

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa De Pós-Graduação em Soldagem

Vinício Martins dos Anjos

**MÉTODOS DE MELHORAMENTO DA RESISTÊNCIA À FADIGA EM JUNTAS
SOLDADAS**

Belo Horizonte

2023

Vinício Martins dos Anjos

**MÉTODOS DE MELHORAMENTO DA RESISTÊNCIA À FADIGA EM JUNTAS
SOLDADAS**

Monografia de especialização apresentada a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Soldagem.

Orientador: Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

Belo Horizonte

2023

A599m	<p>Anjos, Vinício Martins dos. Métodos de melhoramento da resistência à fadiga em juntas soldadas [recurso eletrônico] / Vinício Martins dos Anjos. – 2023. 1 recurso online (69 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Ariel Rodríguez Arias.</p> <p>Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Especialista em Soldagem.</p> <p>Bibliografia: f. 67-69. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Soldagem. 2. Engenharia mecânica. 3. Resistência de materiais. 4. Materiais – Fadiga. 5. Juntas soldadas. 6. Desgaste mecânico. 7. Deformações e tensões. I. Rodríguez Arias, Ariel. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.791</p>
-------	---



Universidade Federal de Minas Gerais
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica
Programa de Pós-Graduação
Curso de Especialização em Soldagem



ATA 04ª/2023 DA DEFESA DE MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

No dia 04 de julho de 2023, às 09:00 h, a Comissão Examinadora se reuniu remotamente para avaliar o trabalho:

Título: MÉTODOS DE MELHORAMENTO A RESISTÊNCIA A FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS

Aluno: VINÍCIO MARTINS DOS ANJOS - Matrícula: 2021662998

Local: Remotamente via plataforma "TEAMS".

Parecer:

A Comissão Examinadora, após a apresentação pelo (a) candidato (a) durante 30 minutos e após ter argüido o(a) candidato(a) por 25 minutos, é de parecer favorável _____ à aprovação do trabalho de monografia com a nota final de 90 e _____ sem (com ou sem) sugestões de modificação.

Sugere-se o prazo de _____ dias para efetuar-se as modificações sugeridas com revisão final acompanhada e homologada pelo orientador Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias

Assinaturas:

Prof. Dr. Ariel Rodriguez Arias
DEMEC/UFMG – Orientador

Engenheiro Marco Marra Miranda
SOTREQ S/A – Avaliador

Prof. Dr. Paulo Jose Modenesi
DEMEC/UFMG - Avaliador

Aluno: Vinicio Martins dos Anjos

AGRADECIMENTO

Agradeço ao Dr. Ariel Rodriguez Arias pela orientação, suporte no desenvolvimento do trabalho dentro e fora do laboratório, o qual contribuiu muito para meu crescimento profissional e aplicação no dia a dia dos conceitos no processo de reparo em juntas soldadas para soluções reais de problemas, mas acima de tudo pela amizade que levarei para a vida.

Agradeço ao Alexandre, pelo suporte dado durante todo o curso, a atenção que foi me dada tanto academicamente quanto pessoalmente, pela programação do curso que ocorreu de forma muito organizada, pelos cafés e belas conversas nos corredores do curso e principalmente pela amizade que levarei para vida.

Agradeço ao Dr. Fagner pelo tempo despendido, inclusive os sábados, nas soldagens dos corpos de prova para as primeiras definições do trabalho, pela paciência e pela boa vontade.

Agradeço ao Dr. Modenesi, pelas orientações, correções, paciência, disponibilidade em transmitir todo o conhecimento durante o curso e principalmente pela educação em tratar com todos nós alunos.

Agradeço a todos os professores do Curso de Especialização em Soldagem por cada ensinamento transmitido, os quais mudaram a minha vida de forma que eu pudesse sentir confiança no enfrentamento dos novos desafios.

Agradeço aos amigos do curso nas trocas de informação para melhor preparação nas provas e trabalhos desenvolvidos no curso. Amizades que levarei comigo por toda via.

Agradeço especialmente a minha esposa Fernanda Guimarães pela parceria, a qual foi fundamental para que eu pudesse me dedicar ao curso e as provas da UFMG.

“Os dias prósperos não vêm por acaso; nascem de muita fadiga e persistência.”
(Henry Ford)

RESUMO

O trabalho proposto apresenta a revisão bibliográfica de processos de melhoramento da resistência a fadiga. Não somente em grandes estruturas, mas também os equipamentos apresentam com o tempo de serviço, trincas de fadiga, cujo mecanismo é imposto por cargas cíclicas em serviço. Nesse mecanismo, o colapso de uma estrutura ocorre com tensões abaixo da tensão de escoamento do material e os processos que serão apresentados nesse trabalho, possuem o objetivo de causar um canal na transição da junta com o metal de base, seja por abrasão, refusão ou deformação plástica para melhorar a resistência da junta a fadiga. O IIW (International Institute of Welding), será utilizado nesse trabalho como uma das principais fontes de pesquisa, pois possui vários documentos sugerindo os parâmetros para aplicação de cada processo de melhoramento para resistência a fadiga. O trabalho apresenta também resultados de pesquisas realizadas com o objetivo de analisar corpos de provas que foram submetidos a cargas cíclicas e tratados por desbaste, refusão ou deformação plástica.

Palavras-chave: Fadiga, Tensão, Melhoramento, Resistência, Junta Soldada.

ABSTRACT

The proposed work presents the bibliografy review of the fatigue resistance improvement process. Not just the biggest structures, but equipment present as the time, cracks, whose mechanism is placed by the cyclic load application at service. In this mechanism the collapse of a structure occurs below the yield strengths of material. The process that was presented in this work have the objective of the create a notch on the weld toe, by abrasion, refusion or plastic deformation for improve the fatigue resistance of the welded joint. The IIW, will be used in this work as one of the main research sources because there are lot of documents suggesting parameters to application of each fatigue resistance improvement process. The work presents also the research carried out with the objective to analyses the specimen that were submitted to cyclic load treated to thin out, refusion or plastic deformation.

Keywords: Fatigue, Tension, Enhancement, Resistance and Welded Joint.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Metal de base, de adição e poça de fusão	19
Figura 2 - Tipos de chanfros.....	20
Figura 3 - Dimensões e nomenclaturas de um filete	21
Figura 4 - Tensão em uma solda em ângulo.....	22
Figura 5 - Tensão em uma solda em ângulo.....	22
Figura 6 - Definições dos ciclos de carregamento.....	23
Figura 7 - Estágios e aspectos microscópicos.	25
Figura 8 - Estágios e aspectos microscópicos.	26
Figura 9 - Estágios e aspectos microscópicos.	27
Figura 10 - Possibilidades de melhoramento de juntas soldadas.....	30
Figura 11 - Ferramenta de acionamento pneumático.	31
Figura 12 - Perfil de aplicação do desbaste	32
Figura 13 - Dimensões da aplicação.....	32
Figura 14 - Aplicação em dois estágios.....	33
Figura 15 - Corpo de prova utilizado para o teste de fadiga e aplicação do desbaste.	34
Figura 16 - Dimensão da ferramenta de tratamento	35
Figura 17 - Perfil do canal.....	36
Figura 18 - Equipamento para aplicação d TIG.	39
Figura 19 - Condições da ponta do eletrodo. – (a) boas e (b) ruins.....	41
Figura 20 -Perfil de aplicação do desbaste	42
Figura 21 - Posição da tocha em relação ao filete.	43
Figura 22 - Densidade de discordâncias.	44
Figura 23 - Zonas medidas na região do TIG - Análise da peça em corte da seção transversal.	45
Figura 24 - Zonas medidas na região do TIG	45
Figura 25 - Zonas de tratamento do TIG.	46
Figura 26 - Zonas de tratamento do TIG	46
Figura 27 - Detalhes para carregamento transversal e longitudinal	47
Figura 28 - Curva S/N – Fixação transversal	48
Figura 29 - Curva S/N – Fixação longitudinal	48
Figura 30 - Detalhe para carregamento longitudinal ASTM A36	49
Figura 31 - Plotter dos dados na curva S/N.	50

Figura 32 - Realização do tratamento de Martelamento.....	52
Figura 33 - Aplicação do Martelamento.....	54
Figura 34 - Força aplicada de Martelamento.....	55
Figura 35 - Ferramenta de aplicação do HFMI e seus penetradores.	57
Figura 36 - a) Aplicação do HFMI b) Parâmetros que influenciam a resistência a fadiga.	60
Figura 37 - a) Aplicação Do HFMI b) Parâmetros que influenciam a resistência a fadiga.....	61
Figura 38 - Padrão de junta normalizada pelo IIW	62
Figura 39 - (a) Soldagem robotizada (b) Aplicação do HFMI.	63
Figura 40 - Macros retiradas da solda antes e após tratamento.	63
Figura 41 - Tensão residual profundidade da transição da solda com o metal base em aço S355. (N = Número de ciclos)	64
Figura 42 - Tensão residual profundidade da transição da solda com o metal base em aço S960. (N = Número de ciclos)	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões das ferramentas de desbaste.....	35
Tabela 2 - Diferentes dimensões de desbaste	36
Tabela 3 - Comparação entre método de elementos finitos e métodos analíticos.....	37
Tabela 4 - Parâmetros para a execução do processo de TIG Dressing.....	40
Tabela 5 - Propriedades mecânicas das amostras.....	49
Tabela 6 - Parâmetros do TIG	49
Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos materiais	54
Tabela 8 - Parâmetros de S/N encontrados para o ST52	55
Tabela 9 - Valores experimentais de tensão residual obtidos por extrapolação.....	56
Tabela 10 - Parâmetros para dois formatos de ferramenta	59
Tabela 11 - Propriedades mecânicas e consumíveis.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASM: American Society for Metals
ASTM: American Society of Mechanical Engineers
IIW: International Institute of Welding
AWS: American Welding Society
GMAW: Gas Metal Arc Welding
FCAW: Flux Cored Arc Welding
GTAW: Gas Tungsten Arc Welding
SMAW: Shield Metal Arc Welding
MCAW Metal Cored Arc Welding
ESAB: Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget
CO₂: Dióxido de Carbono
Ar: Argônio
FBTS: Federação Brasileira de Tecnologia da Soldagem
CP's: Corpos de Prova
S/N: Strength / Life
TIG: Tungsten Inert Gas
RPM: Rotação por Minuto
Mm: Milímetros
S: Segundo
T : Thickness
MB: Metal Base
ZF: Zona Fundida
EPI: Equipamento de Proteção Individual
ZTA: Zona Termicamente Afetada
MPa: Mega Pascal
SG: Strain Gauges
UT: Ultrassom
LP: Líquido Penetrante
A: Amperes
V: Volts
°C: Graus Celsius
KJ/in: Kilo Joules/Polegada

CVA: Grau de Inclinação

N: Número

Hz: Hertz

KN: Kilo Newtons

HV: Hard Vickers

HFMI: High Frequency Mechanical Impact

ISO: International Organization for Standardization

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials

FAT: Resistencia a fadiga a 2×10^6 ciclos com probabilidade de falha de 5%

MEV: Microscópio de Varredura Eletrônica

LISTA DE SIMBOLOS

τ Tensão de Corte

a Espessura da Garganta

t_{eff} Soma da espessura da chapa + perna do filete

σ Amplitude da frequência

σ stress range

% Percentual

σ_m Tensão Média

σ_u Tensão mínimo

σ_o Tensão máxima

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS.....	18
2.1.	Objetivo geral	18
2.2.	Objetivos específicos.....	18
3	PROCESSO DE SOLDAGEM	18
3.1.	Processos de soldagem a Arco Elétrico.....	19
3.2.	Transferência metálica.....	20
3.3.	Design das juntas e chanfros	20
3.4.	Tensão em uma junta soldada tipo filete	21
4	FADIGA.....	23
4.1.	Introdução a fadiga	23
4.1.1.	Incubação, nucleação e crescimento inicial;.....	25
4.1.2.	Crescimento estável;	25
4.1.3.	Ruptura final instável.....	26
4.1.4.	Curva S/N.....	28
5	MÉTODOS DE MELHORAMENTO DA RESISTÊNCIA Á FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS.....	29
5.1.	Introdução aos métodos de melhoramento da resistência	29
5.1.1.	Desbaste por abrasão.....	30
5.1.1.1.	Introdução.....	30
5.1.1.2.	Equipamento.....	31
5.1.1.3.	Segurança	31
5.1.1.4.	Procedimento de aplicação.....	31
5.1.1.5.	Operação do equipamento.....	33
5.1.1.6.	Controle de qualidade.....	33

5.1.2.	Influência da geometria do canal criado pelo desbaste na resistência a fadiga	34
5.1.2.1.	Resultado do tratamento.....	38
5.2.	TIG Dressing	39
5.2.1.	Introdução	39
5.2.2.	Equipamento	39
5.2.3.	Segurança.....	40
5.2.4.	Preparação para aplicação.....	40
5.2.5.	TIG Dressing electrode	41
5.2.6.	Gás de proteção.....	41
5.2.7.	Pré-aquecimento	42
5.2.8.	Velocidade de soldagem x corrente	42
5.2.9.	Efeito das discordâncias após aplicação do TIG.....	44
5.2.10.	Influência do TIG na dureza e geometria do pé da solda.....	45
5.2.11.	Influência do TIG na reparação de juntas pré-fadigadas soldadas em ângulos.	47
5.2.12.	O efeito da profundidade de penetração das variáveis de soldagem TIG	49
5.3.	Martelamento.....	51
5.3.1.	Introdução	51
5.3.2.	Ferramenta	51
5.3.3.	Operação e segurança na aplicação.....	51
5.3.4.	Controle de qualidade da aplicação	52
5.3.5.	Efeito do Martelamento na distribuição de tensões residuais induzidas pelo processo.	54
5.4.	Martelamento Com Ultrassom (HFMI).....	57
5.4.1.	Aplicação do Tratamento	57
5.4.2.	Treinamento do Operador	58
5.4.3.	Preparação para Aplicação.....	58
5.4.4.	Aspectos de segurança	58

5.4.5.	Processo de tratamento	59
5.4.6.	Outras condições.....	59
5.4.7.	Controle de qualidade	60
5.4.8.	Geometria do cordão.....	60
5.4.9.	O efeito do carregamento cíclico na estabilidade da tensão residuais compressivas.	62
6	CONCLUSÃO	65
	REFERENCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

Muitos equipamentos são complexos para fabricar, cujas características deverão ser projetadas para suportar esforços a eles impostos. Equipamentos como pontes, chassis de grandes equipamentos, torres eólicas, carregadores de navios, escavadeiras a cabo por exemplo, são transportados em carretas e navios até o seu destino, onde todas as peças serão unidas para assim resultar no equipamento desejado para tal operação.

No momento em que ocorre a união dessas peças, sejam elas fundidas, forjadas ou chapas laminadas, a soldagem, principal processo de fabricação, estará presente em quase todas as operações de montagens. As juntas são preparações para proporcionar a união dessas peças, projetadas para recebimento do metal de solda.

Faz parte do projeto de fabricação desses equipamentos, o estudo das cargas atuantes, para que o projeto possa garantir segurança em sua operação, ou seja as peças submetidas a carregamentos, que para os exemplos acima, são em sua maioria cíclicas, a resistência necessária para que não ocorra uma falha durante a sua operação. Presente nas juntas soldadas desses projetos, um dos principais mecanismos a ser analisado seria as falhas por fadiga, onde segundo a ASTM E1823-96 (1996):

“É o processo de mudança localizada, permanente e progressiva na estrutura, que ocorre no material sujeito a flutuações de tensões e deformações que pode culminar em trincas ou completa fratura depois de um número suficiente de flutuações”.

Estima-se que aproximadamente 90% das falhas em serviço dos componentes sujeitos a carregamentos repetidos e/ou vibrações devem-se ao fenômeno da fadiga segundo MEYERS; CHAWLA, 1982; DIETER (1981).

O IIW (International Institute of Welding), já realizou várias pesquisas e já publicou diversos documentos com o foco em técnicas de melhoramento em juntas soldadas. Será apresentada nesse documento uma revisão bibliográfica de tratamentos utilizados em juntas soldadas com o objetivo de aumentar a vida a fadiga dessas juntas, quando elas estiverem submetidas a cargas cíclicas. Os tratamentos abordados nessa monografia utilizam como melhoramento, um canal na margem da solda com geometria específica, podendo ser realizado pelo método de desbaste mecânico, refusão ou deformação plástica.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O Objetivo desse trabalho é apresentar alguns dos meios disponíveis de métodos para melhoraria da resistência à fadiga em juntas soldadas.

2.2. Objetivos específicos

Apresentar resultados comparativos entre os métodos de melhoramento a fadiga de juntas soldadas;

Apresentar parâmetros para os tratamentos de melhoramento a fadiga em juntas soldadas;

Apresentar as características de cada tratamento, levando em consideração vantagens e desvantagens de cada método.

Apresentar um material na língua portuguesa para que mais brasileiros possam ter acesso a essa informação.

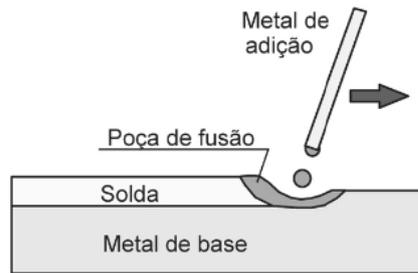
3 PROCESSO DE SOLDAGEM

A soldagem é um dos mais importantes processos de fabricação existentes, cujo aplicação varia em tamanho, forma e quantidade, podendo ser executada por robô, totalmente automatizada e manualmente, sob a habilidade de um soldador atendendo a todas as exigências necessárias para a fabricação, manutenção ou reparo de uma peça ou equipamento. Segundo a *American Welding Society* (AWS), a soldagem é definida operacionalmente como:

“A soldagem é o processo de união de materiais usados para obter a coalescência (união) localizada de metais e não metais produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”
(AWS, 2010, p.47)

A soldagem é uma operação que visa obter a união de peças e solda, é o resultado dessa operação. O material da peça, ou peças, que estão sendo soldadas é o metal de base e frequentemente na soldagem por fusão, um material adicional é fornecido para a formação da solda ou metal de adição MARQUES; MODENESI; BRACARENSE (2011). A figura 1, apresenta de forma ilustrada os conceitos acima.

Figura 1 - Metal de base, de adição e poça de fusão



Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENCE (2011).

Durante a soldagem o metal de adição é fundido pelo calor e misturado com uma quantidade de metal de base também fundido para formar a poça de fusão e local onde as peças serão unidas resultarão em uma junta soldada MARQUES, MODENESI E BRACARENCE (2011).

3.1. Processos de soldagem a Arco Elétrico

Segundo BRANDÃO (2019), para se obter um vínculo metalúrgico em uma união soldada, o processo deve ser capaz de promover o contato físico entre as superfícies metálicas, com isso identificamos três métodos de união; elétrica, termoquímica e radiantes. Os principais processos de soldagem a arco elétricos se dividem em:

GMAW – Processo de soldagem a arco elétrico utilizando um arame nu, maciço protegido durante a fusão do arame por um gás de proteção inerte, ativo ou mistura dos dois.

FCAW – Processo de soldagem a arco elétrico utilizando um arame tubular recheado de fluxo ou metal, protegido durante a fusão do arame por um gás de proteção inerte, ativo ou mistura dos dois. Ainda também conhecido como processo FCAW – Auto Protegido, ocorre a soldagem utilizando um arame tubular, porém sem a necessidade de utilizar um gás como proteção, a proteção é dada pela decomposição do fluxo contido no arame.

GTAW – Processo de soldagem a arco elétrico utilizando um eletrodo não consumível responsável por manter o arco elétrico entre a peça e o próprio eletrodo. Esse processo pode ser realizado com ou sem adição de um consumível a poça de fusão e sua proteção se dá pela adição de gases inertes ou mistura deles.

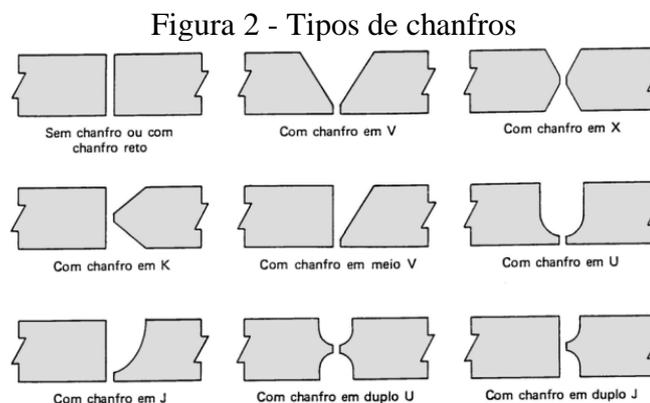
SMAW – Processo de soldagem a arco elétrico utilizando um eletrodo revestido o qual pela decomposição de seu revestimento durante a fusão do arame, protege a poça de fusão pela decomposição dos agentes adicionais ao revestimento.

3.2. Transferência metálica

Segundo a ESAB (2005) os processos de transferência metálica se dividem em; Curto circuito, processo pelo qual é utilizado em arame de diâmetro entre 0,8 a 1,2 mm com pequenos comprimentos de arco, baixa tensão e baixa corrente; Globular, processo pelo qual a gota transferida apresenta um diâmetro maior que o próprio diâmetro do arame, com uma instabilidade e um excesso de respingos e Spray, que é o processo de transferência metálica consequência do aumento da corrente, que faz com que o metal se transfira em forma de um jato de gotas bem pequenas. Caso apresente mais de 15% de gás ativo, por exemplo CO₂, não haverá a transição globular para spray.

3.3. Design das juntas e chanfros

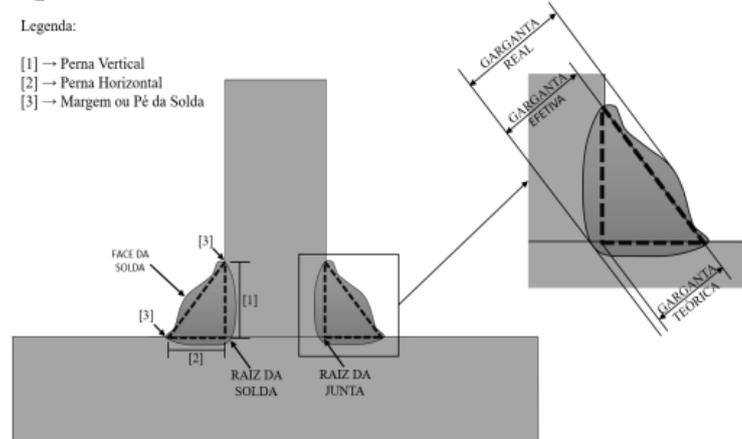
Cada junta soldada, em função do seu processo, espessura das peças, acesso e material a soldar, requer um tipo específico de chanfro. A figura 2, traz uma relação dos principais tipos de chanfros utilizados para a união das peças a soldar.



Fonte: MARQUES, MODENESI E BRACARENCE (2011).

Esta revisão bibliográfica apresentará a seguir, trabalhos e ensaios realizados em diferentes tipos de juntas mostrando a eficácia dos métodos de tratamento em juntas soldadas para aumento de vida a fadiga. As dimensões dos corpos de prova vêm das publicações do IIW, assim como os procedimentos de medição. A figura 3, mostra uma junta de filete, cuja dimensões são as mais estudadas pelos artigos publicados para melhoramento de vida a fadiga.

Figura 3 - Dimensões e nomenclaturas de um filete



Fonte: COELHO (2022)

3.4. Tensão em uma junta soldada tipo filete

No caso de um cordão de filete como o representado na figura 4 e para efeitos de dimensionamento, é usual considerar apenas a tensão de corte na garganta do cordão (DB) e desprezar a tensão normal CORREIA (2005).

A área da garganta do cordão é dada por:

$$A = a \cdot l$$

Onde:

A = área da garganta;

a = espessura da garganta;

l = comprimento

Sendo a espessura da garganta dada por:

$$a = \frac{h}{\sqrt{2}} = 0,707 h$$

Onde:

a = Tensão nominal

h = Espessura

A tensão de corte média na garganta do cordão, DB, é dada por:

$$\bar{f} = \frac{F}{0.707 hl} = \frac{1.414 F}{hl}$$

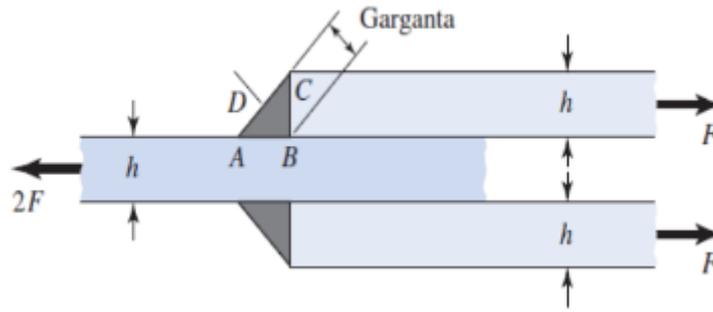
Onde:

F = Tensão

h = Espessura

l = comprimento

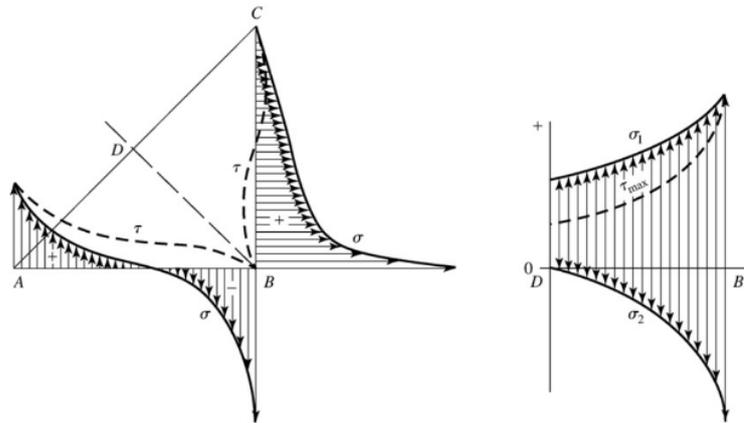
Figura 4 - Tensão em uma solda em ângulo



Fonte: CORREIA (2005)

Veja na figura 5, a representação das distribuições das tensões no cordão de solda. Distribuição de tensões ao longo das faces BC e AB, evidenciando-se os efeitos da concentração de tensões nas faces vertical e horizontal do cordão e distribuição das tensões principais, σ_1 e σ_2 , bem como da tensão de corte máxima na garganta do cordão, evidenciando-se também o efeito de concentração de tensões no ponto B.

Figura 5 - Tensão em uma solda em ângulo



Fonte: (CORREIA, 2005)

A distribuição de tensões em um filete de solda é bem mais complexa do que em uma junta de topo, devido ao seu formato, e, uma concentração de tensões de alta intensidade pode ocorrer na raiz ou na margem da solda MPROJ 4 (2022).

4 FADIGA

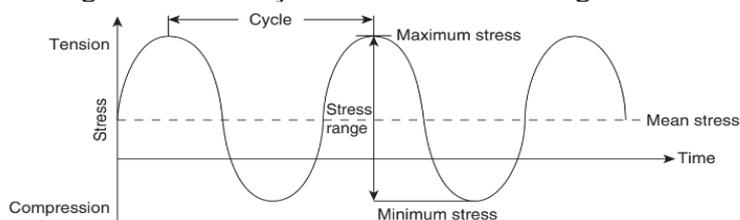
4.1. Introdução a fadiga

Fadiga na visão de engenharia é o processo pelo qual a trinca se forma e depois cresce sob influência de cargas e/ou flutuações das tensões, onde a magnitude das cargas necessárias para produzir a fadiga podem ser muito menores que a tensão de escoamento para a quebra do componente. Quando um material está sujeito a cargas cíclicas, ocorrem deformações repetidas no material, mesmo que sejam de baixa magnitude. Essas deformações repetidas levam a mudanças graduais e acumulativas na estrutura do material, resultando em danos microscópicos, como a formação de micro trincas. À medida que o número de ciclos aumenta, essas micro trincas se propagam e se unem, levando à formação de uma trinca macroscópica que eventualmente causa a falha do material FRICKE (2014).

É importante reconhecer a carga que pode dar origem a fadiga, ou seja, a carga de fadiga e independente de sua magnitude deverá ser considerada como uma carga em potencial para causar a quebra catastrófica de uma peça ou componente MADOX (1991). A figura abaixo representa a definição dos ciclos de fadiga no tempo como:

1. Tensão Máxima – Tensão máxima do ciclo;
2. Tensão Mínima – Tensão mínima do ciclo;
3. Tensão Média – Tensão média entre o mínimo e o máximo;
4. Intervalo das Tensões – Diferença algébrica entre o stress máximo e mínimo;
5. Ciclos – Intervalo entre um pico e outro;
6. Frequência – Número de ciclos por segundo.

Figura 6 - Definições dos ciclos de carregamento.



Fonte: THE WELDING ENGINEER'S GUIDE DO FRACTURE AND FATIGUE (2015).

O que se mostra na figura 6, também é conhecida como "razão de tensão" ou "razão de tensão alternada". A razão é expressa como um valor decimal ou uma porcentagem. A razão no ensaio de fadiga é representada pela seguinte equação:

$$\text{Razão} = \text{Tensão mínima} / \text{Tensão máxima}$$

A amplitude mínima de tensão é a menor tensão aplicada durante o ciclo de carga, enquanto a amplitude máxima de tensão é a maior tensão aplicada durante o ciclo. A razão indica a proporção entre essas duas amplitudes MOORE; BOOTH (2015).

A razão no ensaio de fadiga é um fator importante porque pode afetar significativamente a vida útil do material sujeito à fadiga. Uma alta razão de tensão (mais próxima de 1) indica uma maior variação entre a tensão mínima e a máxima, resultando em um carregamento mais severo. Por outro lado, uma baixa razão de tensão (mais próxima de 0) indica uma menor variação, resultando em um carregamento mais suave MOORE; BOOTH (2015).

A razão de tensão afeta a forma como os materiais respondem à fadiga. Em geral, materiais têm maior resistência à fadiga quando a razão de tensão é menor. Isso ocorre porque uma alta razão de tensão pode levar a concentração de tensões e, portanto, à propagação mais rápida de trincas e falhas. Portanto, a razão no ensaio de fadiga é uma medida importante para caracterizar o comportamento de um material sob carregamento cíclico e para avaliar sua vida útil em condições de fadiga MOORE; BOOTH (2015).

Para projetar componentes resistentes à fadiga, é necessário realizar análises de fadiga, levando em consideração as cargas esperadas, a vida útil desejada do componente e a escolha adequada de materiais e processos de fabricação. Estratégias para minimizar a fadiga incluem o uso de acabamentos de superfície adequados, eliminação de concentrações de tensão, melhorias no projeto da peça e o uso de técnicas de alívio de tensão, como tratamentos térmicos ou shot peening por exemplo FRICKE (2014).

A fadiga também é favorecida pelos grãos de materiais que possuem planos cristalográficos orientados em relação a direção da tensão cíclica aplicada, preferencialmente nos planos de deslizamentos dos cristais que estão a 45° da tensão aplicada, onde ocorre uma quantidade muito pequena de movimento entre as discordâncias MADOX (1991).

4.1.1. Incubação, nucleação e crescimento inicial;

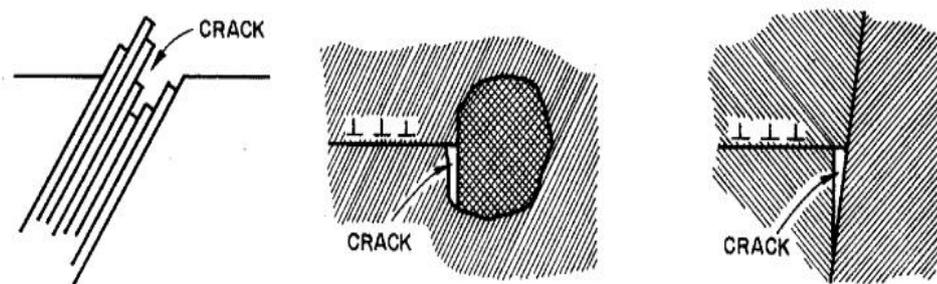
Na soldagem, um concentrador de tensão pode ser causado por vários fatores, como descontinuidades geométricas, como entalhes, furos ou reentrâncias na junta soldada, ou descontinuidades de processo, como defeitos de soldagem, como inclusões ou porosidades. Essas irregularidades criam descontinuidades locais na estrutura da solda, levando a uma distribuição de tensão não uniforme.

O concentrador de tensão é uma preocupação importante porque pode levar ao surgimento de trincas e falhas prematuras na solda. A concentração de tensão pode ampliar o efeito das cargas aplicadas e resultar em níveis de tensão localmente mais altos do que o restante da estrutura soldada.

A ruptura por fadiga que surge em componentes estruturais, quando submetidos a tensões dinâmicas, é provocada pela nucleação mais ou menos lenta de trincas de fadiga e seu mecanismo de nucleação de uma trinca se divide em três estágios.

A movimentação das discordâncias a partir de inclusões, extrusões, barreiras, fronteiras entre os grãos, que podem gerar uma micro trinca e a partir dessa condição, originar um concentrador de tensão conforme ilustrado na figura 7.

Figura 7 - Estágios e aspectos microscópicos.



Fonte: MPROJ 07 (2022).

4.1.2. Crescimento estável;

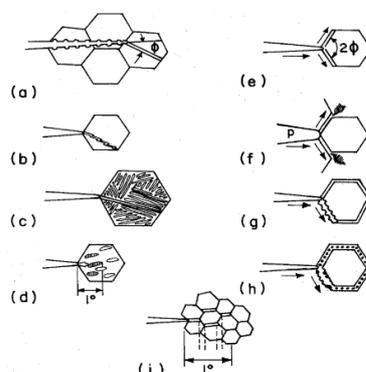
O segundo estágio compreende a progressão de micro trincas para macro trincas. Elas têm início a partir do exato momento em que a micro trinca é gerada. Esse estágio é caracterizado pela formação na superfície de fratura de uma região com platôs paralelos, separados por sulcos também paralelos. Essa região pode apresentar dois tipos de marcas características, conhecidas

como marcas de praia (também chamadas progressivas ou de fadiga) e estrias BUDYNAS; NISBETT (2008).

Propagação estável determinada pelas propriedades mecânicas e pelo nível e forma da tensão aplicada, o mecanismo de nucleação de uma trinca é uma etapa do processo de fadiga que pode ser longo dependendo da dureza, ou seja, uma relação de tensão de ruptura e escoamento.

Se o material não resiste, a ocorrência de trinca é retardada, mas quando ela ocorre, a sua propagação é mais rápida e em contrapartida, se o material é dúctil a ocorrência de trinca é mais rápida, mas sua propagação é mais lenta comparada a condição anterior. A figura 8 ilustra as várias formas em que a propagação estável pode ocorrer.

Figura 8 - Estágios e aspectos microscópicos.



Fonte: MPROJ 07 (2022). (a) Clivagem a partir de estriações, (b) clivagem cíclica, (c) fratura entre fases, (d) clivagem entre precipitados, (e,f) bifurcação intergranular, (g) estriações intergranulares, (h) voids nucleados em partículas intergranulares e (i) facetas descontínuas.

4.1.3. Ruptura final instável

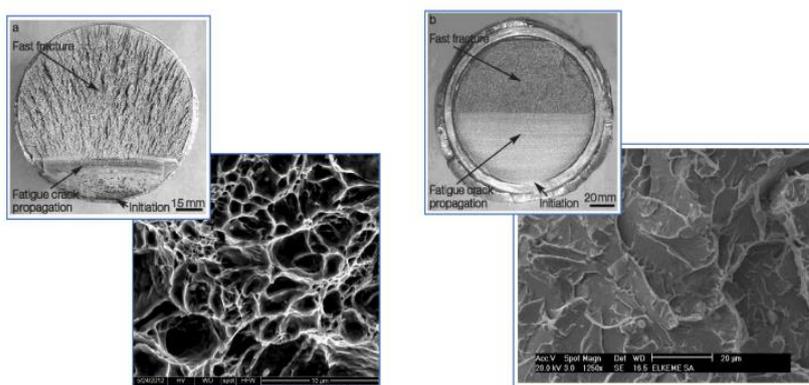
A ruptura final de fadiga ocorre quando uma trinca de fadiga atinge um tamanho crítico e se propaga rapidamente através do material, resultando na falha do componente. É o estágio final do processo de fadiga, onde a trinca cresce e se une até que a seção transversal do material seja reduzida a ponto de não ser mais capaz de sustentar a carga aplicada.

A velocidade de propagação da trinca de fadiga depende das características do material, das condições de carregamento e do ambiente em que o componente está operando. Fatores como a tensão média aplicada, a amplitude das tensões cíclicas, a rugosidade da superfície, a presença de concentrações de tensão e a corrosão podem influenciar a taxa de crescimento da trinca.

A fratura final, traz informações que muitas vezes podem ser vistas a olho nu, pois apresentam características visuais, desde o início da fratura até sua ruptura total.

O aspecto da fratura por fadiga é caracterizado por marcas de praias, similares ao efeito causado pela água do mar na areia e marcas de catraca, causada principalmente pela propagação da trinca em diferentes planos do material. Veja na figura 9 características visuais da fratura final.

Figura 9 - Estágios e aspectos microscópicos.



Fonte: MPROJ-07 (2022).

A ocorrência das trincas de fadiga nas juntas soldadas dos componentes em serviço, ocorre principalmente por três razões conforme SEATON (2018).

Tensão Residual

Ocorre pelo rápido resfriamento e aquecimento provocado naturalmente pelo processo de soldagem.

Concentradores de Tensão

Que está diretamente ligado ao padrão e/ou perfil do filete com a mudança localizada que interrompe o caminho da carga, resultando em uma tensão localizada nos pés do filete.

Descontinuidade Macro e Microscópicas

A influência de uma "pequena" descontinuidade devido `soldagem na iniciação de uma trinca de fadiga.

4.1.4. Curva S/N

O que se entende sobre a fadiga em sua forma mais natural é estudado através da ciclagem de vários corpos de prova contando o número de ciclos até a sua fratura final. A curva S/N é obtida por meio de testes de fadiga, nos quais amostras do material são submetidas a diferentes níveis de tensão cíclica repetitiva e o número de ciclos para falha é registrado MEYERS, CHAWLA (2009).

Os resultados desses testes são plotados em um gráfico com o eixo vertical representando o logaritmo da amplitude de tensão (S) e o eixo horizontal representando o logaritmo do número de ciclos (N). Normalmente, é utilizado uma escala logarítmica para ambos os eixos, pois a relação entre tensão e vida útil é frequentemente expressa de forma logarítmica.

A curva S/N geralmente mostra uma relação inversa entre a amplitude de tensão aplicada e o número de ciclos até a falha. Inicialmente, à medida que a tensão aplicada aumenta, o número de ciclos para falha diminui rapidamente.

No entanto, a taxa diminui à medida que a tensão se aproxima da resistência à fadiga do material. Nesse ponto, é comum observar uma região denominada de patamar de fadiga, onde a vida útil do material é relativamente constante para diferentes níveis de tensão. Além desse patamar, a curva geralmente apresenta uma queda acentuada, indicando a proximidade da falha final.

5 MÉTODOS DE MELHORAMENTO DA RESISTÊNCIA Á FADIGA EM JUNTAS SOLDADAS

5.1. Introdução aos métodos de melhoramento da resistência

Métodos de melhoramento da resistência a fadiga vem sendo pesquisados e aplicados com resultados substanciais, embora comparando os métodos, há uma variação de resultados relacionados a resistência a fadiga que são mostrados na curva S/N. Somado a diferentes resultados dos métodos utilizados, há também uma variação em detrimento da carga aplicada, tipo de material e design da junta. Segundo publicações de MADOX (2013) pelo IIW, estes os métodos de melhoramento a resistência da fadiga a juntas soldadas são destinados a novas estruturas, reparos e upgrades de estruturas em serviço.

As melhorias listadas pelo IIW consistem em tratamento na transição da solda em filete ou solda de topo ao material de base, onde a concentração de tensão é resultado normal de sua fabricação. Essa relação ao pé da solda de um filete ou solda de topo além da transição causada pelo padrão normal da junta, poderão ocorrer trincas que se estenderão em profundidade na junta.

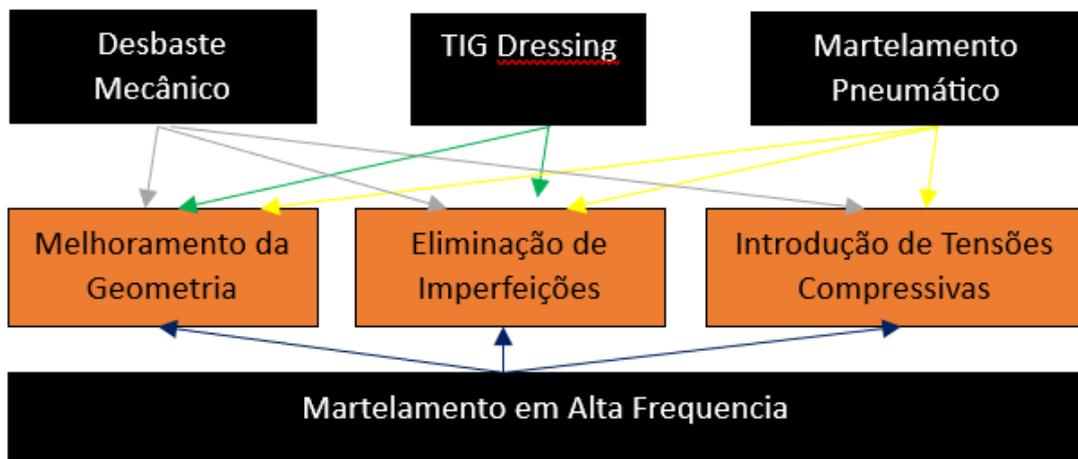
Os métodos de tratamento recomendados pelo IIW se dividem em três métodos de melhoramento:

- Melhoramento de resistência a fadiga pelo método de desbaste mecânico no pé do filete que consiste na retirada de massa e ao mesmo tempo o desenvolvimento de um canal localizado no pé da solda. Exemplo: Remoção por lima rotativa.
- Melhoramento de resistência a fadiga pelo método de refusão do pé do filete consiste em criar uma transição mais suave refundindo a transição entre o filete e o metal de base. Exemplo: TIG Dressing
- Aplicação de tensão residual por compressão no pé do filete que visa provocar na transição do filete ao metal base, uma tensão residual por compressão causando um canal localizado. Exemplo: Martelamento Pneumático e Martelamento por Alta Frequência

Nessa monografia, todos os métodos de melhoramentos a resistência à fadiga recomendados pelo IIW, apresentam uma similaridade que é a localização na junta, cuja aplicação se localiza na transição entre o cordão e o metal de base, porém, em detrimento de uma série de características que serão estudadas adiante, resultaram em diferentes performances em serviço.

Dentre os resultados de melhoria esperados, na figura 10, serão apresentadas de forma macro, as similaridades físicas e geométricas encontradas nos processos de Desbaste Mecânico, TIG Dressing, Martelamento Pneumático e Martelamento em Alta Frequência.

Figura 10 - Possibilidades de melhoramento de juntas soldadas.



Fonte: FUŠTAR, LUKAČEVIĆ, DUJMOVIĆ (2020)

5.1.1. Desbaste por abrasão

5.1.1.1. Introdução

A princípio o efeito do desbaste por abrasão, é a remoção de material localizado no pé do cordão de solda. Ao mesmo tempo que remove esse material, o processo causa um efeito benéfico, em decorrência da suavização do perfil entre o cordão e a superfície da peça, que é o alívio das tensões normais provocadas pelo processo de soldagem.

5.1.1.2. Equipamento

A ferramenta para executar o desbaste mecânico, consiste em uma ferramenta de acionamento pneumático, hidráulico ou elétrico rotativo com um ponta abrasiva em diferentes formatos e essa ponta realiza o desbaste em um perfil desejado entre o filete de solda e a peça, com o objetivo de reduzir a tensão. A ferramenta gira a uma velocidade de 15 a 40.000 rpm com uma pressão de 5 a 7 bar e seus bits normalmente são de carboneto de tungstênio.

Figura 11 - Ferramenta de acionamento pneumático.



Fonte: IIW (2013)

Para evitar erros na aplicação que anulem o efeito do desbaste, é importante que o diâmetro da ferramenta seja configurado a partir da espessura da chapa. O diâmetro utilizado deverá estar entre 10 e 25 mm para espessuras de chapas de 10 a 50 mm.

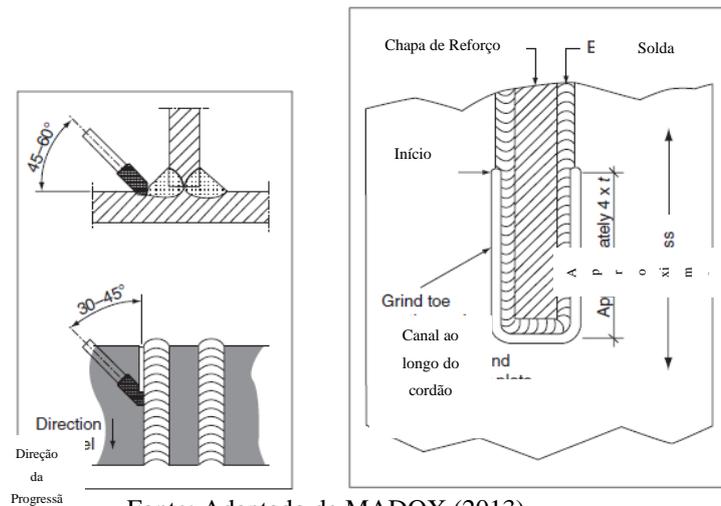
5.1.1.3. Segurança

Por utilizar uma ferramenta rotativa que possui uma ponta preparada para desbastar a região a ser tratada, quem mantém a pressão de encontro a peça é operador e além de vibração, a abrasão causará a projeção de partículas de metal, onde para a sua proteção, o operador deverá utilizar avental de raspa, máscara facial, luva e abafador.

5.1.1.4. Procedimento de aplicação

Uma boa execução do desbaste, depende exclusivamente do operador, o qual deverá possuir habilidades para atingir os resultados esperados na aplicação do tratamento ilustrado na figura 12.

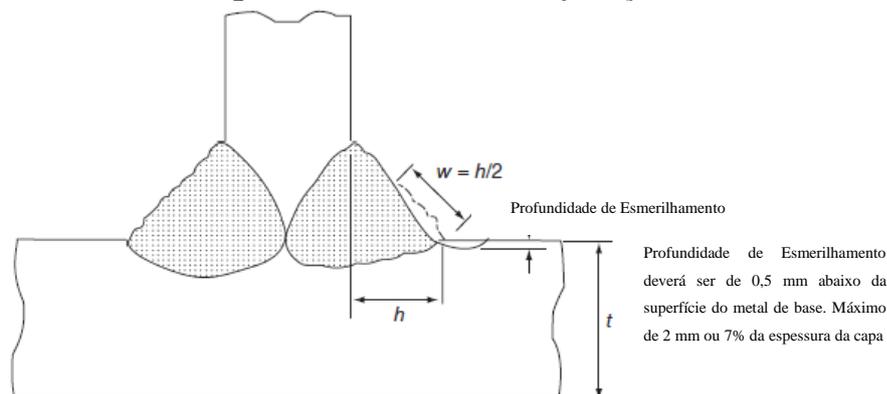
Figura 12 - Perfil de aplicação do desbaste



Fonte: Adaptado de MADOX (2013).

A aplicação do processo de desbaste deverá ocorrer após a limpeza e escovamento da superfície, onde a posição de ponta do desbaste deverá ocorrer entre 45 e 60° em relação a chapa principal. A progressão retilínea e profundidade uniforme, garantirão o sucesso da aplicação de modo que algumas zonas sejam alargadas obedecendo uma profundidade de 0,5 mm, sendo que para chapas acima de 30 mm de espessura, 7% de (t), limitado a 2 mm. É importante que o raio do desbaste seja adequado, caso contrário poderá ocorrer um aumento no fator de concentrador das tensões no pé do cordão de solda e anular o efeito do tratamento.

Figura 13 - Dimensões da aplicação

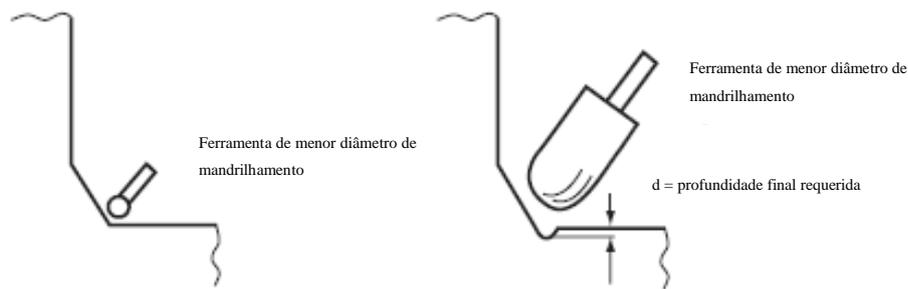


Fonte: IIW (2013)

Segundo IIW (2013), há cuidados que deverão ser tomados para algumas aplicações. Por exemplo, soldas de filetes de peças mais espessas, em torno de 40 mm ou mais, o canal realizado para atenuar as tensões, poderá se estender para a face da solda, e nesse local, poderá iniciar-se uma trinca anulando os benefícios do tratamento. A extensão do tratamento/canal deverá ser aplicada em baixos ângulos da face do cordão de solda e sua dimensão, deverá ser de metade

do comprimento da perna. Quando o filete estiver muito inclinado, o tratamento deverá ser realizado em dois estágios, o primeiro com uma ponta de menor diâmetro para demarcação do pé e posteriormente uma ponta de maior diâmetro para aprofundamento do canal, conforme ilustração abaixo.

Figura 14 - Aplicação em dois estágios.



Fonte: IIW(2013)

5.1.1.5. Operação do equipamento

Para a operação do equipamento, os operadores deverão ser treinados em como se posicionar e segurar a ferramenta, uma demonstração deverá ocorrer para que o próprio operador não só saiba controlar o equipamento, como a pressão necessária e a velocidade de progressão. Ele deverá ter conhecimentos de que a eficácia da aplicação do tratamento dependerá principalmente de sua execução e da mesma forma que um soldador passa pela avaliação periódica de suas habilidades, o operador que realizará essa operação, também periodicamente deverá passar.

5.1.1.6. Controle de qualidade

No processo de desbaste, é importante ter um controle de qualidade adequado durante o processo de inspeção para garantir a conformidade do produto final em que alguns aspectos deverão ser considerados:

Inspeção visual - Uma inspeção visual é essencial para certificar a qualidade superficial da peça após o processo de desbaste com o objetivo de procurar irregularidades como riscos trincas ou qualquer outro defeito visual;

Medições dimensionais - As medições que deverão ser executadas são de fundamentais para verificar se as dimensões estão conforme as tolerâncias especificadas e para isso são usados equipamentos de medição como micrômetros ou gabaritos.

Análise de rugosidade - A rugosidade é uma condição crítica para o desbaste e devido a isso é importante que a superfície esteja limpa e favoreça uma avaliação da rugosidade e se for necessário, utilizar um rugosímetro.

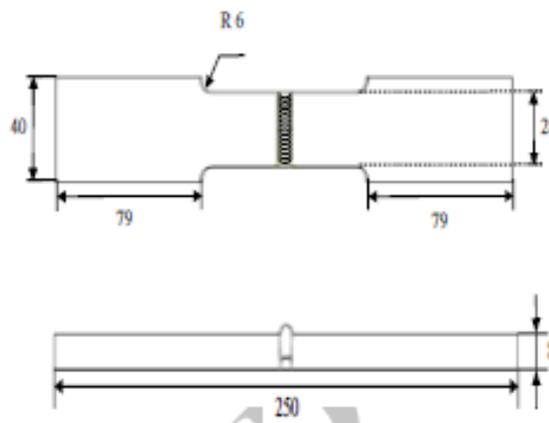
Inspeção de END – É importante que seja realizado um ensaio de líquido penetrante ou partícula magnética no canal que foi produzido pelo desbaste para garantir que não há nenhuma descontinuidade que foi ocultada pós ou antes do tratamento.

Rastreabilidade - O IIW (2016), recomenda, para efeito de rastreabilidade os registros e documentos de todos os resultados de controle de qualidade incluindo informações sobre as etapas do processo, parâmetros de operação, resultados das inspeções e quaisquer outras ações tomadas durante o processo.

5.1.2. Influência da geometria do canal criado pelo desbaste na resistência a fadiga

Um teste de fadiga foi realizado sob carregamento de amplitude constante usando uma máquina de teste de fadiga de 200 KN em temperatura ambiente e sem aquecimento das amostras. Testes de fadiga de baixo ciclo usando a uma taxa de tensão (R) e a frequência foram mantidas em 0,125 e 3 Hz, respectivamente. A geometria final do corpo de prova é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Corpo de prova utilizado para o teste de fadiga e aplicação do desbaste.



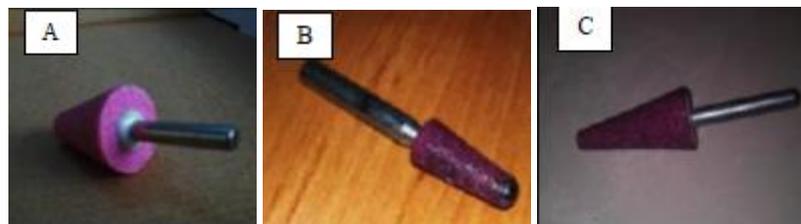
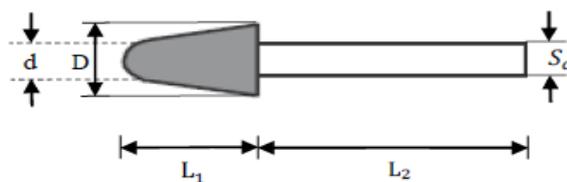
Fonte: FADAEI AND BETKHOODU (2018)

O tratamento de desbaste foi realizado por uma retífica elétrica à rotação de 27.000 rpm a uma potência de 500Wats. O objetivo foi entender o efeito do canal produzido pelo desbaste à vida a fadiga da junta soldada mostrada na figura 15.

A liga da ferramenta de corte utilizada é um mix de alumínio vermelho escuro e óxido de alumínio branco vitrificado que segundo FADAEI AND BETKHOODU (2018), apresenta um bom balanço entre o que se remove de material e a durabilidade da ferramenta, cuja utilização é mundialmente conhecida.

O processo de desbaste foi realizado utilizando três diferentes tamanhos de ferramentas para efeito de comparação de resultados listados na figura 16 e tabela 1. Nesse processo, apenas o pé da solda é removido de forma a remover defeitos de convergência e redução do ângulo de convergência de solda. O que resulta em uma diminuição na tensão. O material foi removido a uma profundidade de 1 mm em relação a espessura o corpo de prova.

Figura 16 - Dimensão da ferramenta de tratamento



Fonte: FADAEI E BETKHOODU (2018)

Tabela 1 - Dimensões das ferramentas de desbaste

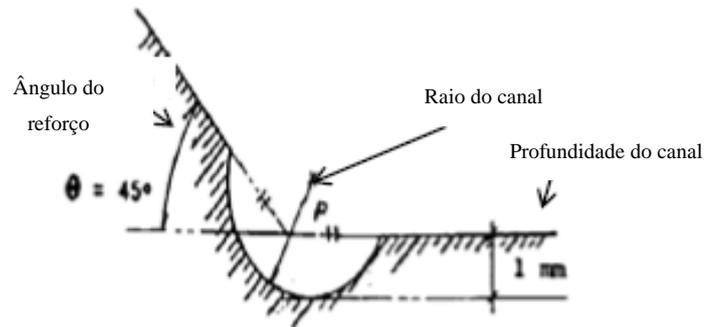
Ferramenta	Sd (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)	D (mm)	d (mm)
A	6	18	40	14	2
B	6	25	40	10	5
C	6	40	40	20	6

Fonte: FADAEI E BETKHOODU (2018)

Segundo FADAEI AND BETKHOODU (2018), três parâmetros, incluindo raio de solda, profundidade e ângulo de desbaste, influenciam nas análises de resultados e nesse artigo, foi investigado o efeito do raio do pé da solda assumindo 1 mm para a profundidade e 45° para o ângulo de desbaste da ferramenta.

Na simulação, apenas uma filete pequeno na intersecção da solda e metal de base foi desenvolvido resultando na redução do fator de concentração de tensão. A figura 17 mostra o perfil do pé da solda após o desbaste.

Figura 17 - Perfil do canal.



Fonte: Adaptado de FADAEI E BETKHOODU (2018)

Tabela 2 - Diferentes dimensões de desbaste

Ferramenta	Raio do Desbaste (mm)	Profundidade do desbaste (mm)	Ângulo da ferramenta (°)
A	1.0	1	45
B	2.5	1	45
C	3	1	45

Fonte: (FADAEI E BETKHOODU, 2018)

Para descobrir o fator de concentração das tensões, métodos analíticos e numéricos foram empregados. No método numérico depois de encontrar a distribuição da tensão utilizando o método de elementos finitos, foi definido como uma razão entre a local de tensão máxima na direção longitudinal e tensão nominal.

Onde:

$$K_t = \sigma_{\max}(\text{longitudinal}) / \sigma_{\text{nominal}}$$

Onde K_t é o fator de concentração das tensões.

Para calcular K_t , a análise de tensão incluindo duas etapas foi realizada usando o método de elementos finitos.

Na primeira etapa, o campo de tensão, devido ao canal, foi definido e então na segunda etapa o carregamento axial foi submetido para o final de um lado, enquanto o deslocamento no outro lado foi considerado zero.

Essa análise foi realizada antes e após a realização do canal pelo desbaste e para cada caso o fator de concentração das tensões foi obtido.

A tabela 3 mostra uma comparação entre os resultados analíticos e numéricos do fator de concentração das tensões.

Tabela 3 - Comparação entre método de elementos finitos e métodos analíticos

Condição	K_t – Método de Elementos Finitos	K_t – Método Analítico	K_t - Diferença de Percentual
Como Soldado	2,63	2,79	5,73
A	1,73	2,85	6,48
B	1,51	1,54	1,94
C	1,48	1,49	0,67

Fonte: FADAEI E BETKHOODU (2018)

Veja que ambos os resultados, tanto analíticos quanto por elementos finitos apresentaram uma boa concordância, com uma diferença aceitável entre elas. E ambas provaram que o aumentando o raio do canal, resulta em uma diminuição no fator de concentração das tensões.

A tabela 4 mostra os resultados de contagem de ciclos comparando os corpos de prova nas condições como soldado e diferente dimensões partindo de 1 mm, 2,5 mm até 3 mm. Fica evidente que aumentando o raio do canal, consequência do aumento da ferramenta, uma melhora na vida a fadiga foi obtida.

Em paralelo aumentando o raio e consequentemente reduzindo a gravidade do canal, o fator de concentração das tensões também diminui.

Tabela 4: Resultado dos ciclos

Condição do teste	Ferramenta	Vida a Fadiga (ciclos)
Como soldado	Testado	28.357
Como soldado	Re-Testado	30.159
Após tratamento	A	30.875
Após tratamento	B	34.356
Após tratamento	Re-Testado B	36.544
Após tratamento	C	39.076
Após tratamento	Re-Testado C	42.710

Fonte: FADAEI E BETKHOODU (2018)

5.1.2.1. Resultado do tratamento

Os resultados da aplicação do tratamento como método de melhoria da resistência à fadiga utilizado por FADAEI E BETKHOODU (2018), concluiu-se que o tratamento de desbaste pode melhorar a vida a fadiga resumindo-se nos aspectos abaixo:

1. Comparando o corpos de prova soldados como os corpos de prova que foram realizados os canais pelo desbaste na simulação, tanto analítica quanto a numérica, fica claro que o tratamento leva a uma redução no fator de concentração das tensões.
2. É possível concluir que com o aumento do raio do canal produzido pelo desbaste, diminui o fator de concentração das tensões e conseqüentemente um aumento de vida a fadiga;
3. Que no resultado experimental o melhor resultado foi observado utilizando a ferramenta de 3 mm levando a uma melhoria de 50,61% na vida a fadiga e a de 1 mm apresentou o pior resultando aumentando a vida a fadiga em 8, 88%.

5.2. TIG Dressing

5.2.1. Introdução

O objetivo do processo de tratamento TIG (TIG Dressing) é refundir a margem do filete entre o metal de base (MB) e a zona fundida (ZF) de forma a suavizar a transição de um ao outro e consequentemente aumentar a resistência a fadiga da junta. Recomenda-se a aplicação do processo para juntas soldadas onde as chapas principais tenham no mínimo 6 mm de espessura para aços. Veja na figura 18 uma ilustração do processo.

Figura 18 - Equipamento para aplicação d TIG.



Fonte: MADOX (2013)

5.2.2. Equipamento

Basicamente o processo TIG é similar ao processo de soldagem, portanto, utiliza os mesmos aparatos como fonte de soldagem, cabos, cilindro de gás tipo argônio por exemplo, tochas, bocais e eletrodo não consumível de tungstênio. Os parâmetros típicos para a configuração da fonte, sugeridos pelo IIW seguem na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para a execução do processo de TIG Dressing

Parâmetros	Range
Gás de proteção	100% Argônio
Vazão do gás (l/min)	7 – 12 l/min
Diâmetro do bocal (mm)	10 – 14 mm
Pré-aquecimento (graus Celsius)	50 a 200 °C
Diâmetro do eletrodo (mm)	3 – 4 mm
Eletrodo	Tório, cério ou lantânio
Tensão (V)	12 – 17 volts
Corrente (a)	160 – 250 amperes
Velocidade de desbaste (cm/min)	8 – 16 cm/min
Heat input	Depende do aço – (material e espessura)

Fonte: IIW (2013)

O processo TIG Dressing requer que o soldador deva ser capaz de aplicar a técnica correta de TIG. Isso inclui segurar a tocha de forma correta para não danificar a solda e o metal de base. O soldador deve estar familiarizado com os materiais envolvidos no processo de tratamento TIG, antes de aplicar o tratamento. É importante que o soldador realize uma inspeção prévia para remover todos os contaminantes que possam contribuir negativamente para o sucesso da aplicação.

Como qualquer outra habilidade de soldagem, a prática e a experiência desempenham um papel fundamental na capacidade do soldador de executar o TIG Dressing de maneira eficiente e eficaz e com o tempo, o soldador desenvolverá habilidades aprimoradas para realizar o processo com precisão.

5.2.3. Segurança

Durante o processo de TIG, o soldador deve tomar precauções de segurança adequadas. Isso inclui o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) apropriado como luvas de proteção, óculos de segurança e avental para evitar lesões durante a operação

5.2.4. Preparação para aplicação

Assim como para a soldagem, toda região deverá estar livre de qualquer contaminante como, óleo, graxa, tinta e completamente limpa. Se necessário lixadeira e/ou escova rotativa poderá

ser utilizada para a preparação. Segundo o IIW (2013), a formação de poros poderá ser o resultado de limpeza deficiente.

5.2.5. TIG Dressing electrode

O formato do arco depende principalmente no perfil do eletrodo, pois caso ele apresente alguma contaminação ou desgaste, isso poderá se tornar um agravante para o arco e conseqüentemente dificultar a refusão da região a ser tratada. Para evitar esse tipo de manifestação indesejada, a afiação do eletrodo, se torna uma característica fundamental para uma aplicação correta do tratamento. Veja na figura 19, uma comparação de ponta ruim e uma ponta em boas condições para aplicação do TIG.

Figura 19 - Condições da ponta do eletrodo. – (a) boas e (b) ruins.



Adaptado de IIW (2013)

5.2.6. Gás de proteção

A proteção da poça de fusão, se dá pela injeção controlada do gás na tocha de forma a circundar a coluna do arco elétrico formado entre o eletrodo e a peça. Por isso é importante o controle da vazão do gás de forma laminar e constante. Caso seja insuficiente a vazão de gás, poros poderão se formar na região a ser tratada e comprometer a eficiência do tratamento. O controle laminar

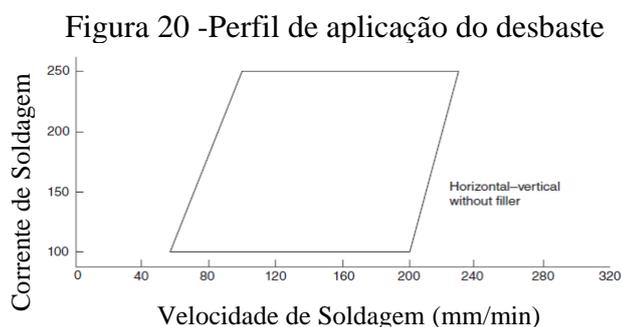
da vazão de gás, somado a uma velocidade adequada da progressão garantirá uma boa eficácia da aplicação do TIG.

5.2.7. Pré-aquecimento

Caso a soldagem seja executada pelo processo de FCAW e seja necessário a realização do TIG imediatamente após a soldagem, um pré-aquecimento de 150°C por 20 minutos deverá ser solicitado, tendo em vista a presença de um teor mais elevado de hidrogênio causado pelo Arame Tubular. No caso em que o processo ocorra após o resfriamento da soldagem, em um tempo longo após a finalização do processo, o pré-aquecimento deverá seguir os mesmos parâmetros que a especificação do procedimento de soldagem.

5.2.8. Velocidade de soldagem x corrente

O tratamento de TIG, exige do soldador ou operador habilidade com relação ao aporte térmico, pois alto aporte de calor, favorece uma baixa dureza da região tratada além de permitir um aumento na progressão da soldagem, no entanto a combinado de aporte térmico elevado como baixa velocidade de progressão propiciará baixa qualidade no perfil da região e mordeduras, comprometendo a eficácia do tratamento. Com o objetivo de evitar essa execução equivocada, o IIW sugere uma referência que poderá ser utilizada para maior acurácia do processo. Veja a figura 20 a recomendação do IIW quanto a velocidades adequadas x corrente utilizada.

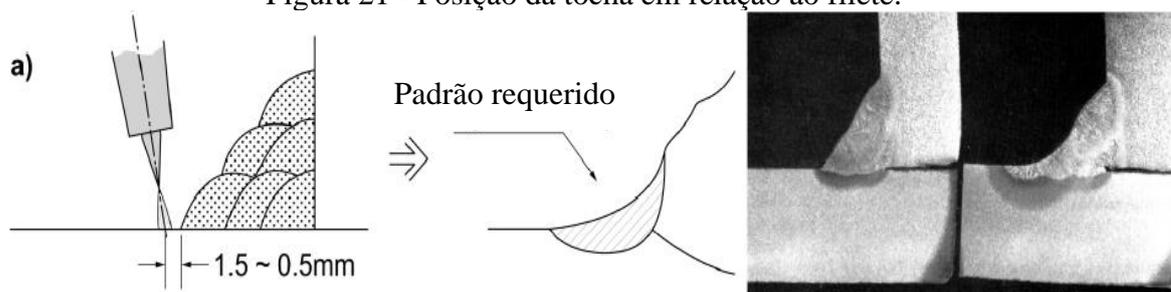


Fonte: Adaptado de IIW (2013)

A combinação da velocidade de soldagem x corrente, resultada no aporte térmico imposto a região a ser tratada. Com a parametrização recomendada pelo IIW, o calor imposto não causará defeitos durante a execução do tratamento.

Para que sejam atingidos os resultados esperados de resistência, o operador ou soldador deverá seguir parâmetros de posicionamento do bico da tocha, em relação a peça a ser tratada, velocidade conforme a especificação e altura do eletrodo em relação a peça de modo que esteja entre 60 e 90° da chapa plana, apresentar uma inclinação em relação a linha de progressão em torno de 10° e distância do centro da ponta do eletrodo de tungstênio a margem da solda de 0,5 a 1,5 mm, conforme a ilustração 21.

Figura 21 - Posição da tocha em relação ao filete.

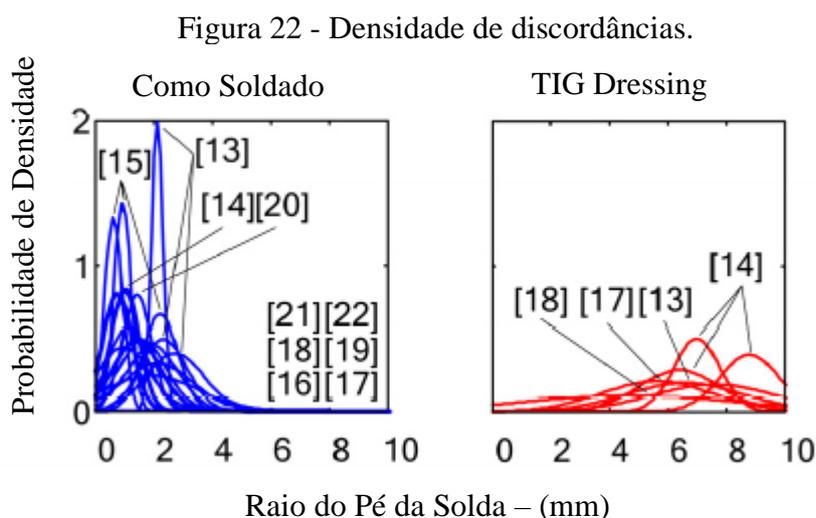


Fonte: IIW (2013)

Durante a execução do TIG, paradas e reinício deverão ocorrer e essa manobra, pode resultar em um perfil não satisfatório para o TIG, criando mordeduras por exemplo. Para evitar a geração de discontinuidades o IIW (2013) sugere que, quando ocorrer a parada, reiniciar a progressão 6 mm antes do ponto de parada ou sobre a face do filete, interromper a progressão deslocando o eletrodo para mais ao meio da face do filete, e reiniciar sobre a face e se deslocar para a linha de refusão ou reiniciar a progressão do lado oposto a progressão anterior.

5.2.9. Efeito das discordâncias após aplicação do TIG

Diferentes autores têm realizado pesquisas para entender quais os efeitos da mudança do raio no tratamento TIG, onde o que já se sabe é que o principal efeito tem relação com a tensões residuais as quais são reduzidas com a redução do raio de aplicação segundo VAN ES (2012). Veja na figura 22 uma comparação de densidade antes e depois da aplicação do TIG.



Fonte: Adaptado de VAN ES (2012) Os números entre colchetes referem-se às fontes dos gráficos no artigo original.

A figura 22 refere-se à quantidade de discordâncias em um material cristalino por unidade de volume antes e depois a da aplicação do tratamento de TIG. As discordâncias são defeitos lineares ou imperfeições na estrutura cristalina de um material, que podem ser introduzidas durante processos de deformação plástica ou durante a formação do material.

A densidade de discordâncias é uma medida da concentração desses defeitos dentro do material ASHBY (1996). É expressa como o número de discordâncias por unidade de volume (geralmente em metros cúbicos). Quanto maior a densidade de discordâncias, maior é o número de discordâncias presentes em um dado volume de material.

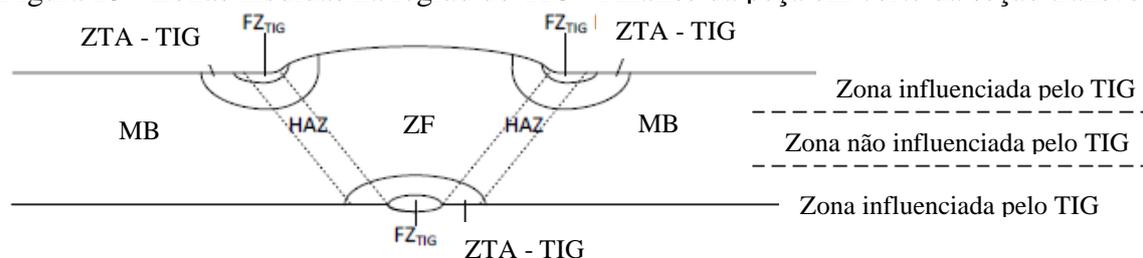
Em resumo, a densidade de discordâncias é uma medida da quantidade de defeitos lineares (discordâncias) presentes em um material cristalino e pode influenciar significativamente suas propriedades mecânicas. Fica claro na figura 22, que a probabilidade de densidade cai significativamente após a aplicação do tratamento de TIG Dressing.

5.2.10. Influência do TIG na dureza e geometria do pé da solda.

VAN ES (2012) investigou também a influência do tratamento de TIG Dressing na dureza da zona tratada. Para isso foram analisadas medições em nove amostras de diferentes especificações. Todas as amostras foram sodadas com junta em V das classes S460 e S1100. Algumas amostras foram de chapas laminadas e outras peças de chapas fundidas na espessura de 20 mm.

Segundo VAN ES (2012), não há variações de dureza ao longo do comprimento do cordão e sendo assim, a medida foi realizada em um ponto da seção transversal, localmente. Veja na figura 23 as zonas analisadas no TIG.

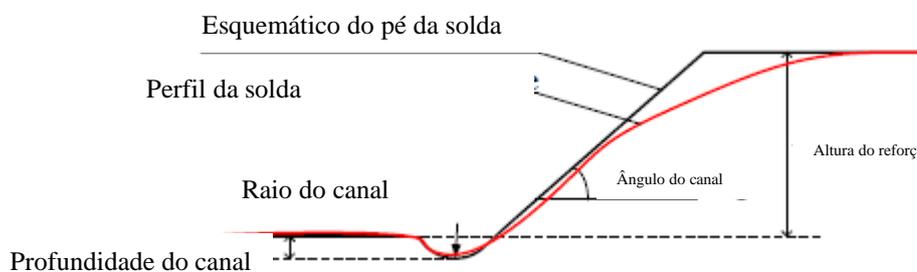
Figura 23 - Zonas medidas na região do TIG - Análise da peça em corte da seção transversal.



Fonte: Adaptado de VAN ES (2012)

Com base nas observações dos dados de solda, quatro parâmetros foram definidos para descrever a solda com precisão. Os quatro parâmetros de convergência de solda; raio de convergência de solda, ângulo de convergência de solda, altura de solda e rebaixo, são representados na figura 24.

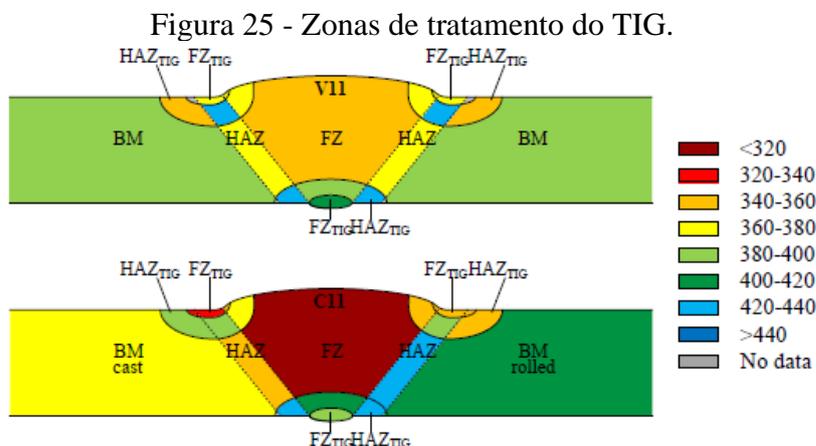
Figura 24 - Zonas medidas na região do TIG



Fonte: Adaptado de VAN ES (2012).

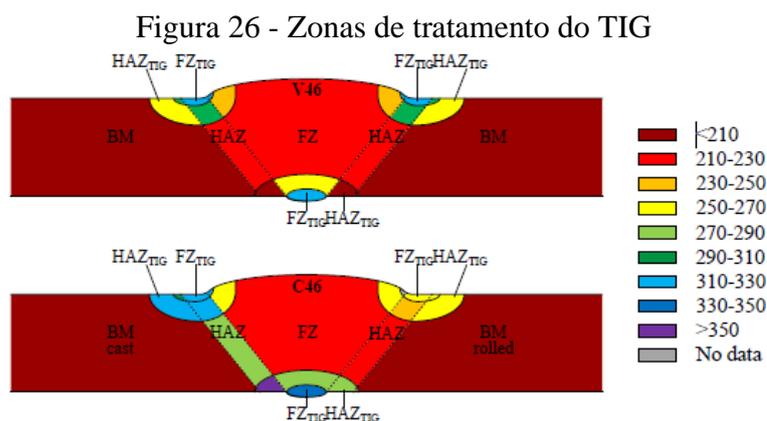
Na figura 25 são apresentados os resultados das medições de dureza para os corpos de prova com aço grau S1100. Os diagramas mostram o amaciamento da área tratada com TIG no pé da

solda em relação às áreas circundantes não perturbadas em alguns casos. No entanto, outras áreas, mostram um aumento de dureza.



Fonte: Adaptado de VAN ES (2012). (BM cast) Metal de base fundido, (BM rolled) Metal de base laminado, BM (Metal de base), (HAZ) Zona afetada pelo calor, (FZ) Zona fundida, (FZ_{TIG}) Zona fundida do TIG e (HAZ_{TIG}) Zona afetada pelo calor do TIG.

Já para a figura 26 são apresentados os resultados das medições de dureza para as amostras do aço grau S460. Em contraste com as amostras de resistência muito alta na figura 25, as áreas tratadas com TIG mostram um aumento de dureza, às vezes até 50%. Nenhuma das zonas que são influenciadas pelo tratamento TIG, tanto diretamente na solda ou posteriormente no material de base ou HAZ mostram qualquer diminuição de dureza.



Fonte: Adaptado de VAN ES (2012). (BM cast) Metal de base fundido, (BM rolled) Metal de base laminado, BM (Metal de base), (HAZ) Zona afetada pelo calor, (FZ) Zona fundida, (FZ_{TIG}) Zona fundida do TIG e (HAZ_{TIG}) Zona afetada pelo calor do TIG.

Segundo VAN ES (2012) a maioria das amostras apresentaram um aumento de dureza no pé da solda, onde é esperado o início da trinca. Em algumas casos, uma queda na dureza foi observada,

mas apenas nos aços de resistência muito alta. Se a dureza puder ser ligada a um aumento na vida a fadiga, a maioria das amostras poderiam apresentar uma influência positiva na vida a fadiga das juntas soldadas.

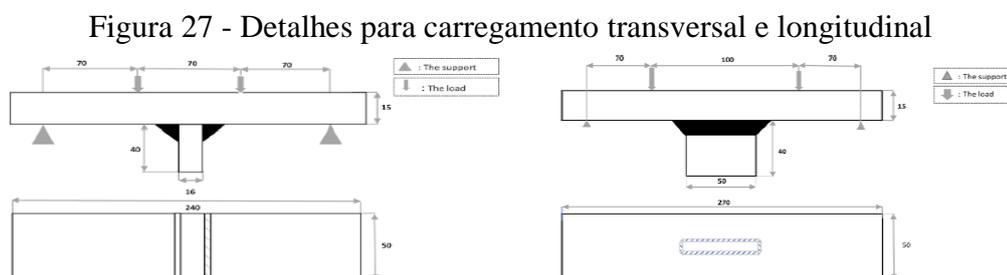
5.2.11. Influência do TIG na reparação de juntas pré-fadigadas soldadas em ângulos.

Segundo MANAI (2012), foram utilizados os materiais SM58 e SM50 onde vinte amostras foram submetidas a um teste com fixações transversais, carregados a 280MPa até 450.000 ciclos e outras vinte amostras foram submetidas a um teste com fixações longitudinais, carregados a 280 MPa com ciclos que foram de 300.000 a 350.000 ciclos.

O objetivo da pesquisa era avaliar a eficiência na reparação de juntas soldadas em ângulos pré-fadigadas pelo tratamento TIG.

Durante os teste de ciclos, inspeções utilizando ultrassom e líquido penetrante foram realizados para detecção de descontinuidades nas amostras

A figura 27 ilustra os detalhes estruturais realizados conforme recomendação do IIW.



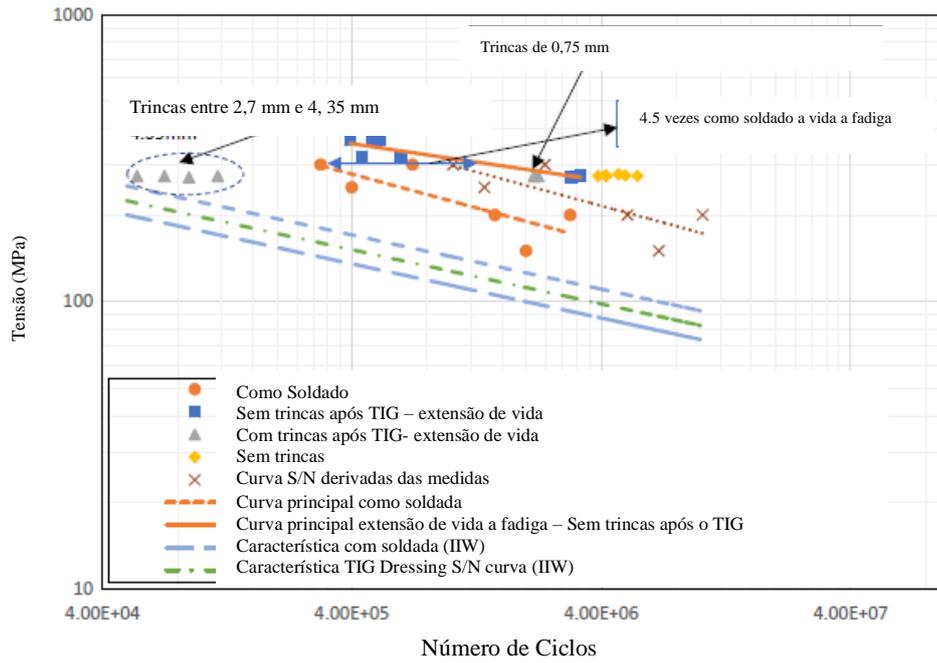
Fonte: MANAI (2011)

Segundo MANAI (2011) independente dos detalhes da solda, ocorreram melhorias na vida à fadiga das amostras que foram tratadas pelo TIG e que estavam pré-fadigadas (trincadas) em média de 3,4 vezes a vida útil da fadiga.

Em detalhes, o aumento da resistência a fadiga foi de 7,5 vezes para fixação longitudinal e de 4,5 vezes para a fixação transversal nos casos em que o TIG refundiu e reparou todas as trincas de fadiga.

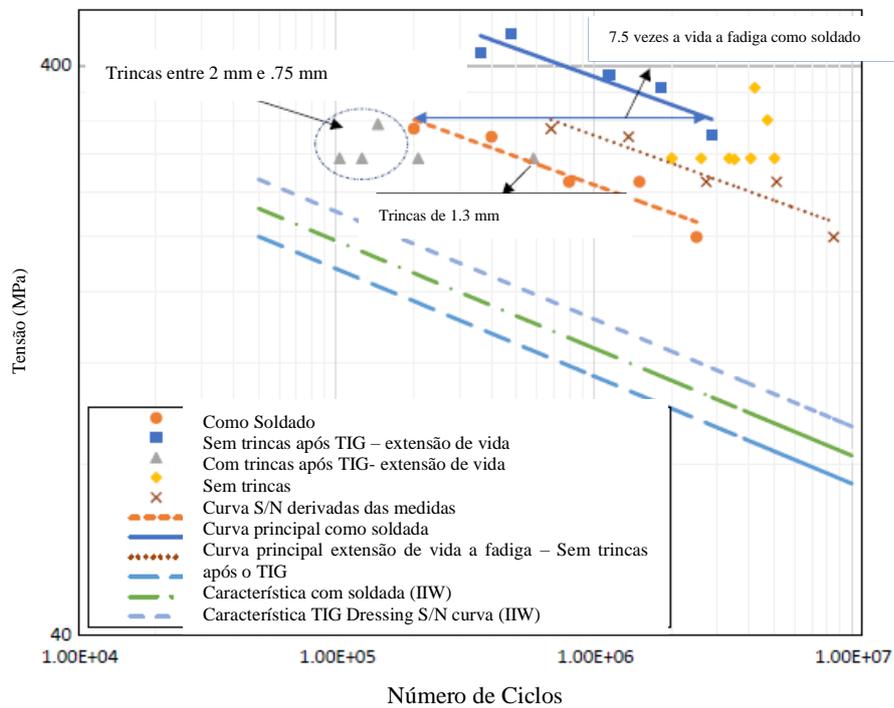
Em contrapartida, se as trincas remanescentes são mais profundas que 1,3 mm, a vida estendida à fadiga é menor do que a soldada e que inclusive, independe do tipo de detalhes soldados. Veja nas figuras 28 e 29 os graficos S/N gerados.

Figura 28 - Curva S/N – Fixação transversal



Adaptado de MANAI (2012)

Figura 29 - Curva S/N – Fixação longitudinal



Adaptado de MANAI (2012)

A maior melhoria na vida à fadiga é detectada no caso em que o TIG conseguiu remover completamente as trincas.

5.2.12. O efeito da profundidade de penetração das variáveis de soldagem TIG

Em sua pesquisa, utilizando cinquenta amostras, FISHER (1979) estudou o efeito da profundidade de penetração em função das variáveis de soldagem TIG:

A pesquisa foi dividida em três etapas:

1° Etapa: Fisher submeteu as amostras como soldadas e sem tratamento à fadiga;

2° Etapa: Fisher submeteu as amostras a um pré carregamento até atingir 75% de confiança como soldado e aplicou o tratamento de TIG.

3° Etapa: Fisher submeteu as amostras à fadiga até apresentarem trincas antes de apresentarem trincas visíveis e as submetia ao tratamento de TIG.

Na segunda e terceira etapa trincas de até 19 mm de comprimento a uma profundidade entre 1.3 mm e 5 mm foram detectadas antes da aplicação do TIG e o que se notou foi que em alguns casos, as trincas não foram totalmente removidas após aplicação do TIG.

As tabelas 5 e 6 apresentam dados do material utilizado para fabricação das amostras e parâmetros utilizados no TIG. A figura 30 também mostra o detalhe da junta que foi soldada para o teste de fadiga.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas das amostras

Material	Redução de Área	Tensão de Escoamento	Alongamento
ASTM A36	50.4%	275.6 MPa	30.3%

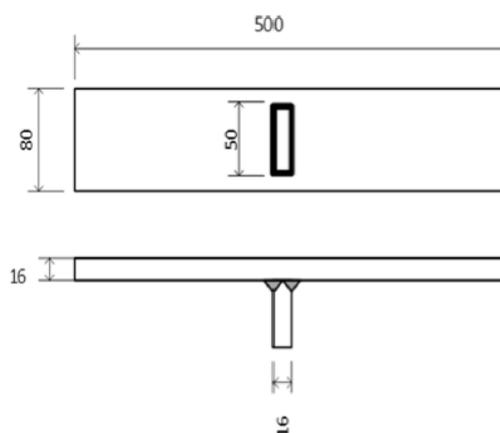
Fonte: FISHER (1979)

Tabela 6 - Parâmetros do TIG

CVA (graus)	Corrente	Tensão	Heat/Input	Penetração
60	200A	16V	64 KJ/in	4.3 mm

Fonte: FISHER (1979)

Figura 30 - Detalhe para carregamento longitudinal ASTM A36



Fonte: FISHER (1978)

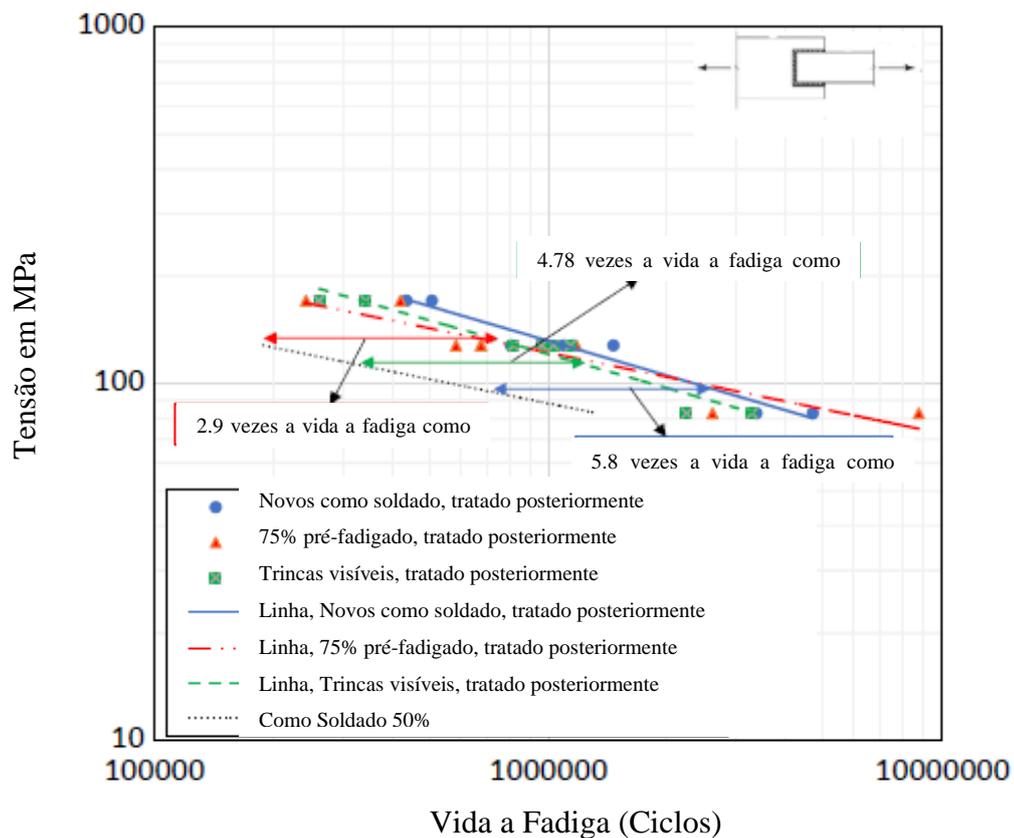
Os pontos de teste plotados como 'novos soldados tratados com TIG' apresentam amostras tratadas antes da aplicação de carga cíclica.

Os pontos de teste identificados como 'pré-fatigados até 75% da vida' foram todos pré-carregados para 75% da vida útil da curva S/N do detalhe não tratados e depois tratados com TIG.

Os pontos indicados como "pré-fatigados até trinca visível" apresentam como soldados amostras pré-carregadas até a introdução de trincas bem visíveis e depois tratados com TIG.

Melhorias na condição no pé da solda não poderiam afetar o crescimento de trincas da raiz da solda. Veja abaixo na figura 31 o resultado dos dados plotados no gráfico.

Figura 31 - Plotter dos dados na curva S/N.



Fonte: FISHER (1978)

A maioria dos detalhes tratados pelo TIG tiveram sua vida regida pela falha da raiz da solda. O pé de solda foi refundido para suavizar a transição do raio e remoção das trincas iniciais.

Portanto, a concentração de tensão e as condições iniciais de descontinuidade são reduzidas no pé da solda, o que forçou a falha da raiz. Pode-se esperar que a resistência à fadiga aumente pelo menos 3,4 vezes a vida à fadiga soldada e não exceder 5,8 vezes a vida soldada.

5.3. Martelamento

5.3.1. Introdução

O objetivo do Martelamento é através de tensões compressivas, resultante de uma deformação plástica aplicada no pé da solda de filete, aumentar a resistência a fadiga de uma junta soldada. Deve ser aplicada em chapas de aço com espessuras acima de 4 mm e seus resultados dependerão em grande parte, da solda a ser martelada estar sob tração ou carga de compressão durante a sua operação, preferencialmente a aplicação deverá acontecer durante o carregamento da peça.

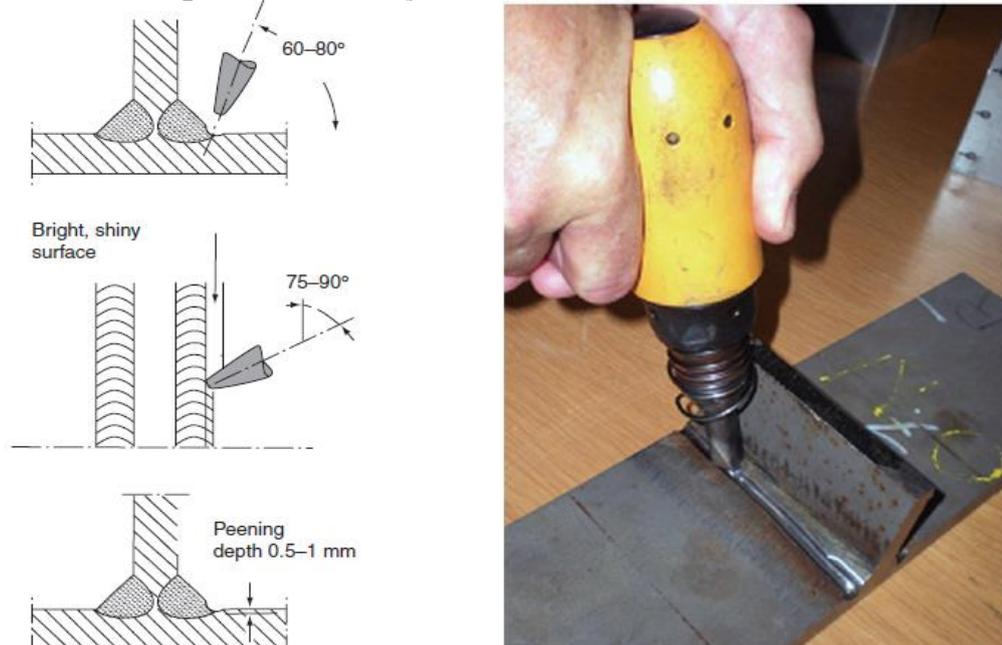
5.3.2. Ferramenta

O equipamento utilizado, normalmente hidráulico ou pneumático, possui pistões de diâmetro entre 15 e 30 mm, operando com uma pressão de 5 a 7 bar, entregando de 25 a 100 impactos por segundo onde esses impactos resultam em uma energia de 5 a 15 joules (IIW,2013).

5.3.3. Operação e segurança na aplicação

A habilidade exigida do operador está em manter o martetele numa velocidade constante e a uma altura constante de modo a garantir o mais estável possível os impactos da ferramenta que pela vibração causada, poderá causar um certo desconforto ao operador que deverá utilizar EPI's como óculos de proteção, máscara, luvas e abafador. Tendo em vista essas particularidades de operação, é importante que o operador realize chapas de testes de modo a parametrizar essas condições para atingir bons resultados antes da aplicação, pois para se atingir os resultados esperados do tratamento de deformação plástica, o Martelamento deverá seguir um ângulo de 45 a 80° em relação a chapa plana e uma perpendicularidade entre 75 e 90° em direção a progressão da solda. Por ser tratar de tensões compressivas, é muito importante que ocorra uma preparação da região a ser tratada antes da aplicação, como o esmerilhamento para remoção de respingos, óxidos ou algum outro material. Para cordões mais convexos, durante a aplicação pode ocorrer algum tipo de sobreposição, que é um concentrador de tensão. A figura 32 ilustra a aplicação do Martelamento.

Figura 32 - Realização do tratamento de Martelamento.



Fonte: (IIW, 2013)

Para aços mais macios será possível atingir a profundidade do canal e perfil em poucos passes, segundo o IIW (2013) não é muito comum um número acima de 4 passes e para aços mais duros, poderá ocorrer uma vibração excessiva causando ao longo da solda, regiões não tratadas. Nas condições em que as peças tratadas forem sujeitas a elevadas tensões, o Martelamento contribuirá pouco ou não terá contribuições para a resistência.

5.3.4. Controle de qualidade da aplicação

Segundo IIW (2013), o controle de qualidade para o Martelamento pneumático com o objetivo de melhorar a fadiga envolve uma série de medidas e verificações para garantir que o processo seja executado de maneira adequada e eficaz. Aqui estão algumas diretrizes para o controle de qualidade nesse contexto:

Procedimentos e especificações: Desenvolva procedimentos operacionais padrão (POPs) e especificações técnicas para o Martelamento pneumático. Esses documentos devem descrever claramente as etapas do processo, os parâmetros de operação, as características do equipamento, as inspeções necessárias e as tolerâncias permitidas.

Qualificação do operador: Certifique-se de que os operadores do Martelamento pneumático sejam devidamente treinados e qualificados para realizar a tarefa. Eles devem entender os procedimentos corretos, conhecer os parâmetros de operação adequados e estar cientes das

questões de segurança relacionadas ao trabalho. Segundo IIW (2013), deverá ser considerado uma uniformidade da endentação ao longo do cordão durante o tratamento, bem como, a profundidade correta, cujo valor deverá apresentar algo em torno de 0,5 mm, tendo como profundidade mínima de 0,15 mm e que não ultrapasse 1 mm de profundidade.

Inspeção visual: Realize inspeções visuais para verificar a qualidade do Martelamento pneumático. Isso envolve examinar as superfícies tratadas para detectar possíveis defeitos, como rachaduras, lascas ou outras irregularidades. As superfícies devem estar uniformes, sem danos excessivos ou pontos de concentração de tensão.

Medição de rugosidade: Meça a rugosidade da superfície após o Martelamento pneumático para garantir que esteja dentro dos requisitos especificados. Uma superfície com rugosidade excessiva pode indicar problemas no processo ou falta de controle adequado.

Ensaio não destrutivo: Realize ensaios não destrutivos, como partículas magnéticas ou líquido penetrante, para identificar possíveis descontinuidades ou defeitos subsuperficiais que possam ter sido introduzidos durante o Martelamento pneumático. Isso é especialmente importante em componentes sujeitos a altas solicitações de fadiga.

Documentação e rastreabilidade: Mantenha registros detalhados de todas as etapas do processo de Martelamento pneumático, incluindo dados operacionais, resultados de inspeção e qualquer ação corretiva tomada. Isso permite a rastreabilidade e facilita a identificação de problemas recorrentes ou áreas de melhoria.

Auditorias e revisões regulares: Realize auditorias internas e revisões periódicas do controle de qualidade do Martelamento pneumático para garantir que os procedimentos estejam sendo seguidos adequadamente e para identificar oportunidades de melhoria contínua.

É importante ressaltar que o controle de qualidade deve ser adaptado às necessidades específicas do processo de Martelamento pneumático e às características dos materiais e componentes envolvidos. Recomenda-se consultar as normas e especificações relevantes, além de buscar orientação de especialistas em engenharia de materiais e ensaios não destrutivos.

5.3.5. Efeito do Martelamento na distribuição de tensões residuais induzidas pelo processo.

Estudos mostram a eficácia do tratamento de Martelamento, conforme os estudos também realizados por MADOX (2013) fazendo parte das recomendações do IIW. Os autores INFANTE, BRANCO e BAPTISTA (1995), investigaram os efeitos do Martelamento no desempenho de uma junta cruciforme não carregada por flexão em um aço de média resistência conforme a tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas dos materiais

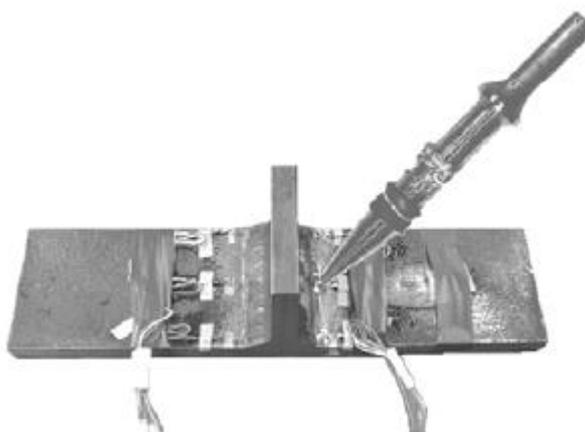
Material	Tensão de Escoamento	Tensão de Fratura	Alongamento
St52 – Din 17100	355MPa	490MPa	16%

Fonte: INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995)

A amostra foi soldada pelo processo SMAW, utilizado um Martetele portátil com quatro strain gauges, o diâmetro da ferramenta foi de 8.5 mm em uma pressão de 3.5 Bar. Em quatro passes o tratamento foi realizado na direção transversal do corpo de prova, com 300 impactos por minuto.

Para o ensaio de fadiga da amostra, realizaram-se ciclos a 250KN, em uma frequência de 10 – 15 Hz, a uma razão igual a 0,1. Veja uma ilustração da aplicação do tratamento na figura 33.

Figura 33 - Aplicação do Martelamento.

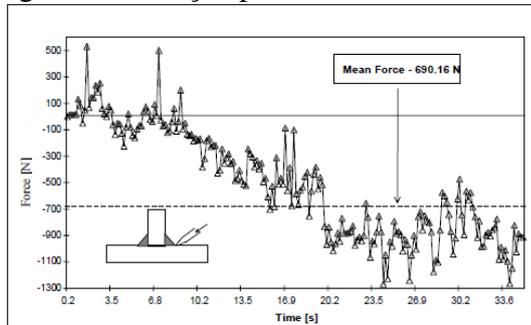


Fonte: INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995)

Os pesquisadores realizaram medições utilizando strain gauges durante a aplicação do tratamento de Martelamento, onde a região superficial apresentou medidas de dureza de aproximadamente 320 HV mostradas na figura 34, além de mostrar uma região de até 2,5 mm

afetada pelo tratamento. As medidas de força foram utilizadas para simulação numérica nesse mesmo artigo.

Figura 34 - Força aplicada de Martelamento



Fonte: INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995)

A tabela abaixo mostra o resultado, onde $N=K_0/(\Delta\sigma)^m$; $(\Delta\sigma)$ - range nominal aplicado.

Tabela 8 - Parâmetros de S/N encontrados para o ST52

Referencia	m	K_0	r^2 (coeficiente de Correção)	Ganho em Resistência 2 $\times 10^6$ Ciclos	Ganho em Resistência 2×10^7 Ciclos
Soldado	8.263	4.99E+26	0.9469	1	1
Base	11.068	4.93E+34	0.9380	1.25	1.20
Martelado	6.751	1.85E+23	0.7866	1.11	1.29

Fonte: INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995)

Os valores de tensão residual foram medidos tanto por difração de raio x quando pelo método de perfuração no pé do cordão nas distâncias de 1, 2, 3 e 5 mm na direção longitudinal. O objetivo foi quantificar a introdução de tensão residual e verificar se a fadiga muda o seu padrão da tensão residual da junta soldada. As tensões de compressão são benéficas a fadiga e observadas na região do tratamento, pois a tensão residual é magnitude de escoamento. À medida que se afastada da região tratada, as tensões são desprezíveis, por exemplo a 5 mm de distância da região tratada. Veja o resultado das tensões residuais medidas conforme localização nos testes.

Tabela 9 - Valores experimentais de tensão residual obtidos por extrapolação.

Distância e direções	X = 0 mm		X = 1 mm		X = 2 mm		X = 3 mm		X = 5 mm	
	x	z	x	z	x	z	x	z	x	z
Perfuração Soldado	-90.7	-25.7	-	-	-18	11	-	-	91	66
Perfuração Martelado	-486	-203.3	-	-	-286	-142	-	-	14	-50
Fadiga Perfuração	-	-70	-	-	-	-	-	-	-7	-33
Soldado Difração X	-189	-78	-	-	-138	-22	-	-	-86	222
Martelamento Difração	-302 -334	-385 -439	-298	-288	-258 -206	-171 -213	-185	-172	-192	150

Fonte: INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995)

A tabela 9 mostra que os valores das tensões residuais foram obtidos em algumas amostras selecionados por raio X difração e a técnica de perfuração no pé da solda nas zonas localizadas nas distâncias 1, 2, 3 e 5 mm do pé de solda no sentido longitudinal direção x.

Os objetivos desses testes foram quantificar as tensões residuais introduzidas pelo processo de martelo e verificar se a carga de fadiga muda o padrão de tensão residual nas juntas soldadas. As tensões residuais diminuem à medida que a distância x aumenta.

Segundo pesquisas realizadas por INFANTE, BRANCO E BAPTISTA (1995), os resultados da distribuição de dureza mostraram que a profundidade da zona afetado pelo Martelamento é de cerca de 2,5 mm. Este foi considerado o limite do campo de tensão residual criado pelo Martelamento. Verificou-se que as tensões residuais de pico perto do pé de solda eram de escoamento magnitude na compressão, justificando o grande benefício do Martelamento.

Algum efeito de relaxamento das tensões pode ocorrer nos corpos de prova ensaiados à fadiga, uma vez que ambas as tensões residuais no x e as direções z foram encontradas apenas ligeiramente compressivas, enquanto o residual as tensões nos espécimes testados como soldados e não fatigados deram valores de tração de baixa magnitude.

1

¹ – Distância em mm do pé da solda - em 1 mm é mais próximo e 5 mm mais distante.

5.4. Martelamento Com Ultrassom (HFMI)

5.4.1. Aplicação do Tratamento

O método conhecido como High Frequency Mechanical Impact (HFMI) vem sendo estudado ao redor do mundo como uma das mais eficazes técnicas para aplicação de tratamento em componentes estruturais submetidos a fadiga. Método, que consiste na aplicação de tensão residual de compressão, através da aplicação de impactos em velocidades ultrassônicas, em junta soldadas. Segundo, (Boris Fuštar, Ivan Lukačević, Darko Dujmović, 2020), o método de HFMI, aumenta a resistência a fadiga mais de 18 vezes se comparado a mesma região não tratada. Neste método um fonte de energia impulsiona elementos piezoelétricos, elementos magnetostritivos ultrassônicos, ou ar comprimido com alta frequência. Cabeças cilíndricas alternadamente aceleram e golpeiam o componente da estrutura (pé de solda) em alta frequência (> 90 Hz). O efeito positivo da energia de impacto em cada curso é determinado pela velocidade (frequência) e a massa que vem no movimento.

Durante o tratamento, o material é localmente deformado plasticamente causando mudanças estruturais e mudanças na geometria do cordão. Tensões de compressão são introduzidas no material reduzindo o concentrador de tensão residual e conseqüentemente aumentando a resistência da junta à fadiga. O resultado da deformação plástica causada pelo penetradores é o encruamento localizado que aumenta a tensão de escoamento do material localizadamente. Resultado esse que segundo FUŠTAR, LUKAČEVIĆ, DUJMOVIĆ (2020) precisa ser estudado profundamente. Veja na figura 35 um exemplo da ferramenta utilizada para aplicação do tratamento de HFMI.

Figura 35 - Ferramenta de aplicação do HFMI e seus penetradores.



FUŠTAR, LUKAČEVIĆ, DUJMOVIĆ (2020)

5.4.2. Treinamento do Operador

Normalmente quando o equipamento é adquirido pelo cliente, o fornecedor aplica um treinamento ao operador entre um e dois dias. Algumas aplicações requerem mais expertise, onde por exemplo as peças podem apresentar bordas curvilíneas e bordas de solda em treliças fabricadas de secções ocas circulares. É importante que a aplicações do HFMI sejam em regiões críticas, pois o início das descontinuidades nas regiões tratadas deverá ser considerado. E caso a trinca se inicie pela raiz da solda a aplicação do HFMI não terá uma aplicação significativa.

5.4.3. Preparação para Aplicação

A região de aplicação deverá ser lixada e estar livre de óxidos, respingos e outros materiais que podem aderir a superfície. Outras observações que aplicação o HFMI em regiões que apresentem cordões convexos ou elevados ângulos do cordão ao aplicar o tratamento, pode ocorrer uma sobreposição, tipo de descontinuidade semelhante a uma trinca. Para se ter um controle de qualidade mais apurado, o IIW sugere a utilização do critério B da norma ISO 5817². Mordeduras, concavidade excessiva, convexidade, sobreposições são descontinuidades indesejadas antes da aplicação do tratamento e todas deverão ser removidas por um soldador treinado e qualificado para o serviço. A remoção das descontinuidades, poderão ocorrer tanto pelo processo de goivagem quanto pelo processo de esmerilhamento, seguindo todas as normas e instruções pertinentes ao trabalho desenvolvido.

Se o tratamento de HFMI não for executado conforme os procedimentos e instruções corretas, poderá contribuir para a introdução potencial de defeito semelhante a uma trinca devido ao posicionamento incorreto de ângulo do penetradores, uma solda com uma inclinação elevada, um penetradores muito grande ou uma convergência de solda tratada incorretamente.

5.4.4. Aspectos de segurança

Embora a geração de ruído e vibração seja menor que os outros métodos tradicionais de tratamento como o Martelamento por exemplo, sugere-se que o operador utilize um protetor auricular para a sua proteção. Os Epi's básicos utilizados na fabricação já cobririam a segurança do operador, o que deverá incluir proteção visual também. A vibração causada pelo

² Norma ISO 5817 é uma norma de critérios para avaliação de juntas soldadas dividida em níveis de qualidade em B,C e D.

equipamento é muito baixa e a utilização do equipamento é permitida pelo período de oito horas de trabalho sem restrição, mas os detalhes também dessa combinação trabalho x exposição é apresentada pelo fabricante do equipamento.

5.4.5. Processo de tratamento

O processo de tratamento variará muito de uma especificação para outra. A tabela 10 fornecerá informações para duas diferentes formas de ferramentas de HFMI. A Associação Americana de Rodovias Estaduais e Funcionários de Transporte (AASHTO) desenvolveu parâmetros simples para a utilização das ferramentas.

Tabela 10 - Parâmetros para dois formatos de ferramenta

Parâmetros	Alta Frequência de Impacto (HiFIT)	Tratamento de impactos UIT
Fonte	Pneumático	Ultrassom – Magnetoestrictivo
N° de Penetradores	1	1 - 4
Ângulo do Endetador com a Superfície	60° - 80°	30° - 60°
Ângulo do Endetador com a progressão	70° - 90°	40° - 80°
Velocidade de Tratamento	3 - 5 mm/s	90° - Todos os pinos em contato com a superfície
		5 - 10 mm/s
		5 - 25 mm/s
Outros		O peso próprio da ferramenta é suficiente. Mínimo de 5 passes.

Fonte: IIW (2016).

5.4.6. Outras condições

Tratamento térmico ou galvanização a quente não deverá ser realizada após a aplicação do tratamento, pois o fato do HFMI introduzir tensões compressivas, o uso desses tratamentos posteriores poderia anular os efeitos do HFMI. Isso vale também para o processo de tratamento de Martelamento Pneumático que apresenta similaridades com o HFMI, pois ambos possuem a capacidade de introduzir tensões compressivas ao pé da solda, porém o HFMI em uma frequência muito maior. As tensões locais são resultadas das tensões resultantes dos processos de soldagem, então para aqueles casos em que as tensões são permanentes, recomenda-se a aplicação do tratamento de HFMI pós carregamento, ou seja, ergue-se a estrutura com as soldas não tratadas e as trata no local, isso faz com que o tratamento não perca sua eficácia, causando um efeito nulo das tensões residuais compressivas.

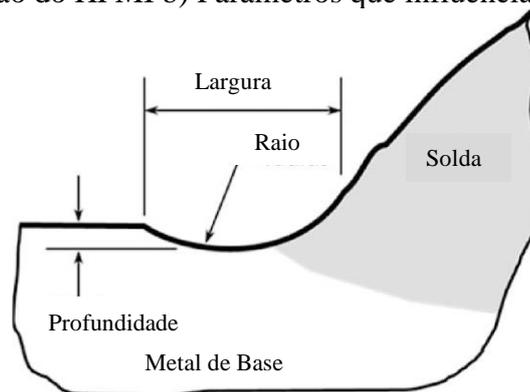
5.4.7. Controle de qualidade

O processo de controle de qualidade do alívio de tensão HFMI (High-Frequency Mechanical Impact) é realizado para garantir que o tratamento seja executado de maneira adequada e atenda aos requisitos de qualidade. Antes de iniciar o processo de alívio de tensão HFMI, é importante desenvolver um plano de execução e especificar os critérios de qualidade desejados. Isso inclui determinar os parâmetros adequados de tratamento, como a frequência e a força de impacto MARQUIS, BARSOUM (2016).

Durante o tratamento HFMI, é fundamental monitorar as variáveis de processo, como a força de impacto, a frequência e o tempo de aplicação. Isso é feito para garantir que as condições estejam dentro dos parâmetros especificados e que o tratamento esteja sendo executado corretamente. MARQUIS, BARSOUM (2016)

A profundidade do sulco é um excelente indicador da extensão do tratamento HFMI, O sulco da solda devido ao HFMI geralmente não reduz a resistência à fadiga, um profundidade mínima do sulco de cerca de 0,1–0,2 mm é necessária para garantir uma completa tratamento de dedo do pé de solda. Dependendo do limite de escoamento do aço e do tamanho do endentadores, normalmente o sulco HFMI ideal será de 0,2 a 0,6 mm de profundidade e o a largura será de 3 a 6 m. MARQUIS, BARSOUM (2016).

Figura 36 - a) Aplicação do HFMI b) Parâmetros que influenciam a resistência a fadiga.



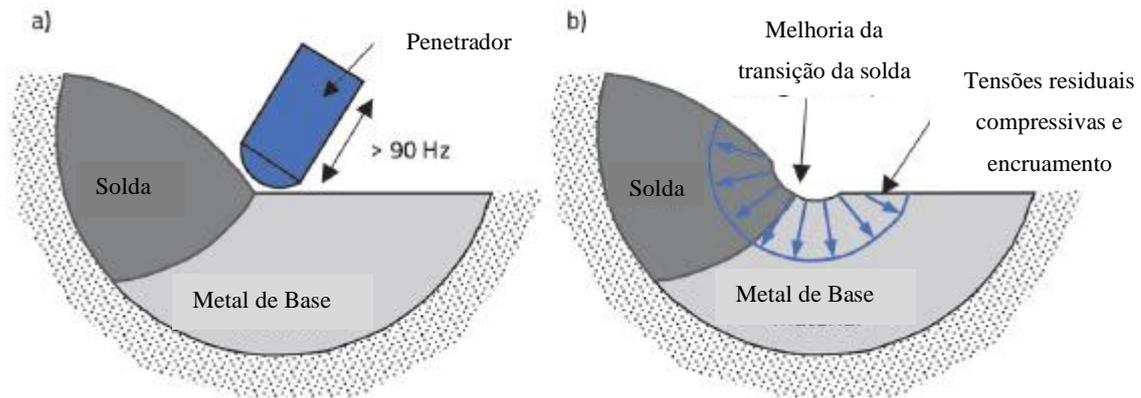
Fonte: IIW (2016)

5.4.8. Geometria do cordão

O tratamento só terá eficácia se a trinca for originada no pé do filete/cordão e após a sua aplicação, terá seu modo de falha alterado. Se a trinca iniciar por exemplo, pela raiz não terá

eficácia. Diretrizes para a implementação do tratamento HFMI, controle de qualidade e avaliação da melhoria da vida em fadiga, usando tensões nominais, tensões de ponto quente e tensão de canal efetiva, são dadas pelo IIW. A figura 37 mostra os parâmetros que influenciam a resistência a fadiga.

Figura 37 - a) Aplicação Do HFMI b) Parâmetros que influenciam a resistência a fadiga.



Fonte: SONATS (2023)

A solda causa uma mudança repentina na geometria da junta que conseqüentemente causa um concentrador de tensões, e esse concentrador de tensão é definida pela concentração de tensão do fator K. A maior concentração é no pé da solda, que é, portanto, o local mais provável, para iniciar uma trinca de fadiga. Do ponto de vista da aplicação, segundo artigo, quanto menor for o raio da endentação, maior o concentrador de tensões, entretanto, aumentar o raio da endentação, garante uma suave transição entre a chapa de base e a face da solda, logo aumenta-se a resistência a fadiga.

A aplicação do tratamento de HFMI pode envolver até 400 MPa de tensões compressivas e atingir até 1,5 mm de profundidade de tratamento a partir da superfície. A magnitude da tensão aumenta com o aumento das tensão de escoamento do material a ser tratado, características essa vantajosa para aplicações em aços de alta resistência. Embora eles não apresentam relaxações pós aplicação de modo que a tensão residual permaneça estável, porque a melhoria da resistência a fadiga com a aplicação do HFMI se dá à introdução de tensões de compressão, mudança de geometria e aumento da dureza da área de aplicação, segundo HARATI, SVENSSON, KARLSSON (2017) para um aço de 1300 MPa de tensão de escoamento.

5.4.9. O efeito do carregamento cíclico na estabilidade da tensão residuais compressivas.

Devido a deformação plástica causa pelo tratamento do HFMI, ocorre um aumento de dureza superficial na área de aplicação do tratamento e essa condição também causa um aumento na resistência a fadiga do material em mais de 100% comparado ao material na condição soldada. Segundo HARATI, SVENSSON, KARLSSON (2017), o carregamento cíclico leva a um relaxamento local significativo dessa condição.

Para essas análises, eles utilizaram amostras de aços e dois consumíveis para a soldagem delas, cujas propriedades mecânicas são apresentadas na tabela 11.

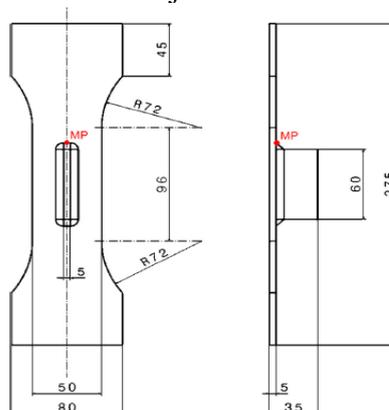
Tabela 11 - Propriedades mecânicas e consumíveis

Materiais	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Alongamento (%)
Aço S355	355	575	22
Consumível para soldagem do aço S355	440	530	30
Aço S960	960	1050	10
Consumível para soldagem do aço S960	930	980	14

Fonte: HARATI, SVENSSON, KARLSSON (2017)

Ambos os materiais e consumíveis foram testados utilizando um corpo de prova com um reforço longitudinal unilateral sem carga conforme padrão IIW ilustrado na figura 38.

Figura 38 - Padrão de junta normalizada pelo IIW

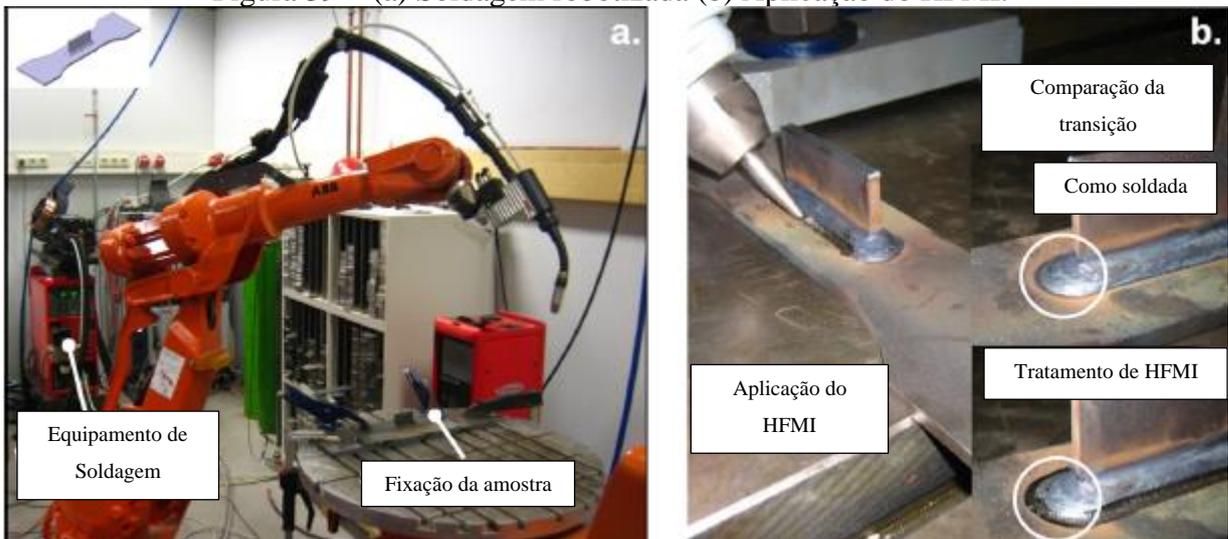


Fonte: LEITNER, KHURSHID, BARSOUM (2017)

O aço S355 foi soldado, pelo processo GMAW, com consumível arame G3S1I, utilizando robô com gás de proteção 82% Ar/ 18% CO₂. Já o Aço S960, foi soldado utilizando o processo MCAW robotizado, com arame G89 usando composição ternária de proteção gasosa com 69% Ar/ 30% He/ 1% CO₂.

As amostras soldadas do tipo reforços, foram soldados utilizando processo robotizado conforme dito anteriormente, aplicado o tratamento de HFMI.

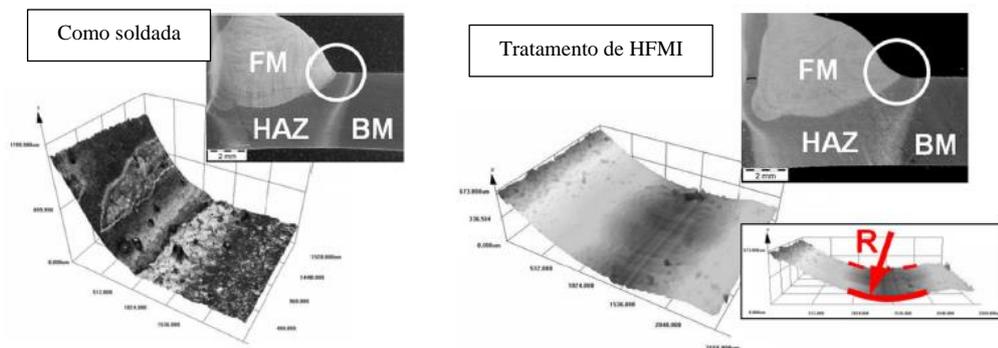
Figura 39 - (a) Soldagem robotizada (b) Aplicação do HFMI.



Fonte: LEITNER, KHURSHID, BARSOUM (2017)

Uma varredura topográfica revelou uma acabamento liso na região tratada pelo HFMI com 2 mm de raio, mostrando que as tensões de compressão excedem principalmente devido a topografia da soldagem, chamando a atenção sobre a estabilidade da tensão residual cíclica. Ilustrando a topografia mencionada veja na figura 40 o seu mapeamento.

Figura 40 - Macros retiradas da solda antes e após tratamento.

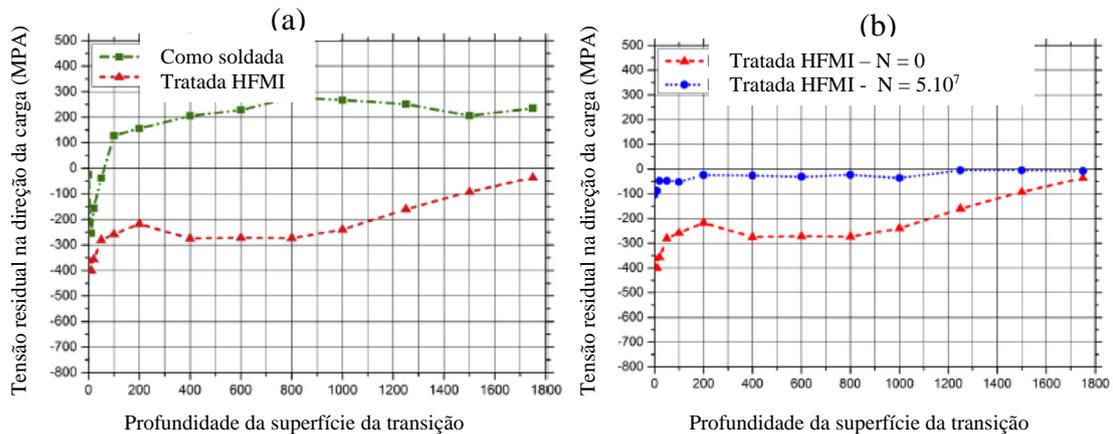


Fonte: LEITNER, KHURSHID, BARSOUM (2017)

A tensão residual medida no aço S355 como soldado mostra uma diferença na tensão residual antes de realizar a ciclagem na figura 40 (a) da esquerda de -150 Mpa na superfície, chegando à diferença de aproximadamente 600 MPa a 0.8 mm de profundidade da superfície e 300 MPa a 1, 8 mm de profundidade da superfície.

Já na figura 41 (b) da direita, após atingir o número de 5.10^7 ciclos da região tratada com o HFMI, verificou-se uma queda imediata da tensão desde a superfície comparado a tratamento inicial sem ciclar, que se manteve uniforme desde a superfície até a profundidade analisada que foi de 1, 8 mm.

Figura 41 - Tensão residual profundidade da transição da solda com o metal base em aço S355. (N = Número de ciclos)

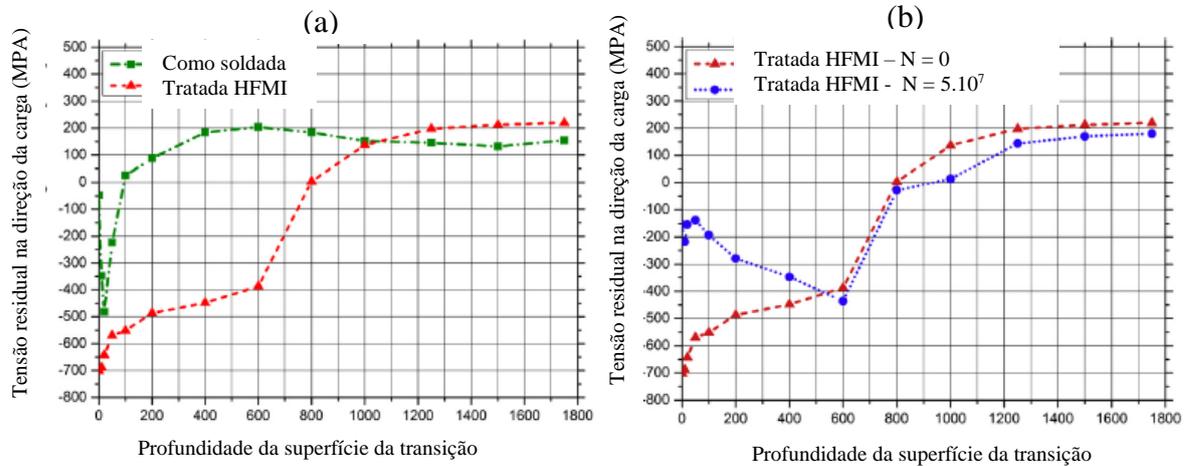


Fonte: LEITNER, KHURSHID, BARSOUM (2017)

A tensão residual medida no aço S960 como soldado mostra uma diferença na tensão residual antes de realizar a ciclagem na figura 42 (a) da esquerda de 650 Mpa na superfície, aproximadamente em 0,03 mm, chegando à diferença de aproximadamente 600 MPa entre 0,1 mm e 0,6 mm se igualando a as tensões de como soldado em aproximadamente 1 mm de profundidade.

Já na figura 42 (b) da direita, após atingir o número de 5.10^7 ciclos da região tratada com o HFMI, verificou-se que a região tratada sofreu um relaxamento das tensões de aproximadamente 500MPa na superfície se igualando a condição de tratamento sem ciclar na profundidade de 0,6 mm. A partir da profundidade de 0,6 mm, as tensões nas amostras sem ciclar até atingir o número de 5.10^7 ciclos tornam-se iguais.

Figura 42 - Tensão residual profundidade da transição da solda com o metal base em aço S960. (N = Número de ciclos)



Fonte: LEITNER, KHURSHID, BARSOUM (2017)

Resumindo, o efeito da carga cíclica introduzida no tratamento de HFMI na condição de tensão residual é observada com base no apresentado acima nas figuras 41 e 42. No aço S355 uma significativa relaxação ocorre devido os primeiros ciclos de carga, mesmo em níveis de carga menores na região tratada que basicamente atua como sobrecarga quase estática nessa tipo de detalhe estrutural.

Já para o aço S960, esse processo de tratamento não é utilizado por se tratar de material não empregado em projetos estruturais, no entanto verificou-se que a profundidade de tratamento do HFMI é menor nesse material, pelo fato dele já ser de alta resistência e cuja propriedade, já apresenta uma alta dureza.

Mas o que se pode afirmar baseado nos dois materiais é que o tratamento de HFMI mostra um efeito de endurecimento de 0,2 mm a 1 mm de profundidade e mostra uma redução no estado de tensões de ambos os materiais analisados.

6 CONCLUSÃO

Para diferentes métodos de tratamento se tem diferentes aspectos e características, as quais estão disponíveis para a aplicação que se busca o aumento a fadiga. O Tratamento de desbaste é o método de tratamento dentre todos o mais fácil e de baixo custo de aplicação, pelo fato de apresentar um dispositivo de tamanho pequeno poderia acessar facilmente locais de espaço restrito, além de facilitar a sua aplicação por um técnico e até mesmo, se assemelhar ao TIG,

removendo trincas superficiais, porém apresenta dentre todas as opções acima, uma menor eficácia.

O processo de TIG Dressing apresenta dentre os tratamentos estudados a segunda maior eficácia dos tratamentos recomendados pelo IIW, no entanto sua aplicação requer mais cuidados por parte do operador. Uma aplicação por parte do operador, poderia contribuir para o aparecimento de descontinuidades após uma aplicação incorreta. Mostra-se com uma opção na refundição de trincas superficiais de até 1,0 de profundidade, mas pode apresentar um amaciamento quando aplicado a aços de alta resistência de microestrutura bainítica e martensítica.

O processo de tratamento por Martelamento, apresenta bons resultados, exige pouca habilidade do operador, mas ao mesmo tempo, por apresenta vibração elevada na aplicação do tratamento, acaba contribuindo para uma instabilidade na aplicação de cordões de grande extensão, apresenta baixo custo, mas se comparado ao HFMI, apresenta baixa eficácia em decorrência de uma profundidade de encruamento menor.

Já o processo HFMI apresenta dentre todos, o melhor desempenho no tratamento das juntas soldadas, porém é ainda pouco explorado, possui o maior custo se comparado a todos os outros processos aqui mencionados.

Nessa monografia foram apresentados quatro tratamentos que podem ser utilizados desde a fabricação quanto a manutenção em juntas soldadas, quando o objetivo é o aumento da resistência a fadiga em juntas soldadas. Dentre as que foram apresentadas, existem outras tantas opções que atrelam, custo, facilidade de aplicação e eficácia.

REFERENCIAS

ASM, **Fractography**, Volume 12 of the ASM Handbook, published in 1987.

AMERICAN WELDING SOCIETY. AWS A3.0M/A3.0:2010: **Standard Welding Terms and Definitions**. 12 ed. Miami: AWS, 2010.

ARIAS, Ariel Rodriguez, **Apresentação dos Fundamentos de Projetos de Junta Soldada – MPROJ 4**, do Curso de Especialização em Soldagem, UFMG, 2022.

ARIAS, Ariel Rodriguez, **Apresentação do Comportamento de Estruturas Soldadas Sob Solicitação Cíclica – MPROJ 7**, do Curso de Especialização em Soldagem, UFMG, 2022.

ASTM E1823-96, Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing, 1996.

BRANDÃO, José Eduardo S.A, **Tecnologia da Soldagem**, Belo Horizonte, PUC Minas, 2021.

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. São Paulo: AMGH Editora Ltda., 2011. Tradução de: João Batista de Aguiar e José Manoel de Aguiar.

COELHO, João P. F. **Avaliação de Fadiga Via Elementos Finitos do Processo HFMI em uma Junta Soldada**, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFMG, 2022.

CORREIA, Vitor F. **Dimensionamento de Juntas Soldadas**. Apostila de Engenharia de Máquina Marítimas, 2005.

JONES, David R. H Engineering materials. 1. **An Introduction to Their, Properties and Applications**. - 2nd. ed.1. Materials 2. Mechanics I. Title **11**, published at 1945.

FADAEI, Abbas; BETKHOODU, Annette. **Effect of Burr Grinding on Fatigue Strength of Steel Butt-Welded Connections**, Advanced Design and Manufacturing Technology, Vol. 11/ No. 2, 2018.

FISHER, J. W.; PENSE, A. W; SLOCKBOWER R. E.; HAUSAMMANN, H.. **Retrofitting Fatigue Damaged Bridges**, Transportation Research Record (1978).

FRICKE, Wolfgang, **Recent developments, and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints**, article from Hamburg University of Technology (TUHH), Schwarzenbergstr. 95c Hamburg 21073, Germany, 2014.

FUŠTAR Boris; LUKAČEVIĆ Ivan; DUJMOVIĆ, Darko, **High-Frequency mechanical impact treatment of welded joints**, Građevinar, 2020.

HAAGENSEN, P. J. MADDOX S. J. **IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints**. Published by Woodhead, 2013.

HARATI, Ebrahim, SVENSSON Lars-Erik, KARLSSON Leif, **improving fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel using HFMI treatment or LTT fillers**, Department of Engineering Science, University West, Trollhättan, Sweden, 2017.

HOBACHER A. **Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**, International Institute of Welding, Paris, France, October 2008.

INFANTE V., BRANCO C. M., BAPTISTA R. **An Analysis of the Effect of Hammer Peening on the Repair of Fatigue Cracked Welded Joints**, The Welding Institute (TWI), Cambridge, UK, 1995.

LEFEBVREA, Fabien, PEYRACA Catherine, ELBELB Guillaume, REVILLA-GOMEZ C., Catherine, VERDUC, Jean-Yves BUFFIÈREC. **Understanding of fatigue strength improvement of steel structures by hammer peening treatment**, Published by Elsevier Ltd. 2015.

MADDOX S. J. **IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints**. Published by Woodhead, 2013.

MANAI, Asma, **An analysis of pre-fatigued TIG-treated welded structures**, Published by Elsevier Ltd. Gothenburg, Sweden, 2020.

MARQUIS Gary B., BARSOUM Zuheir, **IIW Recommendations for the HFMI Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints**, IIW International Institute of Welding, ZI Paris Nord II, Villepinte, France, published by Springer Nature, 2016.

MEYERS Marc André, CHAWLA Krishan Kumar **Mechanical Behavior of Materials**. Cambridge, New York. First published in 1998 by Prentice-Hall Second edition 2009 Cambridge University Press.

MOORE, Philippa; BOOTH, Geoff. **The Welding Engineer's Guide to Fracture and Fatigue**, Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 2015.

NIEMI Erkki, FRICKE Wolfgang, MADDOX Stephen J. **Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components**, Second Edition, Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018.

SEATON, Andrew. **Off-Highway Truck Post Weld Treatment - TIG Dressing**, Caterpillar Channel. Disponível em: https://channel1.mediaspace.kaltura.com/media/OffHighway%20Truck%20Post%20Weld%20Treatment%20-%20TIG%20Dressing/1_gmocv9ae Acessado em 30 de maio de 2023.

SONATS, **Ultrasonic Impact Treatment - Application For Infrastructures**, Empresa fabricante do dispositivo de tratamento HFMI, Disponível: <https://sonats-et.com/en/hfmi-treatment/ultrasonic-impact-treatment/> Acessado em 30 de maio de 2023

TURANI, Claudio, **ESAB Apostila de Soldagem MIGMAG**, 2015.

VAN ES S.H.J., KOLSTEINA M.H.; PIJPERSB R.J.M.; BIJLAARDA F.S.K.; **TIG-dressing of high strength steel butt welded connections – Part1: weld toe geometry and local hardness**, Published by Elsevier Ltd. 2013.

VAN ES, S.H.J., KOLSTEINA M.H.; PIJPERSB R.J.M.; BIJLAARDA F.S.K.; **TIG-dressing of high strength butt welded connections – Part 2: physical testing and modelling**, Published by Elsevier Ltd. 2013.

ZEEMANN, Annelise, **Tensões Residuais na Soldagem**. Disponível em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/ArTIGos/metal/tenses-residuais-na-soldagem.pdf>. Acessado em 17 de junho de 2023.

ZHANG, Yan-Hui, MADDOX S.J., **Investigation of fatigue damage to welded joints under variable amplitude loading spectra**. Structural Integrity Technology Group, TWI Limited, Granta Park, Great Abington, Cambridge, CB1 6AL, UK 2008.