e possui diversas aplicações em alguns campos na engenharia e ciência dos materiais.

As radiações ao atingirem o material podem ser espalhadas elasticamente, ou seja, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo. O fóton de raios x após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente. Se os átomos que geram o espalhamento estiverem arranjados como uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, verifica-se que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicos e que efeitos de difração dos raios x são observados em vários ângulos (CULLITY, 1978).

Considerando dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração de raios x (interferência construtiva ou mesma fase) vão depender da diferença de caminho percorrida pelos raios x e o comprimento de onda da radiação incidente. Essa condição é expressa pela lei de Bragg, ou seja (CULLITY, 1978):

$$n.\lambda=2d.\sin. \theta$$

Onde:

$n$  é a ordem de difração (número inteiro);  $d$  é a distância interplanar para o conjunto de planos hkl da estrutura cristalina;  $\theta$  é o ângulo de incidência dos raios x (medido entre o feixe incidente e os planos cristalinos).

A FIG. 4 mostra a reflexão de um feixe de raios x incidente em planos paralelos na estrutura cristalina de um material.

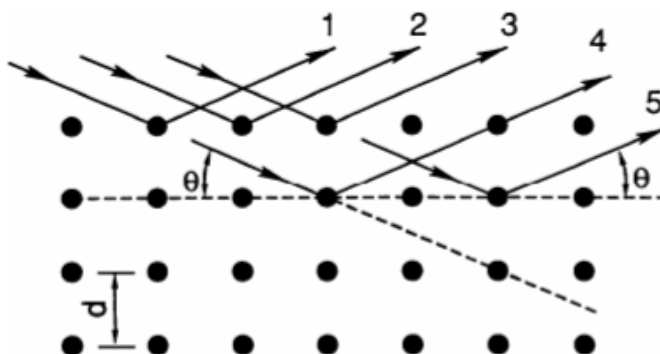


FIG. 4 - Difração de raios x e a equação de Bragg.

Fonte: CULLITY, 1978.

### 2.3.1.2 Difrátômetros de raios x

Os difratômetros de raios x disponíveis no mercado são dominados pela geometria parafocal Bragg-Brentano (FIG. 5); seu arranjo geométrico pode constituir-se de um goniômetro horizontal ( $\theta$ - $2\theta$ ) ou vertical ( $\theta$ - $2\theta$  ou  $\theta$ - $\theta$ ).

Para a geometria  $\theta$ - $2\theta$  (FIG. 5), o goniômetro, acoplado aos acessórios de recepção do feixe difratado, move-se (H) com velocidade angular ( $2\theta$ /passo) sobre o eixo P e rotaciona a amostra (P) com metade desta velocidade angular ( $\theta$ /passo). O raio do círculo do goniômetro é fixa, apresentando iguais distâncias do tubo gerador de raios X à amostra e da amostra à fenda de recepção "D" ( $LP = PD$ ). O plano do círculo focal contém os raios incidentes e difratados, isto é, a fonte, a amostra e a fenda de recepção. (CULLITY, 1978).

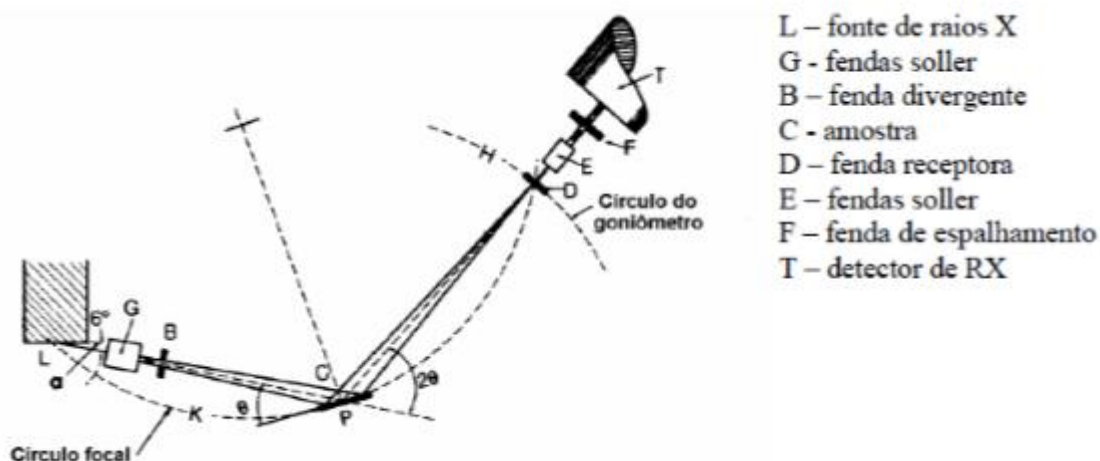


FIG. 5 - Geometria Bragg-Brentano de um difratômetro de raios x, mostrando as diferentes fendas utilizadas.

Fonte: (CULLITY, 1978).

A partir da fonte, os raios x atravessam a fenda Soller ou colimadores paralelos (G), a fenda de divergência (B) e irradiam a superfície da amostra (C). Os raios difratados em determinado ângulo  $2\theta$  convergem para a fenda de recepção (D). Antes ou depois da fenda de recepção pode ser colocado um segundo conjunto de colimadores (E) e uma fenda de espalhamento (F). Um monocromador do feixe difratado pode ser colocado após a fenda de recepção, na posição da fenda de espalhamento (CULLITY, 1978).

A difração de raios x possibilita vários tipos de aplicações, como por exemplo: identificação de fases cristalinas, quantificação de fases, determinação de parâmetros de célula unitária, orientação de cristais (textura), tamanho de cristais e tensão residual.

## 2.3.2 Ruído Magnético Barkhausen

### 2.3.2.1 Definição do RMB

Trata-se de um método de ensaio não destrutivo baseado na análise do ruído magnético de *Barkhausen* e na análise da indução magnética em materiais ferromagnéticos, podendo caracterizar os materiais e envolve aplicações industriais não possíveis com o uso de ensaios convencionais. (CARLECH, 2010).

Quando um campo magnético variável é aplicado ao material, produz-se movimentação das paredes dos domínios, gerando deslocamentos que tendem a formar domínios maiores, orientados segundo a direção do campo aplicado. Esta movimentação não é contínua, mas realizada aos saltos, e depende de uma série de fatores micro e macro-estruturais do material. Por outro lado, essa movimentação gera pulsos magnéticos que podem ser medidos como uma seqüência de pulsos de voltagem através de uma bobina leitora, colocada na superfície do material. A forma de onda do campo magnético de excitação e do RMB gerado podem ser observados na FIG. 6. (CARLECH, 2010).

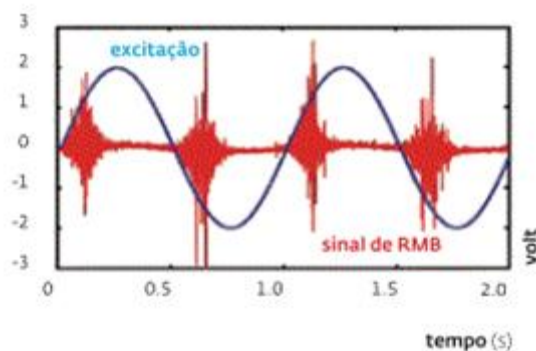


FIG. 6 - Apresentação geral do Ruído Magnético Barkhausen.

Fonte: Laboratório de dinâmica e instrumentação, 2010.

O tipo de sistema de medição de RMB pode variar dependendo da informação desejada, da peça a ser monitorada, das condições em que a medida será realizada dentro do laboratório, numa planta industrial, dentre outros. De acordo com o sistema básico, apresentado de forma esquemática na FIG. 7, utiliza-se uma fonte bipolar que fornece corrente para uma bobina de excitação magnética. O campo gerado depende da frequência e amplitude da corrente que, por sua vez, é controlada por um “software”. O campo magnético variável penetra no material, provocando o movimento dos domínios magnéticos. O sinal de RMB, lido por uma bobina detectora colocada na superfície do material a ser analisado é amplificado e posteriormente digitalizado e enviado para o microcomputador, onde será analisado pelo programa de controle de instrumentação e processamento de sinais. (CARLECH, 2010).

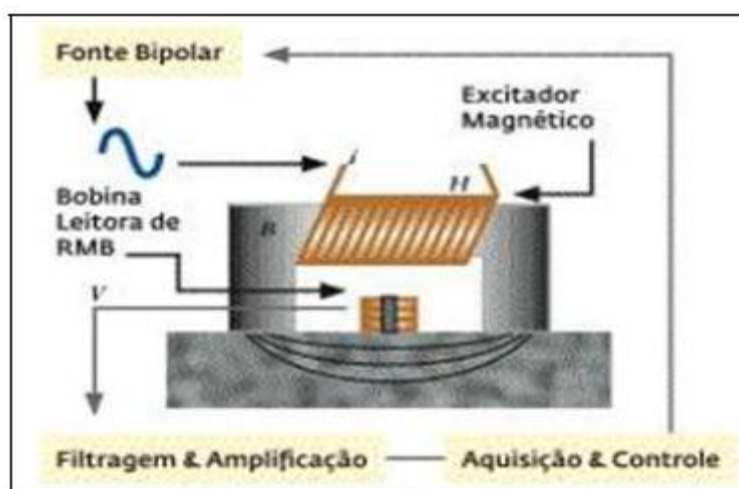


FIG. 7 – Sistema básico para a geração do RMB.

Fonte: Laboratório de dinâmica e instrumentação, 2010.

Na utilização do RMB, como método de ensaio não destrutivo, diversas variáveis influenciam na resposta do ruído. Este, portanto, somente, deve ser utilizado como técnica comparativa envolvendo diferentes estados do material com padrões de referência daquele material estudado (EVANS, 2007).



## 2.4 Métodos de alívio de tensão residual

### 2.4.1 Tratamento térmico de alívio de tensões

O tratamento térmico de alívio de tensões consiste de modo simplificado, em aquecer uniformemente a peça, de maneira que o limite de escoamento do material fique reduzido a valores inferiores às tensões residuais. Nesta condição, as tensões residuais provocam deformações plásticas locais diminuindo de intensidade. (FBTS, 2009).

O processo se baseia no aquecimento do material a uma temperatura apropriada e manutenção nesta temperatura por tempo determinado, seguido de um resfriamento controlado, causando alteração de suas propriedades físicas e mecânicas, sem introdução de novas tensões, conforme apresentado na FIG. 8.

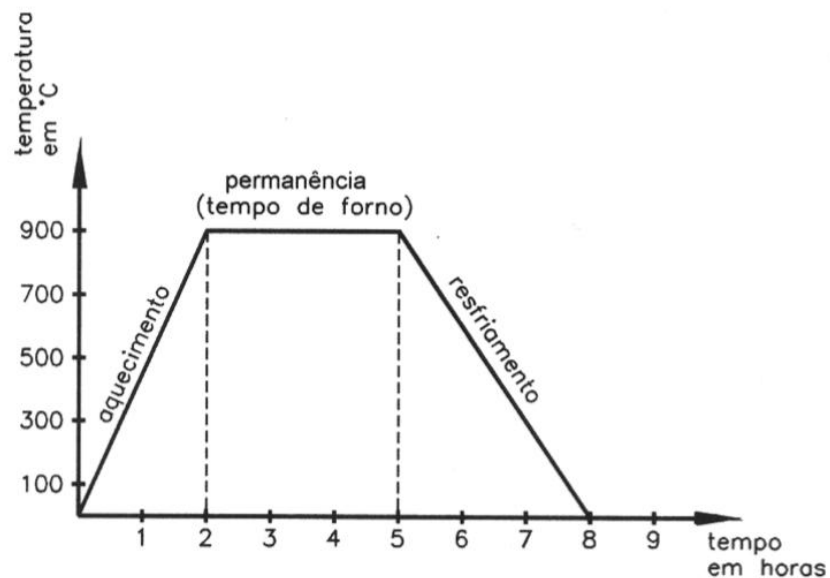


FIG. 8 - Aquecimento e resfriamento controlado.

Fonte: Engenharia Metalúrgica e de Materiais - EPUSP.

O tratamento térmico é realizado em temperaturas chamadas subcríticas para impedir mudanças na microestrutura ou dimensões da peça, e resulta na redução da tenacidade do material e remoção das tensões residuais. As temperaturas utilizadas no processo são variáveis, dependendo do tipo de aço a ser tratado.

As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades (CHIAVERINI, 1988).

Em geral, os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- Remoção de tensões internas;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora da ductilidade;
- Melhora da usinabilidade;
- Melhora na resistência ao desgaste;
- Melhora das propriedades de corte;
- Melhora da resistência à corrosão;
- Melhora da resistência ao calor;
- Modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

## **2.4.2 Alívio de tensão por vibração**

Trata-se de um método de alívio de tensões residuais por meio de vibrações. A energia aplicada reorganiza a estrutura cristalina, aliviando as tensões residuais e estabilizando a peça sem causar distorção.

É um processo muito útil para o alívio de tensões em estruturas grandes, nas quais o método por tratamento térmico poderia causar graves distorções. No processo são introduzidas vibrações de baixa frequência e alta amplitude por um período de tempo determinado, aliviando as tensões residuais sem causar distorção ou alteração na resistência à tração, limite de elasticidade ou resistência à fadiga do material.

As vibrações de baixa frequência transportam energia de alta amplitude e são muito eficientes na diminuição da tensão residual em peças metálicas e em soldas.

A frequência utilizada no processo é gradualmente aumentada até que o sistema físico passa a vibrar com amplitudes cada vez maiores, ou seja, até que a primeira ressonância seja atingida. Esta ressonância é mantida por um período de tempo específico e, em seguida, a frequência é aumentada novamente até a segunda ressonância e assim sucessivamente. (BRAGA, 2011).

A partir da variação da frequência do vibrador, o ponto de ressonância é atingido. Neste ponto a vibração é mantida durante um tempo determinado com base no peso da peça e sua aplicação pretendida. O tempo pode variar de 10 minutos à uma hora ou mais, mas, se for excedido, a peça não irá sofrer qualquer dano devido à fadiga ou perda de resistência à tração. (BRAGA, 2011).

Em caso de estruturas muito grandes, pode ser necessária a aplicação do procedimento em vários pontos.

Esta técnica é indicada para uma grande variedade de metais ferrosos e não ferrosos. Pode ser aplicada em peças de tamanhos variáveis, desde pequenas peças soldadas a grandes estruturas de aço.

Um ponto de destaque do método é a facilidade de aplicação em qualquer fase da fabricação de peças metálicas. Podendo ser utilizado logo após a usinagem ou até mesmo durante a soldagem, evitando a concentração de tensões que podem causar deformação à peça. (BRAGA, 2011).

### **3 METODOLOGIA**

#### **3.1 Objetivo**

Avaliar o comportamento das tensões residuais em componentes soldados após serem submetidos ao método de tratamento de alívio de tensões por vibração mecânica e por tratamento térmico em juntas soldadas.

#### **3.2 Processo experimental**

##### **3.2.1 Corte e preparação dos corpos de prova**

Foram obtidos quatro corpos de prova a partir dos processos de corte e soldagem. A preparação dos chanfros foi realizada pelo processo Oxi-Corte (*Oxi-Fuel Gas Cutting* – OFC), no qual o corte dos metais é obtido pela reação do oxigênio puro com o metal, a alta temperatura, conseguida inicialmente com o uso de uma chama oxigênio - gás combustível.

O metal a ser cortado é aquecido por uma chama a uma temperatura em que ocorre a reação do metal com o oxigênio (temperatura de ignição) e a seguir é exposto a um jato de oxigênio de alta pureza. A reação de oxidação do metal produz uma quantidade de calor suficiente para fundir o óxido que é formado e é expulso pelo jato de oxigênio, e também para manter a peça aquecida, permitindo assim a continuidade da operação.

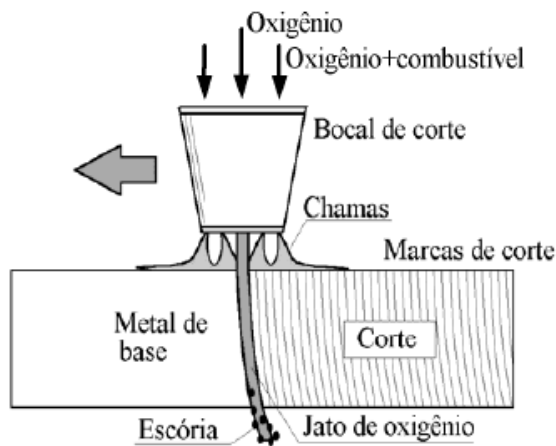
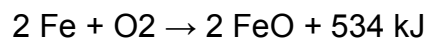


FIG. 9 - Processo de corte a gás.

Fonte: Livro Soldagem – Fundamentos e tecnologia.

A oxidação do ferro em altas temperaturas ocorre em três reações, representadas pelas equações:



No processo foi utilizado um equipamento mecanizado, que proporcionou um corte com uma velocidade mais uniforme do que pelo processo manual. O equipamento utilizado no corte das chapas pode ser visto nas figuras 10 e 11. Após o corte realizou-se um processo de lixamento das peças com o auxílio do esmeril para eliminar rebarbas resultantes do corte, melhorando assim a aparência e regularidade da superfície das peças.

As figuras a seguir ilustram o processo de corte e preparação das chapas para confecção dos corpos de prova. Foi utilizada uma chapa de material USI SAR 50 com 12,7mm de espessura, com as dimensões 150 x 250 mm.



FIG. 10 - Equipamento utilizado no corte.



FIG. 11 - Execução do oxi-corte.



FIG. 12 - Lixamento das peças após o corte.



FIG. 13 - Lixamento das peças após o corte



FIG. 14 - Chapa após corte e lixamento.



FIG. 15 - Comparação entre a chapa após polimento e a chapa após o corte

### 3.2.2 Soldagem dos corpos de prova

Para a soldagem envolvida no trabalho, foi definida a robotização do processo GMAW (*Gas-Shielded Metal Arc Welding*) também conhecido como MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*), no qual um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um arame sólido, e o consumível é alimentado continuamente.

Um fluxo de gás de uma fonte externa foi utilizado para proteger o arco e a poça de fusão da contaminação da atmosfera durante a soldagem. Foi utilizada uma mistura gasosa com 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub>.

No processo de soldagem foi utilizado o robô *MOTOMAN*<sup>®</sup> YR-SK6-C100, conforme apresentado nas figuras 16 e 17. O robô possui seis graus de liberdade, que garante a repetibilidade e precisão dos experimentos, possibilitando um ajuste rigoroso de parâmetros para se obter um determinado conjunto de características para o cordão de solda.



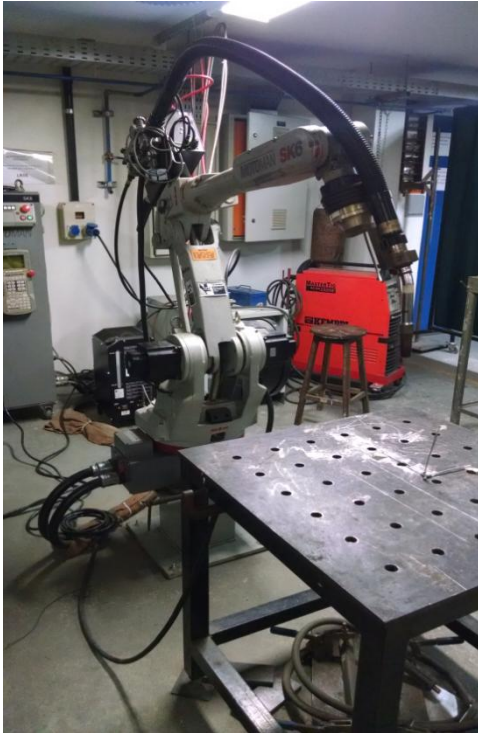


FIG. 16 - Robô utilizado para automatização da soldagem



FIG. 17 - Fonte do robô.

Com a utilização do robô na soldagem, foi possível manter o ajuste de algumas variáveis até o final dos experimentos: variáveis como, tensão, velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem, distância bico de contato-peça, frequência de oscilação, ângulo de inclinação da tocha e ângulo de soldagem. Na condução dos experimentos foi de grande importância o controle preciso de todas estas variáveis, pois influenciam no resultado final das soldas realizadas.

No processo foi utilizado o *backing* cerâmico, que é composto por uma lâmina de alumínio adesiva e um material cerâmico com formato adequado ao tipo de junta que foi soldada.

A utilização do *backing* possibilitou um aumento sensível da produtividade da soldagem através de eliminação das operações de goivagem/esmerilhamento do

passo de raiz, reduzindo assim o consumo de consumível, bem como um aumento da velocidade de deposição do primeiro passo.



FIG. 18 - Utilização do backing cerâmico



FIG. 19 - Corpo de prova preparado para soldagem.

Com o objetivo de evitar a distorção das peças após a soldagem foram utilizados dispositivos de fixação, os quais foram fixados nos furos da mesa de soldagem do robô. Também se utilizou uma sequência de deposição dos cordões de solda, para minimizar a distorção.

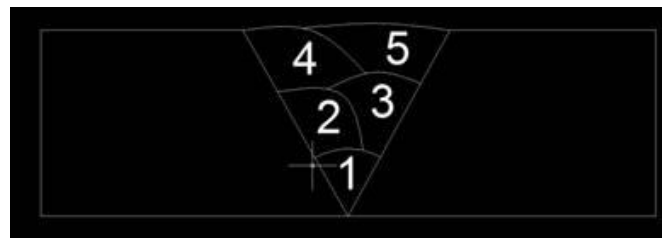


FIG. 20 - Sequência de soldagem realizada.



FIG. 22 - Peça fixada à mesa de soldagem para evitar distorção.

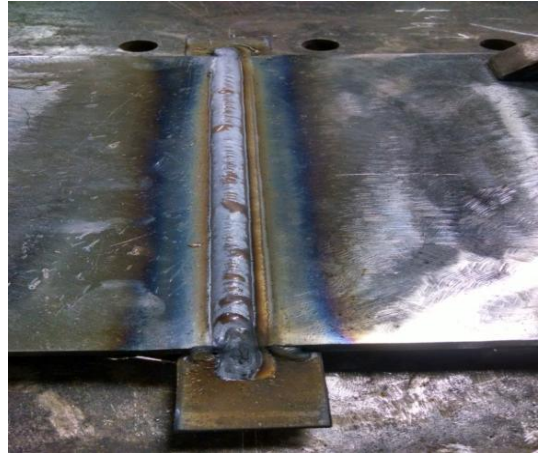


FIG. 21 - Peça após soldagem.

Foi elaborada uma Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), a qual define os parâmetros a serem aplicados na realização da operação da soldagem dos corpos de prova, conforme demonstrado abaixo.

## Especificação de Procedimento de Soldagem

Processo de Soldagem		Norma							
GMAW		AWS D1.1							
Metal Base		Técnica							
Especificação: <input type="text" value="USI SAR 50"/> P: <input type="text"/> Grupo: <input type="text"/> Ø do Tubo: <input type="text" value="NA"/> Espessura(s): <input type="text" value="12,7 mm"/>	Processo tipo: <input type="text" value="Robotizado"/>								
Metal Adição		Tipo de cordão: <input checked="" type="checkbox"/> Retilíneo <input type="checkbox"/> Trançado Oscilação Máxima: <input type="text" value="3 mm"/> Número de passes: <input type="text"/> Simples <input checked="" type="checkbox"/> Múltiplos Eletrodo/Arame: <input checked="" type="checkbox"/> Simples <input type="checkbox"/> Múltiplos Limpeza Inicial: <input type="text" value="Escova e/ou esmeril"/> Limpeza Interpasses: <input type="text" value="Escova e/ou esmeril"/>							
Especificação: <input type="text" value="AWS A 5.18"/> Classificação: <input type="text" value="AWS ER 70S-6"/> Ø do Arame ou Eletrodo: <input type="text" value="1,2 mm"/> F nº: <input type="text" value="NA"/> A nº: <input type="text" value="NA"/>	Ø do Eletrodo do Tungstênio: <input type="text" value="NA"/> Distância entre Eletrodos: <input type="text" value="NA"/> Distância Bocal / Peça: <input type="text" value="15 A 20 mm"/> Aporte de Energia: <input type="text" value="NA"/> Tipo de Transferência: <input type="text" value="NA"/> Inclinação do Arame: <input type="text" value="0° a 15°"/>								
Chapa do Teste		Observação: <input style="width: 100%; height: 30px;" type="text"/>							
Posição do Chanfro: <input type="text" value="1G"/> Progressão da Soldagem: <input type="text" value="NA"/>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50px; text-align: center;"><input checked="" type="checkbox"/></td> <td>Com mata junta</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>Com extração da raiz</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><input type="checkbox"/></td> <td>Com soldagem por um lado c/ penetração total</td> </tr> </table>			<input checked="" type="checkbox"/>	Com mata junta	<input type="checkbox"/>	Com extração da raiz	<input type="checkbox"/>	Com soldagem por um lado c/ penetração total
<input checked="" type="checkbox"/>	Com mata junta								
<input type="checkbox"/>	Com extração da raiz								
<input type="checkbox"/>	Com soldagem por um lado c/ penetração total								
Controle de Temperaturas		Tratamento Térmico							
Temperatura de Pré-Aquecimento: <input type="text" value="NA"/> Temperatura de Interpasses: <input type="text" value="NA"/>	Temperatura: <input type="text"/> Tempo de Patamar: <input type="text"/> Velocidade de Aquecimento: <input type="text"/> Velocidade de Resfriamento: <input type="text"/> Modo de Aquecimento: <input type="text"/> Método de Controle: <input type="text"/>								
Parâmetros		Gás de Proteção							
Corrente (A): <input type="text" value="160 a 212"/> Tensão (V): <input type="text" value="17 a 24"/> Velocidade (mm/s): <input type="text" value="20 a 25"/>	Tipo: <input type="text" value="Mistura"/> Vazão: <input type="text" value="22 l/min"/> Com Mistura: <input type="text" value="75% Ar + 25% CO2"/> Purga: <input type="text" value="NA"/>								
Ensaio Necessários									
Tração <input type="text"/> Dobramento Lateral <input type="text"/> Dobramento Face <input type="text"/>	Dobramento Raiz <input type="text"/> Charpy <input type="text"/> Dureza <input type="text"/>	Macrografia <input type="text"/> Raio X <input type="text"/> Outros <input type="text"/>							
Elaborado por: <input type="text" value="Débora Silva de Sousa"/>	Conferido por: <input type="text" value="Alexandre Bracarense"/>	Data: <input type="text" value="08/10/2014"/>							

FIG. 23 - Especificação do procedimento de soldagem.

Depois de finalizada a soldagem, os corpos de prova foram submetidos a tratamento térmico para alívio de tensões e tratamento por vibração.

### **3.2.3 Tratamento térmico de alívio de tensões**

Após a soldagem, um corpo de prova foi submetido ao tratamento térmico para alívio de tensões. O procedimento foi realizado em três fases distintas: aquecimento, manutenção da temperatura e resfriamento.

Para este procedimento foram definidos os seguintes parâmetros:

- Temperatura de patamar: 600 a 650° C
- Velocidade de aquecimento: 220° C/h
- Temperatura inicial: 300° C
- Tempo de patamar: 1h
- Velocidade de resfriamento: 260°C/h

Os parâmetros utilizados foram definidos baseados na norma AWS D1.1 – 2010 critérios do par. 5.8, que leva em consideração o tipo de material utilizado e sua espessura.

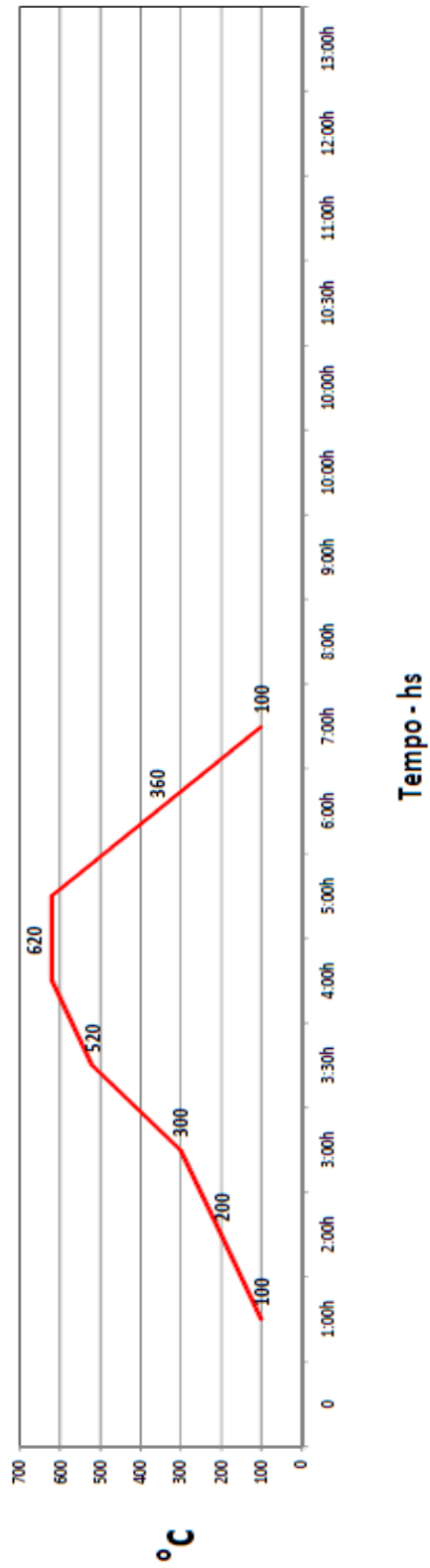
A seguir um gráfico com o ciclo do tratamento térmico realizado.

GRÁFICO DE TRATAMENTO TÉRMICO  
Heat Treatment Graphic

GRÁFICO Nº 10/2014

PEÇA: Chapa Soldada    DIMENSÃO: 250 X 150mm    MATERIAL: USI SAR 50    PROCESSO SOLDAGEM: FCAW    QUANT.: 01 Pç

CICLO DE TRATAMENTO TÉRMICO  
ALÍVIO DE TENSÃO



DOCUMENTOS RELACIONADOS  
Tratamento Conforme Norma AWS A5.8

Contagem, 17 de Novembro de 2014  
Local e Data

FIG. 24 - Gráfico de Tratamento Térmico.



### 3.2.4 Alívio de tensões por vibração

Dois corpos de prova soldados foram submetidos ao tratamento por vibração ressonante, realizado na empresa CNH Industrial, com o equipamento *Fórmula 62*, da ENERGYARC®.

Os dois corpos de prova foram submetidos à frequências de 21,8 Hz, que oscilavam em baixa e alta amplitude por dois períodos de tempo diferentes, 7 e 15 minutos respectivamente. Eles foram apoiados em um suporte de borracha, isolados do chão ou de estruturas rígidas, deixando-os livres para vibrar.

O vibrador foi ligado diretamente aos corpos de prova, a fim de transferir toda a energia vibratória gerada, como pode ser visto nas figuras 25 e 26.



FIG. 25 - Vibrador acoplado ao corpo de prova.



FIG. 26 – Equipamento típico para alívio de tensões por vibração.

O equipamento utilizado no processo é constituído por um vibrador de velocidade variável que está ligado à peça e um painel de controle eletrônico. Os vibradores usados neste método são ligados à estrutura e possuem uma faixa de frequência entre 0 a 100 Hz. O equipamento também é composto por um acelerômetro que detecta as vibrações e transmite um sinal para o painel de controle.

Um ponto de ressonância é determinado e exibido em um mostrador. Alguns equipamentos possuem um gravador que pode gerar um gráfico. As tensões residuais são reduzidas a níveis baixos promovendo o equilíbrio estático.

Depois de realizado o tratamento térmico e o tratamento por vibração ressonante nos corpos de prova, os mesmos foram submetidos à análise da tensão residual através do método de difração de raios-x.

### **3.2.5 Difração de raios-x**

O método empregado para avaliação das tensões residuais foi por Difração de Raios-X através de um difratômetro portátil – *Portable Stress Analyser* STRESSRAD® (RADICON Ltd. Scientific Instruments), FIG. 29, que utiliza o software – Stress. Foi realizada a medição das tensões residuais nos quatro corpos de prova resultantes do processo de soldagem empregados neste trabalho. Sendo que destes dois corpos de prova foram submetidos ao tratamento por vibração, um corpo de prova foi tratado termicamente e o outro foi avaliado apenas como soldado.





FIG. 27 - Difratorômetro Portátil utilizado para análises das tensões residuais.

O método executado foi  $\text{sen}^2$  (psi), no qual se faz necessário a realização de medições *step-by-step* da intensidade irradiada em função do ângulo ( $2\theta$ ) característico. O *National Physical Laboratory* - UK recomenda que para trabalhar com este método deve-se realizar no mínimo dez aferições da intensidade irradiada para cada ângulo (psi) variando de 5 em 5 graus.

Com os testes prévios realizados nas chapas foi definido o tempo padrão de exposição para cada ângulo como sendo 1 minuto. Foram realizadas aferições em 3 linhas ao longo da chapa (início, meio e fim do cordão) e cada linha teve 30 pontos aferidos. Portanto, foi aferido um total de 90 pontos por chapa.

Por tratar-se de tensões residuais em soldas temos tensões longitudinais e transversais, logo são 180 pontos aferidos por chapa. Como são quatro corpos de prova submetidos à difração de raios-x, foi realizado um total de 720 medições, com o equipamento funcionando ao total em um tempo de aproximadamente 7200 minutos, ou seja, 120 horas.

Os corpos de prova 1 e 2 foram soldados e tratados por vibração. O corpo de prova 3 foi analisado apenas como soldado e o corpo de prova 4 foi analisado após soldado e tratado termicamente.

A textura cristalográfica e o tamanho de grão são parâmetros que podem prejudicar a medição de tensão residual por difração de raios x.

### 3.2.6 Ruído Magnético Barkhausen

O teste pelo ruído magnético Barkhausen (RMB) foi realizado no laboratório de Ensaios Não Destrutivos do CDTN, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Para a excitação do material, detecção e processamento do RMB foi utilizado o equipamento MicroScan 600 – Stresstech e uma sonda com excitação em duas direções ortogonais. O conjunto pode ser observado na FIG. 30.

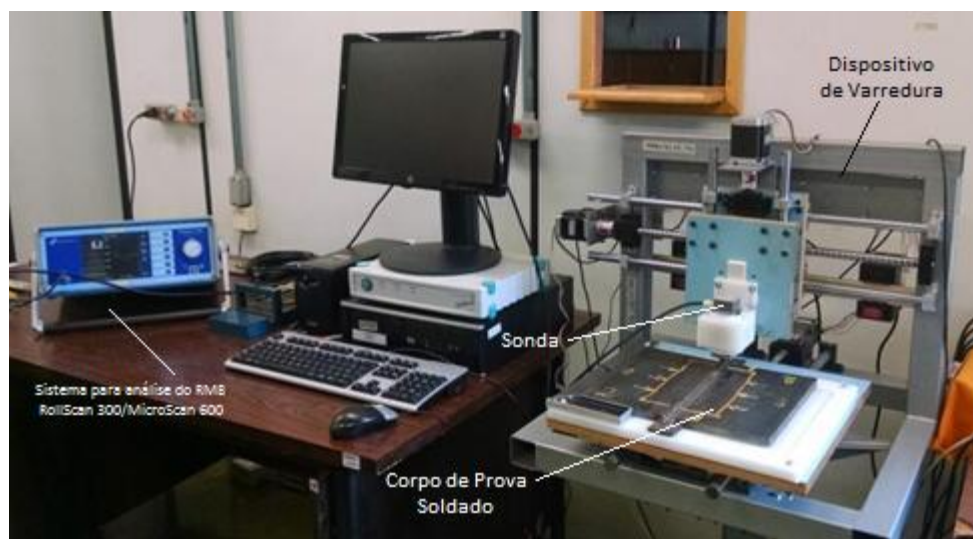


FIG. 28 – Equipamento utilizado para realização do teste por Ruído Magnético Barkhausen.

Fonte: Laboratório CDTN

O sistema possibilita o controle da tensão de excitação da sonda e da amplitude do campo magnético de excitação, cuja frequência pode variar de 6 a 1000 Hz.

O ruído magnético Barkhausen detectado pode ser analisado na faixa de frequências entre 3kHz e 1000kHz. Para análise, o sistema de ensaio utiliza como

referência os blocos retificados dos sinais gerados nos ciclos positivo e negativo de magnetização. Os sinais retificados são suavizados sendo obtidas curvas envelope que representam distribuições suavizadas dos mesmos.

Os ensaios foram realizados utilizando-se uma sonda biaxial, sendo a frequência de excitação 100 Hz, o filtro para a análise do ruído de 70 kHz a 200 kHz, a tensão de excitação de 1,8 V.

As coletas foram realizadas em três linhas perpendiculares ao cordão de solda, identificadas como linhas a, s e d, respectivamente e em uma linha paralela ao cordão de solda, identificada como linha r. Os dados foram adquiridos em intervalos de 5 mm.

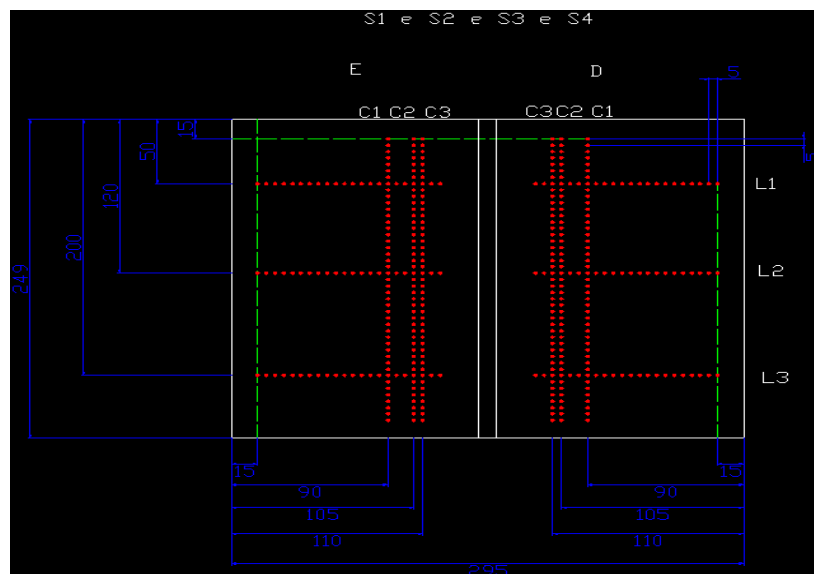


FIG. 29 – Esquemática do teste por Ruído Magnético Barkhausen

Parâmetros utilizados na medição:

- Linha: 22 medidas – Chave do sensor Longitudinal
- Coluna: 45 medidas – Chave do sensor Transversal
- Frequência de magnetização: 100 Hz
- Voltagem de magnetização: 1,8 Vpp
- Faixa do filtro da análise: 8-200 KHz

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a obtenção dos valores das tensões residuais, longitudinais e transversais, foi possível a construção de gráficos com os perfis da intensidade destas tensões pela disposição dos pontos analisados ao longo da junta soldada. As tensões residuais foram analisadas no início, meio e fim do cordão de solda, conforme esquema abaixo:

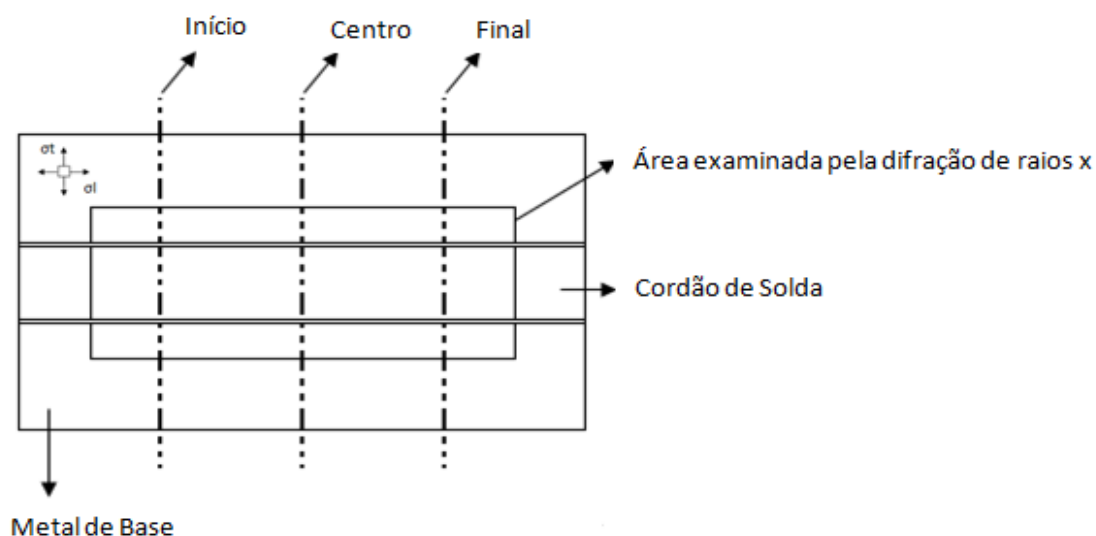


FIG. 30 – Esquemática do teste por Difração de Raios X.

Os GRAF. 01, 02 e 03 ilustram os perfis de tensões residuais longitudinais no início, centro e fim do cordão de solda. Os dados apresentados estão conforme legenda abaixo:

Legenda:	
— $\sigma t 1$	Tratamento por vibração 7min
— $\sigma t 2$	Tratamento por vibração 15min
— $\sigma t 3$	Como soldado
— $\sigma t 4$	Tratamento térmico (TTAT)

Verifica-se que as tensões residuais foram compressivas no metal de base e no metal de solda e trativas na zona termicamente afetada.

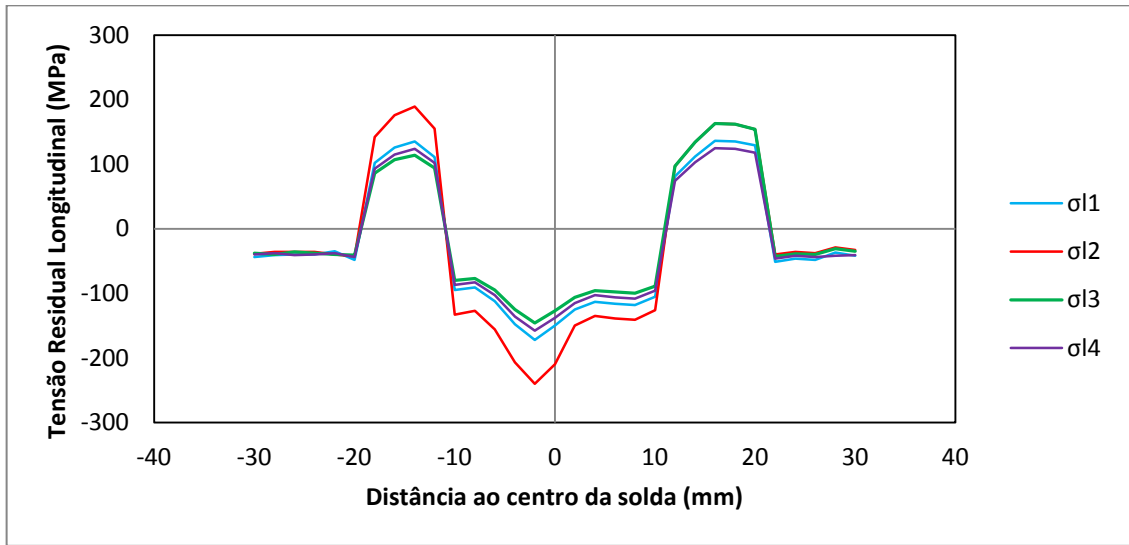


GRÁFICO 1 - Perfil de Tensão Longitudinal - Posição Início

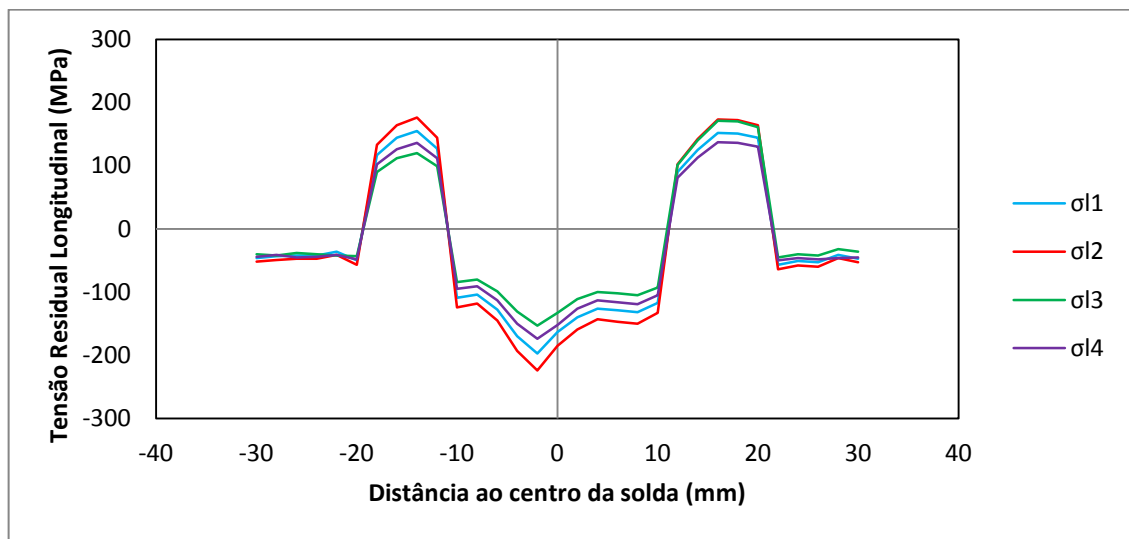


GRÁFICO 2 - Perfil de Tensão longitudinal - Posição Centro

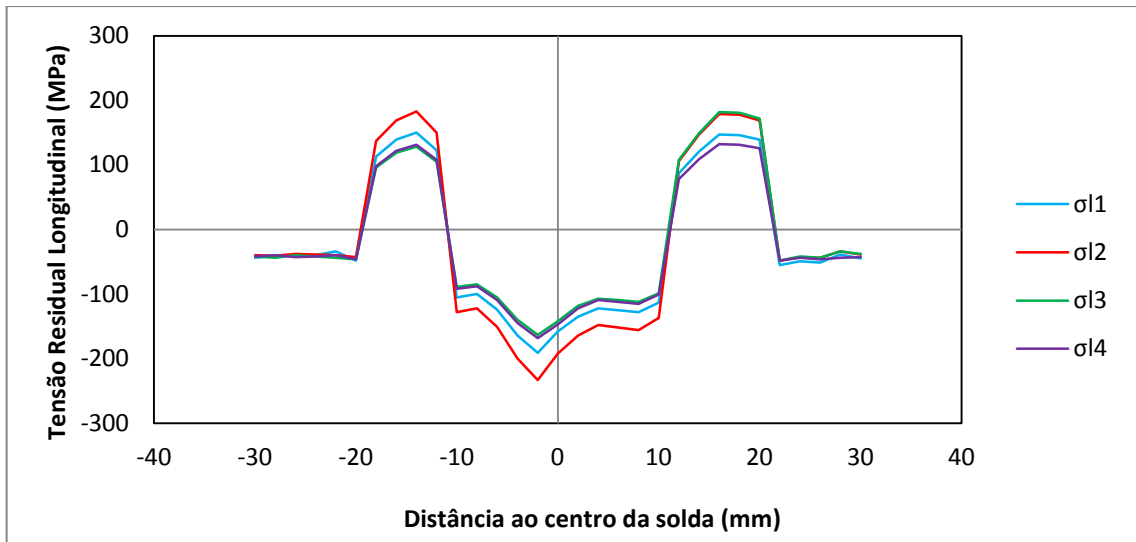


GRÁFICO 3 - Perfil de Tensão Longitudinal - Posição Final

Os GRAF. 04, 05 e 06 ilustram os perfis de tensões residuais transversais no início, centro e fim do cordão de solda.

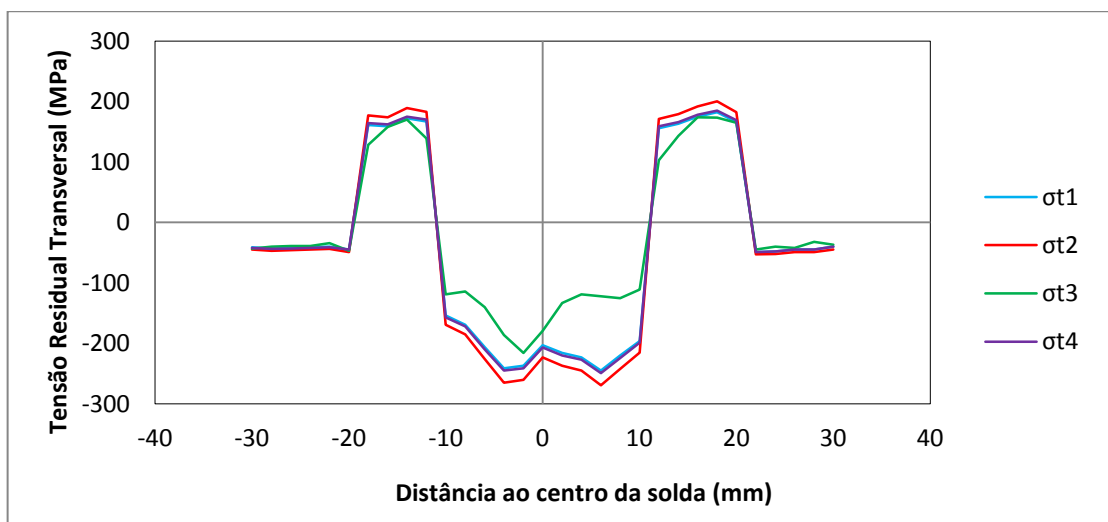


GRÁFICO 4 - Perfil de Tensão Transversal - Posição Início

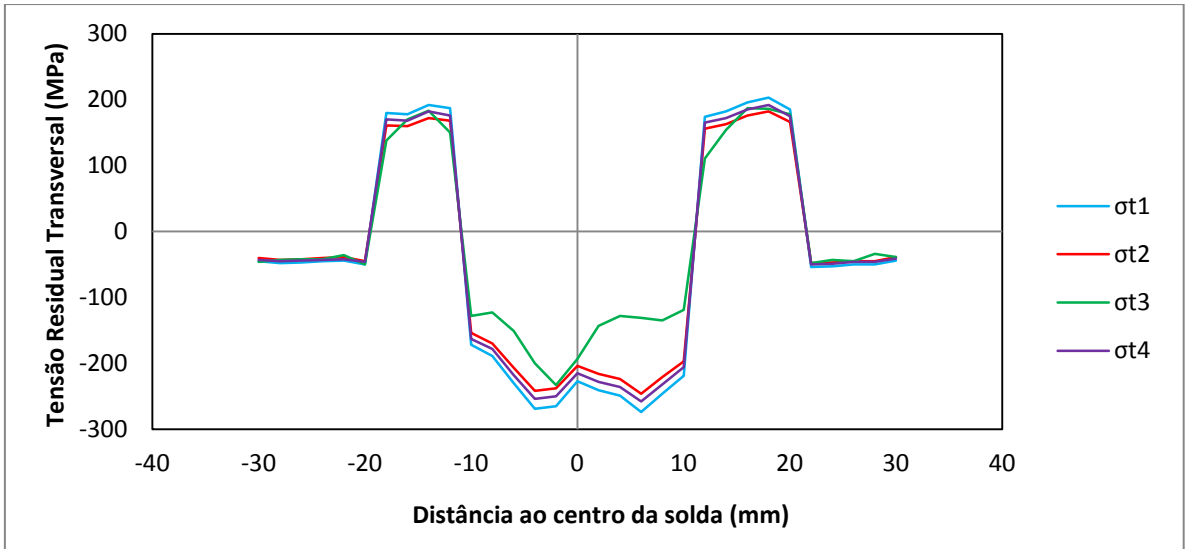


GRÁFICO 5 - Perfil de Tensão Transversal – Posição Centro

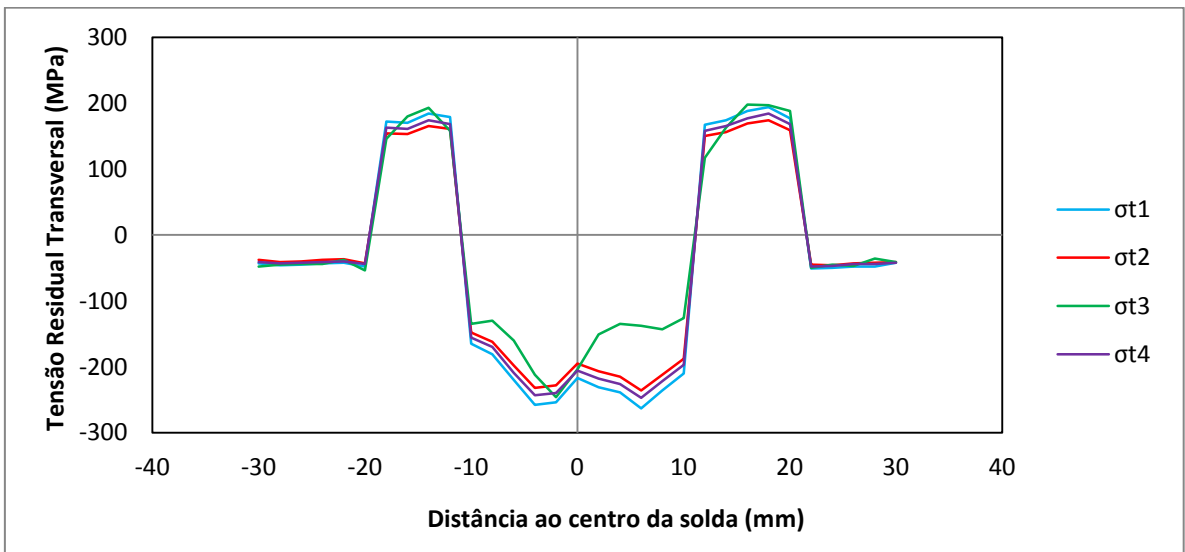


GRÁFICO 6 - Perfil de Tensão Transversal - Posição Final

As análises realizadas através da difração de raios x nos corpos de prova soldados apresentaram tensões residuais compressivas ao longo do cordão de solda, e tensões residuais trativas na zona termicamente ativada.

Após as medições pelo método de difração de raios x, foi realizado o teste pelo Ruído Magnético Barkhausen.

As medições realizadas pelo teste Barkhausen foram inicialmente realizadas em colunas paralelas aos cordões de solda 01, 02, 03 e 04. Em seguida, as medições foram realizadas em três linhas transversais aos cordões de soldas, identificados como L1, L2 e L3. Esse processo foi realizado nos quatro corpos de prova, conforme abaixo:

- A solda 01 representa o corpo de prova que foi submetido ao tratamento por vibração em um período de 7 min.
- A solda 02 representa o corpo de prova que foi submetido ao tratamento por vibração em período de 15 min.
- A solda 03 representa o corpo de prova como soldado.
- A solda 04 representa o corpo de prova que foi submetido ao tratamento térmico de alívio de tensões

Os gráficos a seguir ilustram os perfis de ruídos magnéticos Barkhausen, avaliados nas regiões paralelas aos cordões de solda.



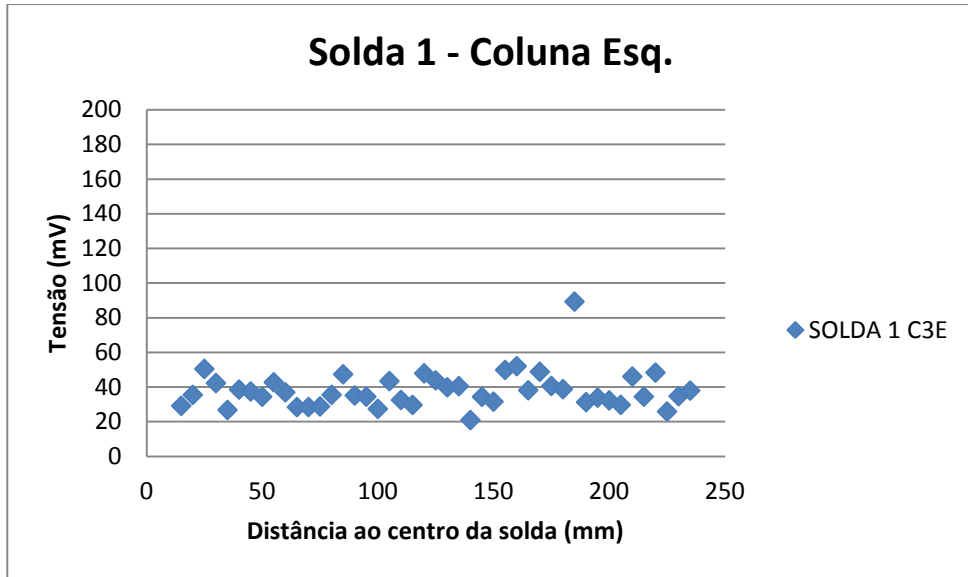


GRÁFICO 7 – Perfil de ruído magnético na solda 01, coluna 01 lado esquerdo.

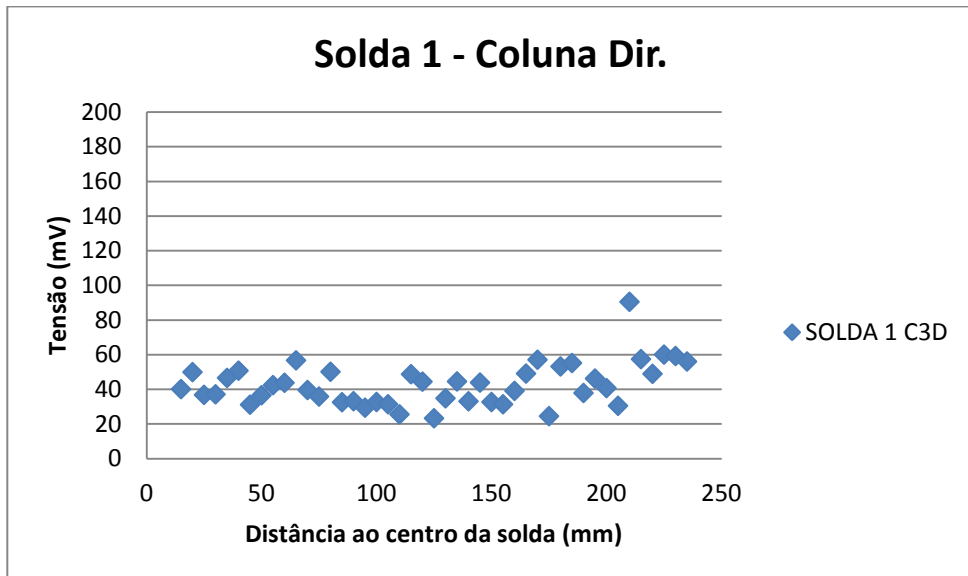


GRÁFICO 8 - Perfil de ruído magnético na solda 01, coluna 01 lado direito.

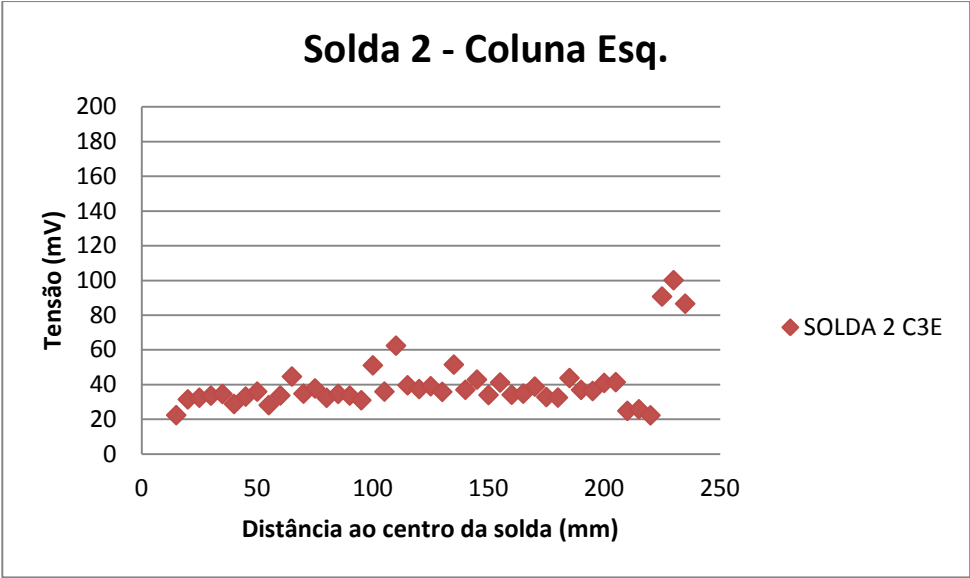


GRÁFICO 9 - Perfil de ruído magnético na solda 02, coluna 01 lado esquerdo.

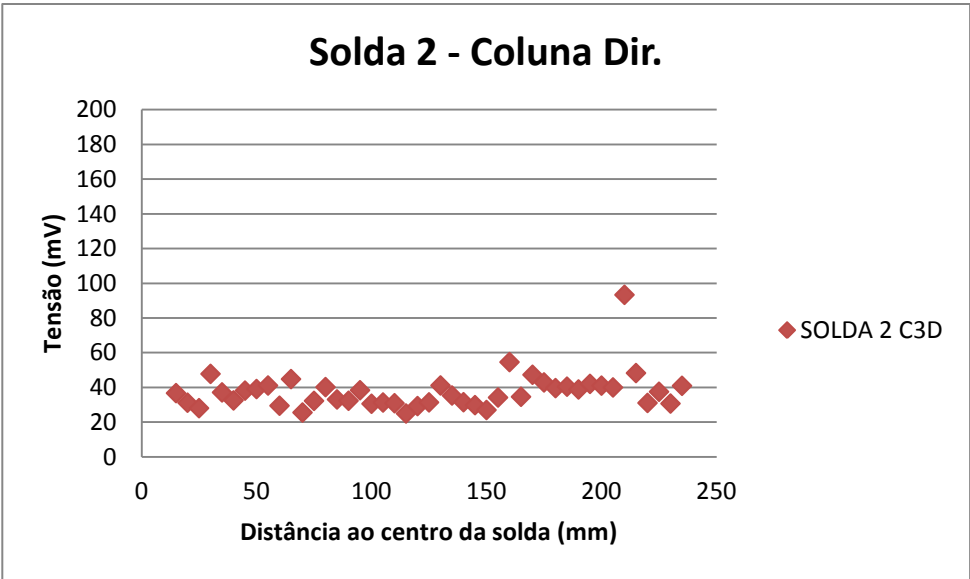


GRÁFICO 10 - Perfil de ruído magnético na solda 02, coluna 01 lado direito.

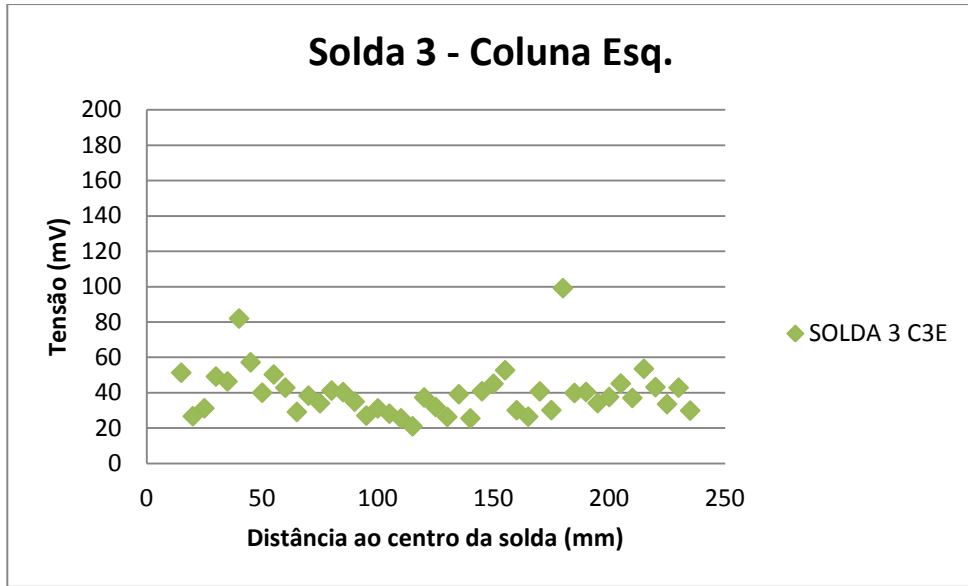


GRÁFICO 11 - Perfil de ruído magnético na solda 03, coluna 01 lado esquerdo.

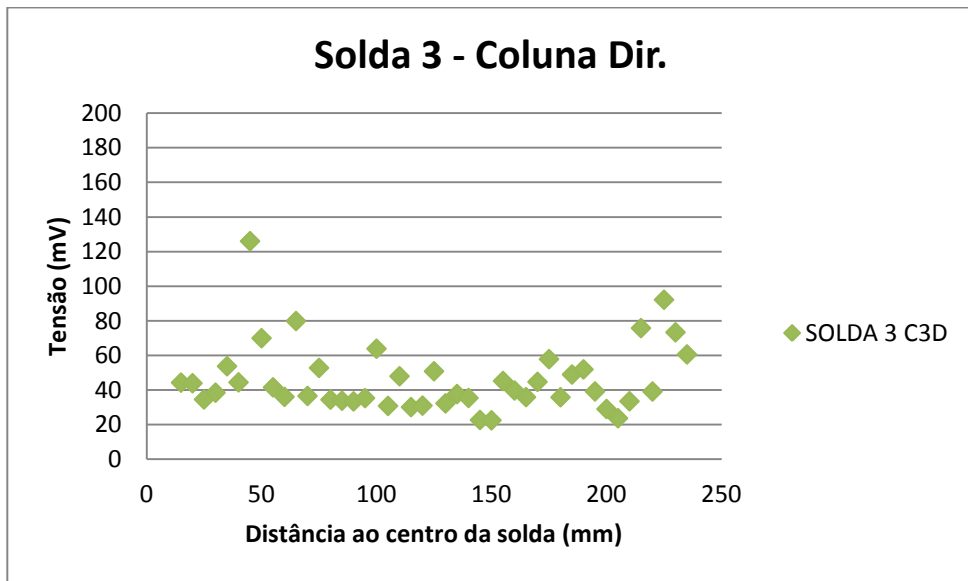


GRÁFICO 12 - Perfil de ruído magnético na solda 03, coluna 01 lado direito.

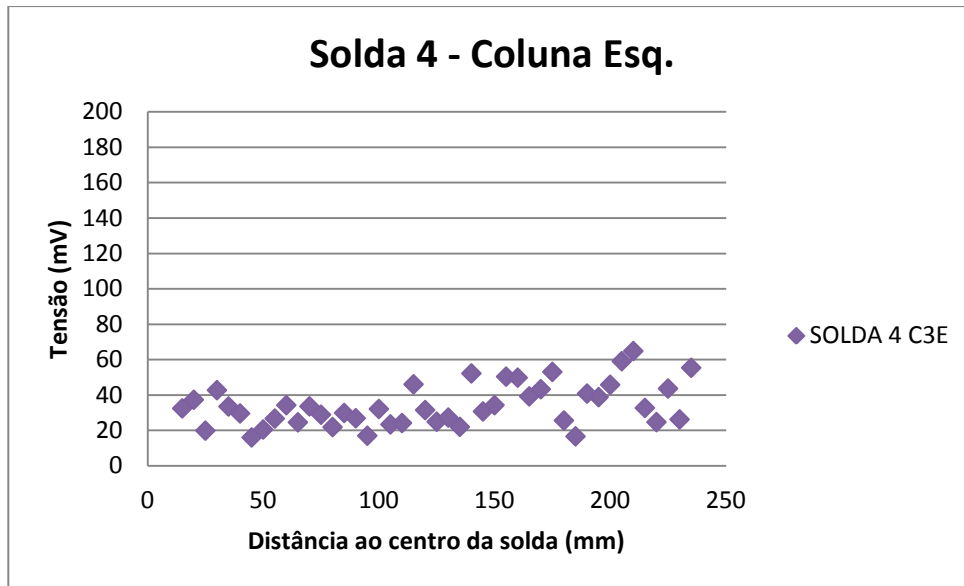


GRÁFICO 13 - Perfil de ruído magnético na solda 04, coluna 01 lado esquerdo.

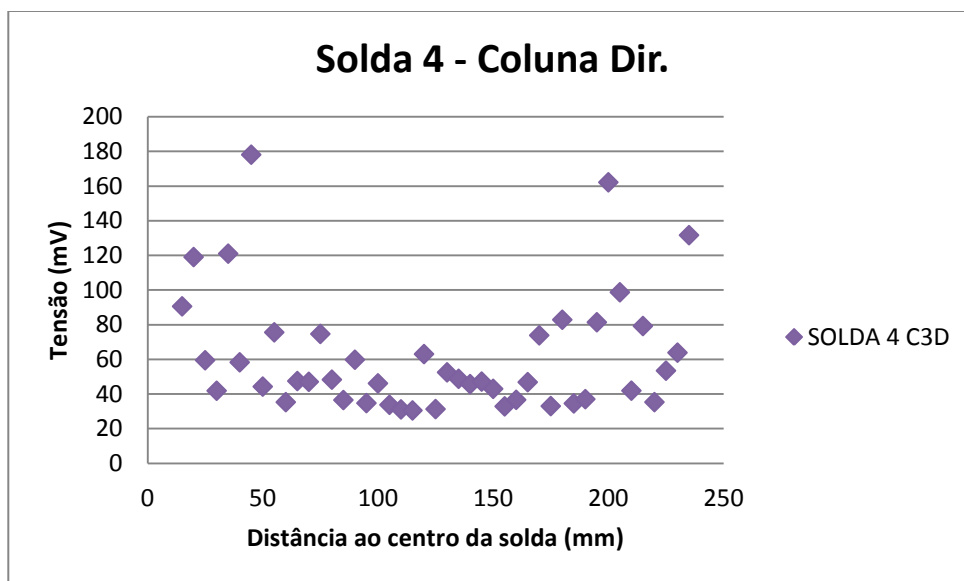


GRÁFICO 14 – Perfil de ruído magnético na solda 04, coluna 01 lado direito.

Os gráficos a seguir ilustram os perfis de ruídos magnéticos Barkhausen, avaliados em três linhas transversais aos cordões de solda (linhas 01, 02 e 03).

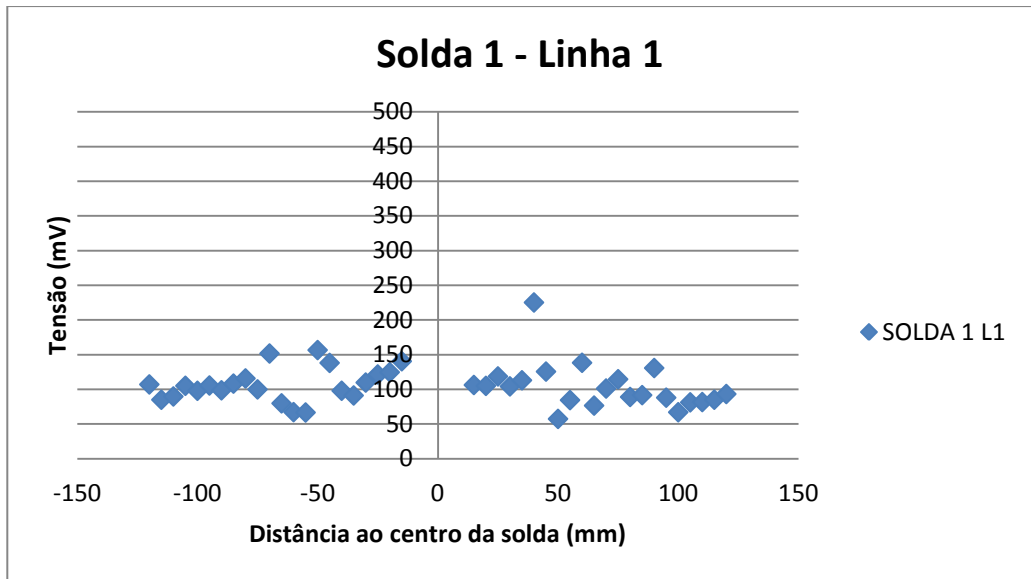


GRÁFICO 15 – Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 01.

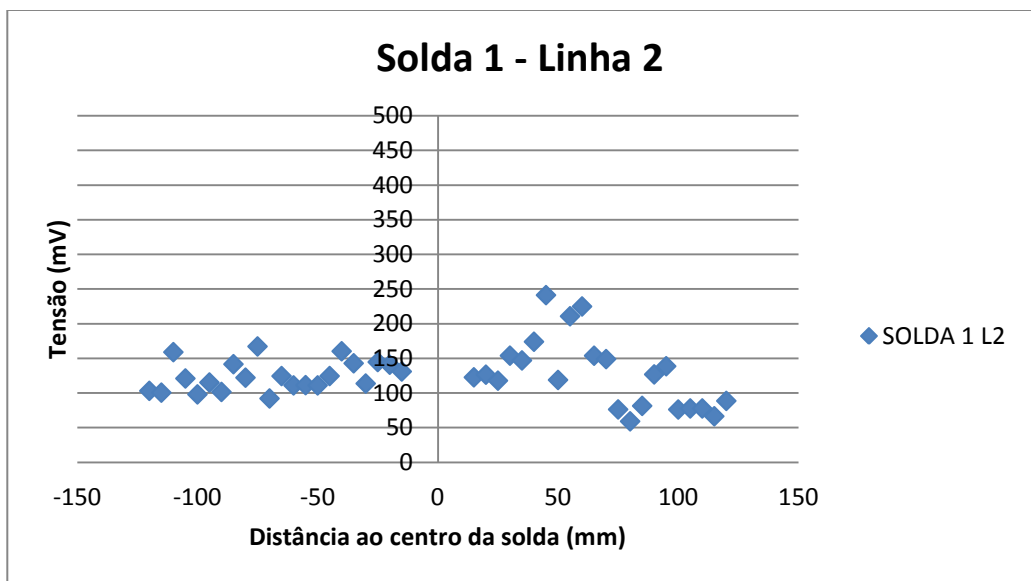


GRÁFICO 16 - Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 02.

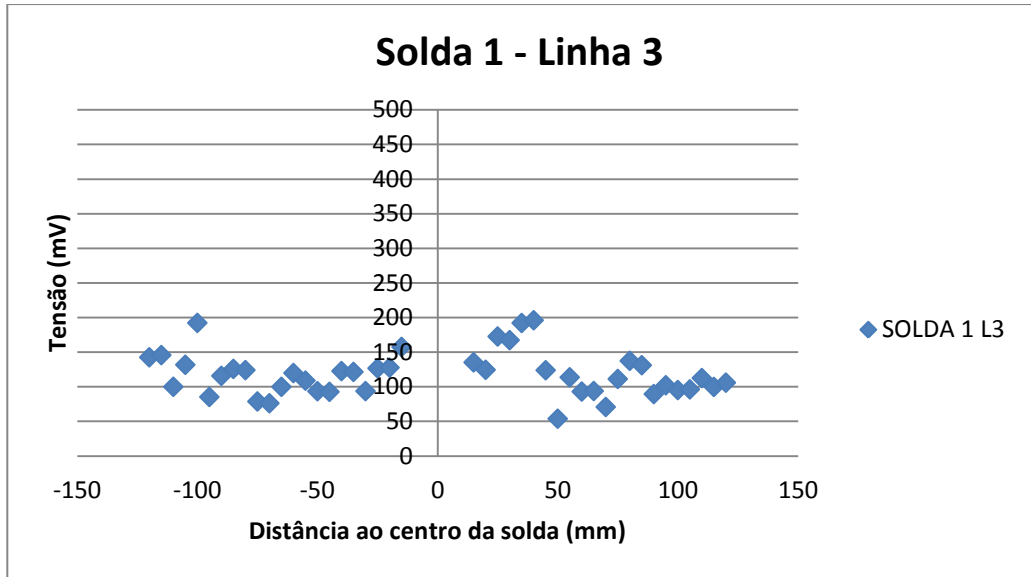


GRÁFICO 17 - Perfil de ruído magnético na solda 01, linha 03.

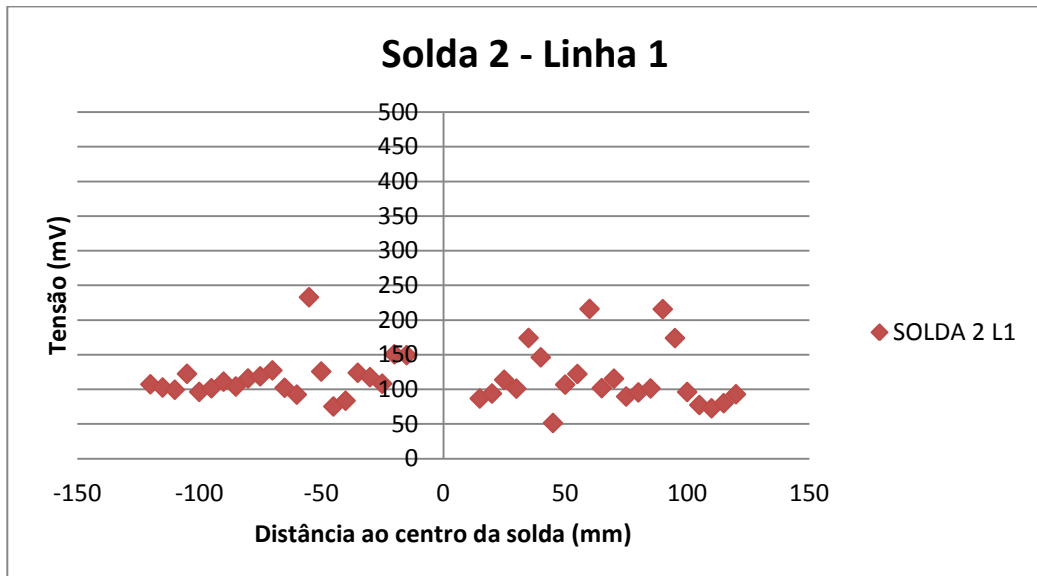


GRÁFICO 18 – Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 01.

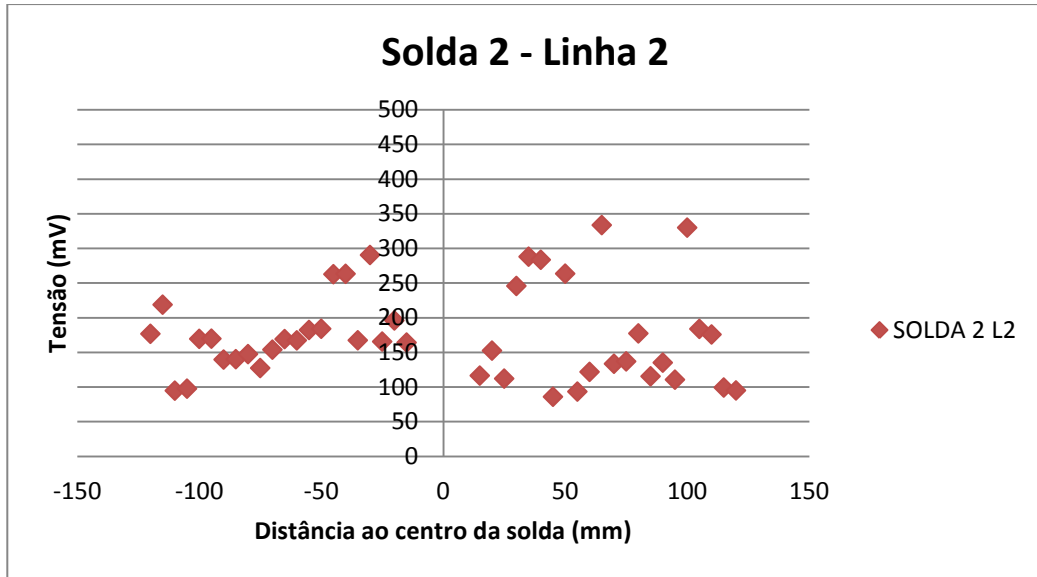


GRÁFICO 19 - Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 02.

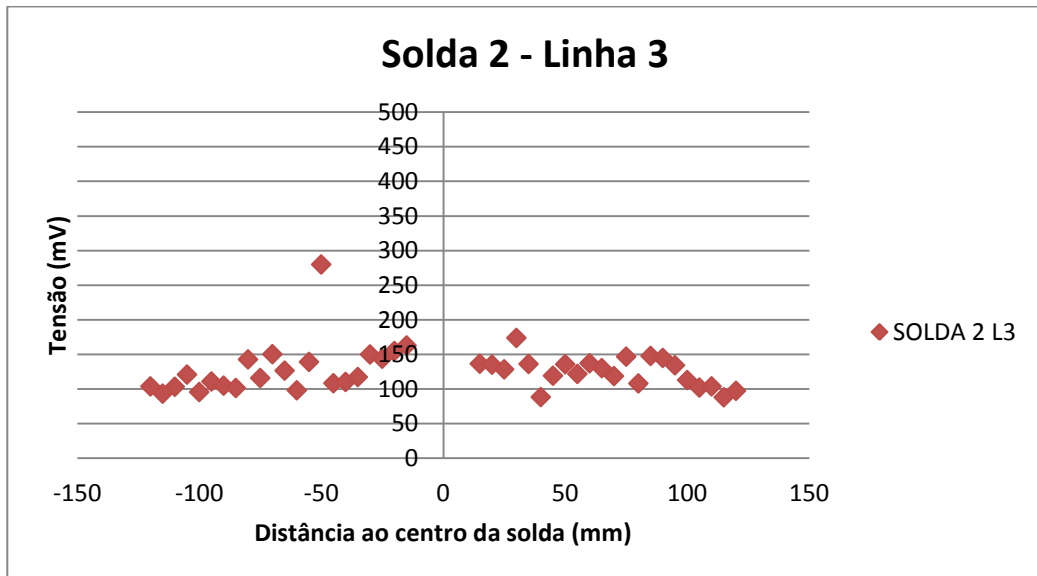


GRÁFICO 20 - Perfil de ruído magnético na solda 02, linha 03.

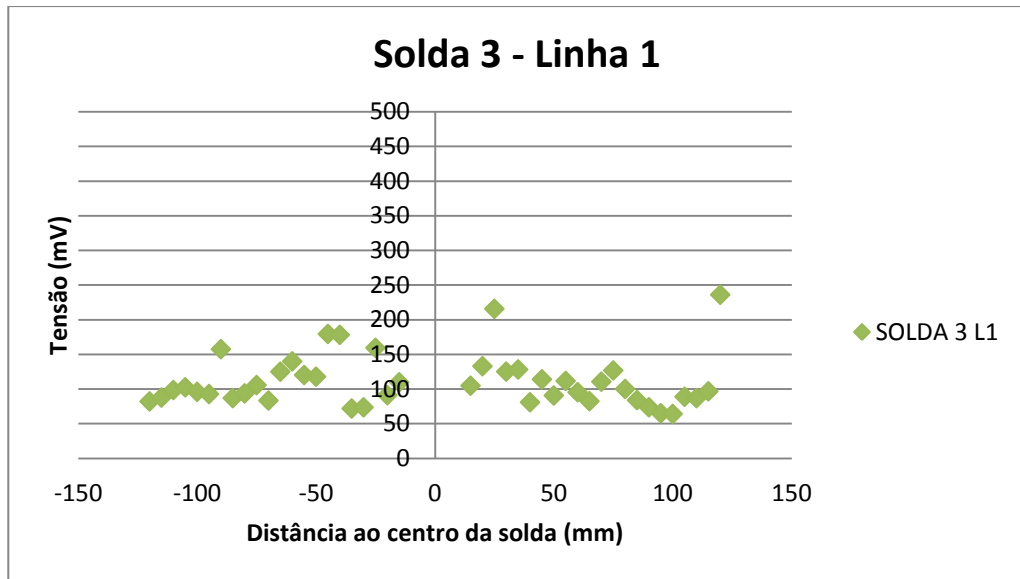


GRÁFICO 21 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 01.

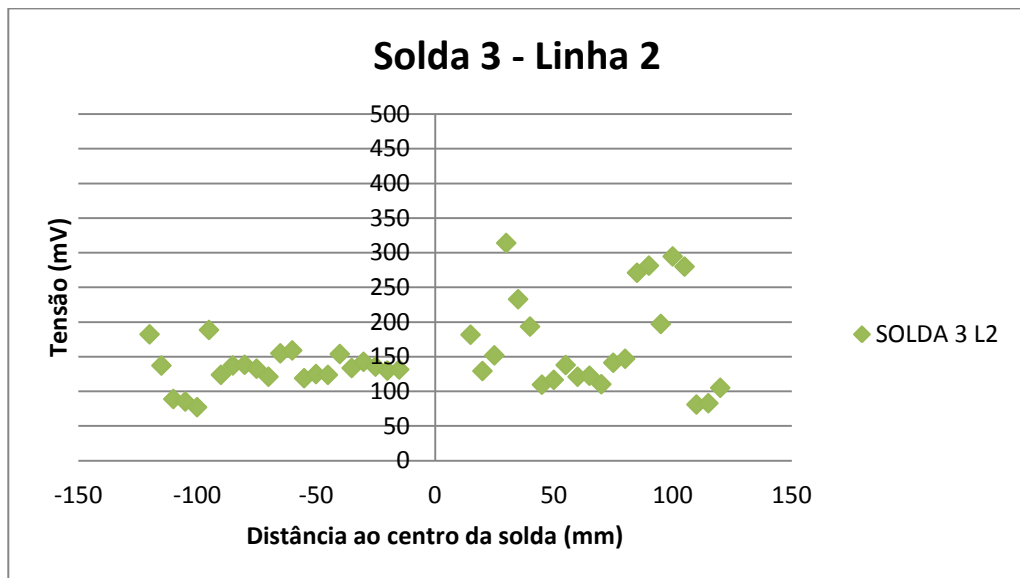


GRÁFICO 22 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 02.



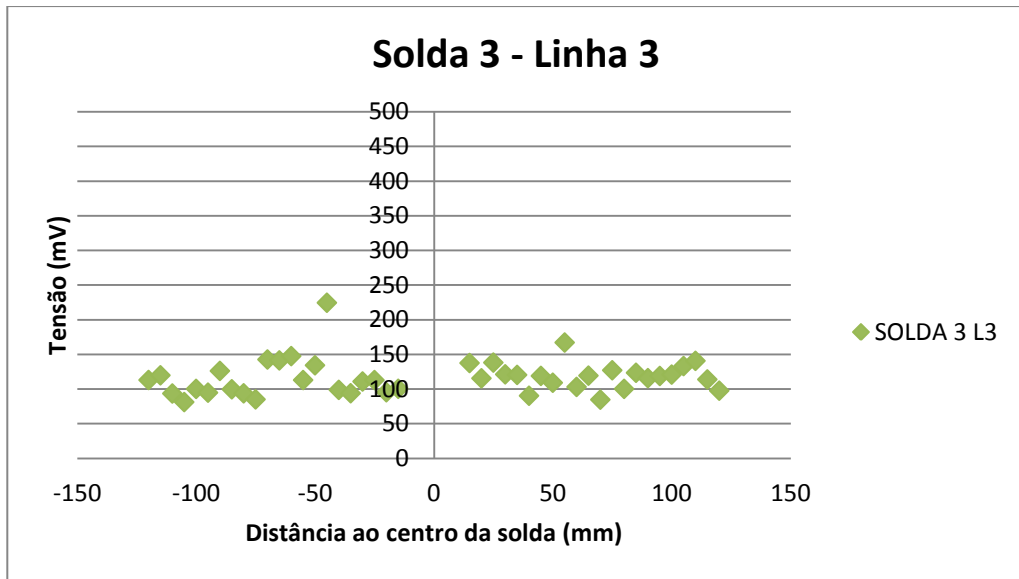


GRÁFICO 23 - Perfil de ruído magnético na solda 03, linha 03.

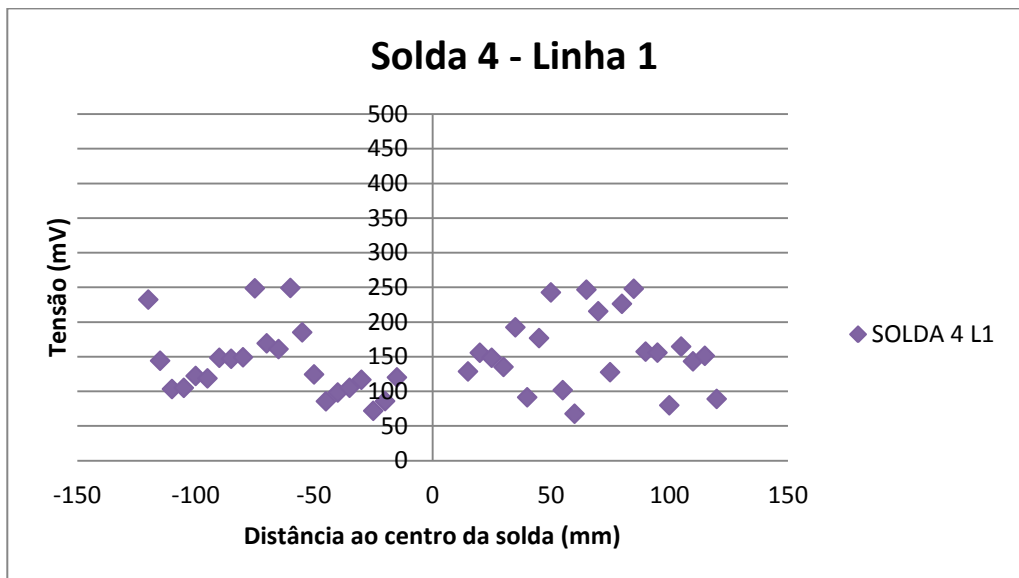


GRÁFICO 24 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 01.

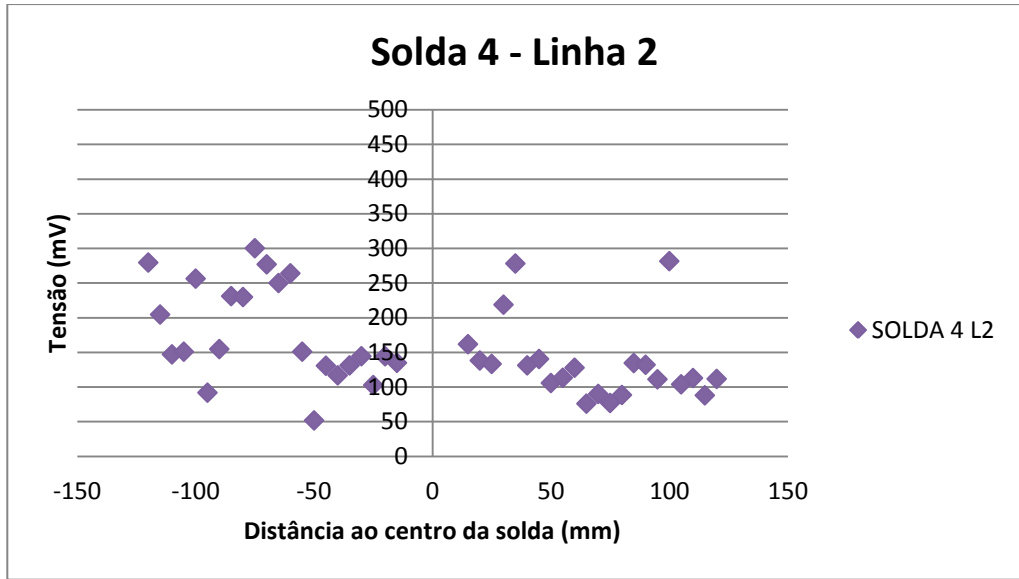
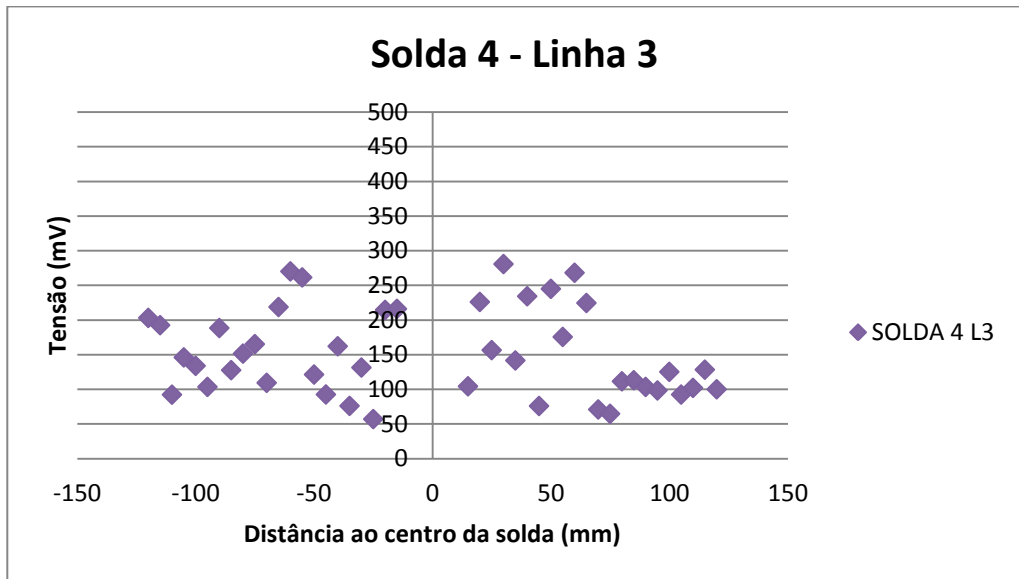


GRÁFICO 25 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 02.



GRAF. 26 - Perfil de ruído magnético na solda 04, linha 03.

Levando em consideração que os pesquisadores MARTINS et. al. (2005) afirmaram que deformação plástica tende a gerar tensões compressivas, podemos relacionar a tensão residual apresentada ao tipo de carregamento que o material foi submetido, no caso deste estudo a laminação a quente, onde a chapa utilizada passou por deformação compressiva.

Após identificar que os corpos de prova apresentam tensões residuais compressivas no cordão de solda, é importante entender como essas tensões agem no material. Dependendo do carregamento externo que será aplicado, trativo ou compressivo, as tensões residuais apresentadas podem ser benéficas ou maléficas, como pode ser visto na revisão bibliográfica deste trabalho.

Em relação à fadiga, a tensão residual pode aumentar ou diminuir sobre o ciclo de fadiga. Tensões trativas podem engatilhar a fratura durante a fadiga. Superfícies livres de tensões são geralmente sítios preferenciais para iniciação de trinca de fadiga. Isso significa que é uma vantagem ter tensão residual compressiva na região perto da superfície (WITHERS e BHADESHIA, 2000).

Em relação à evolução de trincas, a tensão residual compressiva é um item importante para inibir seu crescimento, pois a tensão age contra a propagação da trinca não a deixando propagar. Dentre as diversas alterações metalúrgicas sofridas pelos materiais quando submetidos a um ciclo térmico de soldagem, destaca-se o surgimento de tensões residuais trativas, as quais são geralmente indesejáveis, uma vez que podem acarretar em diversos problemas tais como trincas, fratura por fadiga e corrosão sob tensão (SILVA, 2007).

## 5 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento da tensão residual em quatro corpos de prova soldados, submetidos a diferentes processamentos. Para isso foi implantada a metodologia de medição de tensão residual por difração de raios x e o teste por Ruído Magnético Barkhausen. Após a soldagem, realizou-se o tratamento por vibração em dois corpos de prova, o tratamento térmico para alívio de tensões em um corpo de prova e outro corpo de prova foi avaliado após a soldagem.

Dos experimentos realizados, pode-se concluir:

- I. Houve divergência entre os resultados de tensão residual obtidos nos corpos de prova submetidos a tratamentos para alívio de tensão e o efeito esperado. Pelas referências bibliográficas, esperava-se que o tratamento térmico e o tratamento por vibração para alívio de tensões gerassem uma redução significativa no valor da tensão residual. No entanto, foi observado um aumento no valor da tensão residual superficial, em comparação ao corpo de prova avaliado após a soldagem.
  
- II. O aumento da tensão residual compressiva superficial causada pelo tratamento por vibração e pelo tratamento térmico pode ser benéfico para os materiais metálicos, dependendo do tipo de carregamento a que a peça e/ou estrutura será submetida. Dentre as vantagens da presença de tensão residual compressiva na superfície do material, se destacam: inibição do crescimento de trinca seja ela por fadiga ou térmica, resistência à fratura e corrosão sob tensão.

- III. Outro fenômeno observado é a presença de tensões superficiais de compressão no cordão de solda e tensões superficiais de tração na ZTA, contrariando o que foi apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho. Este comportamento pode ser explicado pelo fato da componente do super-resfriamento superficial ser inferior a componente de transformação de fase. As transformações microestruturais de mudanças de fases que ocorrem durante o ciclo térmico da soldagem geram dilatação do volume do material, induzindo tensões residuais superficiais compressivas na região da solda e, trativas na região termicamente afetada.
- IV. O teste pelo Ruído Magnético Barkhausen não apresentou resultados relevantes, devido à falta de um padrão para ser utilizado como referência. O teste do RMB deveria ter sido utilizado como técnica comparativa envolvendo diferentes estados do material com padrões de referência do material estudado.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que a análise da tensão residual realizada neste trabalho aferiu uma profundidade de 30 micrômetros, obtivemos apenas uma referência de tensão residual superficial. Realizar uma análise mais profunda da tensão residual seria importante, pois o equilíbrio estático é alcançado plano cristalino a plano cristalino no material e como a técnica utilizada por difração de raios-x refere-se apenas a tensões residuais superficiais, a tensão média aferida na região da solda e no metal de base foi de natureza compressiva, o que não impede que este valor varie até a linha elástica do material (que pela teoria de resistência dos materiais encontra-se no ponto médio da espessura da chapa).

Outro ponto importante é avaliar a microestrutura dos corpos de prova envolvidos neste trabalho e identificar quais transformações de fase ocorreram durante o processo de solidificação da solda, causando expansão do volume do material e resultando em tensões residuais de natureza compressiva. Desta forma será possível entender a influência significativa das transformações de fase na magnitude das tensões residuais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY, AWS D1.1/ A 5.8, *Stress-Relief Heat Treatment*, Miami, USA, 2010. 196 p.

BRAGA, E. A vibração como elemento de alívio de tensões residuais em cordões de solda. (Palestra, *Workshop*). Grupo de Caracterização de Materiais - GCAM, ITEC - UFPA, Belém, PA. 2011.

CALLISTER, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais. Rio de Janeiro. Livros Téc. e Cient. Ed. S.A. 2006.

CARLECH, L.P. Medição de tensões residuais em junta soldada com materiais dissimilares por meio do ruído magnético Barkhausen. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, UFMG 2010.

CARMO, D.C. Análise de tensões por ultra-som em barra de aço sob flexão. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal d Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CHIAVERINI, V.; Aços e Ferros Fundidos, Editora ABM, 6º Edição, São Paulo, 1988.

CULLITY, B. D.; Elements of X-Ray Diffraction, 2 Edição. Addison-Wesley Publishing Company, 1978.

EVANS MATERIALS RELIABILITY PROGRAM: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs. Electric Power Research Institute, Palom Alto, CA, 2008.

FUNDAÇÃO BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, FBTS. (Apostila) Inspetor de Soldagem. Departamento de Inspeção de Soldagem, Rio de Janeiro, 2009.

GUROVA, T.; QUARANTA, F.; STEFEN, S. CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE - SOBENA, 21, 2006. Monitoramento do estado das tensões residuais durante fabricação de navios, Rio de Janeiro.

JUNQUEIRA, M. S. Análise de Tensões Residuais de Soldagem utilizando o Método de Eigenstrain. Monografia. Faculdade de Tecnologia. Brasília, 2013.

MARQUES, P.; MODENESI P.; BRACARENSE, A. Soldagem: fundamentos e tecnologia, Belo Horizonte, editora UFMG, 2013.

MARQUEZE, C. M. Análise por ultrassom da textura dos materiais e tensões residuais em juntas soldadas. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MARTINS, C. O. D. et. al.; Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100, Matéria, Vol 9, N° 1, p. 23-31, 2004

MODENESI, PAULO J. Efeitos mecânicos do Ciclo Térmico. Universidade Federal De Minas Gerais. Minas Gerais, 2008.

PUC-Rio – Certificação Digital Nº 0510813/CA. Capítulo 2 - Tensões residuais, p. 31. 2006.

RIBEIRO. R. S., JOÃO CARLOS. Análise de Tensões Residuais e Deformações em Soldadura. Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2010.

SILVA, C. C. Avaliação das Tensões Residuais de Soldagem em Tubulações de Pequeno Diâmetro Usadas em Refinaria de Petróleo. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Janeiro 2007.

SOARES, M. C. B. V. Influência das tensões residuais no comportamento em fadiga e fratura de ligas metálicas. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de



Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SOBRE o Fórmula 62. Disponível em: <<http://formula62.com>> Acesso em nov. 2014.

TSCHIPTSCHIN, A. P. Tratamento térmico dos aços. EPUSP, Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

WITHERS, P. J., e BHADESHIA, H. K. D. H.; Residual Stress, Measurement techniques – Part 1, Materials Science and Technology, Vol. 17, 2001.