



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JAIME MATIAS DA SILVA NETO

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO MECÂNICA SOBRE O
REFINO DE GRÃOS EM METAIS DE SOLDA DE JUNTAS DO AÇO ASTM
A516 GR.60**

CAMPINA GRANDE

2018

JAIIME MATIAS DA SILVA NETO

**INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO MECÂNICA SOBRE O
REFINO DE GRÃOS EM METAIS DE SOLDA DE JUNTAS DO AÇO ASTM
A516 GR.60**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica em nível de mestrado como requisito parcial para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Linha de pesquisa: Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos

Orientador: Dr. Theophilo Moura Maciel

Coorientador: Dr. Antonio Almeida Silva

CAMPINA GRANDE – PB

27/02/2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586i Silva Neto, Jaime Matias da.
Influência da frequência de vibração mecânica sobre o refino de grãos em metais de solda de juntas do aço ASTM A516 Gr.60 / Jaime Matias da Silva Neto. – Campina Grande, 2018.
95 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Theophilo Moura Maciel, Prof. Dr. Antonio Almeida Silva".

Referências.

1. Metal de Solda. 2. Refino de Grãos. 3. Vibração Mecânica. 4. Aço Ferrítico. I. Maciel, Theophilo Moura. II. Silva, Antonio Almeida. III. Título.

CDU 621.791.05(043)

JAIME MATIAS DA SILVA NETO

INFLUÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE VIBRAÇÃO MECÂNICA SOBRE O REFINO
DE GRÃOS EM METAIS DE SOLDA DE JUNTAS DO AÇO ASTM A516 Gr. 60

JAIME MATIAS DA SILVA NETO

Dissertação Aprovada em 27/02/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Theophilo Moura Maciel

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Antonio Almeida Silva

Co-Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marco Antonio dos Santos

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marcos Mesquita da Silva

Examinador Externo

IFPB – Campina Grande-PB.

DEDICATÓRIA

À Nedy Cordeiro de França, José Matias da Silva, Ricardo Cordeiro da Silva, Rosiani Cordeiro da Silva e Karla Cristina Barros de Almeida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, pelo poder de iluminar a humanidade com sua infinita sabedoria e bondade, que trouxe e dá sentido à vida de todos nós.

Aos meus pais, José Matias e Necy Cordeiro, que estiveram sempre ao meu lado, nos momentos bons e ruins, me ensinando os valores da vida e os melhores caminhos a seguir.

Aos meus irmãos, Ricardo Cordeiro e Rosiani Cordeiro, pois sempre estiveram ao meu lado, dando força e carinho.

A minha Noiva, Karla Cristina, minha parceira, dando força, conselhos e carinho nessa caminhada.

Aos meus orientadores, Theophilo Moura e Antonio Almeida, pelo conhecimento, apoio e dedicação que me foi passado ao longo desses dois anos de mestrado.

Aos técnicos de laboratório, Fernando, Mário e Anchieta, pela disponibilidade e esforço para a realização desse trabalho.

Aos amigos de laboratório, Epitácio, Raimundo e Rômulo, pela transmissão de seus conhecimentos, apoio e disponibilidade em prol da conclusão do projeto de mestrado.

A CAPES/CNPQ pelo apoio financeiro.

A UFCG pela oportunidade de realizar esse mestrado em tempos tão difíceis, utilizando seus recursos físicos e humanos.

Enfim, outras pessoas que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a conclusão desse mestrado.

SILVA NETO, J.M. Influência da Frequência de Vibração Mecânica sobre o Refino de Grãos em Metais de Solda de Juntas do Aço ASTM A516 Gr.60. 2018, 95 f. (**Mestrado em Engenharia Mecânica**), Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Campina Grande, 2018.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da aplicação de vibração mecânica durante o processo da soldagem sobre o refino de grãos em metais de solda obtidos na soldagem do aço ASTM A516 Gr.60, aplicado em caldeiras e vasos de pressão. Para o tratamento de vibração mecânica foi utilizado o processo VWC (Condicionamento de Soldagem Vibratória), e para a soldagem foram empregados dois tipos de processos: SMAW (Arco Elétrico com Eletrodo Revestido) e GMAW (Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa). Os consumíveis utilizados foram o arame AWS ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro protegido com CO₂ no processo GMAW e o eletrodo AWS E7018 com 2,25 mm de diâmetro no processo SMAW. Foi projetada e desenvolvida uma bancada vibratória para realização dos experimentos. As juntas foram executadas sem e com vibração, submetidas a amplitudes que variaram de 7,2 a 51,2 m/s² e frequências de 205 a 220 Hz. A vibração promoveu uma melhor distribuição da microestrutura no metal de solda, promovendo um refino de até 113% para uma amplitude de 51,2 m/s² e frequência de 220 Hz no processo GMAW, em relação a condição sem vibração. Já no processo SMAW a redução chegou a 25% com amplitude de 7,2 m/s² e frequência de 205 Hz. As reduções nos desvios padrões médios de dureza chegaram a 71% para uma amplitude de 48,9 m/s² e frequência de 215 Hz, no processo GMAW. Enquanto que no processo SMAW, o desvio padrão médio de microdureza reduziu 27%, com amplitude 7,2 m/s² e frequência de 205 Hz, em relação a condição sem vibração.

Palavras-chave: Metal de solda; Refino de grãos; Vibração mecânica; Aço ferrítico.

SILVA NETO, J.M. Influence of Mechanical Vibration Frequency on Weld Metals Grain Refining of ASTM A516 Gr.60 Welded Joint. 2018, 95 f. (**Master degree in Mechanical Engineering**), Federal University of Campina Grande. Graduate Program in Mechanical Engineering. Campina Grande, 2018.

ABSTRACT

The present work had the objective of evaluating the influence of mechanical vibration during the welding process on grain refining in brazing metals obtained in the welding of steel ASTM A516 Gr.60, applied in boilers and pressure vessels. For the mechanical vibration treatment VWC (Vibration Welding Conditioning) process was used.. , The welds were done using the SMAW (Electric Arc with Coated Electrode) and GMAW (Electric Arc Welding with Gaseous Protection) process. AWS ER 70S-6 wire with 1.2 mm of diameter protected with CO₂ in the GMAW process and the electrode E7018 with 2.25 mm of diameter in the process SMAW were used as consumable. A vibratory bed was designed and developed to perform the experiments. The joints were performed without and with vibration, subjected to amplitudes ranging from 7.2 to 51.2 m/s² and frequencies from 205 to 220 Hz. The vibration promoted a better distribution of the microstructure in the weld metal, promoting a refining of up to 113% for an amplitude of 51.2 m/s² and a frequency of 220 Hz in the GMAW process, in relation to the condition without vibration. In the SMAW process the reduction reached 25% with amplitude 7.2 m/s² and frequency of 205 Hz. The reductions in the average hardness standard deviations reached 71% for a range of 48.9 m/s² and a frequency of 215 Hz, in the GMAW process. Using the SMAW process, the mean standard deviation of microhardness value decreased by 27%, with amplitude 7.2 m/s² and a frequency of 205 Hz, in relation to the condition without vibration.

Keywords : Weld metals; Grain refining; Mechanical vibration; Ferritic steel

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vasos de Pressão	17
Figura 2 – Ponte de Tacoma nos EUA: estrutura entrou em colapso, devido suas frequências naturais serem iguais à frequência de excitação do ambiente, provocando a ressonância.	20
Figura 3 – Desenho esquemático da amplitude	21
Figura 4 – Evolução do processo de soldagem ao longo dos anos.....	22
Figura 5 – Representação esquemática da soldagem GMAW.....	23
Figura 6 – Equipamento para soldagem pelo processo GMAW	24
Figura 7 – Representação esquemática da soldagem SMAW	26
Figura 8 – Equipamento para soldagem pelo processo SMAW	26
Figura 9 – Desenho esquemático das regiões de uma junta soldada	29
Figura 10 – Regiões da zona fundida (esquemático): (A) região misturada, (B) região não misturada e (C) região de fusão parcial.	30
Figura 11 – Representação esquemática de constituintes microestruturais:.....	32
Figura 12 – Crescimento epitaxial próximo à linha de fusão, seguido do crescimento competitivo	33
Figura 13 – Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZTA.....	34
Figura 14 – Sistema eletromagnético de oscilação fixado ao trator.	36
Figura 15 – Lança utilizada em equipamentos de mineração foi amplamente reparada usando o condicionamento de solda Meta-Lax para melhorar a vida em fadiga.....	41
Figura 16 – Aplicação do processo VWC nos dentes da concha de Escavadeira	41
Figura 17 – Fluxograma resumido do projeto	45
Figura 18 – Bancada Vibratória.....	46
Figura 19 – Plano de corte da chapa ilustrando as dimensões das amostras da bancada vibratória.....	47
Figura 20 – Chapa da junta soldada na bancada.....	48
Figura 21 – Chanfro em V simples.....	48
Figura 22 – Soldagem das chapas pelo processo GMAW.....	50
Figura 23 - Ilustração das dimensões da amostra e do cordão de solda	51
Figura 24 – Máquina de solda GMAW	52
Figura 25 – Máquina de solda SMAW.....	52

Figura 26 – Analisador de sinal dinâmico (Agilent)	53
Figura 27 – Coletor analisador de sinal (Vibtron).....	54
Figura 28 – Excitador pneumático (BVI Brunialti).....	55
Figura 29 – Martelo de impacto	55
Figura 30 – Bancada e instrumentação de coleta dos espectros de frequência na junta, com aparelho analisador de campo (Vibtron).....	56
Figura 31 – Microscópio OLYMPUS BX 51M	58
Figura 32 – Localização de contagem dos grãos, no centro do metal de solda.....	58
Figura 33 – Malha 10X10 sob metalografia para contagem de grãos	59
Figura 34 – Esquema ilustrativo das linhas de medição de microdureza	60
Figura 35 – Microdurômetro FM700.....	60
Figura 36 – Fluxograma do projeto de dissertação.....	61
Figura 37 – Espectro da Função Resposta em Frequência (FRF) da bancada vibratória	64
Figura 38 – Espectro de vibração FFT em Aceleração (A) versus Frequência (F) da bancada vibratória, obtido para as pressões de tratamento: a) 2 bar; b) 3 bar; c) 4 bar e d) 5 bar.....	65
Figura 39 – Microestrutura do Aço ASTM A516 Gr.60: Aumento 100X e Nital 2% ...	67
Figura 40 – Microestrutura da amostra sem vibração (C1): Aumento 100X com nital 2%	67
Figura 41 – Microestrutura da amostra com 205 Hz (C2): Aumento 100X com nital 2%	68
Figura 42 – Microestrutura da amostra com frequência de 210 Hz (C3): Aumento 100X com nital 2%.....	68
Figura 43 – Microestrutura da amostra sem vibração (C4): Aumento 100X com nital 2%	69
Figura 44 – Microestrutura da amostra com 205 Hz (C5): Aumento 100X com nital 2%	70
Figura 45 – Microestrutura da amostra com frequência de 210 Hz (C6): Aumento 100X com nital 2%.....	70
Figura 46 – Microestrutura com frequência de 215 Hz (C7): Aumento 100X com nital 2%.....	71
Figura 47 – Microestrutura da amostra com frequência de 220 Hz (C8): Aumento 100X com nital 2%.....	72
Figura 48 – Quantidade de grãos versus frequência de vibração	72

Figura 49 – Quantidade de grãos versus condição de soldagem	73
Figura 50 – Perfil de microdureza média para C1	74
Figura 51 – Perfil de microdureza para a C2.....	75
Figura 52 – Perfil de microdureza para a C3.....	75
Figura 53 – Perfil de microdureza média para cada condição de soldagem SMAW	76
Figura 54 – Perfil de microdureza média para C4.....	77
Figura 55 – Perfil de microdureza para C5.....	78
Figura 56 – Perfil de microdureza média para a C6	78
Figura 57 – Perfil de microdureza média para a C7	79
Figura 58 – Perfil de microdureza média para a C8	80
Figura 59 – Perfil de microdureza média para cada condição de soldagem GMAW.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tendência da distribuição dos elementos de liga nos aços resfriados lentamente.....	19
Quadro 2 – Grau de soldabilidade	28
Quadro 3 - Constituintes da zona fundida de aços ferríticos observados ao microscópio ótico	31
Quadro 4 – Parâmetros e condições de soldagem	49
Quadro 5 – Parâmetros de soldagem SMAW	50
Quadro 6 – Parâmetros de soldagem GMAW	50
Quadro 7 – Composição química nominal e propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr 60.....	51
Quadro 8 – Composição química e propriedades mecânicas nominais do metal de adição correspondente ao eletrodo AWS E7018)	53
Quadro 9 – Composição química e propriedades mecânicas nominais do metal de adição correspondente ao arame AWS ER70S-6.....	53
Quadro 10 – Valores de pressão, frequência e aceleração para cada condição de soldagem	66
Quadro 11 - Valores de todos os resultados obtidos para cada variável.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	–	Ferrita Acicular
ASM	–	<i>American Society for Metals</i>
ASTM	–	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	–	<i>American Welding Society</i>
C1	–	Condição de Soldagem 1
C2	–	Condição de Soldagem 2
C3	–	Condição de Soldagem 3
C4	–	Condição de Soldagem 4
C5	–	Condição de Soldagem 5
C6	–	Condição de Soldagem 6
C7	–	Condição de Soldagem 7
C8	–	Condição de Soldagem 8
CIMM	–	Centro de Informação Metal Mecânica
DBCP	–	Distância Bico de Contato Peça
FC	–	Agregado Ferrita Carboneto
FFT	–	<i>Fast Fourier Transform</i>
FRF	–	Função Resposta em Frequência
FS	–	Ferrita Secundária
FS (A)	–	Ferrita Secundária Alinhada
FS (N)	–	Ferrita Secundária Não - Alinhada
GMAW	–	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
Gr	–	Grau
HSLA	–	<i>High-Strength Low-Alloy</i>
IIW	–	<i>International Institute Welding</i>
LABSOL	–	Laboratório de Soldagem
LF	–	Linha de Fusão
MAG	–	<i>Metal Active Gas</i>
MB	–	Metal de base
MIG	–	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	–	Metal de Solda
PF	–	Ferrita Primária

PF (CG)	–	Ferrita Primária de Contorno de Grão
PF (I)	–	Ferrita Primária Intergranular
RMS	–	<i>Root Mean Square</i>
SMAW	–	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
UFCG	–	Universidade Federal de Campina Grande
VSR	–	<i>Vibratory Stress Relief</i>
VWC	–	<i>Vibratory Weld Conditioning</i>
ZTA	–	Zona Termicamente Afetada
ZF	–	Zona Fundida

LISTA DE SIMBOLOS

A	–	Ampere
Ar	–	Argônio
C	–	Carbono
CO ₂	–	Dióxido de Carbono
O ₂	–	Dióxido de Oxigênio
Gf	–	Grama-força
Hz	–	Hertz
Mn	–	Manganês
%	–	Percentual
Si	–	Silício
V	–	Tensão

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Contextualização do Problema.....	13
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivo.....	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
1.4 Organização da Dissertação	15
CAPÍTULO II.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Aço Carbono Estrutural.....	16
2.1.1 Aço ASTM A516 Gr. 60.....	18
2.2 Vibração	19
2.3 Processos de Soldagem	21
2.3.1 Processo GMAW	22
2.3.2 Processo SMAW	25
2.4 Soldabilidade.....	27
2.5 Regiões da Junta Soldada.....	29
2.5.1 Zona Fundida	30
2.5.2 Zona de Ligação.....	32
2.5.3 Zona Termicamente Afetada.....	33
2.6 Influência do Refino de Grão nas Propriedades Mecânicas no MS.....	34
2.7 Métodos de Refino de Grão na Soldagem.....	35

2.7.1	Inoculação.....	35
2.7.2	Oscilação do Arco	35
2.7.3	Pulsação do Arco	36
2.7.4	Nucleação Superficial Estimulada.....	37
2.7.5	Excitação Eletromagnética	37
2.7.6	Excitação Ultrassônica	37
2.7.7	Tratamento Térmico	38
2.7.8	Vibração Mecânica.....	39
2.8	VWC.....	40
CAPÍTULO III		45
3.	METODOLOGIA	45
3.1	Fase 1 – Definição do Problema	46
3.2	Fase 2 – Projeto da Bancada Vibratória	46
3.3	Fase 3 – Preparação do Metal de Base	47
3.4	Fase 4 – Soldagem com VWC	49
3.5	Fase 5 – Preparação de Amostras para Análises Metalográficas e Microdureza 57	
3.6	Fase 6 – Análise Metalográfica	57
3.7	Fase 7 – Ensaios Mecânicos.....	59
CAPÍTULO IV.....		64
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	64
4.1	Determinação da Frequência Natural Experimental da Bancada Vibratória	64
4.2	Determinação do Espectro de Frequências do Excitador Pneumático na Bancada Vibratória	65
4.3	Análise Microestrutural do Metal de Base	66
4.4	Microestruturas dos Metais de Solda obtidos pelo Processo SMAW	67

4.5	Microestruturas dos Metais de Solda pelo Processo GMAW	69
4.6	Contagem de Grãos	72
4.6.1	Contagem de Grãos para o Processo SMAW	72
4.6.2	Contagem de Grãos para o Processo GMAW	73
4.7	Microdureza do Processo SMAW	74
4.8	Microdureza do Processo GMAW	77
CAPÍTULO V		82
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	82
5.1	Conclusões.....	82
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	82
REFERÊNCIAS.....		83
APÊNDICE – Desenho Completo da Bancada Vibratória		95

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

A soldagem é o mais importante processo industrial de fabricação e união de peças metálicas, permitindo a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de processo e de materiais. Processos de soldagem são também utilizados na recuperação de peças desgastadas, através da aplicação de revestimentos de características especiais sobre superfícies metálicas e para corte (MODENESI et al, 2012).

Durante o processo de soldagem, uma elevada intensidade de calor é gerada na região da junta, provocando um severo ciclo térmico no cordão de solda, produzindo fenômenos metalúrgicos e mecânicos tais como, deformação plástica e transformação de fase e modificação na morfologia e no crescimento do grão (OKUMURA, 1982). O crescimento de grãos na região da solda devido o ciclo térmico prejudicam a integridade e o desempenho da junta soldada, reduzindo a sua tenacidade.

Para minimizar os efeitos do crescimento de grão, diversas técnicas têm sido utilizadas não só para garantir as propriedades pré-estabelecidas como melhorar as propriedades da junta soldada, principalmente quanto ao refino de grãos. Entre elas, podemos citar: inoculação, oscilação do arco, pulsação do arco, nucleação superficial estimulada, excitação eletromagnética, excitação ultrassônica, tratamento térmico e vibrações. A técnica mais tradicional, que é o tratamento térmico, consiste no aquecimento à uma temperatura constante por um tempo pré-determinado e um resfriamento controlado. Porém, sua utilização é contestada por motivos diversos, entre eles, podemos citar de forma resumida: tempo, custo, dimensões, alterações metalúrgicas, etc. (CHUVAS, 2012; MACIEL, 2014).

A indução vibratória vem surgindo como uma alternativa interessante em substituição ao tratamento térmico convencional. Essa tecnologia iniciou em torno do ano 1950, quando a Marinha dos Estados Unidos e a defesa alemã usaram vibrações harmônicas, também chamada de vibrações ressonantes para testar cascos metálicos em asas de avião (BONAL, 2008). No Brasil, esse estudo ainda é bastante carente. Seu funcionamento consiste em vibrar peças à uma faixa próxima a frequência natural da mesma por um determinado tempo (CHUVAS, 2012).

O Condicionamento por Soldagem Vibratória – VWC (*Vibratory Welding Condition*) é um tratamento vibracional que ocorre simultaneamente ao processo de soldagem. Mundialmente, essa técnica é amplamente utilizada desde a década de 50.

A intenção do presente trabalho é avaliar a influência da frequência e amplitude de vibração mecânica sobre o refino de grãos em metais de solda de juntas do aço ASTM A516 Gr.60.

1.2 Justificativa

Atualmente, a indução de vibração mecânica vem emergindo como alternativa ao tratamento térmico. No Brasil é algo recente e pouco explorado, mas com grande potencial no auxílio de soluções de problemas oriundos dos processos de soldagem e da utilização cíclica (MACIEL, 2014). Mesmo que seus resultados práticos tenham sido comprovados, sua credibilidade nos meios industrial e acadêmico ainda é questionada. Isto se deve ao fato de que as instituições normativas ainda não incluíram esta tecnologia, provavelmente devido à falta de comprovações científicas que embasem os resultados práticos atingidos (MARTINS et al, 2012).

Embora o estudo de tratamento por vibração mecânica tenha chamado a atenção de diversos pesquisadores nos últimos anos, dada a sua atuação direta nos principais problemas metalúrgicos relacionados à soldagem, pouco se sabe ainda sobre as características do tratamento por VWC (*Vibratory Welding Condition*) e suas vantagens enquanto processo e com relação aos demais processos de controle de refino de grão. (RODRIGUES, 2013).

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência da frequência e amplitude de vibração mecânica sobre o refino de grãos em metais de solda de juntas do aço ASTM A516 Gr.60, utilizando os processos SMAW e GMAW.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Projetar, montar e testar uma bancada vibratória para realização dos experimentos;

- Realizar a contagem de grãos para identificar a influência da vibração mecânica sobre o metal de solda;
- Analisar quais são as melhores amplitudes e frequências de vibração para se obter um melhor refino de grão;
- Analisar o perfil de microdureza obtido no metal de solda com a variação da amplitude e frequência de vibração;

1.4 Organização da Dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, assim distribuídos:

No Capítulo 1 é feita uma introdução sobre o trabalho a ser apresentado, a fim de fornecer uma noção geral sobre o tema em estudo, justificando o interesse pelo estudo/tema/linha de pesquisa, bem como os objetivos a serem alcançados pelo trabalho.

No Capítulo 2 é abordado o assunto de forma mais específica, conceituando sobre o aço a ser utilizado, os processos de soldagem, as regiões de uma junta soldada, os principais tratamentos utilizados para refino de grão, e finalizando, quais os melhores métodos de refino de grãos.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia aplicada, por meio de um fluxograma concebido, evidenciando como foi desenvolvido o trabalho, com suas respectivas fases, etapas, ferramentas de apoio e respostas.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da pesquisa tais como: frequência natural experimental da bancada, energia de soldagem, análise microestrutural, microdureza das amostras e contagem dos grãos. Também é discutida a eficiência do tratamento por vibração quando comparado ao sem vibração.

Finalizando, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos julgadas como importantes, baseando-se nos resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados ao longo deste trabalho.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Aço Carbono Estrutural

Atualmente existe mais de 3500 tipos diferentes de aços e cerca de 75% deles foram desenvolvidos nos últimos 20 anos. Isso mostra a grande evolução que o setor vem experimentando. Muitos são os tipos de aços e inúmeras formas de classificá-los: aços estruturais, aços fundidos, aços ferramentas, aços inoxidáveis, aços laminados a quente, aços microligados, aço baixo carbono, aços ao níquel, aços cromo-molibdênio, aço C-1020, aço A36, aço temperado e revenido. (CBCA, 2014).

Por aços estruturais entendem-se, basicamente, vergalhões para reforços de concreto, barras (normalmente em aplicações estáticas), bem como chapas e perfis para aplicações estruturais (COSTA, 2010).

Os principais requisitos para aços destinados às aplicações estruturais são:

- Tensão de escoamento elevada;
- Elevada tenacidade;
- Boa soldabilidade;
- Boa formabilidade;
- Custo mínimo.

Quanto à classificação, os aços estruturais podem ser classificados pela sua composição química, propriedades mecânicas e método de fabricação como: aços carbono, aços de alta resistência de baixa liga (*HSLA - High-Strength Low-Alloy*) e os tratados termicamente (AWS, 1994).

Os aços carbono estruturais vêm sendo bastante utilizados na fabricação de vasos de pressão, conforme apresentado na Fig.1, principalmente em indústrias petroquímica, automobilística, na construção civil e transportes.

Figura 1 – Vasos de Pressão



Fonte – (ALIBABA, 2017)

Aços esses que possuem teores de carbono até 0,30%. Alguns podem atingir teores de carbono mais elevados, mas em geral não ultrapassam 0,36% C. Eles podem ser produzidos a custo baixo e podem ser conformados gerando formas complexas. Têm boa soldabilidade e podem exibir um campo vasto de propriedades mecânicas. (CIMM, 2017). Devem obedecer a alguns requisitos fundamentais, tais como (CHIAVERINI, 2005):

- Ductilidade e homogeneidade;
- Valor elevado da relação entre limite de resistência e limite de escoamento;
- Soldabilidade;
- Suscetibilidade de corte por chama, sem endurecimento;
- Resistência razoável à corrosão.

Os aços carbonos estruturais incluem:

- Aços doces;
- Aços carbono-manganês laminados a quente;
- Aços carbono tratados termicamente.

Aços doces e aços carbono-manganês são disponíveis em várias formas comerciais: chapas, tiras, placas, formas estruturais, barras e seções especiais. Já os aços tratados termicamente são disponíveis como placas, barras e ocasionalmente como chapas e formas estruturais. (CIMM, 2017)

Os aços doces possuem um teor de carbono que varia entre 0,10 e 0,25%, o de manganês entre 0,25 e 1,5%, o teor de fósforo máximo é de 0,04% e o de enxofre é de

0,05% (hoje, na prática, os teores de P e S dificilmente chegam próximo destes limites), pois acima desses limites podem provocar defeitos a quente e a frio respectivamente. Estes são os aços mais comumente usados em fabricação e construção. São materiais facilmente soldáveis por qualquer processo a arco, gás ou resistência (Modenesi et al, 2011). Os aços doces possuem, normalmente, baixa resistência e dureza e alta tenacidade e ductilidade. Entre suas aplicações típicas estão as chapas automobilísticas, perfis estruturais, tubos, na construção civil e pontes (ALVES, 2006).

Aços carbono contendo entre 1,2% e no máximo 1,8% de Manganês são referenciados como aços carbono-manganês. O teor de manganês no aço carbono é normalmente aumentado com o objetivo de aumentar a profundidade de endurecimento e de melhorar a resistência e a tenacidade. Este aço já entra na categoria de aço de baixa liga, se considerado o limite inferior do teor de liga de 1% estabelecido pela ISO. (CIMM, 2017).

O tratamento térmico dos aços carbono estruturais permite atingir tensões de escoamento entre 315 e 520 MPa. O aço carbono tratado termicamente é referenciado como pertencente ao grupo de aços de alta resistência. Estes aços são basicamente aços carbono-manganês ou aço carbono-manganês-silício, podendo conter outros elementos. Os tratamentos térmicos aplicados envolvem normalização ou têmpera e revenimento.

2.1.1 Aço ASTM A516 Gr. 60

O aço estrutural ASTM A516 Gr, 60 é bastante utilizado na indústria petrolífera, sendo normalmente aplicado na utilização de vasos de pressão, caldeiras e tubulações, seja no transporte, processamento e armazenamento de produtos derivados de petróleo, apresentando boas propriedades para serviços nas faixas de temperaturas, -60 a +500°C. O aço ASTM A516 Gr.60 é ligado ao silício e ao manganês, apresenta uma resistência a tração na faixa de 450 a 550 Mpa. É um aço que possui combinações de resistência mecânica e dureza, além de outras propriedades físicas e químicas dos aços que são atingidas com a adição de elementos químicos em proporção bem definidas. Os resultados aos incrementos de substância químicas nos aços estão interligadas as modificações microestruturais acarretadas pela adição dos átomos desses elementos na rede cristalina e sua forma de acomodação durante a evolução microestrutural, com o intuito de saber o estado que o mesmo se encontra, puro, dissolvido ou combinado, conforme ilustrado no Quadro 1 (CRUZ, 2006):

Quadro 1 – Tendência da distribuição dos elementos de liga nos aços resfriados lentamente

Dissolvidos na ferrita	Combinados na forma de carbonetos	Na forma de inclusões não metálicas	Na forma de compostos intermetálicos
Ni	-	-	Ni ₃ Al
Si	-	SiO ₂ , M _x O _y	-
Al	-	Al ₂ O ₃	Al _x N _y
Cu	-	-	-
P	-	-	-
Mn (forte)	Mn (fraca)	MnS, MnO, SiO ₂	-
Cr (forte)	Cr (fraca)	CrXO _y	-
V (muito fraca)	V (forte)	V _x O _y	V _x N _y
Ti (muito fraca)	Ti (forte)	Ti _x O _y	Ti _x N _y C _z , Ti _y N _y
Nb (muito fraca)	Nb (forte)	-	-

Fonte – (AGUIAR, 2001 apud TSCHIPTSCHIN, 2001)

Apesar de sua boa soldabilidade, o aço ASMT A516 Gr.60, pode apresentar durante a soldagem, uma ZTA com regiões de alta dureza que estão sujeitas a trincas de corrosão sob tensão, quando submetidas a um ambiente propício (RIBEIRO, 2001).

2.2 Vibração

Segundo (RAO, 2009), qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo é denominado vibração ou oscilação. O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda dedilhadas são alguns dos exemplos típicos de vibração.

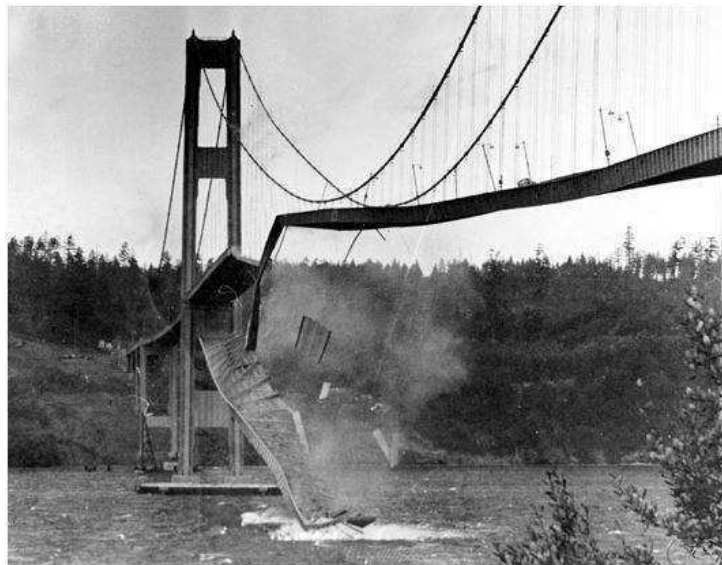
As vibrações podem ser classificadas de várias maneiras, entre elas está a Vibração Livre e Vibração Forçada:

- **Vibração Livre** – Ocorre quando num sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria. Esse tipo de vibração é classificado como vibração livre. Nesse caso, nenhuma força externa atua sobre o sistema. Um exemplo de vibração livre é a atuação de um pêndulo livre.
- **Vibração Forçada** – Numa situação em que o sistema estiver submetido a atuação de força externa, em muitos casos, forças repetitivas, a vibração resultante é denominada vibração forçada. A vibração em um grupo gerador é um exemplo de vibração forçada.

A vibração possui algumas variáveis, entre elas podemos destacar como principais (RAO, 2009):

- **Frequência Natural** – Para um sistema mecânico do tipo massa-mola é definida pela razão $\sqrt{k/m}$, onde k é a rigidez e m a massa do sistema. Sempre que a frequência da força externa (máquinas, equipamentos ou estruturas) coincidir com uma das frequências naturais do sistema, ocorre uma condição denominada ressonância, que resulta em deflexões excessivas e falhas. Danos em estruturas como edifícios, pontes, turbinas e asas de aviões foram associadas à ocorrência de ressonância (Fig. 2).

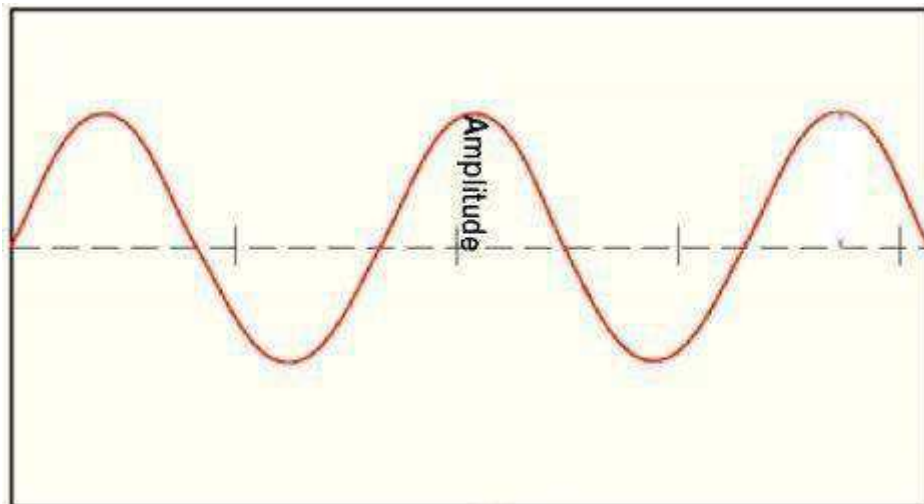
Figura 2 – Ponte de Tacoma nos EUA: estrutura entrou em colapso, devido suas frequências naturais serem iguais à frequência de excitação do ambiente, provocando a ressonância.



Fonte – (ZAMBOTO, 2015)

- **Frequência de Excitação** – O número de ciclos por unidade de tempo é denominado frequência. Pode ser medido em ciclos por segundo (Hertz).
- **Amplitude** – O máximo deslocamento de um corpo vibratório em relação à sua posição de equilíbrio é chamado amplitude de vibração, conforme ilustrado na Fig. 3. A amplitude pode ser medida através de instrumentos como sensores de deslocamento, velocidade e aceleração.

Figura 3 – Desenho esquemático da amplitude

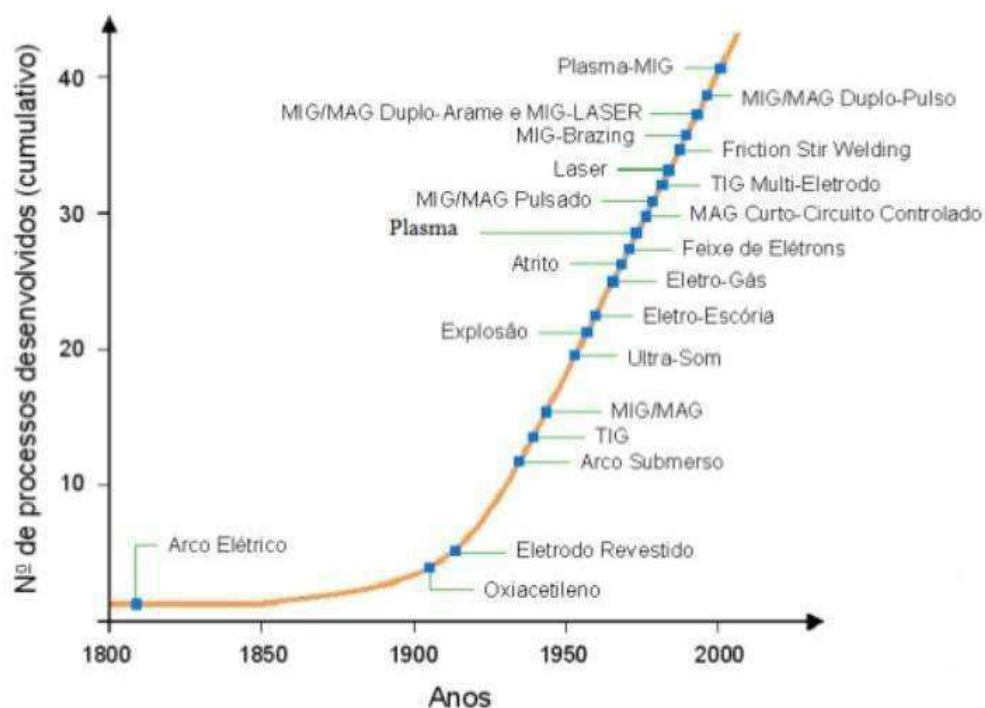


Fonte – (Autoria Própria)

2.3 Processos de Soldagem

O processo de soldagem teve seu grande impulso durante a II Guerra Mundial, com a grande demanda na fabricação de navios e aviões, apesar do arco elétrico ter sido desenvolvido no século XIX (WAINER et al, 2004). Pode-se estimar que existe em utilização comercial cerca de cinquenta processos de soldagem. Na Fig. 4 é apresentada a evolução dos processos de soldagem ao longo dos anos.

Figura 4 – Evolução do processo de soldagem ao longo dos anos.



Fonte – (PEDROSA, 2012)

Observando a Fig. 4, pode-se verificar que processos como feixe de elétrons, plasma e laser ainda são muito recentes, tendo uma baixa utilização, principalmente pelo custo, que ainda é elevado.

2.3.1 Processo GMAW

Os processos de soldagem com proteção gasosa iniciaram na década de 20. Época da concepção básica do GMAW (Gas Metal Arc Welding), porém, este somente se tornou comercial após 1948. A princípio, foi considerado como um processo de alta densidade de corrente, no qual eram utilizados pequenos diâmetros de eletrodos de metal com gás inerte para proteção. Tendo como sua primeira aplicação a soldagem de alumínio. Devido a essa característica, o processo ficou conhecido como MIG (Metal Inert Gas), designação ainda empregada para o processo (BARBEDO, 2011).

O desenvolvimento do processo incluiu a soldagem com baixas densidades de corrente e corrente pulsada, utilização em uma ampla faixa de materiais e emprego de gás ativo ou uma mistura de gases. Esta última evolução trouxe ao consentimento formal do termo GMAW para designação do processo. Quando os gases são inertes (Argônio/Hélio), ele é nomeado MIG (Metal Inert Gas). Já quando os gases são ativos

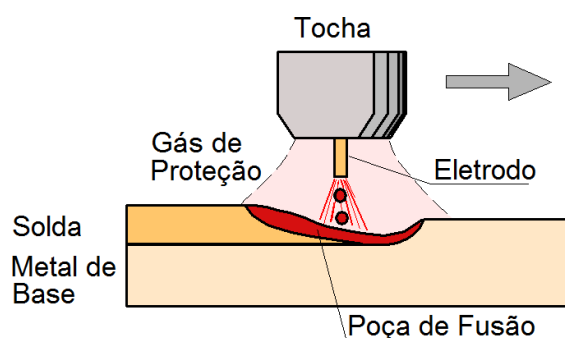
(CO₂ ou misturas Ar/O₂/CO₂), são denominados MAG (Metal Active Gas) (BARBEDO, 2011).

O processo de soldagem a arco com proteção gasosa, com destaque no processo MIG/MAG, vem sendo empregado em várias aplicações industriais. Por ser um processo de fácil automação e ter vários tipos de materiais que podem ser soldados por este método expandem ainda mais as suas aplicações. Vários segmentos utilizam deste processo de fabricação, entre eles pode-se citar: indústria automotiva, autopeças, alimentícia, construção civil, fabricação de bens de consumo, estaleiros, caldeirarias, implementos agrícolas, botijões de gás, entre tantas outras (TATAGIBA et al, 2012).

O processo MIG é adequado à soldagem de aços-carbonos, aços de baixa liga, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e ligas, magnésio e ligas e cobre e ligas. Já o processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga (WAINER et al, 2004).

O processo de soldagem GMAW, ilustrado na Fig. 5, é baseado numa fonte de calor gerada por um arco elétrico produzido através do contato entre o arame consumível com polaridade positiva e a peça a ser soldada de polaridade negativa. Gerando um curto circuito que permite o fluxo de uma elevada corrente elétrica, que resulta no aquecimento do arame, fazendo com que o arame se funda na peça, que é constantemente alimentado de forma contínua durante a soldagem (GOHR JÚNIOR, 2002).

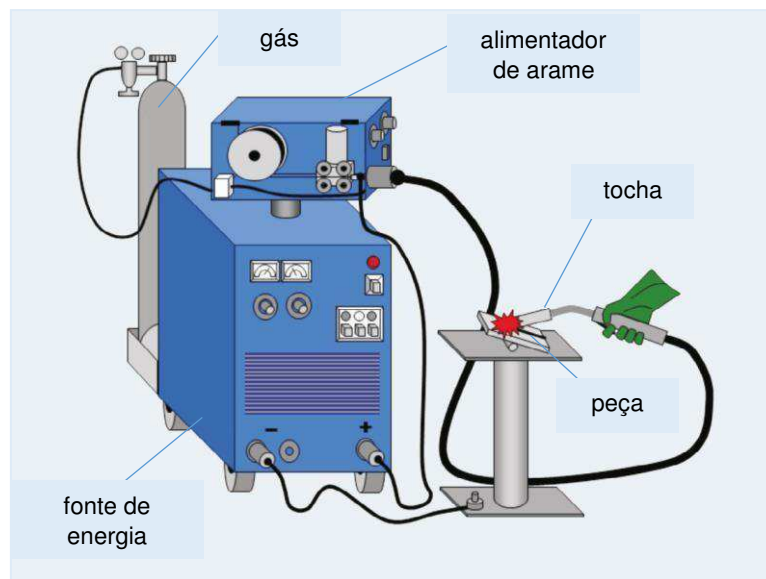
Figura 5 – Representação esquemática da soldagem GMAW



Fonte – (MODENESI et al, 2006)

A soldagem GMAW tem como equipamentos básicos, conforme apresentado na Fig. 6: fonte de energia, cabos, tocha de soldagem, alimentador de arame, cilindros contendo gases de proteção, com regulador de vazão (NASCIMENTO et al, 2005).

Figura 6 – Equipamento para soldagem pelo processo GMAW.



Fonte – (PEIXOTO, 2012)

O processo de soldagem GMAW apresenta várias vantagens e algumas limitações. Entre as vantagens podemos destacar as seguintes (LOCATELLI, 2014; MACHADO, 1996; MODENESI et al, 2012):

- Baixo custo de produção;
- Cordão de solda com bom acabamento;
- Processo com eletrodo contínuo;
- Permite soldagem em qualquer posição;
- Elevada taxa de deposição de material;
- Elevada penetração;
- Processo pode ser: manual, semi-automático e automático;
- Soldagem de ligas ferrosas e não-ferrosas;
- Não há necessidade de remoção de escória;
- Alta velocidade de soldagem, com baixa distorção das peças;
- Soldas de excelente qualidade;
- Facilidade de operação;
- Grande versatilidade na aplicação de diversos materiais e espessuras;
- Exige pouca limpeza após soldagem.

Quanto as limitações ao processo, podemos destacar:

- Processo de ajuste mais difícil e sensível que o processo SMAW;
- A proteção do arco é sensível a correntes de ar;
- Pode gerar elevada quantidade de respingos;
- Equipamentos relativamente caros e complexos;
- Pode apresentar dificuldades para soldar juntas de acesso restrito;
- A variedade de arames disponíveis é relativamente pequena;
- Grande emissão de raios ultravioletas.

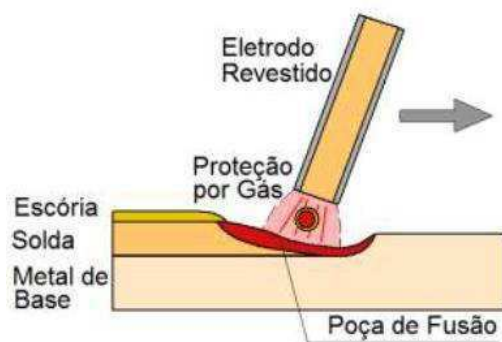
2.3.2 Processo SMAW

A soldagem com o processo ao Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos (SMAW – Shielded Metal Arc Welding) também conhecida como soldagem manual a arco elétrico, ocupou uma posição de destaque na fabricação de equipamentos e estruturas ao longo de grande parte do século XX. Atualmente, alguns processos de soldagem apresentam melhores índices de produtividade (DA SILVA et al, 2015). Apesar do processo a arco ser menos eficiente, seu arranjo simples torna o processo ainda bastante utilizado em muitas partes do mundo, particularmente Índia, China e América Latina (PAUL, 2016).

No processo SMAW a união é produzida pelo calor do arco criado entre um eletrodo revestido e a peça a soldar (WAINER et al, 2004). Durante o processo, esse eletrodo revestido com fluxo é vaporizado e decomposto, gerando um gás que tem a função de proteger o arco e conseqüentemente o cordão de solda (SHIGETA, 2016).

O SMAW (Fig. 7) pode ser usado em todos os metais comuns, exceto para metais reativos como titânio, que é extremamente sensível à fragilização intersticial e requer blindagem de gás inerte. É possível soldar alumínio por este processo, mas as aplicações são limitadas geralmente a placa menores (PHILLIPS, 2016).

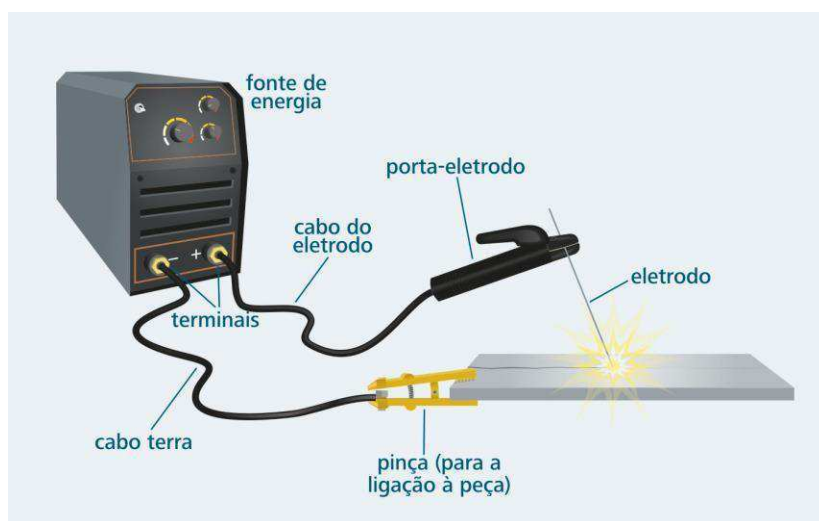
Figura 7 – Representação esquemática da soldagem SMAW



Fonte – (Modenesi et al, 2012)

Os equipamentos básicos, para soldagem SMAW, conforme apresentados na Fig. 8, possuem umas das mais simples configurações possíveis, em comparação aos outros processos elétricos. Consiste basicamente em: fonte de energia, alicate para fixação do eletrodo (também conhecido por porta – eletrodo), cabos de interligação, pinça para ligação à peça (WAINER et al, 2004).

Figura 8 – Equipamento para soldagem pelo processo SMAW



Fonte – (PEIXOTO, 2012)

O processo SMAW oferece algumas vantagens e desvantagens. Entre elas podemos citar as seguintes vantagens (MODENESI et al, 2012; PHILLIPS, 2016):

- Equipamento simples, barato e portátil;
- Não necessita de fluxo ou gases externos;
- Pouco sensível a correntes de ar;

- Processo extremamente versátil em termos de materiais soldáveis;
- Com o eletrodo apropriado, pode soldar em todas as posições;
- Facilidade para atingir áreas de acesso restrito;
- Através da soldagem multipasse, não existe limite para a espessura máxima a ser soldado.

Quanto às desvantagens podemos destacar:

- O processo é lento, principalmente devido à necessidade de substituir com frequência os eletrodos aplicados;
- Produtividade relativamente baixa;
- Exige limpeza após cada passe de soldagem;
- Requer uma habilidade de soldador relativamente alta;
- Torna-se difícil usar quando a espessura das placas é menor que 1/8 polegadas;
- As paradas e começos frequentes para substituir os eletrodos aumentam a probabilidade de ocorrer defeito;
- Incapacidade de soldar metais reativos como o titânio;
- Os eletrodos revestidos são sensíveis à absorção de umidade e podem exigir armazenamento especial.

O consumível da soldagem SMAW é o eletrodo revestido, produzido através da extrusão sob pressão de uma camada ou revestimento sobre a alma, e que consiste de uma mistura de compostos minerais, orgânicos, aglomerantes e outros compostos com finalidades específicas para cada aplicação desejada. Os revestimentos são formados por quatro grupos: básicos, celulósicos, rufílicos e ácidos (WAINER et al, 2004).

2.4 Soldabilidade

A American Welding Society (AWS) define soldabilidade como “a capacidade de um material ser soldado nas condições de fabricação impostas por uma estrutura específica projetada de forma adequada e de se comportar adequadamente em serviço”.

Das ligas metálicas existentes, a maioria pode ser considerada soldável, porém umas são mais difíceis que outras, a depender do processo de soldagem a ser utilizado. Outro fator preponderante para o desempenho esperado é definir qual será a aplicação

desejada. Portanto, deve-se considerar o processo, procedimento e aplicação de soldagem para conhecer a soldabilidade de um material (BARBEDO, 2011).

O aumento do teor de carbono em aços pode proporcionar o aumento da resistência mecânica, porém uma diminuição da soldabilidade do mesmo (MODENESI et al, 2006). Os aços que apresentam um teor de carbono até 0,15% são classificados como aços de excelente soldabilidade, devido ao fato da não temperabilidade. Já os aços que apresentam um percentual entre 0,15 e 0,30 são tidos como de boa soldabilidade, entretanto já existe certa possibilidade de endurecimento (MOREIRA, 2008). No Quadro 2, são apresentados os graus de soldabilidade de alguns metais:

Quadro 2 – Grau de soldabilidade

Material	Grau de Soldabilidade			
	Excelente	Boa	Regular	Ruim
Aço baixo teor de carbono	✓			
Aço médio carbono		✓	✓	
Aço alto carbono				✓
Aço Inoxidável	✓	✓		
Aços-liga			✓	
Ferro fundido cinzento			✓	
Ferro fundido maleável e nodular			✓	
Ferro fundido branco				✓
Ligas de alumínio		✓		
Ligas de Cobre		✓		

Fonte – (WEISS, 2010)

A soldabilidade de um aço pode ser encontrada por um índice denominado de Carbono Equivalente (CE), que correlaciona a composição química do aço com a tendência de revelar estruturas frágeis quando submetido ao processo de soldagem (CUNHA, 2016).

O conhecimento do Carbono Equivalente, possibilita avaliar a temperabilidade do aço, uma vez que quanto maior o CE, maior será a tendência de ocorrência de martensita e, assim sendo, maior temperabilidade e maior risco de fragilização durante a soldagem (CUNHA, 2016). Para os aços citados acima em geral, fórmulas de carbono equivalente (CE) são comumente usadas para estimar a necessidade de cuidados especiais na sua

soldagem. Existem algumas propostas de expressão para a definição do Ceq. Uma muito difundida é proposta pela Eq.1:

$$Ceq = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%Ni}{5} + \frac{\%Cr}{15} + \frac{\%Cu}{15} + \frac{\%Ni}{3} \quad (1)$$

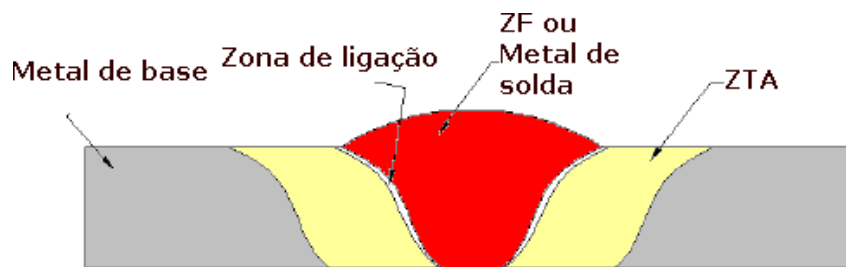
Um critério simples, baseado nesta fórmula, considera que, se $CE < 0,4$ o aço é insensível à fissuração e, se $CE > 0,6$ o material é fortemente sensível, exigindo técnicas especiais de soldagem, como exemplos, o uso de processos de baixo nível de hidrogênio e de pré-aquecimento.

Preferencialmente, o CE deve ser calculado para a composição real do aço. Quando esta não é conhecida, os teores máximos na faixa da especificação do aço devem ser considerados por segurança.

2.5 Regiões da Junta Soldada

Durante a realização de uma solda, as regiões adjacentes do metal de base são submetidas a ciclos térmicos cujas temperaturas de pico decrescem à medida que se afasta do eixo central da solda. Sob essas condições podem-se esperar alterações microestruturais, em relação ao material original, ao longo de sua seção transversal (MODENESI et al, 2012).

Em uma junta soldada por fusão, as principais regiões a serem analisadas são: ZF (Zona Fundida) ou MS (Metal de Solda), ZL (Zona de Ligação) ou LF (Linha de Fusão), ZTA (Zona Termicamente Afetada) e MB (Metal de Base), conforme ilustrado na Fig. 9 (BARBEDO, 2011).



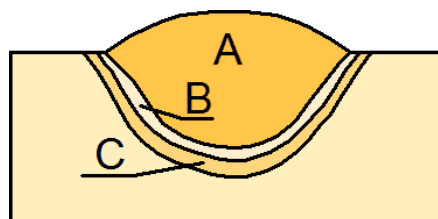
Fonte - (RODRIGUES, 2010)

2.5.1 Zona Fundida

A zona fundida de uma junta soldada é a região na qual ocorre a fusão do metal de adição com parte do metal de base adjacente, caracterizada por temperaturas de pico superiores à de fusão do material. Na região do metal de base não fundida ocorre uma alteração em sua microestrutura e propriedades de acordo com o valor da temperatura do ciclo térmico de soldagem na região (LOCATELLI, 2014).

A região da zona fundida (Fig. 10) pode ser dividida em outras três regiões: região misturada, região não-misturada e região parcialmente fundida.

Figura 10 – Regiões da zona fundida (esquemático): (A) região misturada, (B) região não misturada e (C) região de fusão parcial.



Fonte – (MODENESI et al, 2012)

A região misturada representa a maior parte do metal de solda e tem uma composição resultante da união do metal de base e do metal de adição na poça de fusão. Já a região não misturada, compreende uma fina camada (50 a 150 μm) adjacente a linha de fusão, onde o material de base fundido não se misturou com o metal de adição. A região parcialmente fundida, abrange uma área com temperaturas de pico entre as temperaturas liquidus e sólidas do metal de base, representa uma região entre a ZTA e ZF, onde ocorre uma fusão parcial durante a soldagem. (MODENESI et al, 2012).

A microestrutura formada na zona fundida depende de vários parâmetros, como: composição química do metal de base e do metal de adição, ciclo térmico de soldagem, tamanho de grão austenítico e teor de distribuição das inclusões não metálicas (DUARTE et al, 2014).

Na solda realizada nos aços carbono num só passe, a microestrutura da zona fundida será gerada pelos produtos oriundos da transformação da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita se apresenta com diferentes morfologias, algumas de grande semelhança. Já nas soldas multipasse, a microestrutura tende a ser ainda mais complexa, pois são formadas por regiões reaquecidas e alteradas

pelos ciclos térmicos dos passes subsequentes e por regiões que continuaram praticamente inalteradas (MODENESI et al, 2012).

As fases derivadas da transformação da austenita são basicamente: ferrita, cementita e martensita, existindo a possibilidade de pequenas quantidades de austenita permanecer inalteradas (austenita retida) e surgimento de diferentes precipitados (outros carbonetos, nitretos, etc.) e inclusões. O Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituintes do metal de solda, baseado em observação com o microscópio ótico, vindo a se tornar o mais aceito atualmente. Neste sistema é proposto que os constituintes mais comuns da zona fundida podem ser classificados, conforme Quadro 3, em (DUARTE et al, 2014; MODENESI et al, 2012):

Quadro 3 - Constituintes da zona fundida de aços ferríticos observados ao microscópio ótico

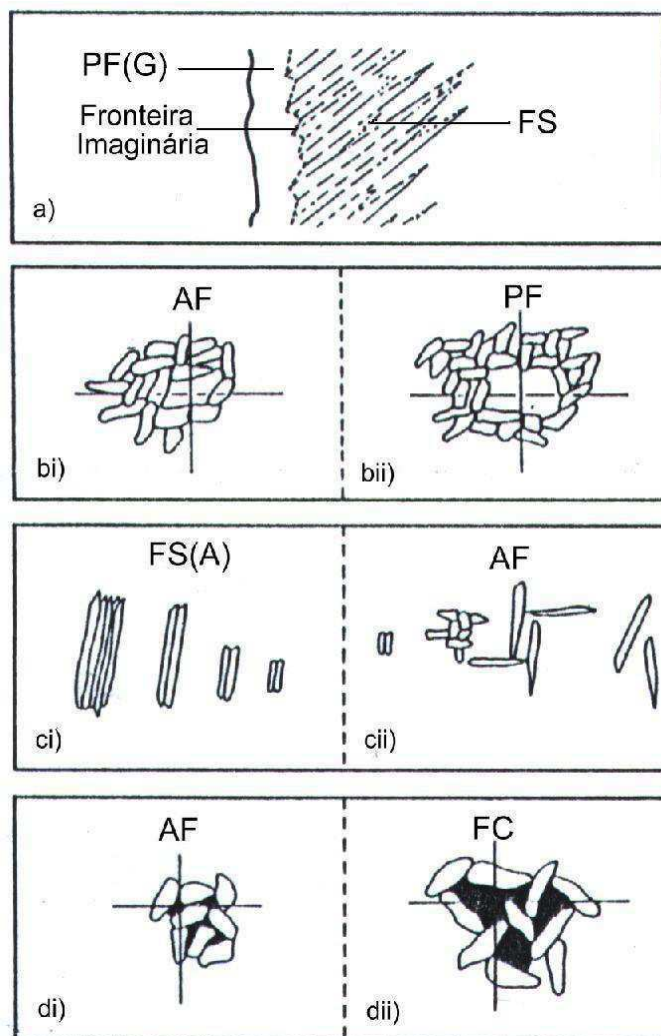
Constituinte	Código	Descrição
- Ferrita Primária	PF(G)	Veios de grãos poligonais associados com os contornos austeníticos prévios.
- Ferrita Poligonal Intragranular	PF(I)	Grãos de ferrita usualmente poligonais, localizados dentro dos grãos austeníticos prévios e mais 3 vezes maiores do que os grãos ou lâminas adjacentes de ferrita.
- Ferrita Acicular	AF	Grãos de ferrita pequenos e não alinhados localizados no interior dos grãos austeníticos prévios. Uma região de AF comumente inclui placas isoladas de grande razão de forma (relação entre o maior e o menor eixo).
- Ferrita com Segunda Fase Alinhada	FS(A)	Duas ou mais placas paralelas de ferrita. No caso de apenas duas placas, a razão de forma deve ser maior do que 4:1. Se o operador tiver segurança, este constituinte pode ser sub-classificado como placa lateral de ferrita, bainita superior ou inferior, FS(SP), FS(UB) ou FS(LB).
- Ferrita com Segunda Fase Não Alinhada	FS(NA)	Ferrita envolvendo completamente ou (i) "microfases" aproximadamente equiaxiais ou distribuídas aleatoriamente ou (ii) lâminas isoladas de AF.
- Agregado Ferrita Carboneto	FC	Estruturas finas de ferrita e carboneto, incluindo ferrita com carbonetos "interfásicos" e perlita. Se o agregado é claramente identificado como perlita, ele deve ser designado como FC(P). Se o agregado for menor que as lâminas adjacentes dentro do grão austenítico prévio, ele deve ser desprezado.
- Martensita	M	Colônias de martensita maiores que as lâminas adjacentes de ferrita. Se o operador estiver seguro, o constituinte pode ser classificado como martensita laminar ou maclada, M(L) ou M(T).

Fonte: (IIW, 1988).

Os constituintes da zona fundida citados no Quadro 3, possuem um formato característico, ilustrado na Fig. 11.

Figura 11 – Representação esquemática de constituintes microestruturais:

a) PF (G) e FS; bi) FA; bii) PF; ci) FS (A); cii) AF; di) AF; dii) FC.

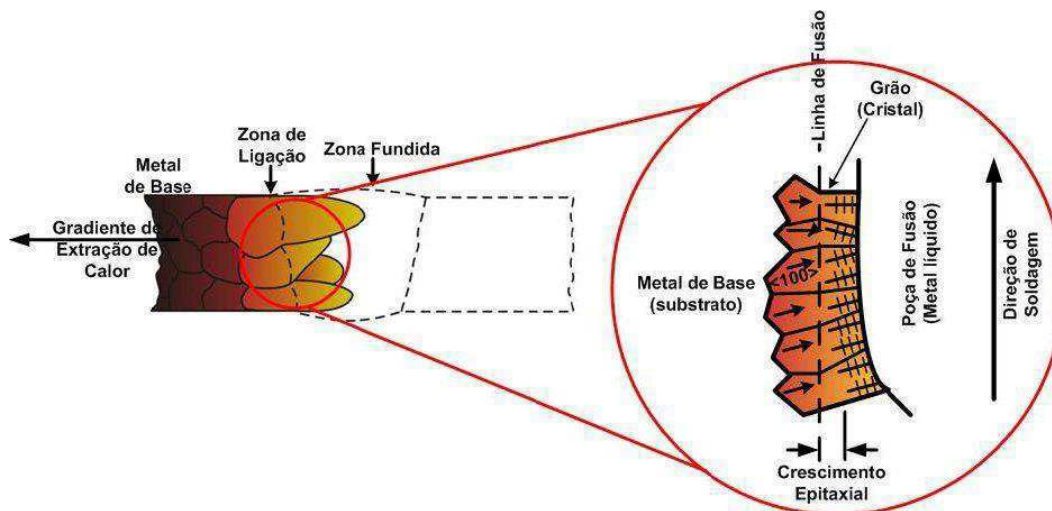


Fonte: (IIW, 1988).

2.5.2 Zona de Ligação

Zona de ligação é a região compreendida entre a ZF e ZTA, na qual se desenvolve, na direção da linha central do cordão de solda, crescimento epitaxial (Fig. 12), gerando o metal de solda. A continuidade metalúrgica entre as regiões de fronteira (ZF e ZTA) tem início principalmente no crescimento de grão do metal de base que estão na linha de fusão (DUARTE et al, 2014; RODRIGUES, 2010).

Figura 12 – Crescimento epitaxial próximo à linha de fusão, seguido do crescimento competitivo



Fonte – (RODRIGUES, 2011)

Na grande parte dos materiais esta região é bem reduzida e somente pode ser observada com o auxílio de um microscópio, podendo mesmo assim não vir a ser identificada, como é o caso dos aços de baixo carbono. Porém encontra-se alguns materiais, como os aços austenítico, tendo por exemplo, em que a presença dessa região parcialmente fundida pode levar à falha devido a trincas por liquação (MACIEL, 2014).

2.5.3 Zona Termicamente Afetada

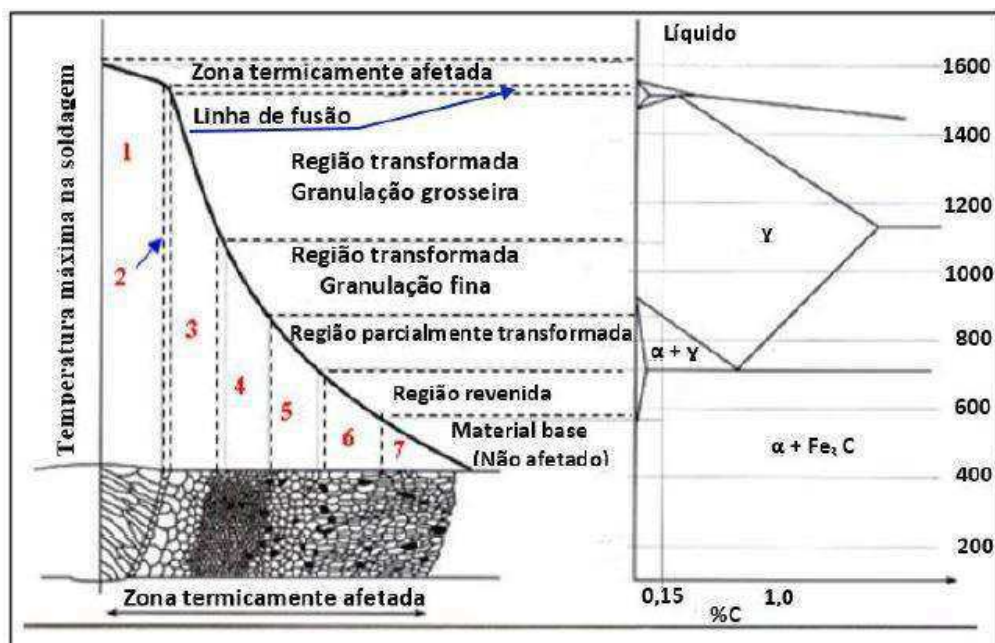
É a região não fundida do metal de base, mas cuja microestrutura e/ou propriedades foram alteradas pelo ciclo térmico durante a soldagem. As temperaturas de pico desta região foram inferiores à sua temperatura de fusão. O tamanho das sub-regiões é influenciado por variáveis como: composição química do material, a espessura e o aporte de calor durante a soldagem (RODRIGUES, 2010).

A ZTA dos aços transformáveis, dependendo da severidade do ciclo térmico da soldagem, pode ser subdividida, para um aço soldado por fusão, em quatro zonas (Fig. 13):

- Região de Grãos Grosseiros (ZTAGG);
- Região de Grãos Finos (ZTAGF) ou região normalizada;
- Região Intercrítica (ZTAIC);
- Região Subcrítica (ZTASC).

Estas zonas apresentam diferentes características metalúrgicas e de propriedades mecânicas relacionadas a seguir (RODRIGUES, 2011).

Figura 13 – Representação esquemática de distribuição de temperatura na ZTA



Fonte – (DUARTE et al, 2014)

2.6 Influência do Refino de Grão nas Propriedades Mecânicas no MS

Segundo VALIEV e ALEXANDROV (1999), pequenas modificações na microestrutura provocam grandes variações nas propriedades mecânicas de materiais metálicos. Este fato tem causado grande interesse entre os pesquisadores devido a propriedades como resistência, plasticidade e tenacidade, que são exigências crescentes do mercado, poderem ser melhoradas com custos relativamente baixos.

Uma maneira possível de obter-se alta tenacidade em aços com baixo teor de carbono e, ao mesmo tempo, manter as outras propriedades desejadas seria pelo refino de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos, o que dificulta a movimentação de discordâncias e a propagação de trinca no material devido à maior desorientação cristalina encontrada nas regiões de contorno (DIETER, 1981). Esta dificuldade de movimentação de discordâncias implica em aumento da resistência mecânica do material.

O refino de grãos na microestrutura tem influência significativa em várias propriedades mecânicas, principalmente na tenacidade do material, onde se tem mais

resultados expressivos. O perfil de microdureza é reduzido, tornando o material mais dúctil. (MACIEL, 2014).

2.7 Métodos de Refino de Grão na Soldagem

O refinamento de grão traz muitos benefícios para o material, entre eles pode-se citar: melhora da resistência mecânica, acabamento superficial homogêneo, distribuição uniforme dos constituintes da liga e a redução das tensões residuais resultantes da solidificação, ou seja, melhorando as propriedades mecânicas do material (ARANGO, 2009).

Na soldagem encontram-se algumas técnicas de controle de grão que são aplicadas com o objetivo de evitar a formação de grãos grosseiros e garantir a continuidade das propriedades do material soldado e até diminuir a probabilidade do surgimento de defeitos. As técnicas utilizadas no controle do crescimento dos grãos são: Inoculação, Oscilação do arco, Pulsação do arco, Nucleação superficial estimulada, Excitação eletromagnética, Excitação ultrassônica e Vibração mecânica (FREIRE, 2008).

2.7.1 Inoculação

A inoculação é uma técnica que vem sendo aplicada industrialmente com o objetivo de refino de grãos durante a solidificação do metal de solda em juntas. Este método consiste em adicionar elementos que funcionarão como agentes de nucleação (inoculantes) no metal líquido a ser solidificado. Ela ocorre com a adição de ligas que asseguram a geração de uma estrutura fina de grãos equiaxiais, extinguindo o crescimento de grão colunares. São alguns exemplos de inoculantes para o aço: ferro-nióbio, carbetos de titânio, ferro-titânio (ARANGO, 2009).

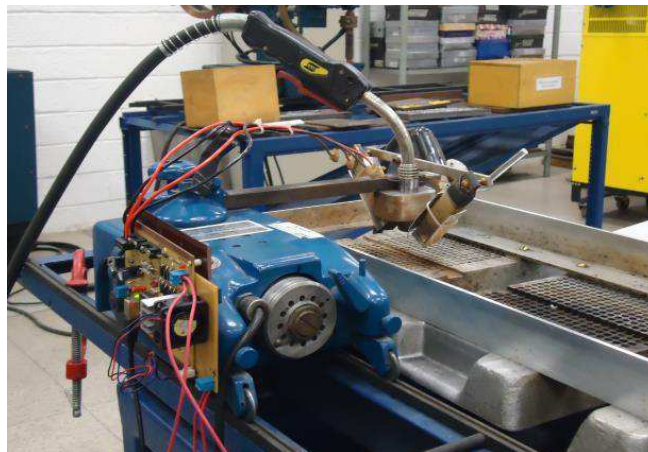
2.7.2 Oscilação do Arco

A técnica de oscilação do arco no sentido transversal ao sentido da soldagem é conhecida como tecimento. Essa oscilação do arco de soldagem pode ser realizada de forma mecânica (pela movimentação da tocha) ou magnética (GUILHERME et al, 2012)

A oscilação magnética do arco de soldagem (Fig. 14) é gerada devido a uma sequência de deflexões magnéticas, na qual o sentido de deflexão depende da montagem/posicionamento do eletroímã em relação ao arco/tocha de soldagem, ou seja, do sentido das linhas de fluxo magnético produzidas pelo eletroímã; campo magnético

paralelo/alinhado à direção de soldagem resulta em deflexão transversal/lateral do arco e campo magnético transversal à direção de soldagem resulta em deflexão longitudinal do arco. A principal vantagem em se aplicar osciladores magnéticos é a simplicidade para criar vários padrões de deflexão do arco, sejam eles para os lados e/ou para frente e para trás em relação à direção de soldagem (LARQUER et al, 2016).

Figura 14 – Sistema eletromagnético de oscilação fixado ao trator.



Fonte – (CORRADI et al, 2015)

Para valores adequados de frequência e amplitude de oscilação, a solda retrata uma melhoria em suas propriedades mecânicas, maior controle da geometria do cordão, devido ao refino de grão e melhoria da proporção de grãos equiaxiais em relação aos grãos colunares existentes na zona fundida de uma junta, mostrando também ser capaz de diminuir a incidência de fissuração a quente em ligas propícias a esse fenômeno (CORRADI et al, 2015).

2.7.3 Pulsação do Arco

O método de pulsação do arco é mais uma das técnicas utilizadas de aperfeiçoamento dos processos tradicionais de soldagem, como GMAW e GTAW. Sua aplicação no refino de grão ocorre devido ao arco pulsado garantir uma energia necessária para a adequada fusão do metal quando se atinge a corrente de pico e promove uma dissipação do calor quando se atinge a corrente de base. Em resumo, consiste na alternância periódica entre níveis altos e baixos (e bem definidos) da corrente de soldagem numa determinada frequência. Teoricamente, um nível alto de energia é ajustado durante os intervalos de alta corrente (pulso), tendo o objetivo de provocar a formação de uma

poça de fusão, à medida que nos intervalos de baixa corrente (base), a energia é preservada em níveis baixos, apenas suficientes para garantir que não ocorra a extinção do arco, permitindo assim, o resfriamento da poça de fusão (TSENG et al, 2011; CUNHA 2013)

Entre as principais vantagens descritas para esta técnica, podemos citar: um maior controle sobre as características dimensionais do cordão de solda (TSENG, 2001; TSENG 2002), maior tolerância às variações na dissipação de calor (SIMPSON, 1977), menor aporte de calor (STREET, 1990; LEITNER, MCELHINNEY e PRUITT, 1973) e redução de tensões residuais e distorções da peça (LEITNER, MCELHINNEY e PRUITT, 1973; SURESH et al. 2004). Já do ponto de vista metalúrgico, as vantagens relatadas na literatura referem-se ao refino de grão obtido na zona fundida (WU, ZHENG e WU, 1998), e a redução da largura da ZAC (JANAKI, MITRA E SHANKAR, 2003).

2.7.4 Nucleação Superficial Estimulada

Essa técnica baseia-se na injeção de um gás inerte resfriado, geralmente argônio, que é direcionado para a superfície da poça de fusão, causando um resfriamento localizado que resulta na nucleação de grãos na superfície.

2.7.5 Excitação Eletromagnética

Nesse método a agitação da poça de fusão pode ser induzida aplicando-se um campo eletromagnético alternado, paralelo ao eletrodo de soldagem.

2.7.6 Excitação Ultrassônica

Nesse método, são várias as formas de aplicar a excitação ultrassônica, elas podem ser através da excitação da peça, eletrodo e tocha de soldagem. FAN et al (2012) propôs para o processo de soldagem MIG/MAG uma configuração em que o corpo principal da tocha de soldagem constitui um transdutor piezelétrico de vibração ultrassônica, com o material de adição sendo mantido por um orifício concêntrico existente ao longo do seu eixo axial, gerando uma configuração em que produz uma melhor transferência metálica do processo (CUNHA et al, 2014; FAN et al, 2012).

Essa onda ultrassônica é irradiada da margem do sonotrodo ultrassônico, e refletida pela superfície da peça de trabalho. A onda refletida interage com a onda

incidente, gerando assim, um campo de radiação acústica, na região onde o arco voltaico é estabelecido (FAN et al, 2010).

Com a aplicação desta técnica, foi verificado que tanto as características do arco, como a forma de transferência e a aparência do cordão de solda mudam consideravelmente (FAN et al, 2011).

2.7.7 Tratamento Térmico

O processo de tratamento térmico em metais pode ser considerado como um conjunto de operações que inclui aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento em condições específicas controladas, com a finalidade de melhorar as suas propriedades ou conferir-lhes características pré-determinadas (RODRIGUES, 2013).

A Normalização é um tipo de tratamento térmico para reduzir o tamanho de grão através da recristalização, homogeneização da microestrutura e redução das tensões residuais trativas que poderiam originar ou propagar trincas devido a solicitações mecânicas ou tratamentos posteriores. Ainda, a normalização altera e refina as estruturas dendrítica fundidas.

Normalmente, a normalização é utilizada em peças posteriormente laminadas, conformadas ou forjadas. Sendo ainda aplicada como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido, com o objetivo de gerar uma estrutura mais uniforme do que a atingida por laminação. A microestrutura gerada é formada pelos constituintes ferrita e perlita fina ou cementita e perlita fina. Dependendo do tipo de aço, pode-se obter também a bainita (SILVA, 2015).

Embora o processo de tratamento térmico seja o mais tradicional para refino de grãos e o mais utilizado, ele possui algumas desvantagens e limitações, que são (CRISE, 2006; FONSECA, 2016; SHANKAR, 1982):

- Alto custo do processo no que se refere ao consumo de energia e os equipamentos utilizados;
- Limitações quanto a formas e dimensões das peças;
- Elevado tempo de processamento;

DA SILVA et al (2015), fez uma pesquisa sobre o efeito da normalização pós-revestimento duro por soldagem nas propriedades do cordão de solda, no qual utilizou

um aço SAE1020. Como resultado, apresentou uma estrutura com uma dureza global maior em 19% após a normalização, devido ao refino visível na microestrutura.

Para BARBOSA (2007), a pesquisa foi com o aço ASTM A516 Gr.70, muito utilizado em vasos de pressão e caldeiras. A normalização produziu um refinamento de grãos ferríticos em torno de 27,4%, resultando no aumento da dureza em 3,7% e tenacidade do material.

2.7.8 Vibração Mecânica

Devido à necessidade de melhorar as propriedades mecânicas dos aços, técnicas de vibração têm sido usadas e aplicadas nas últimas décadas em diversos campos (GOVINDARAO et al., 2012). Para o refino de grão e em substituição ao tratamento térmico de normalização, vem sendo utilizada, em várias partes do mundo, uma tecnologia que utiliza a vibração mecânica, com resultados satisfatórios e comprovada economia de energia (RODRIGUES, 2013).

Na década de 50, Estados Unidos e Alemanha usaram a vibração harmônica (também conhecida como vibrações ressonantes) para testar cascos de barcos metálicos e asas de aviões (BONAL, 2008).

Muitos pesquisadores analisaram o efeito das vibrações microestruturais e propriedades mecânicas de juntas soldadas e chegaram a uma conclusão genérica de que as vibrações são capazes de alterar e melhorar a microestrutura, melhorando assim a propriedades mecânicas de soldas e elementos fundidos devido razão fundamental de que as propriedades mecânicas são influenciadas pela microestrutura e tamanho de grão das soldas (KAINTH, 2015).

A partir das últimas décadas várias técnicas vibratórias foram desenvolvidas para controlar o comportamento de solidificação de juntas soldadas. Entre os vários mecanismos de soldagem vibratória, uma mesa vibratória tem sido utilizada por vários autores para fazer vibrar a placa de base a uma determinada gama de frequências (SHARMA et al, 2014).

A técnica de tratamento por vibração mecânica apresenta resultados práticos, sendo comprovado nas empresas, tanto ao redor do mundo como aqui no Brasil, mas sua confiabilidade nos meios acadêmico e industrial ainda é questionada ou não foi bem divulgada. Essa situação ocorre devido as instituições normativas até momento não incluírem esta tecnologia, possivelmente devido à falta de evidências científicas que fundamentem os resultados práticos atingidos (RODRIGUES, 2013).

As vantagens do método alternativo de indução de vibração mecânica são similares às obtidas pelo tratamento térmico tradicional, destacando a sua pertinente simplicidade quando comparado com o processo térmico ou com os demais métodos (CRISI, 2006; FONSECA, 2016):

- Tempo de processamento é consideravelmente menor quando comparado com os demais tratamentos, principalmente com o térmico;
- 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;
- Equipamento flexível e portátil, possibilita que o tratamento seja efetuado 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.;
- 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.
- Não gera resíduo nem poluição do ar;
- Não apresenta limitações em relação a formas e dimensões dos componentes mecânicos e permite o tratamento de componentes fabricados com materiais diferentes.
- Promove grande redução de consumo de energia, geração de resíduos e poluição do ar.

Os processos de vibrações podem ser aplicados na maioria dos metais trabalhados na indústria metal mecânica. A única limitação deste processo é a não atuação no cobre e suas ligas, por razões ainda não conhecidas (MARTINS et al, 2012).

2.8 VWC

O processo de condicionamento da solda por vibração (VWC - *Vibratory Welding Condition*) é ilustrado na Fig. 15. Nesse processo de tratamento vibracional, ocorre a vibração da peça durante a soldagem, promovendo a homogeneização e quebra dos grãos dendríticos durante a vibração, melhorando sensivelmente as propriedades mecânicas da junta (WEITE, 1999).

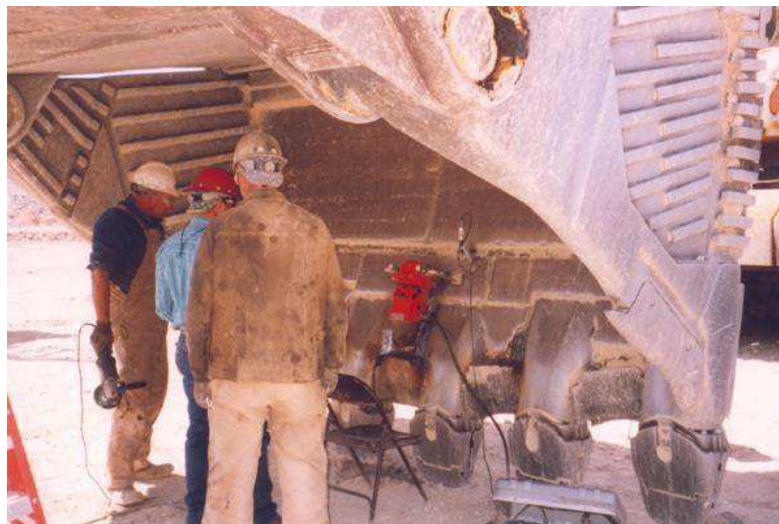
Figura 15 – Lança utilizada em equipamentos de mineração foi amplamente reparada usando o condicionamento de solda Meta-Lax para melhorar a vida em fadiga.



Fonte – (BONAL, 2003)

Condicionamento de Solda por Vibração (Fig. 16) é uma nova tecnologia em que se vibra a peça durante a soldagem por um indutor de vibrações. Seu principal objetivo é refinar grãos, aliviar a tensão residual, minimizar as distorções de soldagem e melhorar as propriedades da junta soldada (ZHU et al, 2005).

Figura 16 – Aplicação do processo VWC nos dentes da concha de Escavadeira



Fonte – (BONAL, 2003)

No processo VWC, durante a solidificação do metal fundido, a intensa vibração na massa fundida provoca a quebra dos indesejáveis grãos dendríticos e colunares,

reduzindo o tamanho há grãos equiaxiais. Propriedades mecânicas, tais como resistência, dureza e alongamento são modificados com vibração (KAINTH, 2014).

Este procedimento produz vários benefícios desejáveis para a zona fundida e para a zona termicamente afetada, tais como (BONAL, 2008; WEITE, 1999; FONSECA 2016):

- Redução das falhas em serviço por fadiga;
- Produz uma superfície limpa, livre de descoloração, escória e incrustações;
- Permite a estabilidade dimensional à longo prazo;
- Redução, ou quase eliminação, da necessidade do pré-aquecimento;
- Minimiza distorções e trincas;
- Redução da porosidade;
- Melhor qualidade do cordão de solda;
- Maior profundidade de penetração da solda
- Permite o aumento na velocidade de soldagem;
- Aumento da ductilidade da junta soldada;
- Minimiza a ocorrência de descontinuidades oriundas do processo de soldagem;
- Aumento da resistência ao impacto da solda (Tenacidade).
- Redução do aporte térmico;
- 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;

Devido ao processo VWC ser realizado com a vibração e a soldagem ocorrendo simultaneamente, o metal líquido na poça de fusão melhora a estrutura do grão solidificado do metal de solda. Sendo assim, o crescimento colunar não ocorre e uma estrutura de grão mais fino é formada. Uma distribuição mais uniforme de tamanho de grão ao longo do metal de solda será observada (PUCKO, 2009).

LU et al (2008) concluíram que VWC altera intensamente a estrutura microscópica. A vibração gera a quebra dos grãos colunares no metal de solda. Uma maior velocidade de soldagem produz uma maior remoção de calor durante a solidificação, produzida na VWC. Assim, quanto maior for a taxa de arrefecimento, menor será o tamanho de grão. E um tamanho de grão mais fino melhora as propriedades mecânicas.

SHARMA et al (2014) estudaram os efeitos das vibrações mecânicas em propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço inoxidável, através do processo eletrodo revestido (SMAW) e com vibrações variando até 300 Hz. Nos resultados, todas as amostras tiveram um refino dos grãos, a resistência mecânica teve um aumento de 23%, o alongamento da junta dobrou e a microdureza aumentou.

ZHU et al (2005) realizou um estudo através do VWC para alívio das tensões residuais, no qual verificou uma redução nas tensões residuais menores que a metade da tensão de escoamento e uma redução no tamanho de grão significativa para uma frequência de vibração maior.

SINGH et al (2012) empregaram a tecnologia de solidificação dinâmica no processo SMAW, induzindo a vibrações durante a solidificação. Esta tecnologia tem como vantagens: operação mais conveniente, menor investimento, menos poluído e menor período de tempo de fabricação. Foi utilizado aço inoxidável (AISI202), sendo realizadas combinações de alta e baixa frequência de vibração mecânica. Os resultados deste estudo indicaram que as juntas de solda com condição vibratória possuíam alta resistência à tração e alta resistência ao escoamento. Estudos metalográficos realizados mostraram que as juntas soldadas possuíam microestrutura relativamente mais fina, resultando assim, numa elevada microdureza, devido a fragmentação dendrítica.

HUSSEIN et al (2011) estudaram as propriedades mecânicas e qualidade do metal de fusão na soldagem, considerando indução de vibração durante a soldagem. No seu estudo, o efeito de vibração harmônica durante a soldagem foi empregado para avaliar as propriedades mecânicas de soldagem. O método de vibração harmônica é examinado experimentalmente tomando quatro valores de frequência durante a soldagem, sendo especificadas de acordo com a frequência natural da placa. Cinco placas retangulares são apoiadas no suporte e soldadas usando uma máquina de solda manual de arco. Os resultados experimentais mostram que a vibração geralmente melhora as distorções, bem como a resistência à tração, melhorado distintamente no caso de ressonância quando comparado com aquele soldado sem vibração.

RAO et al (2015) utilizou o processo de tratamento VWC nas suas amostras, variando dois parâmetros de entrada: tensão e tempo de vibração. Já os parâmetros de processo, como velocidade de soldagem, corrente, entre outros, foram mantidos constantes. A análise das propriedades metalúrgicas mostrou que a microestrutura refinada foi atingida para as amostras, sendo responsável pela melhoria da resistência à

flexão, resistência à tração final, resistência ao impacto e dureza das peças de solda vibratórias.

XU et al (2007) utilizou VWC e arco submerso na soldagem de tubos de solda de circunferência de passagem múltipla. Descobriu que a VWC poderia reduzir as tensões residuais no aro, na superfície externa e significativamente a distorção radial.

KAINTH (2015) construiu uma bancada vibratória e através do processo de soldagem SMAW, realizou o tratamento VWC, obtendo resultados satisfatórios como a quebra dos grãos longos e dendríticos da microestrutura do metal de solda. O refino de grãos produziu melhoras significativas nas propriedades mecânicas das amostras.

MACIEL (2014) fez estudos soldando chapas do aço ASTM A131. A soldagem foi realizada com vibração e sem vibração mecânica, através do processo de arame tubular com proteção gasosa (CO₂), com o objetivo de avaliar propriedades mecânicas da junta soldada. Tendo como resultado uma redução significativa do tamanho de grão, gerando aumento da tenacidade em 26% nas juntas com vibração.

FONSECA (2013) realizou experimentos comparando a soldagem com e sem tratamento por vibração mecânica, do aço USI - SAR 80T (ARBL), pelo processo de soldagem GMAW com proteção gasosa (CO₂), com o intuito de analisar a influência da vibração nas propriedades mecânicas da junta soldada. Concluiu que a mesma atua diretamente na solidificação do material fundido, reduzindo as taxas de resfriamento, promovendo melhorias metalúrgicas, entre elas: refinamento e distribuição homogênea dos microconstituintes da solda. E melhorias significativas nas propriedades mecânicas da junta soldada.

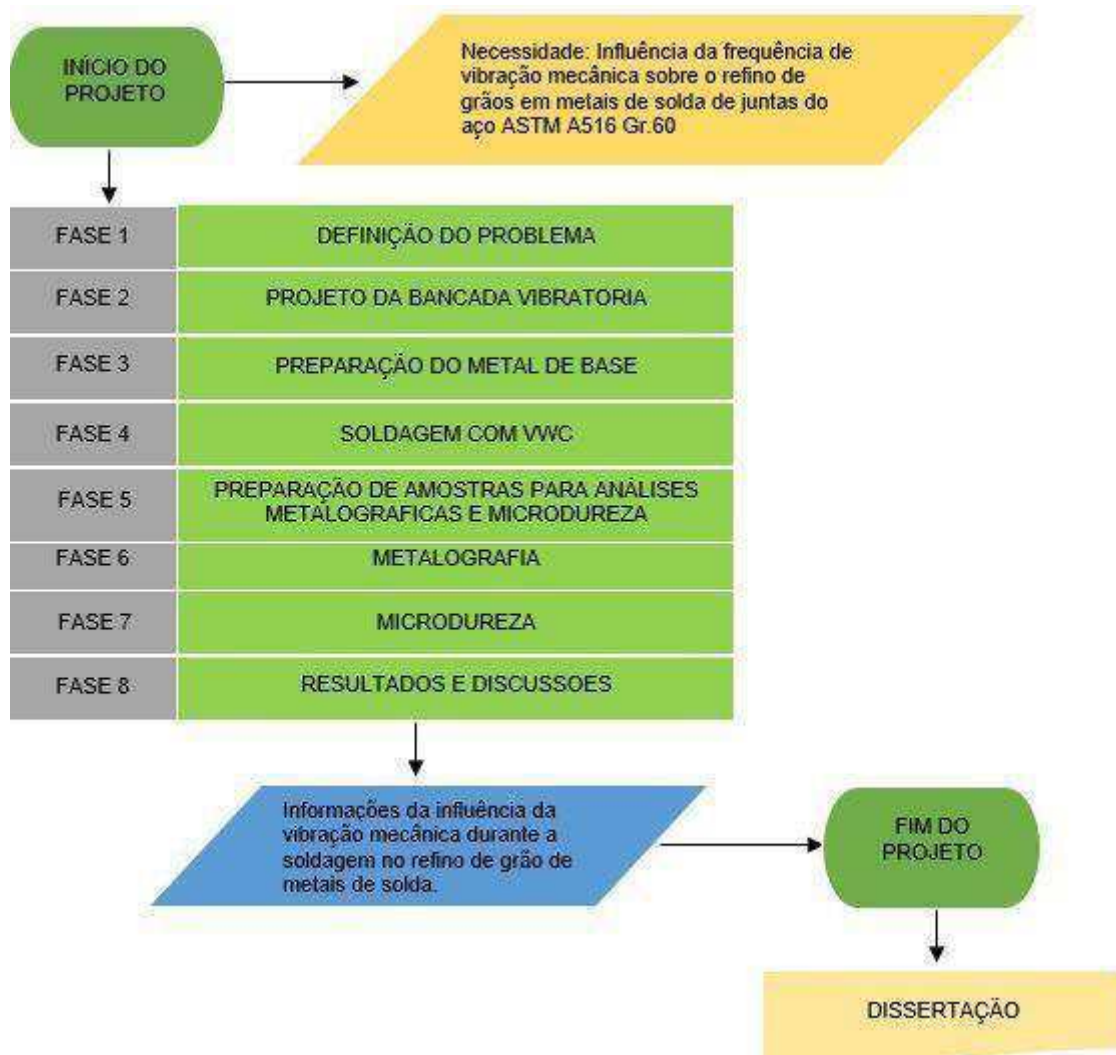
CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

Inicialmente buscou-se atender à necessidade do projeto, que é avaliar a influência da frequência de vibração mecânica sobre o refino de grãos em metais de solda de juntas do aço ASTM A516 Gr.60 utilizando os processos GMAW e SMAW.

No fluxograma resumido, ilustrado na Fig. 17, têm-se as principais fases que foram realizadas pelo projeto de dissertação:

Figura 17 – Fluxograma resumido do projeto



Fonte – Autoria própria

3.1 Fase 1 – Definição do Problema

Na primeira fase, buscou-se informações na literatura especializada sobre os principais temas do projeto, que são: aço ASTM A516 Gr.60, vibração mecânica e metalurgia da soldagem.

Na busca por esse conhecimento, utilizou-se ferramentas de apoio, que são: sites de busca acadêmicos (periódicos capes, oásis/ibict, google acadêmico) e livros.

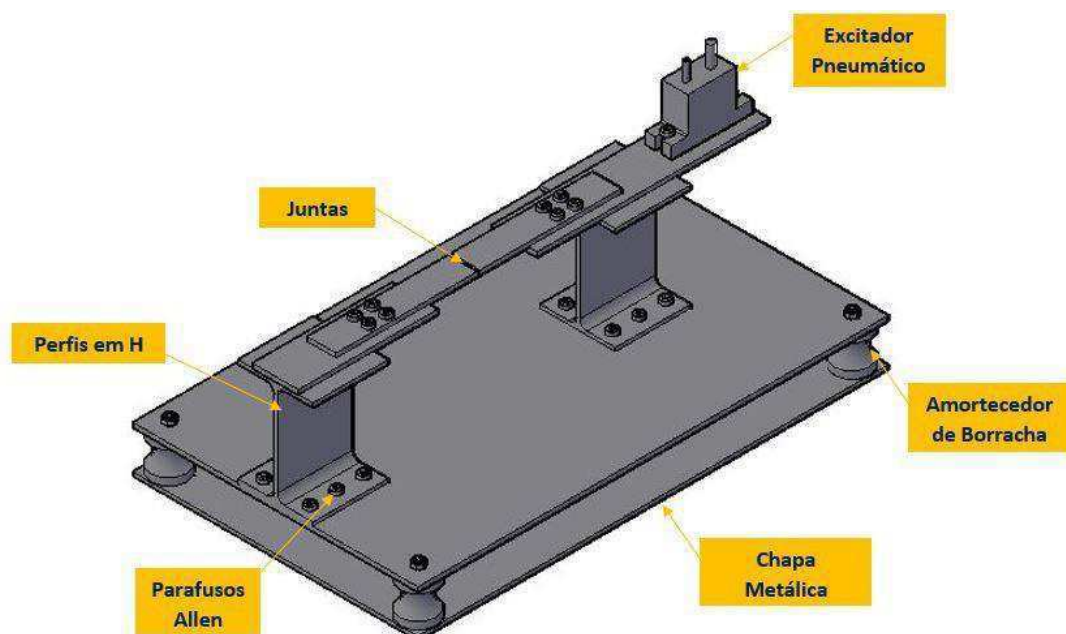
Com todas essas informações, formou-se uma base para alicerçar a necessidade do projeto.

3.2 Fase 2 – Projeto da Bancada Vibratória

Na segunda fase do projeto, foi projetada uma bancada vibratória para fixar as juntas e o excitador pneumático durante a soldagem. Essa fase foi dividida em: desenhar bancada, montar bancada e testar bancada.

Para a construção da bancada, inicialmente foi realizado uma projeção feita por um esboço a mão, para em seguida, ser utilizado a simulação em um software de modelagem (Auto Cad), conforme a Fig. 18. Mais detalhes da bancada montada com as especificações finais se encontra em Anexo (Apêndice 1).

Figura 18 – Bancada Vibratória



Posteriormente foi realizada a montagem da bancada no Laboratório de Soldagem da UFCG (LABSOL). Os materiais utilizados na fabricação da bancada foram,

basicamente, perfis e chapas metálicas em aço, amortecedores de borracha e parafusos de fixação.

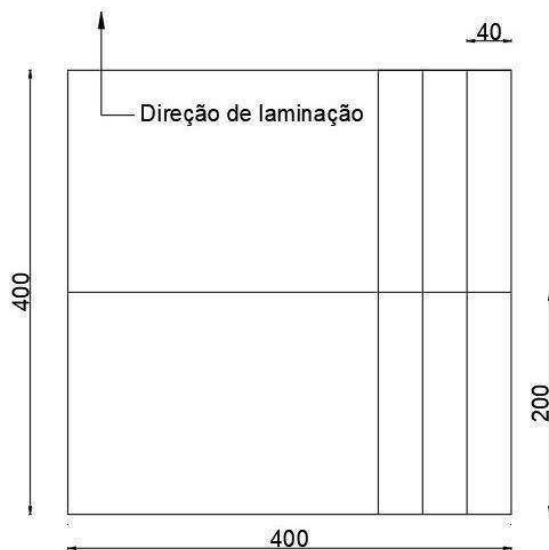
Para finalizar, realizou-se testes na bancada vibratória, verificando se esta atendeu as exigências de projeto. Para tal, foram instalados um compressor e um vibrador pneumático. Ao final dessas etapas, a bancada estava em condições para que experimentos fossem iniciados.

3.3 Fase 3 – Preparação do Metal de Base

As amostras utilizadas no experimento foram inicialmente limpas, considerando que o material estudado contém camadas superficiais de óxidos, devido ao tempo que estavam armazenados no laboratório, além de outras impurezas. Antes da soldagem as superfícies foram preparadas através de esmerilhamento ou escova de aço, a fim de evitar a desestabilização do arco e inclusão de impurezas durante o processo de soldagem, o que poderia acarretar defeitos, tais como poros nas juntas soldadas.

Na etapa seguinte, as chapas foram usinadas na guilhotina de tal forma a produzir juntas com dimensões (40 x 200 x 6) mm. Na Fig. 19 está apresentado o plano de corte da chapa.

Figura 19 – Plano de corte da chapa ilustrando as dimensões das amostras da bancada vibratória

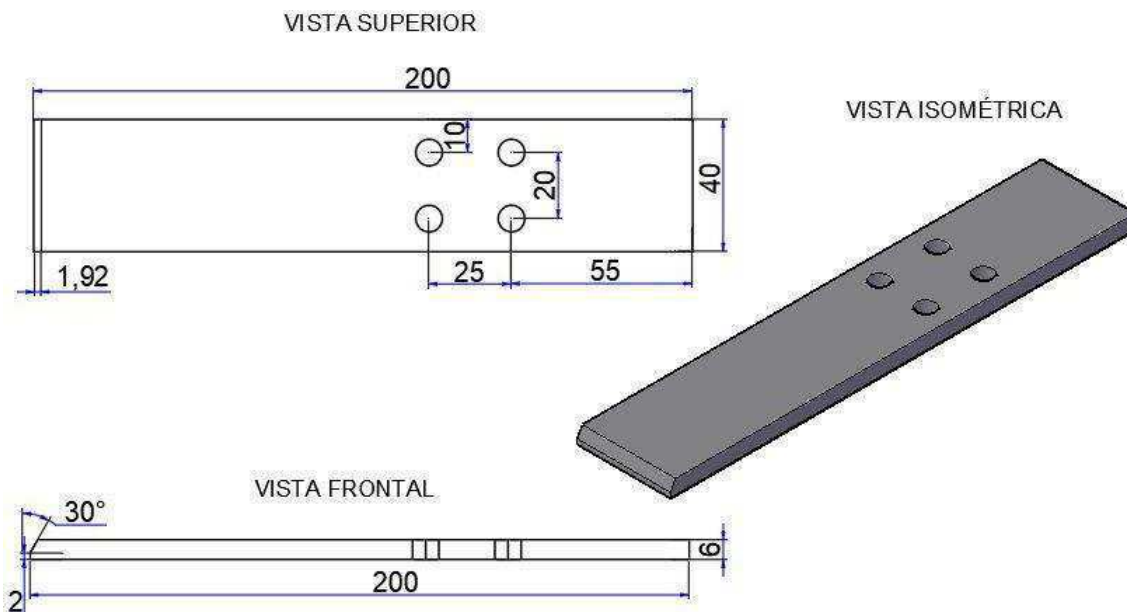


Fonte – (Autoria própria)

Após cortadas, as chapas foram chanfradas nas suas laterais, retirando os cantos vivos, evitando qualquer tipo de acidente.

Em seguida, foram feitos os chanfros de solda nas chapas, através de uma máquina plaina limadora. Os chanfros foram executados com uma geometria no formato “v” e um ângulo de 30° com a vertical, formando um ângulo total de 60° após unidas as chapas, ilustrado na Fig. 20. As medidas ilustradas nas Fig.20 e 21 estão na unidade de milímetros.

Figura 20 – Chapa da junta soldada na bancada



Fonte – (Autoria Própria)

Os chanfros realizados na chapa foram de acordo com a norma AWS D1.1, 2010, conforme ilustrada na Fig. 21

Figura 21 – Chanfro em V simples

		Espessura do Metal Base (U = ilimitada)		Preparação em Chanfro		Posições de soldagem permitidas	Gás de proteção para FCAW	Notas	
Processo de soldagem	Denominação da junta	T ₁	T ₂	Abertura de raiz Face de raiz Ângulo de abertura do chanfro	Tolerâncias				
					Como detalhado (ver 3.13.1)	Como ajustado (ver 3.13.1)			
SMAW	B-U2	U	—	R = 0 a 3 f = 0 a 3 α = 60°	+2, -0 +2, -0 +10°, -0°	+2, -3 Não limitado +10°, -5°	Todas	—	d, e, j
GMAW FCAW	B-U2-GF	U	—	R = 0 a 3 f = 0 a 3 α = 60°	+2, -0 +2, -0 +10°, -0°	+2, -3 Não limitado +10°, -5°	Todas	Não Requerido	a, d, j

Fonte – (AWS, 2010)

3.4 Fase 4 – Soldagem com VWC

Visando a avaliação dos benefícios do processo de tratamento de vibração mecânica, três condições distintas de soldagem foram executadas utilizando o processo de soldagem SMAW, outras cinco condições utilizando o processo GMAW, mantendo os parâmetros de soldagem fixos, totalizando oito condições de soldagem. Os parâmetros de vibração foram variados, conforme ilustrado no Quadro 4. Nesses procedimentos foram adotados alguns estudos como referência (RAO, 2015, SHARMA, 2014).

Quadro 4 – Parâmetros e condições de soldagem

Condição de Soldagem	Processo de Soldagem	Pressão (Bar)
C1	Soldagem SMAW manual sem vibração	-
C2	Soldagem SMAW manual com vibração	2
C3	Soldagem SMAW manual com vibração	3
C4	Soldagem GMAW semi-automatizado sem vibração	-
C5	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	2
C6	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	3
C7	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	4
C8	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	5

Fonte – (Autoria própria)

As juntas para realização dos tratamentos foram obtidas em um único passe e divididas em grupos da seguinte forma: duas juntas foram tratadas por vibração mecânica pelo processo de soldagem SMAW, tendo suas frequências variando nas pressões 2 e 3 Bar, durante 100 segundos, mantendo fixo os parâmetros de soldagem, conforme ilustrado no Quadro 5. Outras 4 juntas foram tratadas por vibração mecânica pelo processo GMAW (Fig. 22), obedecendo a mesma metodologia do processo de soldagem anterior, variando nas pressões 2, 3, 4 e 5 Bar, mantendo os parâmetros de soldagem fixos, conforme ilustrado no Quadro 6. Foram separadas duas amostras para realizar um processo de soldagem sem vibração para posterior comparação com os processos com tratamento por vibração mecânica, sendo uma pelo processo GMAW e uma pelo SMAW, totalizando um experimento com 8 condições.

Figura 22 – Soldagem das chapas pelo processo GMAW



Fonte – (Autoria própria)

Quadro 5 – Parâmetros de soldagem SMAW

Parâmetros de Soldagem (SMAW)	
Tensão (V)	23,2
Corrente (A)	65
Corrente Média (A)	64
Velocidade de Soldagem (m/s)	0,0011
Energia de Soldagem (kJ/m)	1.349,80

Fonte – (Autoria própria)

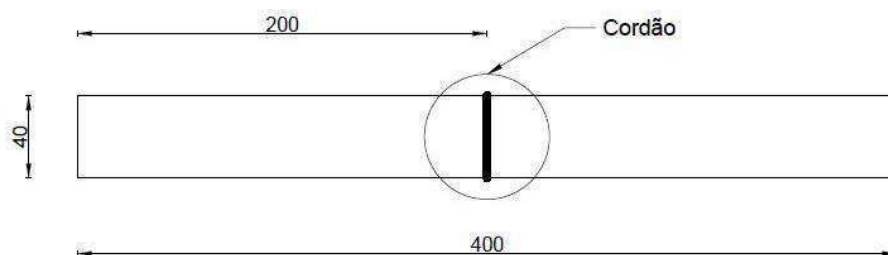
Quadro 6 – Parâmetros de soldagem GMAW

Parâmetros de Soldagem (GMAW)	
Tensão (V)	22
Corrente (A)	155
Corrente Média (A)	153
Inclinação da Tocha	90
Distância Bico de Contato Peça (DBCP)	4 mm
Gás	CO ₂
Vazão do Gás (l/min)	15
Velocidade de Soldagem (m/s)	0,0025
Velocidade de Alimentação do Arame (m/s)	0,058
Energia de Soldagem (kJ/m)	1.346,40

Fonte – (Autoria própria)

Após a execução das soldagens de topo nas juntas, foi obtida assim uma amostra padronizada de dimensões (40 x 400 x 6) mm, conforme ilustrada na Fig. 23.

Figura 23 - Ilustração das dimensões da amostra e do cordão de solda



Fonte – (Autoria Própria)

O metal de base utilizado foi um aço carbono estrutural ASTM A516 Gr.60. Classificado pela Norma ASTM (1979), segundo as suas propriedades mecânicas, que contém como principais elementos de liga o Mn e o Si. O quadro 7 apresenta as propriedades mecânicas e a composição química deste material segundo o fabricante.

Quadro 7 – Composição química nominal e propriedades mecânicas do aço ASTM A 516 Gr 60.

Composição Química					Propriedades Mecânicas		
C máx (%)	Mn (%)	P máx (%)	S máx (%)	Si (%)	Resistência à Tração (Mpa)	Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Carbono	Manganês	Fósforo	Enxofre	Enxofre			
0,23	0,79 - 1,30	0,04	0,04	0,13 - 0,45	415 - 550	220	21 min.

Fonte – (USIMINAS, 2013)

Esse aço apresenta boa resistência mecânica, boa resistência à corrosão atmosférica, boa resistência ao choque e à fadiga, o que aliada a uma boa maleabilidade e soldabilidade torna sua aplicação atrativa na construção de vasos de pressão, no setor petrolífero, transporte e construção civil, dentre outros.

Para realizar a soldagem das juntas, foram escolhidos dois processos de soldagem: GMAW, de funcionamento semi-automatizado, e o SMAW, de funcionamento manual. Para a realização do processo de soldagem GMAW foram utilizados equipamentos da IMC Soldagem, ilustrados na Fig. 24.

Figura 24 – Máquina de solda GMAW



Fonte – (Autoria própria)

A máquina de soldagem GMAW possui algumas características operacionais, como: fonte de soldagem eletrônica multiprocesso com corrente máxima de 800 A, sistema de aquisição de dados para os sinais de tensão e corrente, e tartúlope para deslocamento linear da tocha.

Já para o processo SMAW foi utilizado o equipamento da ESAB, conforme ilustrado na Fig. 25.

Figura 25 – Máquina de solda SMAW



Fonte – (Autoria própria)

O equipamento de soldagem pelo processo SMAW, possui uma corrente máxima de 400A, tensão (220/380 e 440) V e frequência de 60 Hz.

Como consumíveis utilizou-se o eletrodo ASME SFA 5.1 E7018 com 2,25 mm de diâmetro no processo SMAW. No Quadro 8 é mostrada a composição química e as propriedades mecânicas do mesmo.

Quadro 8 – Composição química e propriedades mecânicas nominais do metal de adição correspondente ao eletrodo AWS E7018)

Propriedades Químicas			Propriedades Mecânicas		
C	Si	Mn	Resistência à Tração	Escoamento	Alongamento
Carbono	Silício	Manganês	(Mpa)	(Mpa)	(%)
0,07	0,10	0,30	530 - 590	450 - 460	27 - 32

Fonte – (ESAB, 2018)

No processo GMAW foi utilizado o arame ASME SFA 5.18 ER70S-6 com 1,2 mm de diâmetro no Quadro 9 é mostrada a composição química e propriedades mecânicas do mesmo.

Quadro 9 – Composição química e propriedades mecânicas nominais do metal de adição correspondente ao arame AWS ER70S-6

Propriedades Químicas					Propriedades Mecânicas			
C	Si	Mn	P	S	Cu	Resistência à Tração (Mpa)	Escoamento (Mpa)	Alongamento (%)
Carbono	Silício	Manganês	Fósforo	Enxofre	Cobre			
0,06 a 0,15	0,45 a 0,75	0,90 a 1,40	0,0025 máx.	0,0025 máx.	0,5 máx.	480	400	22 mín.

Fonte – (ESAB, 2018)

Foram utilizados dois equipamentos para análise de vibrações: o analisador de sinal dinâmico marca Agilent, modelo 35670, ilustrado na Fig. 26. E o analisador de sinais, marca Vibtron, modelo VIB – 49 G FFT.

Figura 26 – Analisador de sinal dinâmico (Agilent)



Fonte – (Autoria própria)

O analisador de sinal dinâmico (Agilent) consiste num equipamento construído em fonte de espectro geral para analisar e avaliar problemas de ruído, vibração e acústica, problemas de rotação de máquinas e parâmetros de caracterização de sistemas de controle.

Com o analisador de sinal dinâmico foram realizados testes de impactos com o objetivo de obter as frequências naturais da bancada vibratória.

Já o analisador de sinais (Vibtron), apresentado na Fig. 27, consiste num coletor analisador de campo que foi desenvolvido para identificar falhas em diversos tipos de equipamentos através da coleta de dados das medições globais e espectros vibratórios tanto em velocidade como aceleração, ambos em RMS, com uma faixa de resposta em frequência de 1 a 5000 Hz.

Figura 27 – Coletor analisador de sinal (Vibtron)



Fonte – (Autoria própria)

Acoplado ao equipamento Vibtron foi utilizado um acelerômetro piezoelétrico industrial ICP com uma sensibilidade de 100 mV/g e um limite de aceleração de 20 g pico. Ele foi utilizado para avaliar as amplitudes e frequências de excitação emitidas pelo excitador pneumático na bancada vibratória.

Para proporcionar a vibração durante o processo de soldagem, foi utilizado o excitador pneumático (Fig. 28) Série NCR 120 (BVI Brunialti), que produz vibração mecânica quando acionado pneumáticamente numa dada faixa de pressão (2 à 6 bar).

Figura 28 – Excitador pneumático (BVI Brunialti)



Fonte – (Bunialti, 2017)

No excitador pneumático, suas vibrações são geradas por um rolo que gira a alta velocidade em uma pista de aço duro e polido. A frequência de vibração e a força dinâmica podem ser ajustadas mediante alteração da pressão de ar de suprimento.

O excitador é ligado a um compressor de ar com capacidade de pressão máxima de 10 bar. O ar sai do compressor e passa direto por um conjunto de tratamento de ar, composto por dois filtros, que tem finalidade de drenar, limpar e lubrificar o ar, possuindo ainda, um manômetro e um regulador de pressão de trabalho.

Finalmente, o fluxo de ar passa direto para o vibrador pneumático excitando a estrutura. Seguindo as especificações do fabricante para funcionamento do equipamento e dentro do que foi possível manter em termos de pressão estável no período de tempo, optou-se por quatro pressões de tratamentos (2, 3, 4 e 5 bar).

Para a realização dos testes de impacto na bancada vibratória e identificação da sua frequência natural, foi utilizado um kit de martelo de impacto (PCB Piezotronics 086C03), conforme Fig. 29.

Figura 29 – Martelo de impacto



Fonte – (Autoria própria)

O martelo de impacto, possui máxima tensão entre 20 a 30 VDC, máxima força 2224 N pk, sensibilidade 2,25 mV/N e frequência de ressonância maior ou igual a 22,5 kHz e um acelerômetro modelo PCB 3528B10 SN 34589.

A análise experimental para escolhas das vibrações de tratamento foi realizada em duas etapas. Na primeira parte do experimento, a bancada vibratória foi colocada numa mesa inercial no Laboratório de Vibrações e Instrumentação (LVI). Foram realizados testes através do martelo de impacto, aplicando 10 marteladas seguidas e captando suas médias (Average) pelo analisador de sinal dinâmico (Agilent). Para a segunda parte da análise experimental, realizada no Laboratório de Soldagem (LabSol), foi utilizado o analisador de campo (Vibtron), conforme a montagem geral da Fig. 30, para extrair as frequências que o excitador pneumático estava provocando na estrutura, de forma que com os resultados fosse possível escolher as melhores pressões e consequentemente as melhores frequências para realização do tratamento de vibração.

Figura 30 – Bancada e instrumentação de coleta dos espectros de frequência na junta, com aparelho analisador de campo (Vibtron)



Fonte – (Autoria própria)

3.5 Fase 5 – Preparação de Amostras para Análises Metalográficas e Microdureza

Foram preparados corpos de prova para análise metalográfica e ensaio de microdureza. O processo de usinagem ocorreu através de serra de fita mecânica.

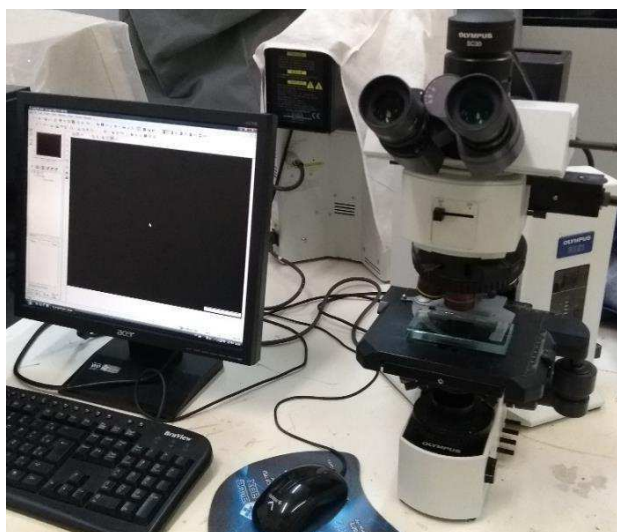
Na análise metalográfica, a superfície foi preparada através de lixamentos sucessivos, sendo empregadas lixas de granulação decrescente na sequência: 80, 120, 240, 360, 400, 500 e 600 girando a peça 90° entre as etapas de lixamento e seguindo o procedimento até que não fosse mais visual as marcas do lixamento anterior e em seguida, aplicou-se um lixamento circular aleatório. A cada mudança de lixa foi preciso observar se todos os riscos da lixa referentes ao lixamento anterior foram retirados. Para uma avaliação qualitativa desses riscos foram utilizados lupa óptica de bancada do próprio laboratório. A amostra então foi limpa e imersa por 15 segundos para ataque da superfície em solução com Nital 2% (98% álcool etílico + 2% ácido nítrico concentrado) em seguida a superfície foi posta sobre água corrente e utilizado álcool e um secador para auxiliar na secagem, ficando assim, em condições de realizar uma análise da macroestrutura do material.

Já para o ensaio de microdureza e análise microestrutural, ocorreu o lixamento até a lixa 1200 e logo em seguida, a amostra foi polida com auxílio da máquina politriz e alumina 4, 3 e 2, atacada com Nital 2% (98% álcool etílico + 2% ácido nítrico concentrado).

3.6 Fase 6 – Análise Metalográfica

Foi realizada a caracterização microestrutural do material, analisando via microscopia óptica realizada por OLYMPUS BX 51M (Fig. 31), com objetivo de poder delinear contornos de grão ferríticos e contraste entre perlita e ferrita ou rede de cementita, e além, de possível presença de bainita e martensita.

Figura 31 – Microscópio OLYMPUS BX 51M

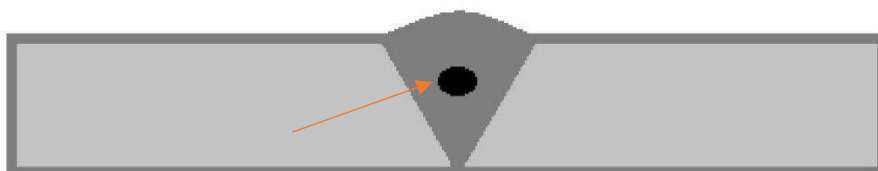


Fonte – (Autoria Própria)

Contagem de Grãos

Para realizar uma análise quanto ao refino de grãos pelo tratamento de vibração mecânica, foi realizado uma contagem de grãos para melhor quantificar os resultados nas várias condições testadas. Para realizar a coleta das imagens da contagem de grãos, foi escolhida a região central do metal de solda, conforme ilustrado na Fig. 32.

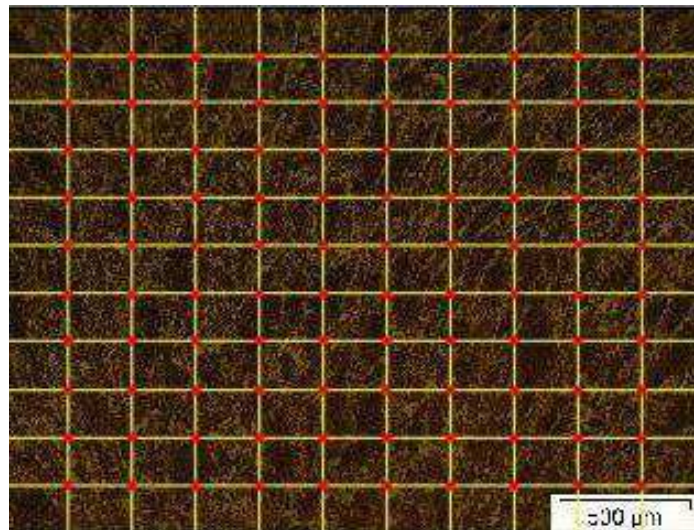
Figura 32 – Localização de contagem dos grãos, no centro do metal de solda



Fonte – (Autoria Própria)

Foram utilizadas as imagens de microestrutura das oito condições de soldagem, com aumento de 50X e nital 2%. Nas imagens capturadas, aplicou-se uma malha com dez linhas e dez colunas, totalizando 100 pontos de interceptação. Em cada ponto de cruzamento foi registrado a existência ou não de grãos, conforme ilustrado na Fig. 33.

Figura 33 – Malha 10X10 sob metalografia para contagem de grãos



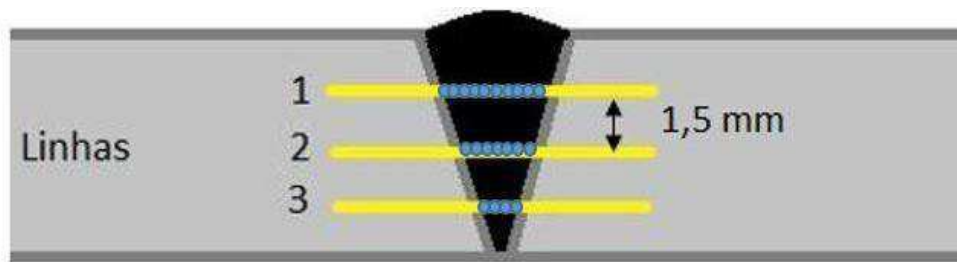
Fonte – (Autoria própria)

Ao final dessa fase, obteve-se a caracterização microestrutural do material.

3.7 Fase 7 – Ensaios Mecânicos

Foram realizados ensaios de microdureza apenas na região da zona fundida ou metal de solda, na junta soldada, conforme ilustrada na Fig. 34. Foram realizadas medições de endentação, divididas em 3 linhas, com o intuito de realizar uma análise em várias regiões no metal de solda. O espaçamento entre os pontos na mesma linha foi de 0,5 mm, já entre as linhas foi de 1,5 mm. Na linha 1, foram realizadas em média quinze endentações, na linha 2, dez endentações, e na linha 3, cinco endentações, resultando numa média de 30 endentações por cordão de solda. Permitindo a obtenção de um perfil de dureza ao longo da região do metal de solda para cada condição de soldagem. Nesse ensaio foi empregada a Microdureza Vickers (HV). As medidas Vickers foram realizadas através do microdurômetro digital FM-700 Future Tech (Fig. 35). A carga utilizada foi de 25 gf durante 15 segundos, conforme norma ASTM E 384 (ASTM, 2017).

Figura 34 – Esquema ilustrativo das linhas de medição de microdureza



Fonte – (Autoria própria)

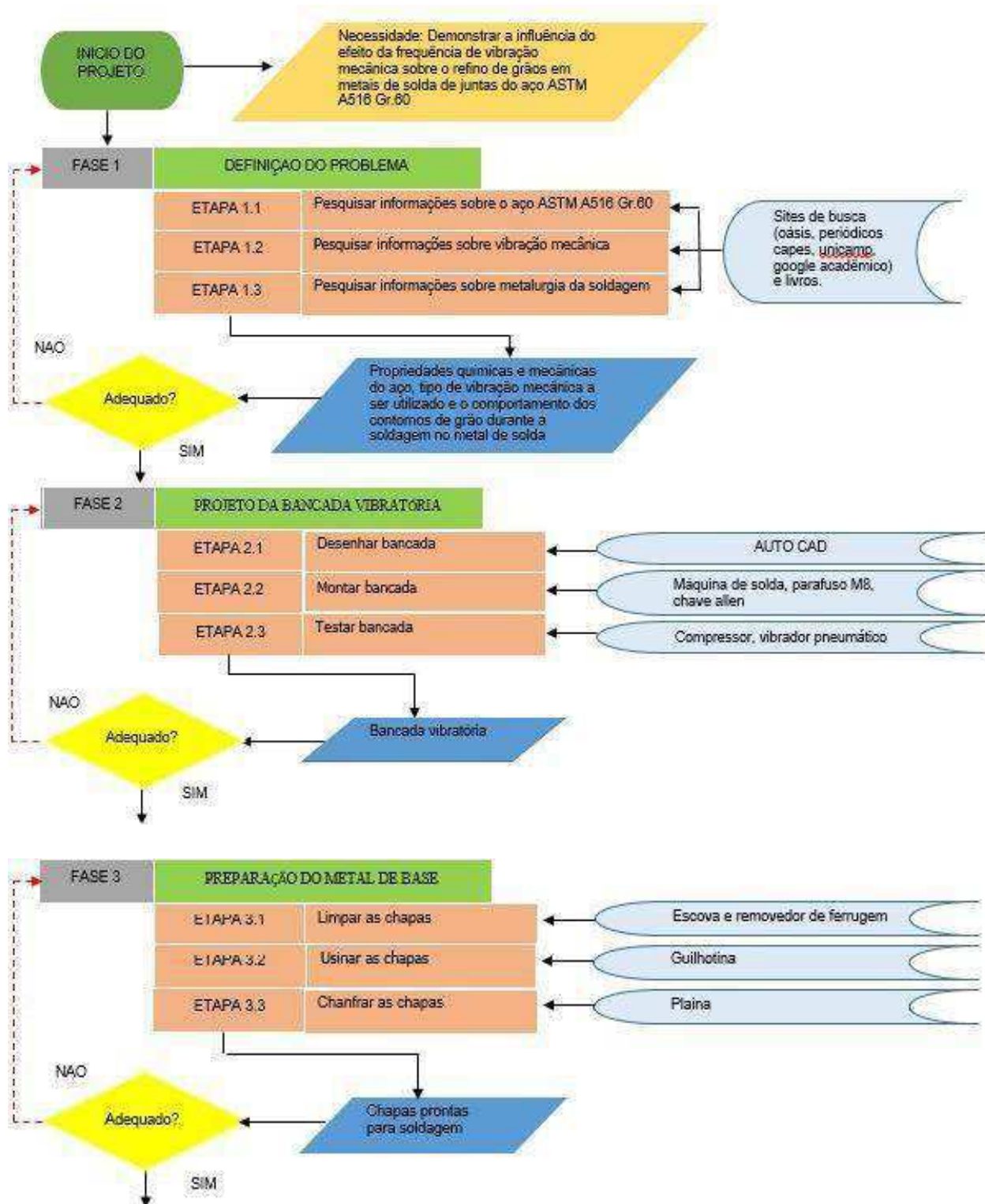
Figura 35 – Microdurômetro FM700

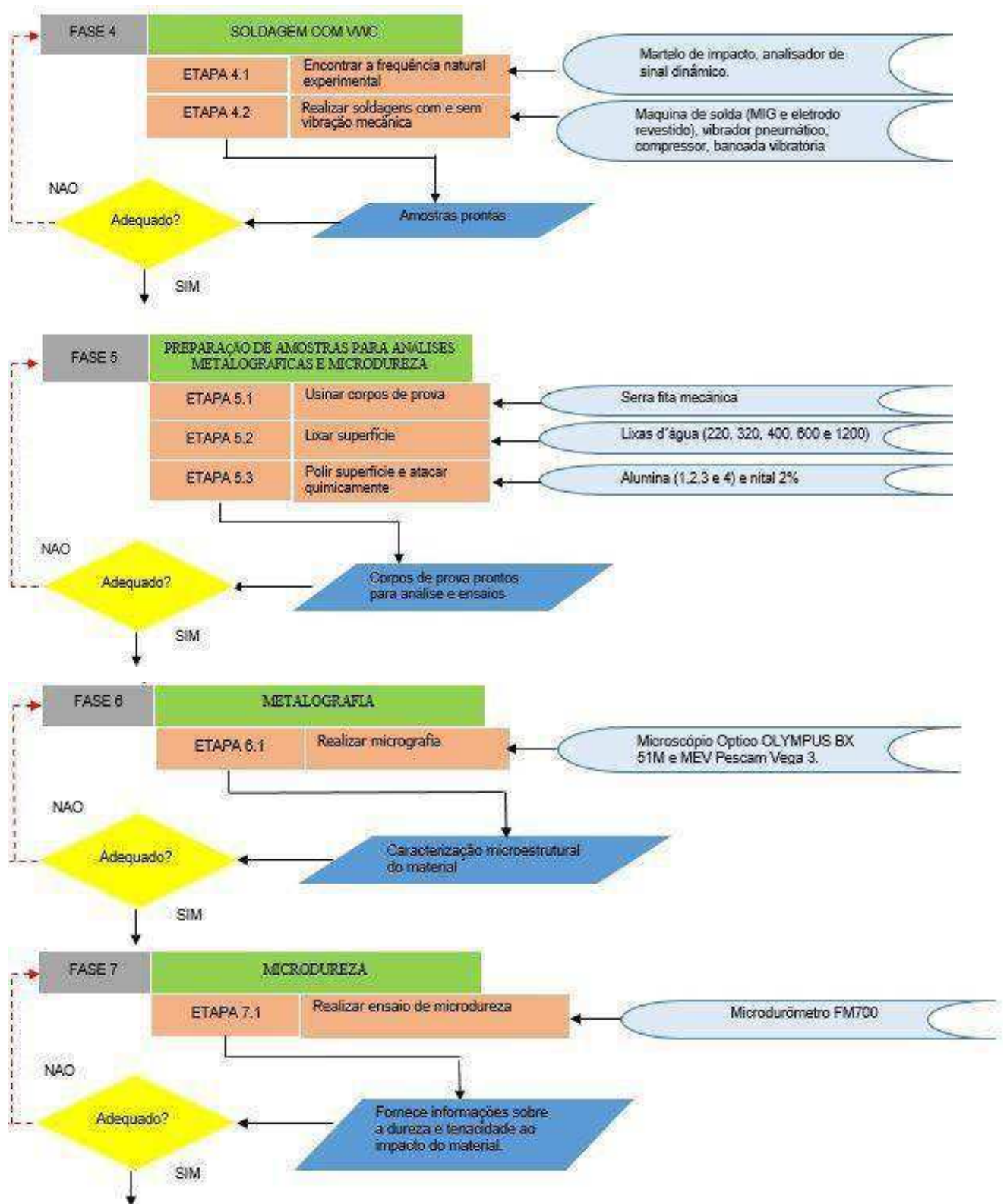


Fonte – (Autoria própria)

No fluxograma (Fig. 36), estão melhor detalhados as etapas e fases descritas acima incluindo os materiais, equipamentos e a metodologia utilizada para atender à necessidade do projeto de dissertação.

Figura 36 – Fluxograma do projeto de dissertação.







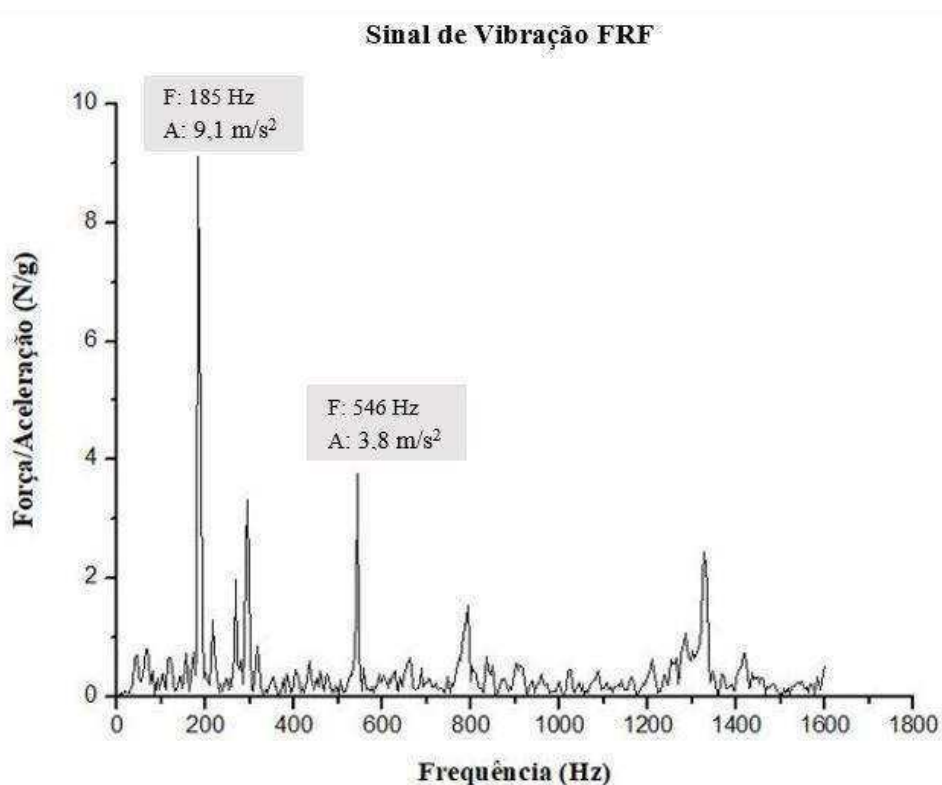
CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Determinação da Frequência Natural Experimental da Bancada Vibratória

Para fins da determinação das frequências naturais em vibração livre, foram realizados testes experimentais através do martelo de impacto na estrutura de testes fixada numa mesa inercial do LVI, aplicando 10 marteladas seguidas e captando suas médias (Average) pelo analisador de sinal dinâmico (Agilent). A Fig. 37 ilustra os resultados obtidos para a bancada vibratória:

Figura 37 – Espectro da Função Resposta em Frequência (FRF) da bancada vibratória



Fonte – (Autoria própria)

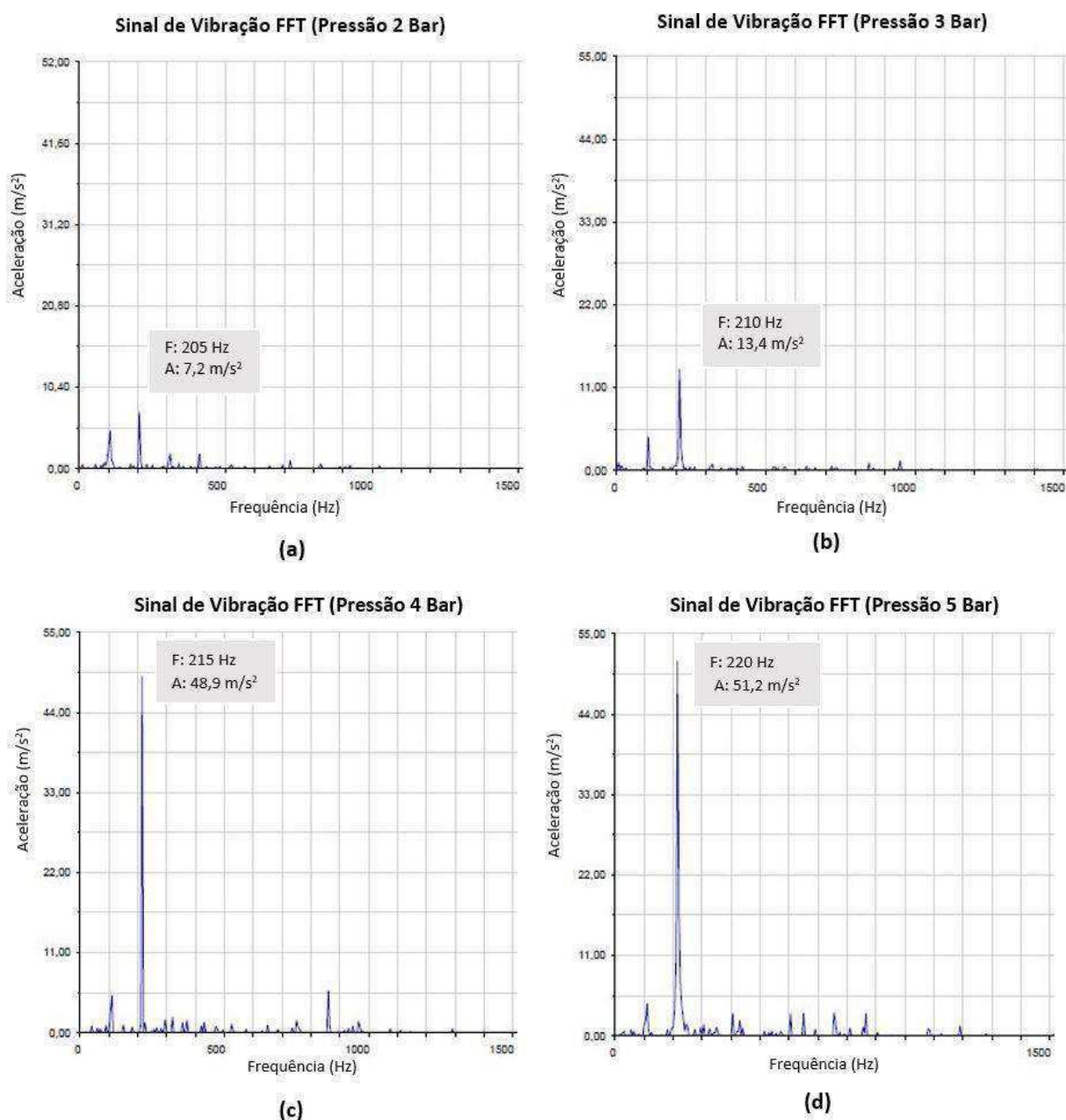
O espectro da FRF (Função Resposta em Frequência) apresentou com mais evidência três picos, correspondentes às três primeiras frequências naturais. A primeira encontrada foi de 185 Hz, a segunda de 300 Hz e a terceira em 546 Hz. Quando o sistema foi submetido a excitação forçada na bancada vibratória (com pressões variando de 2 a 5 bar), foi utilizada como referência a primeira frequência ressonante de 185 Hz, pois foi a

que representou maior amplitude. Portanto, o tratamento por vibração mecânica terá melhores resultados quando estiver próximo a esta frequência, porém fora da frequência ressonante.

4.2 Determinação do Espectro de Frequências do Excitador Pneumático na Bancada Vibratória

As Fig. 38 (a, b, c e d) apresentam os espectros FFT (Fast Fourier Transform), ou seja, a Transformada de Fourier, para obtenção das amplitudes e frequências de vibrações geradas pelo excitador pneumático utilizando-se pressões de 2, 3, 4 e 5 bar, aplicadas na bancada vibratória.

Figura 38 – Espectro de vibração FFT em Aceleração (A) versus Frequência (F) da bancada vibratória, obtido para as pressões de tratamento: a) 2 bar; b) 3 bar; c) 4 bar e d) 5 bar.



Para o espectro da Fig. 38a, utilizando-se 2 bar de pressão, observa-se que o maior pico de aceleração foi de $7,2 \text{ m/s}^2$ correspondendo a uma frequência de 205 Hz, porém à medida que as pressões vão aumentando as amplitudes e frequências relativas desses picos vão aumentando (Fig. 38 b-d). Isto indica que houve uma decomposição das forças de excitação, que foram variando à medida que a excitação aumentava (210, 215 e 220 Hz) junto com os valores de amplitudes de aceleração. Na frequência de 220 Hz, pode-se observar que houve uma maior amplitude do pico, o que indica uma região típica de ressonância.

No quadro 10, temos as respectivas pressões, frequência e amplitudes de aceleração para cada condição de soldagem.

Quadro 10 – Valores de pressão, frequência e aceleração para cada condição de soldagem

Condição de Soldagem	Processo de Soldagem	FN (Hz)	P (Bar)	F (Hz)	A (m/s^2)
C1	Soldagem SMAW manual sem vibração	-	-	-	-
C2	Soldagem SMAW manual com vibração	185	2	205	7,2
C3	Soldagem SMAW manual com vibração	185	3	210	13,4
C4	Soldagem GMAW semi-automatizado sem vibração	-	-	-	-
C5	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	2	205	7,2
C6	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	3	210	13,4
C7	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	4	215	48,9
C8	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	5	220	51,2

FN = Frequência Natural

P = Pressão

F = Frequência

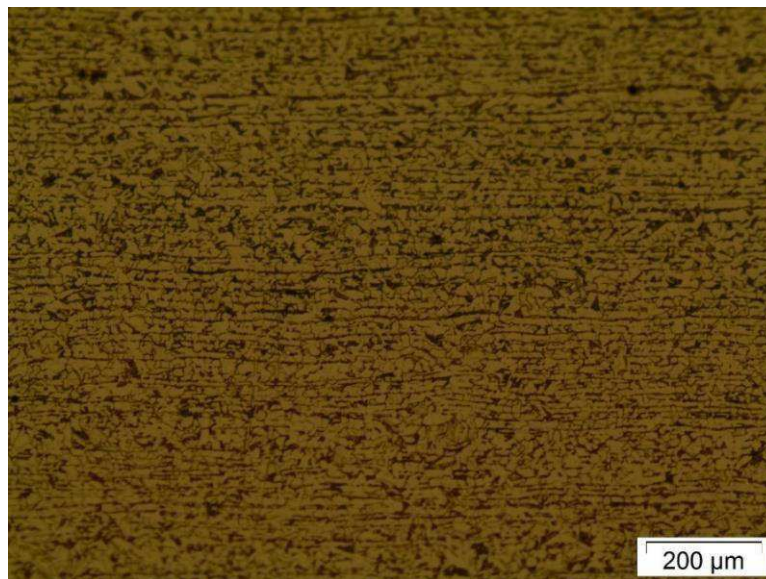
A = Amplitude

Fonte – (Autoria própria)

4.3 Análise Microestrutural do Metal de Base

A Fig. 39 apresenta a microestrutura do metal de base que apresenta-se semelhante à existente na literatura sobre o mesmo, composta por grãos ferríticos em maior quantidade e contornos de grãos perlíticos em menor proporção. O aço apresenta ainda a direção de laminação do processo de fabricação (CRUZ, 2006)

Figura 39 – Microestrutura do Aço ASTM A516 Gr.60: Aumento 100X e Nital 2%

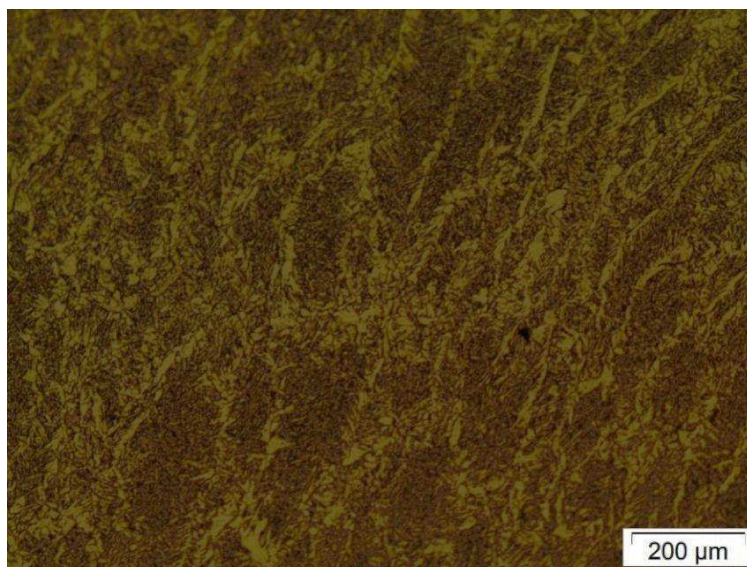


Fonte – (Autoria própria)

4.4 Microestruturas dos Metais de Solda obtidos pelo Processo SMAW

Na Fig. 40 é observado a microestrutura do metal de solda sem vibração (C1):

Figura 40 – Microestrutura da amostra sem vibração (C1): Aumento 100X com nital 2%



Fonte – (Autoria própria)

Pode-se observar uma microestrutura de grãos colunares, de microconstituintes ferríticos e perlíticos, característico de uma solda monopasse de um aço ferrítico

A Figura 41 apresenta a microestrutura da amostra com vibração correspondente a 205 Hz (C2). Nota-se que com o início da vibração, ocorreu uma alteração na granulometria com um aumento na proporção de grãos e do microconstituente Ferrita Primária de Contorno de Grãos – PF (CG), região clara, entretanto com uma maior homogeneidade da microestrutura.

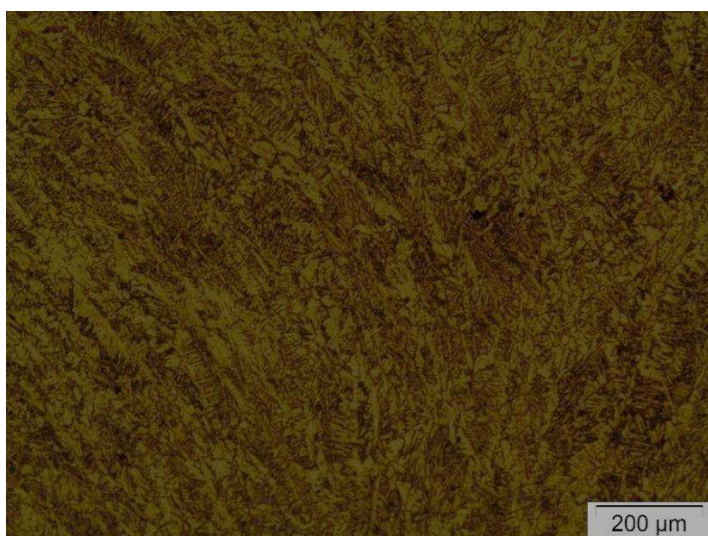
Figura 41 – Microestrutura da amostra com 205 Hz (C2): Aumento 100X com nital 2%



Fonte – (Autoria própria)

A Figura 42 apresenta a granulometria do metal de solda obtido com uma frequência de vibração de 210 Hz (C3).

Figura 42 – Microestrutura da amostra com frequência de 210 Hz (C3): Aumento 100X com nital 2%



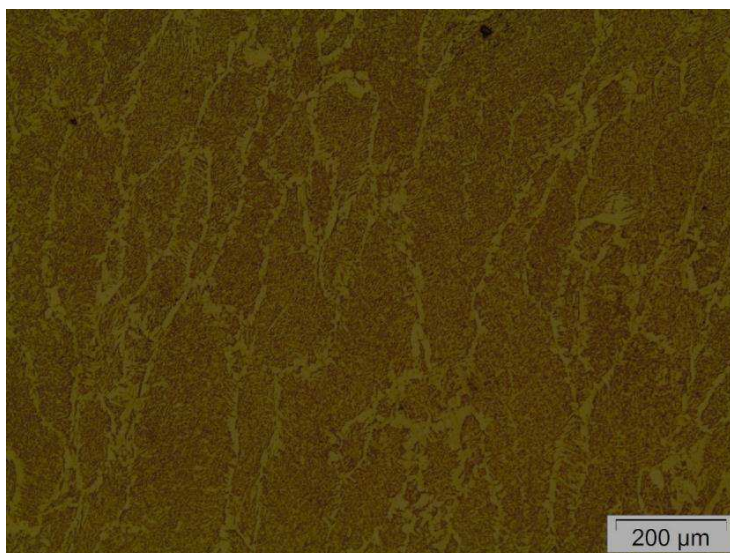
Fonte – (Autoria própria)

Pode-se verificar que continuou ocorrendo a formação de PF (CG), com tendência ao encurvamento dos grãos no metal de solda. Provavelmente devido a frequência de excitação estar próxima a frequência natural experimental da bancada vibratória, provocando uma elevada energia na poça de fusão, reduzindo a taxa de resfriamento durante a solidificação do metal de solda e favorecendo uma maior formação de PF (CG).

4.5 Microestruturas dos Metais de Solda pelo Processo GMAW

Na Fig. 43 é observado a microestrutura para a condição de soldagem sem vibração (C4):

Figura 43 – Microestrutura da amostra sem vibração (C4): Aumento 100X com nital 2%

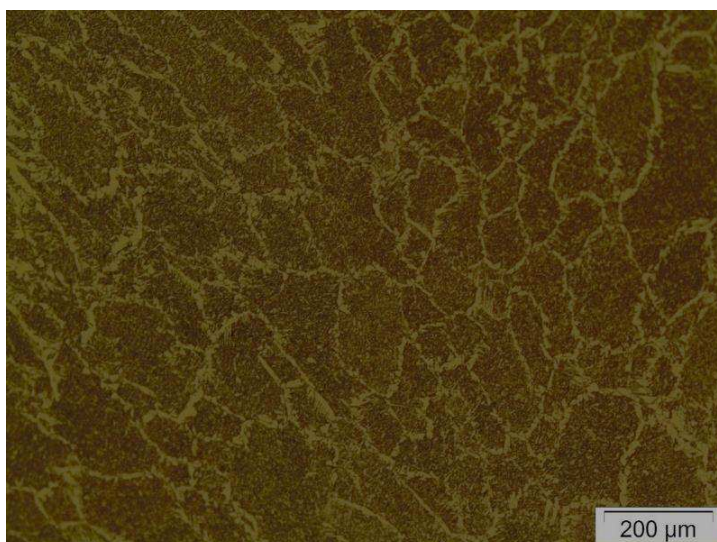


Fonte – (Autoria própria)

O metal de solda obtido sem vibração, obtido com o processo GMAW apresenta também uma microestrutura colunar, entretanto com uma menor proporção de PF (CG) e maior proporção de Ferrita Acicular (AF). Provavelmente devido aos maiores percentuais de C, Si e Mn presentes no metal de adição. Assim como ALVES (2016), utilizando o processo de soldagem GMAW e arame AWS ER 70S - 6, observou a mesma proporção dos microconstituintes, com menor proporção de PF (CG) e maior de AF.

A Figura 44 apresenta a microestrutura da amostra com vibração correspondente a 205 Hz (C5). Nota-se que houve nitidamente uma alteração na morfologia e granulometria da microestrutura, proporcionando grão menos colunares (quase equiaxiais) e com menor dimensão.

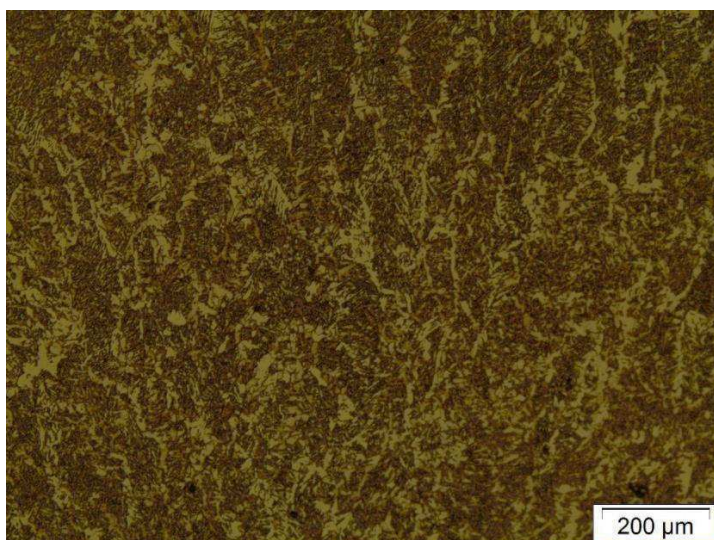
Figura 44 – Microestrutura da amostra com 205 Hz (C5): Aumento 100X com nital 2%



Fonte – (Autoria própria)

A Figura 45 apresenta a granulometria do metal de solda obtido com uma frequência de vibração de 210 Hz (C6). Verifica-se uma maior redução do grão e uma morfologia ainda mais equiaxial, promovida pelo acréscimo na frequência de vibração.

Figura 45 – Microestrutura da amostra com frequência de 210 Hz (C6): Aumento 100X com nital 2%

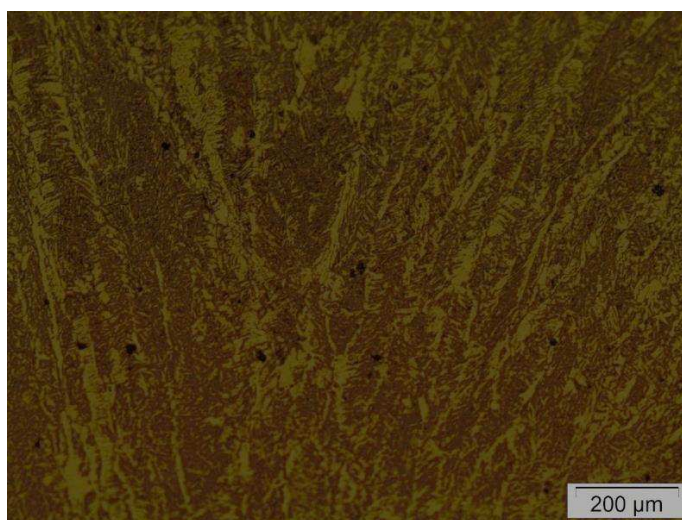


Fonte – (Autoria própria)

A Figura 46 apresenta a microestrutura do metal de solda obtido com uma frequência de vibração de 215 Hz (C7). Observa-se que mesmo que tenha havido uma redução no tamanho do grão, observou-se nesse caso uma maior proporção de Ferrita

Primária de Contorno de Grãos – PF (CG). Este resultado, em princípio não esperado, pode ser atribuído ao elevado nível de energia promovido pela vibração muito elevada que pode ter aumentado demasiadamente a temperatura da poça de fusão e promovido uma redução na taxa de resfriamento o que possibilita maior tempo para a nucleação da ferrita nos contornos de grãos da austenita. FONSECA (2016) obteve resultado similar, utilizou o processo de soldagem GMAW e o aço ao carbono ARBL com 12,5 mm de espessura, realizou a vibração simultânea a soldagem do material, constatando um refino do metal de solda e correspondente redução de dureza.

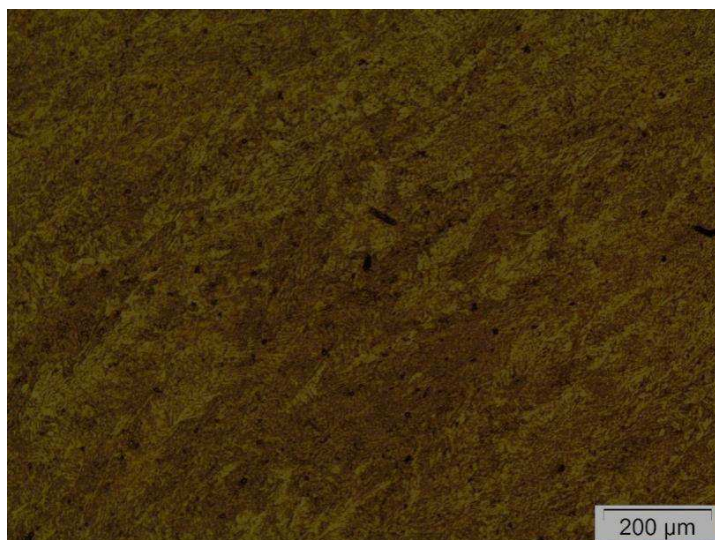
Figura 46 – Microestrutura com frequência de 215 Hz (C7): Aumento 100X com nital 2%



Fonte – (Autoria própria)

Esta hipótese é reforçada com o resultado da microestrutura obtida com uma frequência de vibração de 220 Hz (C8), apresentado na Figura 47. Pode-se verificar a homogeneização da microestrutura e elevada proporção de Ferrita Primária (PF) promovida pela possível redução na taxa de resfriamento, o que propiciou a geração da mesma. MACIEL (2014) obteve resultado parecido, utilizando o aço ASTM A-131, submeteu o mesmo a vibração durante a soldagem, obtendo refino no metal de solda.

Figura 47 – Microestrutura da amostra com frequência de 220 Hz (C8): Aumento 100X com nital 2%



Fonte – (Autoria própria)

4.6 Contagem de Grãos

4.6.1 Contagem de Grãos para o Processo SMAW

A Figura 48 apresenta a contagem de grãos dos metais de solda em função da frequência de vibração obtidos pelo processo SMAW.

Figura 48 – Quantidade de grãos versus frequência de vibração



Fonte – (Autoria própria)

Observa-se o aumento do número de grãos ao se aplicar uma vibração com a frequência de 205 Hz, como era de se esperar pela aparência da microestrutura vista anteriormente. A contagem de grãos evidenciou um refino de até 25% dos grãos na

frequência de 205 Hz. Observa-se também que a partir daí não houve mudança na granulometria. Assim como MACIEL (2014), que evidenciou nos seus experimentos através do processo GMAW, utilizando o aço ASTM A-131 com espessura de 7,94 mm, realizou o tratamento de vibração durante a soldagem, obtendo refino de grãos no metal de solda. Deve-se ressaltar que nesse experimento foi previsto realizar as soldagens com outras condições nas frequências de 215 e 220 Hz, porém durante o processo de soldagem manual sempre ocorriam oscilações do arco e as amostras foram descartadas.

4.6.2 Contagem de Grãos para o Processo GMAW

A Fig. 49 apresenta a relação entre a quantidade de grãos e a frequência de vibração utilizada aplicando-se o processo GMAW.

Figura 49 – Quantidade de grãos versus condição de soldagem



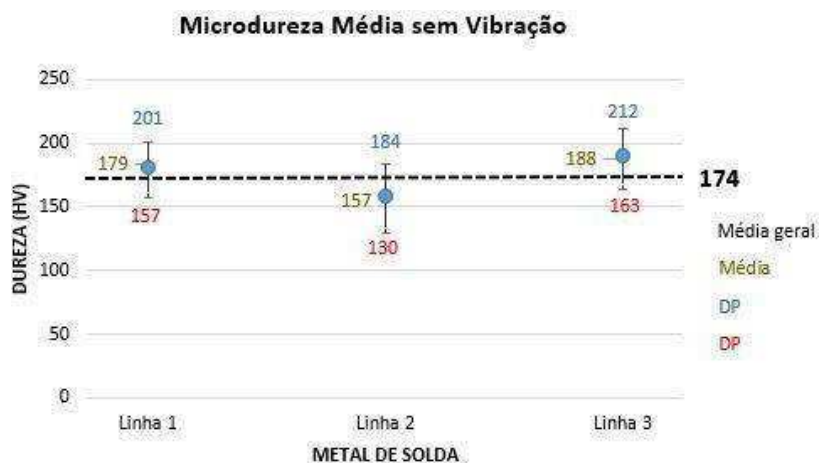
Fonte – (Autoria própria)

Conforme a Fig. 49, observa-se o significativo aumento na quantidade de grãos ao se aumentar a frequência de vibração sendo observado um maior refino na frequência de 220 Hz (113%) em relação a condição sem vibração até atingir a frequência de 210 Hz. A partir desse valor observa-se que a vibração não promoveu refino significativo no metal de solda. Resultado semelhante foi obtido por FONSECA (2016) que utilizou o processo de soldagem GMAW e o aço ao carbono ARBL com 12,5 mm de espessura, realizou a vibração simultânea a soldagem do material, promovendo um refinamento e distribuição homogênea entre as fases ferrita e perlita.

4.7 Microdureza do Processo SMAW

As figuras (50 a 52) apresentam os perfis de microdureza média para as três condições de soldagem. Tem-se o valor médio e seu respectivo desvio padrão para cada linha de medição. Inicialmente, é apresentado o perfil de microdureza para a condição sem vibração, conforme a Fig. 50:

Figura 50 – Perfil de microdureza média para C1

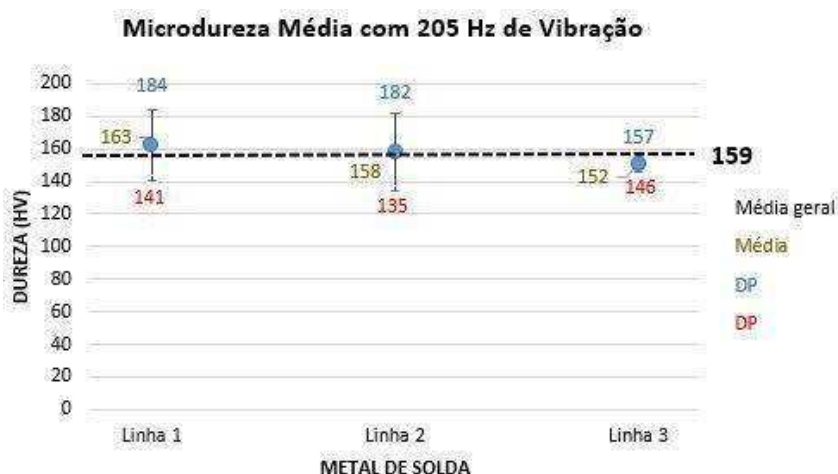


Fonte – (Autoria própria)

Como já era previsto inicialmente, sem a vibração, o metal de solda possui uma microestrutura heterogênea, comprovado pelo desvio padrão médio de 24 HV, gerando um perfil de microdureza com variações significativas. Já a média geral de microdureza entre as linhas, apresentou um valor de 174 HV.

A Fig. 51 apresenta o perfil de microdureza dos metais de solda utilizando-se uma vibração de 205 Hz:

Figura 51 – Perfil de microdureza para a C2

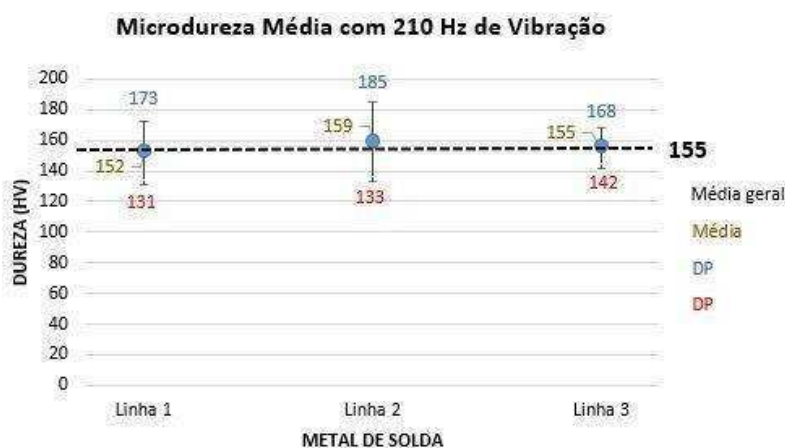


Fonte – (Autoria própria)

O início da vibração na frequência de 205 Hz, começa a produzir uma melhor distribuição na microestrutura do material, tornando mais homogêneo no metal de solda, resultando num perfil de microdureza nos pontos da linha um pouco mais estáveis, comprovado pelo desvio padrão médio menor, de 17 HV, conforme Fig. 51. Quanto a média geral de microdureza entre as linhas, foi de 159 HV, menor que a condição sem vibração, provavelmente devido a uma maior nucleação de PF (CG), provocando uma redução na dureza.

A Fig. 52 apresenta o perfil de microdureza para a frequência de 210 Hz,

Figura 52 – Perfil de microdureza para a C3



Fonte – (Autoria própria)

Com a frequência de 210 Hz, começa a produzir uma melhor distribuição na microestrutura do material, havendo uma melhor distribuição no metal de solda, resultando num perfil de microdureza nos pontos da linha um pouco mais estáveis, comprovado pelo desvio padrão médio menor, de 20 HV. Já a média geral de microdureza entre as linhas, apresentou um valor de 155 HV, conforme Fig. 52. Como citado anteriormente, a vibração por estar próximo a frequência de ressonância, pode ter inserido uma elevada energia na poça de fusão, reduzindo a taxa de resfriamento no metal de solda, favorecendo a nucleação de PF (CG), reduzindo a dureza na zona fundida.

Ao final é apresentado um perfil de microdureza médio entre todas as condições de soldagem (Fig. 53), para melhor comparar cada situação:

Figura 53 – Perfil de microdureza média para cada condição de soldagem SMAW



Fonte – (Autoria própria)

O resultado mostra que na frequência de 205 Hz, a média de dureza foi de 159 HV, encontra-se dentro dos limites de desvio padrão médio, portanto não podemos considerar que ocorreu uma redução na dureza. Com a quebra de grãos o material se tornou mais homogêneo, comprovado pelo desvio padrão médio que reduziu 27%, em relação a condição sem vibração. Na frequência de 210 Hz, novamente a dureza média obteve um valor de 155 HV, ficando dentro da faixa de limites do desvio padrão médio. A homogeneidade na microestrutura foi mantida, com uma redução no desvio padrão médio de 23% em relação a condição sem vibração.

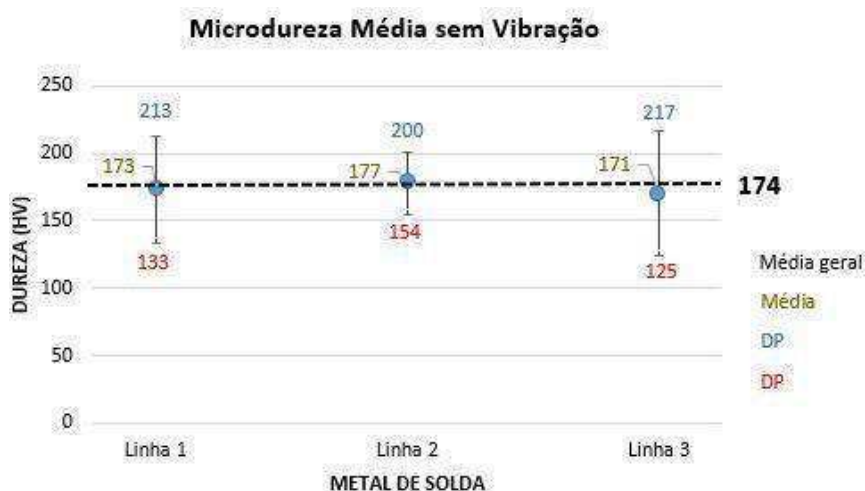
Alguns pesquisadores relatam uma redução na dureza, entre eles, FONSECA (2016) que utilizou o processo de soldagem GMAW e o aço ao carbono ARBL com 12,5

mm de espessura, realizou a vibração simultânea a soldagem do material, constatando uma redução de 7% no perfil de microdureza do metal de solda, e promovendo um refinamento e distribuição homogênea entre as fases claras e escuras. Já MOSTAFAPOUR (2013) demonstrou que quando se trabalha na frequência natural (ressonância) do sistema, ocorre redução das propriedades mecânicas do material, incluindo a dureza.

4.8 Microdureza do Processo GMAW

As figuras (54 a 58) apresentam os perfis de microdureza média para as cinco condições de soldagem. Tem-se o valor médio e seu respectivo desvio padrão para cada linha de medição. Inicialmente, é apresentado o perfil de microdureza para a condição sem vibração, conforme a Fig. 54:

Figura 54 – Perfil de microdureza média para C4

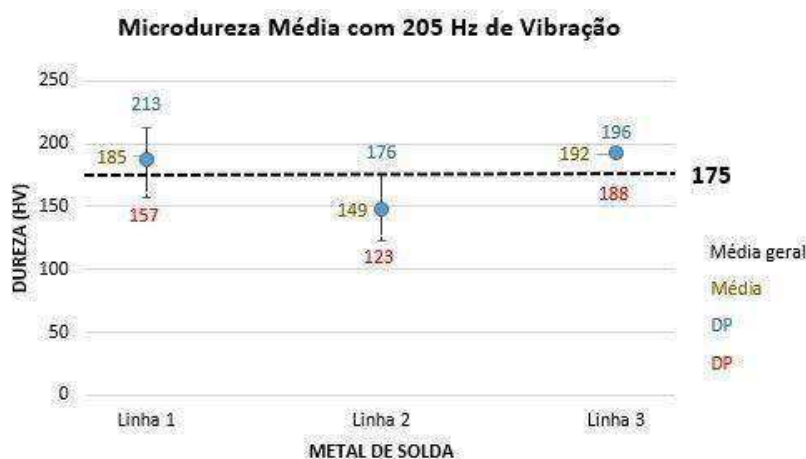


Fonte – (Autoria própria)

Como já era previsto inicialmente, sem a vibração, o metal de solda possui uma microestrutura heterogênea, comprovado pelo desvio padrão médio de 34 HV, gerando um perfil de microdureza com variações significativas. Já a média geral de microdureza entre as linhas, apresentou um valor de 174 HV.

Para a frequência de 205 Hz, é apresentado o perfil de microdureza, conforme Fig. 55:

Figura 55 – Perfil de microdureza para C5

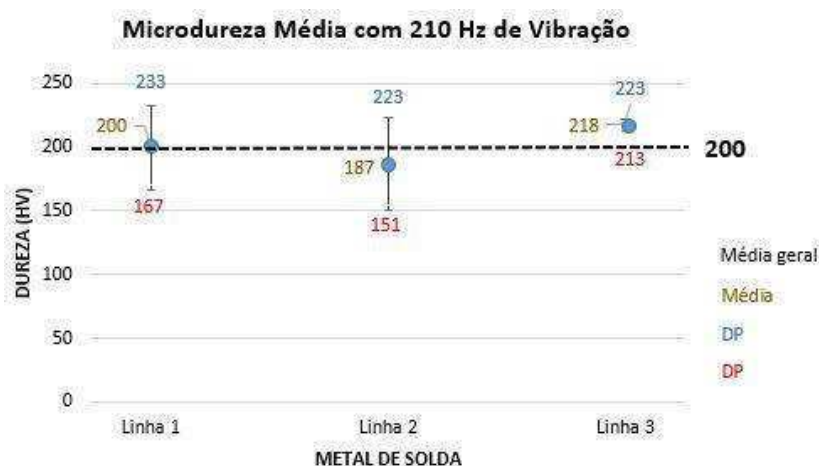


Fonte – (Autoria própria)

Na frequência de 205 Hz, começa a produzir uma melhor distribuição na microestrutura do material, lhe tornando mais homogêneo no metal de solda, resultando num perfil de microdureza nos pontos da linha um pouco mais estáveis, comprovado pelo desvio padrão médio menor, de 29 HV e a média geral de microdureza entre as linhas, apresentou um valor de 175 HV, conforme Fig.55. Quanto a média de microdureza entre as linhas, não apresentou diferença com relação ao metal de solda sem vibração.

Para a frequência de 210 Hz, é apresentado o perfil de microdureza, ilustrado na Fig. 56:

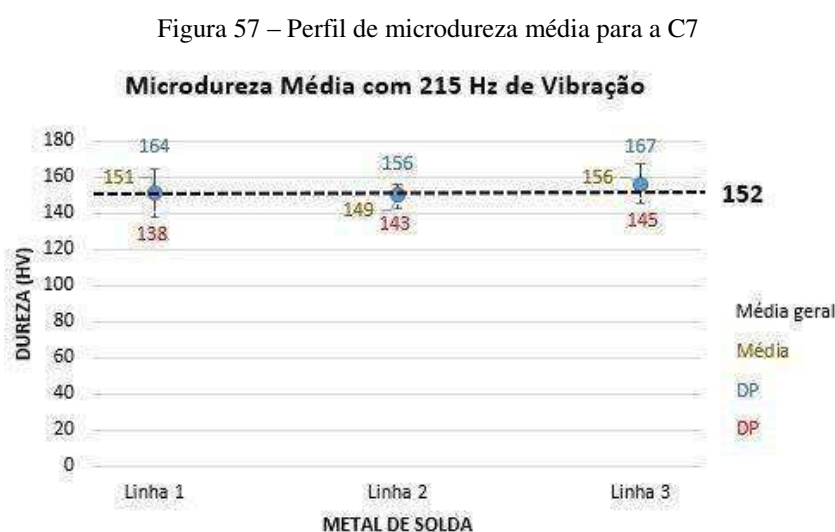
Figura 56 – Perfil de microdureza média para a C6



Fonte – (Autoria própria)

O resultado apresentado para a frequência de 210 Hz, demonstra mais uma vez, que a vibração produz uma melhor distribuição na microestrutura do material, tornando a região da poça de fusão mais homogênea, apresentando um desvio padrão médio de 30 HV, em relação a condição sem vibração, ilustrada na Fig. 56. A média geral do perfil de microdureza entre as linhas do metal de solda foi 200 HV. Esse aumento é justificado pelo melhor refino de grãos, já visto na análise microestrutural do metal de solda em combinação com a formação de AF, que aumenta a dureza.

Para a frequência de 215 Hz, é apresentado o perfil de microdureza, ilustrado na Fig. 57:



Fonte – (Autoria própria)

Essa condição foi a que atingiu melhor resultado de homogeneidade da microestrutura, apresentando um desvio médio de dureza de 10 HV, conforme ilustrada na Fig. 57. Entretanto, a média geral do perfil de microdureza apresentou uma queda para 152 HV. Essa queda de dureza confirma a maior presença de Ferrita Primária de Contorno de Grão – PF (CG) para este nível de vibração.

Para a frequência de 220 Hz, é apresentado o perfil de microdureza, ilustrado na Fig. 58:

Figura 58 – Perfil de microdureza média para a C8



Pode-se verificar que para esse nível de vibração também houve uma queda no valor de microdureza, apresentando uma média geral de 162 HV, confirmando o que foi afirmado no caso anterior. O desvio padrão médio atingiu a segundo melhor resultado para todas as condições, com 18 HV, demonstrando o quanto a vibração torna a estrutura homogênea. A Fig. 59 apresenta um perfil de microdureza médio dos metais de solda para cada frequência de vibração utilizando o processo GMAW.

Figura 59 – Perfil de microdureza média para cada condição de soldagem GMAW



O resultado mostra que na frequência de 205 Hz, foi mantida a dureza, assim como nas demais frequências, pois a dureza média de todas as frequências de soldagem,

encontra-se na faixa dos limites de desvio padrão médio do metal de solda, em relação a condição sem vibração. Para a frequências de 205 e 210 Hz, o desvio padrão médio, se manteve com redução em torno de 15% para ambos casos em relação a condição sem vibração. Já na frequência de 215 e 220 Hz, foi observado uma maior redução no desvio padrão médio, em torno de 71% e 47%, respectivamente, em relação a condição sem vibração. Esses resultados deixam evidente, a influência da vibração no refino de grãos no metal de solda, tornando a estrutura mais homogênea.

Alguns pesquisadores relataram nos seus estudos resultados similares. Como MACIEL (2014) que realizou experimentos com o processo GMAW, utilizando o aço ASTM A-131 com espessura de 7,94 mm, realizou o tratamento de vibração durante a soldagem, obtendo refino do metal de solda e uma redução no perfil de microdureza de 8,2 %. Já MOSTAFAPOUR (2013) demonstrou que quando se trabalha próximo da frequência natural (ressonância) do sistema, ocorre redução das propriedades mecânicas do material, incluindo a dureza.

No quadro 11, é ilustrado todos os resultados obtidos para as oito condições de soldagem, para melhor correlacionar os dados apresentados em cada condição.

Quadro 11 - Valores de todos os resultados obtidos para cada variável

Condição de Soldagem	Processo de Soldagem	FN (Hz)	P (Bar)	F (Hz)	A (m/s ²)	QG	DM (HV)	DPMD (HV)
C1	Soldagem SMAW manual sem vibração	-	-	-	-	76	174	24
C2	Soldagem SMAW manual com vibração	185	2	205	7,2	95	159	17
C3	Soldagem SMAW manual com vibração	185	3	210	13,4	90	155	20
C4	Soldagem GMAW semi-automatizado sem vibração	-	-	-	-	45	174	34
C5	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	2	205	7,2	73	175	29
C6	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	3	210	13,4	92	200	30
C7	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	4	215	48,9	93	152	10
C8	Soldagem GMAW semi-automatizado com vibração	185	5	220	51,2	96	162	18

FN = Frequência Natural

P = Pressão

F = Frequência

A = Amplitude

QG = Quantidade de Grãos

DM = Dureza Média

MPMD = Desvio Padrão Médio de Dureza

Fonte – (Autoria própria)

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A partir dos resultados apresentados e análises realizadas, foi percebido que a vibração resultou no refino de grãos do metal de solda em todas as condições de soldagem, chegando a refinar em torno de 113% para uma amplitude de 51,2 m/s² e frequência de 220 Hz no processo GMAW, em relação a condição sem vibração. Já no processo SMAW a redução chegou a 25% com amplitude 7,2 m/s² e frequência de 205 Hz.

A vibração mecânica, em todas as condições de soldagem realizadas, promoveu uma melhor distribuição dos grãos na poça de fusão, tornando a microestrutura mais homogênea, ocorrida pelo refino no metal de solda. As reduções nos desvios padrões médios de dureza chegaram a 71% para uma amplitude de 48,9 m/s² e frequência de 215 Hz, no processo GMAW. Enquanto que no processo SMAW, o desvio padrão médio de microdureza reduziu 27%, com amplitude 7,2 m/s² e frequência de 205 Hz, em relação a condição sem vibração.

A dureza em todas as condições de soldagem foi mantida, houve uma variação, mas como encontra-se na faixa de limite do desvio padrão médio de cada condição de soldagem, não podemos considerar como redução ou aumento, em relação a condição sem vibração.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

Para sugestões como trabalhos futuros nesta mesma linha de pesquisa, segue:

Realizar o tratamento VWC e verificar a redução das regiões da junta soldada, em especial a zona termicamente afetada e zona fundida.

Verificar a influência do tratamento VWC sobre a tenacidade ao impacto, Ensaio Charpy, do metal de solda e da zona termicamente afetada.

Realizar o tratamento VWC com o objetivo de analisar a redução das distorções (longitudinal, transversal e angular) de soldagem, através da mesa de coordenadas.

Verificar a influência do tratamento VWC sobre as tensões residuais de uma junta soldada.

Realizar a tenacidade à fratura do tratamento VWC.

REFERÊNCIAS

- ALVES, S. M. S.; **Características microestruturais e mecânicas de juntas soldadas em multipasses pelo processo GMAW de um aço API 5L X65Q**. 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- ALBERTI, E. A.; SILVA, L. J.; D' OLIVEIRA, A. S. C. M. Manufatura Aditiva: O Papel da Soldagem nesta Janela de Oportunidade. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 2, p. 190-198, 2014.
- ALIBABA. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/gdigger-spherical-tank-2016717909.html> - Acesso em 26/06/2017.
- AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, **Welding Handbook** – Fundamentals of Welding, vol. 1, 7a ed., 373 p., 1994.
- ARANGO, D. **Efeito da Inoculação na Macroestrutura de Grãos de Ligas Al-Si Obtidas por Solidificação Unidirecional**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade de São Paulo, São Paulo.
- AOKI, S.; NISHIMURA, T.; HIROI, T. Reduction Method for Residual Stress of Welded Joint using Random Vibration. **Nuclear engineering and design**, v. 235, n. 14, p. 1441-1445, 2005.
- BARBEDO, N. D. **Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW Utilizando Aço ASTM A-36 para Verificar a Soldabilidade, Propriedades Metalúrgicas e Geométricas, e Resistência Mecânica**. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.2011.
- BAUERNFEIND, D., ROMOTOWSKI, J., HABERL, J., MORI, G., BERNAUER, J. AND SALLER, G., 2004, **Stress Corrosion Cracking of Highly Alloyed Austenitic Stainless Steels in Chloride Media**, University of Leoben, Austria, 8p.

BOVEN, G.V., CHEN, W. AND ROGGE, R., 2007, **The Role of Residual Stress in Neutral Ph Stress Corrosion Cracking of Pipeline Steels - Part I: Pitting and Cracking Ocurrence**”, Acta Materialia, Vol. 55, pp. 29-42.

BONAL TECHNOLOGIES INC., Disponível em <http://www.bonal.com/>, 2003 - Acesso em julho de 2017.

BONAL TECHNOLOGIES, **META-LAX Vibration Stress Relief**. Disponível em: <http://www.meta-lax.com/> - 2009 - Acesso em março de 2017.

(CBCA, 2014) <http://www.cbca-acobrasil.org.br/site/construcao-em-aco-acos-estruturais.php>

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**. São Paulo, McGraw – Hill do Brasil, 2005.

CHUVAS, T. C., **Estudo da Influência dos Parâmetros de Tratamento de Alívio das Tensões Residuais por Vibração Mecânica em Juntas Soldadas a Plasma**. 2012. 104 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, 2012.

(CIMM, 2017) http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6339-acos-carbono-estruturais.WSMkTOvyu1s

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2008. 672 p.

CORRADI, D. R. et al; **Influência da Oscilação Eletromagnética do Arco Elétrico na Soldagem Gmaw do Aço Inoxidável Austenítico Aisi 316l**. 2015. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, BA, 2015.

COSTA, P. H. S. **Estudo dos Processos TIG Alimentado e MIG-P CC+ Aplicados ao Passe de Raiz na Liga AA5052**. 2015. 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

Mecânica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

COSTA, A. L. V.; **Aços e ligas especiais**. Mei – 3º Ed. – São Paulo: Blucher, Ltda. p. 425. 2010.

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

CRUZ, R. L. S., **Avaliação dos Efeitos da Técnica da Dupla Camada na Soldagem do Aço ASTM A516 Gr. 60**, 2006. 114 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE. 2006.

CUNHA, Henrique Miguel. **Caracterização de juntas soldadas de Aços Carbono e Aços Inoxidáveis utilizando arame AWS E309L T1-1**. 2016. 122 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira. Ilha Solteira, SP, 2016.

DA CUNHA, T. V; BOHÓRQUEZ, Carlos Enrique Niño. Ultrasound in arc welding: a review of application methods and its effects. **Soldagem & Inspeção**, v. 19, n. 3, p. 221-230, 2014.

DA CUNHA, Tiago Vieira. **Proposta de Roteiro para a Determinação das Variáveis de Soldagem do Processo TIG Pulsado Aplicado à Soldagem de Chapas Finas**. 2013. **Soldagem & Inspeção**. São Paulo, Vol. 18, N°. 01, p. 064-071, Jan/Mar 2013.

DA SILVA, E. J.; DE AZEVEDO, A. G. L.; DE ANDRADE, R. S. **Análise das Características Metalúrgicas das Juntas Soldadas com Eletrodos Básicos e Impermeáveis**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, BA, 2015.

DA SILVA RESENDE, P. V.; DE QUEIROZ JÚNIOR, M. I.; NEVES, S. **Efeito da Normalização Pós Revestimento duro por Soldagem nas Propriedades do Cordão de Solda**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, BA, 2015.

DUARTE, S. M. A. **Caracterização Metalúrgica e Mecânica do Aço AISI 8630M Amanteigado com ER-80S D2 pelo Processo de Soldagem MAG**. 2014. 113 f. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba. Dissertação (Mestrado). João Pessoa, PB, 2014.

ESAB, **Catálogo de Consumíveis**. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf>> Acesso em: 07/03/2018.

FAN, Y. **Research on arc characteristics and metal transfer modes of ultrasonic assisted GMAW process**. China Welding (English Edition), 20, n. 3, 2011.

FAN, Y. Research on short circuiting transfer mode of ultrasonic assisted GMAW method. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 17, n. 3, p. 186-191, 2012.

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

FREIRE, S.R. **Influência da Agitação Mecânica no Refino de Grão da Zona Fundida**. TCC. Faculdade de Tecnologia SENAI Cimatec, 2008.

GODOY, J.M. **Estudo da Ocorrência de Trinca por Fadiga em Tubos de Aço Soldados, devido ao Transporte**, 2008, 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratingueta. Universidade Estadual Paulista, Guaratingueta, SP, 2008.

GODOY, J. M.; CAVALHEIRO, B. C.; PEREIRA, M. S.; Avaliação da fissuração por fadiga em tubos durante transporte marítimo. **Soldagem e Inspeção**. São Paulo, v. 15, n. 1, p. 2-10, 2010.

GOHR JR, E. **Desenvolvimento de Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

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, pp-2766-2770, 2012

GUILHERME, L. A.; **Estudo do Efeito da Geometria das Extremidades do Núcleo do Eletroímã sobre a Deflexão do Arco de Soldagem**. 2012. 138 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2012.

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

HORNSEY, J. S. **Vibratory Stress Relieving – It's Advantages as an Alternative to Thermal Treatment**. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/14428134/VSR-an-Alternative-to-Thermal-Treatment>. Acesso em 31/07/2011.

HUSSEIN, A. R., JAIL N. A., TALIB, A. R. A., Improvement of Mechanical Welding Properties by using Induced Harmonic Vibration, **Journal of Applied Sciences**, vol. 11, 2011, p. 348-353.

IIW Sub-Commission IXJ "**Guide to the Light Microscope Examination of Ferritic steel Weld Metals**". IIW Doc. IX-1533-88, 1988.

JANAKI, R. G. D.; MITRA, T. K.; SHANKAR, V. Microstructural Refinement Through Inoculation of type 7020 Al–Zn–Mg alloy Welds and its Effect on hot Cracking and Tensile Properties. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 142, n. 1, p. 174-181, 2003.

JÚNIOR, R. C. S. F. **Influência dos Parâmetros de Soldagem na Formação de Trincas a Frio em Juntas Soldadas de Aços ARBL**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 1998.

JÚNIOR, H. D. et al. **Estudo Experimental das Deformações Residuais Oriundas do Processo de Soldagem**. Cadernos UniFOA, v. 1, n. 1, p. 73-81, 2014.

KAINTH, M.; GUPTA, D.; SHARMA, V. K. Experimental Investigation of the Effect of Vibration on Mechanical Properties of AISI 1018 Mild/Low Carbon Steel Welded Joint Using SMAW. **IJME**, v. 2, n. 2, 2015.

KOU, S. **Welding Metallurgy**, 2 ed., Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2002.

LARQUER, T. R.; SOUZA, D. M. de; REIS, R. P. GTA Welding with Synchronized Magnetic Oscillation. **Soldagem & Inspeção**, v. 21, n. 3, p. 363-378, 2016.

LEITNER, R. E.; MCELHINNEY, G. H.; PRUITT, E. L. An Investigation of Pulsed GTA Welding Variables. **Welding Journal**, 52, n. 9, 1973.

LIANG, X. et al. Comprehensive Evaluation of Welding Quality for butt-Welded by means of CO₂ Arc Vibratory Welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 5-8, p. 1911-1920, 2016.

LOCATELLI, F. R., **Modelagem do Campo de Temperaturas e Distorções de uma Junta do Tipo T Soldada pelo Processo GMAW**. 2014. 117 f. Dissertação de Mestrado, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2014.

LU, Q.; CHEN, L.; NI, C.; Improving Welded Valve Quality by Vibratory Weld Conditioning. **Materials Science and Engineering: A**, v. 457, n. 1, p. 246-253, 2007.

QINGHUA, L.; LIGONG, C.; CHUNZHEN, N.; Effect of Vibratory Weld Conditioning on Welded Valve Properties. **Mechanics of Materials**, v. 40, n. 7, p. 565-574, 2008.

MACHADO, I. G., 1996, **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**, Porto Alegre, RS: Editado pelo Autor, 447 p.

MACIEL, L. F. C. **Efeitos da Vibração Simultânea nas Propriedades Mecânicas de Juntas de Aço ASTM A131 Soldadas pelo Processo Arame Tubular (FCAW)**. 2014. 111 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, SP, 2014.

MARQUES, P.V.; MODENESI, P.J.; BRACARENSE, A.Q. Soldagem: **Fundamentos e Tecnologia**. 2ª ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

MARTINS, C.A.P.; MORILLA, J.C., VILLANI, P.V. **Alívio de Tensões e Condicionamento de Solda por Vibrações Sub-Ressonantes**. 2012. Trabalho apresentado no XXXVIII Congresso Nacional de soldagem – ABS. Ouro Preto, MG. 2012.

MASUBUC, K., Research Activities to Examine Residual Stresses and Distortion in Welded Structures,” **Welding Journal**, Vol. 70, December 1991, pp. 41–47.

MODENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos aços transformáveis**. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2004.

MODENESI, P. J. Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas. **Belo Horizonte: UFMG– Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 26, 2011.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2012.

MOREIRA, A. F. **Influência da Atmosfera Protetora no Cordão de Solda Obtido Através dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW**. 2008. 147 p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2008.

MOSTAFAPOUR, A.; GHOLIZADEH, V. Experimental Investigation of the Effect of Vibration on Mechanical Properties of 304 Stainless Steel Welded parts. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 5-8, p. 1113-1124, 2014.

NASCIMENTO, A. S., **Aspectos Operacionais e Metalúrgicos da Soldagem com Arame Metal Cored**, 2005. 122 f. Dissertação de Mestrado, Universidade federal do Pará, Campos Universitário do Guamá, Belém, PA. 2005.

OLIVEIRA, L. A. **Susceptibilidade À Corrosão sob Tensão da Junta Dissimilar de Aço Inoxidável Aisi 310 e Aço Inoxidável Duplex 2304 com O Metal de Adição E309L**. 8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Salvador, BA, 2015.

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C., **Engenharia de Soldagem e aplicações**, Livro, Editora LTC, Rio de Janeiro, 1982.

OMURA, N. Effects of Mechanical Vibration on Macrostructure and Mechanical Properties of AC4C Aluminum Alloy Castings. **Materials Transactions**, v. 50, n. 11, p. 2578-2583, 2009.

PEDROSA, M. F. **Comparativo do Desenvolvimento de Soldagem para o Processo GMAW Metal Cored com Fonte Pulsada e Gás de Proteção Rico em Argônio Versus o Processo FCAW Convencional com Proteção Gasosa de CO₂ e Gás de Proteção Rico em Argônio**. Rio de Janeiro: FIRJAN/SENAI – Instituto SENAI de Educação Superior, 2012. 100 p.

PEIXOTO, A. L. **Soldagem**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, pg. 90.2012.

PINEDA ARANGO, D. A. **Efeito da Inoculação na Macroestrutura de Grãos de Ligas Al-Si obtidas por Solidificação Unidirecional**. 2009. 129 f. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, SP, 2009

PUČKO, B., **Materials and Manufacturing Processes**, Special Issue: Heat Treatment and Surface Engineering of Tools Dies, Vol. 24, Issue 7-8, 766-771, 2009.

PAUL, A. K. Robust Product Design Using SOSM for Control of Shielded Metal Arc-Welding (SMAW) Process. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 6, p. 3717-3724, 2016.

PHILLIPS, D. H. Arc **Welding Processes**. Welding Engineering: An Introduction, First Edition, John Wiley & Sons, p. 4-73, 2016.

Rao, S. S. **Vibrações Mecânicas**. Ed. Pearson Prentice Hall. 2009. 4º Edição, p. 424.

RAO, P. G.; RAO, P. S.; KRISHNA, A. G. Mechanical properties improvement of weldments using vibratory welding system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 229, n. 5, p. 776-784, 2014.

RAO, P. G.; RAO, P. S.; GOPALA K., A. A Smart Prediction tool for Estimating the Impact Strength of Welded Joints Prepared by Vibratory Welding Process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: **Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 231, n. 2, p. 343-346, 2015.

KALPANA, J.; RAO, P. S.; RAO, P. G.; Influence of Amplitude on the Tensile Strength of Welded Joints Fabricated under Vibratory Weld Conditioning. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 39, n. 3, p. 757-762, 2017.

RODRIGUES, E. R. **Influência de Parâmetros do Processo FCAW-G nas Características da Solda do Aço ASTM A-36**. 2010. 96 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR. 2010.

RODRIGUES, L. A. S. **Caracterização Microestrutural e de Propriedades Mecânicas de Soldas do Aço ASTM A 131 pelos Processos FCAW Convencional e com Adição de Arame Frio**. 2011. 144 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará,

Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

RODRIGUES, R. N.; **Avaliação do efeito da aplicação de vibrações mecânicas sobre os níveis de tensões residuais em juntas soldadas de aços ASTM A516 Gr. 60.** 2013. 129 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2013.

SILVA, T. C. **Tratamento Térmico de Normalização em Tampos de Vasos de Pressão Fabricados de Material P275NH.** 2015. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.

SIMPSON, R. P. Controlled Weld-Pool Solidification Structure and Resultant Properties With Yttrium Inoculation of Ti-6Al-6V-2Sn Welds. **Welding Journal**, 56, n. 3, 1977.

SINGH, J.; KUMAR, G.; GARG, N.; Influence of Vibrations in Arc Welding over Mechanical Properties and Microstructure of Butt-Welded-Joints. **International Journal of Science & Technology**, v. 2, n. 1, p. 1-6, 2012.

SINGH, P.; PATEL, D.; PRASAD, S. B. Investigation On The Effect Of Vibrations On Cooling Behavior And Mechanical Properties Of SMAW Butt Welded Joints. **UPB Sci. Bull., Series D**, v. 79, n. 2, p. 137-146, 2016.

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

SHARMA, V. K.; KAINTH, M. Effect of Auxiliary Mechanical Vibrations on Mechanical and Metallurgical properties of Stainless Steel (AISI 202). **IJME**, v. 1, n. 1, 2014.

SHIGETA, Masaya et al. Qualitative and Quantitative Analyses of Arc Characteristics in SMAW. **Welding in the World**, v. 60, n. 2, p. 355-361, 2016.

STREET, J. A. **Pulsed arc welding**. 1ª. ed. [S.l.]: Abington publishing, 1990.

SURESH, M. V. Effect of Pulse Frequency in Gas Tungsten Arc Welding of Powder Metallurgical Preforms. **Technology Science and of Welding and Joining**, 9, n. 4, 2004

TSENG, K. H.; SUNG, H. L. Evaluation Study on Angular Distortion and Residual Stress of Stainless Steel Pulsed TIG Weldment. In: **Advanced Materials Research**. Trans Tech Publications, 2011. p. 905-909.

TATAGIBA, L. C. S.; GONÇALVES, R. B.; PARANHOS, R. Tendências no Desenvolvimento de Gases de Proteção Utilizados na Soldagem MIG/MAG. **Soldag. Insp. São Paulo**, v. 17, n. 3, p. 218-228, 2012.

TSENG, K. H.; CHOU, C. P. The Effect of Pulsed GTA Welding on the Residual Stress of a Stainless Steel Weldment. **Journal of Material Processing Technology**, 123, 2002.

USIMINAS, **Catálogo de Chapas Grossas**. Disponível em: <https://www.usiminas.com/wp-content/uploads/2013/11/us-0073-15a-chapas-grossas.pdf>>Acesso em: 07/03/2017.

WAINER, E., BRANDI, S. D., DE MELLO, F. D. H., **Soldagem: Processos e Metalurgia**, Livro, Edit. Edgar Blucher Ltda., 4ª reimpressão, p. 1, 2004.

WEISS, A. **Soldagem**. Curitiba: Livro Técnico, 2010. 128 p. ZAMPIERI JÚNIOR,

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.

WU, C. S.; ZHENG, W.; WU, L. **Modelling the Transient Behaviour of Pulsed Current Tungsten-Inert-Gas Weldpools**. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 7, 1998

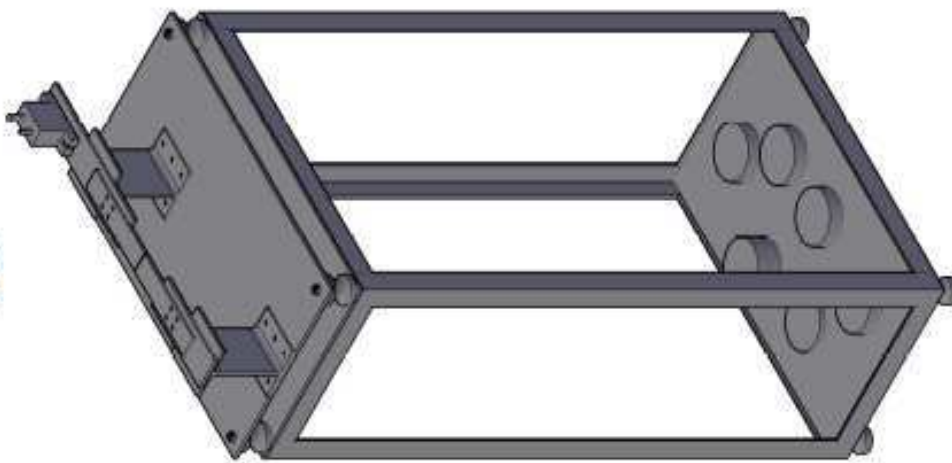
XU, J.; L. C.; C. N. **Effect of Vibratory weld Conditioning on the Residual Stresses and Distortion in Multipass Girth-butt Welded Pipes.** Int J Pres Ves Pip 2007; 84: 298–303.

ZAMBOTO, I. Ponte Tacoma Narrows: Aeroelasticidade ou Ressonância? Blog da Engenharia, Disponível em <<http://blogdaengenharia.com/ponte-tacoma-narrows-aeroelasticidade-ou-ressonancia/>> Acesso em 15 de fevereiro de 2018. Publicado em fevereiro de 2015.

ZHU, Z. Q.; CHEN, Li G.; RAO, D. Relieving Welding Residual Stress by Applying Vibratory Weld Conditioning. In: **Materials Science Forum.** Trans Tech Publications, 2005. p. 475-480.

APÊNDICE – Desenho Completo da Bancada Vibratória

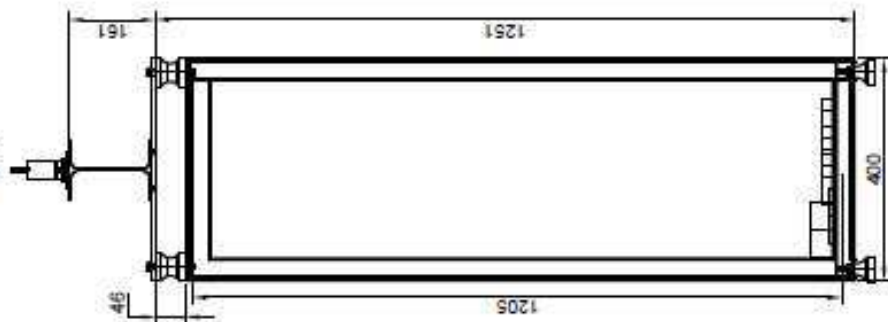
ISO



VF



VL



Suporte das Juntas

VL

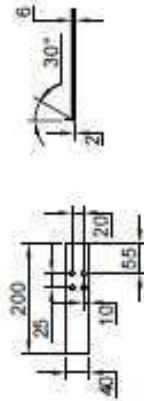
VS



Juntas

VF

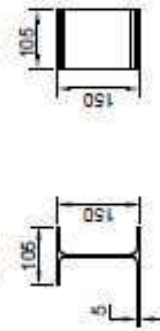
VS



Perfil H

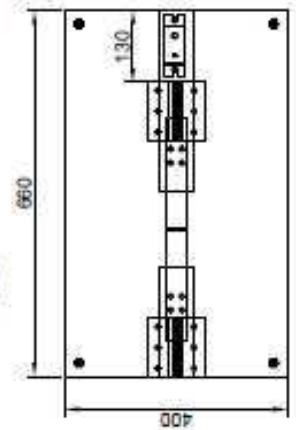
VF

VS



Bancada Superior

VS



VF

