

WILLIAN RINCO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA APLICADA EM UMA
JUNTA EM ÂNGULO SOLDADA PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO.**

Guaratinguetá, SP

2018

WILLIAN RINCO PEREIRA

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DA VIBRAÇÃO MECÂNICA APLICADA EM UMA
JUNTA EM ÂNGULO SOLDADA PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO.**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho

Guaratinguetá, SP

2018

P436a	Pereira, Willian Rinco Avaliação do efeito da vibração mecânica aplicada em uma junta em ângulo soldada pelo processo arco submerso / Willian Rinco Pereira. – Guaratinguetá, 2018. 112 f : il. Bibliografia: f. 103-112 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho 1. Tensões residuais. 2. Vibração. 3. Deformações (Mecânica) I. Título. CDU 620.172 (043)
-------	--

Pâmella Benevides Gonçalves
Bibliotecária/CRB-8/9203

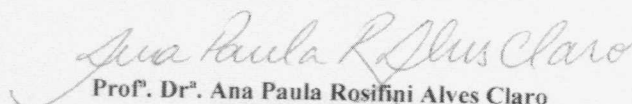
WILLIAN RINCO PEREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE

“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

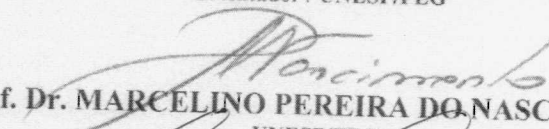
PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof.ª. Dr.ª. Ana Paula Rosifini Alves Claro
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Orientador / UNESP/FEG


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
UNESP/FEG


Prof. Dr. GILBERTO DE MAGALHÃES BENTO GONÇALVES
UNESP/FEB

Agosto de 2018

DADOS CURRICULARES

WILLIAN RINCO PEREIRA

NASCIMENTO: 21.12.1977 – RIO CLARO / SP

FILIAÇÃO: Nilcélio Roberto Pereira
Maria Izilda Rinco Pereira

1996/2001 Curso de Graduação em Engenharia Mecânica
Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI / MG

2002/2004 Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Engenharia de Itajubá – UNIFEI / MG

2015/2017 Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Soldagem
Universidade de Taubaté – UNITAU

2016/2018 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de
mestrado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

2018/2018 IWE – International Welding Engineer
International Institute of Welding – IIW
ABS – Associação Brasileira de Soldagem

Dedico este trabalho
À minha família, de modo especial à
minha mãe, que mesmo não presente
fisicamente, nunca se afastou de mim.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho, pela ajuda, paciência e atenção na condução das atividades deste trabalho, bem como a todos do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT) que me auxiliaram nos ensaios realizados desta dissertação. Em especial aos técnicos do laboratório por todo suporte.

ao Prof. Dr. Luiz Rogério de Oliveira Hein e aos meus companheiros de pós-graduação Me. Maurício Oliveira Filho e Me. Marcelo Antunes no ensaio macrográfico.

à minha família pelo amparo, confiança e por estarem sempre ao meu lado incondicionalmente.

ao Eng^o Arnaldo Marinaro e à EnergyArc que disponibilizaram todos os recursos para a realização dos tratamentos mecânicos de vibração executados neste trabalho.

ao Senai Taubaté que disponibilizou toda a estrutura (instalações e equipamento de soldagem) para a execução da parte experimental, em especial aos professores MSc. Júlio, Danilo, Vanderlei e aos alunos da Caldeiraria.

à Iochpe Maxion pela parceria, em particular ao Eng^o Eduardo Portugal, Dr. Dimas Campos, Eng^o Ricardo Brais, Dr. Paulo Henrique Alves, Me. Alberto Oliveira, Bruno, Andrei, Me. Raphael Barbosa, Eng^o Marco Túlio, Eng^o Lucas, Eng^o Gabriel e Leuer.

ao Eng^o Luiz Antônio Pinto Lelo (IWE), pela amizade, fraternidade e por todo conhecimento transmitido com energia e entusiasmo, compartilhando seus ensinamentos e sua vasta experiência na área de soldagem.

à Eng^a Dra. Annelise Zeemann por todo tempo doado no auxílio das análises dos ensaios metalográficos e por sua atitude sempre solícita, estendendo a mão sempre que necessitei.

à Confab Tenaris pelo ensaio de Microdureza realizado em suas instalações, especialmente aos técnicos de laboratório Alexandre Ribeiro, José Antônio Salgado e Gabriel Salgado pela atenção dada a o presente trabalho.

ao sempre amigo Me. Ivair Santos Alves por constantemente facilitar o caminho, construindo pontes para que eu pudesse superar os obstáculos.

A persistência é o menor caminho do êxito.

Charles Chaplin

RESUMO

O alívio de tensões é convencionalmente realizado por tratamentos térmicos, sendo obrigatório nas principais normas de fabricação. Vibração mecânica pode ser uma alternativa ao alívio térmico, apresentando vantagens como tempo e energia inferiores, configurando-se uma opção com menor custo de tratamento, além de não se alterar a microestrutura dos materiais tratados. Para comprovar a influência da vibração aplicada ao processo de soldagem, soldou-se dois cordões em juntas em ângulo, escolhendo-se o processo arco submerso pela possibilidade de mecanização, excluindo a variável operador, e pelo mesmo apresentar um alto aporte térmico contribuindo para as deformações pós soldagem. Foi utilizado como referência a soldagem sem vibração e comparada às soldagens com vibração simultânea e com vibração imediatamente após os cordões de solda. Todos os corpos de prova foram soldados utilizando-se os mesmos parâmetros de soldagem, sendo a vibração fornecida aos mesmos através de um motor indutor de frequências. A deformação foi inspecionada utilizando-se a técnica de digitalização e sobreposição das imagens em um software. Na análise macrográfica, pôde-se observar que a vibração durante a soldagem modifica os parâmetros geométricos dos cordões. Na análise micrográfica, a vibração exerce influência significativa dependendo da região de análise. Na avaliação da microdureza, verificou-se que a vibração introduzida durante a solda e a aplicada imediatamente após, contribui para redução dos valores nas regiões do metal de solda e ZAC.

PALAVRAS-CHAVE: Tensões residuais. Alívio de tensões por vibração. Deformação.

ABSTRACT

The stress relief is conventionally performed by thermal treatments, being mandatory in the main manufacturing standards. Mechanical vibration can be an alternative to thermal relief, presenting advantages such as lower time and energy, making it an option with a lower cost of treatment, besides not altering the microstructure of the treated materials. In order to prove the influence of the vibration applied to the welding process, two beads were welded in “T” joints, choosing the arc process submerged by the possibility of mechanization, excluding the operator variable, and for the same to present a high thermal contribution contributing to the deformation after welding. Non-vibration welding was used as reference and compared to welds with simultaneous vibration and vibration immediately after the weld beads. All the specimens were welded using the same welding parameters, and the vibration was supplied to them through a frequency inducing motor. The deformation was inspected using the technique of scanning and overlapping the images in a software. In the macrographic analysis, it was observed that the vibration during welding modifies the geometric parameters of the beads. In the micrographic analysis, the vibration exerts influence depending on the region of analysis. In the evaluation of the microhardness, it was verified that the vibration introduced during the weld and the one applied immediately after, contributes to the reduction of the values in the regions of the weld metal and ZAC.

KEYWORDS: Residual Stress. Vibratory Stress Relief. Deformation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processo de soldagem por Arco Submerso.	25
Figura 2 - Ilustração do equipamento de soldagem por Arco Submerso.	27
Figura 3 - Distribuição das tensões em um cordão de solda.	28
Figura 4 - Tensões residuais a) Longitudinal. b) Transversal.	28
Figura 5 - Tensão Residual e Deformações em uma junta em ângulo (“T”).....	29
Figura 6 _ Modos de aplicação da vibração aos processos de soldagem.....	35
Figura 7 - Processos de solidificação no metal de solda.	37
Figura 8 - Representação da energia de vibração em função da frequência.	41
Figura 9 – Curvas de ressonância em resposta aos harmônicos de uma amostra.....	42
Figura 10 - Máquina de Solda: Fonte, trator e trilhos de deslocamento.	48
Figura 11 - Equipamento de vibração SRE: a) painel de controle. b) Indutor de vibração...	48
Figura 12 - Adaptação nos pés da mesa utilizada no experimento.....	49
Figura 13 - Pés da mesa com os isoladores de borracha.....	49
Figura 14 - Ponteamento para montagem.....	49
Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova (mm).....	49
Figura 16 - Fixação do indutor de vibrações.	49
Figura 17 - Suporte de chapas de aço a 45° para permitir posição plana de soldagem.	49
Figura 18 - Bloco de aço, ponteadado sobre a mesa para aumentar massa do conjunto..	49
Figura 19 - Testes preliminares dos parâmetros de soldagem.	49
Figura 20 - Aspecto visual - Cordão de solda preliminar.	49
Figura 21 - Painel de controle do equipamento de vibrações.	49
Figura 22 - Relação Peso e Tempo de tratamento.....	49
Figura 23 - Braço Faro	49
Figura 24 – Coleta dos dados.	49
Figura 25 - Localização dos pontos de nivelamento.	49
Figura 26 - Alinhamento e criação da referência para medição.	49
Figura 27 - Superfície gerada após digitalização.	49
Figura 28 - Referência para sobreposição dos modelos.....	49
Figura 29 – Localização dos cortes dos planos perpendiculares da junta.....	49
Figura 30 – Seccionamento a cada 100 mm	49
Figura 31 - Obtenção dos desvios dos valores e convenção de sinais	49

Figura 32 - Localização dos planos de análise	49
Figura 33 – Corte transversal à solda.....	49
Figura 34 - Amostra após o corte, pronta para embutir.....	49
Figura 35 - Equipamentos usados na preparação das amostras	49
Figura 36 - Polimento simultâneo com auxílio do suporte.	49
Figura 37 - Microscópio óptico Zeiss Z2m.	49
Figura 38 – Microscópio Metalúrgico.	49
Figura 39 - Obtenção das microestruturas.	49
Figura 40 - Eixos de referência na localização dos pontos analisados	49
Figura 41 - Roteiro de análise das regiões dos cordões	49
Figura 42 – a) Microdurômetro ; b) Visualização da impressão do penetrador piramidal.....	49
Figura 43 - Localização dos pontos de medição	49
Figura 44 - Equipamento para ensaio de Partículas Magnéticas	49
Figura 45 – Isosuperfícies CP1: Vibração durante soldagem.....	49
Figura 46 – Isosuperfícies CP2: Vibração durante soldagem.	49
Figura 47 – Isosuperfícies CP3: Vibração imediatamente após a soldagem.	49
Figura 48 – Isosuperfícies CP4: Vibração imediatamente após a soldagem.....	49
Figura 49 – Isosuperfícies CP5: Sem Vibração.	49
Figura 50 – Isosuperfícies CP6: Sem Vibração.	49
Figura 51 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 1	49
Figura 52 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 2	49
Figura 53 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 3	49
Figura 54 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 4	49
Figura 55 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 5.....	49
Figura 56 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 6	49
Figura 57 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 7	49
Figura 58 - Dimensionamento dos cordões de solda – filete.	49
Figura 59 - Macrografia CP2 – Soldagem com Vibração simultânea - VWC.	49
Figura 60 - Macrografia CP2 – Soldagem com Vibração imediatamente após – VSR.	49
Figura 61 – Macrografia CP6 - Soldagem sem Vibração.	49
Figura 62 – Micrografia MB1 - CP2: VWC (200x) – Região AB.....	49
Figura 63 – Micrografia MB1 - CP4: VSR (200x) - Região AB.	49
Figura 64 – Micrografia MB1 - CP6: Sem Vibração (200x) - Região AB.....	49

Figura 65 – Micrografia MB A2 - CP2: VWC (200x).....	49
Figura 66 - Micrografia MB A2 - CP4: VSR (200x).....	49
Figura 67 - Micrografia MB A2 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 68 - Micrografia MB B2 – CP2: VWC (200x)..	49
Figura 69 – Micrografia MB B2 – CP4: VSR (200x).....	49
Figura 70 – Micrografia MB B2 – CP6: Sem Vibração (200x).....	49
Figura 71 - Micrografia ZAC AB1 – CP2: VWC (200x).....	49
Figura 72 - Micrografia ZAC AB1 - CP4: VSR (200x).....	49
Figura 73 - Micrografia ZAC AB1 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 74 - Micrografia ZAC AB2 - CP2: VWC (200x)..	49
Figura 75 - Micrografia ZAC AB2 - CP4: VSR (200x).....	49
Figura 76 - Micrografia ZAC AB2 - CP6: Sem Vibração (200x).....	49
Figura 77 - Micrografia ZAC A1 - CP2: VWC (200x).	49
Figura 78 - Micrografia ZAC A1 - CP4: VSR (200x).	49
Figura 79 - Micrografia ZAC A1 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 80 - Micrografia ZAC B1 - CP2: VWC (200x).	49
Figura 81 – Micrografia ZAC B1 - CP4: VSR (200x).	49
Figura 82 – Micrografia ZAC B1 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 83 – Micrografia ZAC A2.2 - CP2: VWC (200x).	49
Figura 84 - Micrografia ZAC A2.2 - CP4: VSR (200x).	49
Figura 85 - Micrografia ZAC A2.2 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 86 - Micrografia ZAC B2.2 - CP2: VWC (200x).	49
Figura 87 – Micrografia ZAC B2.2 - CP4: VSR (200x).	49
Figura 88 – Micrografia ZAC B2.2 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 89 – Micrografia ZAC A2.1 - CP2: VWC (200x).....	49
Figura 90 - Micrografia ZAC A2.1 - CP4: VSR (200x).....	49
Figura 91 - Micrografia ZAC A2.1 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 92 - Micrografia ZAC B2.1 - CP2: VWC (200x).	49
Figura 93 – Micrografia ZAC B2.1 - CP4: VSR (200x).	49
Figura 94 – Micrografia ZAC B2.1 - CP6: Sem Vibração (200x).	49
Figura 95 – Micrografia MS A1 - CP2: VWC (200x)	49
Figura 96 - Micrografia MS A1 - CP4: VSR (200x)	49
Figura 97 - Micrografia MS A1 - CP6: Sem Vibração (200x)	49

Figura 98 – Micrografia MS B1 - CP2: VWC (200x)	49
Figura 99 - Micrografia MS B1 - CP4: VSR (200x)	49
Figura 100 - CP6: Micrografia MS B1- CP6:Sem Vibração (200x)	49
Figura 101 – Microdureza (HV) nas regiões do cordão A.....	49
Figura 102 - Microdureza (HV) nas regiões do cordão B	49
Figura 103 - Cordão de solda - CP2: Soldagem com vibração simultânea	49
Figura 104 - Cordão de solda CP4: Soldagem com vibração após a realização do cordão....	49
Figura 105 - Cordão de solda CP6: Soldagem sem vibração	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do Metal Base.....	46
Tabela 2 - Propriedades mecânicas da combinação dos consumíveis.....	47
Tabela 3 - Parâmetros Geométricos dos cordões	49
Tabela 4 – Composição Química do Metal de solda – CP2 - VWC	49
Tabela 5 - Composição Química do Metal de solda – CP4 - VSR	49
Tabela 6 - Composição Química do Metal de solda – CP6 - Sem Vibração.....	49
Tabela 7 - Leituras das Microdurezas (HV) – Cordão A.....	49
Tabela 8 - Leituras das Microdurezas (HV) – Cordão B	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARBL	Alta Resistência Baixa Liga
ASM	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CPs	Corpos de prova
MA	Metal de Adição
MB	Metal base
MS	Metal de solda
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i>
SRE	<i>Stress Relief Engineering</i>
VSR	<i>Vibratory Stress Relief</i>
VWC	<i>Vibratory Welding Conditioning</i>
ZAC	Zona afetada pelo Calor
ZF	Zona de fusão
ZL	Zona de ligação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS	20
1.2	JUSTIFICATIVA	21
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	TENSÕES RESIDUAIS.....	22
2.2	TENSÕES RESIDUAIS EM PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	23
2.2.1	Soldagem por arco submerso.....	24
2.2.2	Distribuição das tensões em um cordão de solda.....	27
2.3	ALÍVIO MECÂNICO DAS TENSÕES RESIDUAIS	30
2.3.1	Vibração aplicada pós soldagem.....	31
2.3.2	Vibração aplicada simultaneamente à soldagem.....	34
2.4	SOLIDIFICAÇÃO SOB VIBRAÇÃO.....	36
2.5	MODIFICAÇÕES NA MICROESTRUTURA SOB VIBRAÇÃO.....	39
2.6	DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA DO ALÍVIO MECÂNICO POR VIBRAÇÃO.....	40
2.7	LIMITAÇÕES DO PROCESSO VIBRACIONAL.....	43
2.7.1	Divergências da linha de pesquisa em relação ao alívio da tensão residual....	44
2.8	NORMAS DE FABRICAÇÃO E O ALÍVIO MECÂNICO DAS TENSÕES RESIDUAIS.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	MATERIAIS.....	46
3.1.1	Metal base	46
3.1.2	Metal de adição.....	47
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	47
3.2.1	Equipamento de soldagem.....	47
3.2.2	Equipamento de vibração.....	48
3.2.3	Sistema de isolamento.....	49
3.3	MÉTODOS.....	50
3.3.1	Preparação dos corpos de prova.....	50
3.3.2	Planejamento do experimento.....	51
3.3.3	Preparação do experimento.....	52
3.3.4	Suporte para posicionamento dos corpos de prova.....	52
3.3.5	Testes preliminares de soldagem.....	53
3.3.6	Determinação da frequência de ressonância.....	54
3.3.7	Soldagem dos corpos de prova.....	55

3.8	CARACTERIZAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.....	56
3.9	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	62
3.9.1	Extração das amostras.....	62
3.9.2	Embutimento.....	62
3.9.3	Polimento.....	63
3.9.4	Ataque químico.....	64
3.10	ANÁLISE DA MACROGRAFIA.....	64
3.11	ANÁLISE DA MICROGRAFIA.....	65
3.12	ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS.....	66
3.13	ENSAIO VISUAL.....	67
3.14	ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE.....	68
3.15	ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS.....	69
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES.....	70
4.2	ANÁLISE DA MACROGRAFIA.....	77
4.3	ANÁLISE DA MICROGRAFIA.....	82
4.4	ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS.....	96
4.5	END (ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS).....	98
5	CONCLUSÕES.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101

1 INTRODUÇÃO

Técnicas modernas de soldagem começaram a se prosperar pouco antes do final do século XIX, com o desenvolvimento de métodos para gerar alta temperatura em zonas localizadas. A soldagem geralmente requer uma fonte de calor para produzir uma zona de alta temperatura para fundir o material. (SURESH, V. S. et al. 2017)

Devido à intensa concentração da fonte de calor, as regiões próximas da linha de solda sofrem ciclos térmicos severos, causando aquecimento e resfriamento não uniformes do material, gerando assim deformação plástica não homogênea, tensões residuais e uma ampla região de granulação grosseira. (QINGHUA, 2006, apud MURUGAN et al., 1998; TENG, CHANG, 1997; LEE et al., 1992; EIGENMANN et al., 1994).

As tensões residuais provenientes da soldagem são preocupantes, podendo causar instabilidade dimensional durante a usinagem, fraturas frágeis de baixo nível de tensão e redução da resistência à fadiga. (SHANKAR, 1982)

Ainda segundo Shankar (1982), Munsu (2001), Xu et al. (2007) quando é necessário se reduzir tensões residuais em componentes soldados, o mais utilizado e bem-sucedido método é o alívio térmico, especificando temperatura, tempo de aquecimento e taxas de resfriamento. O tratamento térmico, no entanto, pode ter efeitos adversos como escala, descoloração, perda de acabamento, distorção, alterações na microestrutura, tempo e energia de tratamento altos e dispendiosos, além de se utilizar combustíveis fósseis como fonte de energia, impactando desta forma, o meio ambiente.

Ao longo de uma junta soldada, cria-se um estado de tensões residuais complexo durante a soldagem devido à aplicação localizada de calor. Tensões residuais e distorções permanecem após a conclusão da soldagem. Distorções, tensões térmicas transitórias e tensões residuais em áreas próximas à solda, podem causar falhas prematuras de estruturas soldadas sob certas condições. (AWS Vol. 6, 1993)

O tratamento mecânico por vibração vem sendo proposto como uma alternativa ao térmico por muitos anos. (YANG, 2008). Apresentando vantagens como menor investimento em relação aos equipamentos necessários, operação realizada em qualquer ponto do processo, menor poluição e menor tempo total de fabricação. (KAINTH, M.; GUPTA, D., 2015) (MUNSI, WADDELL, WALKER, 2001) (ADAMS C.M., BERRY, J.T., KLAUBA, B.B., 2005).

Segundo Munsif (2001), o uso de vibração para reduzir o nível de tensão residual nos processos de soldagem, tem sido alvo de estudo, onde bons resultados são relatados, porém o método ainda não recebeu uma investigação mais detalhada.

A vibração mecânica é utilizada para melhorar a microestrutura e propriedades mecânicas de materiais soldados, através de um refinamento de grãos. Na soldagem sob condições vibratórias, as peças de trabalho são fixadas em uma mesa e esta é rigidamente acoplada ao excitador de vibração. (KAINTH, M.; GUPTA, D., 2015).

Conforme afirma Kainth (2015), muitos pesquisadores analisaram o efeito das vibrações aplicadas à soldagem, chegando a uma conclusão genérica de que estas são capazes de alterar a microestrutura, melhorando assim as propriedades mecânicas das soldas devido à razão fundamental que as mesmas são influenciadas pelo tipo de microestrutura e granulometria.

Materiais de grãos finos, normalmente têm maior resistência mecânica e são mais dúcteis do que materiais semelhantes com granulação grosseira. Muitas vezes, pretende-se obter uma estrutura de grão fino no cordão de solda, pois esta leva à menor suscetibilidade do metal de solda à trincas de solidificação e a granulação fina contribui para melhorar as propriedades mecânicas como ductilidade e tenacidade do metal de solda. (SINGH; PATEL; PRASAD, 2016 apud MOARREFZADEH; JAYAPRIYA, MURUGANANDAM; THIRUSANGU, 2012)

Existem duas formas de se aplicar a vibração ao processo de soldagem. Pode-se introduzir a vibração simultaneamente à soldagem e imediatamente após.

Segundo Singh, Patel, Prasad (2016), o mecanismo de soldagem com vibração aplicada, transfere energia mecânica para a região de fusão durante as operações de soldagem, o que perturba o processo de solidificação da poça fundida.

O alívio mecânico da tensão residual, utiliza a vibração monitorada para causar carregamento dinâmico na estrutura tratada. Este carregamento combinado com o carregamento interno de tensões residuais, permite a ocorrência do fluxo plástico na estrutura. (ADAMS C.M., BERRY, J.T., KLAUBA, B.B., 2005).

As pesquisas e a utilização gradativa da vibração como alívio de tensões foram aumentando a confiabilidade do processo, porém, ainda nos dias de hoje, essa confiança não atingiu níveis satisfatórios, fato que faz com que os principais códigos de fabricação recomendem o alívio de tensões residuais pelo tratamento térmico, oferecendo referências para parametrizar e controlar o processo.

Desta forma, o tratamento das tensões residuais pelo processo mecânico de vibração, não é aceito pelas principais normas de fabricação. Apenas é citado nas normas AWS D14 / D14.1 (*Specification for Welding of Industrial and Mill Cranes and Other Material Handling Equipment*) e D14 / D14.4 M (*Specification for Welded Joints in Machinery and Equipment Solutions Manual*), onde se encontram algumas linhas recomendando seguir os parâmetros e instruções do fabricante do equipamento de vibração, além da autorização do engenheiro responsável pelo projeto.

Apesar das publicações existentes sobre o tema evidenciar bons resultados no alívio mecânico das tensões residuais, ainda é um assunto pouco explorado, carecendo de mais pesquisas para a consolidação desta tecnologia.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência da vibração introduzida ao processo de soldagem por arco submerso.

Para se atingir tal objetivo, utilizou-se a vibração aplicada durante e imediatamente após a soldagem de juntas em ângulo, comparando esses processos com a junta soldada sem vibração, usando esta como referência.

Na avaliação das tensões residuais, limitou-se aos efeitos das mesmas, sendo analisadas as deformações pós soldagem através de um software para digitalização, tratamento e sobreposição das imagens.

A análise metalográfica foi realizada com a finalidade de se verificar alterações microestruturais, bem como nos parâmetros geométricos dos cordões e seus respectivos perfis de dureza nas três condições de análise:

- Soldagem por arco submerso sem vibração;
- Soldagem por arco submerso com vibração simultânea à soldagem;
- Soldagem por arco submerso com vibração imediatamente pós soldagem;

1.1 JUSTIFICATIVA

A melhoria contínua dos processos de fabricação exige novas soluções que atendam aos requisitos de qualidade e produtividade do mercado e que estejam alinhadas a uma forma de produção racionalizada e com menor impacto ambiental.

As tensões residuais provenientes dos processos de soldagem, se constituem em uma constante preocupação devido à instabilidade dimensional e outras desvantagens que inviabilizam processos de fabricação e montagem.

Portanto, o avanço da tecnologia do alívio mecânico por vibração poderá se configurar em um desenvolvimento significativo para as indústrias que buscam a otimização de seus meios produtivos alinhados a processos com menor impacto ambiental substituindo combustíveis fósseis como fonte geradora de energia.

Diante deste contexto, o presente trabalho contribui para prover maior literatura sobre o tema, visando uma alternativa energeticamente mais limpa e economicamente mais viável no alívio das tensões residuais, podendo substituir o tratamento térmico nos casos em que:

- Os tamanhos das peças ou estruturas sejam incompatíveis com os tamanhos dos fornos
- Não se deseja alterações microestruturais após tratamento
- Não seja possível se retirar ou movimentar peças / estruturas das linhas de fabricação ou montagem para levá-las aos fornos.
- Se deseja precisão dimensional antes da usinagem
- Se deseja reduzir o tempo total de fabricação

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TENSÕES RESIDUAIS

Entende-se por tensões residuais, as tensões internas existentes em um corpo livre de forças externas. Estas tensões são elásticas e auto equilibrantes, ou seja, qualquer carregamento externo modifica o seu estado de tensões e causa sua redistribuição de modo que as tensões se equilibrem numa nova condição. Neste estado de tensões auto equilibrante, a resultante das forças e de momentos produzidas pelas tensões residuais é igual a zero. (KOU, 2003 apud MASUBUCHI, 1980).

A tensão residual é causada pela heterogeneidade da deformação plástica. Com a deformação plástica local, a zona plástica alonga-se nas vizinhanças da zona elástica e gera tensões residuais após a retirada do carregamento do sistema (KOU, 2003).

Sua origem provem de várias fontes e podem estar presentes na matéria-prima não processada, introduzida durante a fabricação ou pode surgir a partir de carregamento externo. As tensões residuais podem ser suficientemente grandes para causar produção local e deformação plástica, tanto a nível microscópico como macroscópico, e pode afectar gravemente desempenho do componente. (KANDIL et al., 2001)

De acordo com Lu (1996), as tensões residuais podem frear ou acelerar o início de uma deformação plástica nas camadas superficiais ou sub-superficiais, podendo ser benéficas ou deletérias.

Segundo Kandil (2001), as origens das tensões residuais se dividem em:

- Térmica: são freqüentemente relacionadas a processos não uniformes de aquecimento ou resfriamento, juntamente com as restrições de grande volume de material levando a gradientes térmicos severos e ao desenvolvimento de grandes tensões internas.
- Mecânica: são geralmente o resultado de processos de fabricação que produzem deformação plástica não-uniforme.
- Química: podem se desenvolver devido a mudanças de volume associadas reações químicas, precipitação ou transformação de fase.

As tensões residuais têm caráter elástico e se sobrepõem à tensão de serviço. Quando um componente com tensões trativas na superfície sofre carregamento de tração, este material será sobrecarregado localmente pelas tensões residuais trativas existentes na superfície do

componente. O inverso ocorre quando um componente com tensões residuais compressivas na superfície sofre carregamento trativo, as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando o desempenho deste componente em serviço. (NOYAN, 1987)

O valor máximo em módulo que as tensões residuais poderão chegar é o próprio limite de escoamento do material. Valores de tensões acima do limite de escoamento do material irão ocasionar uma deformação plástica, havendo assim, uma redistribuição das tensões residuais. (NOYAN, 1987)

2.2 TENSÕES RESIDUAIS EM PROCESSOS DE SOLDAGEM

Devido à existência de regiões não aquecidas do material durante soldagem, que agem como restrição à dilatação e contração da região aquecida, tensões trativas ou compressivas são geradas, tanto na região aquecida (geradora), como na não aquecida (restritoras). Estas tensões térmicas ao final do ciclo térmico (temperatura ambiente) representam as tensões finais distribuídas na região aquecida e não aquecida. Passam, assim, ao final, a serem chamadas de tensões residuais. (SCOTTI, MISHCHENKO, 2018)

Segundo Scotti (2018 apud Lin e Lee 1997, Xu et al. 2014, Unnikrishnan et al. 2014), a energia de soldagem é um parâmetro de controle que afeta os parâmetros independentes, taxa de resfriamento e volume aquecido, os quais regem a geração de tensões térmicas.

Na soldagem, a expansão e contração do metal de solda em conjunto com o metal de base adjacente, são contidas pelas áreas mais distantes do cordão. Consequentemente, após o resfriamento à temperatura ambiente, existem tensões residuais de tração na solda e no metal de base adjacente, embora existam tensões de compressão residuais nas áreas mais distantes do cordão. (KOU, 2003)

Após a realização do cordão de solda, a dissipação de calor no material ocorre principalmente por condução, das regiões de maior temperatura para o restante do metal. No início de um cordão de solda, há o aquecimento para promover a fusão dos materiais, sendo este, localizado e não uniformemente distribuído. A temperatura e o tempo de exposição a ela, variam o nível das tensões de próximas a zero até o limite de escoamento dos materiais. (ZEEMANN, 2003).

Ainda conforme Zeemann (2003), se uma pequena parte do material aquecido não consegue aumentar seu volume devido às restrições do restante do material, esta pequena região passa a ser comprimida com tensões que irão aumentando seu valor, até ultrapassar o

limite de escoamento em compressão. Deste modo, ao final do aquecimento, quando se inicia o resfriamento, as adjacências da solda se encontram deformadas em compressão, mas com o mesmo tamanho inicial. A mesma parte do material aquecida e comprimida começa a se resfriar, tendendo, portanto a se contrair. No início deste processo, a região se alivia da compressão e como não reduz seu tamanho devido às restrições do restante do material, acaba sendo tracionada até que as tensões de tração superem o limite de escoamento do material e novamente o material, para acomodar esta tensão com valores elevados, se deforma.

As tensões residuais nas soldagens podem ter dois efeitos. Podem produzir distorção e/ou causar falhas prematuras. A distorção é causada pelo calor da região da solda que se contrai de maneira não uniforme. (AWS WELDING HANDBOOK VOL 1, 2001)

Ainda, segundo a AWS Welding Handbook (2001), a distorção nas soldas de filete (juntas em ângulo), é semelhante à que ocorre em soldas de juntas de topo. Compressão transversal, longitudinal e distorção angular resultam do desequilíbrio da natureza das tensões presente nestas soldas. Como soldas de filete são freqüentemente usadas em combinação com outras soldas em estruturas, a distorção resultante específica pode ser muito complexa de ser entendida.

As tensões residuais e a distorção afetam o comportamento dos materiais em relação à instabilidade dimensional e à fratura, contribuindo para a flambagem e o surgimento de trincas quando estas falhas ocorrem na aplicação de baixos níveis de tensão. Isso significa que tensões residuais podem contribuir nas falhas por fadiga do material. (AWS WELDING HANDBOOK Vol 1, 2001) (ASM METALS HANDBOOK VOL 6, 1993).

2.2.1 Soldagem por arco submerso

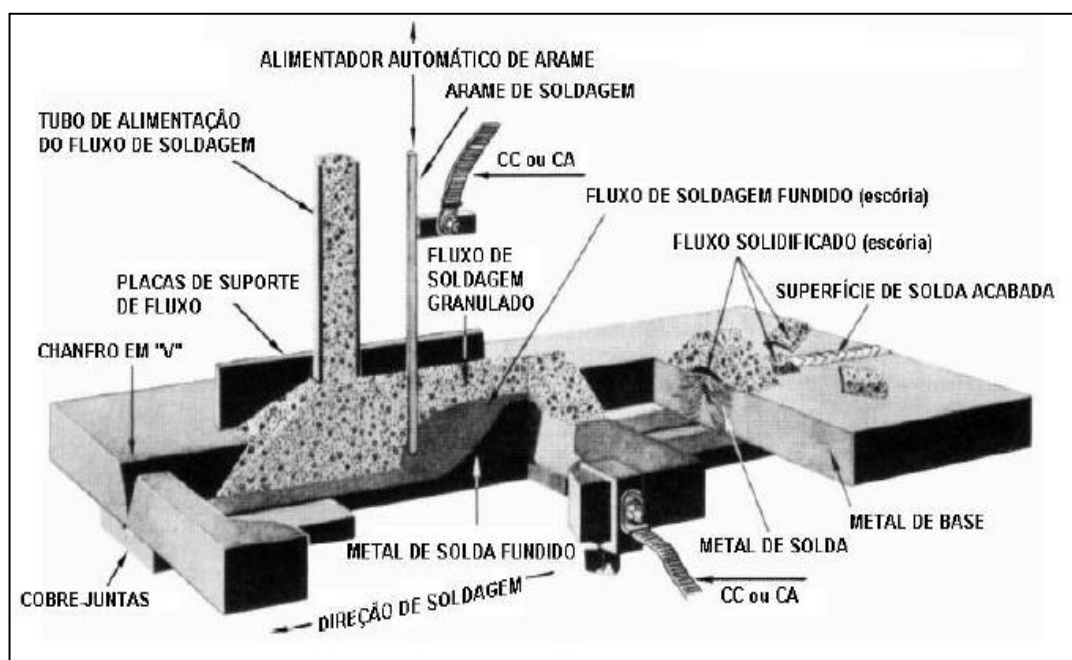
Arco Submerso é um processo de soldagem onde o arco se localiza sob uma camada de material granular fusível denominada “fluxo”, sendo este depositado sobre a região da solda protegendo-a da contaminação atmosférica. (ASM METALS HANDBOOK VOL 6, 1993)

Uma vez aberto o arco elétrico, eletrodo e fluxo são alimentados continuamente enquanto a tocha de soldagem é deslocada ao longo do material a ser soldado. A adição de metal é obtida pelo próprio eletrodo em forma de fios ou fita, alimentados por um dispositivo mecânico. (ASM METALS HANDBOOK VOL 6, 1993)

A operação normalmente é mecanizada (movimentação da tocha de soldagem e alimentação do arame eletrodo independem do operador), embora possa ser realizada de modo semi mecanizado, onde o soldador movimenta a tocha ao longo da junta e mantém a distância entre a tocha e a peça. (TANIGUCHI, 1982).

A figura 1 ilustra o processo de soldagem por Arco Submerso, sendo possível se observar uma junta de topo recebendo o arame alimentado continuamente, recoberto pelo fluxo que protege a poça de fusão.

Figura 1 - Processo de soldagem por arco submerso.



Fonte: adaptado de ESAB.

Os consumíveis utilizados no processo à arco submerso são: Eletrodos (em formatos de arames ou fitas) e fluxos de soldagem que recobrem o cordão.

Como os eletrodos arames de enchimento possuem, geralmente, grandes diâmetros, as correntes de soldagem também são elevadas, gerando grande eficiência de deposição de material com ótima penetração. (TANIGUCHI, 1982).

A combinação entre os consumíveis em conjunto com o metal de base e o procedimento de soldagem, determinarão as propriedades do cordão de solda.

Os fluxos aglomerados são constituídos de compostos minerais finamente moídos e os fluxos fundidos são compostos minerais adicionados a ingredientes fundidos em forno para formação de um vidro metálico, que após resfriado, forma partículas granulares com requisitos para atendimento das propriedades desejadas na soldagem. (TANIGUCHI, 1982).

A classificação dos consumíveis no processo de soldagem por arco submerso é definido pela AWS A 5.17 (Arame de Aço carbono comum e fluxos) e AWS A 5.23 (Baixa Liga). Os fluxos são classificados com base nas propriedades mecânicas do metal de solda em conjunto com a classificação do eletrodo. Os eletrodos são classificados com base apenas em sua composição química, sendo padronizados os diâmetros dos eletrodos nus fornecidos.

A representação dos consumíveis no processo de soldagem à arco submerso é padronizada segundo AWS A 5.17: F S X₁ X₂ X₃ – E CYYY.

Os fluxos utilizados no processo não possuem classificação sistematizada como o processo de soldagem por eletrodos revestidos e geralmente a definição do fluxo está especificada segundo o arame de enchimento. Na prática, se escolhe o par Fluxo-Arame, pois as propriedades do cordão de solda serão dadas pelas reações metalúrgicas entre os consumíveis.

- A letra F inicial representa Fluxo (adicionado sobre o cordão de solda).
- A letra S informa que o fluxo é fabricado somente de escória moída ou misturada
- X₁: Resistência mínima à tração do metal de solda depositado.
- X₂: Condição do tratamento térmico da execução do ensaio.
- X₃: Temperatura de resistência ao impacto mínimo de 27 J.
- A letra E representa Eletrodo nu.
- A letra C é opcional e indica que é um eletrodo tubular com enchimento metálico.
- YYY: Classificação do eletrodo nu de acordo com a composição química.

O equipamento básico para soldagem à arco submerso possui uma fonte de energia, alimentador de eletrodo – arame, tocha de soldagem, sistema de controle, recipiente alimentador de fluxo e cabos elétricos.

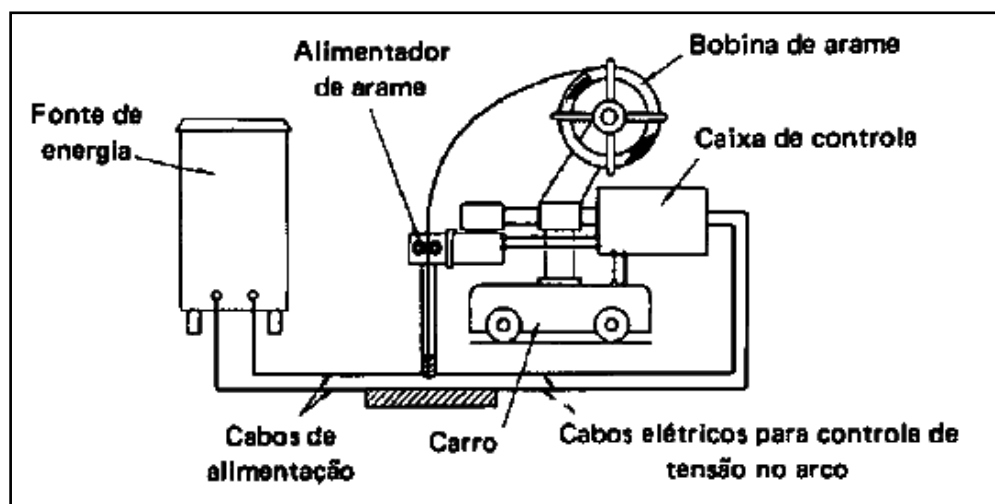
O cabeçote de soldagem reúne alguns destes elementos sendo utilizado na soldagem mecanizada e consiste em um carro também chamado de trator ou tartaruga, acionado por um motor elétrico com ajuste de velocidade de deslocamento, sendo guiado por trilhos. Normalmente a tocha é posicionada junto ao alimentador de arame. As tochas para sistemas automáticos são fixas aos deslocadores. As tochas para o sistema semi mecanizado são conduzidas pelo operador, apoiadas sobre rodízios para garantir constante a distância entre o bico de contato e a peça. O bocal é normalmente montado na tocha alimentando o fluxo concentricamente ao arame. O fluxo é alimentado por gravidade, havendo a possibilidade de reaproveitamento (peneirado) do fluxo recolhido por aspiração. (TANIGUCHI, 1982).

As fontes de energia podem ser:

- Corrente contínua (transformador-retificador ou motor-gerador).
- Corrente alternada (geralmente transformadores).

A figura 2 ilustra o equipamento de soldagem mecanizado.

Figura 2 - Ilustração do equipamento de soldagem por arco submerso.



Fonte: adaptado de TANAGUCHI (1982)

2.2.2 Distribuição das tensões em um cordão de solda

O comportamento da distribuição das tensões trativas e compressivas ao longo de um cordão de solda, pode ser ilustrado conforme figura 3.

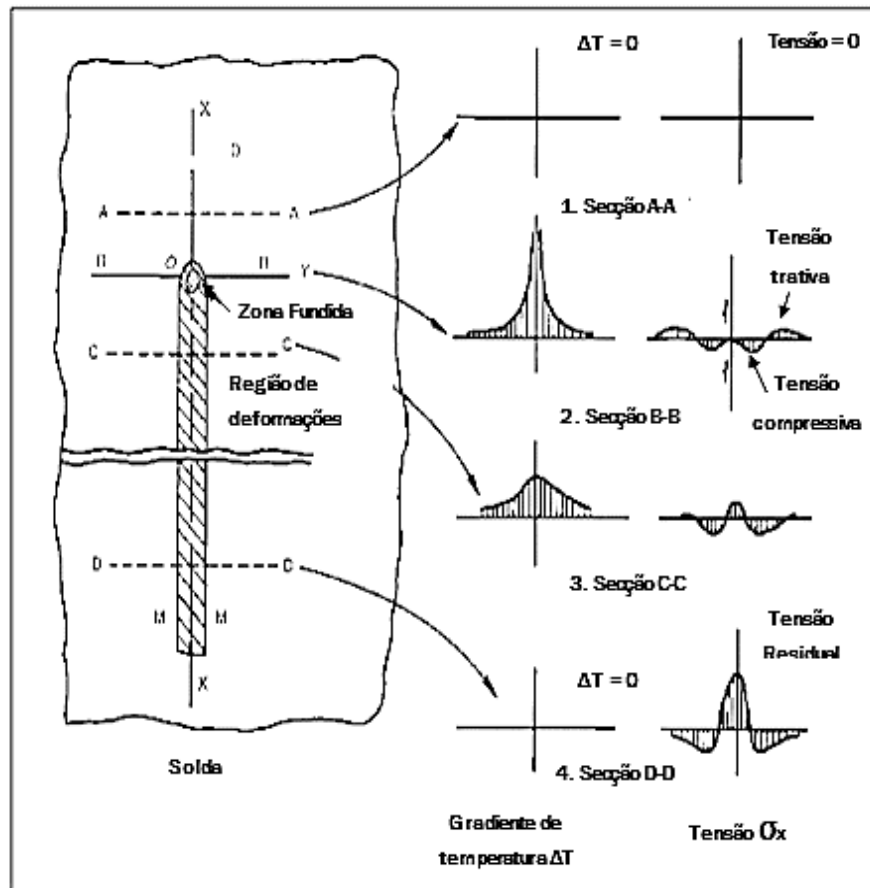
Na seção A-A da figura 3, que se encontra fora do cordão de solda, não há variação de temperatura ou geração de tensão de tração.

Na seção B-B da figura 3, que corta a zona fundida, encontra-se uma maior variação de temperatura (ΔT) e o início das tensões de compressão e tração nas adjacências do cordão de solda.

Na seção C-C da figura 3, onde a deformação plástica ocorreu durante a soldagem, observa-se uma redução da temperatura e também níveis maiores de tensões tanto trativas como compressivas.

Já na seção D-D da figura 3, onde a solda já resfriou, verifica-se o nível máximo de tensões de tração e compressão, sendo estas, tensões residuais.

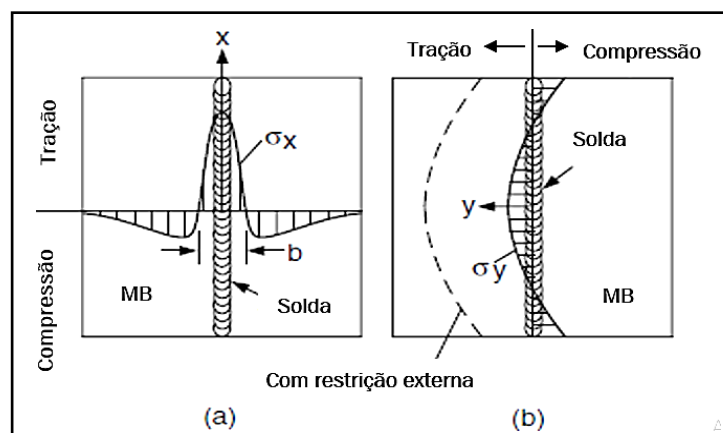
Figura 3 – Distribuição das tensões em um cordão de solda.



Fonte: adaptado de AWS WELDING HANDBOOK (2001)

A distribuição da tensão residual transversal e longitudinal ao longo do comprimento da solda, em uma junta de topo, estão representados na Figura 4.

Figura 4 - Tensões residuais a) Longitudinal. b) Transversal.

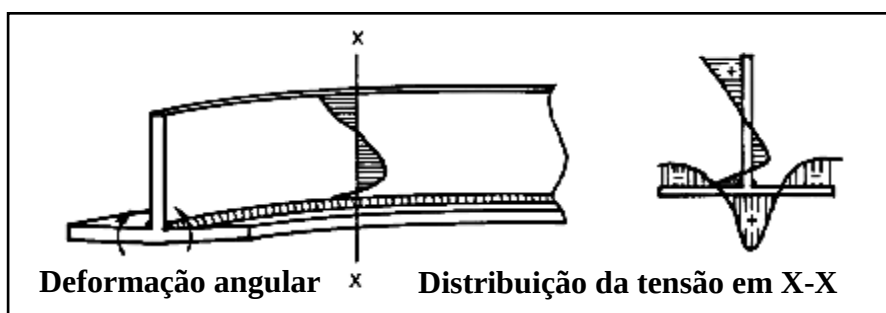


Fonte: adaptado de KOU (2003)

As tensões de tração de magnitude relativamente baixa são produzidas na parte média da solda, onde a contração térmica na direção transversal do cordão de solda é contida pelo metal base muito mais frio e distante da solda. Os esforços de tração no centro da solda são equilibrados por esforços de compressão nas extremidades da mesma. (AWS, 2001)

A deformação e a distribuição das tensões em uma junta em ângulo (junta “T”), estão ilustradas na figura 5.

Figura 5 – Tensão Residual e Deformações em uma junta em ângulo (“T”).



Fonte: adaptado de ASM METALS HANDBOOK (1993)

Distorções encontradas em estruturas de fabricação são causadas por três alterações dimensionais fundamentais: (ASM METALS HANDBOOK VOL 6, 1993)

- Tensões de contração transversal;
- Tensões de contração longitudinal paralela a linha de solda;
- Distorção angular ao redor da linha de solda.

Os efeitos da tensão residual na soldagem podem ser resumidos conforme AWS WELDING HANDBOOK, (2001) em:

- O efeito da tensão residual no desempenho de estruturas soldadas é apenas significativo em fenômenos que ocorrem sob baixa aplicação de tensão, como fratura, fadiga e fraturas frágeis por corrosão;
- À medida que o nível de tensão aplicada aumenta, o efeito de tensões residuais diminui;
- O efeito da tensão residual é insignificante no desempenho de estruturas soldadas sob tensão aplicada maior que o limite de escoamento
- O efeito da tensão residual tende a diminuir após o carregamento cíclico.

2.3 ALÍVIO MECÂNICO DAS TENSÕES RESIDUAIS

A vibração tem sido usada para estabilizar dimensionalmente e reduzir a distorção de peças e estruturas. Neste processo, a peça de trabalho é submetida a vibrações em uma determinada frequência e amplitude por um tempo pré-determinado. A combinação de tensões internas da peça de trabalho e essa força aplicada externamente, faz com que a tensão exceda o ponto de escoamento, resultando em deformação plástica. Isso leva à redistribuição e redução de tensões residuais. (SHAIKH, 2016)

No alívio das tensões residuais por vibração, o componente que receberá a energia mecânica induzida, é isolado com almofadas de borracha. Esta configuração é então sujeita a vibrações controladas, que podem ser transmitidas ao sistema usando um motor variável carregado excentricamente junto com um controlador de velocidade, que é usado para escanear frequência ressonância em tempo real. (BAQAR, YUGAL, PRADEEP, 2014)

Ainda segundo Baqar, Yugal, Pradeep (2014), tem-se duas hipóteses principais para explicar o mecanismo de alívio das tensões residuais usando-se técnicas vibratórias:

- A primeira faz uma analogia entre vibração e métodos térmicos relacionando-o ao deslocamento atômico na rede cristalina. As vibrações de baixa frequência devem transmitir energia suficiente aos átomos para permitir-lhes assumir novas posições, promovendo um rearranjo em níveis menores de tensão. (SHANKAR, 1982)
- A segunda hipótese relacionou o alívio com a processo de deformação plástica. Durante os tratamentos vibracionais, as tensões residuais e tensões cíclicas, excedem o ponto de escoamento do material, resultando em redução da tensão residual por deformação plástica. (SHANKAR, 1982)

A vibração pode ser aplicada ao processo de soldagem durante a realização do cordão de solda, e imediatamente após. Quando introduzida simultaneamente à soldagem, atua na poça de fusão que irá se solidificar. Ao ser aplicada imediatamente pós soldagem, fornece energia para redistribuição das tensões em menores níveis. (MUNSI, WADDELL, WALKER, 2001)

O instituto internacional de Soldagem (IIW) também pesquisa o processo de alívio de tensões residuais em soldagem. Pesquisadores do instituto na Finlândia publicaram em 2016 um artigo na tentativa de se estabelecer diretrizes para boas práticas, relacionando o HFMI (*High Frequency Mechanical Impact*) à resistência à fadiga.

Na última década, segundo os pesquisadores Marquis e Yildimirim (2016), os tratamentos HFMI tem se desenvolvido significativamente como um método confiável, eficaz e fácil de usar para melhorar a resistência à fadiga pós-soldagem. Em seu experimento, os pesquisadores distribuíram amostras para quatro fabricantes distintos de equipamentos de HFMI. Os quatro fabricantes se localizam na Alemanha, Canadá, Suécia e Holanda. A todos os fabricantes de equipamento de HFMI foi informado que as amostras após tratamento, seriam submetidas aos testes de fadiga sujeitas a carga de amplitude variável e cada fabricante desenvolveu seus respectivos parâmetros do processo. O objetivo do teste não foi comparar fabricantes do equipamento e sim validar a técnica de HFMI e por meio disso, criar diretrizes para boas práticas. Em todas as amostras dos quatro fornecedores de equipamento de HFMI foi comprovada a melhora da resistência à fadiga. Estes estudos têm sido de grande valia na intenção de se criar uma referência e um guia de boas práticas quando peças foram tratadas utilizando HFMI.

2.3.1 Vibração aplicada pós soldagem

A vibração introduzida após a solda se constitui em uma técnica para alívio das tensões residuais denominada VSR (*Vibratory Stress Relief* – Alívio de tensões por vibração). (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015)

O principal objetivo da técnica VSR é reduzir e redistribuir tensões para níveis seguros, de modo que a precisão do componente e a estabilidade a longo prazo sejam asseguradas. O VSR não funciona para todas as aplicações, mas possui bons resultados para aplicações que não exigem a mudança na estrutura cristalina ou propriedades mecânicas. Há muitos benefícios em usar o VSR como alternativa ao tratamento térmico de soldagens, incluindo economia de custo e tempo. (ROBBINS, 2004 apud CLAXTON, 1999) (MAYUR, WAYAKOLE, SARODE, 2017) (ADAMS, BERRY, KLAUBA, 2005) (SHAIKH, 2016).

O alívio de tensão residual por vibração é um método de alívio de tensão não térmico que é mais comumente usado para obter estabilidade dimensional em fabricações soldadas e fundidas. Devido às dificuldades em medir tensões residuais e devido a efeitos desconhecidos da vibração, alguns pesquisadores no intuito de se chegar à eficácia do processo, sugeriram frequências ressonantes e frequências sub-ressonantes. Todas essas teorias são baseadas na amplitude vibracional que pode ser obtida na peça de trabalho. Dependendo do tamanho do componente, configurações diferentes são usadas para transmitir vibrações. (SHAIKH, 2016)

Ainda segundo Shaikh (2016 apud Baqar, Jain, Khanna, 2014), três tipos diferentes de abordagens VSR são comumente usados no alívio das tensões residuais, dependendo da frequência utilizada no tratamento :

- VSR ressonante: Vibração da peça em sua frequência natural e grandes cargas variáveis. A alta amplitude cíclica constante e a frequência precisa devem estimular as propriedades cíclicas do componente. Para obter um número maior de padrões de carregamento, vibradores com faixas de alta frequência devem ser usados. Para melhores resultados, deve ser aplicado após os processos de usinagem de desbaste, pois reduz as tensões devido à usinagem. Nos casos em que os métodos térmicos não obtiverem precisão e estabilidade necessárias às aplicações, o R-VSR (VSR ressonante) pode ser aplicado imediatamente antes de terminar as operações, para se alcançar a estabilidade total.
- VSR sub-ressonante: É utilizado se o equipamento não for capaz de atingir a frequência de ressonância da peça. Neste método, apenas a base do pico de frequência é alcançável. Isso ocorre porque o pico está fora do alcance do equipamento utilizado. É chamado de VSR Ressonante Sub Modal, pois o pico não é alcançável.
- Sub-harmônico: Este método tem dois princípios. A energia sub-harmônica é usada para o alívio da tensão. Após isso, a curva harmônica de uma peça metálica submetida a tensão se desloca e estabiliza para uma nova localização de frequência, devido a redução da tensão térmica. Neste método, a carga cíclica da peça em frequências se encontra abaixo da faixa de frequência natural. Neste processo, os componentes metálicos exibem uma reação harmônica à energia induzida. A curva harmônica ocorre quando o componente vibrado não consegue dissipar mais energia dos indutores de força e responde com um movimento de amplitude fora da proporção. Este método é avançado em relação aos métodos anteriores de alívio de tensão por vibração. O processo sub-harmônico pode ser usado durante a soldagem para reduzir a distorção e trincas.

Segundo WALKER et al. (1994), as fontes mais importantes de preocupação relacionadas à aplicação do processo VSR está na incerteza quanto aos parâmetros reais necessários para alcançar um alívio eficaz da tensão residual.

Quanto à soldagem, segundo Jurcius et al. (2010), VSR é especialmente compatível com os processos convencionais: Arco submerso, TIG , Eletrodo revestido e MIG/MAG.

Para todas as aplicações do alívio por vibração, devem ser seguidas duas exigências de modo a garantir a eficiência do tratamento:

- apoiar a estrutura a ser tratada, isolando-a do piso ou de estruturas rígidas, deixando-a livre para vibrar.
- o vibrador deve ser conectado diretamente à estrutura tratada, de maneira a transferir toda energia de vibração, minimizando perdas do processo.

A frequência de vibração depende do material, do tamanho e do formato da peça a ser tratada. Geralmente as frequências utilizadas nos tratamentos são menores que 100 Hz, em um período inferior a meia hora. (SHANKAR, 1982).

Hornsey (2004) observa que a aplicação de vibrações para alívio das tensões residuais não é para ser um substituto dos tratamentos térmicos, sendo que, cada tratamento tem a suas vantagens e desvantagens.

Porém, onde o alívio térmico não pode ser executado pelas características do processo e/ou materiais, bons resultados têm sido apresentados por pesquisadores tendo a vibração como alívio de tensões pós soldagem.

Singh et al. (2012) verificaram que as juntas vibradas apresentaram alta resistência à tração, à elasticidade e pouca perda de ductilidade quando comparados às juntas sem vibração.

Burzic et al. (2012) investigaram a tensão residual em chapas de aço soldadas de topo com e sem vibração. Os resultados dos testes Charpy com e sem entalhe, mostram melhoras nos níveis de absorção de impacto nos corpos de prova para o processo com vibração.

Hahn (2002) analisou as tensões residuais por vibração ressonantes e sub-ressonantes. As vibrações ressonantes produzem maiores níveis de alívio quando comparadas a sub-ressonantes, devido a maior amplitude da frequência. Peças ou conjuntos com menores tensões residuais conseguem maiores níveis de alívio.

Sun et al. (2003), soldaram placas de material D6AC e D406A utilizando VSR e compararam os resultados com placas sem o tratamento mecânico. Os níveis de tensões macro residuais reduziu nas amostras tratadas com VSR.

Adams Berry, Klauba, (2005) concluíram que o alívio das tensões residuais usando vibração evoluiu nas últimas décadas na manufatura industrial, sendo:

- Usado principalmente para fins de estabilidade dimensional, sendo mais estável e previsível do que o tratamento térmico economizando significativamente custo e tempo total de fabricação.

- O progresso de um tratamento de vibração eficaz pode ser monitorado controlando a vibração, e observando o padrão de ressonância da peça de trabalho. O pico de ressonância é o parâmetro chave para monitoramento.
- O tratamento de vibração permite uma ampla gama de materiais, incluindo baixo teor de carbono, alta resistência aços, aços inoxidáveis, bi-metálicos e soldagens com membros de liga de alumínio com nenhum efeito sobre suas propriedades físicas.

2.3.2 Vibração aplicada simultaneamente à soldagem

A vibração aplicada durante a soldagem se constitui em uma técnica denominada VWC (*Vibratory Weld Conditioning*) ou Solda Condicionada por Vibração. (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015)

Na soldagem com vibração introduzida simultaneamente ao processo, a peça vibra durante a execução do cordão, afetando principalmente a solidificação para melhorar a qualidade do mesmo. A vibração facilita a liberação de gases e os cordões de solda resultantes exibem reduzida porosidade. As propriedades mecânicas das soldas sob condições vibratórias são dependentes das mudanças estruturais ocorridas durante o aquecimento e resfriamento do cordão. (PRAKASH, TEWARIS, RIVASTAVA, 2010)

Materiais metálicos cuja microestrutura foi submetida ao refinamento de grãos, possuem muitas vantagens que incluem, entre outras, boas propriedades mecânicas estabilidade térmica e baixa temperatura com alta taxa de deformação plástica. Este refinamento de grãos pode ser alcançado quando forças externas são aplicadas para induzir o fluxo do fluido durante a solidificação, que inclui a agitação mecânica. A estrutura grosseira de grãos colunares é substituída por uma equiaxial. A transição é acompanhada por uma quebra na curva de velocidade de sub-resfriamento com uma mudança na forma da interface sólido-líquido. (OLUFEMI, ADEMOLA, 2012 apud VALIEV et al, 2000, MARKUSHEV et al, 1997, LEE et al, 2003, KOMURA et al, 2001, DRAGNEVSKI, COCHRANE, MULLIS, 2002)

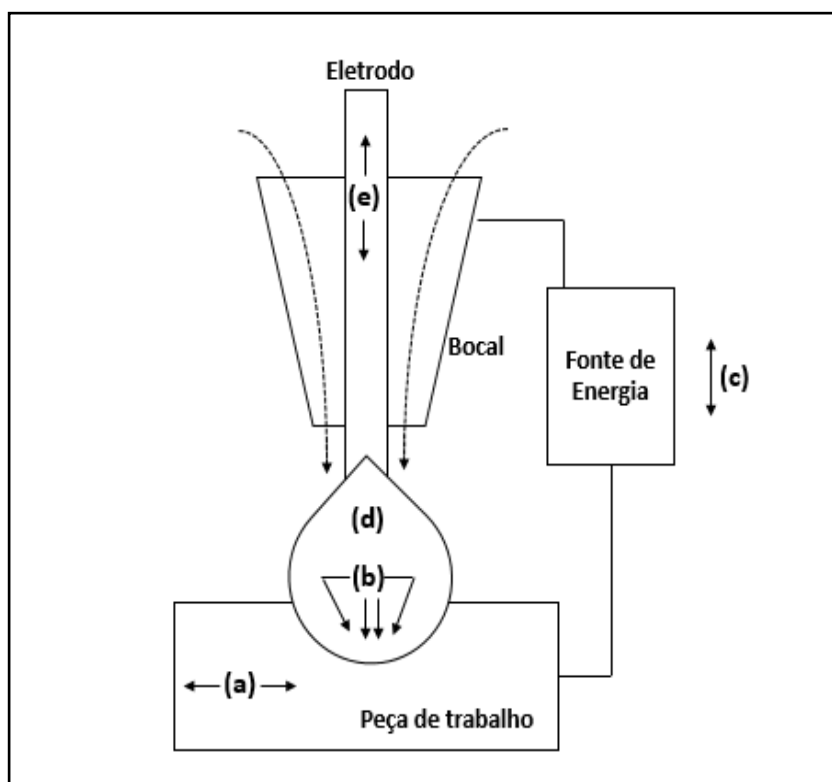
O lead time de produção pode ser consideravelmente reduzido devido ao processamento paralelo de vibração na soldagem. Além disso, a vibração durante a realização do cordão, leva a microestrutura aprimorada e melhores propriedades mecânicas. (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015)

Diferentes modos de vibração estão associados a qualquer um dos constituintes do sistema de soldagem que inclui a peça de trabalho, o eletrodo, o arco elétrico, a poça de fusão e a fonte de alimentação. Os primeiros quatro constituintes podem ser fisicamente agitados, enquanto a fonte de energia pode fornecer vibração à gotícula fundida, através da corrente pulsada.

Todos os tipos de vibrações fornecidas aos processos de soldagem, podem ser classificados em dois grupos: 1) Vibração da peça de trabalho com agitação da poça de fusão em um sistema de soldagem; 2) Vibração de vários elementos além da peça de trabalho em um sistema de soldagem.

Na figura 6, estão representados os modos de vibração associados a soldagem:

Figura 6 -Modos de aplicação da vibração aos processos de soldagem.



Fonte: adaptado de JOSE, KUMAR, SHARMA (2015)

(a) Vibração da peça de trabalho (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015 apud KIM et al, 2008, TEWARI, SHANKER, 1993, PUCKO, 2009, BALASUBRAMANIAN, KESAVAN, BALUSAMY, 2011, DEHMOLAEI, SHAMANIAN, KERMANPUR, 2008).

(b) Oscilação da poça de fusão (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015 apud MATSUDA, NAKAGAWA, NAKATA, 1978, SORENSEN, EAGAR, 1990, ANDERSEN et al., 1990, WATANABE et al., 2010).

(c) Oscilação de gotículas derretidas usando corrente pulsada (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015 apud WU, CHEN, LI, 2004, HIRATA et al., 2007)

(d) Oscilação da soldagem arco (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015 apud GRILL, 1981, WANG et al., 2014).

(e) Vibração do eletrodo (JOSE, KUMAR, SHARMA, 2015 apud JONES, EAGAR, LANG, 1992).

2.4 SOLIDIFICAÇÃO SOB VIBRAÇÃO

A formação de subgrãos pela vibração simultânea à soldagem, pode ser explicada pela presença de agitação forçada na poça de fusão. A vibração do metal líquido contribui para aumentar a taxa de transferência de calor e a remoção do superaquecimento líquido, o que diminui a probabilidade de refusão dos grãos sólidos iniciais. O gradiente de temperatura do centro para a borda da poça de fusão é reduzida e a zona sub-resfriada é dispersa no líquido. Fragmentação, nucleação e crescimento podem acontecer dentro de toda a poça, o que dá origem ao refinamento dos grãos. A soldagem com agitação da poça de fusão, aparentemente produz uma taxa de resfriamento maior durante a solidificação. (PRAKASH, TEWARI, SRIVASTAVA, 2010)

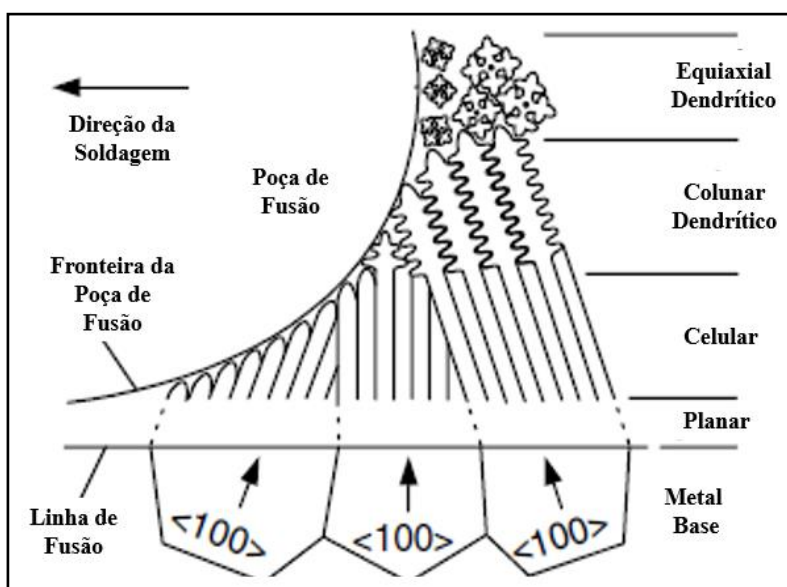
De acordo com Prakash, Tewari, Srivastava, (2010 apud Flemings, 1974) conforme os princípios de solidificação, uma maior taxa de resfriamento permite menor tempo para que o crescimento dos subgrãos ocorra durante solidificação, resultando em uma estrutura de subgrãos mais refinada. Além disso, a energia mecânica fornecidas pela vibração, aumenta a deformação plástica e a densidade das discordâncias. Então as discordâncias com alta densidade se combinarão para criar sub-limites de pequeno ângulo. Devido à existência de subgrãos mais refinados, os mesmos atuam como barreiras aos deslocamentos das discordâncias melhorando as propriedades mecânicas, como por exemplo a tenacidade. Portanto, a vibração induzida à soldagem favorece a recristalização, melhorando as propriedades do cordão de solda.

O método de soldagem com vibração simultânea produziu alguns outros efeitos benéficos além de refino de grãos, como a remoção dos gases promovida pela agitação da

poça de fusão, diminuindo a porosidade no cordão de solda. (PRAKASH, TEWARI, SRIVASTAVA, 2010, apud QINGHUA, LIGONG, CHUNZHEN, 2008)

O processo de solidificação no metal de solda produz a estrutura de solidificação. O processo de solidificação depende o gradiente térmico, a velocidade de solidificação e do teor de elementos de liga presentes. Estas estruturas podem ser planares, celulares, colunares dendrítico e equiaxial. O processo de solidificação pode mudar de planar para celular, dendrítico colunar e equiaxial dendritico através da zona do metal de solda, conforme ilustrado na figura 7. (BALASUBRAMANIAN, RAGHAVENDRAN, BALUSAMY, 2011)

Figura 7 - Processos de solidificação no metal de solda.



Fonte: adaptado de KOU (2003)

Na figura 7, segundo Kou (2003) pode-se observar a ilustração de três grãos orientados para crescer epitaxialmente a partir da linha de fusão. A uma curta distância da linha de fusão, a solidificação muda para o modo celular. Mais longe da linha de fusão, a solidificação muda para modo dendrítico colunar. Perto da linha central da solda, os dendritos equiaxiais nucleam e crescem, bloqueando o dendritos colunares.

A formação de grãos equiaxiais refinados na zona de fusão tem duas vantagens principais. Primeiro, os grãos finos ajudam a reduzir a suscetibilidade de trincas à quente durante a soldagem. Em segundo lugar, grãos finos podem melhorar as propriedades mecânicas do cordão e devido a isso, esforços são feitos para tentar refinar a zona de fusão da solda. (BALASUBRAMANIAN, RAGHAVENDRAN, BALUSAMY, 2011)

Prakash, Tewari, Srivastava, (2010, apud Dvornak et al., 1991) enquanto estudavam a solidificação sob condições vibratórias concluíram que o refinamento dos grãos observados foi devido à menor energia necessária para a nucleação da fase sólida. No entanto, a remoção rápida de calor latente de solidificação da interface sólido-líquido desempenhou um papel menor no grão refinamento sob vibração.

Lu Qinghua, Chen Ligong e Ni Chunzhen (2008) estudaram que a microestrutura mudou drasticamente depois do V-SAW (nome dado ao processo de soldagem por Arco Submerso com vibração simultânea à soldagem). A energia vibratória quebra os grãos dendríticos crescentes na solda e na ZAC. Quanto maior a velocidade da poça de fusão, maior rapidez da remoção de calor durante a solidificação. Assim, quanto maior a taxa de resfriamento, mais os núcleos entram em ação e menor o tamanho dos grãos.

Kainth, Deepak, Gupta (2015 apud Singh et al., 2015) estudaram a solidificação sob vibração. Os resultados indicam que as juntas soldadas com condição vibratória possuíam relativamente alta resistência à tração final, alta limite de escoamento sem perdas significativas de ductilidade.

Metalograficamente, juntas soldadas sob vibração, possuem microestrutura relativamente mais fina, resultado da fragmentação dendrítica originada na agitação da poça de fusão durante a realização do cordão de solda. (BONAL, 2008; WEITE, 1999).

Segundo QINGHUA et al. (2006), o tratamento com aplicação da vibração durante a soldagem (VWC) proporciona: Redução da distorção da junta oriunda da soldagem, redução de trincas no cordão de solda, aumento da vida em fadiga, redução da porosidade, redução da necessidade do pré-aquecimento, maior profundidade de penetração da solda, processo de soldagem com maior velocidade, melhoria na qualidade do cordão de solda, redução do aporte térmico, melhores níveis de ductilidade da junta e melhoria da tenacidade.

Hussein et al (2011) observaram que no tratamento VWC, onde a vibração é aplicada durante a soldagem, cada vez que se aumenta a frequência, aumenta a ductilidade. Corpos de prova na condição VWC não fraturaram nos testes de flexão. Os mesmos, sem vibração, apresentaram uma trinca de 3 mm. Cordão de solda com VWC numa frequência de 3 Hz apresentou trinca, porém em um tamanho bem menor. Soldagem com VWC numa frequência de 5 Hz não apresentou propagação da trinca devido ao efeito da vibração simultânea ter redistribuído a energia. No mesmo processo, utilizando-se a frequência de 10 Hz, a trinca desapareceu. Os testes também mostram que na condição VWC, o limite de resistência à tração aumentou quando comparado às amostras sem vibração.

Wu (1999) realizou um experimento variando as frequências de vibração aplicadas à soldagem. Na frequência de ressonância de 58 Hz, as dendritas são menores do que os grãos quando vibrados, e se orientam em diferentes direções. Na frequência sub-ressonante de 48 Hz, os grãos crescem e se orientam de maneira mais aleatória e possuem um tamanho menor (grãos mais refinados). Em seus estudos, há uma divisão entre macro e micro vibração, e consequentemente macro e micro deformação. A vibração é uma energia transferida à peça e a macro vibração é responsável pela movimentação do material ou peça. A micro vibração é responsável pelos tremores internos da estrutura. Na frequência ressonante, a macro vibração é maior do que a micro, pois toda a energia transferida é fornecida para a movimentação da peça. Na frequência sub-ressonante, um terço da energia é direcionada à macro vibração e o restante é transferida à micro vibração que alcançam maior magnitude.

Desta forma, na frequência sub-ressonante, a peça é afetada simultaneamente pelas macro e micro vibrações, dando uma aparência caótica na superfície da poça de fusão. Quando a vibração é aplicada, o fluxo de calor é perturbado e o alinhamento dos grãos é aleatório. As dendritas que crescem, podem quebrar-se e gerar novos grãos menores. Após se separarem do grão principal (Grão “mãe”), os grãos resultantes (“grãos filhos” com tamanho reduzido) continuam a propagar na direção original do crescimento.

Portanto, a vibração é eficaz na agitação da poça de fusão e na influência da direção de solidificação, tendo os corpos de prova testados níveis de dureza menores quando comparados ao processo sem vibração. (WU, 1999)

2.5 MODIFICAÇÕES NA MICROESTRUTURA SOB VIBRAÇÕES

Segundo Pucko (2005 apud Adams, Berry, Klauba, 2005), o tratamento mecânico para alívio de tensões realizado após a soldagem, não fornece energia suficiente para haver alterações microestruturais. Portanto, as vantagens das alterações microestruturais nos cordões de solda, só serão obtidas no tratamento mecânico realizado simultaneamente à soldagem, atuando no aquecimento e resfriamento da junta.

Segundo Singh, Patel, Prasad (2016), ao se comparar a microestrutura de peças vibradas e não vibradas, constatou-se alterações nas peças tratadas devido as dendritas do metal de solda, durante a solidificação, tiveram um obstáculo para o crescimento, isto é, uma força oposta gerada pelas vibrações mecânicas induzidas na poça de solda, não permitiu que essas dendritas crescessem em toda a sua extensão.

Taylor et al., (2017 apud Kainth, Deepak, Gupta, 2015), resumiram o efeito da vibração durante a soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas dos cordões. Os resultados das diversas literaturas pesquisadas pelos autores, sugerem que a vibração durante a soldagem beneficia a estrutura de grãos e propriedades mecânicas das peças tratadas. A fragmentação e separação das dendritas e a taxa de resfriamento total, foram identificados como dois fatores principais que contribuem para o refinamento do grão das microestruturas vibradas.

2.6 DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA DO ALÍVIO MECÂNICO POR VIBRAÇÃO

O alívio de tensões residuais por vibração teve sua origem antes da década de 1950, ainda no período da segunda guerra mundial. Os avanços se intensificaram após a crise energética ocorrida nos anos 1960.

Os alemães e norte-americanos estudavam a aplicação de vibração nas asas dos aviões alemães e cascos dos navios norte-americanos, tentando levá-los à quebra. (HEBEL, 2004).

A predição era que se aprovados nos testes, não falhariam em serviço. Estes testes de fadiga levaram os cientistas e engenheiros a concluir que eles poderiam usar as vibrações para eliminar as tensões residuais de peças soldadas e fundidas de uma maneira diferente do tratamento térmico convencional (MARTINS, 2012).

Na época dos primeiros estudos utilizando-se vibrações, os equipamentos de alívio de tensão não eram credenciados como confiáveis, sendo alvo constante de pesquisas para a melhoria do processo. (BONAL, 2015).

Com a evolução dos estudos, os pesquisadores concluíram que para se obter os resultados esperados, era necessário conhecer qual a frequência harmônica do objeto tensionado e utilizar uma frequência sub-harmônica no tratamento. Com a aplicação de vibrações sub-ressonantes, é promovida a redistribuição das tensões presentes no componente, levando a curva harmônica ou ressonante a se movimentar. Quando o corpo está livre das tensões residuais ocorre a estabilização da curva na localização de sua frequência natural (BONAL, 2015).

Esta frequência é mantida para permitir que ocorra a redistribuição e o equilíbrio das tensões internas, permitindo uma redução significativa dos valores das mesmas. (BONAL, 2015; HEBEL, 2004).

No início do desenvolvimento da tecnologia, havia certa dificuldade de se obter resultados confiáveis e que fossem constantes. Assim, depois de reconhecer tal fato, engenheiros da empresa Bonal, por meio de pesquisas e estudos, descobriram que o segredo do sucesso para o alívio de tensão por vibração estava em dois princípios (HEBEL, 2004):

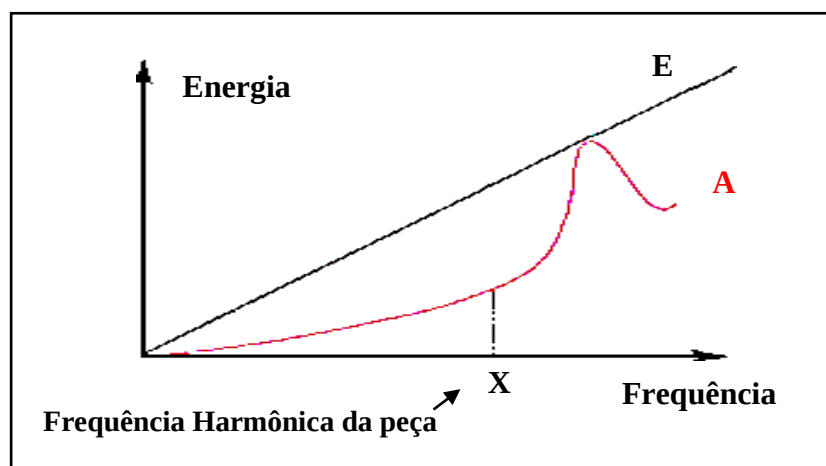
- Vibrações aplicadas ao metal na zona Sub-harmônica.
- Acompanhamento da frequência harmônica. Se um componente tem tensão térmica em que a frequência da curva harmônica vai primeiro mudar e depois se estabilizar em sua condição natural.

A aplicação da vibração baseia-se na utilização de onda na forma senoidal. A energia mecânica é induzida para criar uma amplitude de vibração que está abaixo da amplitude harmônica, dentro de um tempo de permanência que varia de 20 minutos até algumas horas, dependendo da resistência do componente, do seu módulo de elasticidade, das suas dimensões, e de sua massa e, esta é mantida para permitir que ocorra a redistribuição e o equilíbrio das tensões internas (BONAL, 2015; HEBEL, 2004).

Quando a vibração é aplicada ao componente tensionado, pode-se encontrar a curva de ressonância (A) em um gráfico da amplitude pela frequência., como mostra a figura 8.

Este gráfico apresentará um pico que será denominado pico de ressonância e corresponde a frequência de ressonância ou frequência natural. A energia de vibração, é induzida e absorvida pelo metal com uma frequência logo abaixo do pico. Define-se que esta é a frequência apropriada para obter os melhores resultados, pois vibração na frequência de pico de amplitude provoca no material, deformação plástica e fadiga. (HEBEL, 2004).

Figura 8 - Representação da energia de vibração em função da frequência.



Fonte: adaptado de BONAL (2018)

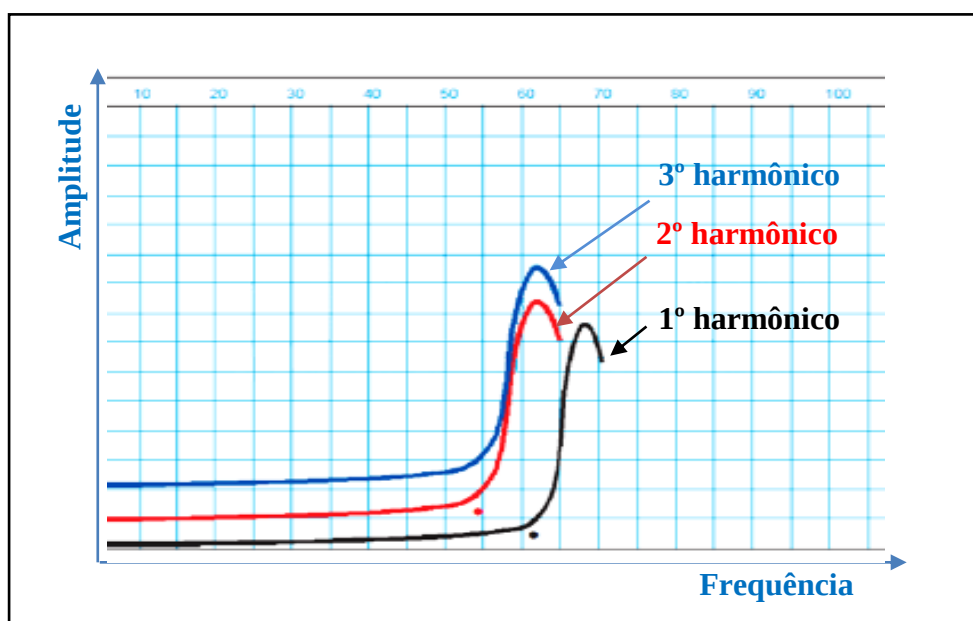
Na Figura 8, a linha reta “E” representa o aumento constante da energia vibracional, bem como a frequência de vibração. A linha curva “A” representa o perfil de amplitude de um componente de metal vibrando em relação ao mesmo intervalo de frequência. A curva do componente metálico inicialmente resiste à energia vibracional como pode ser observado na figura 8. (HEBEL, 2004).

Em seguida, em certa frequência, a energia supera a resistência e a amplitude aumenta rapidamente ou "salta" para criar uma condição harmônica (Ressonância). O diferencial máximo de energia aplicada (amplitude) é a uma frequência imediatamente antes da harmônica, representada no gráfico da figura 8 como o ponto “X”. Essa frequência será utilizada para determinar o tempo de permanência da aplicação do processo (HEBEL, 2004).

Se a frequência harmônica mudar após aplicação da vibração, então o único valor que pode alterar é a elasticidade, o que significa que a tensão residual foi reduzida. (BONAL, 2008; HEBEL, 2004). Este processo foi patenteado pela empresa norte americana Bonal Inc. que o denominou de Meta-Lax (Relaxamento do metal).

Através de uma frequência sub-harmônica produzindo um movimento acelerado dos átomos no cristal, estes apresentam uma tendência a elevar sua energia interna que conseqüentemente restauram a configuração inicial da matriz cristalina (BONAL, 2008; HEBEL, 2004).

Figura 9 – Curvas de ressonância em resposta aos harmônicos de uma amostra.



Fonte: adaptado de BONAL (2018)

Na figura 9 observa-se a resposta inicial da amostra ao 1º harmônico (linha na cor preta) através da curva de ressonância, frequência natural ou harmônica. Com a aplicação de vibrações, ocorre a redistribuição das tensões, levando a curva harmônica ou ressonante a se movimentar, apresentando um novo comportamento, fato que pode ser observado com a curva na cor vermelha.

No momento em que o corpo está livre das tensões residuais, ocorre a estabilização da curva na localização de sua frequência natural. (BONAL, 2015).

Quando a peça está totalmente aliviada de tensões térmicas, a curva harmônica vai se estabilizar em seu estado de frequência natural, observada na curva na cor azul.

Através de cálculos matemáticos e ensaios em laboratório, foram observados que as vibrações suaves que são utilizadas no processo de alívio vibracional, são mais eficientes do que as vibrações com altas amplitudes (BONAL, 2008; SHANKAR, 1982).

Assim como a empresa americana Bonal, a SRE Co. (Stress Relief Engineering Company), de mesma nacionalidade, também é uma das empresas que atuam no mercado oferecendo o tratamento vibracional de alívio de tensões residuais desde sua criação em 1962.

A empresa SRE diferentemente da empresa Bonal, usa o método de alívio das tensões residuais por vibração ressonante, enquanto que a Bonal utiliza a frequência sub ressonante.

O tratamento de alívio de tensões residuais oferecido pela SRE, utiliza um processo denominado Formula 62 (nome comercial, usando como referência o ano de criação da empresa), onde as peças são submetidas a frequências baixas e alta amplitude por um período curto de tempo conforme o peso do conjunto tratado. As tensões residuais são reduzidas a níveis baixos promovendo o equilíbrio estático. (SRE - *Stress Relief Engineering Company*)

2.7 LIMITAÇÕES DO PROCESSO VIBRACIONAL.

Segundo a SRE (*Stress Relief Engineering Company*), o processo de alívio de tensões não é eficaz para materiais laminados a frio, extrudados, endurecidos por deformação e endurecidos por precipitação, e por isso não são recomendados pela empresa.

Objetos muito pequenos em grandes quantidades podem ser tratados termicamente em lotes com muito mais facilidade, a menos que o próprio processo térmico possa causar danos às peças tratadas.

O processo vibratório não altera as propriedades mecânicas ou metalúrgicas do material. Em alguns casos a alteração micro estrutural é desejável para se obter microconstituintes adequados às diversas aplicações.

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

2.7.1 Divergência de linha de pesquisa em relação ao alívio da tensão residual

O instituto de Soldagem Spawalnictwa (Polônia) a fim de aprofundar os estudos sobre o tratamento mecânico de alívio de tensões por vibração, realizou e publicou várias pesquisas onde afirmam que a eficácia do tratamento se refere apenas a estabilidade dimensional e não inclui a redução do nível de tensão residual como vantagem do processo.

Em algumas publicações do instituto polonês, foram realizados experimentos onde são feitas medições extensométricas durante o processo vibratório.

Segundo Sedek e Weglowsky, (2012), o fenômeno de ressonância não aumentou significativamente as amplitudes de tensões e leves deformações foram detectadas após o procedimento vibratório. As peças foram submetidas a cargas variáveis de diferentes amplitudes num experimento onde o processo de envelhecimento natural foi feito por 800 dias. Durante este período, através de extensômetros, se mediu as deformações nas regiões próximas à solda após os primeiros dias, depois se mediu após semanas e a cada 3 semanas e assim foi feito para se aumentar a confiabilidade nos estudos. Durante o envelhecimento natural, as peças de teste deformaram espontaneamente devido às tensões de soldagem. A deformação foi então referida como deformação retardada.

Sedek et. al. (2016) concluíram que o processo vibratório deve ser aplicado para se assegurar a estabilidade dimensional requerida dentro ou não do ciclo produtivo e que as reduções de tensões residuais são comparadas ao envelhecimento natural questionando as publicações dos fabricantes dos equipamentos, como as empresas Bonal e a SRE.

As tensões induzidas por vibrações aceleram processos de micro relaxamento e transformações de fase à temperatura ambiente e, como resultado, produz tensões retardadas que não estão sendo contempladas nas pesquisas e publicações dos fabricantes de equipamentos de vibração.

2.8 NORMAS DE FABRICAÇÃO E O ALÍVIO MECÂNICO DE TENSÕES RESIDUAIS

Os processos de fabricação inevitavelmente deixam tensões residuais nos materiais trabalhados e dependendo da criticidade da utilização, alguns deles necessitam de tratamentos que melhorem suas propriedades mecânicas para seus respectivos fins. (BONAL, 2008; SHANKAR, 1982).

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

Poucas informações sobre o alívio das tensões residuais tratadas mecanicamente são encontradas nas normas e códigos de fabricação. Nas normas AWS D14 / D14.1 e D14.4 M, encontra-se um tópico referente a VSR (alívio de tensões por vibração) apresentando um breve conteúdo sobre a técnica, citando que a mesma pode ser extremamente útil para a garantia da estabilidade dimensional durante o processo de fabricação e só será validada quando da aprovação pelo engenheiro responsável pelo processo e/ou projeto.

Quando previstos em contrato, os procedimentos de alívio por vibração deverão seguir as recomendações do fabricante do equipamento sendo necessários registros e monitoramento dos parâmetros do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Metal base

O metal base utilizado para confecção de todos os corpos de prova, foi fornecido em forma de chapa pela Universidade Estadual Paulista - Unesp – FEG.

Para verificar a composição química do metal base apresentada na tabela 1, foi utilizado o espectrômetro de emissão óptica SpectroMax do laboratório metalográfico pertencente a empresa Iochpe Maxion localizada em Cruzeiro/SP.

Tabela 1 - Composição Química do Metal Base.

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Al	% Cu	% Co
0,1230	0,2050	0,720	0,017	0,021	0,019	0,019	<0,002	0,056	0,015	0,005
% Ti	% Nb	% V	% W	% Pb	% B	% Sn	% Zn	% As	% Bi	% Ca
0,005	0,014	<0,001	0,026	0,0075	0,0006	0,0035	0,0041	0,005	<0,002	<0,0001
% Ce	% Zr	% La	% Fe							
<0,003	0,0024	<0,001	98,7							

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para se determinar o limite de resistência à tração do metal base (MB), mediu-se a dureza em quatro pontos de um corpo de prova preparado para o ensaio na máquina EMCOTEST modelo M4U 025 pertencente ao laboratório físico da empresa Iochpe Maxion.

Com o valor da dureza sendo obtido pela média das leituras dos pontos do metal base, utilizou-se a norma DIN EN ISO 18265:2013E – Conversão dos valores de dureza para materiais metálicos, tabela A1, página 13, para determinar o limite de resistência do material igual a 495 MPa.

Este valor do limite de resistência do MB será utilizado para se determinar a combinação dos consumíveis (Eletrodo – Fluxo) do processo de soldagem.

Conforme a análise química do material e determinação da resistência mecânica do mesmo, o aço foi classificado como Baixa Liga ASTM 841 Gr A, segundo as tabelas 1

(Requisitos Químicos, página 1) e 3 (Requisitos de tração, página 4) da norma ASTM - *Standard Specification for Steel Plates for Pressure Vessels, Produced by Thermo-Mechanical Control Process* (TMCP) – Especificação padrão para placas de aço para vasos de pressão, produzidos pelo processo de controle termo-mecânico.

3.1.2 Metal de Adição

De acordo com o limite de resistência do metal base (495 Mpa), escolheu-se a combinação Fluxo + Eletrodo (arame): F7A2-EL12 segundo classificação AWS 5.17/5.23 e as propriedades mecânicas desta combinação de consumíveis se encontram na tabela 2.

Conforme requisitos da soldagem, o limite de resistência da combinação dos consumíveis F7A2-EL12, possui valor superior ao metal base.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas da combinação dos consumíveis.

Combinação Fluxo-Arame	Condição	Limite Escoamento Mpa (Ksi)	Limite Resistência Mpa (Ksi)	Alongam (%)	Charpy		Classificação AWS 5.17/5.23
					J (ft.lbf)	°C (°F)	
L-50	Como soldado	480 (69)	590 (85)	29	45 (33)	-29 (-20)	F2A2-EM13K-H8
L-60	Como soldado	440 (64)	530 (75)	29	64 (47)	-29 (-20)	F7A2-EL12
L-61	Como soldado	480 (70)	590 (85)	28	54 (40)	-29 (-20)	F2A2-EM12K-H8
L-70	Como soldado	550 (80)	640 (93)	24	58 (43)	-18 (0)	F9A0-EA1-G

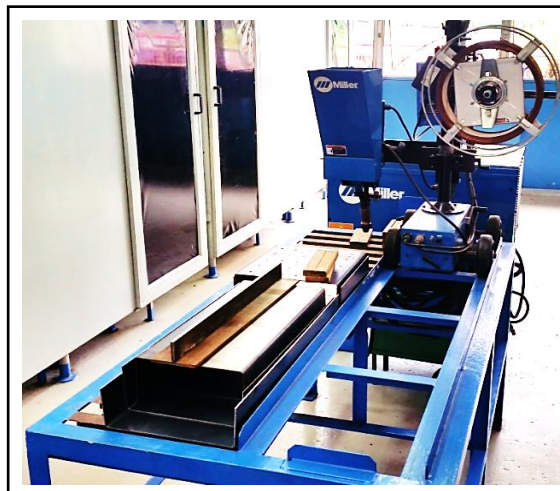
Fonte: adaptado GERDAU (2015)

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.2.1 Equipamento de soldagem

As soldagens de todos os corpos de prova, foram realizadas pelo processo Arco Submerso, utilizando uma máquina de solda inversora DC 800 do fabricante Miller Eletric de propriedade do Senai Taubaté. A figura 10 mostra a máquina de solda utilizada no experimento, bem como os demais acessórios necessários para a soldagem mecanizada, onde o trator se desloca sob trilhos com velocidade constante.

Figura 10 - Máquina de Solda: Fonte, trator e trilhos de deslocamento.



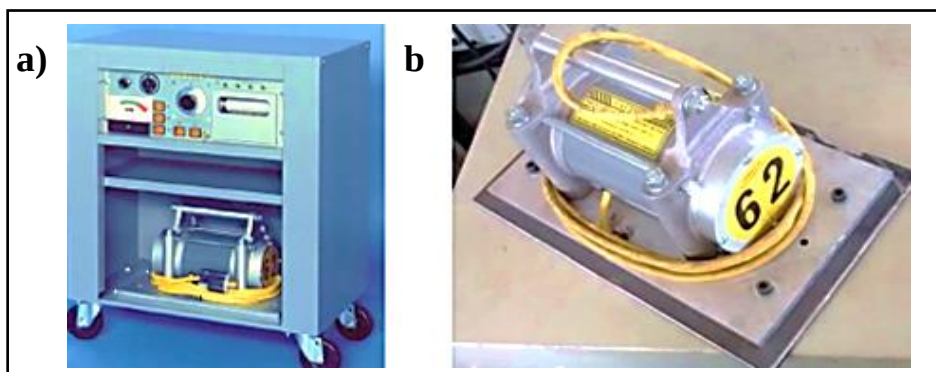
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.2.2 Equipamento de vibração

Foi utilizado o equipamento de vibração do fabricante SRE (*Stress Relief Engineering Company*) - Formula 62, fornecido e aplicado pela empresa EnergyArc.

O equipamento é composto do Indutor de vibração (oscilador), sensor de vibração (acelerômetro) e painel de controle com fonte estabilizadora, onde se regula a frequência com a qual é fornecida a vibração. A figura 11 mostra o equipamento utilizado para fornecer vibrações durante a soldagem e imediatamente após a realização dos cordões de solda.

Figura 11 - Equipamento de vibração SRE: a) painel de controle. b) Indutor de vibração.



Fonte: SRE (2018).

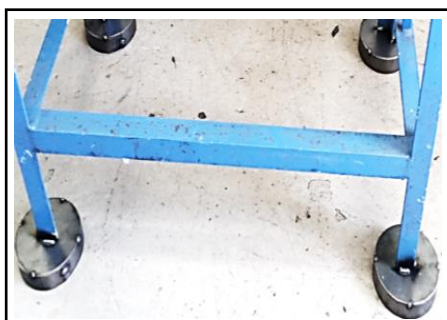
Especificações técnicas do equipamento de vibração:

- Dimensões (altura x largura x profundidade): 66 x 41 x 84 cm;
- Peso: 76 Kg;
- Potência: 750 W
- Tensão de entrada: Monofásica 220 V – 60 Hz.

3.2.3 Sistema de isolamento

Deve-se isolar a mesa utilizada para que toda a energia fornecida pelo oscilador seja transferida sem perdas aos corpos de prova. Usou-se um conjunto de isoladores de borracha, fornecidas pela EnergyArc, com dureza de aproximadamente 20 Shore A. Para assegurar que os isoladores não se movimentariam com a aplicação da vibração, foram confeccionados na caldeiraria do Senai Taubaté, quatro suportes redondos de aço que foram soldados nos pés da mesa e que abrigaram os isoladores mostrados nas figuras 12 e 13.

Figura 12 - Adaptação nos pés da mesa utilizada no experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 13 - Pés da mesa com os isoladores de borracha.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Preparação dos corpos de prova

A chapa fornecida para a execução da parte experimental, foi cortada em uma serra de fita do fabricante ROMARFRA modelo RMF 400-S no laboratório de usinagem do DMT/FEG/UNESP de modo a formar uma junta em ângulo (junta “T”)

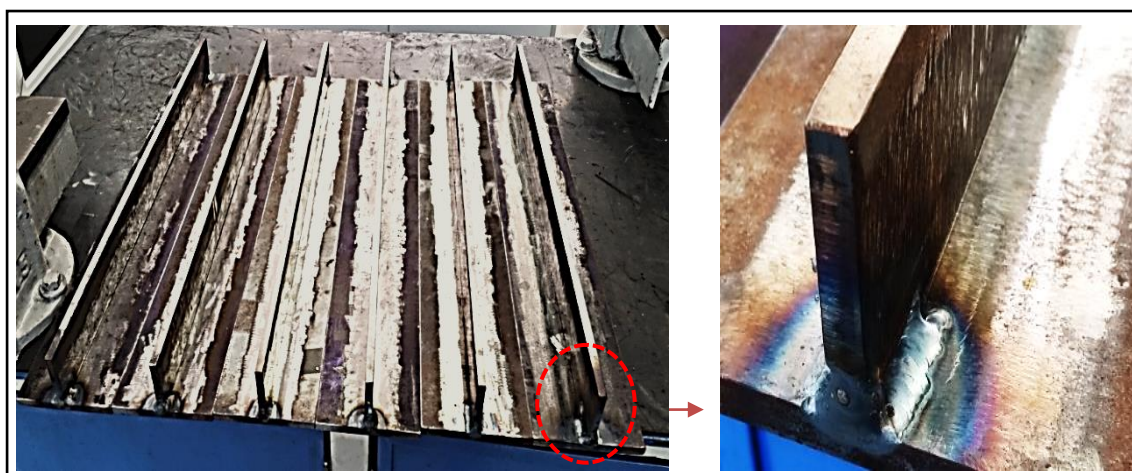
Esta configuração de junta foi escolhida devido à pouca literatura da mesma soldada sob vibração e com vibração após a soldagem, e também pela fixação dos componentes no dispositivo de montagem, garantindo que a vibração fosse transmitida de forma efetiva à junta.

Com a finalidade de se garantir a planicidade na região de montagem, após o corte, as chapas foram fresadas na empresa E.X.P. (Cruzeiro) utilizando a fresadora do fabricante VEKER. As chapas após a operação de fresamento estão prontas para a montagem dos corpos de prova (cp).

A montagem dos cps foi feita pela caldeiraria do Senai – Taubaté, garantindo a perpendicularidade formada pela junta em ângulo.

Com a finalidade de se fixar os dois componentes da junta, foram dados quatro pontos de solda utilizando-se o processo de Eletrodo Revestido. O ponteamto foi realizado em cada lado da junta e em cada extremidade conforme demonstrado e detalhado na figura 14.

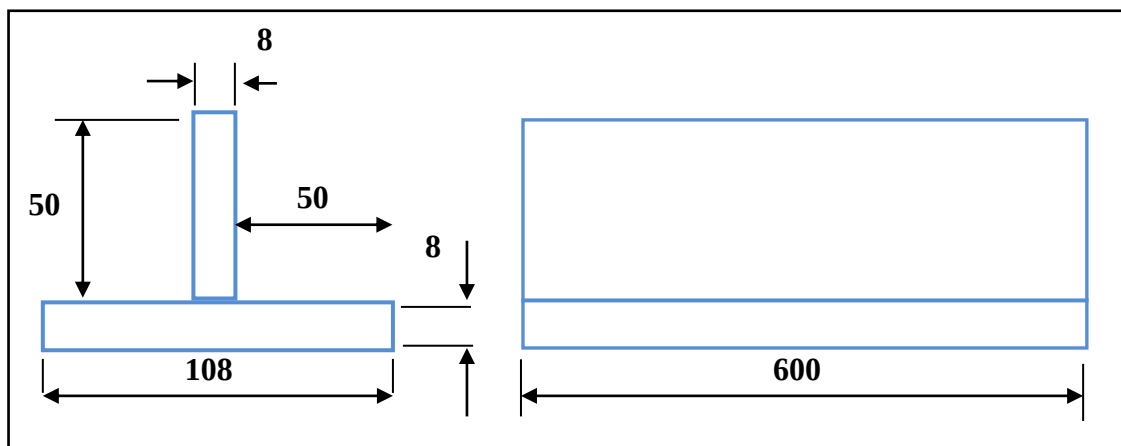
Figura 14 - Ponteamto para montagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após a preparação e montagem, os corpos de prova ficaram com as dimensões conforme a figura 15.

Figura 15 - Dimensões dos corpos de prova (mm).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.2 Planejamento do experimento

Para a avaliação da influência da vibração introduzida ao processo de soldagem, foi escolhido o processo convencional por Arco Submerso devido à mecanização do mesmo, onde o operador de soldagem apenas regula os parâmetros do equipamento, posiciona os corpos de prova, inicia o processo e supervisiona a soldagem durante a execução do cordão.

Desta maneira, exclui-se a variável habilidade do operador, visto que o mesmo necessitaria de um tempo hábil para adaptar-se à introdução de um novo processo ao convencional.

A preocupação com a repetibilidade dos resultados foi outro motivo na escolha da mecanização.

As amostras foram soldadas conforme descrito abaixo:

- Arco submerso com vibração simultânea à soldagem – VWC.
- Arco submerso com vibração imediatamente pós soldagem – VSR.
- Arco submerso convencional – Sem vibração.

3.3.3 Preparação do experimento

Na parte de baixo da mesa onde foram soldados os corpos de prova, fixou-se a placa base e o indutor utilizado para fornecer a vibração ao processo de soldagem, conforme figura 16.

Figura 16 - Fixação do indutor de vibrações.



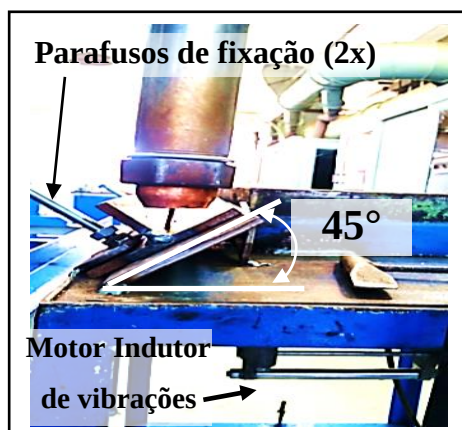
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.4 Suporte para posicionamento dos corpos de prova

Também na caldeiraria do Senai – Taubaté, foi confeccionado um suporte de chapas de aço contendo dois parafusos de fixação para receber e travar os corpos de prova permitindo a soldagem na posição plana, conforme figura 17.

Este procedimento foi necessário devido à desvantagem do Arco Submerso, que necessita de uma posição de soldagem que permita que o fluxo permaneça sobre a poça de fusão, protegendo-a contra contaminações.

Figura 17 – Suporte de chapas de aço a 45° para permitir posição plana de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Devido ao peso da mesa do experimento ser muito leve, foi sugerido pela empresa EnergyArc que se acrescentasse massa ao conjunto a fim de se obter melhores resultados dos tratamentos vibracionais. Um bloco de aço pesando aproximadamente 100 Kgf, foi fixado por pontos de solda sobre a mesa mostrado na figura 18.

Figura 18 – Bloco de aço, pontado sobre a mesa para aumentar massa do conjunto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.5 Testes preliminares de soldagem

Com o objetivo de se avaliar os parâmetros de soldagem, foram feitos testes preliminares da soldagem demonstrados nas figuras 19 e 20.

Figura 19 - Testes preliminares dos parâmetros de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 20 – Aspecto visual - Cordão de solda preliminar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

3.3.6 Determinação da frequência de ressonância

Após a instalação do oscilador no dispositivo de montagem, procurou-se determinar a frequência natural ou de ressonância do conjunto. Primeiramente, foram feitos testes à uma baixa frequência de vibração para análise do sistema.

Inicialmente aumenta-se, através do potenciômetro, demonstrado na figura 21, a frequência de vibração que é induzida de forma gradativa, monitorando-a no painel de controle do equipamento.

Figura 21 - Painel de controle do equipamento de vibrações.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

No momento em que o ponteiro da figura 21, que está se deslocando para a direita indicando o aumento da frequência, começar a registrar valores menores, é determinada a frequência de ressonância do conjunto. Segundo o fabricante, o melhor resultado de alívio de tensão, é obtido ao utilizar a frequência na máxima amplitude.

O equipamento identifica esta frequência quando aumenta a rotação do motor fixado abaixo da mesa. Quanto maior a rotação, maior a amplitude da frequência registrada pelo ponteiro de sensibilidade do acelerômetro da figura 21.

A frequência de ressonância registrada pelo equipamento foi de 46 Hz.

Para o processo mecânico de alívio de tensões que é realizado imediatamente após a soldagem (VSR), o tempo de tratamento foi determinado pelo gráfico da figura 22. Utilizando o peso de aproximadamente 150 Kgf para todo o conjunto, tem-se 7 minutos de aplicação da vibração pós solda.

Figura 22 – Relação Peso e Tempo de tratamento.



Fonte: adaptado de SRE (2018).

3.3.7 Soldagem dos corpos de prova

Com o objetivo de se comparar os processos para avaliar a influência da vibração introduzida à soldagem, usou-se as mesmas especificações e parâmetros de regulação para todas as amostras do experimento.

Em todos os corpos de prova foram feitos dois cordões de solda, um em cada lado da junta em ângulo. Ao primeiro cordão, identificou-se no corpo de prova a letra A, e ao segundo com a letra B.

Com base nos ajustes realizados nos testes preliminares, usou-se os seguintes parâmetros e especificações do procedimento de soldagem:

- Corrente de soldagem: 350 A
- Tensão: 33 V
- Polaridade inversa (+)
- Corrente Contínua
- Eletrodo EL-12 com diâmetro 2,4 mm
- Fluxo ativo F7A2
- Velocidade de soldagem (velocidade do carrinho deslocador): 300 cm/min

Os corpos de prova 1 e 2 (CP1 e CP2) foram soldados pelo processo Arco Submerso e a vibração na frequência de 46 Hz foi introduzida durante o período de realização dos cordões de solda, processo denominado VWC (*Vibratory Weld Conditioning*).

Os corpos de prova 3 e 4 (CP3 e CP4) foram soldados pelo processo Arco Submerso e a vibração na frequência de 46 Hz foi introduzida imediatamente após soldagem por um período de 7 minutos conforme o gráfico da figura 22, caracterizando o processo denominado VSR (*Vibratory Stress Relief*).

Os corpos de prova 5 e 6 (CP5 e CP6) foram soldados pelo processo Arco Submerso sem vibrações, sendo este, utilizado como referência.

3.8 CARACTERIZAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

Na avaliação das deformações decorrentes da soldagem, utilizou-se a digitalização dos corpos de prova realizada na metrologia da empresa Iochpe Maxion.

O equipamento utilizado na digitalização de todos os corpos de prova foi o braço FARO modelo CAM 2 Measure X conforme figura 23, com incerteza de medição de $\pm 0,0035$ mm, em conjunto com o software GEOMATIC STUDIO 10 para geração das imagens.

A coleta de dados para a geração das imagens pode ser observada na figura 24. Para tal finalidade, seguiu-se o procedimento:

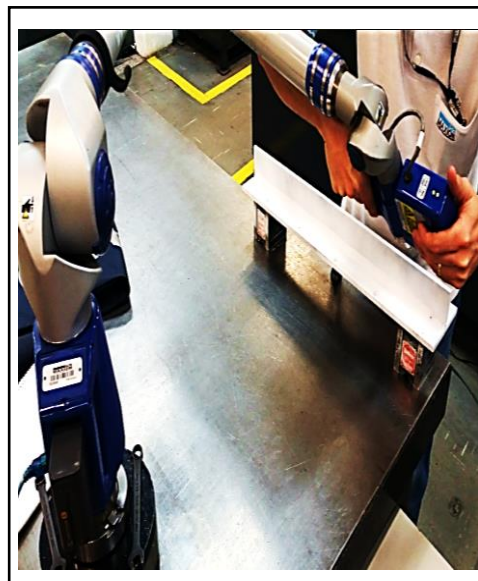
- Limpeza das superfícies utilizando pano com álcool.
- Aplicação de Revelador para ensaios não destrutivos (END), não aquoso, para deixar na cor branca a superfície a ser digitalizada.
- Digitalização conforme figura 25.

Figura 23 - Braço Faro



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 24 – Coleta dos dados.

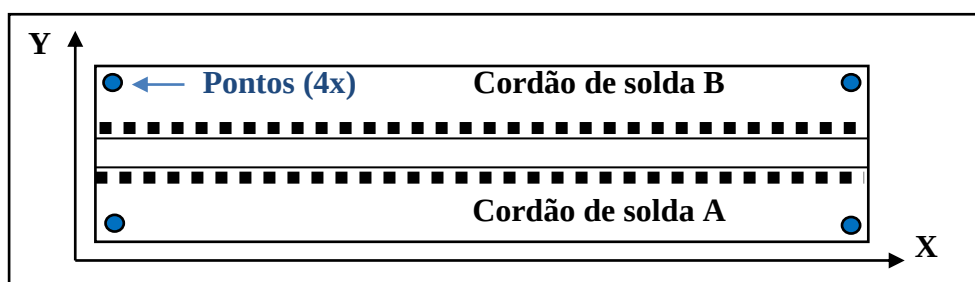


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para a coleta de dados e digitalização dos corpos de prova, são necessários o nivelamento para criar uma superfície e o alinhamento para se estabelecer o ponto de referência.

O nivelamento foi feito através dos quatro pontos na parte superior dos corpos de prova conforme indicados na figura 25.

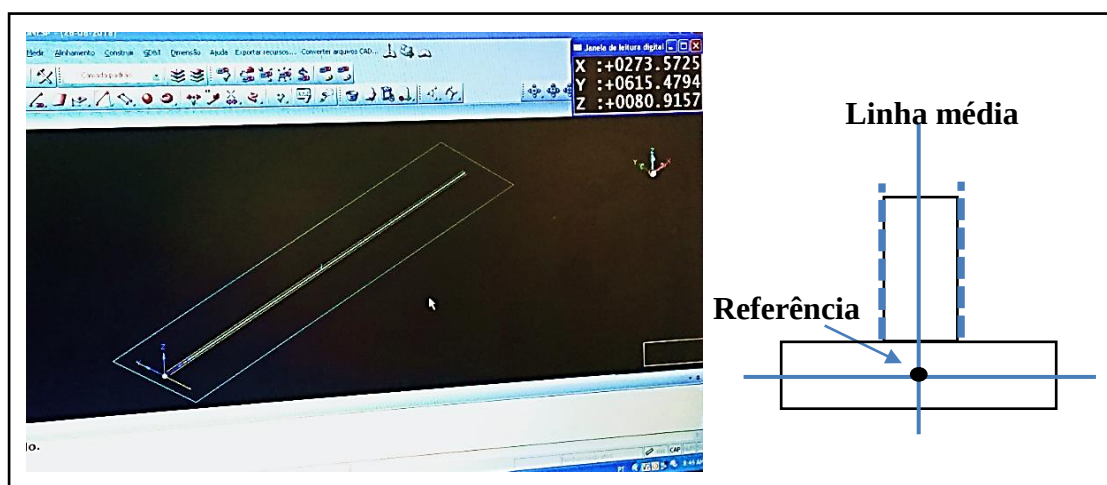
Figura 25 - Localização dos pontos de nivelamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

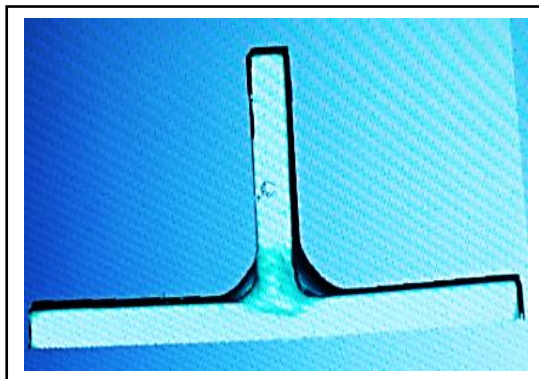
Para o alinhamento na coleta de dados, construiu-se 2 linhas verticais para criar uma linha média que fará a intersecção com a linha horizontal criando um ponto de referência conforme mostrado na figura 26. A digitalização gera células de captura, e após o tratamento dos dados, as células se transformam em pontos. Com a finalidade de diminuir o nível de ruídos da coleta, os pontos foram organizados e ordenados, sendo convertidos em superfície conforme apresentado na figura 27.

Figura 26 - Alinhamento e criação da referência para medição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

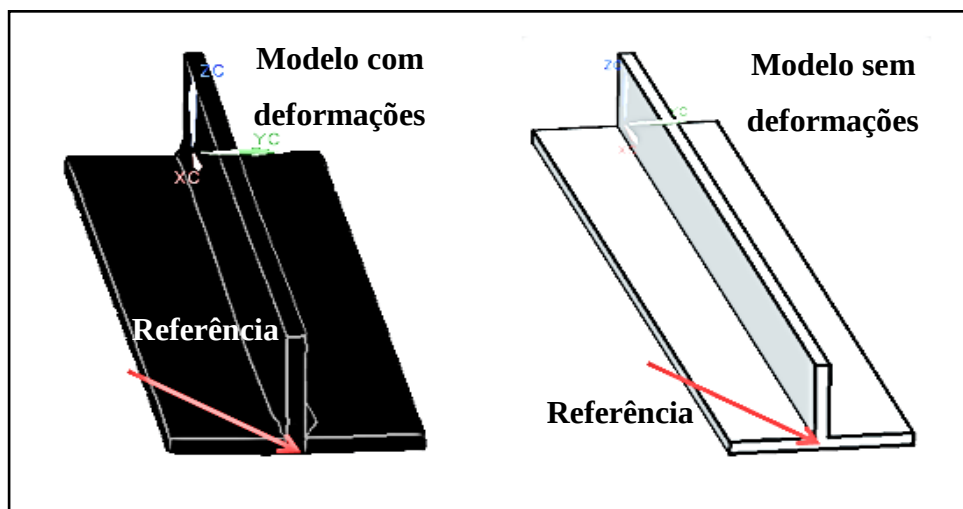
Figura 27 - Superfície gerada após digitalização.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Após a digitalização gerar as superfícies dos corpos de prova deformados pelo processo de soldagem, as imagens foram sobrepostas através do software NX – SIEMENS, utilizando-se como referência o modelo matemático com as dimensões iniciais (antes da soldagem) conforme figura 15. Para a sobreposição das imagens dos modelos com deformações e sem deformações, tomou-se como referência os pontos indicados na figura 28.

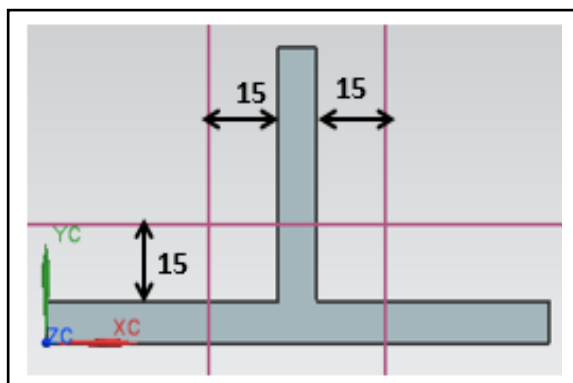
Figura 28 - Referência para sobreposição dos modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nos modelos matemáticos das superfícies geradas a partir dos corpos de prova, foram feitos três cortes utilizando-se planos paralelos às superfícies perpendiculares da junta “T”, a uma distância de 15 mm das superfícies horizontal e vertical conforme ilustrados na figura 29.

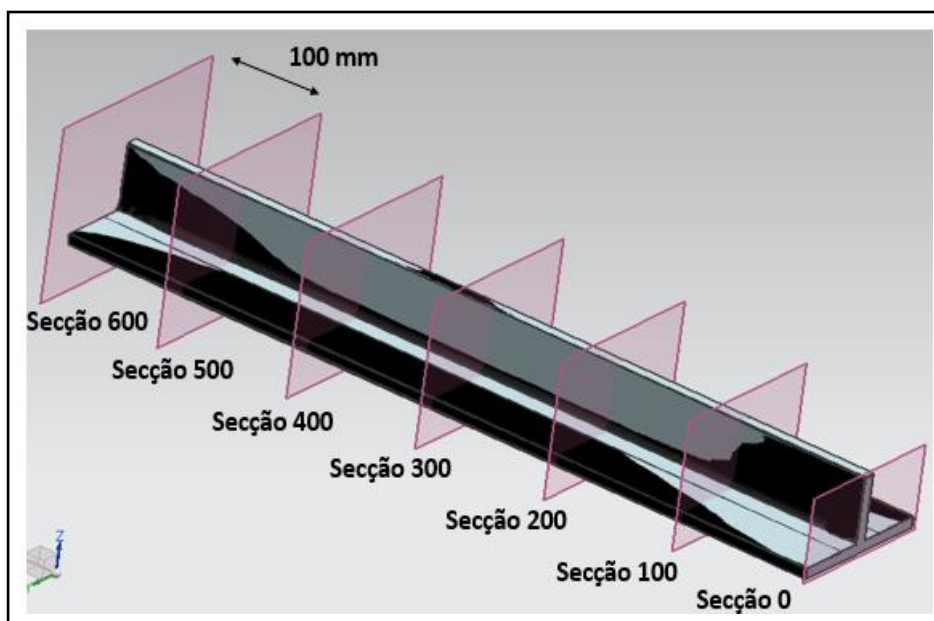
Figura 29 - Localização dos cortes dos planos perpendiculares da junta



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para avaliar as deformações ao longo do comprimento de 600 mm, os corpos de prova foram seccionados a cada 100 mm, de acordo com a figura 30, formando as secções 0, 100, 200, 300, 400, 500 e 600.

Figura 30 – Seccionamento a cada 100 mm.



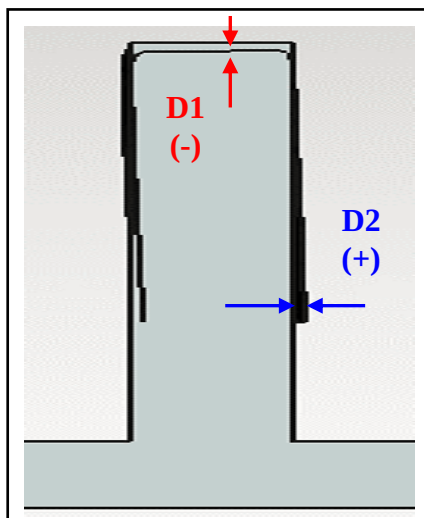
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Ao se sobrepor as imagens, são gerados valores dos desvios dos corpos de prova em relação ao modelo usado como referência. Na figura 31 é demonstrado como foram obtidos os valores juntamente com a convenção dos sinais.

À dimensão D1 da figura 31, foi atribuído valor negativo, pois a linha do corpo de prova digitalizado após deformação, encontra-se abaixo da linha do modelo de referência.

À dimensão D2 da figura 31, foi atribuído valor positivo, pois a linha do corpo de prova digitalizado após deformação encontra-se à frente da linha do modelo de referência

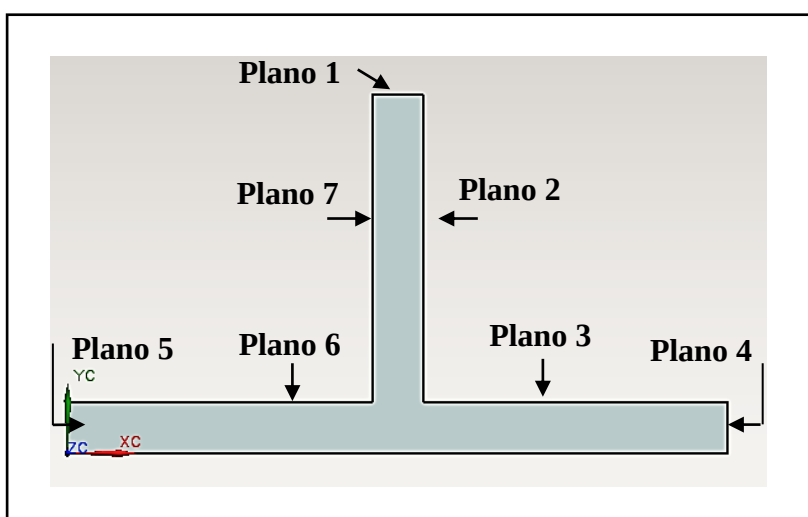
Figura 31 - Obtenção dos desvios dos valores e convenção de sinais



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Para a análise das deformações em diferentes regiões dos corpos de prova, foi definido sete planos conforme mostrado na figura 32.

Figura 32 - Localização dos planos de análise



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.9 PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA

As amostras para os ensaios de Macrografia, Micrografia e Micro dureza, foram preparadas no laboratório metalográfico da Iochpe Maxion. Usou-se a mesma preparação para todos os ensaios realizados. Foram selecionados os seguintes corpos de prova para os ensaios:

- CP2 – Soldagem por Arco Submerso com vibração simultaneamente à soldagem.
- CP4 – Soldagem por Arco Submerso com vibração imediatamente após à soldagem.
- CP6 – Soldagem por Arco Submerso sem vibração.

3.9.1 Extração das amostras

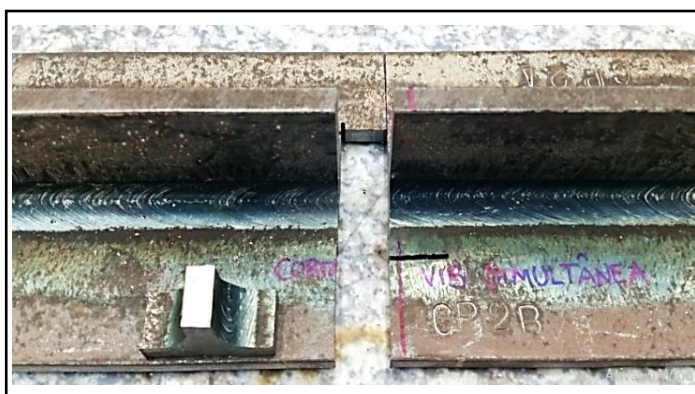
Utilizou-se a serra de fita mostrada na figura 33 para as extrações das amostras realizadas no sentido transversal ao sentido de soldagem conforme figura 34.

Figura 33 – Corte transversal à solda



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 34 – Amostra após o corte, pronta para embutir



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.9.2 Embutimento

As amostras foram embutidas à quente com baquelite (resina na cor verde) na prensa de embutimento AROTEC PRE-40 Mi mostrada na figura 35.

Após esta operação, iniciou-se a etapa de lixamento utilizando-se uma sequência de lixas com as granulometrias: 220, 320, 600, 1200 e por fim 1500.

Todas as lixas foram utilizadas na politriz automática AROPOL 2V com rotação baixa. Tomou-se o cuidado de girar 90° as amostras a cada mudança de lixa com o objetivo de se eliminar todos os riscos do sentido da lixa anterior.

Figura 35 - Equipamentos usados na preparação das amostras

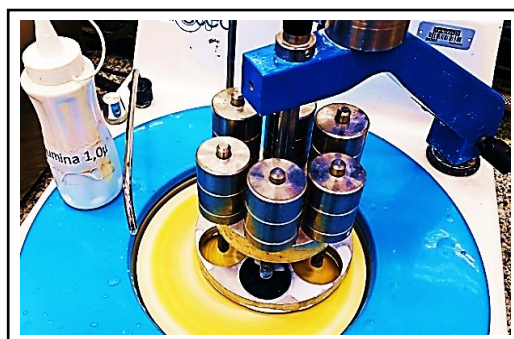


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.9.3 Polimento

Nesta etapa, foi utilizado um suporte mostrado na figura 36, sendo possível polir todas as amostras simultaneamente, diminuindo disparidades entre as amostras. O polimento foi feito na mesma politriz onde as amostras foram lixadas, usando-se o pano para polimento metalográfico e solução de alumina 1,0 μm e 0,3 μm .

Figura 36 - Polimento simultâneo com auxílio do suporte.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Após o polimento, as todas as amostras foram limpas com água corrente, álcool e algodão, e foram secas usando-se um secador com ar quente.

3.9.4 Ataque Químico

No ataque químico das amostras para micrografia, macrografia e micro dureza Vickers, utilizou-se o reagente Nital 2% (98% álcool etílico, 2% ácido nítrico) com um tempo de imersão de 25 segundos. Após o ataque, as amostras foram lavadas em água corrente e secas com ar quente do secador.

3.10 ANÁLISE DA MACROGRAFIA

As imagens para a análise da macrografia foram obtidas em um microscópio óptico motorizado Zeiss AxioImager Z2m mostrado na figura 37, do laboratório de imagens de materiais (LAIMat) do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP.

Foi feita uma matriz de 12 x 15 fotos, formando assim, a imagem macroscópica. Todas as imagens foram feitas em campo claro utilizando-se uma ampliação de cinco vezes.

Figura 37 - Microscópio óptico Zeiss Z2m.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Foi possível se determinar parâmetros geométricos e analisar descontinuidades dos cordões de solda utilizando-se o software AxioVision LE 64. O objetivo da análise macrográfica neste experimento foi verificar a influência da vibração na macroestrutura das amostras tratadas mecanicamente (CP2 e CP4), comparando-as com o processo de soldagem sem vibração (CP6).

3.11 ANÁLISE DA MICROGRAFIA

A finalidade da análise micrográfica para este experimento, foi verificar se a vibração exerce influência na microestrutura. A análise das amostras visa identificar quais microestruturas foram formadas, tamanhos de grão e ordenação dos mesmos nas regiões do metal base (MB), da ZAC e do metal de solda (MS).

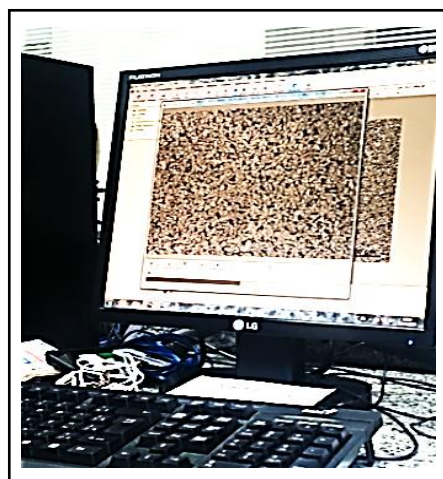
Usou-se o microscópio metalúrgico OLYMPUS modelo CK 40 M exibido na figura 38e o software AxionVision LE 64, mostrado na figura 39, na obtenção das imagens.

Figura 38 – Microscópio Metalúrgico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 39 - Obtenção das microestruturas.

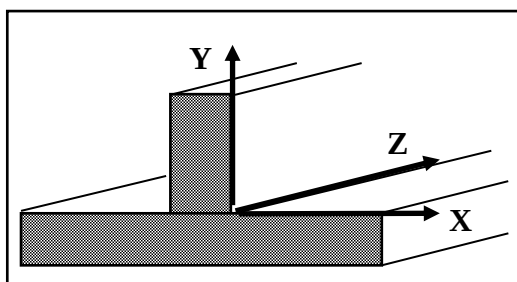


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Os sentidos de soldagem (eixo Z) e de corte para análise (eixos X e Y), estão demonstrados na figura 40. Foi definido e seguido um roteiro para obtenção das imagens, permitindo a análise das diferentes regiões conforme indica a figura 41.

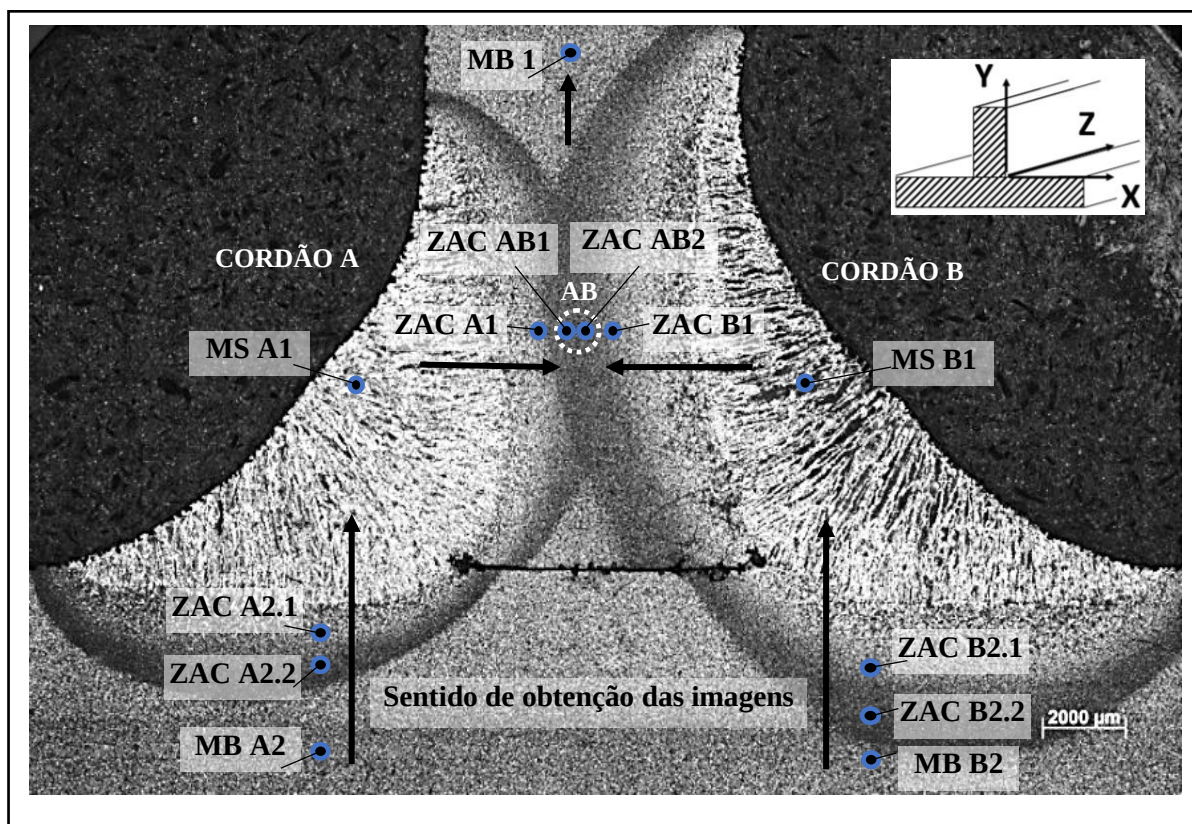
A região AB, na figura 41, é comum entre os dois passes de solda, sendo formada pelo ciclo térmico do primeiro e segundo cordões.

Figura 40 - Eixos de referência na localização dos pontos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 41 - Roteiro de análise das regiões dos cordões



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.12 ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS

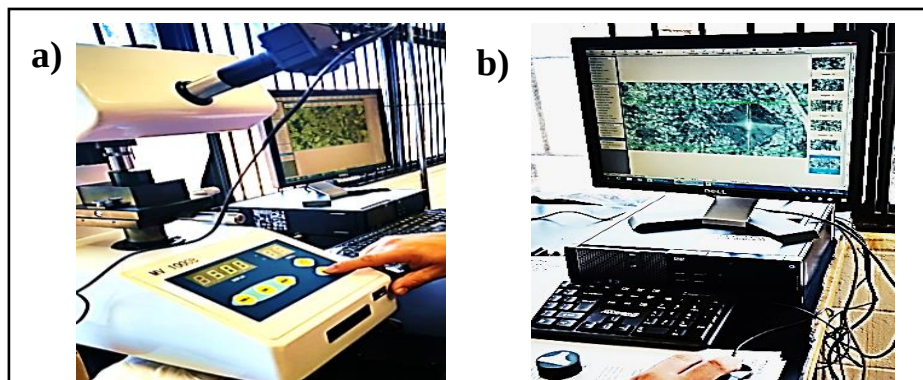
O teste de microdureza foi realizado no laboratório da Confab Tenaris localizada em Moreira César – Pindamonhangaba, utilizando o equipamento microdurômetro MV 1000 B mostrado na figura 42

Para se comparar as amostras avaliando a influência da vibração à soldagem, foi investigada a variação de dureza nas regiões do metal base (MB), da ZAC (Zona afetada pelo calor) e do metal de solda (MS). A localização dos pontos onde se realizou as medições (roteiro) com um penetrador de diamante de base piramidal, se encontra na figura 43.

A carga do ensaio realizado foi de 500 gf, aplicada durante o período de 15 segundos.

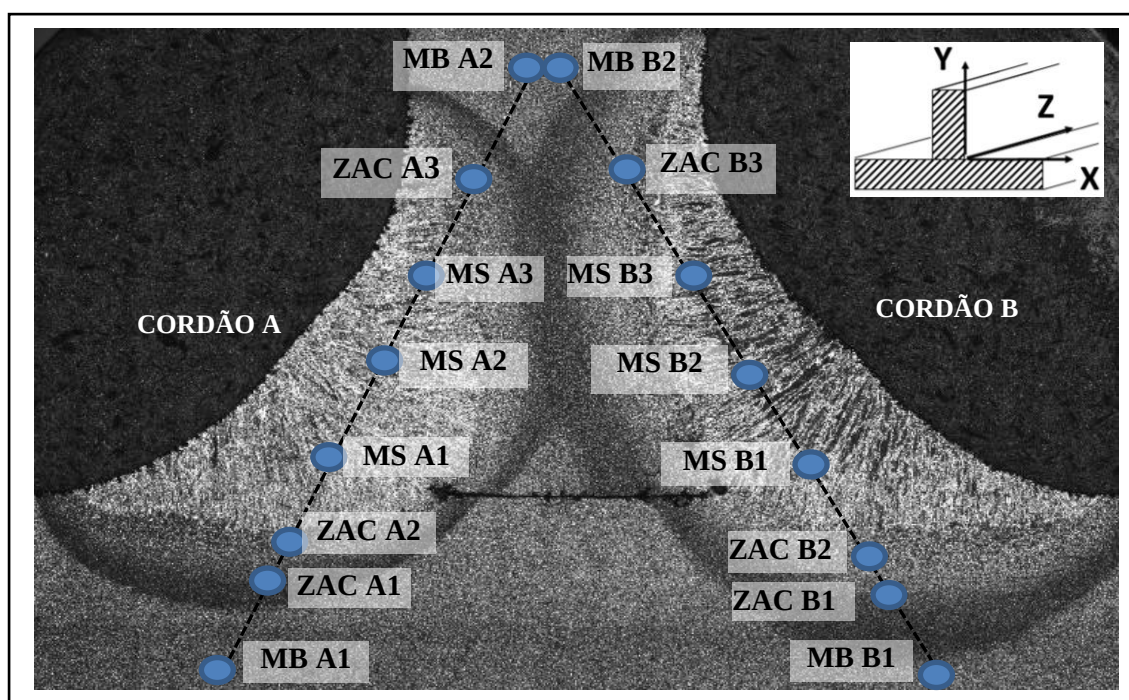
Os valores das medições são fornecidos em Vickers, obtidas através das leituras das diagonais da pirâmide formada pelo penetrador de diamante.

Figura 42 – a) Microdurômetro ; b) Visualização da impressão do penetrador piramidal



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 43 - Localização dos pontos de medição



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

3.13 ENSAIO VISUAL

É uma das mais antigas atividades nos setores industriais, e o primeiro Ensaio Não Destrutivo (END) aplicado em qualquer tipo de peça ou componente, estando associado a outros ensaios de materiais. ABENDI (2018).

É possível se analisar trincas, corrosão, deformação, alinhamento, cavidades, porosidade e mordeduras.

3.14 ENSAIO POR LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio não destrutivo (END) por líquido penetrante presta-se a detectar descontinuidades superficiais e que sejam abertas na superfície, tais como trincas, poros, dobras, podendo ser aplicado em todos os materiais sólidos e que não sejam porosos ou com superfície muito grosseira. ABENDI (2018).

Segundo a ABENDI (Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção), o ensaio é realizado nas seguintes etapas:

- Preparação da superfície - Limpeza inicial: Antes de se iniciar o ensaio, a superfície deve ser limpa e seca, isenta de resíduos de água, óleo ou outro contaminante. Os corpos de provas foram escovados com escova de aço e limpos usando pano com limpador de superfícies SKC-S do fabricante MAGNAFLUX.
- Aplicação do Penetrante: Geralmente na cor vermelha. Forma-se um filme sobre a superfície e por ação da capilaridade penetra na descontinuidade. Foi utilizado o penetrante visível, lavável à água SKL-WP do fabricante MAGNAFLUX.
- Remoção do excesso de penetrante: A superfície deve ficar isenta de qualquer resíduo.
- Revelação: Aplicação de um filme uniforme de revelador sobre a superfície. O revelador geralmente é um pó fino na cor branca. O revelador age absorvendo o penetrante das descontinuidades e revelando-as.
- Após a aplicação do revelador: As observações podem ser feitas através da mancha causada pela absorção do penetrante contido nas aberturas, objetos de avaliação.

3.15 ENSAIO POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

É a técnica de magnetização pela indução de um campo magnético gerado por um eletroímã em forma de U, que é apoiado na peça a ser examinada, onde é gerado um campo magnético.

Foi utilizado o equipamento tipo Yoke do fabricante MAGNAFLUX de propriedade da Unesp, modelo Y-6, 220V, 1 fase, 1,8 A, conforme mostrado na figura 44

Figura 44 - Equipamento para ensaio de Partículas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para o ensaio, foi utilizado o banho preparado MAGNAVIS 9CM – partícula vermelha, via úmida do fabricante MAGNAFLUX.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES

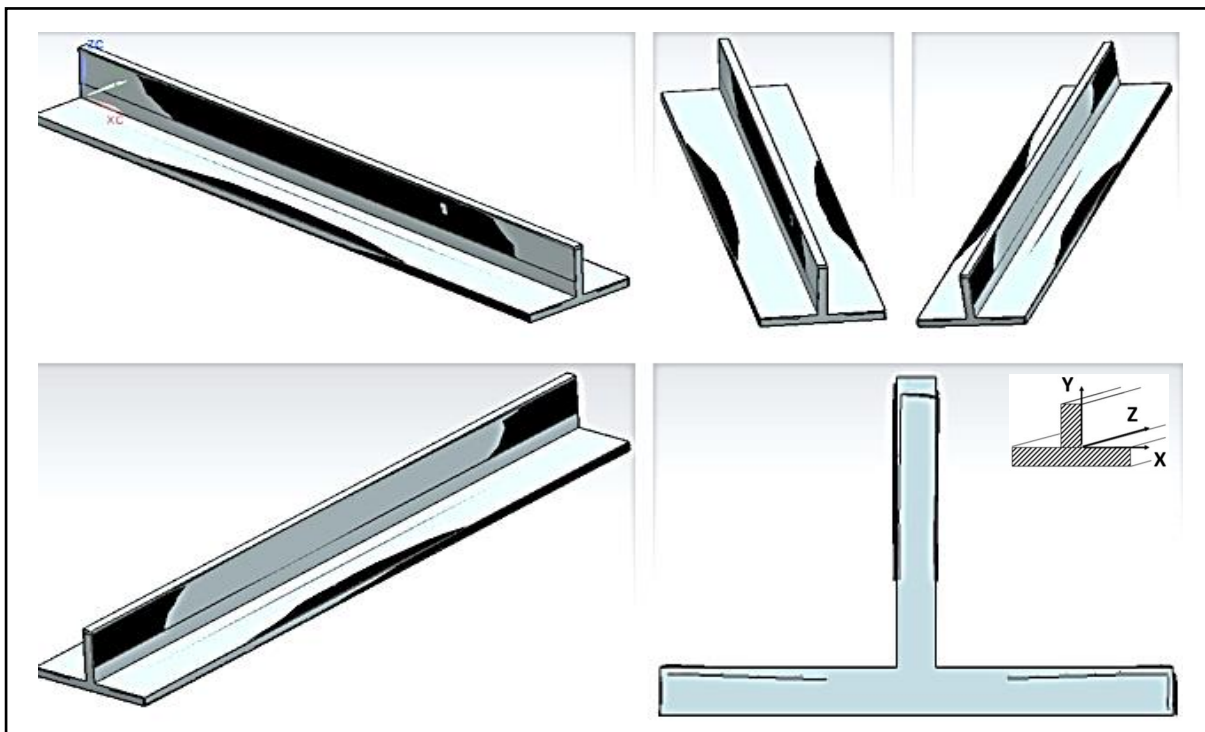
A sobreposição dos corpos de prova digitalizados em um modelo matemático (utilizado como referência), permite verificar as regiões e a magnitude das deformações.

Nas imagens sobrepostas, caso os corpos de prova digitalizados após as deformações provenientes da soldagem (na cor preta), não apresentassem deformações, seria possível visualizar apenas o modelo matemático (na cor cinza) isento das mesmas, como ilustrado na figura 15.

Ao se deformar, os corpos de prova se distanciam positiva ou negativamente do modelo matemático, permitindo desta maneira, analisar a deformação após a soldagem.

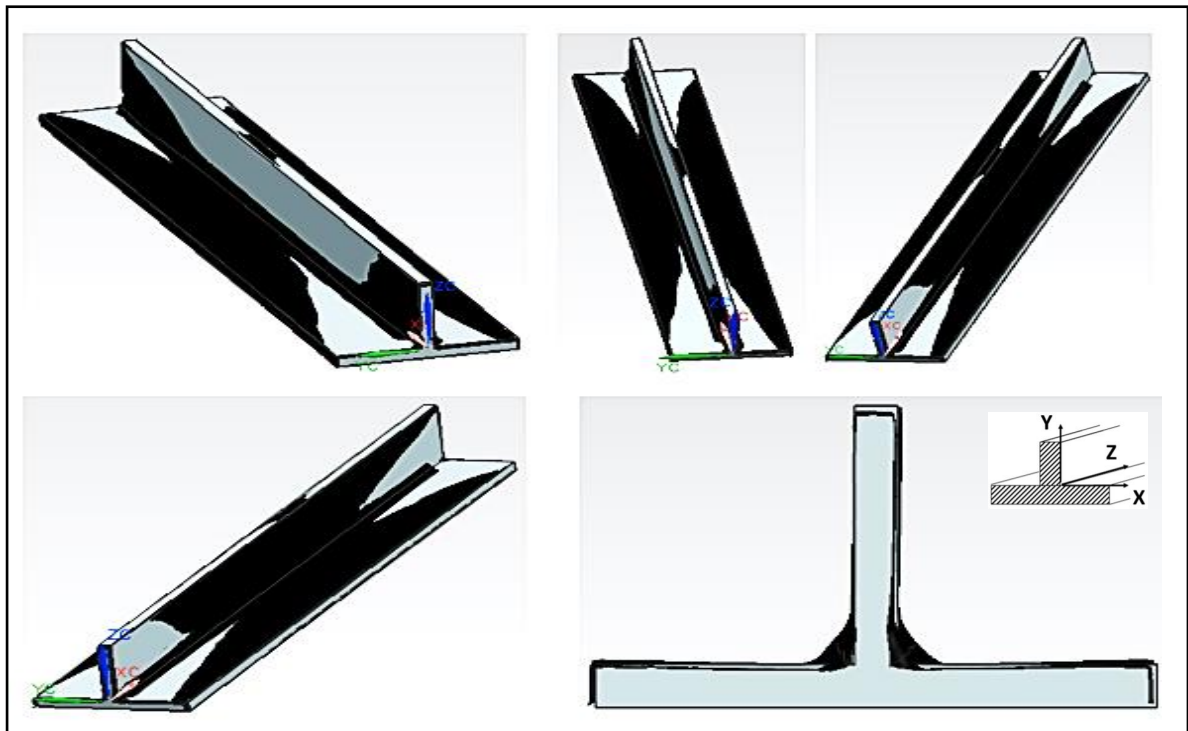
As sobreposições das imagens dos corpos de prova (CPs) obtidas pelo software foram denominadas isosuperfícies e são mostradas nas figuras 45, 46, 47, 48, 49 e 50.

Figura 45 – Isosuperfícies CP1: Vibração durante soldagem.



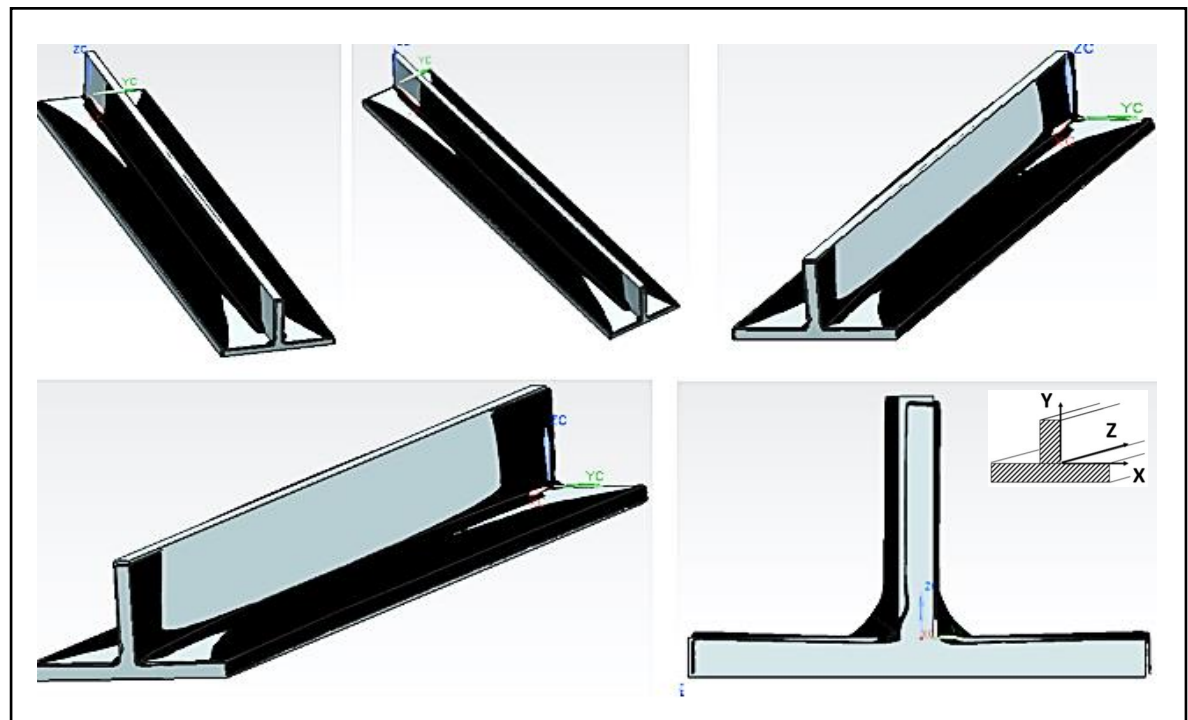
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 46 – Isosuperfícies CP2: Vibração durante soldagem.



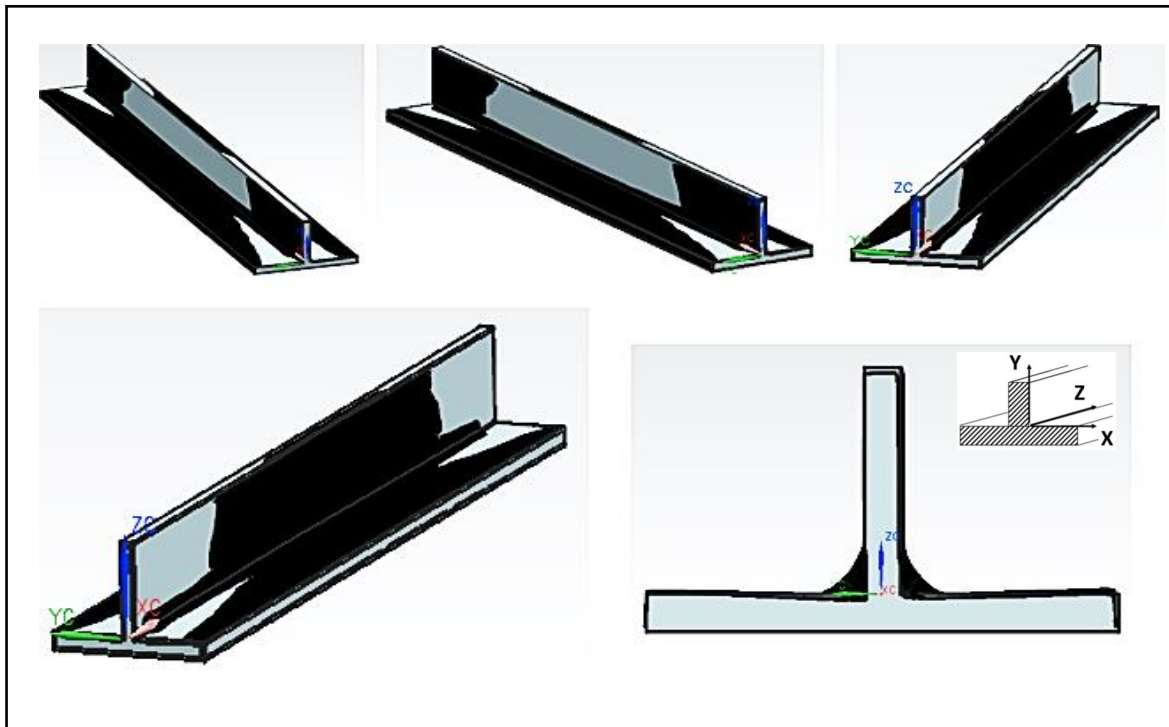
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 47 – Isosuperfícies CP3: Vibração imediatamente após a soldagem.



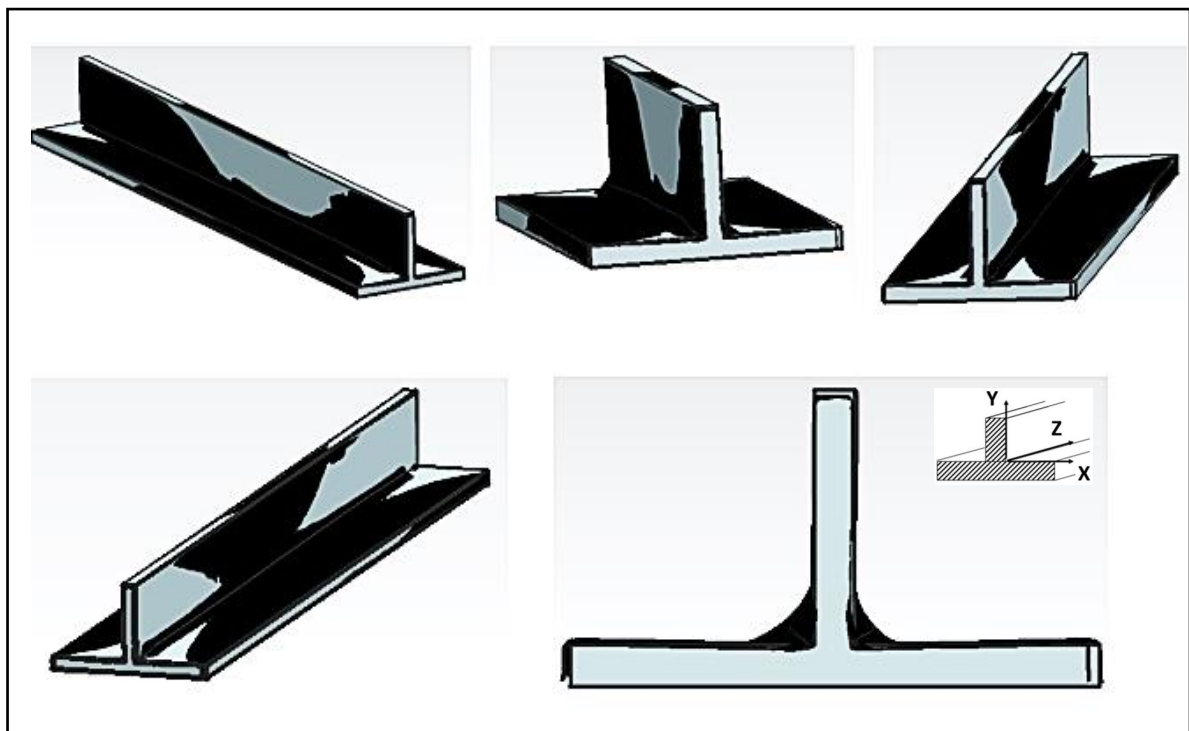
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 48 – Isosuperfícies CP4: Vibração imediatamente após a soldagem.



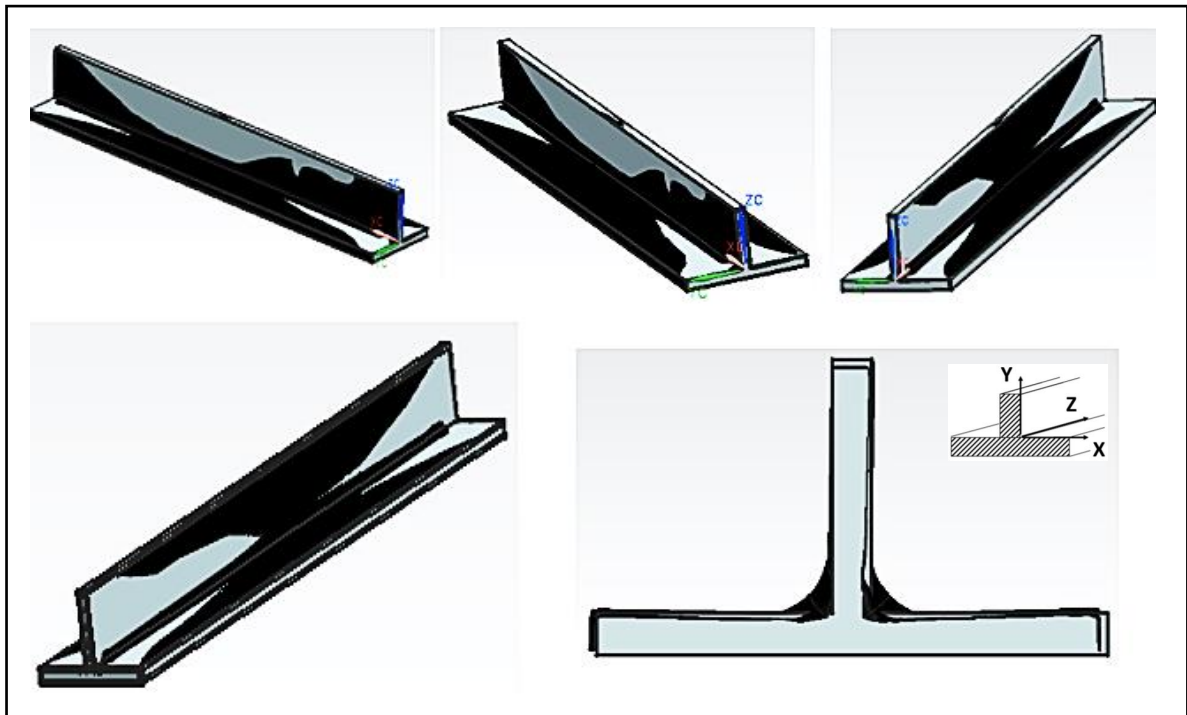
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 49 – Isosuperfícies CP5: Sem Vibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 50 – Isosuperfícies CP6: Sem Vibração.

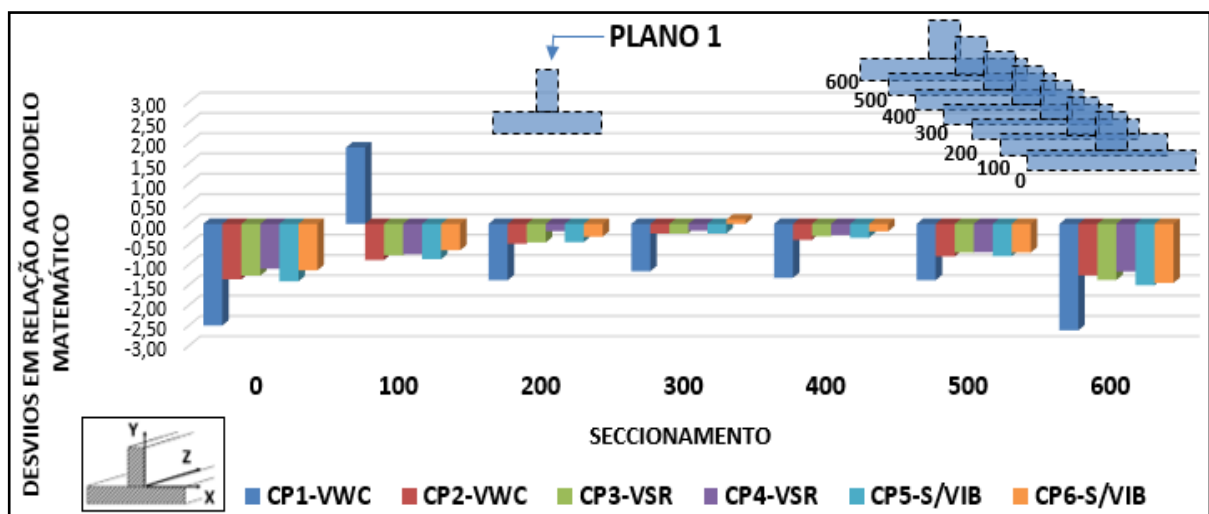


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Os dados gerados pela diferença dimensional entre os CPs deformados após soldagem e o modelo, podem ser observados nos gráficos das figuras 51, 52, 53, 54, 55, 56 e 57.

O plano 1 situa-se nos eixos X e Z. A deformação após soldagem foi avaliada no eixo Y e fez com que os planos dos CPs se deslocassem para baixo do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos da figura 51.

Figura 51 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 1



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

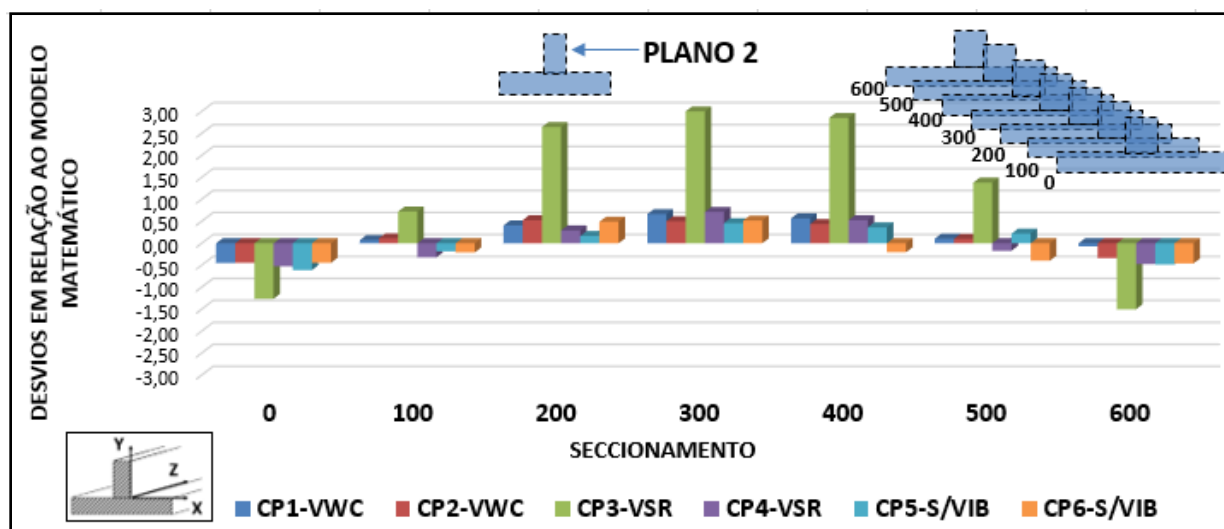
No plano 1 da figura 51, as maiores deformações estão nas extremidades dos CPs, e a vibração fornecida durante a soldagem e imediatamente após, não contribuíram para redução dos valores.

O plano 2 situa-se nos eixos Y e Z indicados na figura 52. A deformação pós solda foi avaliada no eixo X e fez com que os planos dos cps, nas extremidades, se deslocassem para esquerda do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos.

Na região central dos cordões, observa-se os maiores valores e um deslocamento para a direita, evidenciados pelos valores positivos.

A vibração durante a solda reduziu levemente a deformação e a vibração pós solda apresentou maiores níveis de deformação comparadas aos cps sem vibração.

Figura 52 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 2

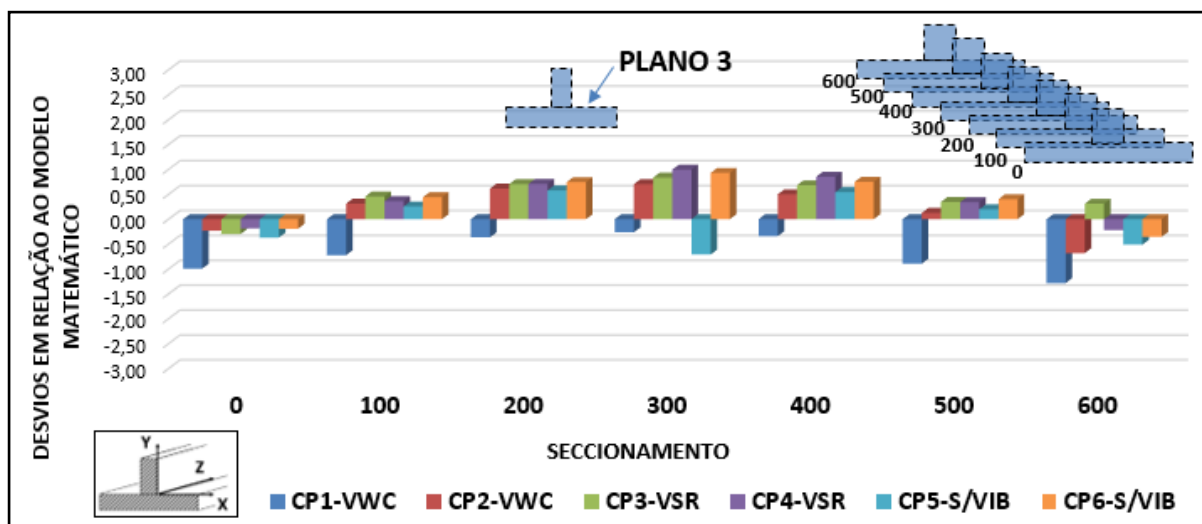


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Na figura 53, o plano 3 situa-se nos eixos X e Z. A deformação foi avaliada no eixo Y e fez com que os planos dos CPs nas extremidades, se deslocassem para baixo do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos no gráfico.

Na região central dos cordões, observa-se um deslocamento para cima, exceto CP1 (vibração simultânea à soldagem - VWC).

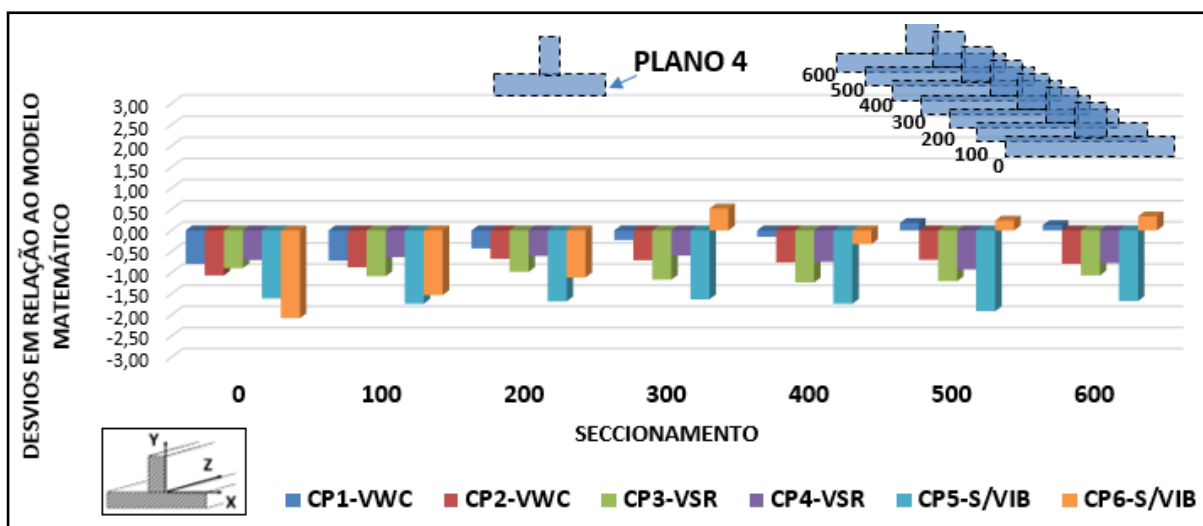
A vibração durante e pós solda reduziu levemente a deformação no centro dos cordões neste plano.

Figura 53 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 3

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O plano 4 demonstrado na figura 54, situa-se nos eixos Y e Z. A deformação pós solda foi avaliada no eixo X e fez com que os planos dos CPs, se deslocassem para esquerda do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos.

A vibração durante e pós soldagem foi responsável por reduzir significativamente a deformação neste plano de análise.

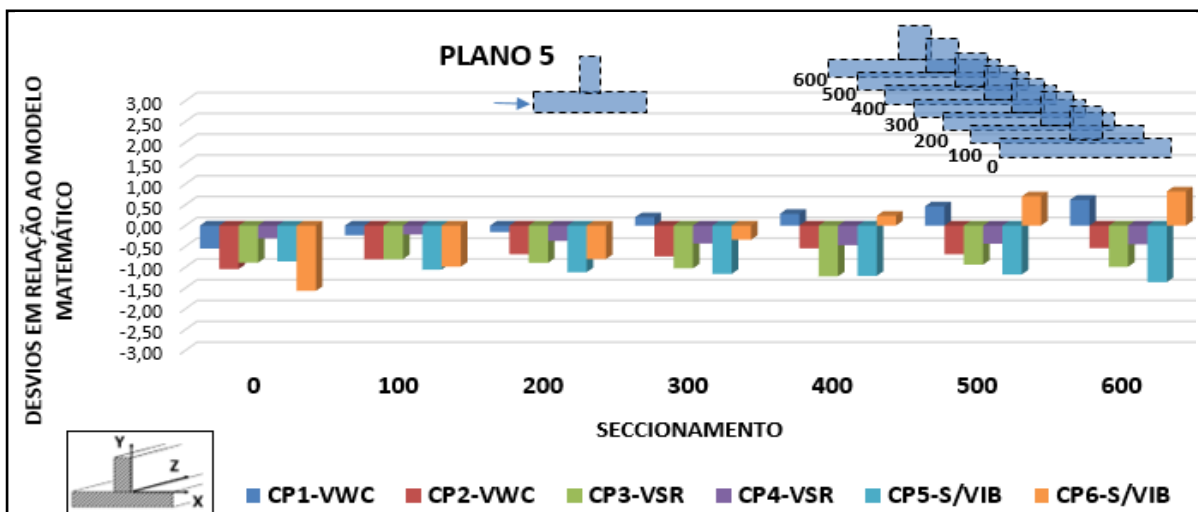
Figura 54 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 4

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na figura 55, o plano 5 situa-se nos eixos Y e Z. A deformação pós solda foi avaliada no eixo X e fez com que os planos dos CPs, se deslocassem para direita do mesmo plano do

modelo, evidenciados pelos valores negativos. A vibração durante e pós soldagem foram responsáveis por reduzir significativamente a deformação neste plano de análise.

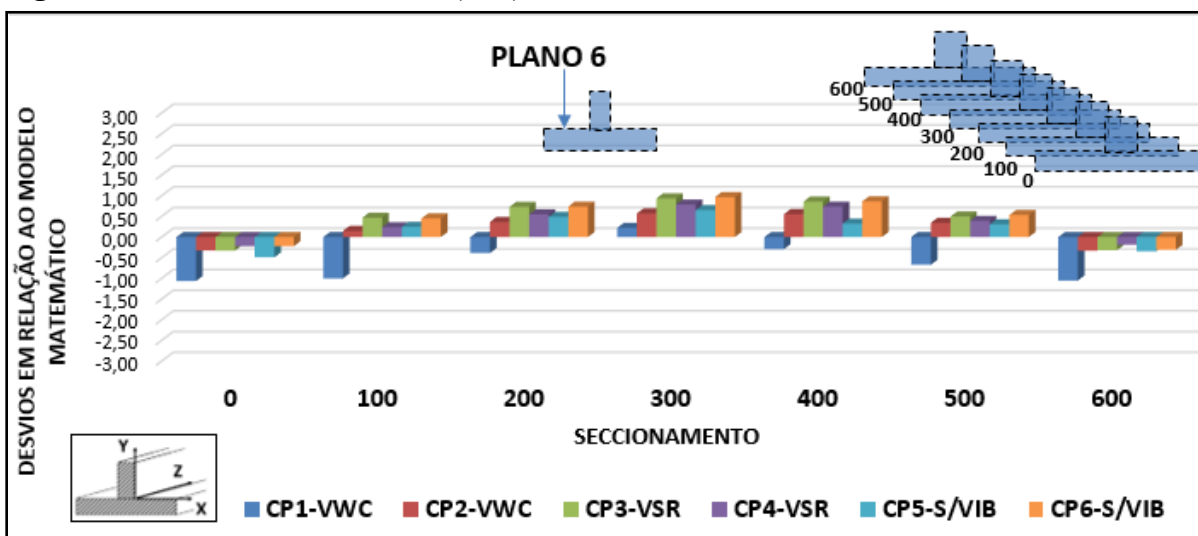
Figura 55 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

O plano 6 situa-se nos eixos X e Z mostrados na figura 56. A deformação pós solda foi avaliada no eixo Y e fez com que os planos dos CPs, nas extremidades, se deslocassem para baixo do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos. Na região central dos cordões, observa-se um deslocamento para cima, evidenciados pelos valores positivos, exceto CP1 (VWC). A vibração durante (VWC) e imediatamente pós solda (VSR) reduziram levemente a deformação na região central dos cordões.

Figura 56 - Desvios dimensionais (mm) - Plano 6



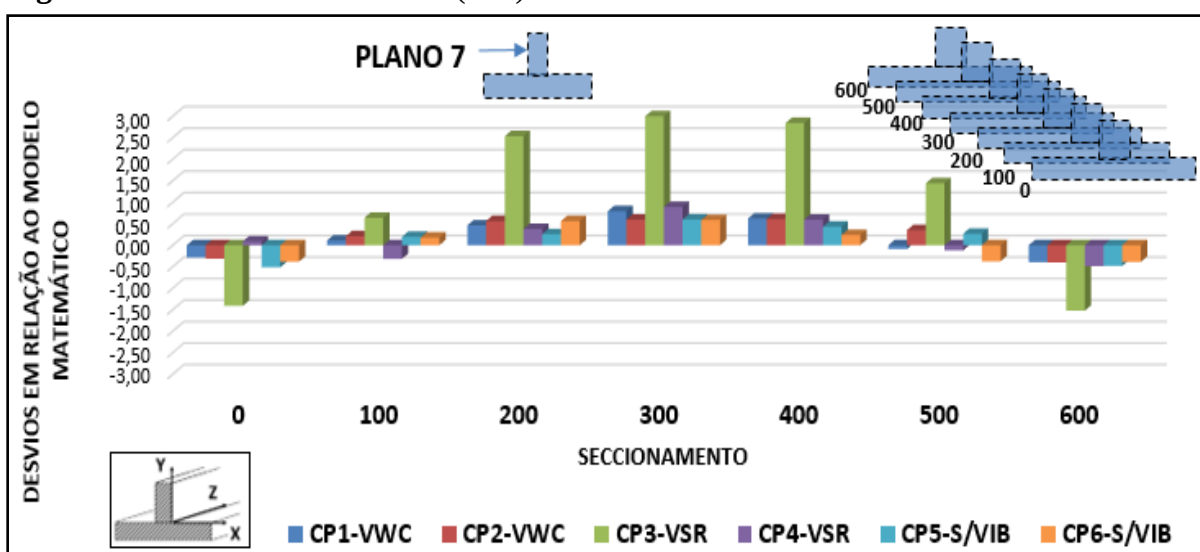
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na figura 57, o plano 7 situa-se nos eixos Y e Z. A deformação pós solda foi avaliada no eixo X e fez com que os planos dos CPs nas extremidades, se deslocassem para direita do mesmo plano do modelo, evidenciados pelos valores negativos.

Na região central dos cordões, observa-se os maiores valores e um deslocamento para a esquerda, evidenciados pelos valores positivos.

A vibração durante a solda (VWC) reduziu levemente a deformação e a vibração pós solda (VSR) apresentou os maiores níveis de deformação comparadas aos CPs sem vibração.

Figura 57 - Desvios dimensionais (mm) – Plano 7



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

4.2 ANÁLISE DA MACROGRAFIA

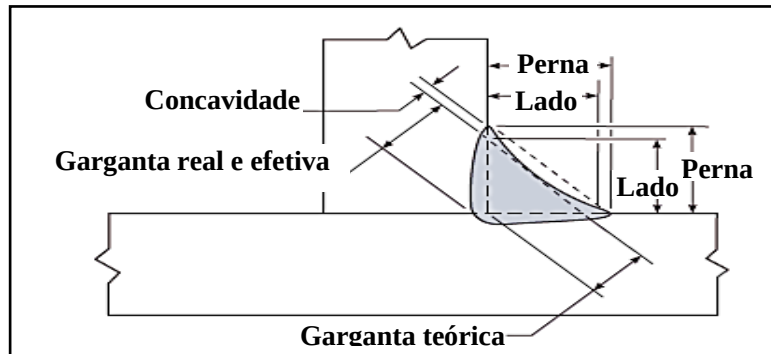
Foram analisadas as dimensões das penetrações vertical e horizontal, as pernas vertical e horizontal, as ZACs, a concavidade e a garganta dos dois cordões, utilizando como referência a figura 58.

As imagens obtidas para análise da macrografia estão demonstradas nas figuras 59, 60 e 61. O equipamento utilizado para capturar as imagens, permite verificar dimensões nas regiões de análise. As barras de escala das imagens foram utilizadas como referência para calibração (dimensional), antes de se realizar qualquer medição.

As dimensões obtidas através do software AxioVision LE 64, foram utilizadas para se comparar os parâmetros geométricos dos cordões nos processos com vibração simultânea à soldagem, vibração após a soldagem e sem vibração.

O objetivo da análise macrográfica foi avaliar a influência da vibração no processo de solda, e por este motivo, os parâmetros geométricos dos cordões não foram utilizados para se aprovar ou reprovar as especificações do procedimento de soldagem.

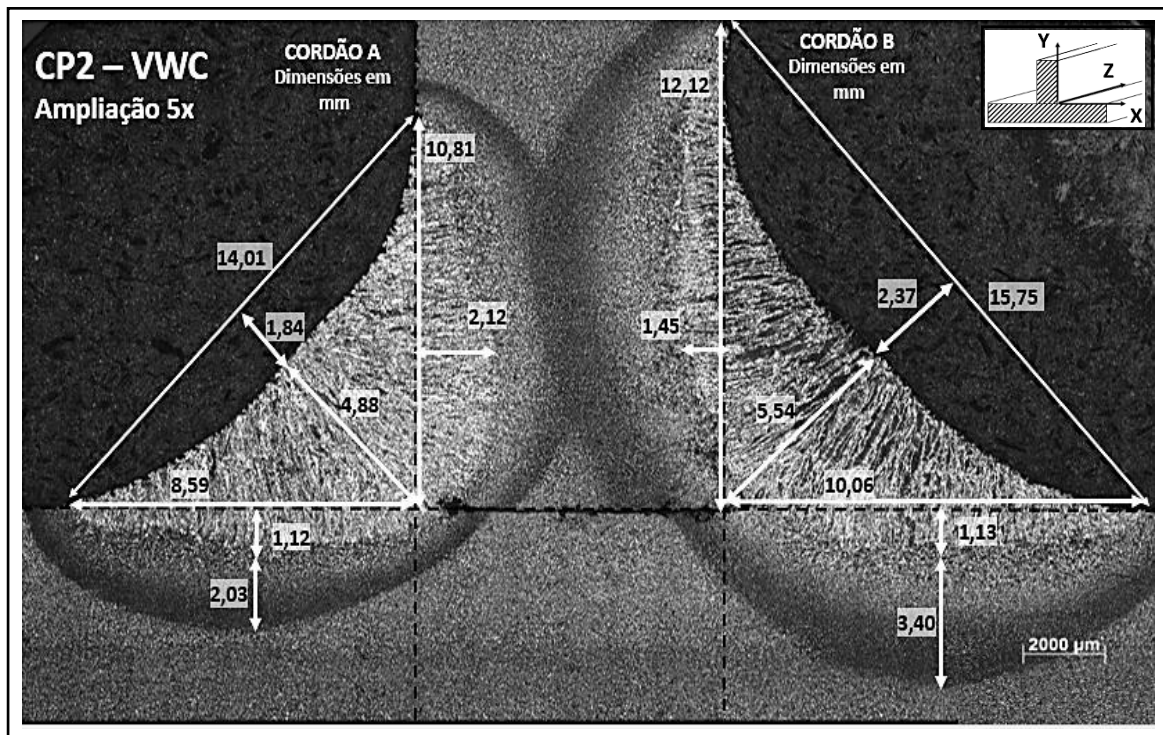
Figura 58 - Dimensionamento dos cordões de solda – filete.



Fonte: adaptado de AWS WELDING HANDBOOK (2001).

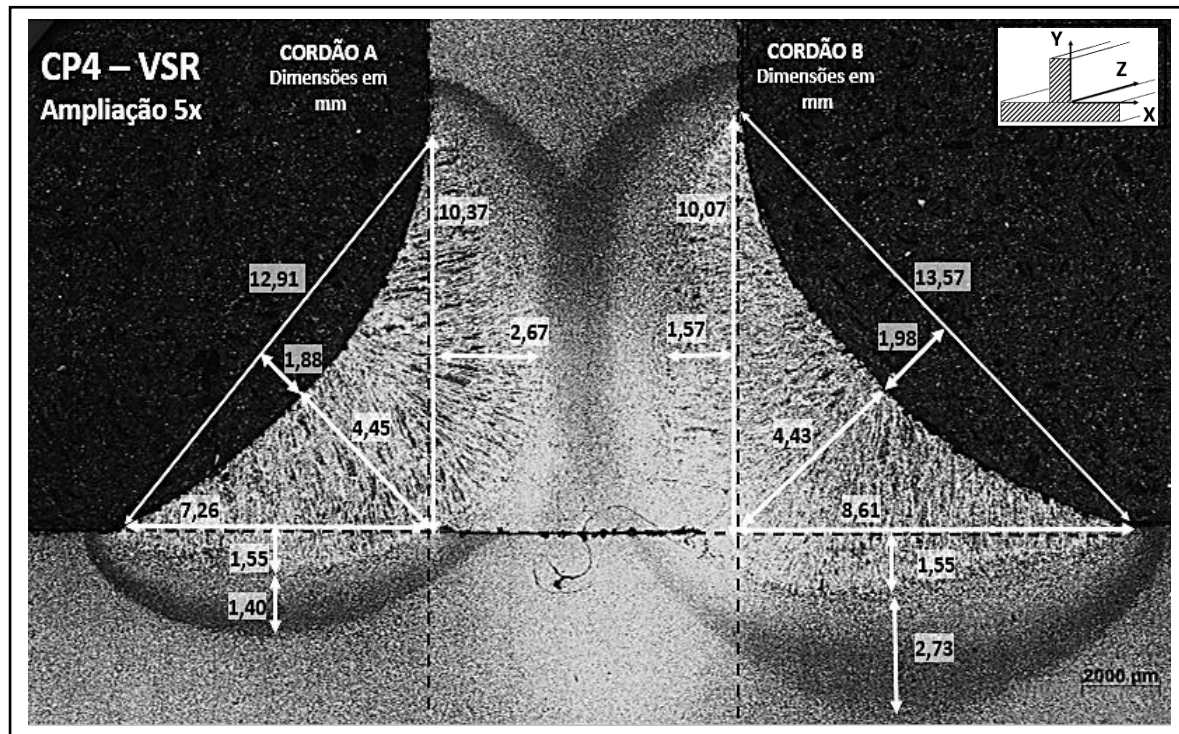
A perna do filete, corresponde ao menor dos lados medidos nas faces de fusão do maior triângulo inscrito na seção transversal da solda conforme figura 58. A garganta efetiva é a distância entre a raiz a solda e o lado externo do triângulo inscrito indicado na figura 58.

Figura 59 - Macrografia CP2 – Soldagem com Vibração simultânea – VWC.



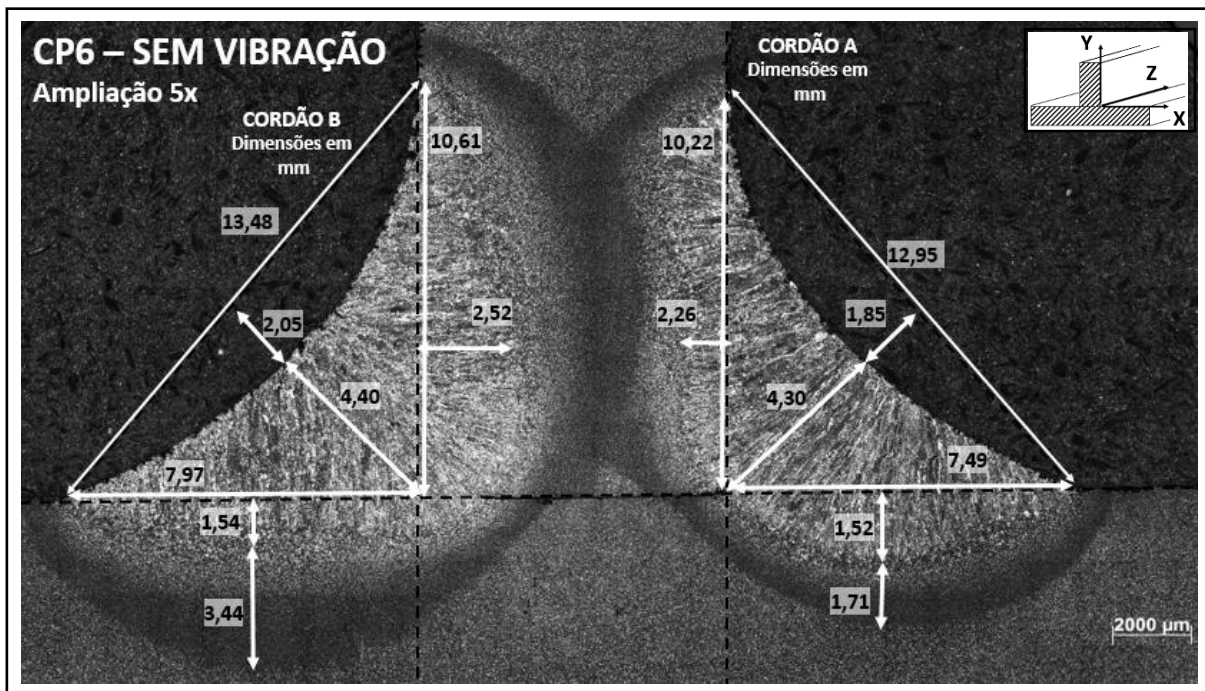
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 60 - Macrografia CP2 – Soldagem com Vibração imediatamente após – VSR.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 61 – Macrografia CP6 – Soldagem sem Vibração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Um gap foi evidenciado entre os componentes da junta em ângulo, podendo ser observado em todas as amostras analisadas, formado ao se pontear as extremidades dos corpos de prova na preparação antes da soldagem.

Pode-se verificar uma concavidade excessiva, que é a falta de material do reforço nos dois cordões de solda de cada amostra. Esta concavidade é formada quando a tocha de solda e a junta não estão perpendiculares. A velocidade no deslocamento do trator, que movimenta a tocha, pode ter sido relativamente alta para a corrente de soldagem utilizada neste experimento, contribuindo para a ausência do reforço nos dois cordões de todos os CPs.

Na tabela 3, pode-se observar os valores obtidos pelo software AxioVision LE 64.

Tabela 3 – Parâmetros Geométricos dos cordões

	CONCAVIDADE		PENETRAÇÃO				PERNA				ZAC		GARGANTA	
	(mm)		Vertical (mm)		Horizontal (mm)		Vertical (mm)		Horizontal (mm)		Vertical (mm)		(mm)	
	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B	Cordão A	Cordão B
CP2	1,84	2,37	1,12	1,13	2,12	1,45	10,81	12,12	8,59	10,06	2,03	3,40	4,88	5,54
CP4	1,88	1,98	1,55	1,55	2,67	1,57	10,37	10,07	7,26	8,61	1,40	2,73	4,45	4,43
CP6	1,85	2,05	1,52	1,54	2,26	2,52	10,22	10,61	7,49	7,97	1,71	3,44	4,30	4,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Não foi a intenção do experimento aprovar os cordões de solda, apenas foram comparados os processos onde se procurou verificar a influência da vibração nos parâmetros geométricos dos cordões.

A concavidade pôde ser medida em todos os cordões das amostras e as amostras que foram tratadas com vibração, não apresentaram diferenças significativas quando comparadas à amostra não vibrada.

As penetrações horizontal e vertical na amostra tratada com vibração durante a soldagem (CP2), apresentou menores valores, e o processo onde a vibração foi fornecida após a soldagem (CP4) obteve valores pouco superiores ao processo convencional (CP6).

Constatou-se que a vibração, ao agitar a poça de solda durante a realização do cordão, faz com que se tenha maior fusão lateral na junta. Grosseiramente, pode se dizer que a vibração espalha mais lateralmente o cordão reduzindo desta forma, a penetração.

As pernas horizontal e vertical da amostra com vibração simultânea à soldagem (CP2) apresentou os maiores valores quando comparados às amostras com vibração pós soldagem (CP4) e sem vibração (CP6), que possuem valores muito próximos.

Na análise da garganta da solda, verificou-se que a amostra tratada com VWC, apresentou para os dois cordões de solda, valores ligeiramente maiores que os demais processos que possuem valores semelhantes.

A ZAC das amostras vibradas durante a soldagem e não vibradas, possuem larguras que se assemelham e menores dimensões para a amostra tratada com vibração pós solda.

4.3 ANÁLISE DA MICROGRAFIA

As análises das composições químicas do Metal de solda, foram feitas na empresa TECMETAL com o equipamento SPECTROMAX. Os valores estão nas tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 – Composição Química do Metal de solda – CP2 - VWC

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %	Co %
Value	0,0860	0,560	1,49	0,0200	0,0087	0,0260	0,0290	<0,002	0,0280	0,0310	0,0027
	Ti %	Nb %	V %	W %	Pb %	B %	Sn %	Zn %	As %	Bi %	Ca %
Value	0,0100	<0,003	0,0011	0,0270	<0,003	0,0013	<0,001	0,0068	0,0068	<0,002	0,0044
	Ce %	Zr %	La %	Fe %							
Value	<0,003	0,0044	0,0037	97,6							

Fonte: TECMETAL (2018)

Tabela 5 - Composição Química do Metal de solda – CP4 - VSR

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %	Co %
Value	0,0610	0,491	1,22	0,0200	0,0099	0,0250	0,0290	<0,002	0,0200	0,0300	0,0050
	Ti %	Nb %	V %	W %	Pb %	B %	Sn %	Zn %	As %	Bi %	Ca %
Value	0,0060	0,0068	0,0024	0,0340	<0,003	0,0010	0,0031	<0,002	0,0084	0,0027	0,0006
	Ce %	Zr %	La %	Fe %							
Value	<0,003	0,0065	0,0015	98,0							

Fonte: TECMETAL (2018)

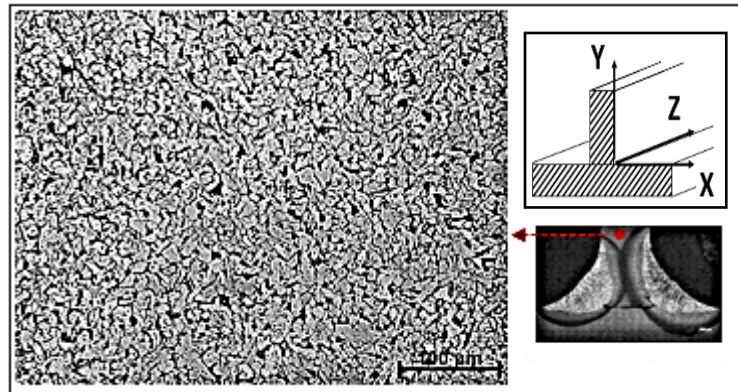
Tabela 6 - Composição Química do Metal de solda – CP6 - Sem Vibração

	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo %	Al %	Cu %	Co %
Value	0,0590	0,480	1,18	0,0190	0,0099	0,0240	0,0260	<0,002	0,0071	0,0300	0,0051
	Ti %	Nb %	V %	W %	Pb %	B %	Sn %	Zn %	As %	Bi %	Ca %
Value	0,0048	0,0047	0,0015	0,0420	<0,003	0,0016	0,0024	<0,002	0,0062	0,0033	0,0002
	Ce %	Zr %	La %	Fe %							
Value	<0,003	0,0055	<0,001	98,1							

Fonte: TECMETAL (2018)

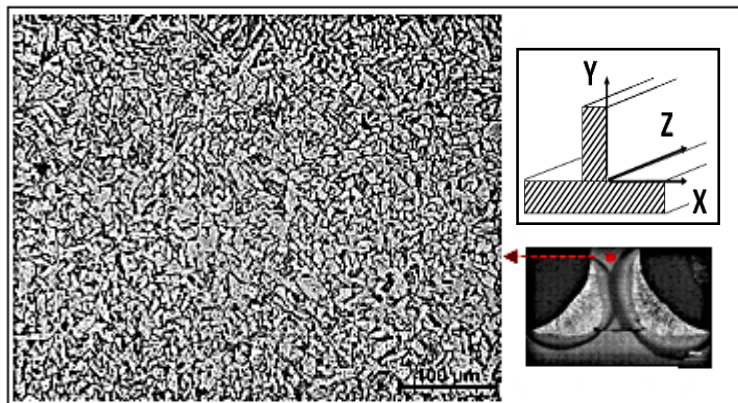
Nas figuras 62, 63 e 64, pode-se observar as micrografias do Metal base identificado como MB1 na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 62 – Micrografia MB1 - CP2: VWC (200x) – Região AB.



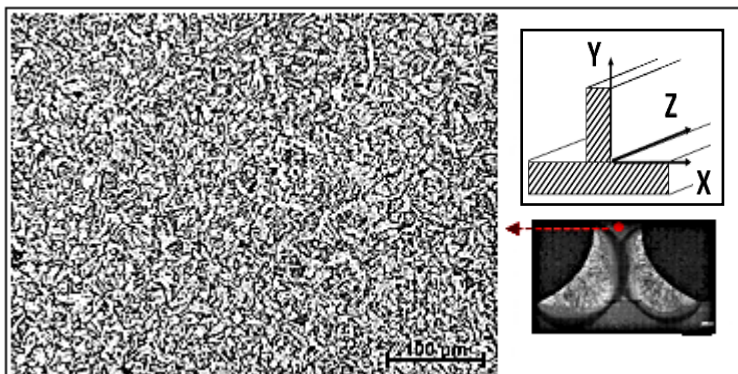
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 63 – Micrografia MB1 - CP4: VSR (200x) – Região AB.



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 64 – Micrografia MB1 - CP6: Sem Vibração (200x) – Região AB.

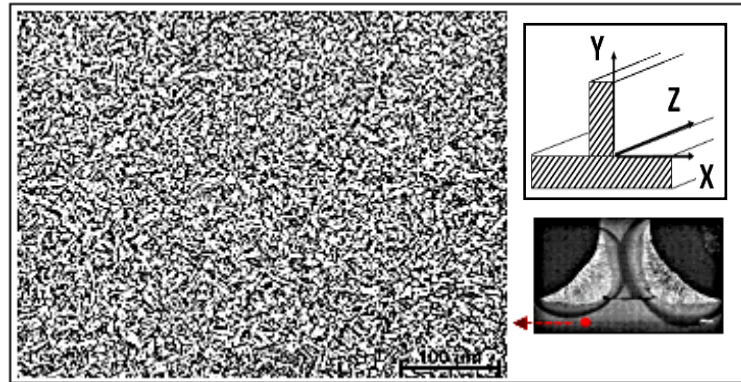


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Não foram identificadas variações atribuídas à vibração nesta região do MB.

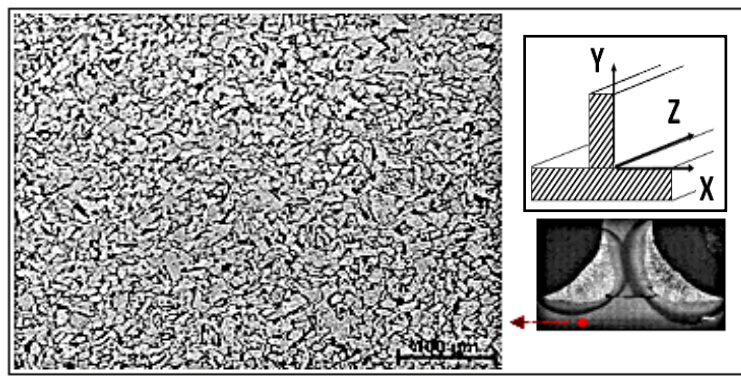
Nas figuras 65, 66 e 67, pode-se observar as micrografias do Metal base identificado como MB A2, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 65 – Micrografia MB A2 - CP2: VWC (200x).



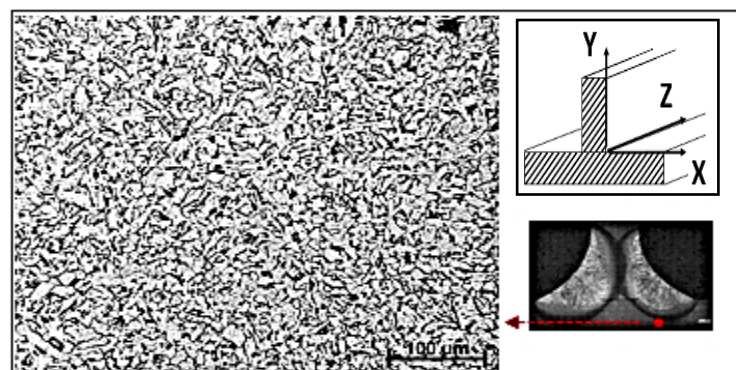
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 66 - Micrografia MB A2 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 67 - Micrografia MB A2 - CP6: Sem Vibração (200x).

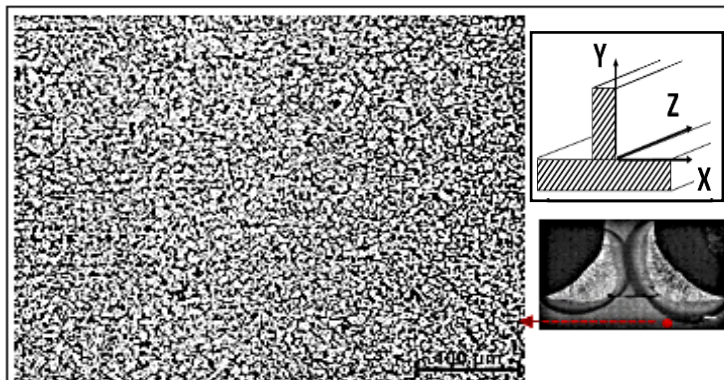


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Não foram identificadas variações atribuídas à vibração nesta região do MB

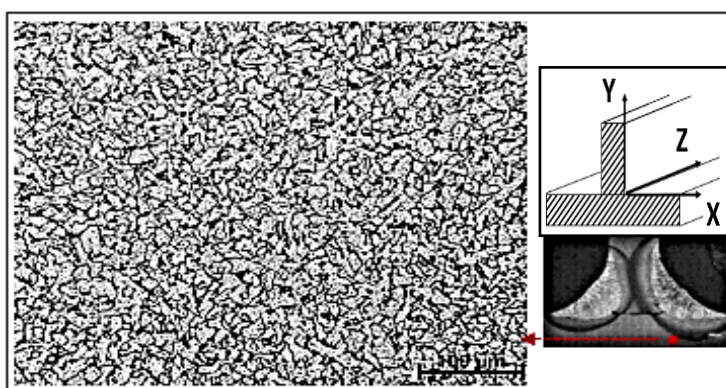
Nas figuras 68, 69 e 70, pode-se observar as micrografias do Metal base identificado como MB B2, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 68 – Micrografia MB B2 - CP2: VWC (200x).



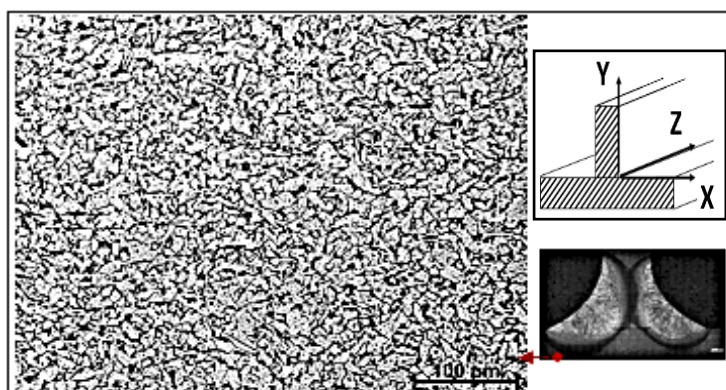
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 69 – Micrografia MB B2 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 70 – Micrografia MB B2 - CP6: Sem Vibração (200x).

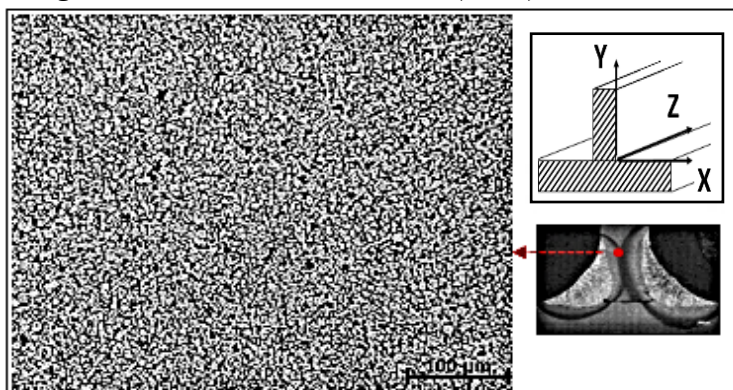


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Não foram identificadas variações atribuídas à vibração nesta região do MB.

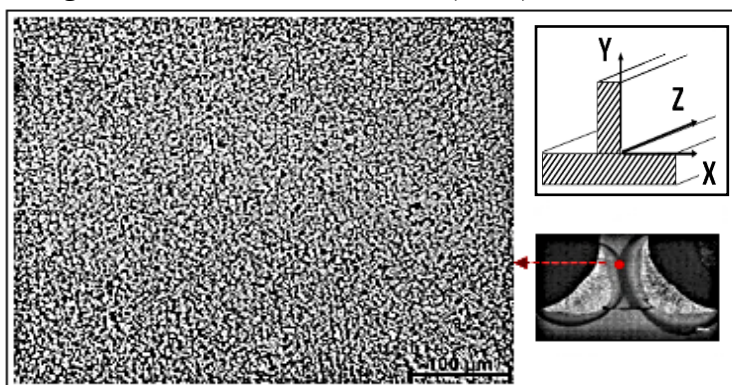
Nas figuras 71, 72 e 73, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC AB1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 71 – Micrografia ZAC AB1 - CP2: VWC (200x).



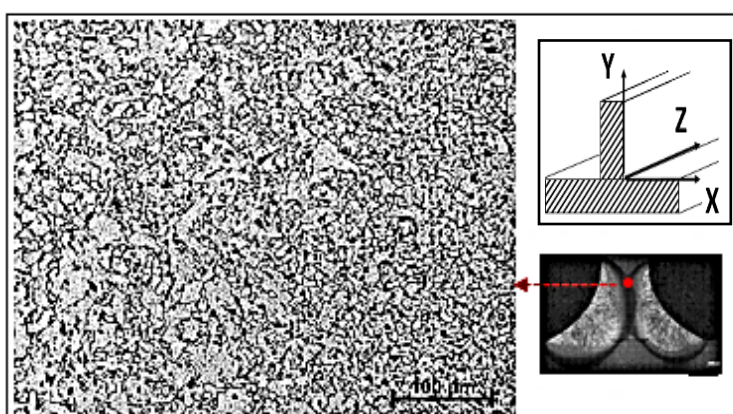
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 72 – Micrografia ZAC AB1 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 73 – Micrografia ZAC AB1 - CP6: Sem Vibração (200x).

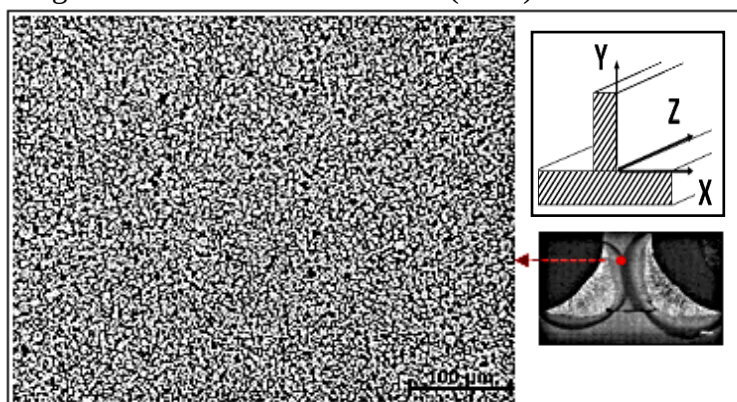


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na região da ZAC AB1 localizada próxima ao metal de solda, verifica-se um refino de grãos na zona de ligação, nas amostras tratadas com vibração durante e após soldagem.

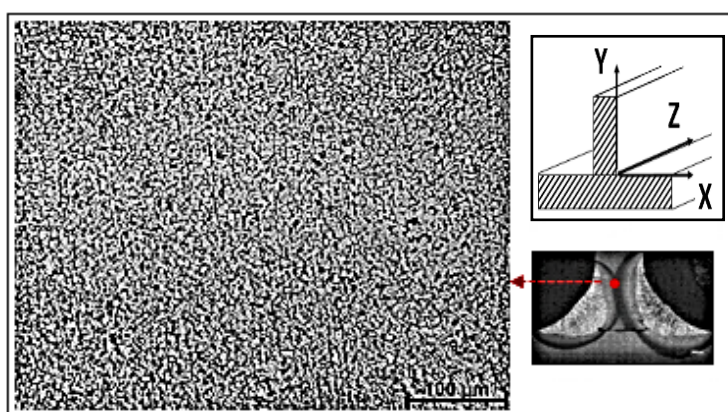
Nas figuras 74, 75 e 76, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC AB2, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 74 – Micrografia ZAC AB2 - CP2: VWC (200x).



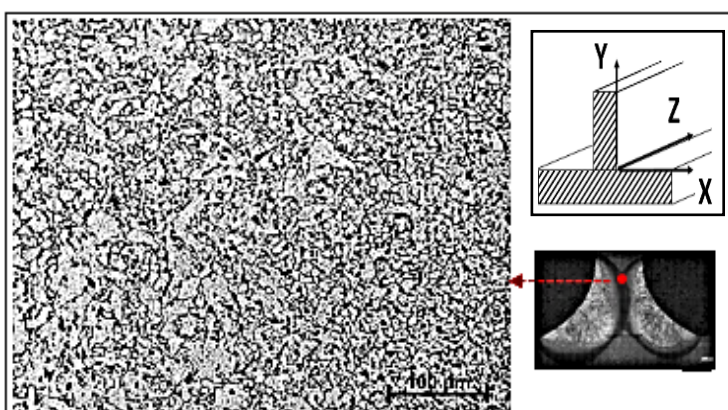
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 75 – Micrografia ZAC AB2 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 76 – Micrografia ZAC AB2 - CP6: Sem Vibração (200x).

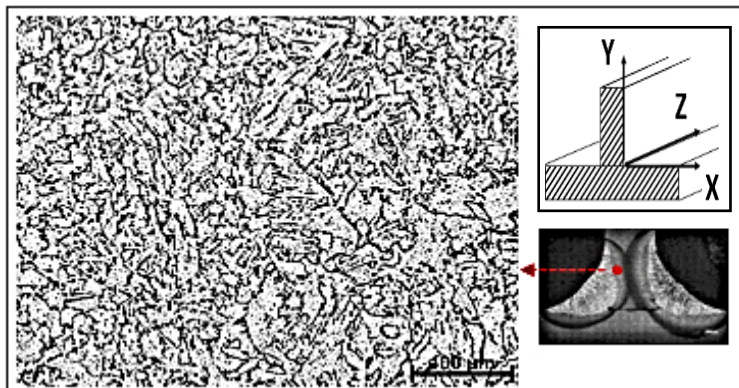


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Na região da ZAC AB2 localizada próxima ao metal de solda, verifica-se um refino de grãos na zona de ligação, nas amostras tratadas com vibração durante e após soldagem.

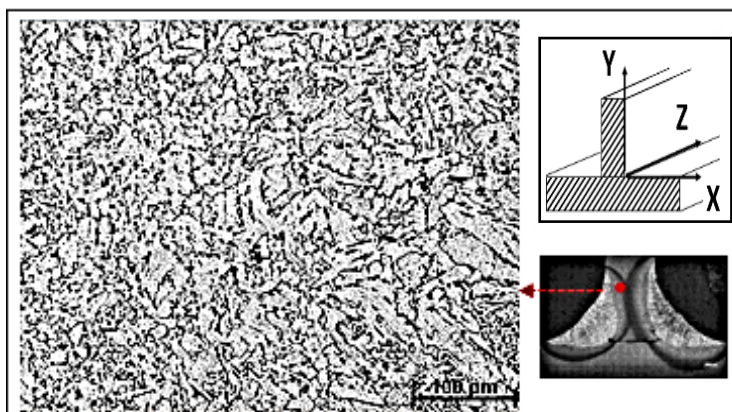
Nas figuras 77, 78 e 79, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC A1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 77 – Micrografia ZAC A1 - CP2: VWC (200x).



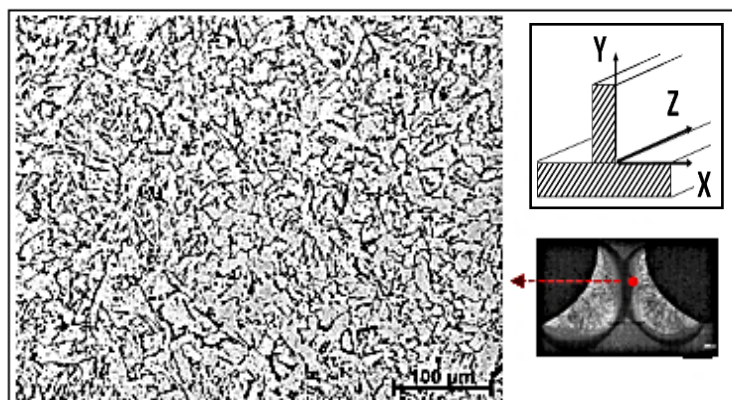
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 78 – Micrografia ZAC A1 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 79 – Micrografia ZAC A1 - CP6: Sem Vibração (200x).

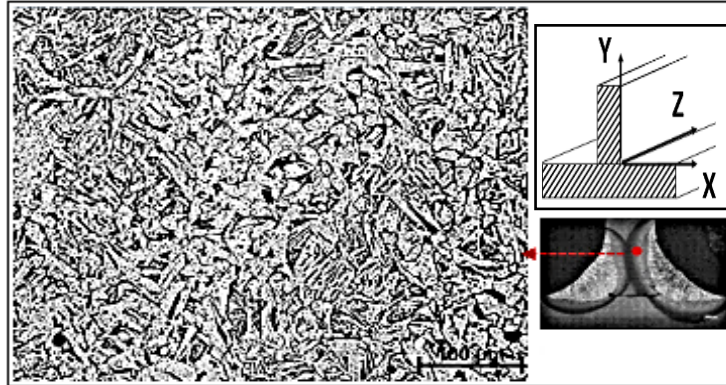


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se identificou alterações provenientes da vibração. Os CPs tratados mecanicamente apresentam características semelhantes ao CP não tratado.

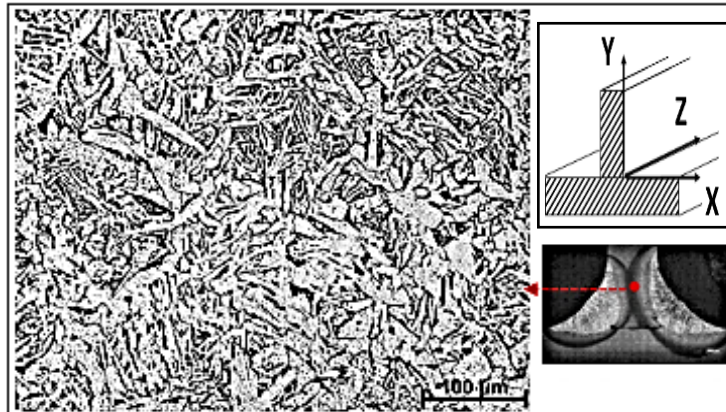
Nas figuras 80, 81 e 82, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC B1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 80 – Micrografia ZAC B1 - CP2: VWC (200x).



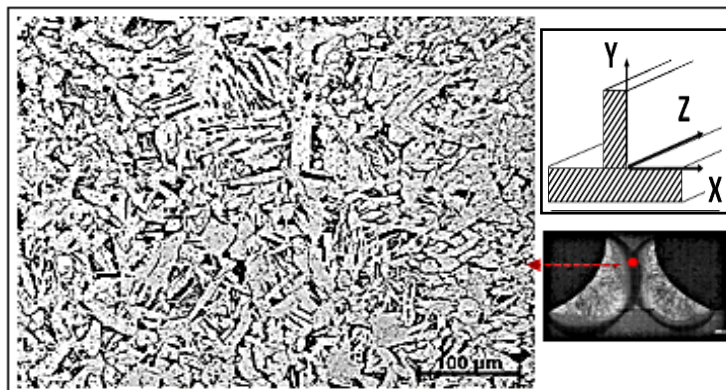
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 81 – Micrografia ZAC B1 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 82 – Micrografia ZAC B1 - CP6: Sem Vibração (200x).

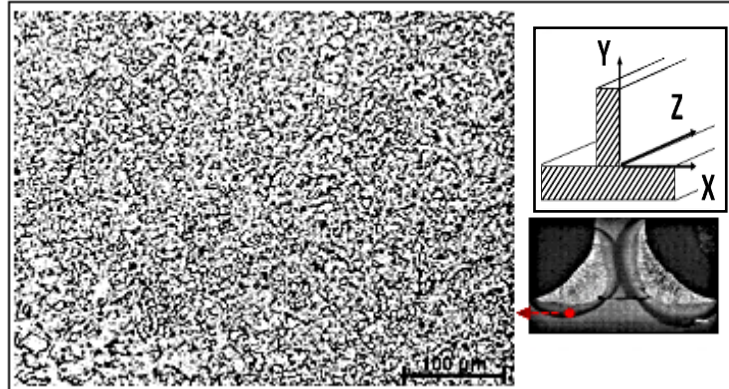


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se verificou alterações atribuídas à vibração. Os CPs tratados mecanicamente apresentam características semelhantes ao CP não tratado.

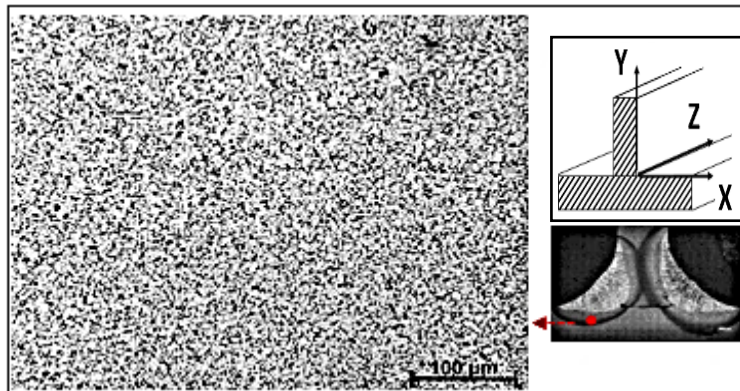
Nas figuras 83, 84 e 85, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC A2.2, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 83 – Micrografia ZAC A2.2 - CP2: VWC (200x).



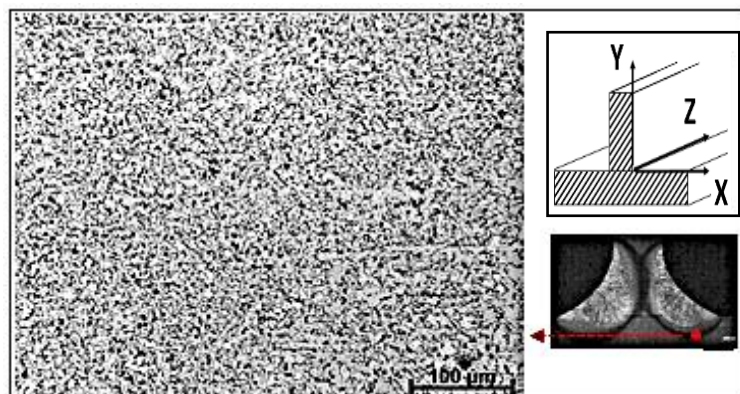
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 84 – Micrografia ZAC A2.2 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 85 – Micrografia ZAC A2.2 - CP6: Sem Vibração (200x).

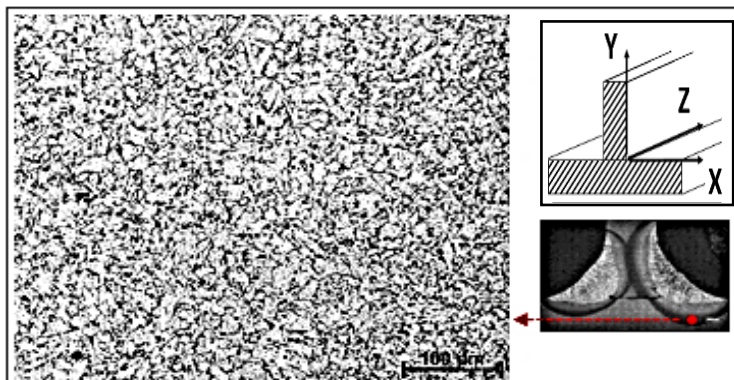


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se identificou modificações atribuídas à vibração. CP2 e CP4 tratados mecanicamente apresentam características semelhantes ao CP6 não tratado.

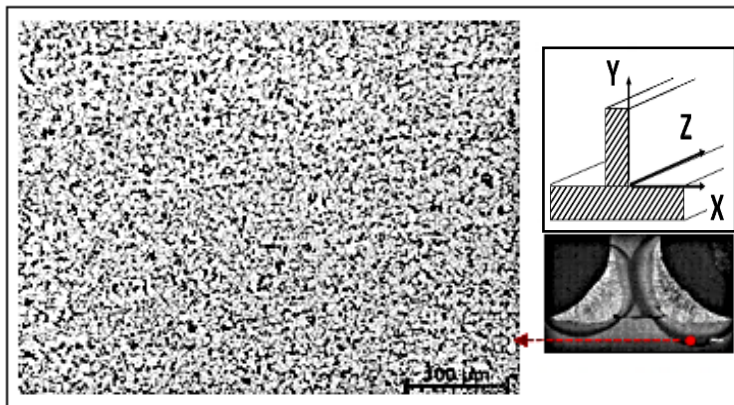
Nas figuras 86, 87 e 88, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC B2.2, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 86 – Micrografia ZAC B2.2 - CP2: VWC (200x).



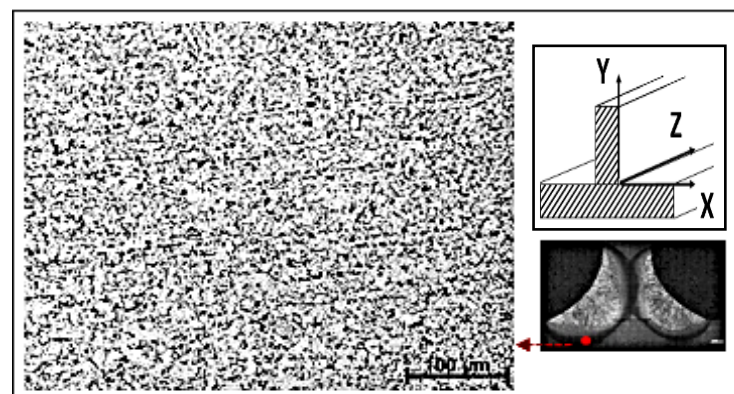
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 87 – Micrografia ZAC B2.2 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 88 – Micrografia ZAC B2.2 - CP6: Sem Vibração (200x).

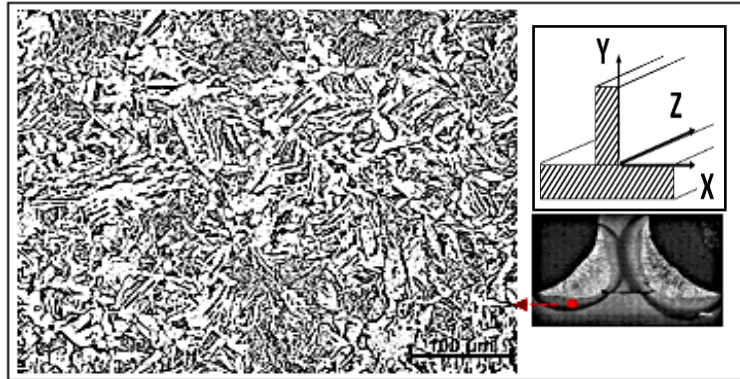


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se identificou modificações atribuídas à vibração.

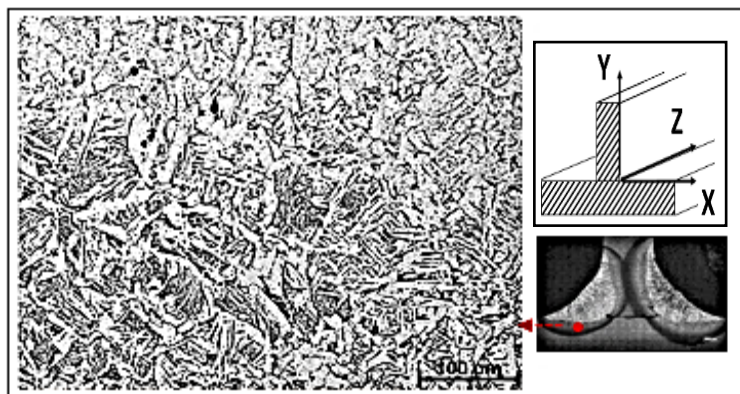
Nas figuras 89, 90 e 91, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC A2.1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 89 – Micrografia ZAC A2.1 - CP2: VWC (200x).



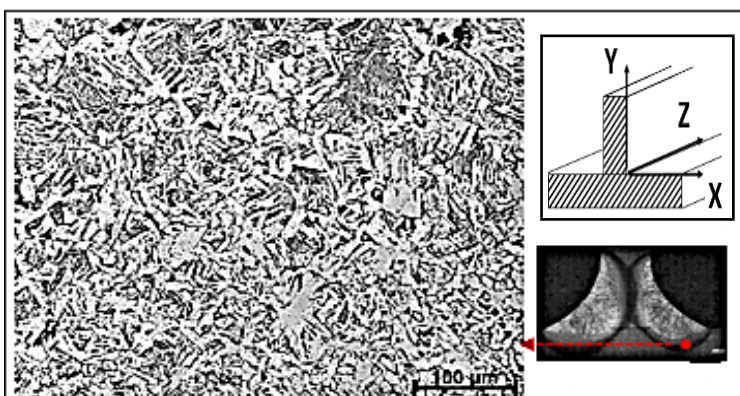
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 90 – Micrografia ZAC A2.1 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 91 – Micrografia ZAC A2.1 - CP6: Sem Vibração (200x).

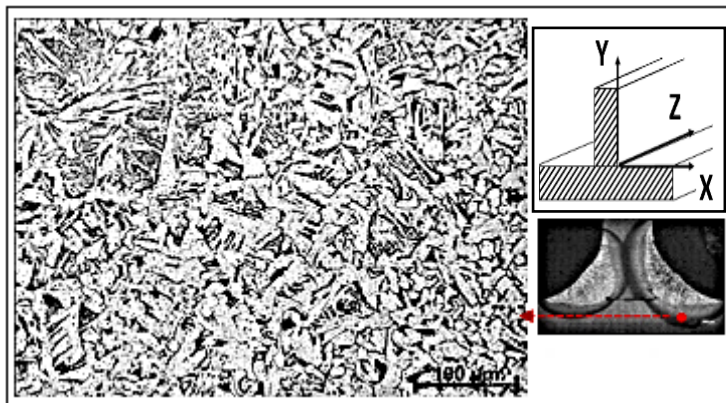


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se identificou modificações atribuídas à vibração.

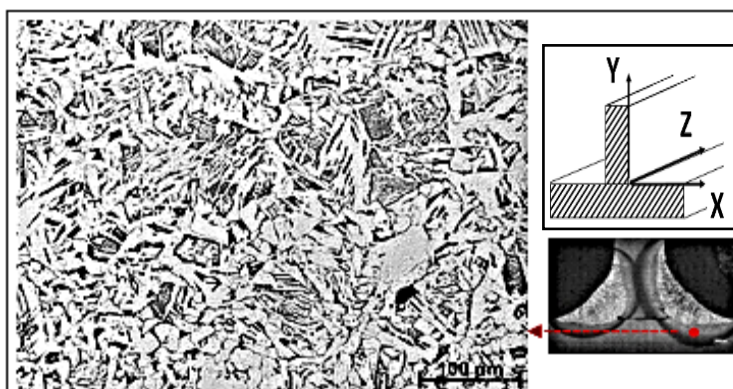
Nas figuras 92, 93 e 94, pode-se observar as micrografias da ZAC identificada como ZAC B2.1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 92 – Micrografia ZAC B2.1 - CP2: VWC (200x).



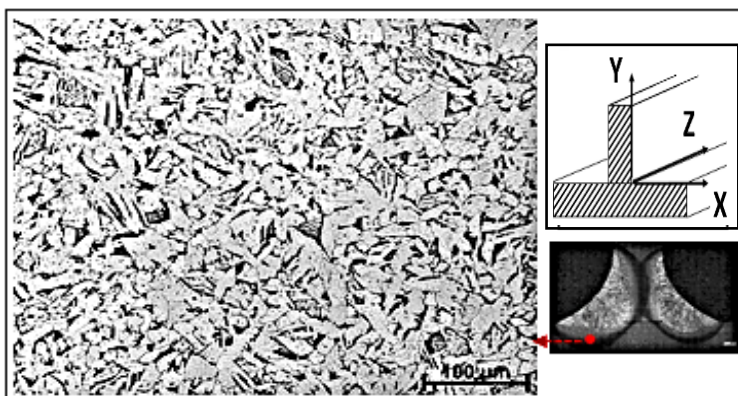
Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 93 – Micrografia ZAC B2.1 - CP4: VSR (200x).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Figura 94 – Micrografia ZAC B2.1 - CP6: Sem Vibração (200x).

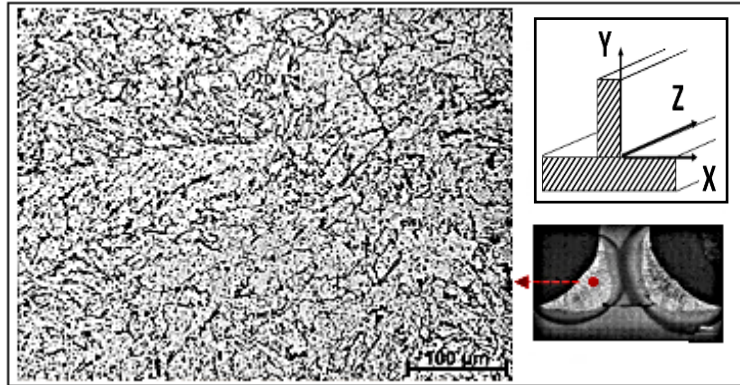


Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Nesta Região da ZAC, não se verificou alterações provenientes da vibração.

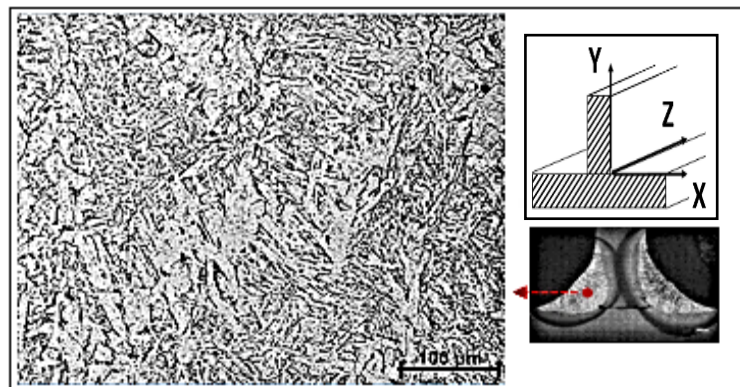
Nas figuras 98, 96 e 97, pode-se observar as micrografias do metal de solda identificada como MS A1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 95 – Micrografia MS A1 - CP2: VWC (200x)



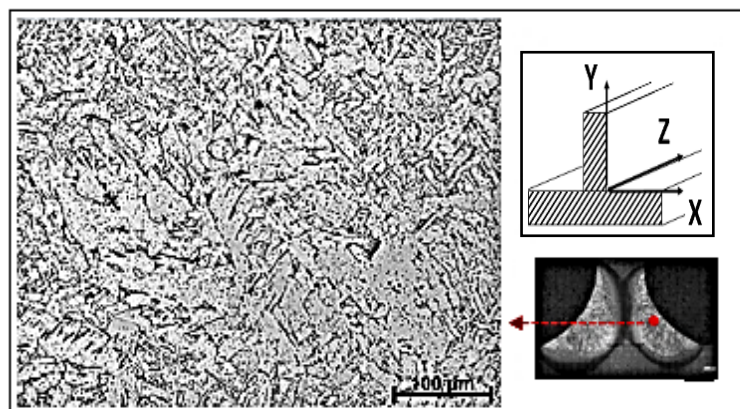
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 96 – Micrografia MS A1 - CP4: VSR (200x)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 97 - Micrografia MS A1 - CP6: Sem Vibração (200x)

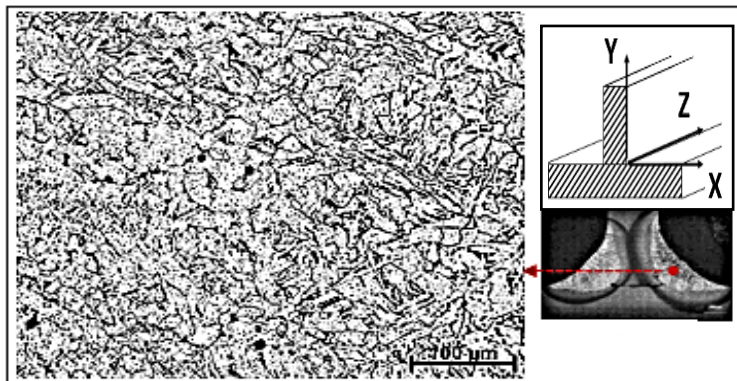


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Esperava-se uma maior ordenação dos grãos no MS devido à energia fornecida pela vibração. Os CP2 e CP4, possuem grãos com aspecto um pouco mais refinado, porém o refino não pode ser totalmente atribuído a vibração, sendo o Mn do MB, facilitador deste processo.

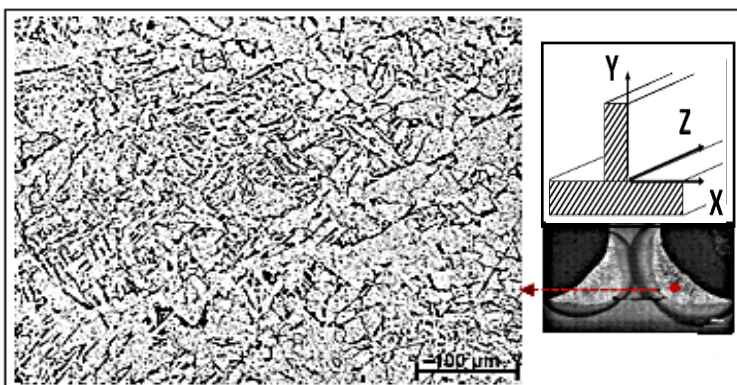
Nas figuras 98, 99 e 100, pode-se observar as micrografias do metal de solda identificada como MS B1, na figura 41, onde se definiu o roteiro para captura das imagens.

Figura 98 – Micrografia MS B1 - CP2: VWC (200x)



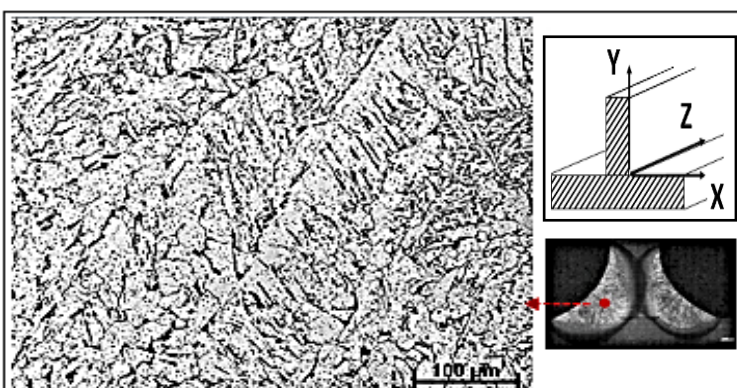
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 99 - Micrografia MS B1 - CP4: VSR (200x)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 100 - CP6: Micrografia MS B1- CP6:Sem Vibração (200x)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

Tanto no MS do cordão como no cordão, acreditava-se numa maior organização da microestrutura devido à vibração no metal de solda. Todavia, a ordenação foi pouco significativa e a vibração não conseguiu os mesmos efeitos de refino como nas zonas de ligação, próximas ao metal fundido.

Para se avaliar a influência da vibração na microestrutura das amostras tratadas, dividiu-se em áreas de análise: Metal Base (MB), Zona Afetada pelo Calor (ZAC), Zona de Ligação compreendida entre a região de fusão e a região não fundida, e o Metal de Solda (MS).

Por se tratar de um aço hipoeutetóide com teor de carbono inferior a 0,8%, o Metal de Base se mostrou predominantemente ferrítico, com pequena quantidade de perlita. A estrutura é granular, apresentando granulação fina para todas as amostras analisadas. Esta granulação fina do Metal de Base é devido ao tratamento termomecânico para aumento de resistência.

A ZAC mais afastada do cordão de solda, mostrou crescimento de grão ferrítico e estrutura bainítica próximo da Zona de Ligação (ZL). Tanto no primeiro cordão, como no segundo, não foram verificadas variações que possam ser atribuídas à vibração.

Nas amostras com aplicação da vibração durante a soldagem (CP2) e imediatamente após (CP4), observa-se uma estrutura mais refinada bem próxima à Zona de Ligação (ZL) localizada entre as regiões do Metal de Solda e da ZAC. Na amostra sem o tratamento mecânico vibracional (CP 6) verifica-se uma diferença em relação às amostras tratadas com vibração, podendo-se observar grãos colunares mais longos.

Nos cordões de solda (MS), os grãos são colunares e a microestrutura é predominantemente ferrítica, pró-eutetóide e com regiões de segunda fase alinhada. Os Aços C-Mn possuem maior temperabilidade e por isso há uma maior tendência à formação de estruturas com maior grau de refinamento dos grãos e com maior dureza, enquanto que os aços carbonos comuns possuem dureza inferior.

O efeito da vibração poderia gerar estruturas mais refinadas, porém, o refino dos grãos pode estar ligado também à presença do elemento Manganês presente no Metal Base e no fluxo ativo do processo Arco Submerso utilizado neste experimento.

O fluxo que recobre o cordão de solda, por ser ativo, participa das reações que ocorrem na poça de fusão e contribuem para as alterações metalúrgicas no Metal de Solda (MS). As amostras analisadas não apresentam evidências de variações metalúrgicas que possam estar única e diretamente relacionadas à vibração.

4.4 ANÁLISE DA MICRODUREZA VICKERS

Na tabelas 7 e 8, encontram-se os valores da microdureza medida em Vickers de acordo com o roteiro e a localização dos pontos de medição da figura 43. Os valores das leituras, foram colocados nos gráficos das figuras 101 e 102.

Tabela 7 - Leituras das Microdurezas (HV) – Cordão A

	MB A1	ZAC A1	ZAC A2	MS A1	MS A2	MS A3	ZAC A3	MB A2
CP2	141	131	139	152	151	163	144	141
CP4	150	141	168	154	154	151	143	142
CP6	135	167	185	199	176	172	168	140

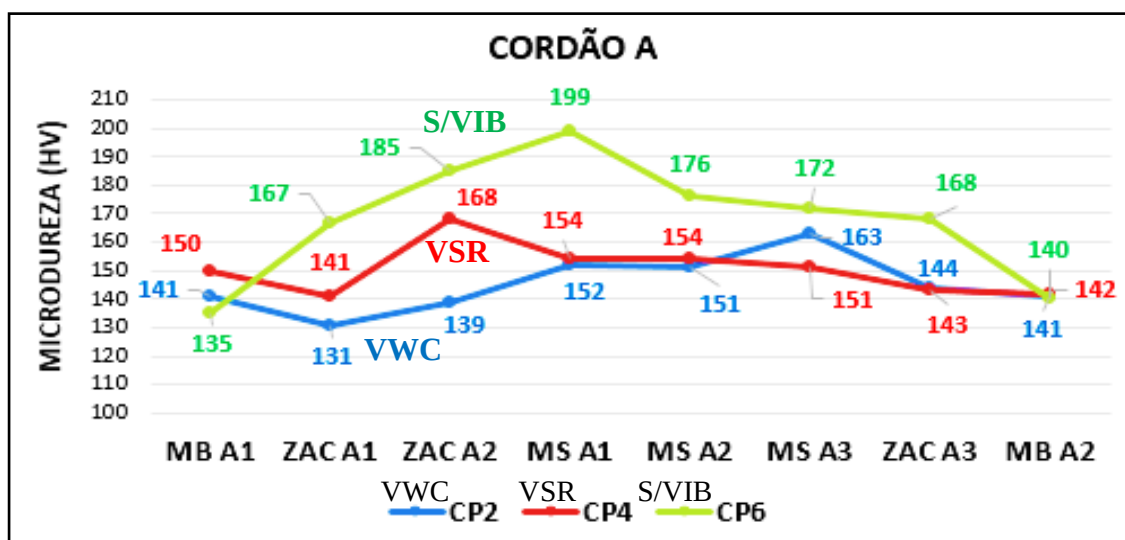
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Tabela 8 - Leituras das Microdurezas (HV) – Cordão B

	MB B1	ZAC B1	ZAC B2	MS B1	MS B2	MS B3	ZAC B3	MB B2
CP2	139	162	164	177	180	177	168	158
CP4	149	152	165	173	174	171	164	150
CP6	145	171	173	187	198	187	178	155

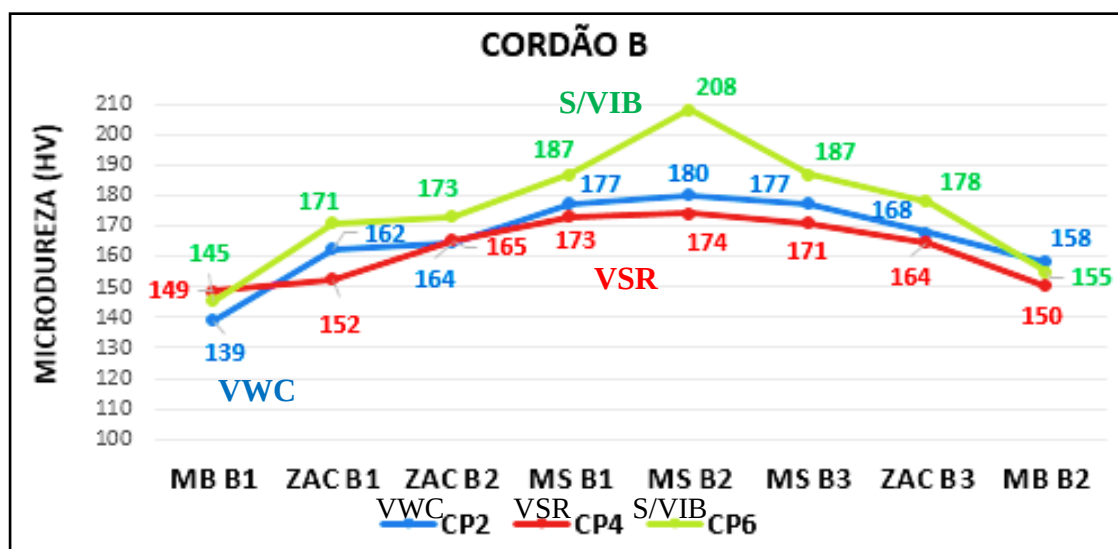
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 101 – Microdureza (HV) nas regiões do cordão A



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 102 - Microdureza (HV) nas regiões do cordão



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nos cordões A e B, verifica-se uma redução dos valores de microdureza para as amostras que receberam tratamento mecânico de vibração (CP2 e CP4) quando comparados com a amostra não tratada (CP6).

O cordão B apresenta valores de microdureza superiores ao cordão A. Isto pode ser explicado pelo fato do cordão A ter recebido calor proveniente do segundo cordão (B), apresentando desta forma, níveis menores de dureza.

4.5 END (ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS)

Todos os cordões foram inspecionados visualmente, e pelos ensaios Líquido Penetrante e Partículas Magnéticas.

Após análise dos resultados dos ensaios, não foram verificadas descontinuidades superficiais em nenhuma das amostras do experimento, com semelhante aspecto visual dos cordões nas amostras tratadas e não tratadas conforme mostram as figuras 103, 104e 105.

Figura 103 - Cordão de solda - CP2: Soldagem com vibração simultânea



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 104 - Cordão de solda CP4: Soldagem com vibração após a realização do cordão



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 105 - Cordão de solda CP6: Soldagem sem vibração



Fonte: Elaborado pelo autor (2018).

5 CONCLUSÕES

- A sobreposição das imagens digitalizadas ao modelo matemático possibilitou visualizar as deformações provenientes do processo de soldagem. Eixos e planos foram definidos para a análise. No plano 1 (X e Z), a vibração não contribuiu para a redução das deformações. Nos planos 2 e 7 (Y e Z), apenas a vibração introduzida simultaneamente à soldagem reduziu levemente a deformação, sendo melhores os resultados nas extremidades dos cordões. Nos planos 3 e 6 (X e Z), todos os CPs tratados mecanicamente por vibração apresentaram leve redução das deformações, com melhores resultados para o processo onde a vibração foi aplicada simultaneamente à soldagem. Nos planos 4 e 5 (Y e Z), observa-se contribuição significativa da vibração na redução das deformações nas regiões das extremidades e central dos cordões.
- Verificou-se uma concavidade excessiva em todas as amostras. A concavidade pôde ser medida em todos os cordões e as amostras vibradas não apresentaram diferenças significativas quando comparadas à amostra não vibrada. A concavidade está relacionada ao ângulo de ataque da tocha de solda, que sendo o mesmo para todos os corpos de prova, verificou-se o mesmo perfil de solda.
- A penetração horizontal na amostra tratada com vibração durante a soldagem apresentou valores ligeiramente maiores, e a vibração obteve valores pouco superiores ao processo convencional. Na penetração vertical, os valores se assemelham, não podendo ser atribuída à vibração uma influência efetiva.
- Na análise da garganta da solda, verificou-se que as amostras tratadas com vibração durante a realização dos cordões, apresentou para os dois cordões de solda, valores ligeiramente superiores que os demais processos. A ZAC das amostras possui larguras e tamanhos semelhantes, não sendo possível atribuir à vibração uma influência positiva ou negativa.
- Na amostra tratada com vibração simultânea (VWC), observou-se uma menor penetração e maior largura dos cordões. A vibração induzida à soldagem, atua na poça de fusão, contribuindo para a agitação do metal líquido, fato que pode explicar uma maior distribuição lateral dos cordões de solda (tanto no primeiro, cordão A como no segundo, cordão B), em detrimento da penetração.

- Na análise microestrutural, o Metal de Base (MB) analisado é predominantemente ferrítico com pequenas ilhas de perlita. A estrutura granular possui tamanho de grãos finos observadas em todas as amostras do experimento. Na região da ZAC para todas as amostras, se pode observar um crescimento de grão ferrítico e estrutura bainítica próximo a zona de ligação (ZL).
- Para os CP2 e CP4 que utilizaram vibração respectivamente, durante e logo após o processo de solda, notou-se uma diferença próxima a Zona de Ligação (ZL), onde observa-se uma estrutura mais refinada, enquanto que a amostra não vibrada (CP6) apresentou grãos colunares mais longos.
- Ao se avaliar a microdureza das amostras, observa-se uma redução da dureza corpos de prova tratados mecanicamente, com melhores resultados para o processo onde se aplica a vibração durante a realização dos cordões de solda.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaio por líquido penetrante. Ensaio por partículas magnéticas** Disponível em <www.abendi.com.br>. Acesso em 15 de julho de 2018.

ADAMS, C. M.; BERRY, J. T.; KLAUBA, B. B. Vibratory stress relief: methods used to monitor and document effective treatment, a survey of users and directions for further research: In: TRENDS IN WELD RESEARCH, 7.,2005, Philadelphia. **Proceedings of international conference**, Philadelphia, 2005. Disponível em: <https://www.asminternational.org/web/smst/search/-/journal_content/56/10192/CP2005TWR0601/CONFERENCE-PAPER?doAsUserId=Zv%252BRiUQAYdn%252Fy6jT%252F9qswg%253D%253D>. Acesso em: 20 de janeiro de 2018.

AHMAD, A. Y.; QUENAEI, A. Fusion Welding Techniques, **Journal of Engineering Research and applications**, v. 6, p. 78-83, mar. 2016.

ALMEIDA, L.F.C.B. **Avaliação da influência da aplicação da vibração mecânica na microestrutura e em características mecânicas de juntas de aço inoxidável martensítico CA6MN soldadas pelo processo FCAW**. 2015. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2015.

ARAÚJO, M. R. V. **Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural**. 2006. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2006.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Weld Integrity and Performance**, ASM Int.,1st ed. New York: ASM 1997. 379p.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **Volume 2: Properties and selection: nonferrous alloys and special -purpose materials**, Materials Park, Ohio: ASM 1990. 890p.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS. **ASM handbook volume 6: Welding, Brazing and Soldering**. 9th ed. ASM 1995. 1299p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook: Welding science and technology**. 9 ed. v. 1 Miami: AWS 2001. 872p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1/D1.1M:2010: Structural welding code - steel**. 22nd ed. Miami: AWS 2010. 540p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.6/D1.6M:2007: Structural welding code - stainless steel**. 2nd ed. Miami: AWS 2007. 276p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D14.1/D14.1M:2005: An american national standard specification for welding of industrial and mil cranes and other material handling equipment**. 4th ed. Miami: AWS 2012. 129p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEER. **Boiler and pressure vessel section II-part C: Specifications for welding rods, electrodes, and filler metals**, New York: ASME 2013. 887p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **A841/A841M**: Standard specification for steel plates for pressure vessels, produced by thermo-mechanical control process (TMCP). ASTM 1998. 5p.

SURESH, B.; et al. Influence of vibratory weld conditioning on hardness of lap welded joints. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology**, v. 8, p. 169–177, jan.2017. Disponível em: < <http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp>>. Acesso em 21 de maio de 2018.

BALASUBRAMANIAN, K.; RAGHAVENDRAN, S.; BALUSAMY, V. Studies on the effect of mechanical vibration on the microstructure of the weld metal. **International Journal on Engineering Technology and Sciences**, v. 2, p. 253-256, 2011. Disponível em: <[http:// www.techsciencepub.com/ijets](http://www.techsciencepub.com/ijets)>. Acesso em 21 de maio de 2018.

BAQAR, JAIN, KHANNA, Vibratory Stress Relief Techniques: A Review of Present Trends and Future Prospects, **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 4, Issue 11, p. 141-144, 2014. Disponível em:<[http:// www.ijetae.com](http://www.ijetae.com)>. Acesso em 22 de maio de 2018.

BONAL TECHNOLOGIES, **Meta-lax vibration stress relief**. Disponível em: <<http://www.meta-lax.com>>, Acesso 15 de março de 2018.

Burzic, M.; et al. Effect of vibration on the variation of residual stresses and impact energy in butt-welded joints. **Structure Integrity And Life**, v. 12, p. 215-220, 2012.

CRISI, G. S.; MENDONCA D. P.; Stress relief of welds by heat treatment and vibration: a comparison between the two methods. **The Library Vibratory Stress Relief**. p. 1 – 8, 2006. Disponível em: <http://www.vsrtechnology.net/wp-content/uploads/crisi_mendonca.pdf>. Acesso em 18 de novembro de 2017.

DAWSON, R.; MOFFAT, D. G.; Vibratory stress relief: a fundamental study of its effectiveness. **Journal of Engineering Materials and Technology**, v.102, p. 169-176, abril, 1980. Disponível em <<https://www.wiap.ch/Alte%20Literatur/dawson-moffat.pdf>>. Acesso em 15 de março de 2018.

DJURIC, D et al, Vibration stress relief treatment of welded high-strength martensitic steel. **Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde**, v. 55, p. 86-93, janeiro de 2013. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/271925330>>. Acesso em 15 de março de 2018.

DUARTE, D.M.D.,**Estudo de uma aço microligado utilizado na estampagem de componentes de automóveis**. 2013. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia metalúrgica e de materiais) – Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto, Porto, 2013.

EQUIPAMENTO FÓRMULA 62. **Informações técnicas do equipamento de vibração.** Stress Relief Engineering SRE. Disponível em: <<http://www.stressreliefengr.com>>. Acesso em março de 2018.

ESAB. **Processo de soldagem arco submerso.** Disponível em: <<http://www.esab.com.br>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2018.

GERDAU. **Catálogo de consumíveis.** Disponível em: <<http://www.gerdau.com.br>>. Acesso em 12 de fevereiro de 2018.

GRIGORYANTS, A. G; et al. Technology of low-frequency vibrational treatment of welded structures in engineering, **Welding International**, v. 29:6, p. 475-478, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/09507116.2014.941672>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2018.

GOVINDARAO, P., SRINIVASARAO P., GOPALAKRISHNA A., SARKAR, M.M.M. Effect of vibratory welding process to improve the mechanical properties of butt welded joints, **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, v..2, p. 2766-2770, ago. 2012.

GUPTA, R. K.; et al. Investigation of cracks generated in columbium alloy (C-103) sheets during deep drawing operation. **Journal Failure. Analls. and Prevent.** v.10, p.228–232, abr. 2010.

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

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

HORNSEY, J. S. Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment. Leraastfotein, jan. 2006. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/14428134/VSR-an-Alternative-to-Thermal-Treatment>> Acesso em 15 de março de 2018.

HUSSEIN A.R.; JAIL N.A.; TALIB A. R. A. Improvement of mechanical welding properties by using induced harmonic vibrations, **Journal of Applied Sciences**, Selangor, v.11, p.348-356, 2011.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 18265.** Metallic materials conversion of hardness values, 2nd ed. 2013. 84p.

JURČIUS, A.; VALIULIS, A. V.; ČERNAŠEJUS, O. U., **Effects of vibration energy input on stress concentration in weld and heat-affected zone of S355J2 steel – Diffusion and Defect Data Pt.B: Solid State Phenomena**, v.165, p. 73-78, 2010.

KANDIL, F. A; et al. A review of residual stress measurement methods -a guide to technique selection, **National Physical Laboratory**, Teddington, 2001. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/publications/a-review-of-residual-stress-measurement-methods-a-guide-to-technique-selection>> Acesso em: 15 de fevereiro de 2018.

KAINTH, M.; GUPTA, D. A review: effect of vibrations on mechanical properties of welded joints, **International Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, p. 7-12, fev.2015.

KLAUBA B.B.; ADAMS, C. M.; BERRY, J.T. Vibratory Stress Relief: Methods used to Monitor and Document Effective Treatment. A Survey of Users and Directions for Further Research. **Proceedings of the 7th Conference on Trends in Welding Research**, n.16, Georgia, maio 2005.

KOU, S. **Welding Metallurgy**, New York: John Wiley & Sons, 1987. 459p.

JOSE, M. J.; KUMAR, S. S.; SHARMA, A.; Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds, **Science and Technology of Welding & Joining**. 2015. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/281077323>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

LINCOLN WELD. **Consumíveis para arco submerso**. Disponível em: <www.lincolnelectric.com>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

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

MACIEL, L, F, C. **Efeitos da vibração simultânea nas propriedades mecânicas de juntas de aço astm a131 soldadas pelo processo FCAW**. 2014. 111f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MARINO, N. M. R. **Diretrizes para apresentação de trabalhos acadêmicos FEG/UNESP**, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá, 2016.

MARTINS, C.P.; MORILLA, J.C.; VILLANI, P.V. Alívio de tensões e condicionamento de solda por vibrações sub-ressonantes. In: CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM 38., 2012, Ouro Preto, Minas Gerais. 2012. Disponível em: < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762018000100428>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

MILLER WELDS. **Manual do Equipamento DC 800**, Disponível em: <www.millerwelds.com>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

MISHCHENKO, A., SCOTTI, A. Tensões residuais em soldagem a arco: uma visão holística, **Soldagem & Inspeção**. v. 23, p.93-112, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2301.10>>. Acesso em 7 de maio de 2018.

MUNSI, A.S; WADDELL, A. J.; WALKER, C. A. The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution. **Journal of Materials: Design and Applications**. Glasgow, p. 99-111, 2001

NASIR N. S. Review on welding residual stress, **ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences**, Kelantan, v. 11, p. 6166-6175, maio de 2016. Disponível em: < www.arnpjournals.com>. Acesso em: 18 de novembro de 2017

NETO, A. B., **Alívio de Tensões em tubos a partir da aplicação de vibração mecânica**. 2016. 148f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

NOYAN, C.; et al. Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation. Springer Science Business Media. New York, 1987. Disponível em: <<https://www.springer.com/la/book/9781461395713>> Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

OLUFEMI, A. F.; ADEMOLA, I. S. Effects of melt vibration during solidification on the mechanical property of mg-al-zn alloy. **International Journal of Metallurgical Engineering**, Akure, v. 1, p. 40-43, mar. 2012. Disponível em: <<http://journal.sapub.org/ijmee>>. Acesso em 21 de janeiro de 2018.

Park, D.B.; et al. Strengthening mechanism of hot rolled Ti and Nb microalloyed HSLA steels containing Mo and W with various coiling temperature. **Materials Science and Engineering** v. 560, Seul, p. 528 – 534, 2013.

PATIL, M. S.; WAYAKOLE, R.R.; SARODE, K. D.; Vibratory Residual Stress Relief In Manufacturing - A Review., **International Journal of Engineering Sciences & Research Technology**, Pune, v. 6, p.609-613, maio de 2017.

PRAKASH, J.; TEWARI, S. P.; SRIVASTAVA, B. K. Nucleation, grain growth, solidification and residual stress relaxation under stationary and vibratory welding condition - a review. **International Journal on Engineering Technology and Sciences**, Varanasi. v. 1, p. 1-7, mar. 2010.

PUCKO, B.; GLIHA, V.; Charpy toughness of vibrated microstructures, **Metalurgija Metabeka**. Maribor, v. 44, p.103-106, 2005.

QINGHUA, L.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N.; Improving welded valve quality by vibratory weld conditioning, **Mechanics of Materials**. Shanghai, v. 40, p. 565-574, out. 2006. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/mechmat>. Acesso em 7 de maio de 2018.

RAO, P. G.; RAO, P. S.; KRISHNA, A. G. Review on residual stresses in welded joints prepared under the influence of mechanical vibrations, **Journal of Manufacturing Technology Research**, v. 6, p. 33-40, 2017.

ROBBINS, M. E.; **Topics in Vibratory Stress Relief of Weldments**, 2014. 33f. Seminar Submitted to the Faculty of Rensselaer at Hartford in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, dezembro de 2014.

SANTOS, C. H., **Estudo do Alívio das tensões residuais, em peça estampada, pela técnica de vibrações mecânicas**. 2011. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

SCOTTI, A; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG: Um melhor entendimento, melhor desempenho**, Artliber Editora, São Paulo, 2008.

SEDEK, P. Some experiences concerning the dimensional stabilization by vibration of welded structures. **International Symposium: Stress and deformation of welded construction**. Zagreb, p. 19-24, maio de 1982.

SEDEK, P.; STANISLAW, WEGLOWSKY Application of mechanical vibration in the machine building technology. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, 2012.

SEDEK, P.; et al. Vibratory stabilization – constant development for industrial practice. **Biuletyn Instytutu Spawalnictwa**, v. 1, p. 6-15, 2016.

SHAIKH, S. N. Vibratory residual stress relieving - a review, **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, 5 th National Conference. Pune, p. 1-4, 2016. Disponível em: <<http://www.iosrjournals.org>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

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

SINGH, P. K.; PATEL, D.; PRASAD, S.B. Development of vibratory welding technique and tensile properties investigation of shielded metal arc welded joints. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, p. 2-6, setembro de 2016. Disponível em: <www.indjst.org>. Acesso em 21 de janeiro de 2018.

SINGH, P. K., PATEL, D., PRASAD, S.B., Investigation on the effect of vibrations on cooling behavior and mechanical properties of smaw butt welded joints, **U.P.B. Science Bull., Series D**, Jamshedpur, v. 79, p. 137-146, 2017.

SKINNER, R. D. An investigation into the theory behind sub-ressonant stress relief. **The Library Vibratory Stress Relief** p. 10, 1987.

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

SURESH, P. V. et al. Influence of vibratory weld conditioning on hardness of lap welded joints. **International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)**, v. 8, p. 169-177, janeiro de 2017. Disponível em: <<http://www.iaeme.com/IJMET/issues.asp?JType=IJMET&VType=8&IType=1>>. Acesso em 21 de janeiro.

TANIGUCHI, C., **Engenharia de Soldagem e Aplicações**, LTC, Rio de Janeiro, 1982. 461p.

TAILOR, J. K.; et al. A review paper on effects of vibration on mechanical properties and defect of similar and dissimilar weld joints in tig **Welding, international Journal for Innovative Research in Science & Technology**. v. 4, p. 170-174, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.ijirst.org>>. Acesso em: 15 de março de 2018.

TEWARI, S. P., SHANKER. Effect of longitudinal vibration on mechanical properties of mild steel weldments, **Journal of Engineering Manufacture**, v. 207, p.173-177, 1993.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. H. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. 6 ed. 2008. Editora Blucher, São Paulo SP, 1992.

WALKER, C. A.; et al.; Vibratory stress relief – an investigation of the underlying processes. **The Library Vibratory Stress Relief**, UK , ago. 1994.

WEITE WU, Influence Of Vibration Frequency On Solidification Of Weldments, **Department of Materials Science and Engineering**. Taiwan, v. 42, p. 661–665, 1999.

WEN, S Y LIU, S CHE, L LIU, CHEN YANG, Influence of high frequency vibration on microstructure and mechanical properties of TIG welding joints of AZ31 Magnesium alloy, **Transaction of nonferrous metals society of China**, v. 25, p .397-404, 2015.

XU, J; CHEN, L; NI, C; Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes, **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 84, p. 298-303, 2007. Disponível em: < www.elsevier.com/locate/ijpvp>. Acesso em: 15 de março de 2018.

YANG, Y. P.; Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, p. 856-862, out. 2008.

YILDIRIM, H.; MARQUIS, G. Fatigue strength improvement factors for high strength steel welded joints treated by high frequency mechanical impact. **International Journal of Fatigue**. v. 44, p. 168-176, nov. 2012. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2012.05.002>>. Acesso em 7 de março de 2018.

YILDIRIM, H. C.; MARQUIS, G. Overview of fatigue data for high frequency mechanical impact treated welded joints, **Welding in the World**, v. 57, issue 7/8, 2012.

YILDIRIM, H. C.; MARQUIS, G. B. A round robin study of high frequency mechanical impact treated welded joints subjected to variable amplitude loading. **International Institute of Welding**, 8 comission, Finlândia, 2012.

ZEEMANN, A.; Tensões residuais em soldagem. **Infosolda Portal Brasileiro de Soldagem**, p.1-5, 2003. Disponível em:<<http://www.infosoldas.com.br/artigos/metsol03.pdf>>. Acesso em janeiro de 2018.