



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JULIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Guaratinguetá

LUIS NORBERTO DA FONSECA

**CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL E COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE JUNTAS DE AÇO USI-SAR-80T SOLDADAS PELO PROCESSO
GMAW COM AUXÍLIO DE PROCESSOS VIBRACIONAIS.**

Guaratinguetá

2016

LUIS NORBERTO DA FONSECA

**CARACTERIZAÇÃO MACRO E MICROESTRUTURAL E COMPORTAMENTO
MECÂNICO DE JUNTAS DE AÇO USI-SAR-80T SOLDADAS PELO PROCESSO
GMAW COM AUXÍLIO DE PROCESSOS VIBRACIONAIS.**

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 Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Caporalli Filho

Guaratinguetá
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

A663c	Araújo, Márcia Regina Vieira de Caracterização microestrutural do metal de solda depositado por arco submerso em chapas de aço-carbono estrutural / Márcia Regina Vieira de Araújo. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2006 118 p. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2006 Orientador: Juno Gallego Bibliografia: p. 112-118 1. Arco de soldagem submersa. 2. Microestrutura. 3. Aço - Inclusões. 4. Solda e soldagem.
-------	---

LUIS NORBERTO DA FONSECA

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: MATERIAIS**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ÂNGELO CAPORALLI
UNESP/FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP/FEG


Prof. Dr. EMERSON AUGUSTO RAYMUNDO
FATEC Pindamonhangaba

Agosto de 2016

DADOS CURRICULARES

LUIS NORBERTO DA FONSECA

NASCIMENTO	14.01.1975 – BELÉM/PA
FILIAÇÃO	Carlos Norberto Pereira da Fonseca Luiza Eulália Dutra
1995/2000	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Universidade de Taubaté
2014/2016	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

De modo especial, dedico este trabalho a meu pai (in memoriam), minha mãe, esposa, filhos e a todas as pessoas que amo. Todos, a sua maneira, foram os meus grandes incentivadores.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, fonte de amor e vida, pela minha saúde, inteligência, persistência, por ter me concedido muitas bênçãos nessa longa jornada e pela vida das pessoas que amo incondicionalmente.

À minha Avó, Odila Enricone Dutra (in memorian), que com seu jeito simples, rígido e sério, porém carinhoso, sempre me manteve no caminho certo.

Aos meus pais, pela compreensão, paciência, cobranças, suporte e incentivos concedidos em minha educação e formação. Principalmente pelos preciosos exemplos e lições deixadas, doloridas ou não, ao longo de toda minha vida.

Ao meu pai, Carlos Norberto Pereira da Fonseca (in memorian) que até mesmo em seu último olhar e suspiro, com amor e carinho, me motivou e incentivou a seguir em frente. Este olhar ficará para sempre em minhas lembranças!

À minha mãe, LuizaEulália Dutra, que mesmo a distância me incentiva, motiva e apoia nesta jornada. À minha esposa, Keise Luciane Clemente, que meu deu dois filhos maravilhosos e, a sua maneira, me incentivou e apoiou durante toda essa jornada.

Aos meus filhos, Matheus Norberto Clemente da Fonseca e Maithê Vitória Clemente da Fonseca, que, apesar, de seus poucos anos de vida, são os grandes incentivadores do meu contínuo aperfeiçoamento.

Ao meu orientador, Professor Dr. Angelo Caporalli Filho, sem sua orientação, preciosos ensinamentos, ideias, incentivos, dedicação, amizade e exemplo de profissionalismo, este trabalho, aqui apresentado, não seria uma realidade!

A todos os Doutores, Mestres, técnicos e alunos que fazem parte do Departamento de Materiais e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista “Júlio deMesquita Filho” Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pela contribuição e por prover os meios para a realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram e me auxiliaram para que este trabalho pudesse se concretizar!

*“Aprenda com as pessoas
Planeje com as pessoas
Comece com que elas já têm
Construa sobre o que elas já
sabem
Dos melhores líderes
Quando a tarefa é realizada
Todas as pessoas dirão
Nós que fizemos”
LaoTzu – Arte da Guerra
Filosofo chinês – Século VI A.C*

*“Não basta saber, é preciso também
aplicar; não basta querer, é preciso também
fazer.”
Johann Goethe*

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

RESUMO

A soldagem, por envolver muitos fenômenos metalúrgicos, é considerada um processo de alta complexidade, prático, de importância e aplicação inquestionável. Diante de um cenário de rápido e vigoroso crescimento das demandas industriais, visando a melhoria contínua da qualidade das juntas soldadas, percebe-se a necessidade latente por novas tecnologias, equipamentos e materiais. Nas últimas décadas, os tratamentos mecânicos por vibração vêm se apresentando com alternativas potenciais no auxílio de soluções de problemas oriundos dos processos de soldagem e como alternativa ao tratamento térmico de alívio de tensões. O presente trabalho visa identificar e analisar, qualitativa e quantitativamente, os benefícios e influência dos processos vibracionais na microestrutura e propriedades mecânicas das juntas soldadas. Com o auxílio do tratamento mecânico de alívio de tensões por vibração e do processo de soldagem GMAW semi-automatizado e com proteção gasosa ativa de CO₂, amostras em aço carbono ARBL – USI-SAR 80T foram soldadas em três condições de contorno distintas. De onde, corpos de prova foram retirados, preparados e submetidos à análise macro e micro estrutural e à ensaios destrutivos e não destrutivos. Ao término do experimento, como resultados, foram observados, em valores médios, reduções de 54,55% em deformações e de 7,1% de dureza, além do aumento de 10,5% no limite de ruptura e 30,1% na tenacidade da junta. E, ainda, aumento nos parâmetros dimensionais do cordão de solda e homogeneização de fase e refinamento de grãos.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem. Vibração. Alívio de tensões. Alívio de tensões por vibração. Condicionamento de solda.

FONSECA, L. N., **Characterization macro and microstructural and mechanic behavior joints in USI-SAR-80T carbon steel welded by GMAW process with the aid vibratory process.** Dissertation (Master's Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

Welding, by involving many metallurgical phenomena is considered a high complexity process, practical, importance and unquestionable application. Faced with a fast setting and strong growth of industrial demands for continuous improvement of quality of welded joints, we see the latent need for new technologies, equipment and materials. In last decades, the mechanical vibration treatments have been presented with a potential alternative to aid of problem solutions originated from welding processes and as an alternative to heat treatment of stress relief. The objective of this study is identify and analysis, qualitatively and quantitatively, the benefits and influence of vibrational processes at mechanical property and microstructure of material of welded joints. With the aid of mechanical treatment of stress relief by vibration and semi-automated GMAW welding process and active shielding gas CO₂, carbon steel samples in HSLA - USI-SAR 80T form welded in three different boundary conditions. Where, samples were taken, prepared and submitted to macro and micro structural analysis and destructive and non-destructive testing. At the end of the experiment, as results were observed in mean values, reduction of 54.55% in deformations and 7.1% hardness, and increased to 10.5% at the breaking point and 30.1% in tenacity of the joint. And also increase the dimensional parameters of the weld bead and phase homogenization and grain refinement.

KEYWORDS: Welding. Stress relief. Vibratory stress relief. Welding Condition.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Soldagem GMAW	27
Figura 2: Ilustração - Equipamento de soldagem GMAW.....	28
Figura 3: Macroestrutura esquemática da secção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas.....	30
Figura 4: Curva de temperatura em diferentes pontos de uma junta soldada.	31
Figura 5: Representação esquemática da junta soldada.	31
Figura 6: Epitaxia ou Crescimento epitaxial.	33
Figura 7: Modelo para descrever tensões térmicas	37
Figura 8: Modelo para descrever tensões térmicas (a) Conjunto de barras e (b) Barra central sendo aquecida.....	38
Figura 9: Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas nas três barras e na solda de topo.	38
Figura 10: Ilustração do desenvolvimento das tensões residuais longitudinais durante a soldagem.....	39
Figura 11: Ilustração do efeito das descontinuidades estruturais na configuração da linha de tensões.	40
Figura 12: Ilustração de Contração Transversal.....	41
Figura 13: Ilustração de Contração Longitudinal.....	42
Figura 14: Ilustração de Deformação Angular.....	42
Figura 15: Ilustração do dobramento de uma viga.	42
Figura 16: Ilustração de Rotações durante a soldagem.	42
Figura 17: Ilustração de Empenamento.....	43
Figura 18: Ilustração de Porosidade em junta soldada.	43
Figura 19: Porosidade em uma junta soldada.....	43
Figura 20: Ilustração de Porosidade Distribuída.	43
Figura 21: Ilustração de Porosidade agrupada.	43
Figura 22: Ilustração de Porosidade alinhada.	43
Figura 23: Excesso de respingo em junta soldada.....	44
Figura 24: Ilustração de mordedura em juntas soldadas.	44
Figura 25: Falta de fusão em juntas soldadas.....	45
Figura 26: Deposição Insuficiente em juntas soldadas.	45
Figura 27: Rechupe de carácter em junta soldada.....	46

Figura 28: Falta de penetração em uma junta soldada.	46
Figura 29: Inclusão de escória em junta soldada.....	47
Figura 30: Trinca em uma junta soldada.	47
Figura 31: Gráfico produzido durante o tratamento de alívio de tensões ressonante.	50
Figura 32: Gráfico produzido durante o tratamento de alívio de tensões sub ressonantes.	51
Figura 33: Estudo do efeito da vibração na dissipação de energia.....	52
Figura 34: Exemplos de equipamentos disponíveis comercialmente.....	54
Figura 35: Exemplos de tratamento vibracional com fixação diretamente no componente. ..	54
Figura 36: Exemplos de tratamento vibracional com o auxílio de uma mesa de vibração.	55
Figura 37: Lay out de soldagem.....	57
Figura 38: Gabarito de soldagem	58
Figura 39: Desenho do gabarito de soldagem.	59
Figura 40: Máquina de corte portátil adaptada para soldagem	60
Figura 41: Equipamento de soldagem utilizado	61
Figura 42: VSR-800 Vibratory stress Relief System.	62
Figura 43: Componentes do equipamento de vibração.	62
Figura 44: Fresamento das laterais das chapas e chanfro das juntas.....	65
Figura 45: Dimensões das chapas preparadas para soldagem.....	66
Figura 46: Chanfro duplo V	66
Figura 47: Divisão das chapas em quadrantes e análise de deformações.	67
Figura 48: Instrumentos utilizados	68
Figura 49: Lay out de corte de amostras	69
Figura 50: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.....	71
Figura 51: Equipamento de ensaio universal – Modelo INSTRON 8801.....	71
Figura 52: Ilustração dos corpos de prova para ensaio Charpy.....	72
Figura 53: Dimensões dos corpos de prova de ensaio de impacto Charpy transversal.....	72
Figura 54: Máquina de impacto Trebel – PSW30.....	73
Figura 55: Corpo de prova para ensaio de dobramento	73
Figura 56: Esquema do perfil de medida de dureza vickers.	74
Figura 57: Sequência de soldagem.....	75
Figura 58: Cordão de solda - Condição de soldagem S1	77
Figura 59: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S1	77
Figura 60: Cordão de solda - Condição de soldagem S2	78
Figura 61: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S2	78

Figura 62: Cordão de solda - Condição de soldagem S3	79
Figura 63: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S3	79
Figura 64: Deformações superficiais - Condição de soldagem S1.....	80
Figura 65: Deformações superficiais - Condição de soldagem S2.....	81
Figura 66: Deformações superficiais - Condição de soldagem S3.....	81
Figura 67: Macrografia - Condição de soldagem S1.....	82
Figura 68: Macrografia - Condição de soldagem S2.....	82
Figura 69: Macrografia - Condição de soldagem S3.....	83
Figura 70: Visão geral das condições de soldagem.....	83
Figura 71: Micrografia - Metal de Base	85
Figura 72: Micrografia – ZTA	86
Figura 73: Micrografia – ZF	87
Figura 74: Ensaio de Tração - Condição de Soldagem S1	88
Figura 75: Ensaio de Tração - Condição de soldagem S2.....	89
Figura 76: Ensaio de Tração - Condição de Soldagem S3.....	89
Figura 77: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S1.....	90
Figura 78: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S2.....	91
Figura 79: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S3.....	91
Figura 80: Ensaio de impacto – Solda.....	91
Figura 81: Ensaio de impacto – ZTA	92
Figura 82: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S1	93
Figura 83: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S2	93
Figura 84: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S3	94
Figura 85: Ensaio de dureza - Média por área	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cenários de soldagem executados.....	57
Tabela 2: Especificação técnica - Máquina de corte	60
Tabela 3: Especificação técnica do equipamento de soldagem.....	61
Tabela 4: Composição química aproximada do Aço carbono USI-SAR-80T.	63
Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço carbono USI-SAR-80T.....	63
Tabela 6: Composição química (%) aproximada do metal de adição ER 70S-6.....	64
Tabela 7: Propriedades mecânicas do metal de adição ER 70S-6.....	64
Tabela 8: Dimensões do chanfro	66
Tabela 9: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S1	75
Tabela 10: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S2	76
Tabela 11: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S3	76
Tabela 12: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S1.....	89
Tabela 13: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S2.....	89
Tabela 14: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S3.....	89
Tabela 15: Ensaio de impacto – Solda	90
Tabela 16: Ensaio de impacto – ZTA.....	90
Tabela 17: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S1	93
Tabela 18: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S2	94
Tabela 19: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S3	94
Tabela 20: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S1.....	95
Tabela 21: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S2.....	95
Tabela 22: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S3.....	96

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Aporte térmico.....	34
---------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	-	American Society for Metals
ASTM	-	American Society for Testing and Materials
ASME	-	American Society of Mechanical Engineers
AWS	-	American Welding Society
CIMM	-	Centro de Informações Metal Mecânica
IIW	-	International Institute of Welding
SAE	-	Society of Automotive Engineers
VSR	-	Vibratory Stress Relief
VWC	-	Vibratory Weld Conditioning
GMAW	-	Gas Metal Arc Welding
MAG	-	Metal Active Gas
MIG	-	Metal inert Gas

LISTA DE SIMBOLOS

Mpa	Mega Pascal
°C	Temperatura – Graus Celsius
I	Corrente
A	Ampere
Hz	Hertz
V	Volts
kJ/cm	Aporte Térmico
HV	Dureza Vickers
CDP	Corpo de prova
mm/s	Velocidade de deposição

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVO	24
2.	REVISÃO BILIOGRÁFICA.....	25
2.1	MÉTODOS DE UNIÃO DOS METAIS	25
2.2	SOLDAGEM	25
2.2.1	Processo soldagem por pressão.....	26
2.2.2	Processo de soldagem por fusão	26
2.3	PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (GAS METAL ARC WELDING)	27
2.4	METALURGIA DA SOLDAGEM	29
2.4.1	Zona não afetada termicamente ou metal base (MB).....	31
2.4.2	Zona termicamente afetada (ZTA)	32
2.4.3	Zona fundida (ZF)	33
2.4.3.1	Zona de ligação (ZL)	33
2.5	APORTE TÉRMICO.....	34
2.6	TENSÕES RESIDUAIS	35
2.7	DEFEITO DE SOLDA	40
2.7.1	Descontinuidades dimensionais	41
2.7.2	Descontinuidades estruturais em soldas de fusão	43
2.8	ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÃO	47
2.8.1	Histórico.....	47
2.8.2	Alívio de tensões por vibração	49
2.8.3	Processo de alívio de tensão por vibração	53
2.8.4	Processo de condicionamento da solda	53
2.8.5	Equipamentos de alívio de tensões por vibração	53
2.8.6	Tratamento térmico vs vibracional.....	55

3.	MATERIAS E MÉTODOS.....	57
3.1	PLANEJAMENTO DA SOLDAGEM.....	57
3.1.1	Equipamentos.....	58
3.1.1.1	Gabarito de soldagem	58
3.1.1.2	Máquina de corte portátil.....	60
3.1.1.3	Equipamento de soldagem	60
3.1.1.4	Equipamento de alívio de tensões por vibração.....	61
3.2	MATERIAIS.....	63
3.2.1	Material de base	63
3.2.2	Metal de adição	64
3.2.3	Proteção Gasosa	65
3.3	PREPARAÇÃO DAS CHAPAS PARA SOLDAGEM	65
3.4	ENSAIOS MECÂNICOS	67
3.4.1	Inspeção visual do cordão de solda	67
3.4.2	Análise de descontinuidade dimensionais.....	67
3.4.3	Ensaio por líquido penetrante	68
3.4.4	Preparação dos corpos de prova	68
3.4.5	Análise de Macrografia	70
3.4.6	Análise de Micrografia	70
3.4.7	Ensaio de tração.....	71
3.4.8	Ensaio de Impacto Charpy	72
3.4.9	Ensaio de dobramento	73
3.4.10	Ensaio de dureza Vickers.....	73
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	75
4.1	Aporte térmico	75
4.2	Inspeção visual e por líquido penetrante do cordão de solda	77
4.3	Análise de descontinuidade dimensionais	80

4.4	Análise de Macrografia.....	81
4.5	Análise de Micrografia	84
4.6	Ensaio de tração	88
4.7	Ensaio de Impacto – Charpy	90
4.8	Ensaio de dobramento.....	92
4.9	Ensaio de dureza Vickers.....	95
5.	CONCLUSÕES	97
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1. INTRODUÇÃO

A soldagem é uma técnica de unir duas ou mais partes constitutivas de um todo, assegurando entre elas a continuidade do material em suas respectivas, características mecânicas e químicas. Presente no dia a dia de todos, com mais de 50 processos distintos de soldagem com utilização industrial, pode ser considerado um dos mais importantes processos de fabricação e técnica de união permanente de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de processo e de materiais. Sua importância é evidenciada tanto pela presença nas mais diferentes atividades industriais, quanto pela influência que uma boa soldabilidade tem no desenvolvimento de novos tipos de aços e outras ligas metálicas.

É uma tecnologia em desenvolvimento, que vem progredindo rapidamente nas últimas décadas, onde, o tempo todo, novas técnicas, procedimentos, materiais, ferramentas e equipamentos são pensados para entender as necessidades e resolver problemas oriundos dos processos de soldagem. Por envolver muitos fenômenos metalúrgicos (fusão, solidificação, difusão, transformações no estado sólido, descontinuidades, deformações causadas pelo calor e tensões residuais), pode ser considerado um processo crítico de alta complexidade e para que seja utilizado com eficiência é necessário entender os princípios envolvidos no processo.

A grande maioria dos processos de soldagem é baseada na aplicação, na região da junta, de energia térmica e mecânica. No caso do processo de soldagem GMAW – MAG (Gas Metal Active Welding – Metal Active Gas) e outros processos similares, a intensa concentração de calor durante a soldagem submete as regiões próximas à solda a um severo ciclo térmico, causando o aquecimento e um resfriamento não uniforme do material. Introduzindo ou maximizando a ocorrência, ao longo de uma secção do componente mecânico, de deformações plásticas heterogêneas, tensões residuais, transformações de fases, obtenção de fases indesejáveis e crescimento de grãos na região da solda que juntamente com a formação de descontinuidades existentes na solda, podem prejudicar a integridade e o desempenho da junta soldada.

O tratamento térmico de alívio de tensões é o método mais tradicional no tratamento e minimização das descontinuidades decorrentes do processo de soldagem. Todavia, sua aplicação, é muitas vezes limitada pela condição de fabricação, pelo tamanho das estruturas, custo, energia e tempo de processamento. Os processos vibracionais vêm se apresentando com uma alternativa às limitações do processo térmico de alívio de tensões, por não alterar ou

afetar as demais propriedades mecânicas do componente mecânico e por apresentar um menor custo de energia e tempo de processamento.

As primeiras observações e estudos, a respeito dos benefícios da vibração no alívio de tensões residuais e no condicionamento da solda foram obtidos por volta de 1943 (durante a segunda guerra mundial). Quando, devido à severa escassez de tempo, as indústrias alemãs de equipamentos pesados foram forçadas a abandonarem os métodos rudimentares de alívio de tensão e transformarem sua fabricação, sem os tratamentos por calor. Enfrentaram assim, o problema de como aliviar as tensões de grandes soldas de preparação para uma manufatura de precisão. Rapidamente observaram que grandes fabricações transportadas por caminhões ou por trem da oficina de soldagem até o local da manufatura de precisão, quando comparado com aquelas que foram soldadas e manufaturadas no mesmo local ou em instalações próximas, demonstraram uma estabilidade dimensional superior durante a manufatura. E, por fim, após a guerra, engenheiros alemães e americanos iniciaram estudos referente a esta observação e produziram o primeiro protótipo de equipamento.

O tratamento vibracional é especialmente usado para o alívio de tensões residuais em grandes estruturas, para componentes mecânicos cujo custo de tratamento térmico é alto, para componentes mecânicos com tolerâncias dimensionais apertadas onde o tratamento térmico poderia causar distorções que poderiam exceder as tolerâncias, para componentes mecânicos fabricados utilizando diversos materiais. Consiste no alívio das tensões residuais e estabilização dimensional do componente mecânico através da introdução de energia vibracional.

Apesar de considerado uma metodologia de crescente utilização, ainda é um assunto pouco explorado, que pouco se sabe a respeito e, cuja sua eficácia divide os especialistas. Porém, mesmo diante de poucas literaturas, pesquisas ou publicações, é considerado consistentemente efetivo em comparação com o processo térmico de alívio de tensões residuais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Considerada um processo especial pela série de normas ABNT ISO 9000, por envolver muitos fenômenos metalúrgicos (fusão, solidificação, difusão, transformações no estado sólido, descontinuidades, deformações causadas pelo calor e tensões residuais), a soldagem é considerada um método de alta complexidade, prático de importância e aplicação em todos os setores das indústrias. Que, diante de um cenário de rápido e vigoroso crescimento das demandas industriais e necessidade, em escala crescente, de materiais com elevado níveis de resistência e tenacidade, percebe-se, apesar de todos os avanços obtidos ao longo dos anos, a necessidade latente por novas tecnologias, equipamentos e materiais na busca contínua da melhoria na qualidade das juntas soldadas.

Os processos vibracionais são considerados técnicas emergentes que se apresentam como alternativas potenciais no auxílio de soluções ou minimização de problemas oriundos dos processos de soldagem e como alternativa ao tratamento térmico de alívio de tensões. Trata-se de um tema recente no Brasil, porém, apesar de consolidado e amplamente utilizado mundialmente, ainda divide as opiniões de engenheiros, pesquisadores e especialistas.

Portanto o desenvolvimento da tecnologia, entendimento dos fenômenos envolvidos e correta aplicação dessa metodologia poderá resultar em um avanço significativos para as indústrias, diante do cenário desafiador da busca contínua da melhoria da qualidade das propriedades mecânicas das juntas soldadas. Além da possibilidade de promover a redução de custo e tempo do tratamento, minimizar os riscos de impactos ambientais e permitir o tratamento de componentes fabricados em materiais dissimilares ou de componentes de grande porte.

1.2 OBJETIVO

O objetivo proposto é analisar os benefícios e influência dos tratamentos mecânicos por vibração, simultâneo e posterior a soldagem, nas propriedades mecânicas de juntas de aço carbono USI-SAR-80T soldadas através do processo de soldagem MAG - Metal Active Gas (GMAW) com proteção gasosa de CO₂ comercialmente puro. Consiste na análise da macroestrutura da junta soldada (descontinuidades oriundas do processo de soldagem, tamanho da ZTA, zona de fusão, penetração da solda, etc...), da microestrutura (fases presentes, tamanho de grão, tipo de estruturas, etc...) e das propriedades mecânicas, mensuradas através dos ensaios mecânicos destrutivos (Charpy, Tração e dobramento), e semi ou não destrutivos (Deformações e micro dureza). Tendo em vista que se trata de uma análise comparativa, os resultados obtidos no processo de soldagem convencional foram tomados como referência para comparações com os resultados das demais condições de soldagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTODOS DE UNIÃO DOS METAIS

Os métodos de união dos materiais são, comumente, divididos em duas categorias principais. A primeira, baseada na ação de forças macroscópicas entre as partes a serem unidas, tendo como exemplo a parafusagem e a rebiteagem, onde a resistência da junta é dada pela resistência ao cisalhamento do parafuso ou rebite aliada à força de atrito entre as superfícies em contato. A segunda, baseada na ação de forças microscópicas (Interatômicas e intermoleculares), tendo como exemplo a brazagem, colagem e a soldagem, onde a união é obtida pela aproximação dos átomos ou moléculas, das peças a serem unidas ou de um material intermediário adicionado à junta, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas, particularmente ligações metálicas e de Van der Waals (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

2.2 SOLDAGEM

É uma técnica, mais prática e econômica, de unir duas ou mais partes constitutivas de um todo, assegurando entre elas a continuidade do material e em consequência suas características mecânicas e químicas (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992). Tem aplicação desde a indústria microeletrônica até a fabricação de navios e outras estruturas com centenas ou milhares de toneladas de peso. Utilizada na fabricação de estruturas simples, como portões e grades, assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias química, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanato, joias e de outros objetos de arte (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; AHMAD, 2016).

Na literatura, são encontradas várias definições de soldagem (GOURD, 1980; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Todavia, para a Associação Americana de Soldagem (American Welding Society – AWS) a definição de soldagem adotada é: ***“Processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição”***(AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, 1994).

Os processos de soldagem são classificados pela natureza da união, agrupando os processos partindo da distinção entre a soldagem no estado sólido e por fusão, ou pelo tipo de fonte de energia empregada (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

De acordo com a classificação por tipo de fonte de energia, os processos de soldagem se subdividem em: 1) Fonte mecânica: O calor é gerado por atrito ou por ondas de choque, ou por deformação plástica do material; 2) Fonte química: O calor é gerado por reações químicas exotérmicas; 3) Fonte elétrica: O calor é gerado pela passagem de corrente elétrica ou com a formação de um arco elétrico; 4) Fonte radiante: O calor é gerado por radiação eletromagnética (laser) ou por um feixe de elétrons acelerados através de um potencial.

Enquanto que, pela natureza da união, os processos se subdividem em: 1) Processo por pressão ou por deformação; 2) Processo por fusão.

2.2.1 Processo soldagem por pressão

Processo de soldagem na qual a união das partes é resultado de, somente, a aplicação de pressão ou a combinação de pressão e calor. Dentre outros, destacam-se o processo de soldagem por forjamento, ultrassom, fricção, difusão e explosão (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009; AHMAD, 2016).

2.2.2 Processo de soldagem por fusão

É o processo de união de metais no qual as partes soldadas são fundidas por meio de ação de energia elétrica ou química, com ou sem material de adição (consumível), sem que ocorra aplicação de pressão (PAULI; ULIANA, 1996; KOU, 2003; AHMAD, 2016).

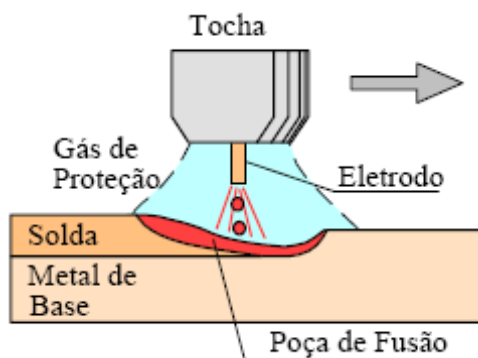
Este, por sua vez, também é subdividido em: 1) Soldagem à gás (Gas Welding): Processo pelo qual a união das partes é realizada pelo aquecimento gerado por uma chama oriunda da reação de gases; 2) Soldagem por arco elétrico (Arc Welding): Processo pelo qual a união das partes é realizada através de arco elétrico entre o eletrodo e o metal de base; 3) Soldagem por feixe de alta energia (High energy Beam Welding): Processo pelo qual a união das partes é realizada utilizando um fonte de calor de potência extremamente alta (AHMAD, 2016).

Devido à tendência de reação do material fundido com os gases da atmosfera, a maioria dos processos de soldagem por fusão utiliza algum tipo de proteção para minimizar estas reações (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009). Assim, a soldagem pode ser feita sob vácuo, com gás inerte, gás ativo, fluxo e sem proteção (KOU, 2003; WAINER; BRANDI; MELLO, 1992).

2.3 PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW (GASMETALARCWELDING)

A soldagem a Arco Gás Metal (Gas Metal ArcWelding – GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico (Consumível), alimentado de forma contínua, e a peça. Como o arame eletrodo (metal de adição) não possui revestimento como no processo por eletrodo revestido, a proteção do arco e da poça de fusão ocorre através de um gás de proteção, inerte ou ativo, suprido externamente (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; QUITES, 2002; KOU, 2003; MODENESI, 2006; AHMAD, 2016). Conforme figura 1.

Figura 1: Soldagem GMAW



Fonte: (MODENESI, 2006).

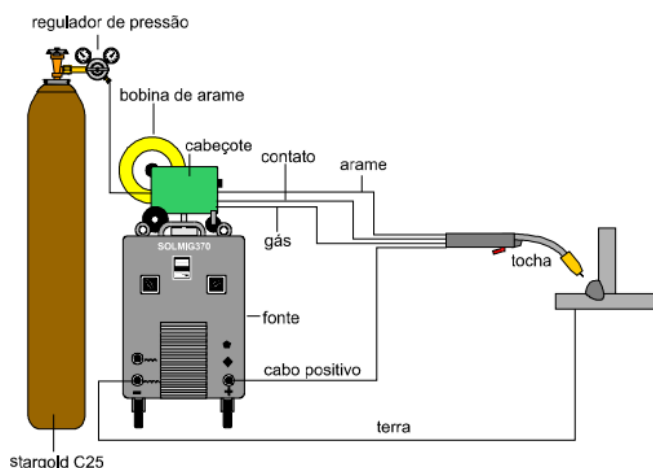
A principal função dos gases é a proteção do metal fundido de gases atmosféricos, tais como o oxigênio, nitrogênio e dióxido de carbono, enquanto a poça de fusão está sendo formada. Porém, de acordo com sua natureza e composição, pode vir a ter uma grande influência nas características do arco, no tipo de transferência de metal, na velocidade de soldagem, nas perdas por projeções (respingos), na penetração, na forma externa da solda e

propriedades mecânicas (American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; QUITES, 2002).

O processo MIG (Metal Inert Gas) utiliza a injeção de um gás inerte, tais como argônio e o hélio, ou mistura de gases (argônio + 1% de O₂ ou argônio + 3% de O₂). O gás inerte não reage metalurgicamente com a gota ou a poça de fusão, atua apenas na proteção destas regiões, auxilia na abertura e manutenção do arco voltaico, tem efeito na penetração e solidificação, o que, indiretamente e menos pronunciadamente, pode influenciar na microestrutura da solda. Enquanto o processo MAG (Metal Active Gas) utiliza a injeção de um gás ativo ou mistura de gases que perdem a característica de inertes, quando parte do metal de base é oxidado, que podem ser o CO₂, CO₂ + 5 a 10% de O₂, Argônio + 15 a 30% de CO₂, CO₂ + 5 a 15% de O₂ ou Argônio + 25 a 30% de N₂. A natureza oxidante desses gases, além das funções de proteção e das funções elétricas, interfere no desempenho da soldagem, reage metalurgicamente com a gota de transferência e a poça de fusão influenciando, substancialmente, na microestrutura da solda (American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; QUITES, 2002; KOU, 2003; SODERSTORM; MENDEZ, 2008; AHMAD, 2016).

O equipamento básico para qualquer utilização consiste de fonte de energia, cabos e mangueiras de conexão, tocha de soldagem resfriada a ar ou água, unidade de alimentação de eletrodo e seu sistema de controle de soldagem, fonte regulável de gás protetor com regulador de vazão e bobina de arame (eletrodo) (American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; FBTS, 2000; BARCARENSE, 2003; KOU, 2003; MODENESI, 2006; SCOTTI; PONOMAREV, 2008), conforme figura 2.

Figura 2: Ilustração - Equipamento de soldagem GMAW.



O processo de soldagem GMAW, devido à alimentação contínua de eletrodo e altas taxas de deposição, produz solda de alta produtividade e boa qualidade quando aplicado com procedimento de soldagem apropriados. Apresenta grande versatilidade em relação à posição de soldagem, podendo ser realizada em todas as posições, e à aplicação de materiais e espessuras, sendo o único processo de eletrodo consumível que pode ser utilizado com todos os metais comerciais e ligas. Por ser um processo semiautomático e podendo ser automatizado, requer menor exigência do soldador quando comparado ao processo por eletrodo revestido. E, por fim, a presença de hidrogênio na solda é praticamente inexistente e como não utiliza fluxo, a possibilidade de inclusão de escória é pequena. Todavia, quando comparado aos demais processos, requer uma limpeza mínima após a soldagem, principalmente quando se utiliza eletrodos de alto silício e gás ativo, pois um filme vítreo de sílica (aspecto de vidro) se forma e, se não tratado adequadamente, pode originar uma descontinuidade por inclusão de escória vítrea (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; FBTS, 2000; KOU, 2003; IBRAHIM, 2012; SCOTTI; PONOMAREV, 2008).

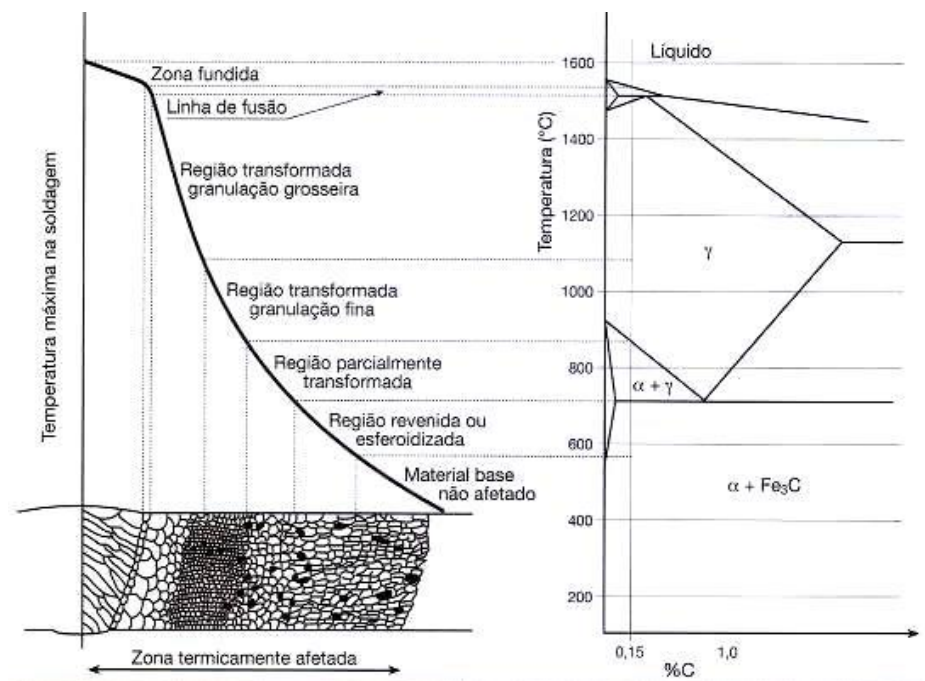
Em contrapartida, o processo de soldagem GMAW requer um equipamento de soldagem mais complexo, mais caro e menos portátil do que o equipamento do processo de soldagem SMAW. Apresenta versatilidade reduzida tanto para soldagens realizadas em campo, pois correntes de ar podem dispersar o gás de proteção prejudicando o arco elétrico e qualidade da solda, quanto para soldagem em locais de difícil acesso, devido ao tamanho da pistola de soldagem e proximidade, entre o bocal e a peça. Por não formar escória, apresenta uma maior velocidade de resfriamento, o que aumenta a ocorrência de trincas. A variedade de arames disponíveis é relativamente pequena, cabendo mencionar que materiais que não tenham suficiente ductilidade para serem trefilados não podem ser transformados em arames maciços para soldagem. Por fim, resulta em altos níveis de radiação e calor, o que pode resultar na resistência do operador ao processo (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; MACHADO, 1996; American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; FBTS, 2000; QUITES, 2002; KOU, 2003; SCOTTI; PONOMAREV, 2008; IBRAHIM, 2012).

2.4 METALURGIA DA SOLDAGEM

Por definição, a metalurgia de soldagem visa estudar o efeito da operação de soldagem sobre a estrutura e propriedades mecânicas dos materiais.

O sucesso da soldagem está associado a diversos fatores e, em particular, com a sua relativa simplicidade operacional. Durante a realização de uma solda, as regiões que envolvem o cordão de solda (regiões adjacentes do metal de base) são submetidas a ciclos térmicos cuja temperatura de pico decrescem à medida que se afasta do eixo central da solda (Figura 4). Devido às alterações localizadas e bruscas de temperatura, a soldagem pode ser, muitas vezes um processo “traumático” para o material, resultando em alterações estruturais e de propriedades mecânicas importantes do cordão de solda e regiões próximas (Figura 3).

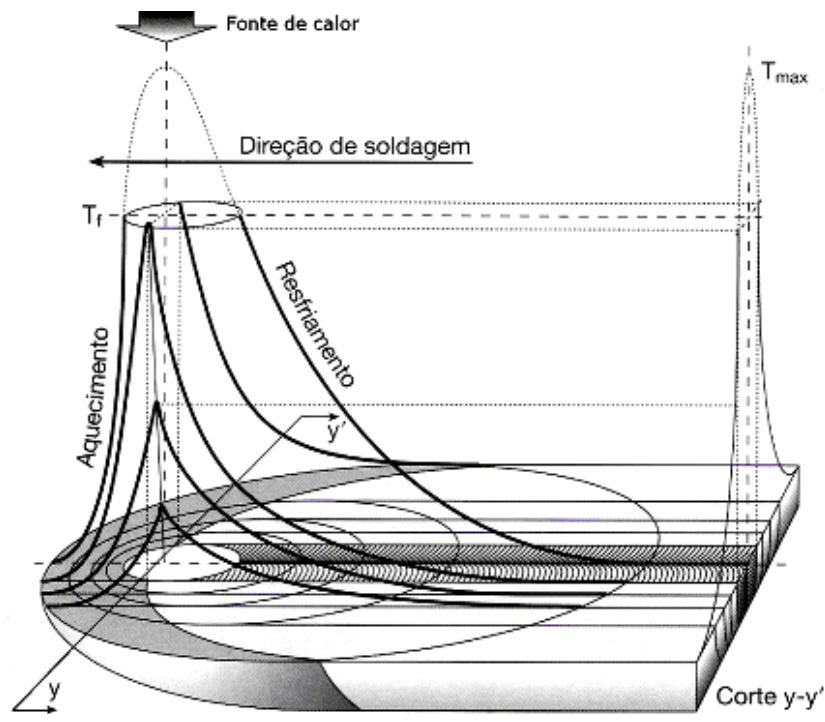
Figura 3: Macroestrutura esquemática da secção transversal de uma junta soldada e sua relação com as temperaturas.



Fonte: (COLPAERT, 2008).

A velocidade de resfriamento é uma característica importante na soldagem dos aços carbono, pois quando aquecidos em temperaturas elevadas eles são austenitizados na região da solda e, durante o resfriamento, os produtos da transformação da austenita dependem das condições de resfriamento, conforme ilustrado na curva da variação da temperatura (T) em função do tempo (t) ou curva de ciclo térmico de soldagem (ZEEMANN; EMYGDIO, 2001; KOU, 2003; COLPAERT, 2008; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009), conforme figura 3 e 4.

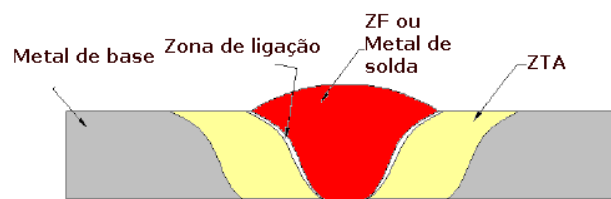
Figura 4: Curva de temperatura em diferentes pontos de uma junta soldada.



Fonte: (COLPAERT, 2008).

As regiões que envolvem o cordão de solda podem ser subdivididas em três regiões básicas(Figura 5) (DALLAN; DAMKROGER, 1993; CAMPOS, 2005; COLPAERT, 2008).

Figura 5: Representação esquemática da junta soldada.



Fonte: (Campos, 2005)

2.4.1 Zona não afetada termicamente ou metal base (MB)

Regiões mais afastadas da solda que não sofrem alterações estruturais e de propriedades importantes pelo ciclo térmico (FBTS, 2000; KOU, 2003; PETROBRÁS, 2003; CAMPOS, 2005).

2.4.2 Zona termicamente afetada (ZTA)

A zona termicamente afetada (ZTA) ou zona afetada pelo calor (ZAC) é a parte não fundida do metal de base, cuja microestrutura e propriedades mecânicas foram alteradas pelo ciclo térmico. As temperaturas de pico nesta região são superiores à temperatura crítica do material e inferiores à sua temperatura de fusão (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; FBTS, 2000; KOU, 2003; PETROBRÁS, 2003; COLPAERT, 2008).

Pelas características microestruturais, é possível dividir a zona termicamente afetada em:

- **Região transformada de granulação grosseira:** Também chamada de região de crescimento de grão da austenita, próxima à interface com o metal de solda e acontece numa faixa de temperatura compreendida entre 1100°C e 1500°C. A granulação grosseira da austenita dificulta a sua transformação em ferrita durante o resfriamento, aumentando a sua temperabilidade e reduzindo consideravelmente a tenacidade do material (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; KOU, 2003; MARQUES, 2009).
- **Região transformada de granulação fina:** Também chamada de região de refino de grão e acontece numa faixa de temperatura compreendida entre 900°C e 1100°C. Esta região é caracterizada por uma estrutura fina de ferrita e perlita e com pequenos tamanhos de grão, temperabilidade reduzida, boa resistência mecânica e ductilidade. Isto se deve ao fato do fenômeno de transformação da austenita em ferrita ocorrer com uma deformação, tempo e temperatura menor que a da região anterior menor e não suficiente para promover a recristalização primária, ou seja, crescimento de grão. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; KOU, 2003; MARQUES, 2009).
- **Região parcialmente transformada e Região revenida ou esferoidizada:** São, também, chamadas de região intercrítica, ocorre numa faixa de temperatura compreendida entre 700°C e 950°C, a microestrutura resultante é mais refinada, porém, normalmente, apresenta propriedades mecânicas inferiores à do metal de base (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; KOU, 2003; MARQUES, 2009).

As dimensões da zona termicamente afetada, assim como de cada uma de suas regiões, são determinadas pelo aporte de calor aplicado durante o processo de soldagem. As fases e morfologias resultantes em cada região, por outro lado, são resultado direto das condições de resfriamento da junta (American Society for Mechanical Engineering – ASME, 1995; SANTOS NETO, 2003).

2.4.3 Zona fundida (ZF)

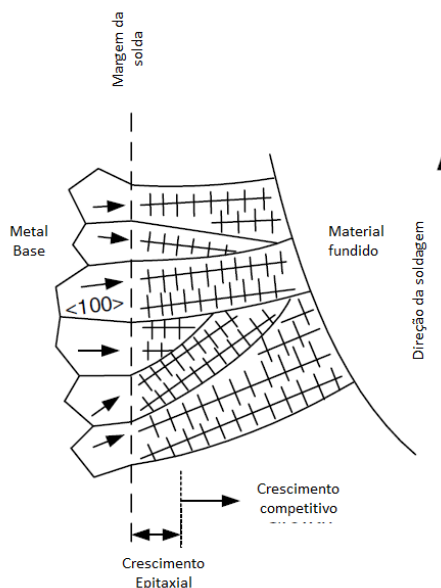
Região constituída pelo volume de material que foi fundido (Metal de base e material de adição) e solidificado durante a soldagem, cuja a composição química obviamente é diferente dos materiais que a originaram. É caracterizada por temperaturas de picos superiores à temperatura de fusão do material de base (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; KOU, 2003; PETROBRÁS, 2003; MARQUES, 2009).

2.4.3.1 Zona de ligação (ZL)

Região do metal de base, contida dentro da zona fundida, que sofreu fusão parcial durante a soldagem, e sobre qual se inicia o processo de solidificação do metal de solda.

Nesta região, durante a solidificação, grãos com direção preferencial de crescimento fácil crescem na direção do gradiente máximo de temperatura (em direção à região central da solda), impedindo o crescimento de outros grãos cujas direções de crescimento não estão orientadas com essa direção. Este fenômeno (Figura 6) é chamado de crescimento competitivo de grãos ou Epitaxia ou crescimento Epitaxial (FBTS, 2000; KOU, 2003; PETROBRÁS, 2003; CAMPOS, 2005).

Figura 6: Epitaxia ou Crescimento epitaxial.



Fonte: (KOU, 2003).

2.5 APORTE TÉRMICO

Ciclos térmicos sofridos a cada ponto do material soldado determinam as transformações microestruturais e, conseqüentemente, as propriedades esperadas para uma junta (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; ZEEMANN; EMYGDIO, 2001). As temperaturas nas quais a junta soldada é submetida durante a soldagem dependem dos parâmetros de soldagem, que por sua vez, influenciam na qualidade, produtividade, custo e determinam a geometria final do cordão de solda. Esses parâmetros consistem na corrente, voltagem e velocidade de soldagem, ângulo e altura da tocha em relação ao material de base, posição e direção da soldagem e a taxa de fluxo de gás (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; LIMA, 2005; SCOTTI; PONOMAREV, 2008; IBRAHIM, 2012).

O conceito de intensidade de fonte de energia (I) – quantidade de energia transferida à um material por unidade de tempo e na unidade de área – é muito importante para a compreensão dos fenômenos envolvidos na soldagem. Processos, cujas fontes de energia são de alta intensidade, tendem a exigir menor tempo de soldagem e minimizam certos efeitos indesejáveis (como distorções, por exemplo) devido à pequena área aquecida. Em um processo de alta intensidade, a energia é transferida tão rapidamente e através de uma área tão pequena que a fusão ocorre quase instantaneamente, antes que ocorra uma perda significativa de calor por condução (ZEEMANN; EMYGDIO, 2001).

O aporte térmico, ou energia de soldagem absorvida pela junta soldada é dada pela equação a seguir:

Equação 1: Aporte térmico.

Fórmula:	Nomenclatura:	Unidades de medida:
$AT = \eta \frac{60 \cdot (V \times I)}{v}$	AT: Aporte térmico	[J/cm]
	η : Rendimento do arco	
	V: Tensão de soldagem	[V]
	I: Corrente de soldagem	[A]
	v: Velocidade de soldagem	[cm/min]

Tensão de soldagem: Em um processo onde o comprimento de arco, gás de proteção, tipo e diâmetros do eletrodo são constantes, um aumento da tensão de soldagem gera um aumento da largura e a diminuição do reforço do cordão da solda, além da redução da penetração.

Corrente de soldagem: Uma vez mantidas constantes todas as demais variáveis do processo de soldagem, um aumento da corrente elétrica irá causar o aumento na capacidade de fusão, taxa de deposição e, conseqüentemente, um aumento na profundidade de penetração e largura do cordão de solda.

Velocidade de soldagem: Uma vez mantidas constantes todas as demais variáveis do processo de soldagem, o aumento da velocidade de soldagem irá causar uma diminuição na penetração da solda, largura e altura do reforço do cordão de solda.

Contudo, essa variação desses parâmetros de soldagem não afeta somente as características geométricas do cordão de solda, mas também a sua microestrutura e podem gerar descontinuidades (defeitos) no cordão de solda (WAINER; BRANDI; MELLO, 1992; LIMA, 2005; SCOTTI; PONOMAREV, 2008; IBRAHIM, 2012).

Quanto mais alto for o aporte de calor (energia de soldagem), maior será a quantidade de energia calorífica transferida à peça, maior a poça de fusão, mais larga a zona aquecida e menor o gradiente térmico entre a solda e o metal de base (MODENESI, 2000).

2.6 TENSÕES RESIDUAIS

Um dos adjetivos interessante que é frequentemente usado para descrever tensões residuais é "insidioso (Traíçoeira)". Isso ocorre porque as tensões residuais estão presentes em praticamente todos os materiais sólidos ou componente, mas, como não podemos vê-la e sem algumas medidas cuidadosas e complexas, não sabemos quão grave pode ser e, por vezes, tendemos a nos esquecer que elas estão lá (MORDFIN, 1988).

Por definição, é o estado de tensões existente em um corpo elástico quando se encontra livres de forças externas ou gradientes de temperaturas, podem ser do tipo trativa ou compressivas. São introduzidas ou maximizadas deliberadamente, ou de forma acidental, por solicitações cíclicas constantes, por sistemas compostos de vários componentes, por falhas operacionais e, ainda, durante todas as fases do seu processo de fabricação, isto é, em seus sucessivos tratamentos mecânicos e térmicos, tais como: fundição, soldagem, laminação, forjamento, usinagem, retifica, dobramento, têmpera, etc... (MODENESI, 2001; KOU, 2003; CARVALHO, 2004).

Apesar de sua natureza insidiosa (Traíçoeira), as tensões residuais podem ser benéficas ou prejudiciais, isto é, seus efeitos podem ser significativos ou catastróficos (MORDFIN, 1988). Ficaram conhecidas, depois de anos de pesquisa, como um dos mais críticos fatores

que podem influenciar as propriedades de fadiga de juntas soldadas (SHIVJE, 2001). A existência de tensões residuais no material, tanto compressivas como trativas, ocorre simultaneamente. Com a ausência de carga externa a princípio a tensão residual trativas deve estar em equilíbrio com a tensão compressiva (PADILHA, 2004). Todavia, junto à superfície do material, quando trativas contribuem para diminuir as propriedades de fadiga e, quando, compressivas contribuem para melhorar a resistência a fadiga em estruturas soldadas (ITOH, 1989).

Por exemplo, danos por fadiga, propagação de trincas e corrosão sob tensões são fenômenos que ocorrem sob tensões de tração, nestes casos, as tensões residuais podem contribuir para o desenvolvimento desses modos de falha. Em contrapartida, tensões residuais de compressão são benéficas para o componente, uma vez que inibe essas ocorrências (MORDFIN, 1988).

Contudo, a concentração alta de tensões residuais, tração ou compressão, podem causar instabilidade dimensional. Portanto, é desejável que as tensões prejudiciais sejam reduzidas ao menor nível possível (MORDFIN, 1988; SHANKAR, 1982).

Na solda, as tensões residuais são introduzidas pelo processo de soldagem por fusão, imediatamente após a soldagem (CRISI; MENDONÇA, 2006). Este processo é caracterizado pelo aquecimento de regiões localizadas das peças permanecendo o restante destas em temperaturas muito inferiores. As regiões aquecidas tendem a se dilatar, mas esta dilatação é dificultada pelas partes adjacentes submetidas a temperaturas menores, o que resulta no desenvolvimento de deformações elásticas e plásticas não uniformes, de magnitude macroscópica e microscópica, no material aquecido. Consideradas com uma das principais causas do aparecimento das tensões residuais, promovem ainda o surgimento de mudanças permanentes de forma e dimensões (Distorções) na peça (AWS, 1994; ASM HANDBOOK, 1995).

Todavia, se um objeto for aquecido e resfriado de modo uniforme e não existirem restrições às suas variações dimensionais, estas não resultam em efeitos mecânicos importantes no objeto, isto é, após o ciclo térmico, o objeto não deverá apresentar nem tensões residuais nem distorções.

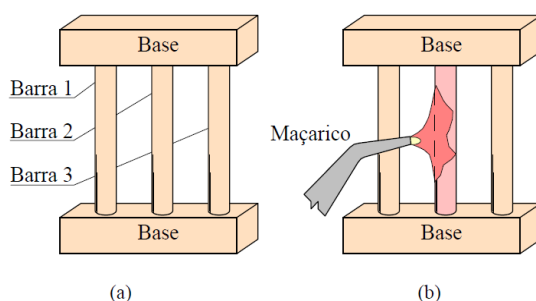
As tensões residuais podem acarretar dois efeitos deletérios: 1) Produzem distorções e, conseqüentemente a falta de estabilidade dimensional e dificuldade de ajuste de peças ou componentes devido à sua mudança de forma; 2) São a causa ou contribuem para a falha prematura do componente mecânico, principalmente em mecanismos de falha por fadiga sob

carregamentos cíclicos externos; 3) Reduz a resistência à corrosão sob tensão (MODENESI, 2001; AWS, 1994; ASM HANDBOOK, 1995; CRISI, MENDONÇA, 2006). E não podem, de modo algum, ser desprezadas, pois elas se somam às tensões aplicadas externamente.

Para ilustrar o fenômeno das tensões térmicas, consideremos o aquecimento e resfriamento de três barras de aço de baixo carbono de mesmo comprimento e seção, unidas em suas extremidades por duas bases (Figura 7), de forma que nenhuma pode se alongar ou contrair independentemente das outras (KOU, 2003; SCOTTI, 2009).

Figura 7: Modelo para descrever tensões térmicas

(a) Conjunto de barras e (b) Barra central sendo aquecida.

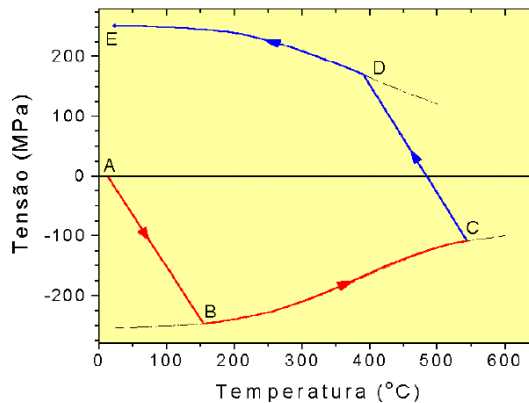


Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

No início do aquecimento (Figura 8 – Trecho A-B), as tensões de e deformações resultantes da dilatação da barra central serão elásticas. Uma vez que as barras devem manter as mesmas dimensões aproximadas, a dilatação térmica da barra central deve ser compensada por deformações elásticas (MODENESI, 2001; KOU, 2003; BRAGA, 2011).

Como o limite de escoamento diminui com o aumento da temperatura, as tensões compressivas sob a barra central fazem com que ela se deforme plasticamente e com isso o valor da tensão tendem a diminuir (Figura 8 – Trecho B-C). Ao pararmos o aquecimento no ponto C, a barra central inicia o processo de contração com a queda da temperatura, contudo, como ela se tornou mais curta que as demais, tensões de tração passam atuar sobre ela até que o limite de escoamento seja atingido (Figura 8 – Trecho D) (MODENESI, 2001; KOU, 2003; BRAGA, 2011).

Figura 8: Modelo para descrever tensões térmicas (a) Conjunto de barras e (b) Barra central sendo aquecida.



Fonte: (MODENESI, 2001).

Como as barras estão rigidamente unidas, as variações de comprimento serão compensadas pela deformação elástica que gerarão tensões residuais. Sendo, na barra central, tensões de tração (próximo do limite de escoamento) e nas barras externas tensões de compressão de intensidade igual a metade da tensão da barra central (MODENESI, 2001; KOU, 2003; BRAGA, 2011).

Conforme figura 9, essa analogia pode ser utilizada para a representação de tensão de uma junta soldada, associando a região da solda com a barra central e as regiões mais afastadas do metal de base, com as barras externas (MODENESI, 2001; KOU, 2003; BRAGA, 2011).

Figura 9: Comparação entre as tensões residuais desenvolvidas nas três barras e na solda de topo.



(a) Tensões residuais desenvolvidas nas três barras.

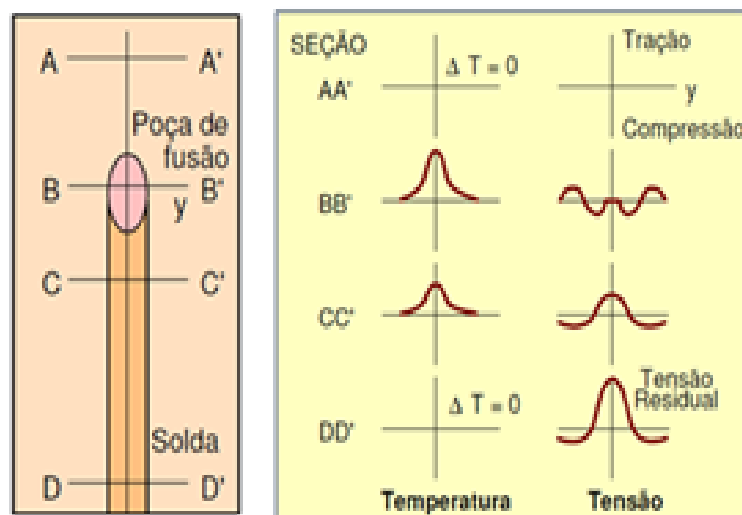
(b) Tensões residuais longitudinais formadas ao longo da direção transversal (y) a uma solda de topo.

Fonte: MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

A figura 10 ilustra o desenvolvimento de tensões devido ao aquecimento não uniforme de uma junta soldada (MODENESI, 2001; KOU, 2003; BRAGA, 2011), onde:

- Seção AA' – Região do material de base distante da poça de fusão e ainda em temperatura ambiente e isento de tensões;
- Seção BB' – Região do material de base junto à poça de fusão. O material aquecido tende a se expandir sendo, contudo, restringido pelas regiões mais frias da peça, gerando, desta forma, tensões de compressão em regiões próximas à zona fundida e tensões de tração em regiões mais afastadas. Na poça de fusão, como o material ainda se encontra em seu estado líquido, as tensões são nulas;
- Seção CC' – Com o resfriamento e após a solidificação da zona fundida, o material passa a se contrair, sendo novamente impedido pelas regiões mais frias e afastadas da zona fundida. Assim surgem as tensões de tração junto ao cordão da solda e de compressão nas regiões mais afastadas, que por sua vez aumentam de intensidade levando ao escoamento da região aquecida;
- Seção DD' - Após o resfriamento completo, as tensões residuais no centro da solda chegam a níveis próximos ao limite de escoamento do material.

Figura 10: Ilustração do desenvolvimento das tensões residuais longitudinais durante a soldagem.



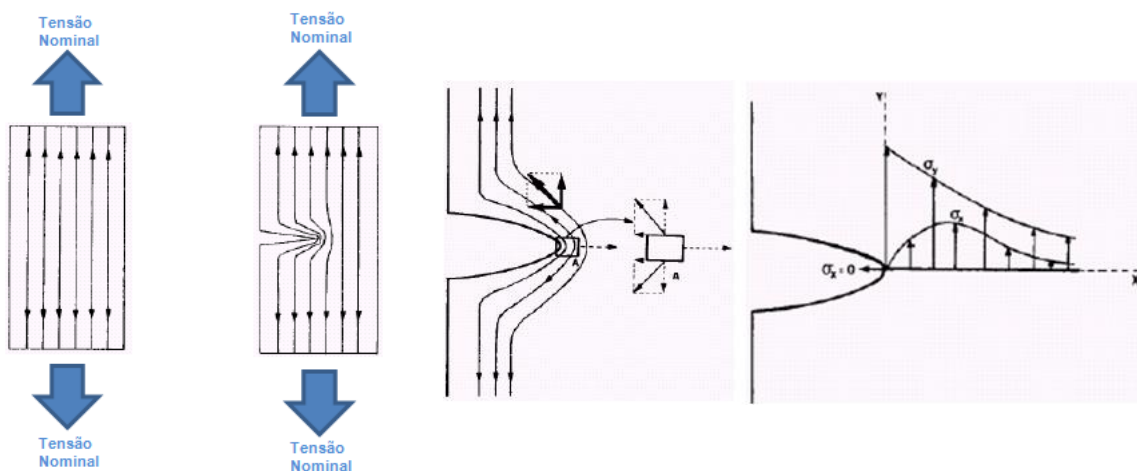
Fonte: (MODENESI, MARQUES, SANTOS; 2012 - Adaptado: KOU, 2003).

2.7 DEFEITO DE SOLDA

É a interrupção das estruturas típicas de uma peça ou junta soldada, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas. Essa imperfeição ou descontinuidade, produzida na solda devido a desvios no processo de soldagem, não é necessariamente um defeito. Isto é, só deve ser considerado defeito, quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado, tornar a peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica e procedimento aplicável (PETROBRÁS, 2003).

Na maioria dos casos, as descontinuidades alteram o campo das tensões residuais macroscópicas, de uma configuração simples para uma configuração mais complexas, nas vizinhanças dos locais onde elas ocorrem. Em princípio, não são responsáveis pela formação de tensões residuais, mas contribuem para o crescimento das trincas por fadiga, e são conhecidas como descontinuidades concentradoras de tensão (AWS, 1994).

Figura 11: Ilustração do efeito das descontinuidades estruturais na configuração da linha de tensões.



Existem quatro tipos gerais de descontinuidades: a) Descontinuidades dimensionais; b) Descontinuidades estruturais; c) Descontinuidades relacionadas com propriedades indesejáveis na região da solda e; d) Descontinuidades relacionadas com as propriedades do metal de base (MODENESI, 2001; FBTS,2000).

2.7.1 Descontinuidades dimensionais

As Distorções são alterações de forma e dimensões que componentes soldados sofrem como resultado do movimento do material (Deformação plástica), são subdivididas em contrações transversais, longitudinais e as deformações angulares. Ocorrem em função das tensões térmicas desenvolvidas durante o processo de soldagem (KOU, 2003), devido o aquecimento e resfriamento não uniforme da peça ou estrutura e o escoamento plástico não uniforme. E afetam sua forma e dimensões de modo tanto global como localizado (quando são também chamadas de deformidades), dependem das propriedades térmicas do material, particularmente o seu coeficiente de expansão (α), sua condutividade térmica (k), limite de escoamento (σ_{ys}) e o seu módulo de elasticidade (E) (MODENESI, MARQUES, SANTOS; 2012).

Nas juntas soldadas, forças de contração e tração atuam no metal de base e na zona fundida. Quando o metal de adição é depositado e se funde com o metal de base, ele está no seu estado de expansão máximo. No resfriamento, o metal de solda tende a se contrair para o volume que normalmente ocuparia à temperatura mais baixas, mas como ele está ligado ao metal de base a sua contração fica restringida. Se o esforço de contração for suficiente para “puxar” todo o metal de base ocorrerá uma grande deformação (MODENESI, 2001).

As contrações transversais, ilustrada pela figura 12, são as reduções de dimensões perpendiculares ao eixo do cordão de solda. Sua magnitude depende de vários fatores, tais como: grau de restrição da junta, a quantidade de rotação da junta durante a soldagem e o número de passes usados (KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS; 2012).

Figura 12: Ilustração de Contração Transversal.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

As contrações longitudinais, ilustrada pela figura 13, são reduções do comprimento do cordão de solda. Tende a ser menor que a contração transversal (cerca de 1/1000 do comprimento da solda), contudo, podem causar efeitos importantes, tais como: Dobramento

de peças soldadas fora de sua linha neutra e a distorção por flambagem em chapas finas (KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS; 2012).

Figura 13: Ilustração de Contração Longitudinal.



Fonte:(MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

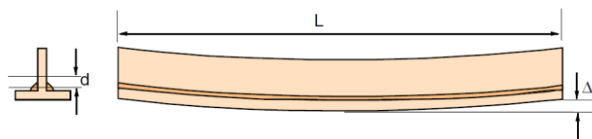
As deformações angulares, ilustradas pelas figuras de 14 a 17, são alterações do ângulo entre os elementos a unir em relação ao ângulo nominal. Ocorrem quando as contrações transversais não são uniformes ao longo da espessura da junta. Enquanto que o dobramento, a rotação e o empenamento, são provocados pela contração longitudinal do cordão de solda(KOU, 2003; MODENESI, MARQUES, SANTOS; 2012).

Figura 14: Ilustração de Deformação Angular.



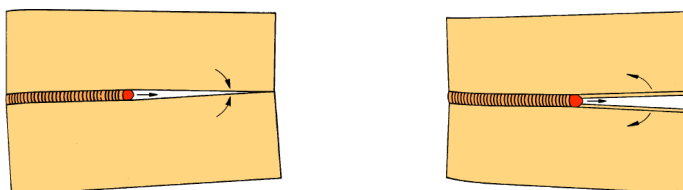
Fonte:(MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

Figura 15: Ilustração do dobramento de uma viga.



Fonte:(MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

Figura 16: Ilustração de Rotações durante a soldagem.



Fonte:(MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

Figura 17: Ilustração de Empenamento.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (KOU, 2003).

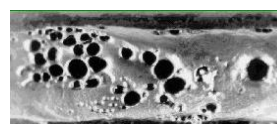
2.7.2 Descontinuidades estruturais em soldas de fusão

A porosidade, ilustrada pelas figuras de 18 a 22, é formada pela evolução de gases, na parte posterior da poção de fusão, durante a solidificação da solda. Podem ocorrer dentro da solda e não ser visíveis e, como atuam como concentrador de tensão, deixa a solda frágil e sem resistência. Tem origem em: 1) Peça suja, enferrujada ou úmida; 2) Corrente de soldagem/amperagem incorreta; 3) Velocidade de soldagem muito alta; 4) Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo); 5) Polaridade incorreta; 6) Possibilidade de o eletrodo estar úmido; 7) Eletrodos danificados; 8) Alta velocidade de resfriamento; 9) Instabilidade do arco (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

Figura 18: Ilustração de Porosidade em junta soldada.



Figura 19: Porosidade em uma junta soldada.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

Figura 20: Ilustração de Porosidade Distribuída.

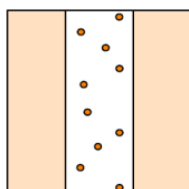


Figura 21: Ilustração de Porosidade agrupada.

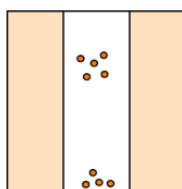
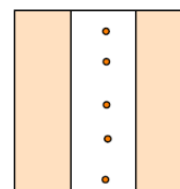


Figura 22: Ilustração de Porosidade alinhada.



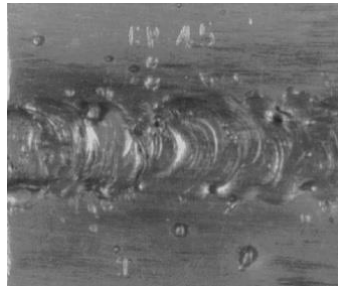
Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

Respingos (Figura 23) são glóbulos de metal de adição transferidos durante a soldagem e aderidos à superfície do metal de base ou à zona de fundida já solidificada. Deixa o acabamento do cordão irregular, embora não afete a resistência da solda, e aumento o custo de

limpeza. Tem como causa raiz: 1) Corrente de soldagem (amperagem) muito alta; 2) Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo); 3) Sopros magnéticos (Arco se desvia sem que você mova o eletrodo); 4) Peça suja, oxidação, corrosão ou úmida; 5) Possibilidade de o eletrodo estar úmido; 6) Polaridade errada (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

Observação: Apesar desta descontinuidade não afetar a resistência da solda, a ocorrência desta pode denunciar a existência de outras descontinuidades (Exemplo: Mordeduras, porosidades, falta de fusão, trincas, etc...) que fragilizam a resistência da região soldada.

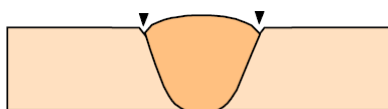
Figura 23: Excesso de respingo em junta soldada.



Fonte: FBTS.

Mordedura (Figura 24) são reentrâncias agudas formadas pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de solda e o metal de base ou outro passe adjacente. Prejudica o acabamento e a resistência da solda, podem atuar como ponto para o início de trincas quando a peça está em serviço e como pontos preferências para início de corrosão. Tem como causa raiz: 1) Corrente de soldagem (amperagem) muito alta; 2) Velocidade de soldagem muito alta; 3) Bitola do eletrodo muito elevada ou chanfro muito apertado; 4) Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo inadequada; 5) Sopros magnéticos: o arco se desvia sem que você mova o eletrodo; 6) Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo); 7) Possibilidade de o eletrodo estar úmido (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

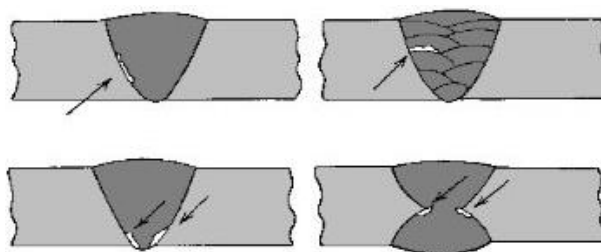
Figura 24: Ilustração de mordedura em juntas soldadas.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

A falta de fusão (Figura 25) se refere à ausência de união por fusão entre passes adjacentes de solda ou entre a solda e o metal de base. Reduz a resistência da solda e atuam como pontos de início de trincas quando a peça está em serviço. Tem como causa raiz: 1) Corrente de soldagem (Amperagem) muito baixa; 2) Velocidade de soldagem muito alta; 3) Bitola do eletrodo muito elevada ou chanfro muito apertado; 4) Abertura excessiva da junta; 5) Em peças espessas ocorre falta de penetração na raiz da solda; 6) Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo inadequado; 7) Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo) (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

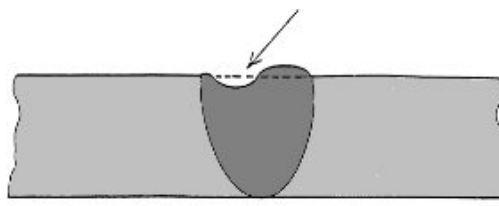
Figura 25: Falta de fusão em juntas soldadas.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

Deposição insuficiente (Figura 26) corresponde à Insuficiência de metal na face da solda. Fragiliza a solda devido a redução da seção transversal da junta. Tem como causa raiz: 1) Velocidade excessiva; 2) Número de passe insuficiente; 3) Condução incorreta do eletrodo (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

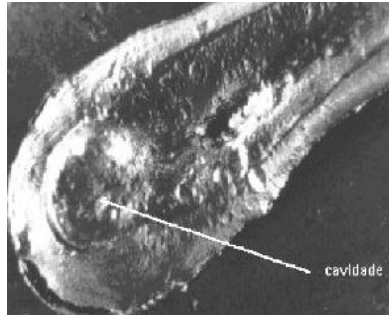
Figura 26: Deposição Insuficiente em juntas soldadas.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

O rechupe de cratera (Figura 27) corresponde a falta de material resultante da contração da zona fundida, localizada na cratera do cordão de solda. É considerado ponto preferência para nucleação de trincas e acumulo de escória. Tem como causa raiz: 1) Interrupção abrupta do fornecimento de eletrodo; 2) Extinção do arco (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

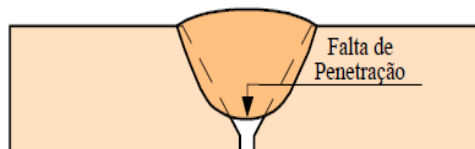
Figura 27:Rechupe de caráter em junta soldada.



Fonte: FBTS.

A falta de penetração (Figura 28) se refere à falha em se fundir e encher completamente a raiz da junta. Atua como ponto de início de trincas quando a peça está em serviço e reduz a resistência da solda. Tem como causa raiz: **1)** Corrente de soldagem (Amperagem) muito baixa; **2)** Velocidade de soldagem muito alta; **3)** Bitola do eletrodo muito elevada ou chanfro muito apertado; **4)** Abertura excessiva da junta; **5)** Peças espessas; **6)** Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo inadequado; **7)** Distância muito alta do eletrodo à peça (arco longo) (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

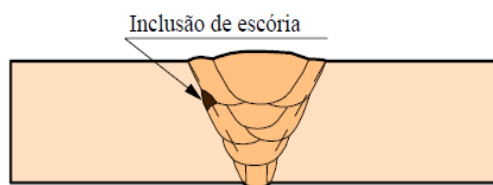
Figura 28: Falta de penetração em uma junta soldada.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

A inclusão de escória (Figura 29) consiste em partículas de óxido e outros sólidos não – metálicos aprisionados entre os passes de solda ou entre a solda e o metal de base. Reduz a resistência da solda e atua como ponto de início de trincas. Tem como causa raiz: **1)** Entre um cordão e outro, a escória não foi removida corretamente; **2)** Na troca de eletrodo, a escória não foi removida adequadamente no final da solda; **3)** A escória dos cordões de ponteamto para montagem de peça não foi adequadamente removida; **4)** Ângulo de eletrodo ou movimentação do eletrodo inadequado; **5)** Bitola do eletrodo muito elevada ou chanfro muito apertado. A escória não destaca com facilidade (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

Figura 29: Inclusão de escória em junta soldada.



Fonte: (MODENESI, 2001 – Adaptado: (PETROBRÁS, 2003).

As trincas (Figura 33) são consideradas os tipos mais grave de descontinuidades em uma junta soldada. Formam-se quando tensões de tração se desenvolvem em um material fragilizado, incapaz de se deformar plasticamente para absorver as tensões. Elas podem se formar durante, logo após a soldagem, em outras operações de fabricação subsequentes à soldagem ou durante o uso do equipamento ou estrutura soldada, algumas são visíveis ou não e podem se propagar, quebrando totalmente a peça quando em serviço. Tem como causa raiz: **1)** Trinca de cratera, no final do cordão (O arco é fechado muito rápido); **2)** Teor de carbono ou enxofre elevado no metal de base; **3)** Peça muito espessa ou junta muito rígida; **4)** Cordão de solda muito côncavo ou muito convexo; **5)** Possibilidade de o eletrodo ou metal de base estar úmido; **6)** Junta ou chanfro incorreto em peças espessas ou com vários passes (MODENESI, 2001; FBTS, 2000; PETROBRÁS, 2003).

Figura 30: Trinca em uma junta soldada.



Fonte: FBTS.

2.8 ALÍVIO DE TENSÕES POR VIBRAÇÃO

2.8.1 Histórico

Nas últimas décadas, técnicas rudimentares de vibração eram usadas na tentativa de estabilizar as tensões residuais e melhorar as propriedades mecânicas de partes metálicas

(GOVINDARAO, 2012). A arte de redução do stress consistia em aplicações repetidas de batidas de martelo no material para gerar alta amplitude, fazendo com que o material vibre na sua frequência natural. Essa técnica é apenas um dos mais antigos exemplos do esforço para estabilizar metais induzindo-os a vibração (www.vsrtechnology.net; SHANKAR, 1982).

Outros esforços incontrolláveis, imprevisíveis para empregar vibração incluíram: 1) A prática de, logo após o processo de fundição, derrubar ou arremessar o componente mecânico de alturas consideráveis em monte de areia; 2) O "peening" que é um processo que, embora bem aceito como um método de impedir fadiga por corrosão é marginalmente efetivo como um método de alívio de tensão de metais; 3) O envelhecimento natural que é um processo de alívio de tensões através do armazenamento do componente mecânico ao ar livre durante 6 a 18 meses aproximadamente, ficando submetido às expansões e contrações decorrente das mudanças diárias da temperatura ambiente (www.vsrtechnology.net; SHANKAR, 1982).

De 1920 a 1940 a fotografia infravermelha experimentou um desenvolvimento significativo que, durante a segunda guerra mundial, resultou em imagens de reconhecimento altamente melhorada. Com isso, fundições e locais de tratamentos térmicos poderiam ser facilmente identificados por fotografias aéreas. Sendo esses processos industriais fundamentais às indústrias de máquinas de guerra do terceiro Reich, estas instalações se tornaram os principais alvos dos bombardeios das forças aliadas (www.vsrtechnology.net).

Por volta de 1943, a severa escassez de tempo para se utilizar os processos rudimentares, forçou às indústrias alemãs de equipamentos pesados abandonarem os métodos rudimentares de alívio de tensão e transformarem sua fabricação, sem os tratamentos por calor. Enfrentaram assim, o problema de como aliviar as tensões de grandes soldas de preparação para uma manufatura de precisão. Os alemães rapidamente descobriram que grandes fabricações transportadas por caminhões ou por trem da oficina de soldagem até o local da manufatura de precisão, quando comparado com aquelas que foram soldadas e manufaturadas no mesmo ou em instalações próximas, demonstraram uma estabilidade dimensional superior durante a manufatura. Com o progresso da guerra, os alemães tornaram o transporte após a fabricação de grandes componentes de precisão, um procedimento padrão. Embora gerentes e engenheiros de manufatura não estivessem certos do porque esse fenômeno ocorria, alguns acreditavam que este era resultado da flexão sofrida pelo componente mecânico, logo fizeram experimentos para gerar flexão de uma maneira efetiva e custos previsíveis, como por exemplo, aplicando vibração(www.vsrtechnology.net).

Há quatro mil milhas de distância, as indústrias de máquinas de guerra americanas tiveram um gigantesco aumento, tanto em tamanho quanto em número de instalações de fabricações e nas exigências de precisão do metal manufaturado. E engenheiros americanos também descobriram o alívio de tensão através da flexão do componente mecânico, e iniciaram a aplicação de vibração para excitar componentes mecânicos (www.vsrtechnology.net).

No início dos anos 50, tanto os Estados Unidos quanto a Alemanha usaram a vibração harmônica (também chamada de vibrações ressonantes) para testar cascos de barcos metálicos e asas de aviões (Bonal, 2008).

Após a segunda guerra mundial, engenheiros de ambos os lados se tornaram colegas de trabalho em empresas nos Estados Unidos, em particular em empresas de manufatura de papel e componentes. Frequentemente esses componentes eram fabricados de materiais que não respondiam adequadamente aos processos de tratamento térmico, ou eram bi-metálicos. E essa dificuldade foi a motivação para o desenvolvimento da metodologia de alívio de tensões por vibração e dos primeiros protótipos de equipamento (www.vsrtechnology.net).

O tratamento mecânico de alívio de tensões por vibração é uma nova tecnologia, ainda em desenvolvimento, que possui uma série de vantagens sobre os métodos térmicos (BRAGA, 2011) e, apesar de, ainda, não ser aceito oficialmente pela *American pressure vessel and piping design and construction codes*, que continuam a exigir que o alívio de tensões de soldas seja feito por tratamento térmico, os processos vibracionais de alívio de tensões tem ganhado considerável popularidade ao longo dos últimos anos (CRISI; MENDONÇA, 2006).

2.8.2 Alívio de tensões por vibração

Os métodos existentes e mais usuais para o alívio de tensões residuais em juntas soldadas são mecânicos e os térmicos. O método mecânico pode ser realizado por martelamento ou vibração, que consiste no alívio de tensões residuais por vibrações mecânicas. O método térmico consiste em aquecer toda a peça soldada ou cada solda, uma por uma, até uma determinada temperatura onde o alívio de tensões irá ocorrer (CRISI & MENDONÇA, 2006).

Para uma estrutura atômica estressada não há diferença entre energia introduzida por meio de calor ou por meio de vibração. Essa energia aplicada em ambos os métodos alivia as

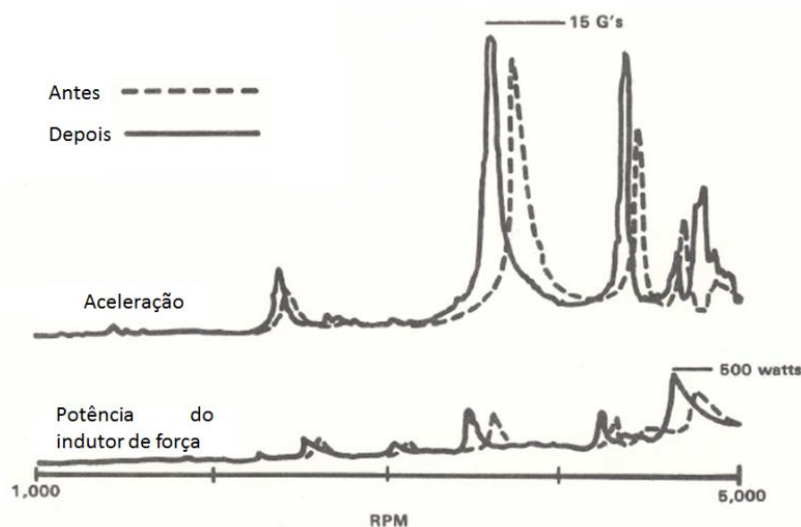
tensões residuais e estabiliza dimensionamento a peça (JURČIUS; VALIULIS; ČERNAŠEJUS, 2010; CRISI& MENDONÇA, 2006).

É um método simples baseado na ressonância vibratória, que consiste em submeter o componente mecânico, usando um indutor de força de elevada potência, a um ou mais estado vibratório de baixa frequência e alta amplitude, ressonante ou subressonante, por um período de tempo, com base no tipo do material, peso e dimensões do componente (SHANKAR, 1982; CRISI& MENDONÇA, 2006). O método permite que as tensões residuais sejam reduzidas sem distorcer ou alterar a resistência a tração, limite de escoamento ou resistência a fadiga e restaura o equilíbrio estático (CRISI& MENDONÇA, 2006; JURČIUS; VALIULIS; ČERNAŠEJUS, 2010).

Atualmente, há dois tipos existentes de tratamento por vibração.

1) O equipamento induz, lentamente, vibração ao componente mecânico, partindo do estado de repouso até a frequência máxima de vibração. A resposta do componente mecânico à vibração é monitorada até que uma das frequências de ressonância seja encontrada (Normalmente existem duas ou três frequências de ressonância). Então, o indutor de força é desligado e posteriormente retorna à velocidade que corresponde à primeira frequência de ressonância do componente mecânico. A vibração é induzida, nesta velocidade, durante um determinado tempo até que o ponto de frequência ressonância desapareça. Então o processo é repetido com a nova frequência de ressonância encontrada, conforme figura 31.

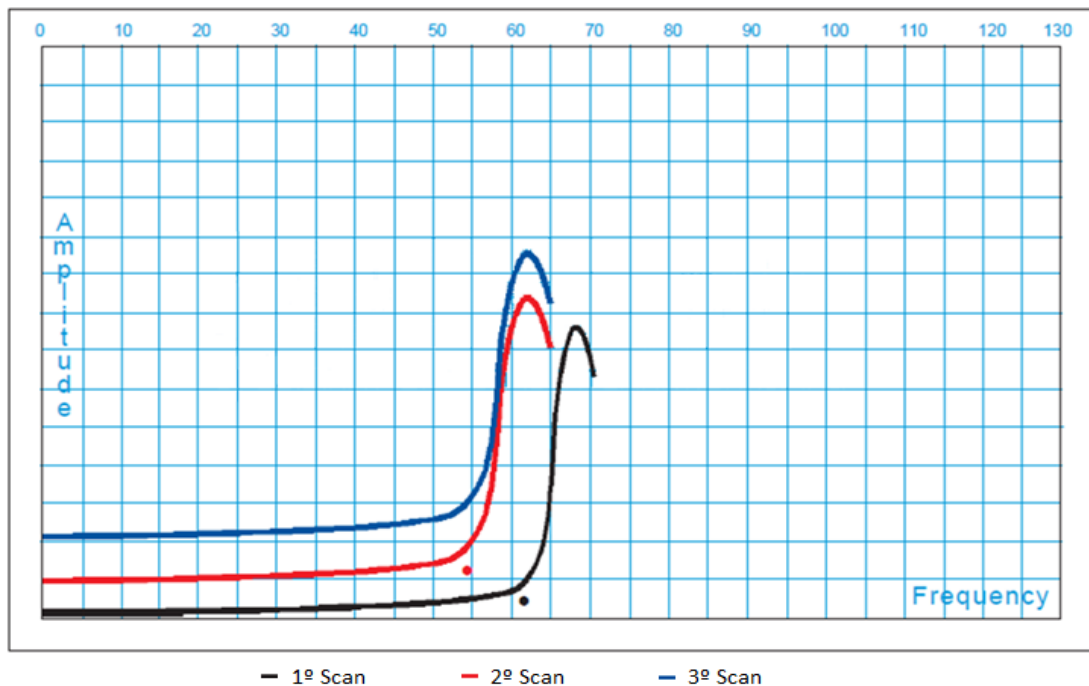
Figura 31: Gráfico produzido durante o tratamento de alívio de tensões ressonante.



Fonte: (www.vsrtechnology.net).

2) Após um escaneamento inicial para determinar a frequência de ressonância do componente mecânico, a vibração é mantida em uma frequência abaixo de cada frequência de ressonância. A vibração é induzida ao componente mecânico por um determinado tempo, após o processo é interrompido e repetido no mínimo mais duas vezes, conforme figura 32.

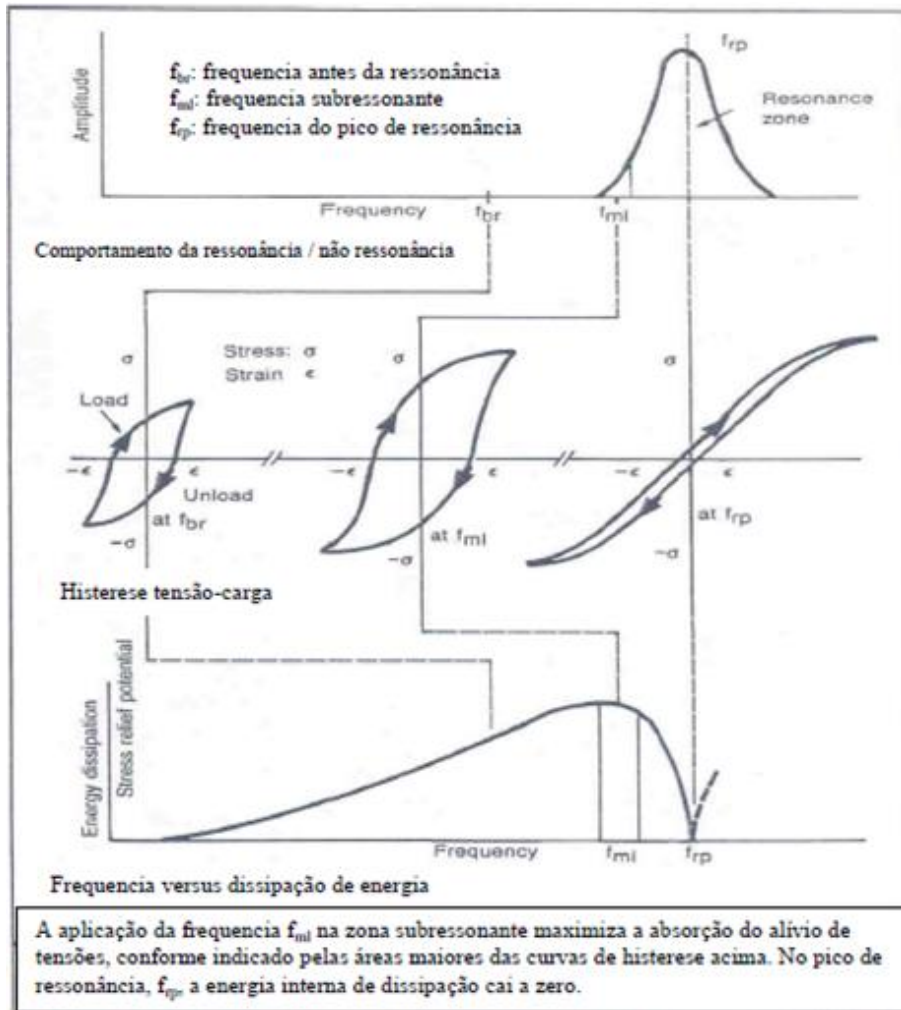
Figura 32: Gráfico produzido durante o tratamento de alívio de tensões sub ressonantes.



Fonte: (www.bonal.com).

Vibrações ressonantes têm sido indicadas como sendo melhor meio para redução de tensões residuais por vibração, pois promovem muito mais redistribuição de tensão quando comparada com o método de frequência sub-ressonantes ou sub-harmônicas (Figura 33). Pois, as vibrações de baixa frequência e energia de alta amplitude são muito eficientes na redução das tensões residuais de peças e soldas metálicas (SHANKAR, 1982; CRISI& MENDONÇA, 2006).

Figura 33: Estudo do efeito da vibração na dissipação de energia.



Fonte: (SHANKAR, 1982).

O tempo e a frequência de vibração dependem do tipo de material, peso e dimensões do componente mecânico (SHANKAR, 1982).

Ao contrário dos tratamentos térmicos, o mecanismo de tratamento de tensões residuais por vibração não é completamente compreendido. Atualmente, existem duas hipóteses proposta visando explicar o mecanismo por trás do alívio de tensões por vibração.

A primeira hipótese traça uma analogia entre o tratamento vibracional e o tratamento térmico, relacionando o alívio de tensões com o deslocamento dos átomos que se agrupam na estrutura cristalina. Neste caso, as vibrações de baixa frequência são, supostamente, suficientes para proporcionar energia aos átomos possibilitando que os mesmos assumam uma nova posição na estrutura cristalina, aliviando as tensões internas. Contudo, não há nenhuma evidência experimental para esta hipótese (SHANKAR, 1982).

A outra hipótese atribuía o alívio de tensões residuais ao processo de deformação plástica. Diferentemente da hipótese anterior, um número considerável de investigações experimentais evidenciou que durante os tratamentos vibracionais, as combinações das tensões residuais e cíclicas podem exceder o limite de escoamento do material, resultando na redução da tensão residual por deformação plástica. No entanto, nenhuma destas investigações apresentaram observações diretas de deformação plástica (SHANKAR, 1982).

2.8.3 Processo de alívio de tensão por vibração

O processo de alívio de tensão por vibração consiste na aplicação do processo vibracional após o processo de soldagem ou uso do componente mecânico.

Este procedimento produz vários benefícios desejáveis, tais como: 1) Redução das falhas em serviço por fadiga; 2) Produz uma superfície limpa, livre de descoloração, escória e incrustações; 3) Permite a estabilidade dimensional de longo prazo; 4) Minimiza distorções (BONAL, 2008).

2.8.4 Processo de condicionamento da solda

O processo de condicionamento da solda consiste na aplicação do processo vibracional simultaneamente ao processo de soldagem, promovendo o alívio das tensões térmicas de acordo com a introdução das mesmas durante o processo de solidificação (WEITE, 1999).

Este procedimento produz vários benefícios desejáveis para a zona fundida e para a zona termicamente afetada, tais como: 1) Redução das falhas em serviço por fadiga; 2) Produz uma superfície limpa, livre de descoloração, escória e incrustações; 3) Permite a estabilidade dimensional de longo prazo; 4) Minimiza distorções e trincas; 5) Permite o aumento na velocidade de soldagem; 6) Minimiza a ocorrência de descontinuidades oriundas do processo de soldagem; 7) Promove mudanças metalúrgicas – o processo produz uma cadeia cristalina com grãos mais finos e mais uniformes na junta soldada melhorando, assim, as propriedades mecânicas da solda (BONAL, 2008; WEITE, 1999).

2.8.5 Equipamentos de alívio de tensões por vibração

Os equipamentos de alívio de tensões por vibração disponíveis comercialmente, conforme figura 34, consistem em um motor de velocidade variável com pesos excêntricos associado a um acelerômetro e um console elétrico/eletrônico responsável pela alimentação de energia e controle da vibração.

Figura 34: Exemplos de equipamentos disponíveis comercialmente.



Fonte: Sites dos fabricantes.

A vibração poderá ser induzida ao componente mecânico de duas formas:

1) O indutor de força e o acelerômetro poderão ser fixados diretamente no componente mecânico, se o mesmo for suficientemente grande (Figura 35). Neste caso, o componente mecânico deverá ser isolado do chão através de borrachas, ou elementos similares, para que a vibração induzida não seja perdida ou absorvida.

Figura 35: Exemplos de tratamento vibracional com fixação diretamente no componente.



Fonte: Sites dos fabricantes.

2) O componente mecânico, o indutor de força e o acelerômetro são fixados em uma mesa de vibração isolada do chão através de borrachas, ou elementos similares (Figura 36).

Figura 36: Exemplos de tratamento vibracional com o auxílio de uma mesa de vibração.



Fonte: Sites dos fabricantes.

2.8.6 Tratamento térmico vs vibracional

Dentre os diversos métodos empregados no processo de alívio de tensões residuais, o mais convencional e igualmente efetivo é o processo de tratamento térmico. Porém, embora, amplamente utilizado, assim como outros processos de manufatura, apresenta algumas desvantagens, tais como (CRISI; MENDONÇA, 2006; SHANKAR, 1982):

- 1) Alto custo do tratamento em termos de equipamento e de consumo de energia;
- 2) Tempo de processamento alto;
- 3) Deterioração da superfície tratada através da formação de camadas de óxidos, descoloração e escamações;
- 4) Necessidade de processamento final subsequente para remoção das camadas de óxido formada durante o tratamento;
- 5) Limitações em relação a formas e dimensões dos componentes mecânicos;
- 6) Em alguns casos, pode diminuir algumas propriedades mecânicas importantes que são usualmente adquiridas durante outros processos térmicos-mecânicos;
- 7) Pode promover alterações metalúrgicas nas microestruturas;
- 8) Geração de resíduos e poluição do ar;
- 9) Exigem que o equipamento, submetido ao tratamento, seja desmontado, transportado até o forno de tratamento e tratado separadamente por tipo de material, forma e dimensões;
- 10) Tem limitações no tratamento de componentes fabricados em vários tipos de materiais;
- 11) Pode ser impraticável para um gama de grandes componentes.

As vantagens da técnica alternativa de indução de vibração mecânica são idênticas às obtidas pelo tratamento térmico convencional, com destaque à sua relativa simplicidade quando comparado com o processo térmico ou com as demais técnicas (CRISI; MENDONÇA, 2006):

- 1) Equipamento flexível e portátil, permite que o tratamento seja realizado no local onde os componentes se encontram, evitando-se, assim, as variáveis de tempo e custo envolvidos nos processos de desmontagens, movimentação de componentes e montagens, etc.;
- 2) Custo do tratamento, tanto em nível de aquisição de equipamento, quanto em nível de custo de operação (OPEX) é consideravelmente menor quando comparado com o equipamento para tratamento térmico;
- 3) Tempo de processamento é consideravelmente menor quando comparado com os demais tratamentos, principalmente com o térmico;
- 4) Não promove a Deterioração da superfície tratada (formação de camadas de óxidos, descoloração e escamações), logo não necessita de um processamento subsequente para limpeza da superfície.
- 5) Não altera as propriedades mecânicas, não promove alterações metalúrgicas nas microestruturas, não gera resíduo nem poluição do ar;
- 6) Não apresenta limitações em relação a formas e dimensões dos componentes mecânicos e permite o tratamento de componentes fabricados com materiais diferentes.
- 7) Promove grande redução de consumo de energia, geração de resíduos e poluição do ar.

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 PLANEJAMENTO DA SOLDAGEM

Visando a avaliação dos benefícios dos processos de tratamento mecânicos de alívio de tensões por vibração, três cenários distintos de soldagem foram executados (Tabela 1).

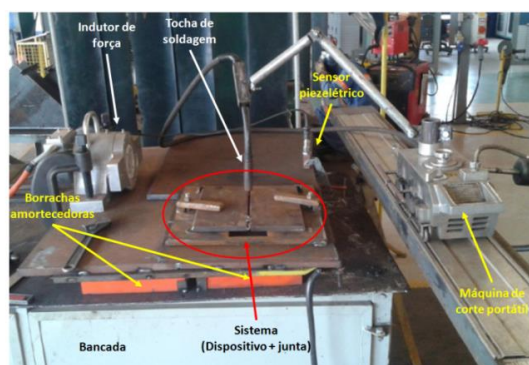
Tabela 1: Cenários de soldagem executados.

Cenários:	Descrição:
S1	Soldagem convencional com o auxílio do processo vibracional posterior a soldagem.
S2	Soldagem convencional
S3	Soldagem convencional com o auxílio do processo vibracional simultâneo a soldagem sem alteração de parâmetros de soldagem.

Por se tratar de uma análise comparativa, visando garantir a confiabilidade dos resultados obtidos e a repetibilidade do processo de soldagem para cada cenário executado, a soldagem foi realizada através de um processo semi-automatizado, parâmetros de soldagem idênticos e com auxílio de um gabarito de fixação.

A vibração foi induzida ao componente mecânico fixando o indutor de força e o acelerômetro diretamente no componente, neste caso um sistema formado pelo gabarito e as chapas. E, para que a vibração induzida não seja perdida ou absorvida, o sistema, foi isolado do chão através de borrachas (Figura37).

Figura 37: Lay out de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.1 Equipamentos

3.1.1.1 Gabarito de soldagem

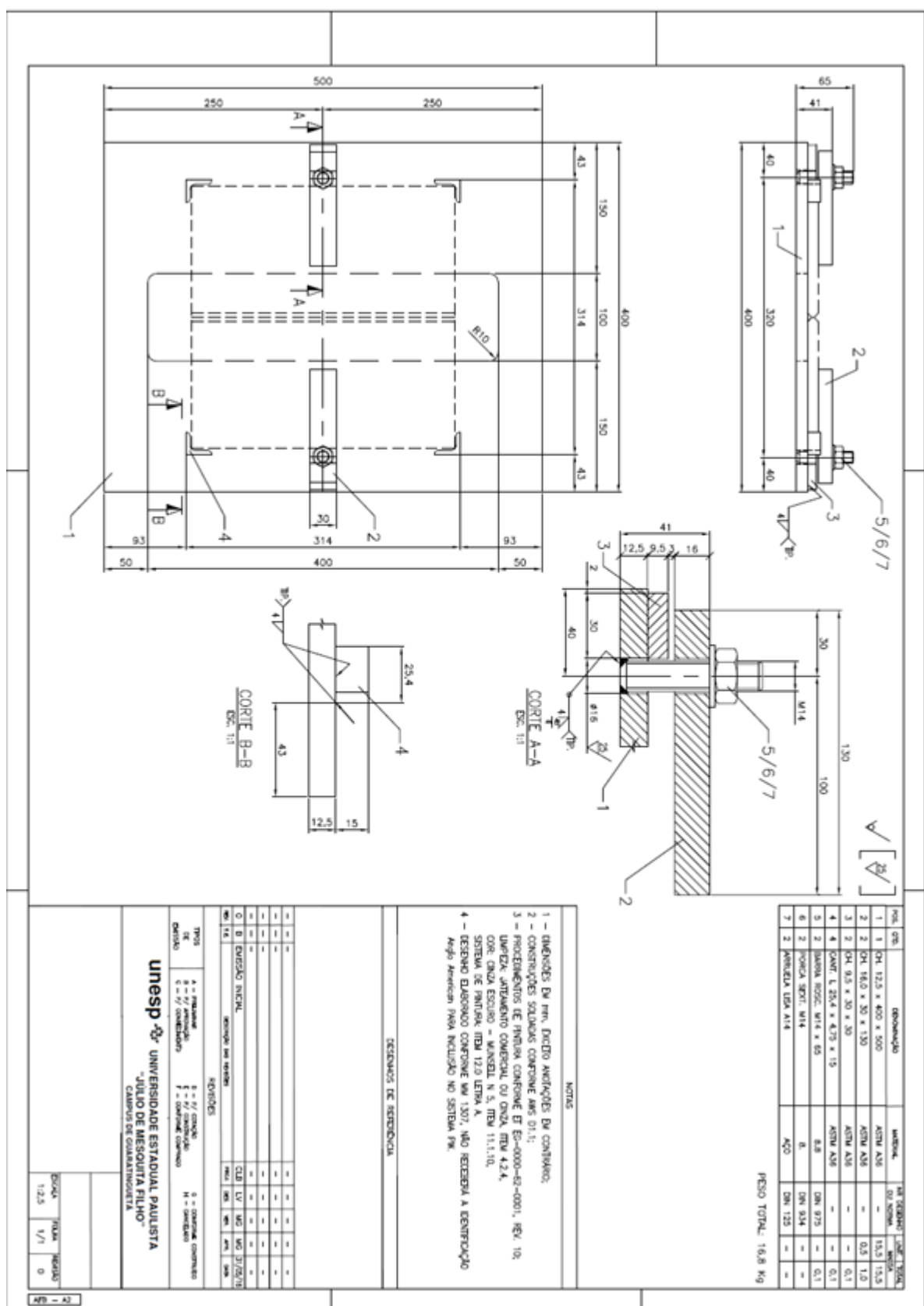
Confeccionado em chapa de aço carbono SAE 1020 com 500 mm de comprimento por 400 mm de largura e 12,5 mm de espessura (Figura 39), visa facilitar o posicionamento e a fixação do conjunto de chapas, eliminando movimentos indesejados, de modo a garantir o alinhamento do chanfro em relação a tocha de soldagem durante a excitação do sistema e, consequentemente reduzir o tempo de preparo de cada cenário (Figura 38).

Figura 38: Gabarito de soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 39: Desenho do gabarito de soldagem.



Fonte: Elaborado pelo autor

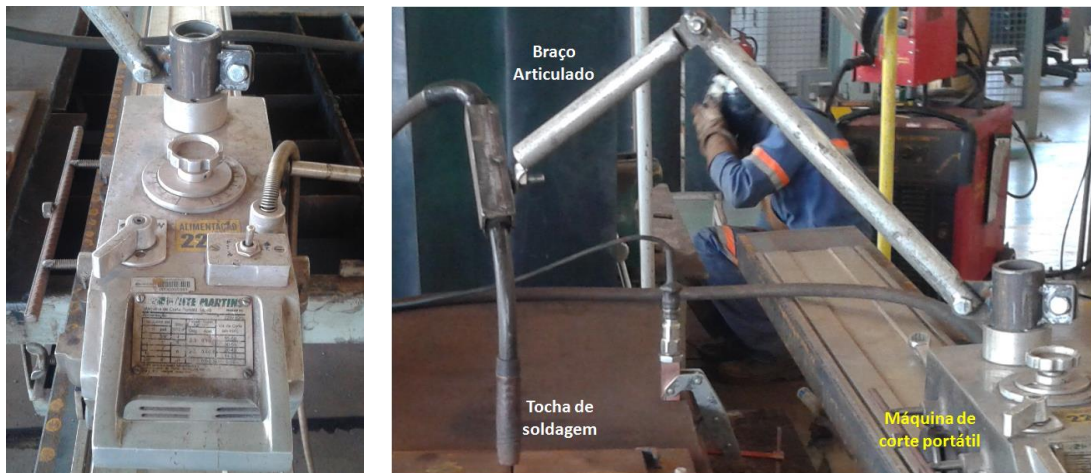
3.1.1.2 Máquina de corte portátil

Com o intuito eliminar variações na velocidade de soldagem, o processo de soldagem foi semi-automatizado utilizando uma máquina de corte portátil adaptada com um braço articulável (Figura 40) e especificação técnica de acordo com tabela 2.

Tabela 2: Especificação técnica - Máquina de corte

Especificação técnica
Descrição: Máquina de corte portátil;
Fabricante: White Martins
Modelo: IVC 46
Alimentação: 220v; 60 Hz
Velocidade de corte: 8 a 58 cm/min

Figura 40: Máquina de corte portátil adaptada para soldagem



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.1.3 Equipamento de soldagem

O equipamento utilizado para soldagem MIG/MAG com tensão pulsada e ajuste eletrônico contínuo dos parâmetros de soldagem, conforme figura 41, e especificação técnica conforme tabela 3.

Tabela 3: Especificação técnica do equipamento de soldagem.

Especificação técnica:	
Fonte de soldagem Fabricante: ESAB Modelo: Origo Mig 558 TP (V/A) Normas: IEC 60.974-1 Classe de proteção: IP23 Tensão a vazio VDC: 70 VDC Faixa de corrente: 30 – 400 A	Alimentador: Modelo: ArcWeld 400P Bitola de arame: 0,8 a 1,6. Velocidade de alimentação máxima: 20 m/mim

Figura 41: Equipamento de soldagem utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.1.4 Equipamento de alívio de tensões por vibração

O equipamento de alívio de tensões por vibração selecionado para o desenvolvimento do trabalho em questão foi o modelo VSR-800 Vibratory stress Relief System, fabricado pela VSR Group (Figura 42).

Figura 42: VSR-800 Vibratory stress Relief System.



Fonte: Manual do fabricante

O princípio de funcionamento é baseado na vibração ressonântica e os principais componentes estão ilustrados na figura 43.

Figura 43: Componentes do equipamento de vibração.



a) Console elétrico MX-800



b) Indutor de força



c) Grampos de fixação



d) Acelerômetro



e) Borrachas amortecedoras

Fonte: Manual do fabricante

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Material de base

Para a realização da soldagem, utilizou-se como material de base chapas de aço, de alta resistência e baixa liga (Aço ARBL), USI - SAR 80T, desenvolvidos para atender às exigências de mercado em aplicações onde a resistência mecânica à abrasão, tenacidade e peso são requisitos principais. Trata-se de um aço similar ao Aço ASTM A517 B/H com limite mínimo de escoamento de 700 mpa. Geralmente aplicado em equipamentos de terraplanagem, máquinas agrícolas, guindastes, caçambas de caminhões fora de estrada, carros blindados, blindagem de veículos militares, vasos de pressão, caçambas, pontes e plataformas marítimas.

As suas propriedades mecânicas são resultantes de um processo de manufatura que incorpora, na rota de produção, a aplicação de conceitos como endurecimento por precipitação, refino de grão e adição de elementos de microligantes associados a diferentes escalas de passes de temperatura de laminação.

Em específico ao aço USI-SAR 80T, a obtenção de alta resistência mecânica conjugada com a boa tenacidade e soldabilidade, é obtida submetendo o aço, durante o processo de fabricação, à tratamento térmico de têmpera por cortina d'água a 900°C, seguido de revenimento na faixa de 600 ou 680°C.

De acordo com a especificação, apresenta a seguinte composição química (Tabela 4) e propriedades mecânicas (Tabela 5):

Tabela 4: Composição química aproximada do Aço carbono USI-SAR-80T.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	Sn (%)	N (%)	B (%)	Ca (%)	Sb (%)
0,12	0,95	0,018	0,005	0,26	0,73	0,01	0,49	0,043	0,01	0,001	0,036	0,015	0,001	0,042	0,0021	0,002	0,001

Fonte: Catálogo Usiminas

Tabela 5: Propriedades mecânicas do Aço carbono USI-SAR-80T.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES
Limite de resistência à tração	856 Mpa
Limite de escoamento	778 Mpa
Alongamento	26%

Fonte: Catálogo Usiminas

3.2.2 Metal de adição

O metal de adição para o processo de soldagem MIG - MAG a ser utilizado será o consumível de classificação ER70S-6, conforme especificação AWS A5.18.

É um arame sólido com uma boa fluidez da poça de fusão e, conseqüentemente, de alto rendimento nos processos industriais dos mais diversos segmentos, tais como: Indústria de implementos agrícolas e rodoviários, automobilística caldeirarias e construções mecânicas.

O elevado teor de manganês e silício proporciona excelente desoxidação do metal de solda nas aplicações em superfícies com moderada oxidação superficial. O resultado é um cordão com bom acabamento, ótimas propriedades mecânicas, baixo nível de respingos e juntas de excelente sanidade radiográficas.

Largamente utilizado em praticamente todas as aplicações de soldagem MIG – MAG de aços carbonos. Podendo ser empregado em soldagens semi-automáticas, mecanizadas e robotizada. Considerado extremamente versátil, podendo ser aplicado em todas as posições de soldagem e nas mais diversas espessuras de chapas.

De acordo com a especificação, o consumível de classificação ER 70S-6 apresenta a seguinte composição química (Tabela 3) e propriedades mecânicas (Tabela 4):

Tabela 6: Composição química (%) aproximada do metal de adição ER 70S-6.

C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Al (%)	Cu (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	Sn (%)	N (%)	B (%)	Ca (%)	Sb (%)
0,06 a 0,15	1,4 a 1,85	0 a 0,035	0 a 0,035	0,8 a 1,15	-	0 a 0,15	0 a 0,15	-	-	-	0 a 0,03	-	-	-	-	-	-

Fonte: Catálogo GERDAU

Tabela 7: Propriedades mecânicas do metal de adição ER 70S-6.

PROPRIEDADES MECÂNICAS	VALORES
Limite de resistência à tração	480 Mpa mín.
Limite de escoamento	400 Mpa mín.
Alongamento	22% mín.

Fonte: Catálogo GERDAU

3.2.3 Proteção Gasosa

Como proteção gasosa, foi utilizado o dióxido de carbono – CO₂ comercialmente puro. Selecionado por ter um baixo custo, ser economicamente viável em relação a outros gases de proteção e proporcionar vantagens operacionais devido suas características físico-químicas (ESAB, 1999).

3.3 PREPARAÇÃO DAS CHAPAS PARA SOLDAGEM

As chapas a serem unidas pelo processo de soldagem, foram cortadas por plasma e posteriormente, para confecção do chanfro e remoção de imperfeições oriundas do processo de corte, garantir o paralelismo e o perpendicularismo das faces, foram fresadas na Laboratório de usinagem do DMT/FEG/UNESP (figura 44), assumindo as dimensões listadas na figura 45.

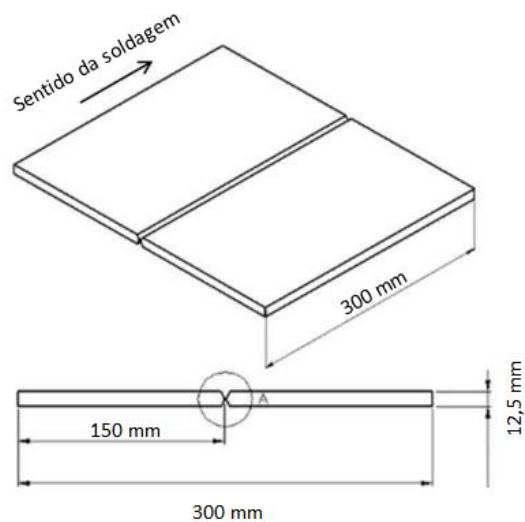
Os chanfros foram pré-definidos, conforme norma AWS D1.1, conforme mostrado na figura 46 e tabela 8.

Figura 44: Fresamento das laterais das chapas e chanfro das juntas.



Fonte:Elaborado pelo autor.

Figura 45: Dimensões das chapas preparadas para soldagem



Fonte:Elaborado pelo autor.

Figura 46: Chanfro duplo V

Double-V-groove weld (3) Butt joint (B)									
Welding Process	Joint Designation	Base Metal Thickness (U = unlimited)		Groove Preparation			Permitted Welding Positions	Total Weld Size (E ₁ + E ₂)	Notes
		T ₁	T ₂	Root Opening Root Face Groove Angle	Tolerances				
					As Detailed (see 3.12.3)	As Fit-Up (see 3.12.3)			
GMAW FCAW	B-P3-GF	1/2 min	—	R = 0 f = 1/8 min α = 60°	+1/16, -0 +U, -0 +10°, -0°	+1/8, -1/16 ±1/16 +10°, -5°	All	S ₁ + S ₂	A, E, Mp, N

Fonte:AWS D1.1

Tabela 8: Dimensões do chanfro

Variável:	Valores:
T ₁	½" ou 12,5mm
S ₁	2/3.T ₁ = 8,33 mm
S ₂	1/3.T ₁ = 4,17 mm
f	1,5 mm

Fonte: elaborado pelo autor.

3.4 ENSAIOS MECÂNICOS

3.4.1 Inspeção visual do cordão de solda

Precede qualquer outro tipo de inspeção e baseia-se em uma inspeção mais simples da superfície externa do cordão de solda e regiões adjacentes. É realizada a olho nu ou com uso de instrumentos e equipamentos, visa identificar a existência e determinar, ao longo do cordão de solda, o tamanho, forma, acabamento e a presença de descontinuidades oriundas do processo de soldagem (FBTS, 2000; MENDONÇA, 2007).

A inspeção visual foi realizada logo após a conclusão da soldagem de todos os corpos de prova. Além da análise visual, a inspeção contou com o auxílio de paquímetro e escala, do fabricante Mitutoyo, e foi registrada através da utilização de uma câmera digital CANON PowerShot A800.

3.4.2 Análise de descontinuidade dimensionais

Visando identificar mudanças na forma da peça soldada, devido às deformações térmicas do material durante a soldagem, cada chapa que compõem a junta soldada foi riscada, com o auxílio de um paquímetro traçador de altura, dividindo o corpo de prova em quadrantes. E, utilizando uma mesa devidamente nivelada e com o auxílio de um relógio comparador e uma base magnética (Figura 47), foram analisadas possíveis variações de medidas no comprimento, largura e na superfície do corpo de prova, antes e após a soldagem, tendo como referências os vértices destes quadrantes (Figura 48).

Figura 47: Divisão das chapas em quadrantes e análise de deformações.



Fonte:Elaborado pelo autor

Figura 48: Instrumentos utilizados



Paquímetro traçador de altura
Fabricante: Mitutoyo



Relógio comparador
Fabricante: Mitutoyo
Escala: 0,01 mm



Base magnética
Fabricante: Mitutoyo

Fonte: elaborado pelo autor.

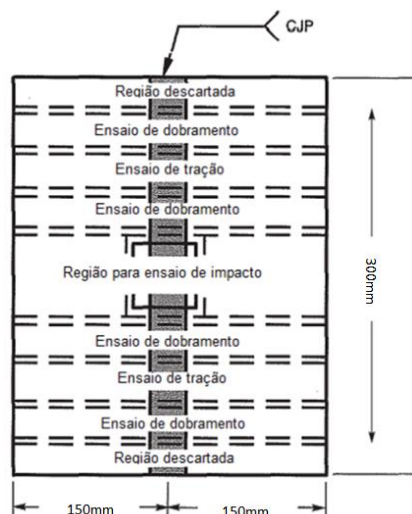
3.4.3 Ensaio por líquido penetrante

Visando a detecção de descontinuidades superficiais no cordão de solda e regiões adjacentes, os corpos de prova foram limpos para que não houvesse a presença de contaminantes. Posteriormente, à temperatura inferior à temperatura máxima admissível, foi aplicado um líquido de alta capilaridade formando um filme sobre a superfície limpa da junta soldada. Após o tempo recomendado pelo fabricante e em norma (PETROBRAS, 1996), para que ocorra a penetração do líquido nos possíveis defeitos existentes, o excesso de líquido penetrante foi removido com auxílio de um pano de limpo e aplicado a camada reveladora. Posteriormente, após o tempo recomendado, técnicas de inspeção visual foram utilizadas para verificação e análise das descontinuidades reveladas. Por fim, as juntas soldadas foram limpas e submetidas à preparação para os demais ensaios.

3.4.4 Preparação dos corpos de prova

A retirada dos corpos de provas, utilizados no trabalho, para a realização dos ensaios mecânicos foi realizada conforme norma AWS D1.1, conforme figura 49.

Figura 49: Lay out de corte de amostras



Fonte: AWS D1.1

O seccionamento do material foi realizado utilizando o equipamento de corte de serra automático com refrigeração e velocidade de corte controlada, que proporciona temperaturas de trabalho amenas, evitando uma possível transformação de fases do material nas regiões foco de análise.

Os corpos de prova para a caracterização mecânica, foram submetidos ao setor de usinagem da LABMETAL, em São José dos Campos/SP, para serem preparados, conforme procedimento e dimensões normatizadas, para os respectivos ensaios.

Os corpos de prova utilizados na caracterização macro e micro estrutural foram submetidos ao processo de lixamento, polimento e ataque químico. Na etapa de lixamento, foram utilizadas lixas d'água de óxidos de alumínio de diferentes granulometrias e uma politriz Struers Labpol-5 a uma rotação de 400 rpm e com o auxílio de água corrente no lixamento. Sendo as lixas utilizadas, para as amostras para análise macroestrutural, as de granulometrias 220, 320, 400 e 600, enquanto, para as amostras para análise microestrutural, as de granulometrias 220, 320, 400, 600 e 1200.

Na etapa do polimento, foi utilizada, novamente, a politriz Struers Labpol-5 à uma rotação de 300 rpm, com o auxílio de lubrificante à base de óleo, pasta de diamante de 9 e de 3 μm e, para o polimento final, sílica coloidal 0,05 μm .

Para a amostra da análise macroestrutural, o ataque químico foi realizado por imersão de aproximadamente 20 segundos em reagente Nital 10% (90% de álcool etílico + 10% de

ácido nítrico concentrado). Por fim, lavada com água corrente destilada, em temperatura ambiente, e detergente neutro e, posteriormente, secada com ar quente soprado.

Para a amostra da análise microestrutural, o ataque químico foi realizado, sob a superfície polida do material, com o auxílio de algodão umedecido com reagente Nital 4% (96% álcool etílico + 4% ácido nítrico), por aproximadamente 5 segundos de esfregamento e exposição da superfície ao reagente. Posteriormente, a amostra foi lavada com água corrente destilada, temperatura ambiente, e secada com ar quente soprado.

3.4.5 Análise de Macrografia

Consiste na análise a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X) do aspecto da superfície, devidamente polida e atacada por reagentes químicos, visando a visualização da existência, distribuição e natureza das falhas e impurezas, homogeneidade do material, dimensional e qualidade da solda, identificar os processos de fabricação utilizado, presença de tratamentos térmicos entre outras características.

A macrografia foi realizada na seção transversal das soldas das três condições de soldagem propostas para este experimento. A revelação da macroestrutura foi evidenciada através da captação de imagens por meio de uma câmera fotográfica digital, modelo Cyber Shot.

3.4.6 Análise de Micrografia

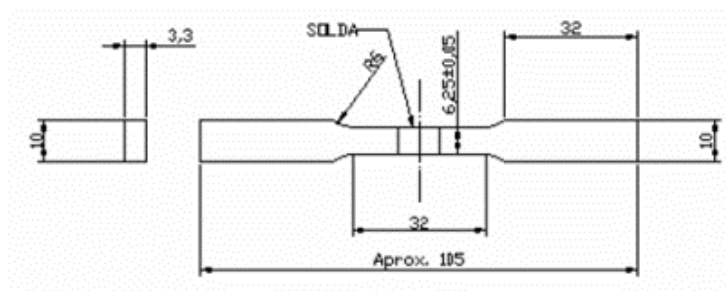
Consiste na análise dos produtos metalúrgicos, através de microscópio, visando identificar as fases presentes, a granulação do material (Tamanho de grão), o teor aproximado de carbono no aço, a natureza, a forma, a quantidade e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. Todavia, para este experimento, a caracterização microestrutural tem como objetivo a comparação, entre as três condições de soldagem proposta, das respectivas regiões básicas das juntas soldadas, visando identificar possíveis alterações promovidas pelos tratamentos mecânicos vibracionais.

A micrografia foi realizada na seção transversal das soldas, nas três regiões básicas da junta soldada (Metal de base, ZTA e ZF) das três condições de soldagem proposta para este experimento. A revelação da microestrutura foi evidenciada com o auxílio de um microscópio óptico, modelo XJP-6.

3.4.7 Ensaio de tração

Os corpos de prova para o ensaio de tração transversal foram confeccionados e ensaiados conforme norma ASME IX – Ed.2015. Foram retirados três corpos de prova de cada cenário de soldagem, com as dimensões citadas na figura 50, totalizando seis corpos de prova (AWS D1.1, 2008).

Figura 50: Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração.



Fonte: AWS D1.1

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de tração, até a ruptura final, realizados pelo método de controle de deslocamento com velocidade de ensaio de 5 mm/min, com o auxílio do equipamento de ensaio universal modelo INSTRON 8801 (Figura 51). E, Como critério de avaliação, foi adotada que a tensão de ruptura do corpo de prova não deve ser menor que a tensão mínima especificada para o metal de base utilizado, conforme norma.

Figura 51: Equipamento de ensaio universal – Modelo INSTRON 8801



Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.8 Ensaio de Impacto Charpy

Para este ensaio, os corpos de prova, tipo transversal, foram retirados da junta soldada, onde o eixo longitudinal é paralelo ao cordão de solda e o corpo de prova é perpendicular a ele, conforme norma ASME IX – Ed. 2015 (figura 53). Foram estabelecidas duas posições para o entalhe em V, sendo um no centro da solda e o outro na ZTA, aproximadamente 2,0 mm da margem da solda, conforme ilustrado na figura 52.

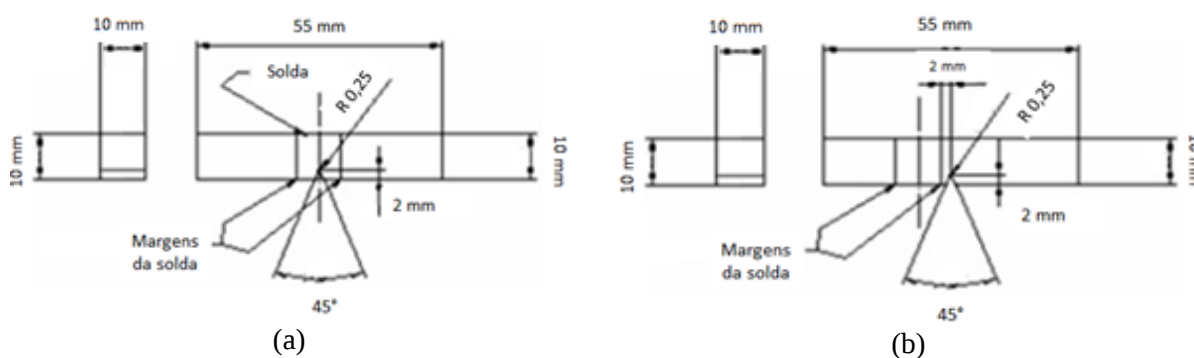
Figura 52: Ilustração dos corpos de prova para ensaio Charpy

(a) Entalhe no centro da solda; (b) Entalhe na ZTA.



Figura 53: Dimensões dos corpos de prova de ensaio de impacto Charpy transversal

(a) Entalhe no centro da solda; (b) Entalhe na ZTA.



Fonte: ASME IX – Ed. 2015

Os corpos de prova foram ensaiados na máquina de impacto Trebel – PSW30 (Figura 54). Para as amostras de cada cenário de soldagem, foram retirados e preparados três corpos de prova para cada posição de entalhe, totalizando seis corpos de prova.

Figura 54: Máquina de impacto Trebel – PSW30



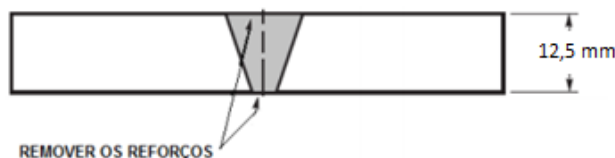
Fonte: ASME IX – Ed. 2015

3.4.9 Ensaio de dobramento

Para este ensaio, os corpos de prova foram retirados das chapas soldadas, conforme norma ASME XI (Figura 49), sendo quatro testes de dobramento lateral (DL) a 180° para cada cenário, totalizando 12 testes.

Os corpos de prova (Figura 55) foram posicionados sob roletes, distanciados 63,2 mm um do outro, e submetido ao esforço de dobramento de um cutelo com 40 mm de diâmetro. Sendo que, como critério de aceitação, após o dobramento, os corpos de prova não podem apresentar trincas ou outras descontinuidades maiores que 3,0 mm e que o somatório de todas as descontinuidades maiores que 1,0 mm e menores que 3,0 mm não excedam 10,0 mm (AWS D1.1, 2008).

Figura 55: Corpo de prova para ensaio de dobramento



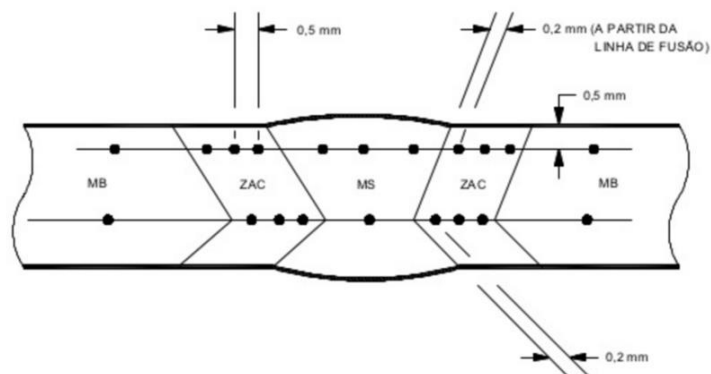
3.4.10 Ensaio de dureza Vickers

Objetivando avaliar as possíveis variações de dureza entre o material de base, ZTA e material de solda, o ensaio foi realizado conforme norma N133 (Petrobrás, 2002) e com a obtenção de 20 medições de indentação, utilizando um penetrador de diamante com base

piramidal preso a suportes controlados eletronicamente visando o aumento da precisão das medidas.

As medições foram realizadas conforme figura 56. Através da ponta de diamante foi aplicada uma carga sobre a superfície de 10 kg e tempo de penetração de 15 segundos para cada medida, respectivamente.

Figura 56: Esquema do perfil de medida de dureza vickers.



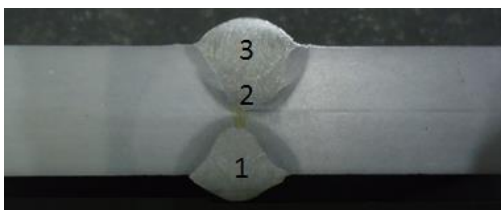
Fonte:Elaborado pelo autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aporte térmico

A figura 57 ilustra a sequência de passes executada durante o procedimento de soldagem.

Figura 57: Sequência de soldagem



Fonte:Elaborado pelo autor.

A tabela 9, lista os parâmetros de soldagem e o cálculo do aporte térmico para a condição S1, onde foi realizada a soldagem convencional com o auxílio do tratamento mecânico vibracional de alívio de tensões posterior a soldagem. Nesta condição de soldagem, os parâmetros médios utilizados foram: Tensão de soldagem foi de 21,47V, corrente elétrica de 202,67 A e de velocidade de soldagem de 0,0034 mm/min. Tais parâmetros resultaram em um aporte térmico médio de 75.116 KJ/cm.

Tabela 9: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S1

S1	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de avanço (mm/min)	Aporte térmico (J/cm)
Face 1 – Passe 2	22,00	176,00	0,0034	66.962.823,53
Face 1 – Passe 3	21,20	212,00	0,0034	77.726.682,35
Face 2 – Passe 1	21,20	220,00	0,0034	80.659.764,71
Média:	21,47	202,67	0,0034	75.116.423,53

A tabela 10, lista os parâmetros de soldagem e o cálculo de aporte térmico para a condição S2, onde foi realizada a soldagem convencional. Nesta condição de soldagem, os parâmetros médios utilizados foram: Tensão de soldagem foi de 21,07 V, corrente elétrica de 225,33 A e de velocidade de soldagem de 0,0034 mm/min. Tais parâmetros resultaram em um aporte térmico médio de 82.107 KJ/cm.

Tabela 10: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S2

S2	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de avanço (mm/min)	Aporte térmico (J/cm)
Face 1 – Passe 2	20,80	220,00	0,0034	79.137.882,35
Face 1 – Passe 3	21,20	244,00	0,0034	89.459.011,76
Face 2 – Passe 1	21,20	212,00	0,0034	77.726.682,35
Média:	21,07	225,33	0,0034	82.107.858,82

A tabela 11, lista os parâmetros de soldagem e o cálculo do aporte térmico para a condição S3, onde foi realizada a soldagem convencional com o auxílio do tratamento mecânico vibracional simultâneo ao processo de soldagem. Nesta condição de soldagem, os parâmetros médios utilizados foram: Tensão de soldagem foi de 20,40V, corrente elétrica de 214,67 A e de velocidade de soldagem de 0,0034 mm/min. Tais parâmetros resultaram em um aporte térmico médio de 75.725 KJ/cm.

Tabela 11: Parâmetros de soldagem e aporte térmico - Condição de soldagem S3

S3	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de avanço (mm/min)	Aporte térmico (J/cm)
Face 1 – Passe 2	20,40	216,00	0,0034	76.204.800,00
Face 1 – Passe 3	20,00	216,00	0,0034	74.710.588,24
Face 2 – Passe 1	20,80	212,00	0,0034	76.260.141,18
Média:	20,40	214,67	0,0034	75.725.176,47

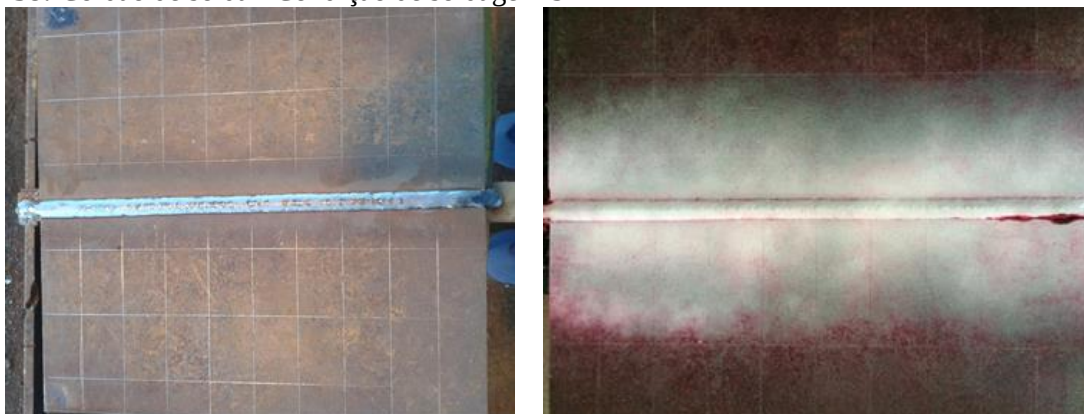
Segundo Wainer, Brandi, Mello (1992), Lima (2005), Scotti, Ponomarev (2008) e Ibrahim (2012) a qualidade, produtividade, custo e a geometria final do cordão dependem dos parâmetros de soldagem.

O equipamento de soldagem foi ajustado para a faixa de parâmetros recomendados pelo fabricante dos consumíveis. Todavia, por ser um equipamento automático, o mesmo realizou ajustes nos parâmetros de corrente elétrica e tensão ao longo da soldagem das amostras. Consequentemente, em comparação com a condição de soldagem de referência S2, observamos que a condição de soldagem S1 foi realizada com a tensão de soldagem de 1,9 % superior e corrente elétrica 10,6 % inferior, enquanto a condição de soldagem S3 foi realizada com a tensão e corrente elétrica de soldagem inferiores, 3,2% e 4,7% respectivamente. Resultando em reduções de aporte térmico de 8,5% e 7,8% para as condições S1 e S3, respectivamente, e, conforme citado pelos autores mencionados acima, alterações de propriedades mecânicas e geometria final do cordão que serão apresentadas a seguir.

4.2 Inspeção visual e por líquido penetrante do cordão de solda

A figura 58 apresenta o cordão de solda realizado na condição de soldagem S1. Observamos um cordão com bom acabamento superficial e com dimensional, altura do reforço e largura, homogêneo. Contudo, nos dois últimos quadrantes, observamos a ocorrência da falta de fusão na margem inferior da junta, conforme evidenciada pelo ensaio de líquido penetrante.

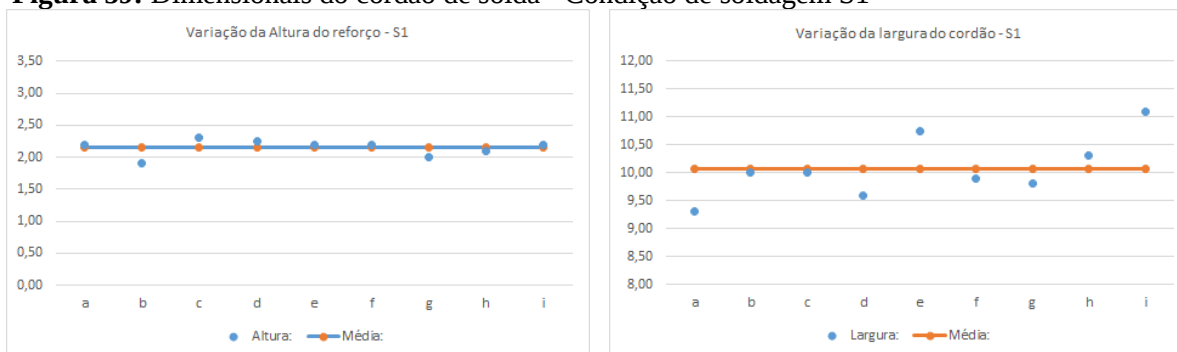
Figura 58: Cordão de solda - Condição de soldagem S1



Fonte:Elaborado pelo autor.

O dimensional do cordão de solda da condição de soldagem S1 apresentam variações de amplitudes pequenas (Figura 59), sendo a largura média de 10,08 mm e altura média do reforço de 2,15 mm. Em ambos os casos, a variação é sensivelmente menor que a variação do dimensional observado na condição de soldagem S2 e maior que a condição de soldagem S3.

Figura 59: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S1

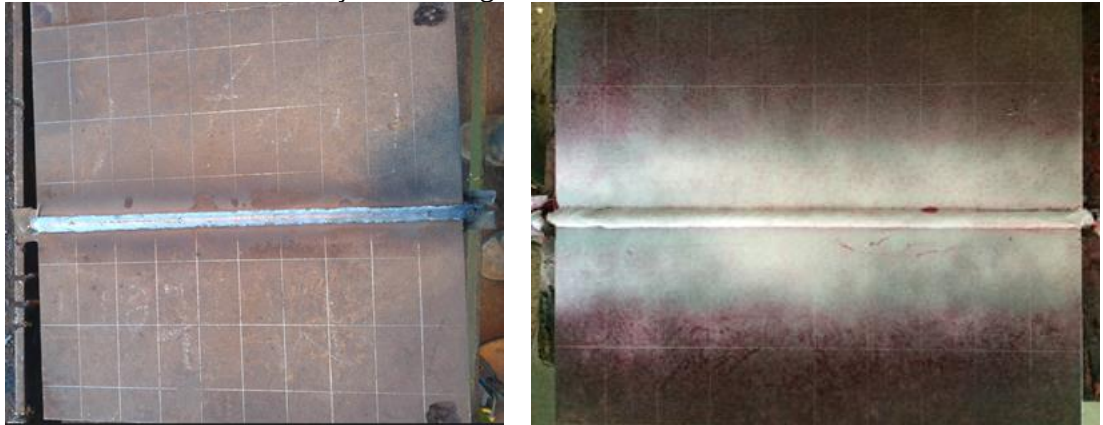


Fonte:Elaborado pelo autor.

A figura 60 apresenta a solda realizada na condição de soldagem S2. Observamos um cordão da com bom acabamento superficial e com dimensional, altura do reforço e largura,

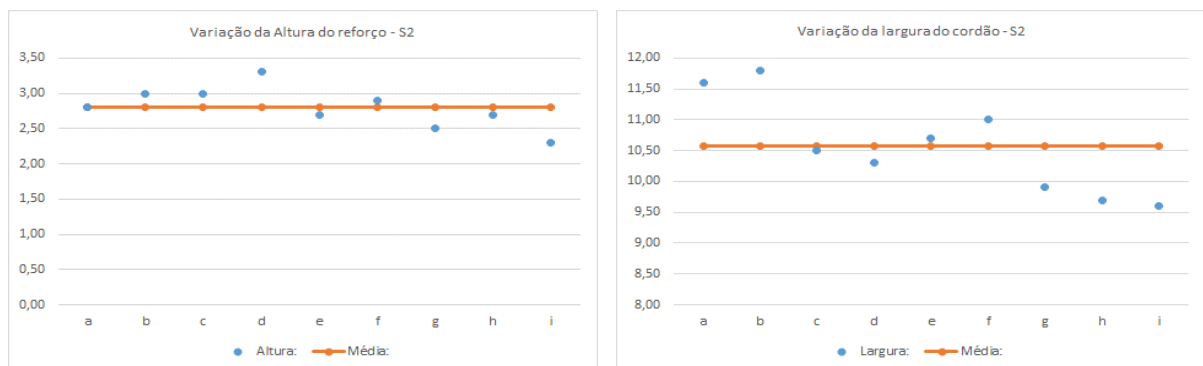
homogêneo, porém com variações de amplitudes maiores que as demais condições de soldagem (Figura 61), sendo a largura média de 10,57 mm e altura média do reforço de 2,80 mm. Igualmente a condição de soldagem S1, também, observamos a ocorrência da falta de fusão, porém desta vez, na margem superior da junta soldada e em menor intensidade.

Figura 60: Cordão de solda - Condição de soldagem S2



Fonte:Elaborado pelo autor.

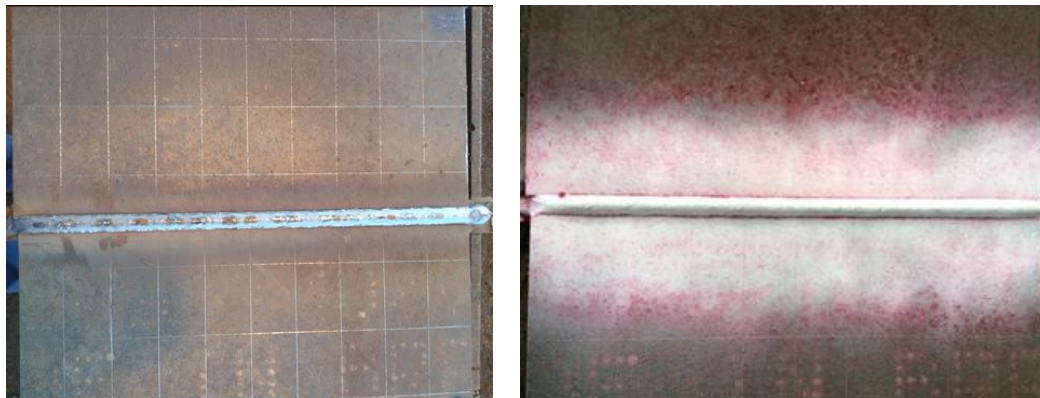
Figura 61: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S2



Fonte:Elaborado pelo autor.

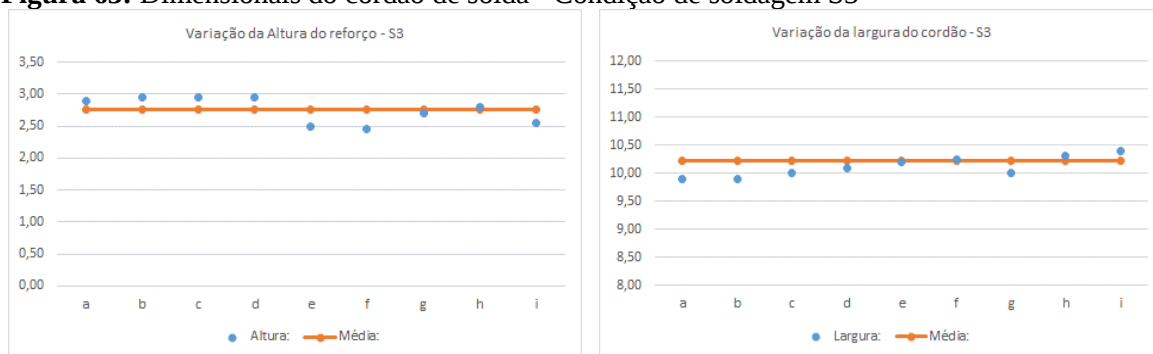
A figura 62 apresenta a solda realizada na condição de soldagem S3. Igualmente as demais, observamos um cordão de solda com bom acabamento superficial e com dimensional, altura do reforço e largura, homogêneo, porém com variações com amplitudes menores que as demais condições de soldagem (Figura 63), sendo a largura média de 10,22 mm e altura média do reforço de 2,75 mm. Com a presença de um poro não visível a olho nu, porém evidenciado pelo ensaio por líquido penetrante.

Figura 62: Cordão de solda - Condição de soldagem S3



Fonte:Elaborado pelo autor.

Figura 63: Dimensionais do cordão de solda - Condição de soldagem S3



Fonte:Elaborado pelo autor.

Segundo Wainer, Brandi, Mello (1992), Lima (2005), Scotti, Ponomarev (2008) e Ibrahim (2012), em um processo onde as demais variáveis são mantidas constantes, um aumento da tensão de soldagem irá gerar a redução da penetração e um aumento da largura e diminuição do reforço da solda. Nessa mesma analogia, um aumento da corrente de soldagem irá gerar um aumento na penetração e na largura do cordão de solda.

Ao compararmos as três condições de soldagem, em valores médios, observamos que a condição de soldagem S2 apresenta os maiores valores para a altura de reforço (2,80 mm) e largura do cordão de solda (10,57 mm), características decorrentes do fato desta soldagem ter sido executada com o maior parâmetro de corrente elétrica (225,30 A) e o segundo maior parâmetro para tensão de soldagem (21,07 V), enquanto que, a condição de soldagem S1, por utilizar o menor valor de corrente elétrica (202,67 A) e maior valor para a tensão de soldagem (21,47 V), apresenta os menor parâmetros de altura de reforço (2,15 mm) e largura (10,08 mm) (Conforme tabela 9, 10 e 11).

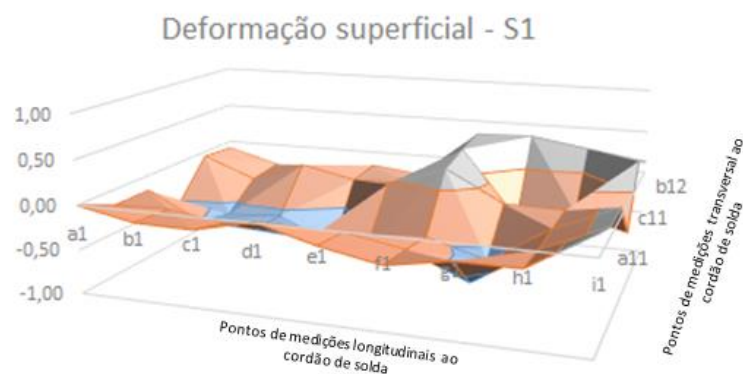
Observamos, ainda, a ocorrência de falta de fusão nas condições de soldagem S1, em maior intensidade, e S2, em menor. Esta descontinuidade atua como ponto concentrador de tensão, reduzindo a resistência da solda e dentre todas as origens possíveis, neste experimento, a mais provável é a corrente de soldagem muito baixa. Sendo, para a condição de soldagem S1, o menor parâmetro dentre as três condições, enquanto que a condição de soldagem S2 o maior.

A condição de soldagem S3, entre as três condições de soldagem, apresenta valores médios intermediários para a altura do reforço (2,75 mm) e largura do cordão (10,22 mm). Em relação aos parâmetros de soldagem, foi executada com o menor valor médio de tensão de soldagem (20,40 V) e o segundo maior para corrente elétrica (214,67 A). Diferentemente das condições de soldagem S1 e S2, esta condição de soldagem não apresentar descontinuidade por falta de fusão ao longo do cordão. E, tendo sido executada com a segunda maior corrente elétrica e a menor tensão de soldagem (Conforme tabela 9, 10 e 11) é possível concluir que o tratamento mecânico vibracional simultâneo ao processo de soldagem teve influência significativa na qualidade do cordão de solda.

4.3 Análise de descontinuidade dimensionais

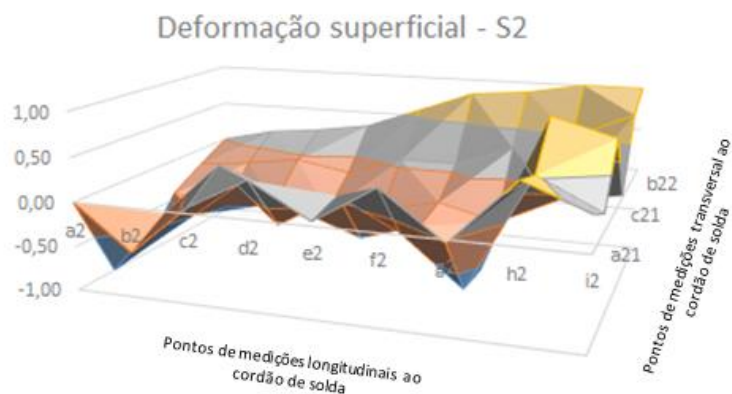
As figuras 64, 65 e 66 apresentam as amplitudes das deformações resultantes após cada uma das três condições de soldagem, definida através da mensuração e comparação das deformações existentes, antes e após o processo de soldagem, nos pontos pré-determinados.

Figura 64: Deformações superficiais - Condição de soldagem S1



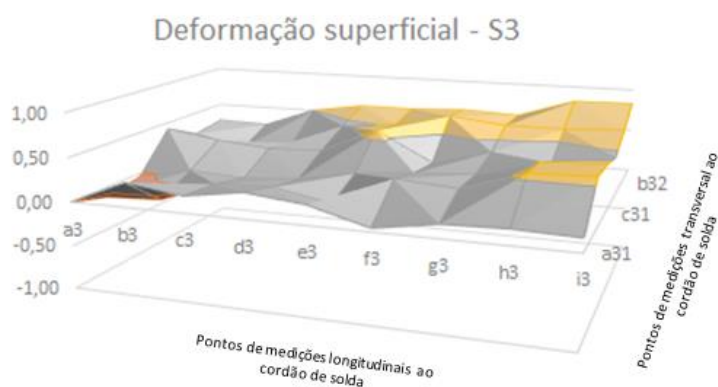
Fonte:Elaborado pelo autor.

Figura 65: Deformações superficiais - Condição de soldagem S2



Fonte:Elaborado pelo autor.

Figura 66: Deformações superficiais - Condição de soldagem S3



Fonte:Elaborado pelo autor.

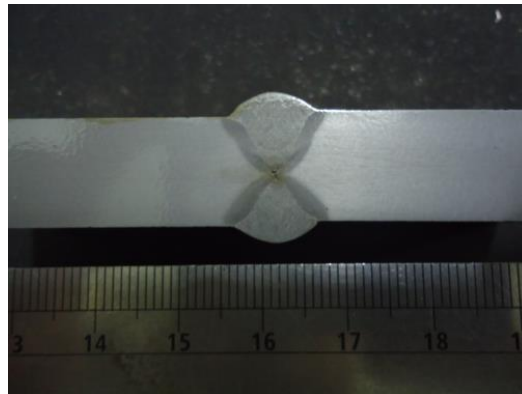
As soldagens S1 e S3, condições que contaram com o auxílio dos tratamentos mecânicos vibracionais, apresentaram amplitudes de deformação superficiais 49,7% e 59,4%, respectivamente, inferiores à condição S2. Permitindo concluir que os tratamentos mecânicos vibracionais tiveram influência na redução das deformações existentes nas juntas soldadas.

4.4 Análise de Macrografia

Segundo a análise macrografica, no ponto de corte, o aspecto da condição de soldagem S1 (Figura 67) apresenta, no cordão de solda da face superior, 10,5 mm de largura, 3 mm de altura do reforço, 7 mm de penetração e zona termicamente afetada compreendida entre 1 e 2 mm de espessura. E na face inferior, 10 mm de largura, 2 mm de altura de reforço, 6 mm de penetração e zona termicamente afetada compreendida entre 1,5 e 2,5 mm. A Junta apresenta,

devido a falhas de posicionamento das chapas no dispositivo de fixação, um leve embicamento e, em função dos demais parâmetros dimensionais, um ângulo excessivo no reforço da solda. Observamos, ainda, a presença de falta de penetração na raiz da solda, descontinuidade considerada grave.

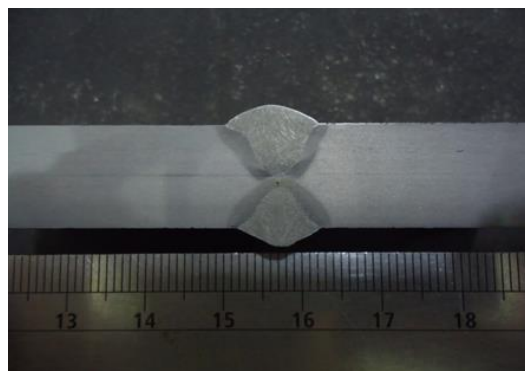
Figura 67: Macrografia - Condição de soldagem S1



Fonte:Elaborado pelo autor.

O aspecto da condição de soldagem S2 (Figura 68) apresenta, no cordão de solda da face superior, 12,5 mm de largura, 3 mm de altura do reforço, 8 mm de penetração e zona termicamente afetada compreendida entre 3 e 4 mm de espessura. E na face inferior, 11,5 mm de largura, 2,5 mm de altura de reforço, 6 mm de penetração e zona termicamente afetada compreendida entre 1,0 e 3,0 mm. Igualmente à condição de soldagem anterior, observamos, a presença de falta de penetração na raiz da solda, porém com dimensões inferiores.

Figura 68: Macrografia - Condição de soldagem S2

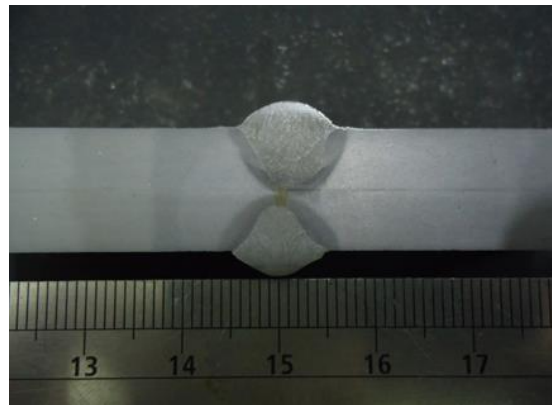


Fonte: Elaborado pelo autor.

O aspecto da condição de soldagem S3 (Figura 69) apresenta, no cordão de solda da face superior, 11,0 mm de largura, 3,5 mm de altura do reforço, 7,5 mm de penetração e zona

termicamente afetada compreendida entre 1,0 e 2,0 mm de espessura. E na face inferior, 10,5 mm de largura, 2,5 mm de altura de reforço, 6,0 mm de penetração e zona termicamente afetada compreendida entre 1,0 e 2,5 mm. E igualmente às demais condição de soldagem, observamos, a presença da falta de penetração na raiz da solda, porém com dimensões bastante reduzidas.

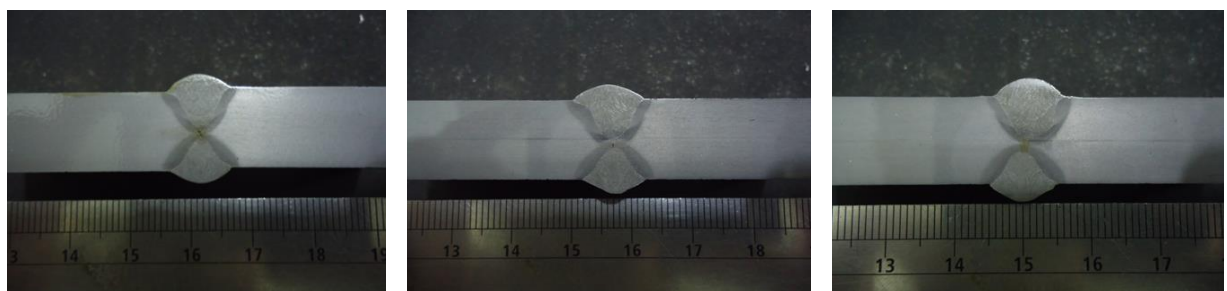
Figura 69: Macrografia - Condição de soldagem S3



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a figura 70, ambas as condições de soldagem apresentam falta de penetração na raiz da solda. Conforme já observado anteriormente, dentre todas as origens possíveis, neste experimento, a mais provável é a corrente de soldagem muito baixa. E, por se tratar de uma descontinuidade concentradora de tensão grave e por reduzir a resistência da solda, todas as três juntas soldadas estariam reprovadas. Todavia, como o objetivo deste experimento foi analisar comparativamente os benefícios e influência dos tratamentos mecânicos por vibração nas características das juntas soldadas, esse fato não interfere na continuação deste estudo.

Figura 70: Visão geral das condições de soldagem



a) Condição de soldagem S1

b) Condição de soldagem S2

c) Condição de soldagem S3

Logo, a condição de soldagem S1, por ter sido executada com a menor corrente elétrica e maior tensão de soldagem, entre as três condições, apresenta os menores parâmetros de penetração e largura do cordão de solda. Devido a maior tensão elétrica, apresenta a segunda maior altura de reforço e, devido as dimensões dos demais parâmetros, apresenta um ângulo excessivo de reforço. E, em consequência do menor aporte térmico, igualmente a condição de soldagem S3, apresenta as menores dimensões da ZTA.

A condição de soldagem S2, devido a maior corrente de soldagem e tensão de soldagem intermediária apresenta os maiores parâmetros dimensionais para largura e penetração dentre as três condições de soldagem, minimizando as dimensões da falta de penetração na raiz. E, devido à tensão de soldagem, apresenta uma altura de reforço intermediária. E, em consequência do maior aporte térmico, a ZTA apresenta a maior espessura.

Por fim, a condição de soldagem S3 apresenta valores intermediários para os parâmetros dimensionais de largura e penetração do cordão de solda, maior altura de reforço e espessura da ZTA similar à condição de soldagem S1. Com o aporte térmico 0,8 % superior ao da condição de soldagem S1 e devido à similaridade entre as espessuras das duas ZTA e ao fato da descontinuidade na raiz da solda assumir dimensões bastante reduzidas em relação as demais condições, ao compararmos os resultados obtidas das soldagens, evidenciamos que o tratamento mecânico por vibração simultânea ao processo de soldagem exerceu influência nas características dimensionais do cordão de solda. Todavia, o tratamento mecânico vibracional posterior a soldagem não promoveu alterações dimensionais aparentes.

4.5 Análise de Micrografia

Segundo a American Society of Materials (1995), as fases e morfologias resultantes em cada região, são resultados diretos das condições de resfriamento da junta. Onde, elevadas taxas de resfriamento conduzem à formação exclusiva de martensita, enquanto taxas menores conduzem a combinações de martensita com bainita, ferrita e perlita respectivamente.

A solução química utilizada para o ataque e revelação das microestruturas não ataca a ferrita, austenita e nem a cementita, apenas delinea os contornos e escurece a martensita, perlita, bainita e agregados eutetóides, revelando a microestrutura em fases claras, associadas a altos níveis de resistência, e escuras, como baixos níveis de resistência.

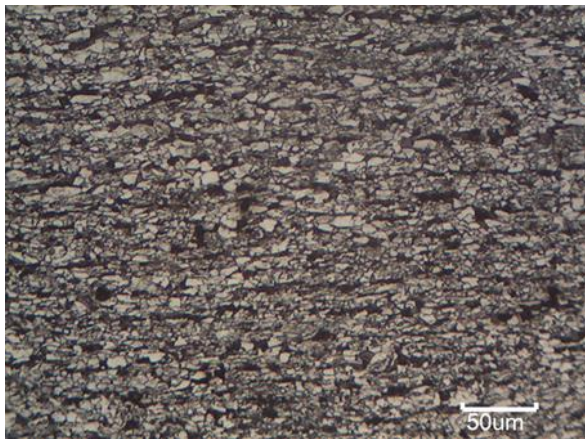
A figura 71 apresenta as micrografias, da região do metal de base, do aço USI-SAR-80T. Observamos, para as três condições de soldagem, que não houve alterações aparentes na

microestrutura do metal de base. Isto é, o material se apresenta idêntico à condição de fornecimento, apresentando uma microestrutura homogênea composta por ferrita e perlita levemente esferoidizada, martensita revenida e agregados eutetóides.

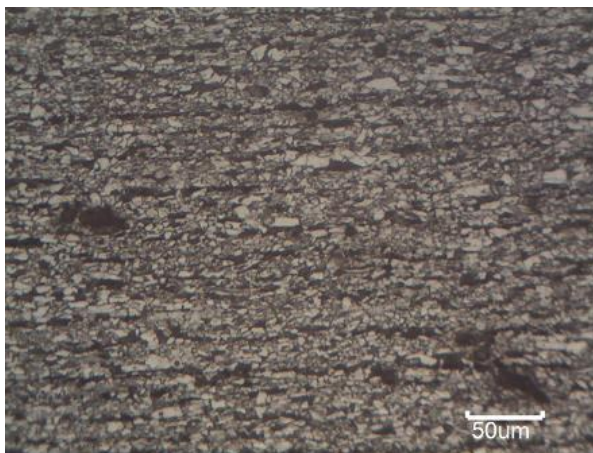
Figura 71: Micrografia - Metal de Base



a) Condição de soldagem – S1



b) Condição de soldagem – S2



c) Condição de soldagem – S3

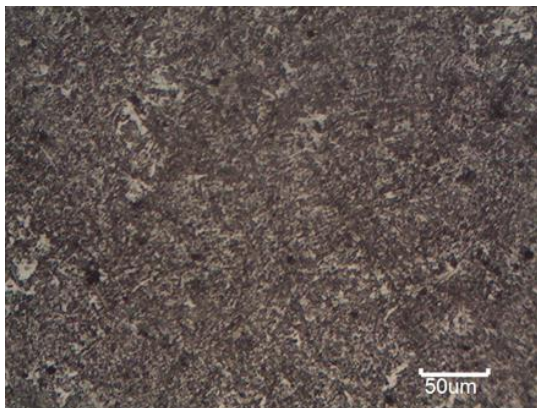
As figuras 72 e 73 apresentam as micrografias da ZTA e ZF, respectivamente, de todas as condições de soldagem propostas para este experimento.

Devido a um aporte térmico inferior às demais condições de soldagem e taxa de resfriamento elevada, observamos, na condição de soldagem S1 (figuras 72 A e 73 A), a presença de uma microestrutura heterogênea com predominância de martensita, perlita, bainita e agregados eutetóides (fases escuras) e concentrações pequenas de ferrita, autenita e cementita (fases claras).

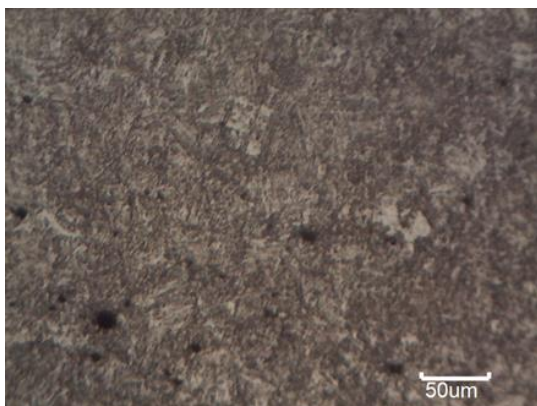
Para a condição de soldagem S2 (figuras 72 B e 73 B), devido ao aporte térmico superior às demais condições de soldagem e taxa de resfriamento menor, observamos a presença de uma microestrutura heterogênea com predominância martensita, perlita, bainita e agregados eutetóides (fases escuras), porém com concentrações mais significativas de ferrita, autenita e cementita (fases claras).

Na condição de soldagem S3 (figuras 72C e 73 C), devido ao aporte térmico ligeiramente superior ao da condição de soldagem S1 e, por intermédio do tratamento mecânico vibracional simultâneo a soldagem, uma taxa de resfriamento mais lenta, observamos uma alteração microestrutural mais intensa e com uma distribuição mais homogênea entre as fases escuras e claras.

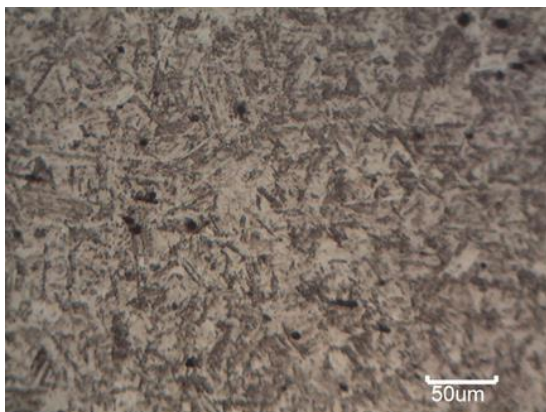
Figura 72: Micrografia – ZTA



a) Condição de soldagem – S1

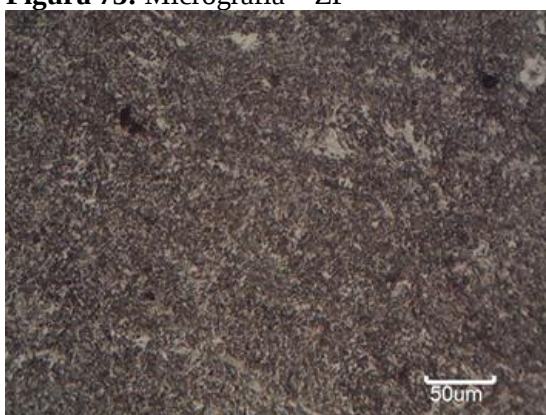


b) Condição de soldagem – S2

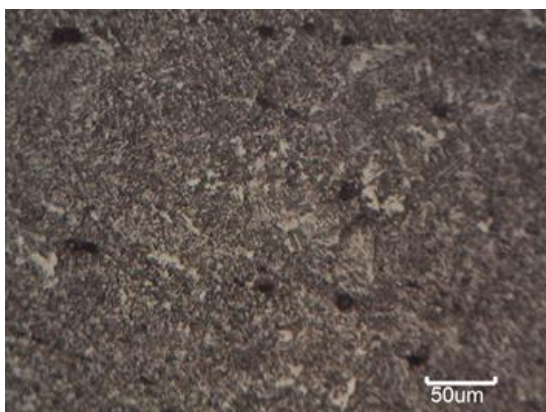


c) Condição de soldagem – S3

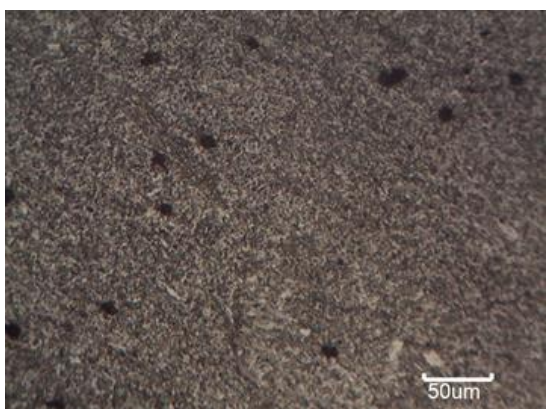
Figura 73: Micrografia – ZF



a. Condição de soldagem – S1



b. Condição de soldagem – S2



c. Condição de soldagem – S3

Como reflexo das microestruturas citadas acima e, de acordo com Weite (1999), o tratamento mecânico vibracional simultâneo ao processo de soldagem (Condição de soldagem S3), promove o alívio das tensões de acordo com a introdução das mesmas durante o processo de solidificação, reduzindo a taxa de resfriamento, promovendo melhorias metalúrgicas (refinamento de grãos e distribuição mais homogênea entre as fases claras e escuras) e, conseqüentemente, melhorias nas propriedades mecânicas da junta soldada. Diante do exposto, a condição de soldagem S3 irá apresentar níveis de resistência superiores às condições de soldagem S1 e S2.

4.6 Ensaio de tração

O ensaio de tração evidenciou que todas as três juntas soldadas, por norma, estariam reprovadas. Pois, apesar de todos os corpos de prova terem rompido no metal de base, estes obtiveram valores de tensão de ruptura inferiores ao valor mínimo de 800 MPa, conforme requerido na especificação do aço USI-SAR-80T. Todavia, como o objetivo deste experimento é analisar comparativamente os benefícios e influência dos tratamentos mecânicos por vibração nas propriedades mecânicas das juntas soldadas, esse fato não interfere na continuação deste estudo.

As figuras 74 a 76 apresentam as condições dos corpos de provas, antes e depois, do ensaio de tração e as tabelas de 11 a 13, as dimensões, secções, limites de rupturas obtidos e os locais de ruptura para cada condição de soldagem.

Figura 74: Ensaio de Tração - Condição de Soldagem S1



Tabela 12: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S1

Amostra	Dimensões (mm)	Secção (mm²)	LR (MPa)	Local da Ruptura
TP A1	12,19 x 20,29	247,34	587,6	Solda
TP A2	12,22 x 19,97	244,03	586,4	Solda

Figura 75: Ensaio de Tração - Condição de soldagem S2

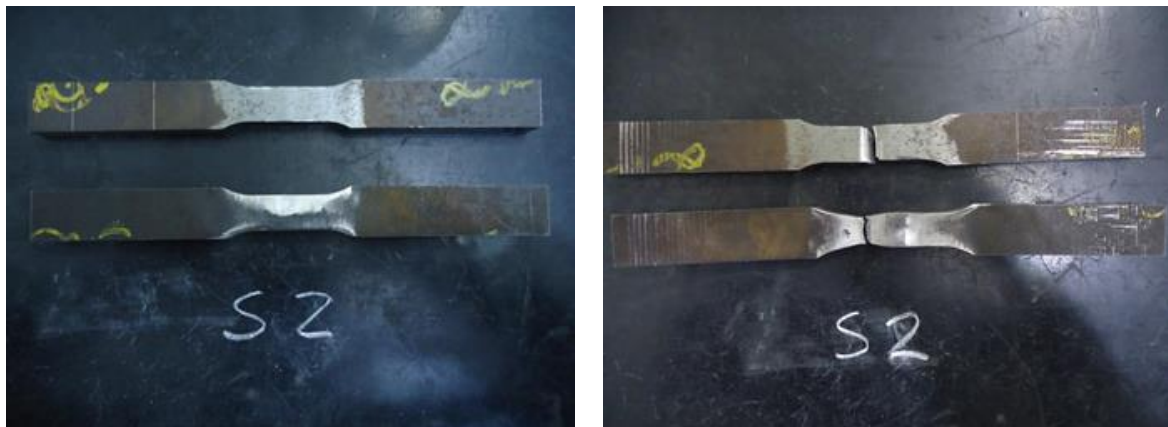


Tabela 13: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S2

Amostra	Dimensões (mm)	Secção (mm²)	LR (MPa)	Local da Ruptura
TP A1	12,75 x 19,72	251,43	584	Solda
TP A2	12,51 x 20,02	250,45	590	Solda

Figura 76: Ensaio de Tração - Condição de Soldagem S3

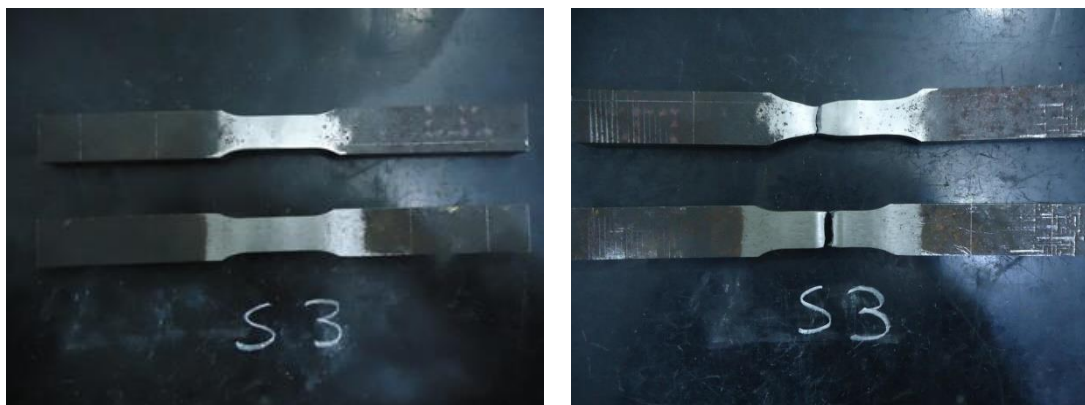


Tabela 14: Resultados do ensaio de tração - Condição de soldagem S3

Amostra	Dimensões (mm)	Secção (mm²)	LR (MPa)	Local da Ruptura
TP A1	12,45 x 19,96	247,34	649	Metal Base
TP A2	12,60 x 19,85	250,11	637	Solda

As condições de soldagem S1 e S3, soldagens com o auxílio vibracional, apresentaram resultados superiores à condição de soldagem S2, em média, de 0,5% e 10,5%, respectivamente. Evidenciando que os tratamentos mecânicos vibracionais exerceram influência nas propriedades mecânicas da junta soldada. Tendo, o processo vibracional simultâneo ao processo de soldagem, condição de soldagem S3, se mostrando o mais eficiente.

4.7 Ensaio de Impacto – Charpy

As figuras 77 a 79 apresentam as condições dos corpos de provas, antes e depois, do ensaio de impacto e as tabelas 18 e 19, as dimensões e secções das amostras utilizadas nos ensaios, os limites de rupturas encontrados e os locais de ruptura para cada condição de soldagem.

Tabela 15: Ensaio de impacto – Solda

Amostra	Dimensões (mm)	Entalhe	Temperatura	Energia Absorvida (J)		
				Condição de soldagem S1	Condição de soldagem S2	Condição de soldagem S3
1	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	Solda	20°C	62	56	74
2	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	Solda	20°C	58	60	79
3	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	Solda	20°C	60	58	77
			Média	60,00	58,00	76,67

Tabela 16: Ensaio de impacto – ZTA

Amostra	Dimensões (mm)	Entalhe	Temperatura	Energia Absorvida (J)		
				Condição de soldagem S1	Condição de soldagem S2	Condição de soldagem S3
1	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	ZTA	20°C	57	53	67
2	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	ZTA	20°C	54	54	71
3	10,00 x 10,00 x 55,00 KCV	ZTA	20°C	51	51	64
			Média	54,00	52,67	67,33

Figura 77: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S1



Figura 78: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S2

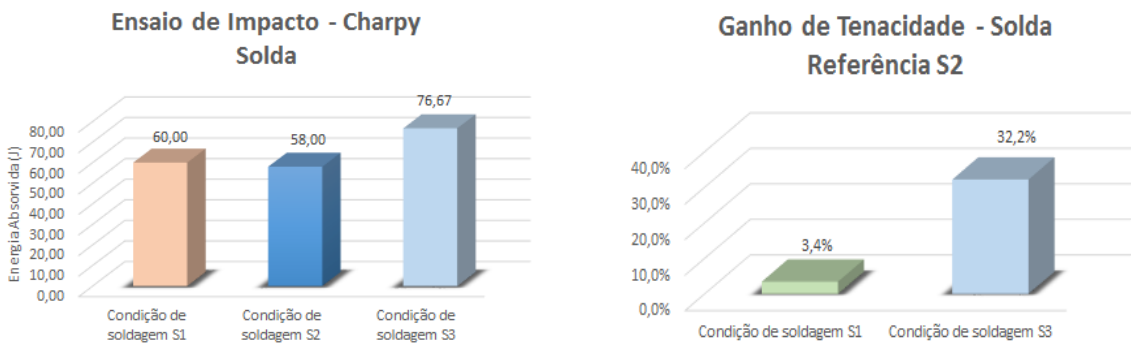


Figura 79: Ensaio de Impacto - Condição de soldagem S3



Conforme figura 80, na região da solda, tomando como referência o valor de 58,00 J, correspondente ao valor médio de energia absorvida pela condição de soldagem S2, observamos o aumento de 3,4% de energia absorvida na condição de soldagem S1 e 32,2% na condição de soldagem S3.

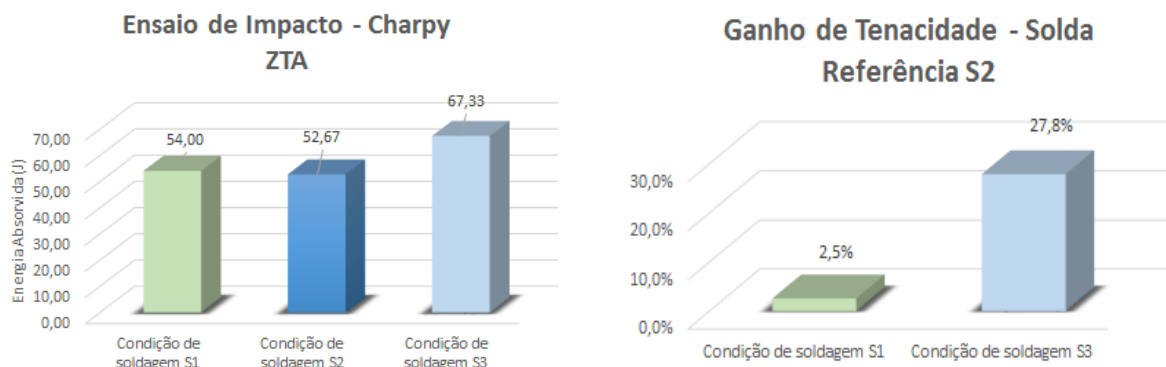
Figura 80: Ensaio de impacto – Solda



Conforme figura 81, na região da ZTA, tomando como referência o valor de 52,67 J, correspondente ao valor médio de energia absorvida pela condição de soldagem S2,

observamos o aumento de 2,5% de energia absorvida na condição de soldagem S1 e 27,8% na condição de soldagem S3.

Figura 81: Ensaio de impacto – ZTA



Nos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao impacto e demonstrados nas tabelas e gráficos acima, observamos que, para todas as condições de soldagem, as amostras com entalhe na ZF absorveram, em média, 11,7% mais energia que as amostras com entalhe na ZTA. E, podemos concluir que os tratamentos mecânicos de alívio de tensão por vibração exerceram influência nas propriedades mecânicas das juntas soldadas, com destaque para a condição de soldagem S3, com o auxílio da vibração simultânea à soldagem, onde, em média, as amostras absorveram 26,3% e 30,1% mais energia que as condições de soldagem S1 e S2, respectivamente.

4.8 Ensaio de dobramento

Para cada condição de soldagem, foram preparadas quatro amostras, totalizando doze amostras para o ensaio de dobramento. Após o ensaio, deste total de amostras, apenas três apresentaram descontinuidades dentro dos parâmetros permitidos dentro do critério de aceitação da norma para o ensaio, conseqüentemente, para um processo de qualificação de soldas, todas as juntas soldadas estão reprovadas. A fragilização das juntas perante ao ensaio de dobramento, conforme evidenciado, foi devido ao fato de todas as juntas apresentarem falta de penetração na raiz (Descontinuidade concentradora de tensão).

Figura 82: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S1



Tabela 17: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S1

Amostra	Dimensões (mm)	Resultado
DL 01	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 02	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 03	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 04	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda

Na condição de soldagem S1 (Figura 82 e tabela 17), observamos que todos os corpos de prova sofreram o rompimento na região da solda. A presença de falta de penetração na raiz da solda em dimensões superiores às demais condições de soldagem e um cordão de solda com largura e penetração inferior (resultado da soldagem com corrente elétrica baixa e tensão de soldagem alta) às demais condições de soldagem, são os responsáveis pela resistência apresentada pela junta soldada.

Figura 83: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S2



Tabela 18: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S2

Amostra	Dimensões (mm)	Resultado
DL 01	12,70 x 10,0 x 290	Abertura de 2,67 mm
DL 02	12,70 x 10,0 x 290	Abertura de 2,88 mm
DL 03	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 04	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda

Na condição de soldagem S2 (Figura 83 e tabela 18), onde também foi evidenciado falta de penetração na raiz da solda, observamos que duas amostras apresentaram descontinuidades de 2,67 mm e 2,88 mm, respectivamente, sem rompimento do cordão de solda e dentro do intervalo permitido pelo critério de aceitação da norma. A descontinuidade e o cordão de solda, com largura e penetração superior às juntas das demais condições de soldagem (Resultado da soldagem com corrente elétrica alta e tensão de soldagem intermediária), são os responsáveis pela resistência apresentada pela junta soldada.

Figura 84: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S3

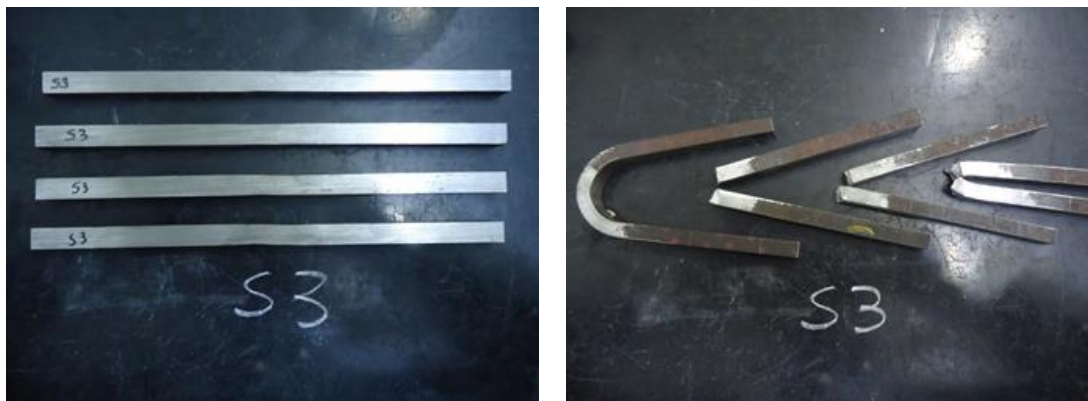


Tabela 19: Ensaio de dobramento - Condição de soldagem S3

Amostra	Dimensões (mm)	Resultado
DL 01	12,70 x 10,0 x 290	Abertura de 1,53 mm
DL 02	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 03	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda
DL 04	12,70 x 10,0 x 290	Rompimento na solda

Na condição de soldagem S3 (Figura 84 e tabela 19), onde também foi evidenciado falta de penetração na raiz da solda, observamos que uma amostra apresentou descontinuidade de 1,53 mm, sem rompimento e dentro do intervalo permitido pelo critério de aceitação da norma. A descontinuidade e o cordão de solda, com largura e penetração intermediária às juntas das demais condições de soldagem (Resultado da soldagem com corrente elétrica e tensão de soldagem intermediária), são os responsáveis pela resistência apresentada pela junta soldada.

O ensaio de dobramento, diante da reprovação das juntas e de sua simplicidade, não nos permitiu obter conclusões significativas a respeito da influência dos tratamentos vibracionais nas propriedades mecânicas das juntas soldadas. Uma vez que ocorreram variações nos parâmetros de soldagem e, conseqüentemente, nas variáveis dimensionais do cordão de solda, os resultados não nos permite, através de comparação, concluir se os mesmos são frutos da variação dos parâmetros ou por influência dos tratamentos vibracionais.

4.9 Ensaio de dureza Vickers

Visando a verificação de possíveis alterações de dureza entre o material de base, ZTA e material de solda, foi realizada 20 medições de endentação, permitindo a obtenção de um perfil de dureza ao longo de toda a seção transversal da junta soldada para cada condição de soldagem deste experimento.

As tabelas 23 a 25, mostram os perfis, de cada condição de soldagem, encontrados após o ensaio de dureza.

Tabela 20: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S1

MB	ZAC			MS			ZAC			MB
190	235	239	264	220	226	219	265	239	213	192
192	223	234	274	224			268	235	221	191

Tabela 21: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S2

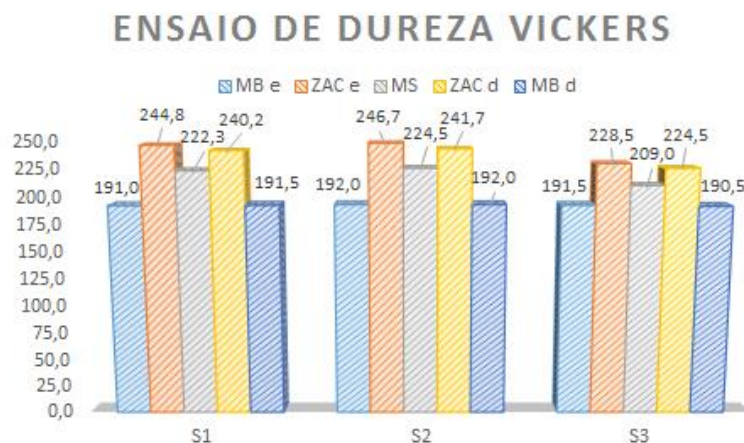
MB	ZAC			MS			ZAC			MB
191	236	242	266	221	229	222	268	242	211	192
193	225	235	276	226			271	239	219	193

Tabela 22: Ensaio de dureza - Condição de soldagem S3

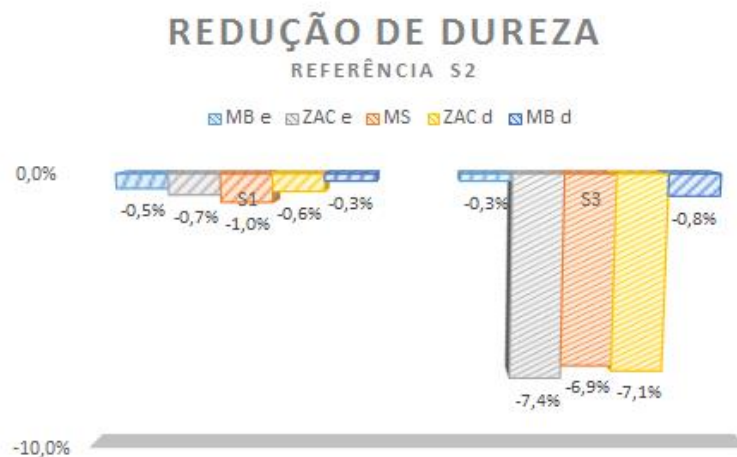
MB	ZAC			MS			ZAC			MB
192	219	223	245	206	213	208	247	224	196	190
191	213	217	254	209			251	221	208	191

A comparação das condições de soldagem S1 e S3 com a condição de soldagem S2, nos permite concluir que os tratamentos mecânicos de alívio de tensão por vibração exerceram influência nas propriedades mecânicas das juntas soldadas. Conforme figuras 85a e 85b, os resultados obtidos nos ensaios de dureza Vickers, observamos reduções, em valores médios e desconsiderando as variações observadas nos materiais de base, de 0,8% e 7,1%, respectivamente, para cada área da junta soldada das condições de soldagem S1 e S3, em comparação com a condição de soldagem S2.

Figura 85:Ensaio de dureza - Média por área



a) Média dos valores obtidos por área



b) Redução média de dureza por área

5. CONCLUSÕES

Em relação aos resultados obtidos a partir da realização destes ensaios experimentais, que teve como objetivo principal a análise comparativa entre as condições de soldagem com o auxílio dos tratamentos mecânicos vibracionais e o processo de soldagem convencional, temos:

1. Em virtude de um ajuste automático de parâmetros de soldagem, realizado pelo equipamento, as soldas das condições S1 e S3 foram executadas com um aporte térmico inferior 7,8% e 8,3%, respectivamente, quando comparado com a condição S2. Todavia, mesmo com geometrias inferiores à condição S2, observamos ganhos significativos nas propriedades mecânicas, das amostras soldadas com o auxílio dos processos mecânicos vibracionais, que se aproximam e, ou, superam os resultados obtidos na condição S2.

2. A junta soldada na condição S3 que apesar de ter sido executada com um aporte térmico 8,3% inferior à condição S2, resultado do decréscimo da tensão de soldagem em 3,2% e corrente elétrica em 4,7%, apresentou uma geometria do cordão próxima à condição de comparação e, diferentemente das demais, não apresentou falta de penetração ao longo do cordão. Logo, o tratamento mecânico vibracional, quando aplicado simultaneamente ao processo de soldagem exerce influência na geometria do cordão de solda e na eliminação de descontinuidades. Tais efeitos, não são observados na amostra, onde o tratamento mecânico vibracional foi aplicado após a soldagem.

3. Ambos tratamentos mecânicos vibracionais promoveram a redução de deformações térmicas nas juntas soldadas. Com redução da amplitude de deformações de 49,7% para o tratamento posterior a soldagem e de 59,4% para o tratamento simultâneo ao processo de soldagem.

4. O tratamento mecânico, na condição S3, atuou durante a solidificação, do material fundido, reduzindo a taxa de resfriamento, promovendo melhorias metalúrgicas (Refinamento e distribuição homogênea entre as fases claras e escuras) e melhorias significativas nas propriedades mecânicas da junta soldada. Enquanto, na condição S1, por ter sido executado após o término da soldagem, não gerou alterações metalúrgicas na junta, porém apresentou melhorias pequenas em suas propriedades mecânicas.

5. Em função da falta de penetração na raiz da solda, existente em todas as amostras, o ensaio de dobramento não nos permitiu realizar nenhuma análise comparativa entre as condições de soldagem.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Estudo comparativo entre soldas realizados com o auxílio da pulsação térmica e soldas com o auxílio do tratamento mecânico por vibração simultâneo a solda;
2. Estudo do comportamento à fadiga de juntas soldadas com o auxílio do processo vibracional;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, A. Y. AL-QUENAEI., Fusion Welding Techniques, **Journal of Engineering Research and applications**, Vol. 6, 78-83p, March 2016.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS - ASM, **Weld Integrity and Performance**, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF MATERIALS - HANDBOOK: Volume 6 – **Welding, Brazing and Soldering**, 1995.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS A 3.0:2001, **Standard Welding Terms and Definitions**, 2001.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS B 3.0:1977, **Welding Procedure and Performance Qualification**, 1977.

AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, **Welding Handbook – Fundamental of Welding**, vol. 1, 7a ed., 373 p., 1994.

AMERICAN WELDING SOCIETY – AWS, **Welding Handbook**, Vol. 2, Caps. 4 e 5, 2004.

ANAZAWA, R. M. **Caracterização mecânica e microestrutural de um aço 300M com microestrutura multifásica**. 2007, 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Câmpus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

ARAÚJO, M. R. V. **Caracterização Microestrutural do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso em Chapas de Aço-Carbono Estrutural**. Ilha Solteira, 2006. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

BARCARENSE, Q.A.; **Gas Metal Arc Welding**, 2003.

BONAL TECHNOLOGIES INC., Disponível em <http://www.bonal.com> - Acesso em dezembro de 2014.

BRAGA, E. M. **A vibração como elemento de Alívio de tensões Residuais em cordões de solda.** In: 1º WORKSHOP DE VIBRAÇÃO E ACUSTICA DA REGIÃO NORTE, 2011 – Belém/PA – Brasil. Universidade Federal do Pará - Grupo de Caracterização de Materiais - GCAM, ITEC.

CAMPOS, P. T., **Caracterização Mecânica e Microestrutural de Juntas Soldadas pelos Processos MIG/MAG (GMAW) e Arame Tubular (FCAW),** Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, PR. 2005.

CARVALHO, A. L. M.,**Efeitos das tensões residuais na fratura e resistência a fadiga da liga de alumínio 7050-T7451. 230p.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, SP. 2004.

COLPAERT, H.;**Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns,;** Revisão técnica: Silva, A. L. V. C. S., 4Ed.; São Paulo/SP; editora Blucher, 2008.

CRISI, G. S; MENDONÇA, D. P. **Stress relief of welds by heat treatment an vibration: A comparison between the two methods,** 2006.

DALLAN, C. B.; DAMKROGER, B. K. Characterization of welds. In: DAVIS, J.R. et al.(Ed.).**ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering.** Metals Park; American Society for Metals, 1993.p.202-209.

DAMS, M. C.; BERRY, J. T.; KLAUBA, B. B. **Productive Applications of Mechanical Vibrations,** Published by American Society of Material, 2005.

FBTS, **Curso de Inspetor de Soldagem,** Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, 2000.

GOURD, L. M., **Principles of Welding technology.** First published 1980, London, Edward Arnold (Publishers) Ltd.

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), Vol.2, Issue.4, July-Aug 2012 pp-2766-2770.

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

HIRAI, S., AOKI, S., **Reduction of residual stress by ultrasonic surface vibration**. Published in the Japanese Society of Mechanical Engineers, 1995.

IBRAHIM, I. A., MOHAMAT, S. A., AMIR, A., GHALIB, A., **The effect of gas metal arc welding (GMAW) process on different welding parameters**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROBOTICS AND INTELLIGENT SENSORS, 2012.

JIJIN XU, LIGONG CHEN, CHUNZHEN NI, **Effect of vibratory weld conditioning on the residual stresses and distortion in multipass girth-butt welded pipes**, Institute of Welding, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Received 6 July 2006; received in revised form 7 November 2006; accepted 7 November 2006.

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, Volume 165, 2010, Pages 73-78.

KESKITALO, M., SUNDQVIST, J., MANTYJARVI, K., POWELL, J., KAPLAN, A.F.H., **The influence of shielding gas and heat input on the mechanical properties of laser welds in ferritic stainless steel**. In: XV NORDIC LASER MATERIALS PROCESSING CONFERENCE, XV, august 2015, Tampere/Finland.

KOU, S.; **Welding Metallurgy**. Segunda edição. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 466 p.

LIMA, E.J et al, **Determinação da relação entre parâmetros de soldagem, largura da poça e aspectos do cordão de solda utilizando câmera de alta velocidade**, Belo Horizonte, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q., **SOLDAGEM - Fundamentos e tecnologia**. 3ª Edição Atualizada, 2009.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B.; **Introdução a Metalurgia da Soldagem**, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, jan. 2012.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., SANTOS, D. B.; **Introdução aos processos de Soldagem**, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, novembro. 2000.

MODENESI, P. J., Soldagem I – **Descontinuidades e Inspeção em juntas Soldadas**, Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Belo Horizonte, p. 9-10, nov. 2001.

MODENESI, P. J.; **Introdução à física do arco elétrico**, UFMG, Belo Horizonte, janeiro 2005.

MORDFIN. L.: **“Mechanical Relaxation of Residual Stress”** – Editor: STP 993, 1988.

PAULI, E. A., ULIANA, F. S.; **Noções básicas de processos de soldagem e corte – Mecânica**, SENAI/ES, 1996.

PETROBRÁS, **Norma técnica de Ensaio Não Destrutivo - Líquido Penetrante – N-1596**, 1996.

PETROBRÁS, **Soldagem – Descontinuidades em juntas soldadas, fundidos, forjados e laminados – N-1738**, 2003.

PETROBRÁS, **Soldagem - Terminologia – N-1438**, 2003.

PETROBRÁS, **Soldagem - Procedimento – N-133**, 2002.

QINGHUA XU, LIGONG CHEN, CHUNZHEN NI, **Effect of vibratory weld conditioning on welded valve properties**, Institute of welding, School of materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China. Received 29 October 2006.

QUITES, A. M.; **Introdução à soldagem a Arco voltaico**, soldasoft – Florianópolis, 2002.

RODRIGUES, E. R., **Influência de parâmetros do processo FCAW–G nas características da solda do Aço ASTM A-36**, 2009, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 96p.

SALLMAN, R. E., BISHOP, R. J., **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering**, Sixth Edition, Paperback – December 22, 1999.

SANTOS NETO, Norival Ferreira dos. Dissertação de Mestrado, **Caracterização de soldas em aços API 5L com diferentes arames tubulares e temperaturas de preaquecimento**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 87 p.

SCOTTI, Américo; PONOMAREV, Vladimir. **Soldagem MIG/MAG melhor entendimento, melhor desempenho**. Artliber Editora, São Paulo, 2008.

SHANKAR, S.; **Vibratiory Stress Relief of Mild Steel Weldments**, A dissertation sumited to the faculty of Oregon Graduate Center in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy; Janeiro, 1982.

SILVA, M. C.; **Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80**, Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia; Dezembro, 2009.

SODERSTROM, E. J., MENDEZ, P. F.; **Metal transfer during GMAW with thin electrode and AR-CO2 shielding gas mixtures**, Vol. 87. Miami: Welding Journal Dept, 2008.

VSR TECHNOLOGIES GROUP, Disponível em <http://www.vsrtechnology.net> - Acesso em fevereiro de 2016.

WAINER, Emilio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. 6º Reimpressão 2008. Editora Blucher, São Paulo SP, 1992.

WEITE WU, **Influence Of Vibration Frequency On Solidification Of Weldments**, Department of Materials Science and Engineering, I-Shou University, 1, Section 1, Hsueh-

Cheng Rd., Ta-Hsu Hsiang, Kaohsiung County 84008, Taiwan, Republic of China, Scripta mater. 42 (2000) 661–665 - 1999.

ZEEMANN, A., EMYGDIO, P.R.O., **Básico de soldagem**. Apostila do cursode materiais da TECMETAL, Taubaté, 2001.

ZEEMANN, A., EMYGDIO, P.R.O., **Princípios de metalurgia física e metalurgia mecânica**. Apostila do curso de materiais da TECMETAL, Taubaté, 2001.