

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA – EE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MAURÍCIO DIOGO DA SILVA**

**DESEMPENHO EM FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE TOPO  
TRATADAS COM A TÉCNICA TIG DRESSING TENDO COMO METAL  
BASE O AÇO ASTM 131 – AH36**

**RIO GRANDE – RS**

**2019**

**MAURÍCIO DIOGO DA SILVA**

**DESEMPENHO EM FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE TOPO  
TRATADAS COM A TÉCNICA TIG DRESSING TENDO COMO METAL  
BASE O AÇO ASTM 131 – AH36**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração:  
Engenharia de Fabricação

Orientador:  
Prof. Kleber Eduardo Bianchi, Dr.

Coordenador:  
Prof. Luciano Volcanoglo Biehl, Dr.

**Rio Grande**

**2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

S586d Silva, Maurício Diogo da.

Desempenho em fadiga de juntas soldadas de topo tratadas com a técnica *TIG Dressing* tendo como metal base o aço ASTM 131 – AH36 / Maurício Diogo da Silva. – 2019.

68 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Kleber Eduardo Bianchi.

Coorientador: Dr. Luciano Volcanoglo Biehl.

1. TIG Dressing 2. Fadiga 3. GMAW (Gas Metal Arc Welding)  
I. Bianchi, Kleber Eduardo II. Biehl, Luciano Volcanoglo III. Título.

CDU 621:621.791



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
PPMec



Ata nº 09/2019 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos trinta dias do mês de abril de dois mil e dezenove, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas e trinta minutos no Auditório 4110 - Prédio 4, no Campus Carreiros desta Universidade, a que se submeteu o mestrando **Maurício Diogo da Silva**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: **DESEMPENHO EM FADIGA DE JUNTAS SOLDADAS DE TOPO TRATADAS COM A TÉCNICA TIG DRESSING TENDO COMO METAL BASE O AÇO ASTM 131 - AH36**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Carlos Eduardo Marcos Guilherme e Gustavo Simões Teixeira, sob a orientação do Professor Kleber Eduardo Bianchi. Analisando o trabalho, a Banca Examinadora o considerou:

1. Kleber Eduardo Bianchi: APROVADO
2. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: APROVADO
3. Gustavo Simões Teixeira: APROVADO

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. [Assinatura]  
CPF: 440.783.230-49
2. [Assinatura]  
CPF: 732.848.700-25
3. [Assinatura]  
CPF: 002.010.080-92

Maurício Diogo da Silva: [Assinatura]

Dedico este trabalho a minha família, em especial aos meus pais e irmãos, minhas afilhadas e minha namorada Stéphanie, por sempre estarem comigo nos momentos difíceis que passei durante esta etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

Sobretudo a Deus, pela vida e as oportunidades proporcionadas;

À minha mãe pela dedicação, carinho e pelo amor dedicado a mim e a família durante toda sua vida;

Ao meu pai por toda confiança, incentivo e amor ofertado;

Aos meus irmãos que direta ou indiretamente contribuíram na minha formação;

Às minhas afilhadas Maria Alice Diogo, Luiza Insaurriaga, Melissa da Silva, Julia da Silva e Lara Insaurriaga por serem maravilhosas e me tornarem um homem melhor;

À minha amada Stéphanie que esteve ao meu lado sempre me erguendo em momentos de grande dificuldade;

Ao professor Dr. Kleber Eduardo Bianchi pelo conhecimento transmitido, por ter me orientado, incentivado durante toda esta jornada e por acreditar no meu trabalho;

Aos professores Dr. Luciano Voncanoglo Bhiel, Dr. Jorge Luís Braz de Medeiros e Ph.D Henara Lillian Costa Murray por todos os ensinamentos transmitidos;

Aos meus amigos e colegas Marcos Saalfeld da Silva e Eder Bicharra pela amizade e por toda ajuda que me foi entregue sempre que solicitei;

À FURG por ser responsável em grande parte da minha formação profissional e acadêmica;

Ao Curso técnico em mecânica do IFSul campus Pelotas por permitir a utilização de seus laboratórios durante esta pesquisa e seus professores por todo auxílio;

## Epígrafe

A educação é o grande motor do desenvolvimento pessoal. É por meio dela que a filha de um camponês se torna médica, que o filho de um mineiro pode chegar a chefe de mina, que um filho de trabalhadores rurais pode chegar a presidente de uma grande nação.

Nelson Mandela

## RESUMO

Atualmente o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*, também conhecido por MAG – *Metal Active Gas*) possui grande destaque no meio industrial, seja na união de componentes e estruturas do setor da mobilidade (segmentos rodoviário, ferroviário, naval, agrícola e aeroespacial), da indústria química (reservatórios, tubulações e vasos de pressão) e construção civil (edifícios, pontes e plataformas), bem como em operações rotineiras de manutenção. A motivação desta pesquisa se deve ao fato das uniões soldadas representarem pontos críticos para falha catastrófica, por fratura frágil ou fadiga, em estruturas de engenharia. Procedimentos pós-soldagem são aplicados nos possíveis sítios de nucleação de trincas de fadiga, com o intuito de mitigar o problema. Neste trabalho foi realizado o estudo do estado da arte de algumas das técnicas pós-soldagem, visando esclarecer seu efeito sobre a junta. O foco do estudo se concentrou nas características que o processo de refusão TIG (*TIG Dressing*) pode conferir a uma junta soldada pelo processo GMAW tendo o aço microligado ASTM 131 AH36 como metal de base. Foram avaliados aspectos de microestrutura, dureza, geometria da junta e resistência à fadiga. A micrografia e o ensaio de microdureza revelaram as consideráveis alterações causadas pela refusão TIG. Os resultados de vida em fadiga alcançados foram comparados com os obtidos por Silva em pesquisa recente realizada junto a esta universidade. Para tal, o trabalho reporta os diagramas S-N GMAW original e GMAW - *TIG Dressing*, com as estimativas de 5% e 95% de sobrevivência. Importante melhora no tempo de vida em fadiga foi obtida nos espécimes tratados em relação aos corpos de prova no estado original.

Palavras chave: Refusão TIG, fadiga, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*).

## **ABSTRACT**

GMAW welding process (Gas Metal Arc Welding, also known as MAG - Metal Active Gas) currently is largely employed in industry, whether in the union of components and structures in the mobility sector (road, rail, naval, agricultural and aerospace segments), petrochemical and chemical plants (reservoirs, pipelines and pressure vessels) and civil frames (buildings, bridges and platforms) as well as in routine maintenance operations. The motivation of this research is based on the fact that welded joints represent critical points for catastrophic failure due to brittle fracture or fatigue in engineering structures. Post-welding procedures are applied to the possible fatigue cracking nucleation sites in order to mitigate the problem. This work begins by presenting the state of art of the most employed post-welding techniques, in order to clarify the effect on the joint. The focus of the experimental work was directed to the characteristics that TIG Dressing technique provides to a welded joint manufactured by the GMAW process, having ASTM 131 AH36 microalloyed steel as base metal. Microstructure, hardness, joint geometry and fatigue strength were evaluated. The micrograph and the microhardness tests revealed the considerable changes caused by TIG dressing. Fatigue life results were compared with those obtained in a recent research conducted at GEFMat/FURG. For this, the work reports the S-N diagrams for original GMAW and GMAW TIG Dressing cases, with estimates of 5% and 95% probabilities of survival. Important improvement in fatigue life was attained by treated specimens in relation to the specimens in the original state.

**Keywords:** TIG Dressing, Fatigue, GMAW (Gas Metal Arc Welding).

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Flanco do cordão de solda .....	21
Figura 2 – <i>Hammer peening</i> em superfícies .....	22
Figura 3 – <i>Grinding</i> em união soldada.....	22
Figura 4 - Geometria do flanco do cordão anterior e posterior o <i>TIG Dressing</i> . .....	24
Figura 5 - Perfis geométricos circular, Baud, Mattheck e Grodzinski.....	25
Figura 6 – Comparativo do FCT ao longo do perfil AB. ....	25
Figura 7 - Distância entre o eixo do arco elétrico e o flanco da solda.....	27
Figura 8 – Microestrutura apresentando $\alpha_w$ e $\alpha_a$ .....	28
Figura 9 – Aspecto das ripas de ferrita acicular, projetando-se a partir de inclusões de óxidos. ....	28
Figura 10 – Morfologia da ferrita acicular. ....	29
Figura 11 – Ferrita Widmanstätten. ....	30
Figura 12 – Nucleação da ferrita Widmanstätten.....	30
Figura 13 – Organograma de execução. ....	31
Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração. ....	33
Figura 15 – Configuração da junta.....	34
Figura 16 – Dimensões da placa de teste. ....	35
Figura 17 – Placa usada na soldagem para retirada dos corpos de prova.....	35
Figura 18 – Aplainamento das placas de teste.....	36
Figura 19 - Dispositivo de fixação das chapas para soldagem.....	37
Figura 20 - Goivagem da raiz da solda.....	38
Figura 21 - Verificação da integridade da junta .....	39
Figura 22 - Tocha TIG acoplada ao Tartílope.....	40
Figura 23 - Bocal TIG com eletrodo esmerilado a) e desgastado b) .....	42
Figura 24 - <i>TIG Dressing</i> concretizado.....	42
Figura 25 - Corte das placas pós tratamento.....	44
Figura 26 - Espécime pronto para usinagem final .....	44
Figura 27 – Corpo de prova projetado para ensaio de fadiga.....	45
Figura 28 – Usinagem do CP (fadiga) no centro de usinagem .....	45
Figura 29 - Corpo de prova para ensaio de fadiga .....	45
Figura 30 – Regiões de soldagem GMAW. ....	46
Figura 31 – Regiões de soldagem e <i>TIG Dressing</i> .....	47

Figura 32 – Dimensões do reforço da união soldada. ....	47
Figura 33 – Regiões de ensaio de microdureza Vickers.....	48
Figura 34 – Inspeção por LP. ....	50
Figura 35 – Vista superior de amostra após <i>TIG Dressing</i> . ....	51
Figura 36 - Ângulo de reforço GMAW.....	52
Figura 37 - Ângulo de reforço pós refusão TIG. ....	52
Figura 38 – Geometria da junta GMAW.....	52
Figura 39 – Geometria da junta após refusão TIG.....	53
Figura 40 – Corpo de prova com ruptura no metal base. ....	55
Figura 41 – Trinca nucleada na extremidade do metal base. ....	55
Figura 42 – Nucleação e propagação da trinca em espécime tratado.....	56
Figura 43 – Corpo de prova com elevado período de propagação da trinca .....	57
Figura 44 – Ruptura ocorrida na região refundida. ....	57
Figura 45 – Nucleação de trinca (figura 44).....	58
Figura 46 – Diagrama S-N GMAW <i>TIG Dressing</i> (refusão TIG). ....	60
Figura 47 – Diagrama S-N GMAW com reforço .....	60
Figura 48 – Diagrama S-N para aços estruturais .....	61
Figura 49 – Metal de base .....	63
Figura 50 – Metal de solda. ....	63
Figura 51 – Microestrutura pós <i>TIG Dressing</i> 1 .....	64
Figura 52 - Microestrutura pós <i>TIG Dressing</i> 2.....	64
Figura 53 – ZAC <i>TIG Dressing</i> . ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teores de elementos químicos do metal de base. ....	32
Tabela 2 – Resultado obtido no ensaio de tração .....	33
Tabela 3 – Parâmetros utilizados no corte a plasma. ....	34
Tabela 4 - Parâmetros adotados na soldagem GMAW. ....	37
Tabela 5 – Parâmetros para realização do <i>TIG Dressing</i> .....	41
Tabela 6 – Indicações para ensaio de fadiga segundo a norma ASTM E739. ....	43
Tabela 8 – Valores de microdureza Vickers extraídos da margem do cordão.....	54
Tabela 9 - Valores de microdureza Vickers extraídos do metal de solda (GMAW). .	54
Tabela 10 – Dados dos ensaios de fadiga de CPs tratados por refusão TIG. ....	58
Tabela 11 – Dados Comparativos de tensões para 5% e 95% de sobrevivência.....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>AWS</b>	<i>American Welding Society</i>
<b>ARBL</b>	Alta Resistência e Baixa Liga
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>CCC</b>	Cúbica de Corpo Centrado
<b>CFC</b>	Cúbica de Face Centrada
<b>CP</b>	Corpo de Prova
<b>DBCP</b>	Distância entre o Bico de Contato e a Peça
<b>FCT</b>	Fator Concentrador de Tensão
<b>GMAW</b>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<b>GTAW</b>	<i>Gas-shielded Tungsten Arc Welding</i>
<b>GEFMat</b>	Grupo de Estudos em Fabricação e Materiais
<b>HFP</b>	<i>High Frequency Peening</i>
<b>HSLA</b>	<i>High Strenght Low Alloy</i>
<b>IFSul</b>	Instituto Federal Sul-Rio-Grandense
<b>IIW</b>	<i>International Institute of Welding</i>
<b>ISO</b>	<i>International Standardization for Organization</i>
<b>MB</b>	Metal Base
<b>NBR</b>	Norma Brasileira
<b>NT</b>	Nucleação da Trinca
<b>PT</b>	Propagação da Trinca
<b>RB</b>	Ruptura Brusca
<b>RPP</b>	Região do Primeiro Passe GMAW
<b>RSP</b>	Região do Segundo Passe GMAW
<b>TIG</b>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
<b>TMCP</b>	<i>Thermo Mechanical Controlled Process</i>
<b>TD</b>	<i>TIG Dressing</i>

<b>ZAC</b>	Zona Afetada pelo Calor
<b>ZAC TD</b>	Zona Afetada pelo Calor do <i>TIG Dressing</i>
<b>ZAC 1</b>	Zona Afetada pelo Calor do primeiro passe GMAW
<b>ZAC 2</b>	Zona Afetada pelo Calor do segundo passe GMAW

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	17
2. JUSTIFICATIVA .....	18
3. OBJETIVOS .....	19
3.1 Objetivo Geral .....	19
3.2 Objetivos Específicos .....	19
4. SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE .....	20
4.1. Martelamento .....	21
4.2. Usinagem do Flanco do Cordão e Melhoria do Perfil .....	22
4.3. Refusão TIG ( <i>TIG Dressing</i> ) .....	23
4.3.1. Geometria e Dureza da área refundida .....	24
4.3.2. Breve Descrição dos Equipamentos e da Execução do TIG dressing .....	26
4.4. Aspectos Relacionados à Microestrutura do Metal de Solda .....	27
5. MATERIAIS E MÉTODOS .....	31
5.1. Seleção do Material .....	32
5.2. Preparação das placas para soldagem .....	34
5.3. Soldagem das placas empregando o processo GMAW .....	36
5.4. Execução do TIG Dressing .....	39
5.4.1. Parametrização do TIG dressing .....	39
5.4.2. Execução do TIG dressing .....	41
5.5. Corpos de prova para teste de vida em fadiga .....	43
5.6. Descrição dos Resultados .....	46
5.6.1. Caracterização da junta .....	46
5.6.2. Microdureza .....	47
5.6.3. Fadiga .....	48
5.7. Análise da fratura .....	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
6.1. Sobre o <i>TIG dressing</i> .....	50
6.2. Geometria da junta .....	51
6.3. Resultado do Ensaio de Microdureza .....	53
6.4. Análise dos resultados de vida em fadiga .....	54
6.5. Modificação da microestrutura .....	62
7. CONCLUSÃO .....	66

<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
--	-----------

## 1. INTRODUÇÃO

O processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) atualmente está entre os mais utilizados na soldagem de componentes e estruturas de engenharia. A especificação dos parâmetros de processo principais (tensão, distância bico de contato - peça, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação do arame) bem como secundários (teor e vazão do gás de proteção, por exemplo) permite aliar aspectos econômicos e de qualidade, tendo em vista que grande parte dos defeitos presentes em juntas soldadas decorre do emprego de parâmetros inadequados.

Porém, mesmo que o emprego de parâmetros adequados durante a soldagem propicie juntas de qualidade aceitável, falhas catastróficas podem vir a ocorrer por outros fatores, como a presença de intrusões e de falhas de fusão no flanco e na raiz da solda. Tais fenômenos são intrínsecos aos processos de soldagem, devido aos gradientes térmicos de grande magnitude e transformações de fase pelas quais passa o material. Tais discontinuidades no flanco e na raiz são de grande importância para o fenômeno da fadiga, por representarem trincas previamente existentes. A presença dessas microtrincas tem por efeito a supressão do período de nucleação, o qual, em peças não soldadas, pode representar a maior parte da vida útil da peça. Para supressão das microtrincas especificamente posicionadas no flanco dos cordões, bem como para atenuação do efeito de entalhe naturalmente associado a essa região, são empregados tratamentos pós-soldagem.

Nesse contexto, o GEFMat/FURG tem se debruçado sobre algumas das técnicas de melhoria do desempenho em fadiga de uniões soldadas, dentre as quais se situa o processo refusão TIG (*TIG Dressing*), procedimento que consiste na refusão do flanco do cordão por meio do processo GTAW (também conhecido por TIG - *Tungsten Inert Gas*).

## **2. JUSTIFICATIVA**

Dado que o emprego de uniões soldadas é uma das melhores alternativas para a união permanente de componentes, sua realização mesmo qualificada vai ao encontro de descontinuidades inerentes aos processos de soldagem e devido a falhas recorrentes a estas descontinuidades, estudos têm sido feitos visando a melhoria destas juntas. Desta forma alterações ocasionadas por meio de um procedimento de melhoria pós-soldagem acessível a ambientes fabris de pequeno, médio e grande porte, pode ser uma alternativa viável no incremento de vida em fadiga. Por tal razão justifica-se a análise dos efeitos propiciados pela técnica de refusão TIG.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

O objetivo desta pesquisa é analisar a junta soldada após a aplicação da técnica de refusão TIG com o intuito de verificar mudanças microestruturais nas três zonas críticas desta união soldada e também constatar a eliminação de trincas superficiais existentes no pé da solda, bem como a mudança do fator de concentração de tensão geométrico proveniente do processo de soldagem efetuado na união das chapas metálicas.

Outro objetivo correlato é o de comparar os resultados obtidos por este trabalho com os resultados alcançados por uma junta somente como soldada (sem nenhum tratamento posterior).

#### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Verificar a dureza conferida à região tratada posteriormente com *TIG Dressing*;
2. Verificar o surgimento de uma nova microestrutura;
3. Analisar a vida em fadiga comparando com resultados de trabalho recente realizado junto à universidade (FURG).

#### 4. SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE

Podemos dizer que o processo de união de materiais por meio de soldagem é dividido em três etapas:

- I. Procedimentos anteriores ao processo;
- II. A soldagem em si;
- III. Tratamentos posteriores à soldagem.

O primeiro tópico diz respeito à seleção do tipo de junta, preparação e limpeza das peças, bem como o desenvolvimento de dispositivos e todo ferramental necessário à execução da soldagem. Já a segunda etapa é relacionada especificamente às peculiaridades inerentes ao processo de união da junta, tais como os parâmetros de soldagem, goivagem entre passes, etc. Por fim, a terceira etapa diz respeito aos procedimentos necessários para evitar falhas decorrentes do processo de resfriamento, bem como tratamentos posteriores, como o alívio de tensões, por exemplo. Nesses tratamentos e cuidados posteriores à soldagem, a ampliação da vida em fadiga é uma das maiores preocupações de engenheiros e projetistas mecânicos.

De acordo com Shigley et. al. (2005) qualquer descontinuidade em uma peça, seja ela fundida, forjada, usinada ou confeccionada por meio de uniões soldadas, altera a distribuição de tensões, de forma que as regiões onde tais descontinuidades ocorrem são chamadas de áreas de concentração de tensão.

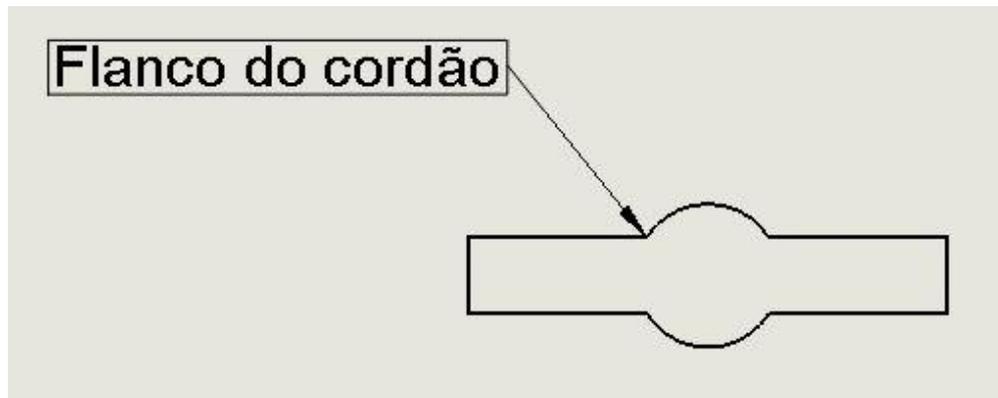
Os tratamentos posteriores à soldagem podem, de forma simplificada, serem divididos entre aqueles que alteram e os que não alteram o efeito de entalhe associado ao perfil do cordão.

Segundo AWS D1.1 (2010), os métodos que podem ser utilizados para a melhoria do efeito de entalhe são:

- I. Melhoria de Perfil (*profile improvement*) - processo de usinagem para suavização do perfil ou para retirada do reforço dos cordões. Eventualmente, a especificação criteriosa de parâmetros e do processo de soldagem permite obter, sem necessidade de soldagem, um perfil mais adequado.

- II. Usinagem do flanco do cordão (*toe grinding*) - por meio de operação manual, com ferramenta rombuda e dispositivo elétrico ou pneumático, é gerada uma ranhura no flanco do cordão.
- III. Martelamento (*hammer peening*) – pequenos punções em forma de agulha são projetados contra o flanco do cordão por ferramenta específica. Ocorre deformação plástica e, conseqüentemente, a geração de um perfil mais arredondado na região. Porém, o resultado mais significativo observado após o processo de martelamento é a inserção de tensões residuais de compressão culminando na redução das tensões residuais de tração presentes na região.
- IV. Refusão TIG (*TIG dressing*) – refusão do flanco do cordão de solda utilizando o processo GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) autógeno.
- V. *Toe grinding* e *hammer peening* – os dois processos são aplicados em sequência.

Figura 1 – Flanco do cordão de solda



Por sua importância, os processos *hammer peening*, *toe grinding* e *TIG dressing* são abordados nas próximas seções.

#### 4.1. Martelamento

De acordo com Yuan Kuilin, (2015), o martelamento (*hammer peening*) é um processo de trabalho a frio que induz tensões residuais compressivas na região em que é aplicado (que pode ser o flanco de um cordão de solda). É empregado em situações nas quais o aspecto estético final da superfície martelada não é requisito crítico, caso contrário, um procedimento secundário se fará necessário para melhoria da superfície.

As tensões compressivas geradas pelo processo se localizam na região superficial da peça. Os impactos repetitivos criam uma zona de deformação plástica circundada por material elasticamente deformado. O retorno elástico da região circundante causa a compressão da região plástica. Portanto, caso a região apresente previamente uma tensão residual de tração, o *hammer peening* causa sua atenuação. A figura 2 mostra a aplicação do processo sobre a superfície de uma peça.

Figura 2 – *Hammer peening* em superfícies



#### 4.2. Usinagem do Flanco do Cordão e Melhoria do Perfil

Trata-se do processo de retirada de material por usinagem, modificando a geometria do flanco e/ou da face do cordão de solda. O procedimento pode ser efetuado por qualquer ferramenta de usinagem de ponta esférica. Os principais efeitos do processo são a remoção de microtrincas e a redução do fator de entalhe (Haagensen et. al, 2006). A figura 3 mostra uma ferramenta utilizada no processo.

Figura 3 – *Grinding* em união soldada.



### 4.3. Refusão TIG (*TIG Dressing*)

Segundo Haagensen et. al (2006), trata-se de técnica posterior à soldagem, de execução relativamente simples, que tem por efeito a suavização do fator de entalhe associado ao flanco do cordão, bem como a redução das tensões residuais e a eliminação de microtrincas advindas do processo de soldagem, porém, não recomendada para componentes de alumínio e aço com espessuras inferiores a 4 mm e 6 mm respectivamente.

A refusão TIG utiliza, portanto, os mesmos preceitos e equipamentos do processo de soldagem GTAW, o qual, segundo Modenesi (2009), possui excelente controle da poça de fusão, gera pouco ou nenhum respingo, proporciona excelente acabamento, permite soldagem em qualquer posição e exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem. Quando aplicado ao flanco de cordões, trata-se de processo autógeno.

Para Albuquerque et. al. (2004), a refusão TIG aumenta consideravelmente a vida em fadiga. Em seu trabalho afirmam ter tido aumentos que variam entre 67 e 325% em comparação aos corpos de prova sem tratamento.

Contudo para que resultados satisfatórios sejam obtidos Maddox et. al. (2006) enfatizam alguns aspectos. O primeiro é sobre a importância de uma superfície livre de contaminantes, pois estes, em contato com o gás de proteção, tendem a resultar na formação de poros que prejudicam o desempenho da junta, principalmente na vida em fadiga. O segundo trata da forma do arco para a execução do *TIG Dressing*, uma vez que o desgaste da ponta do eletrodo de tungstênio é responsável pela uniformidade do arco elétrico.

Segundo Pedersen et. al (2010) quando comparado com os processos de *Toe Grinding* e HFP (*High Frequency Peening*), o *TIG Dressing* mostrou ser o melhor tratamento posterior à soldagem para vida em fadiga na região de ciclagem média ( $10^5$  ciclos). Tal conclusão se baseou na avaliação dos resultados de ensaios, bem como em aspectos produtivos, como a velocidade de operação, a facilidade de implantação e a flexibilidade propiciada pelo processo.

Segundo Es S. V. (2012) os corpos de prova tratados com *TIG Dressing* tornam-se melhores que os CPs apenas soldados pois estes ganham considerável

incremento do tempo de iniciação de trinca; seu estudo mostra que a dispersão dos dados é maior para vida de iniciação da trinca do que propriamente para a vida em fadiga, assim sendo o entalhe presente no pé da solda deixa de ser o elo mais fraco da corrente.

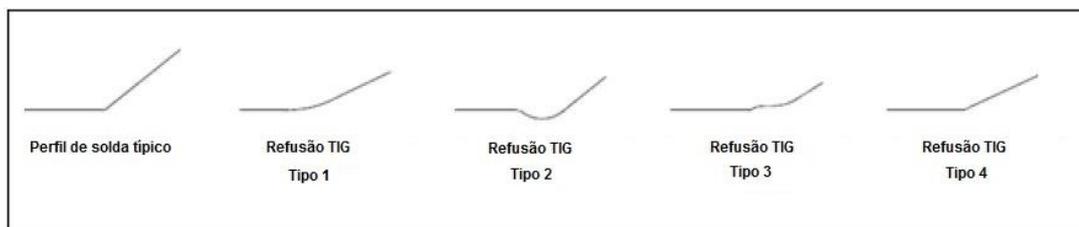
Ferro et. al (2017) menciona que o *TIG Dressing* remove inclusões de escória e também altera a dureza na região refundida. Em consonância Es S. H. J. V. et. al (2013) citam que a dureza na zona refundida bem como na zona afetada pelo calor aumentam, causando com isto benefício à resistência em fadiga. Os autores também afirmam que tal tratamento afeta o estado de tensões residuais, fator primordial na melhoria da vida em fadiga em aços estruturais de elevada resistência.

Ferro et. al. (2017) conclui em sua pesquisa que há um incremento específico de volume no flanco do cordão de solda induzindo na região uma tensão residual de compressão, este incremento de volume ocorre devido ao escoamento do metal refundido outrora localizado no cordão de solda.

#### 4.3.1. Geometria e Dureza da área refundida

Conforme Es S.V. (2012) o tratamento com refusão TIG não confere apenas uma única geometria para o flanco do cordão de solda. Algumas das diferentes formas obtidas podem ser observadas na figura 4.

Figura 4 - Geometria do flanco do cordão anterior e posterior o *TIG Dressing*.



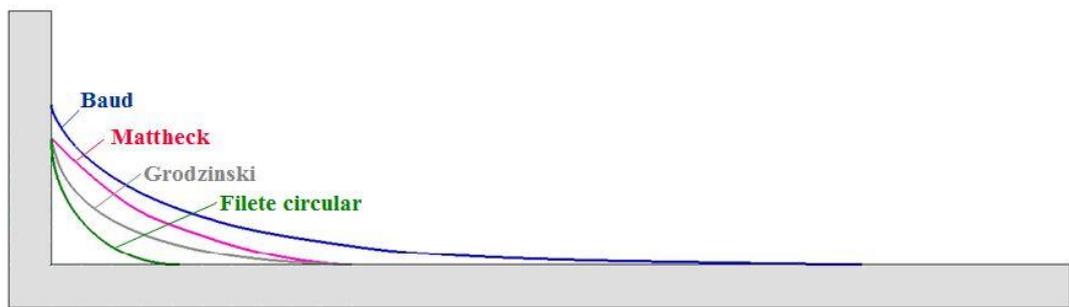
Fonte: Es S. V., (2012).

A severidade do entalhe é reduzida pelo escoamento de metal refundido até a região concentradora de tensão inicial originando um entalhe com forma arredondada ao longo do cordão de solda. A forma obtida com a refusão TIG não descreve um raio circular e sim de raio variável por conta da concentração de calor estar distribuída por uma poça de fusão que abrange o metal de solda depositado

durante a união das chapas e a chapa base. Os perfis de raio variável como mostrou Simões (2012) em sua pesquisa apresentam fator concentrador de tensão inferior ao apresentado por perfis circulares.

Simões (2012) realizou por meio de análise de elementos finitos o estudo de quatro tipos de formas de entalhes com o objetivo de saber qual deles oferece o menor FCT. Seus resultados apontaram após a análise de entalhes de raio circular e três entalhes de raio variável que são denominados como Curva de Baud, Curva de Mattheck (Método dos triângulos), e Curva de Grodzinski, que o fator concentrador de tensão com entalhe de raio variável é entre 24% e 31 % (valores aproximados) menor que o FCT entregue pelo entalhe de raio circular. A figura 5 mostra o perfil de cada curva de raio variável e também a curva de raio circular.

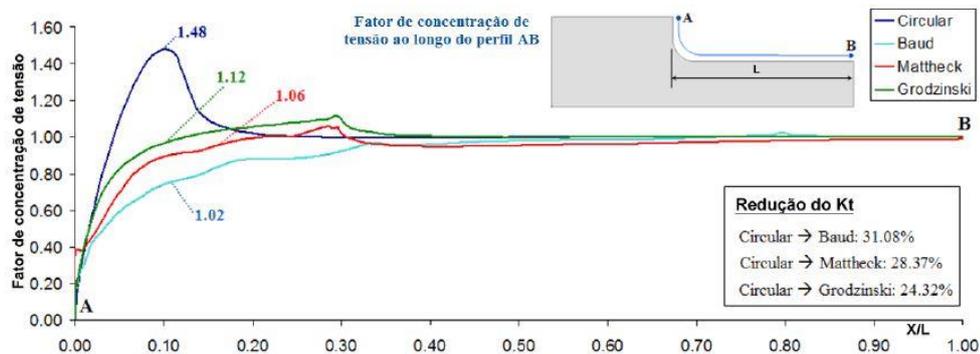
Figura 5 - Perfis geométricos circular, Baud, Mattheck e Grodzinski.



Fonte: Simões (2012).

A figura 6 ilustra o mencionado no parágrafo anterior em relação ao FCT analisado para cada curva apresentada na figura 5.

Figura 6 – Comparativo do FCT ao longo do perfil AB.



Fonte: Simões (2012).

De acordo com Branco et. al (1999) e Albuquerque et. al (2004) o desempenho de componentes soldados pode ser afetado por vários fatores, porém, o perfil da união soldada é um dos mais relevantes, pois o ângulo de tangência torna esta região um grande concentrador de tensão. Frequentemente, o início da trinca é localizado no flanco do cordão, região esta de efetiva atuação da refusão TIG.

Segundo Pedersen et. al. (2009) os aços de alta resistência quando submetidos ao refusão TIG sofrem uma queda nos valores de dureza entre 15% e 20% na região submetida ao tratamento.

Albuquerque et. al (2004) salienta que, durante o processo, o eletrodo TIG gera calor intenso e concentrado, produzindo um gradiente térmico elevado entre as regiões refundida e adjacente. Ou seja, o metal existente no entorno da região refundida provoca um resfriamento rápido nessa região, propiciando a formação de martensita na ZAC, com conseqüente aumento da dureza.

Tais afirmações antagônicas criaram um impasse quanto ao efeito do refusão TIG em termos de dureza da região afetada pelo processo. Tal aspecto foi, portanto, inserido como meta secundária do presente trabalho.

#### **4.3.2. Breve Descrição dos Equipamentos e da Execução do TIG dressing**

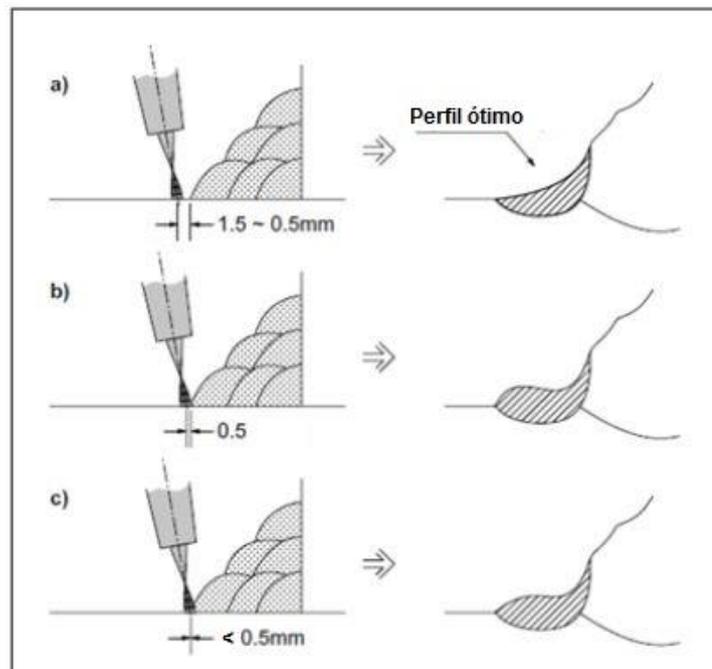
Como dito anteriormente, o equipamento e insumos são os mesmos utilizados no processo de soldagem TIG convencional. Porém, deve haver cuidado na manutenção das condições do eletrodo de Tungstênio. Já o gás utilizado normalmente é o Argônio e, conforme Haagensen et. al. (2006) a adição de Hélio possibilita a refusão de maior volume de metal.

Quanto ao pré-aquecimento para a realização do *TIG Dressing*, o IIW recomenda que, como regra geral, seja adotada como temperatura mínima aquela que consta no procedimento de soldagem da junta.

Quanto à posição da tocha, Haagensen et. al. (2006) em publicação realizada junto ao IIW (*International Institute of Welding*) aconselham que o eixo do arco encontre-se afastado do flanco da solda uma distância entre 0,5 mm e 1,5 mm.

Distâncias menores que 0,5 mm tornariam ineficiente o procedimento, conforme mostra a figura 7.

Figura 7 - Distância entre o eixo do arco elétrico e o flanco da solda.

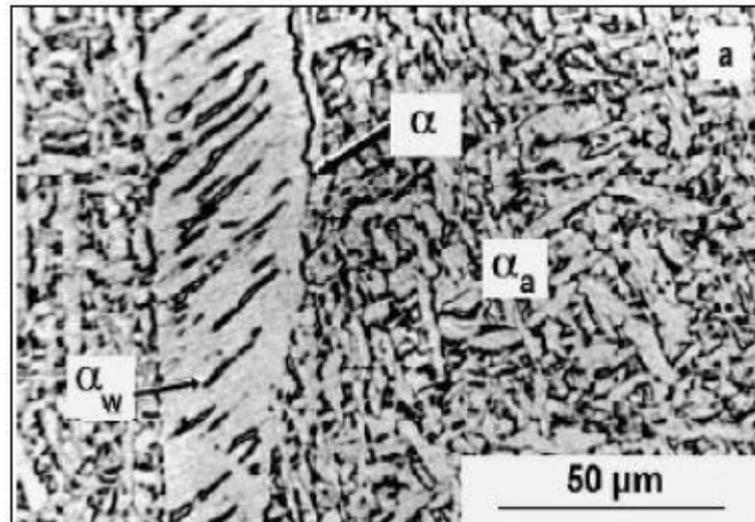


Fonte: Haagensen et. al. (2006).

Tais recomendações se aplicam a placas base com espessuras superiores a 4 mm para o alumínio e superiores a 6 mm para o aço.

#### 4.4. Aspectos Relacionados à Microestrutura do Metal de Solda

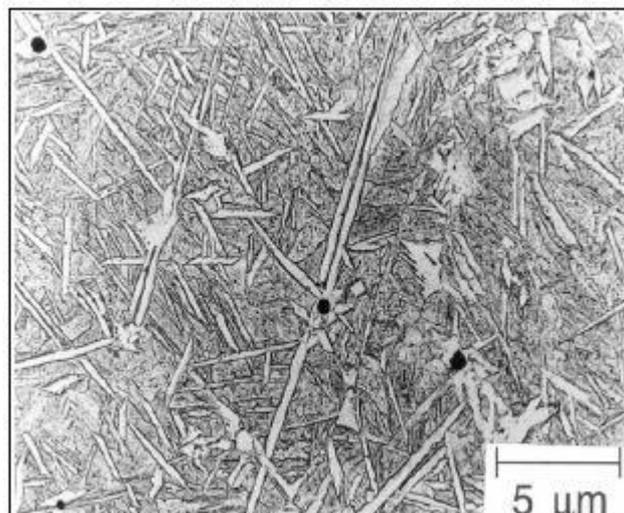
Segundo Babu (2004), o metal de solda no estado líquido dissolve o oxigênio e este forma inclusões de óxidos durante o processo de resfriamento, período no qual também ocorre a transformação da ferrita  $\delta$  (CCC) em austenita  $\gamma$  (CFC) e esta em ferrita  $\alpha$  (CCC). Na fase austenita já há presença de grãos, os quais, no resfriamento, geram distintas morfologias de ferrita, como a ferrita acicular ( $\alpha_a$ ) e a ferrita de Widmanstätten ( $\alpha_w$ ). A figura 8 mostra o aspecto dessas microestruturas dispostas, respectivamente, nas regiões central e de contorno de um grão.

Figura 8 – Microestrutura apresentando  $\alpha_w$  e  $\alpha_a$ 

Fonte: Babu (2004)

Conforme Babu (2004) a ferrita acicular se origina a partir das inclusões de óxidos no metal fundido, formando ramos ou ripas que se projetam da partícula. Tendo sido iniciado o processo, novos ramos surgem a partir dos originais, formando uma região de aspecto bastante característico, semelhante a um tapete trançado. As ripas apresentam alta densidade de discordâncias, o que proporciona valores de módulo de elasticidade e tenacidade à fratura, semelhantes ao da bainita superior (Bs). A figura 9 mostra algumas inclusões e as ripas de ferrita se projetando a partir delas.

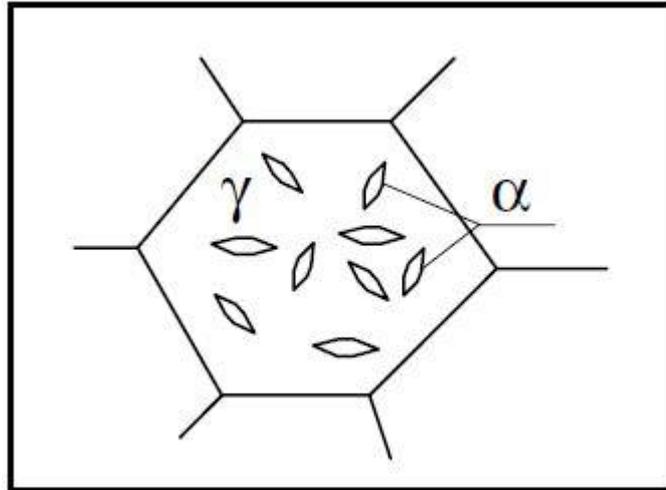
Figura 9 – Aspecto das ripas de ferrita acicular, projetando-se a partir de inclusões de óxidos.



Fonte: Bhadeshia (2001).

A figura 10 mostra um desenho representativo da formação da ferrita acicular dentro de um grão de austenita.

Figura 10 – Morfologia da ferrita acicular.



Fonte: Adaptado de Modenesi (2009).

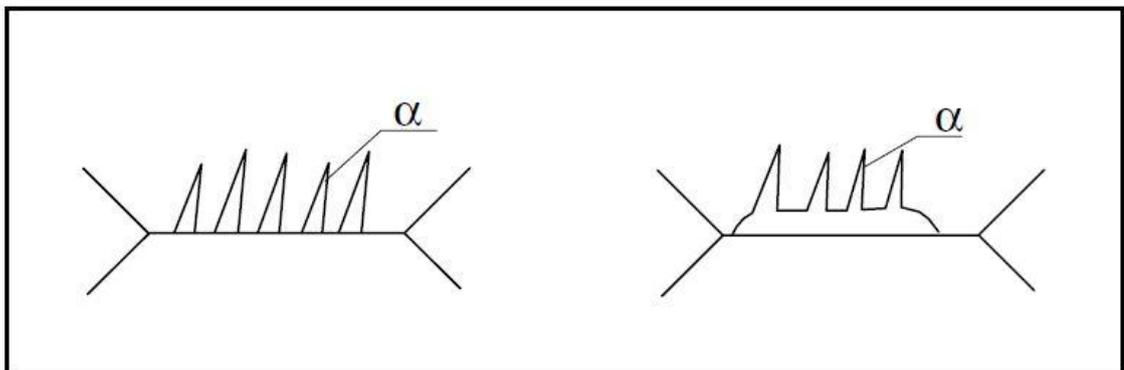
Já a ferrita de Widmstätten (estrutura também conhecida simplesmente por placas laterais de ferrita) apresenta forma de ripas ou placas que se projetam da ferrita de contorno de grão (primeira estrutura formada a partir da transformação da austenita) ou diretamente da própria austenita, estas placas possuem discordâncias de baixa densidade (MODENESI, 2009). As figuras 11 e 12 mostram o aspecto morfológico e o mecanismo de nucleação dessa estrutura.

Figura 11 – Ferrita Widmanstätten.



Fonte: Krauss (1990).

Figura 12 – Nucleação da ferrita Widmanstätten.

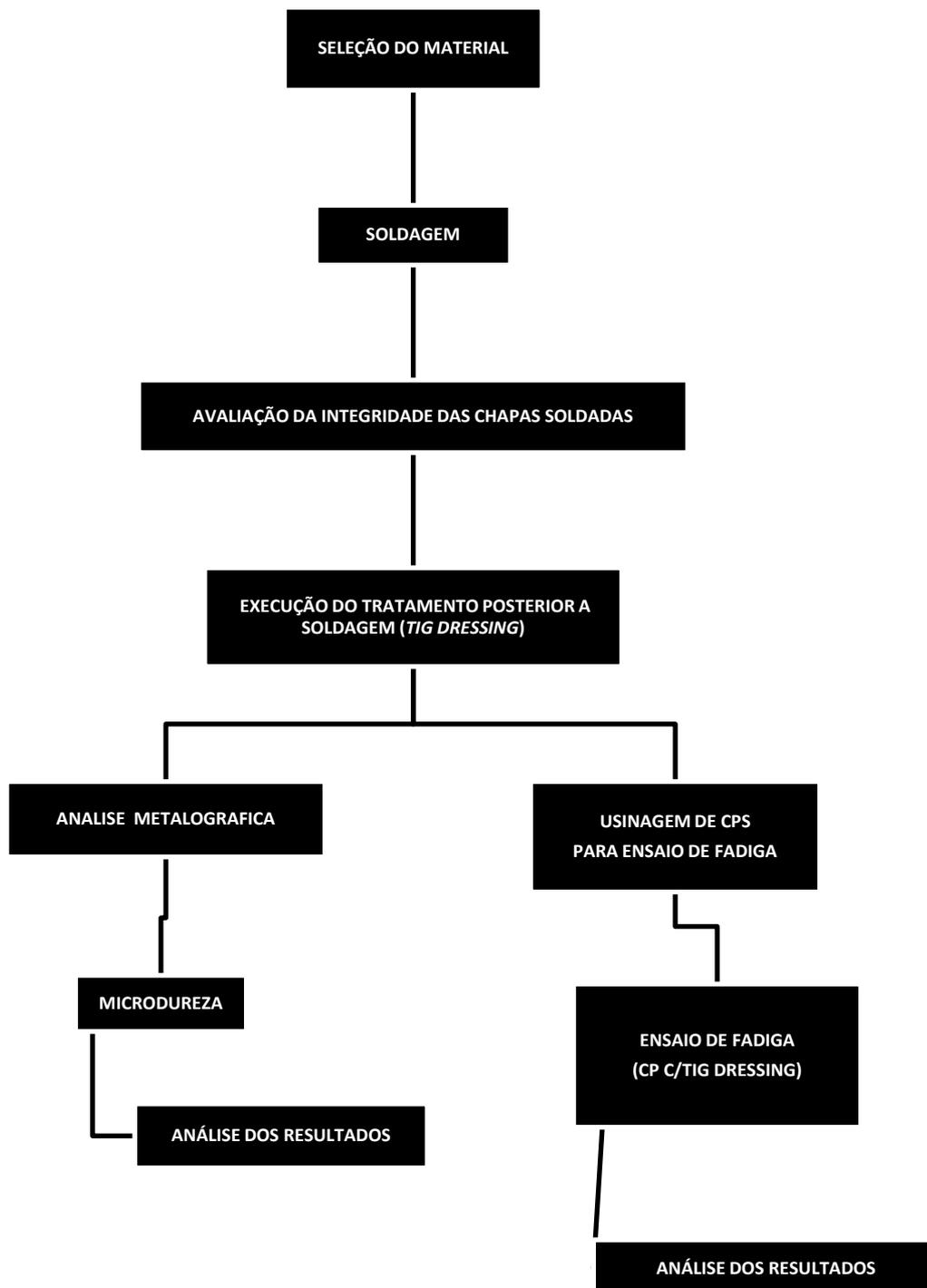


Fonte: Adaptado de Modenesi (2009).

## 5. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada nesta pesquisa foi dividida nas etapas mostradas no organograma apresentado na figura 13.

Figura 13 – Organograma de execução.



### 5.1. Seleção do Material

Foi empregado como metal base o aço ASTM A131 grau AH36. Trata-se de um aço microligado de alta resistência, classe conhecida no Brasil pela sigla ARBL (em inglês *High Strength Low Alloy* - HSLA) que apresenta a importante característica de aliar boa soldabilidade, resistência mecânica e tenacidade à fratura. Estas características são frutos da associação de uma liga Fe-C com baixo teor de carbono e pequena quantidade elementos de liga a um processo de laminação controlado (TMCP – *Thermo mechanical Controlled Process*).

O aço ASTM 131 grau AH36 é largamente empregado na indústria de estruturas, principalmente na área naval e *offshore*.

A composição química do metal base foi obtida por meio de espectrometria, sendo apresentada na tabela 1. Nessa tabela também são apresentados os teores recomendados pela norma ASTM A131/A131M, além do carbono equivalente.

Tabela 1 – Teores de elementos químicos do metal de base.

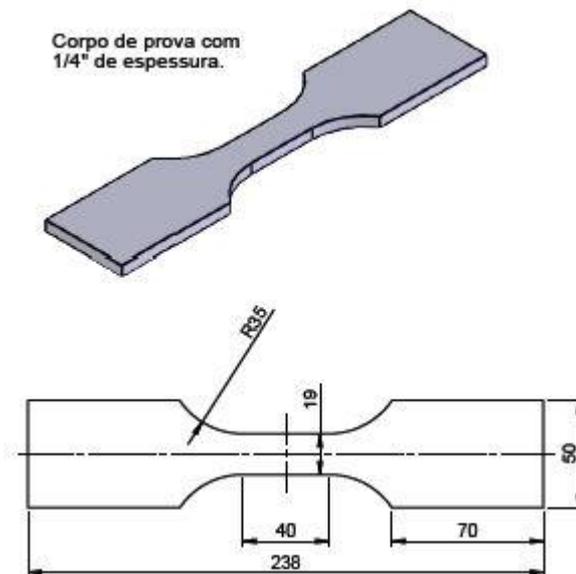
	Referência ASTM	Amostra do metal utilizado
C, Max	0,18	0,08
Mn	0,90-1,60	1,41
Si	0,10-0,50	0,28
P, Max	0,035	0,009
S, Max	0,035	0,011
Al, min	0,015	0,024
Nb	0,02-0,05	0,031
V	0,05-0,10	0,001
Ti, Max	0,02	0,015
Cu, Max	0,35	0,012
Cr, Max	0,20	0,009
Ni, Max	0,40	0,011
Mo, Max	0,08	0,001
C eq., Max	0,38	0,338

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

A equação utilizada para o cálculo do carbono equivalente foi obtida junto a norma ASTM A131/A131M.

Como parte do procedimento de caracterização foi realizado ensaio de tração utilizando o Laboratório de Ensaio Mecânicos do Curso Técnico em Edificações do Instituto Federal Sul-Rio-Grandense (IFSul) Campus Pelotas utilizando a máquina de marca Emic, modelo DL 20000 com capacidade de 300 kN. Os espécimes para o ensaio de tração foram produzidos no Laboratório de Fabricação do Curso Técnico em Mecânica do IFSul – Pelotas, com forma e dimensões prescritas na norma NBR ISO 6892-1 (2013). A figura 14 mostra as dimensões principais.

Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração.



Os resultados obtidos no ensaio de tração, mostrados na Tabela 2.

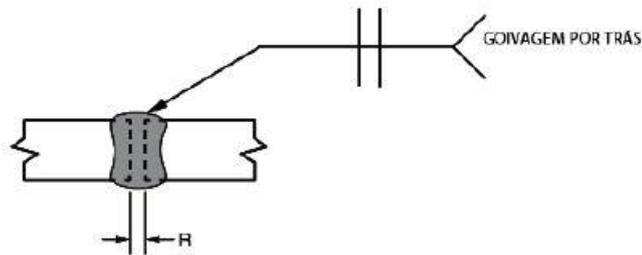
Tabela 2 – Resultado obtido no ensaio de tração

	<b>Tensão de Escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão Máxima (MPa)</b>	<b>Alongamento (%)</b>
<b>CP1</b>	396,7	491,2	47,7
<b>CP2</b>	406,3	491,9	47,7
<b>CP3</b>	398,6	491,1	45,4
<b>Média</b>	400,1	491,0	47,0
<b>Desvio padrão</b>	5,10	0,45	1,31

## 5.2.Preparação das placas para soldagem

O trabalho é fundamentado em uma junta de topo com cordão na face e na raiz, com goivagem de raiz conforme mostrado na figura 15. As dimensões e proporções foram definidas em consonância com a norma AWS D1.1 (2010) para uma chapa de espessura 6,35 mm ( $\frac{1}{4}$  in).

Figura 15 – Configuração da junta.



Fonte: Adaptado da norma AWS D1.1 (2010)

Os procedimentos de limpeza e corte da chapa foram realizados nas instalações do GEFMat - FURG. O corte das placas (chapas para teste e para soldagem definitiva) foi realizado por plasma, com o equipamento Hypertherm modelo Powermax 1650. Os parâmetros utilizados são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados no corte a plasma.

Pressão (psi)	Corrente (A)	DBCP (mm)	Vel. corte (mm/min)
80	60	2,5	1200

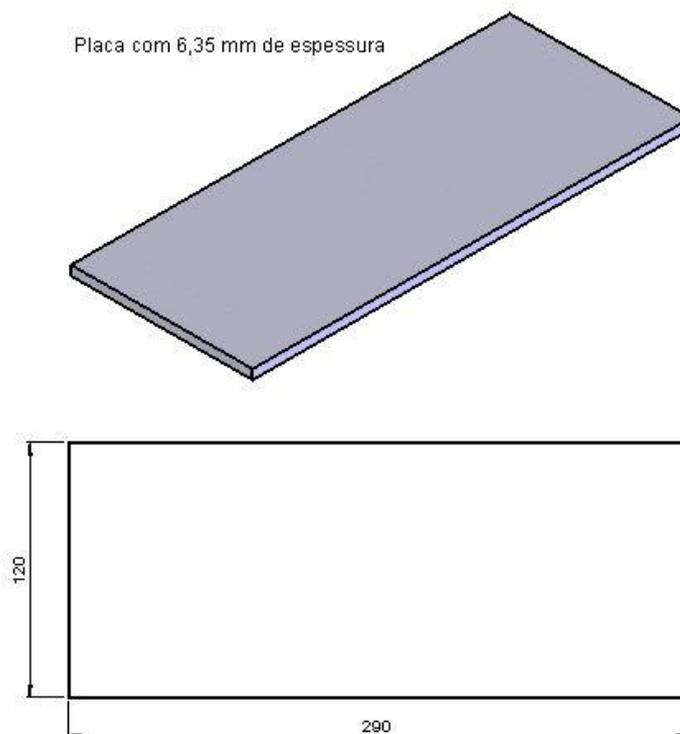
As placas de teste apresentavam as dimensões mostradas na figura 16.

Figura 16 – Dimensões da placa de teste.



As placas a serem soldadas para posterior confecção dos corpos de prova apresentavam as dimensões mostradas na Figura 17.

Figura 17 – Placa usada na soldagem para retirada dos corpos de prova.



Uma vez cortadas, as placas foram aplainadas com o intuito de obter um perfil retangular adequado, necessário para as etapas posteriores de fabricação. Tal usinagem foi realizada nas instalações do Curso Técnico em Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense (IFSUL) – Campus Pelotas, utilizando para este fim uma plaina marca Zocca modelo 500. A figura 18 mostra as placas durante o processo.

Figura 18 – Aplainamento das placas de teste.



### 5.3. Soldagem das placas empregando o processo GMAW

Com o intuito de obter um bom resultado na soldagem das chapas foi observada a questão do pré-aquecimento das mesmas para soldagem GMAW (MAG). Para tal, foi consultada a norma AWS D1.1 (2010), segundo a qual, para o aço ASTM 131 grau AH 36 com espessura entre 3 e 20 mm, a temperatura de pré-aquecimento mínima é de 20 °C.

Como um dos objetivos desta pesquisa é comparar o desempenho em fadiga de juntas correspondentes aos casos “com” e “sem” *TIG dressing*, foi utilizado como referência o trabalho recente de SILVA, M. S. (2018). Nesse sentido, o procedimento de soldagem adotado no presente trabalho (juntas “com” *TIG dressing*) é idêntico ao empregado naquele (juntas “sem” *TIG dressing*). Os parâmetros de soldagem do procedimento, em concordância com a norma AWS D1.1, são descritos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros adotados na soldagem GMAW.

Tensão (V)	Vazão (l/min)	Vel. soldagem (cm/min)	Vel. alimentação (m/min)	Corrente (A)	Abertura de raiz (mm)	DBCP (mm)
23,4	16	24	10,7	194,2	2	13

Fonte: Silva, M.S. (2018).

O gás de proteção utilizado no processo é conhecido como C25, este gás é uma mistura de argônio (Ar) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) sendo 75% Ar e 25% CO<sub>2</sub>. O arame sólido empregado foi da classe AWS A.518/A.5.15M-2005 ER70S6 com diâmetro de 1,2 mm.

Com o intuito de evitar a abertura das chapas de metal base durante a soldagem, essas foram pré-fixadas por meio de pontos de solda nas extremidades da junta. Para tal, foi usado processo de soldagem com eletrodo revestido. Para impedir que o conjunto se mova durante o processo, foram providenciados grampos de fixação. A figura 19 apresenta uma imagem contendo a tocha, dispositivo de fixação e peça.

Figura 19 - Dispositivo de fixação das chapas para soldagem



Após realizado o primeiro passe de soldagem, a peça foi virada e então efetuada a goivagem da raiz, por meio de disco abrasivo. O resultado pode ser observado na figura 20. A goivagem foi necessária, pois a forma irregular do metal adicionado no primeiro passe poderia ocasionar alguma descontinuidade à junta.

Figura 20 - Goivagem da raiz da solda



Com a finalização da soldagem do primeiro conjunto foi efetuada a verificação da integridade da junta no que concerne a descontinuidades externas e penetração do metal de solda.

Em referência às descontinuidades externas foi realizada inspeção visual do conjunto obtendo resultado satisfatório (ausência de mordeduras, respingos e porosidade), e análise de superfície por meio de ensaio com líquido penetrante e partículas magnéticas, em que ambos não acentuaram a existência de trincas superficiais provenientes do processo GMAW.

A integridade da junta soldada foi averiguada mediante o corte da seção transversal em duas placas, cada placa foi cortada em dois pontos separados de 50 mm um do outro resultando em quatro amostras. Os espécimes obtidos foram analisados por macrografia utilizando nital 2%. O resultado desta análise é apresentado na figura 21.

Figura 21 - Verificação da integridade da junta



#### 5.4. Execução do TIG Dressing

Posteriormente à soldagem GMAW, as placas após retornarem a temperatura ambiente foram submetidas à aplicação da técnica *TIG Dressing*. Para execução da mesma foi necessário o equipamento convencional de solda GTAW (TIG).

##### 5.4.1. Parametrização do TIG dressing

O processo iniciou pela limpeza da região soldada, item muito importante para a efetividade do *TIG dressing*. Para eliminar a camada oxidada, empregou-se disco *flap* acoplado à esmerilhadeira manual. Em sequência, houve a limpeza com flanela de algodão embebida em diluente (*thinner*), com secagem natural. Para retirar resíduos da flanela sobre a região limpa, foi utilizado o ar comprimido.

A fase de determinação dos parâmetros do *TIG Dressing* adotou por base as recomendações do IIW e as experiências do técnico responsável pelo laboratório e do próprio autor.

Com a fonte pronta para o início da atividade, acertos foram feitos no tartilope (Tartilope é o equipamento responsável pela automatização do procedimento, ele assegura que parâmetros como velocidade de deslocamento da tocha e DBCP sejam ajustados e assim permaneçam durante todo o trajeto) e também na tocha de soldagem, visando determinar o modo de movimentação da tocha em relação à

chapa, a distância adequada entre eletrodo e chapa, bem como o afastamento transversal entre a ponta do eletrodo e o flanco do cordão de solda.

No que se refere ao movimento da tocha, o equipamento (tartílope) permite a escolha de parâmetros como o deslocamento entre dois pontos ou o deslocamento passando por três ou mais pontos (limitado em 5 pontos), isso permite que o *TIG Dressing* possa ser realizado em cordões de solda que não descrevem apenas uma linha reta. Como as chapas onde o tratamento foi efetuado possuem um cordão que descreve uma linha reta utilizou-se o deslocamento entre dois pontos e, para tal, foi preciso estabelecer apenas os pontos de início e fim do passe de refusão. A figura 22 mostra a tocha TIG acoplada ao Tartílope.

Figura 22 - Tocha TIG acoplada ao Tartílope



Tais pontos foram especificados de modo que o afastamento entre a ponta do eletrodo e o flanco do cordão ficasse entre 0,5 e 1,5 mm. Já o comprimento do arco (distância entre a ponta do eletrodo de tungstênio e a chapa base) inicialmente utilizado foi de 3 mm.

Os trabalhos de parametrização iniciaram com a fonte trabalhando ajustada a 110 A, o que se mostrou insuficiente para uma refusão efetiva. Por esse motivo, a corrente foi sendo aumentada de forma gradativa. O diâmetro do eletrodo de tungstênio utilizado foi de 2,4 mm. Porém, outro fator que se mostrou muito importante foi a velocidade de deslocamento da tocha. O primeiro passe foi conduzido com uma velocidade de 3,33 mm/s, resultando em um passe

insatisfatório. Assim como a corrente, a velocidade foi sendo ajustada até um valor considerado satisfatório, no caso, de 1,66 mm/s.

Os parâmetros finais empregados no tratamento são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros para realização do *TIG Dressing*

Tensão (V)	Vazão (l/min)	Velocidade (mm/s)	Corrente (A)	Gás	DBCP (mm)
26	15	1,66	125	Argônio	4,5

#### 5.4.2. Execução do *TIG dressing*.

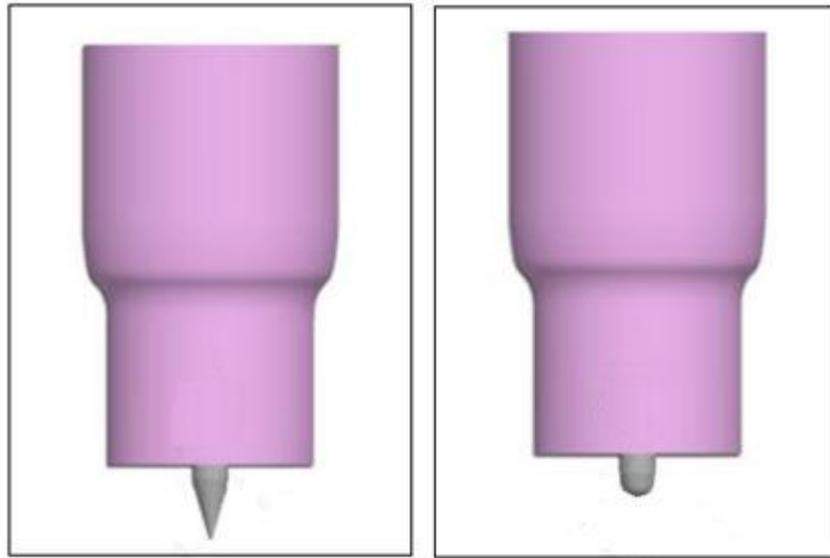
Como cada chapa possui a necessidade de quatro passes de refusão, o início das atividades de execução do *TIG Dressing* apresentou grande dificuldade devido ao empenamento das chapas quando submetidas à elevada quantidade de energia térmica do procedimento com quatro passes executados consecutivamente. Mesmo com as chapas fixadas em suporte adequado o empenamento era elevado.

Maddox (2001) menciona que um alto aporte de calor permite maiores velocidades no deslocamento da tocha. Mas na fase inicial de efetuação do procedimento, notou-se que o aquecimento gerado era muito grande quando os quatro passes eram efetuados em sequência. O problema foi resolvido realizando o *TIG dressing* sempre com a chapa fria (temperatura ambiente), o que elevou muito o tempo de execução.

A fonte utilizada para o *TIG Dressing* foi da marca ESAB modelo Heliarc 355 AC/DC.

Por fim, para que o arco elétrico se mantenha efetivo, a ponta do eletrodo não pode apresentar desgaste excessivo. A figura 23 exemplifica a forma inicial e posterior ao desgaste natural gerado pelo processo. Observou-se que a vida útil do eletrodo de Tungstênio foi reduzida e que o reparo da sua ponta ocasionou inúmeras paradas. O esmerilamento foi a técnica de reparo utilizada. Segundo Bracarense (2000) esta permite que o arco tenha maior estabilidade.

Figura 23 - Bocal TIG com eletrodo esmerilado a) e desgastado b)



A figura 24 mostra tocha e peça na fase de conclusão do procedimento em um dos flancos do cordão.

Figura 24 - *TIG Dressing* concretizado.



As etapas de parametrização e de execução do *TIG Dressing* foram realizadas nos laboratórios do GEFMat.

### 5.5. Corpos de prova para teste de vida em fadiga

A curva S-N foi obtida por meio de ensaios com aplicação de cargas cíclicas em corpos de prova submetidos ao *TIG Dressing*. Segundo a Eurocode EN (1990) para um único ponto é imprescindível o número mínimo três amostras.

Por outro lado, a norma ASTM E739 indica o número de corpos de prova e replicação mínimos, conforme o tipo de ensaio desejado. A tabela 6 mostra esses valores.

Tabela 6 – Indicações para ensaio de fadiga segundo a norma ASTM E739.

Ensaio	Número mínimo de corpos de prova	Replicação mínima (%)
Pesquisa e desenvolvimento de testes preliminares	6 a 12	17 a 33
Pesquisa e desenvolvimento de componentes e corpos de prova	6 a 12	33 a 50
Dados utilizáveis em projeto	12 a 24	50 a 75
Dados com confiabilidade estatística	12 a 24	75 a 88

Fonte: Adaptado de ASTM E739-10 (2013, p.3).

A replicação mínima foi obtida por meio de equação extraída da norma ASTM E739 – 10 (2013), onde a base de cálculo é relação entre o número de diferentes níveis de tensão e a quantidade de corpos de prova. A replicação obtida para três níveis de tensão e dez corpos de prova foi de 70%.

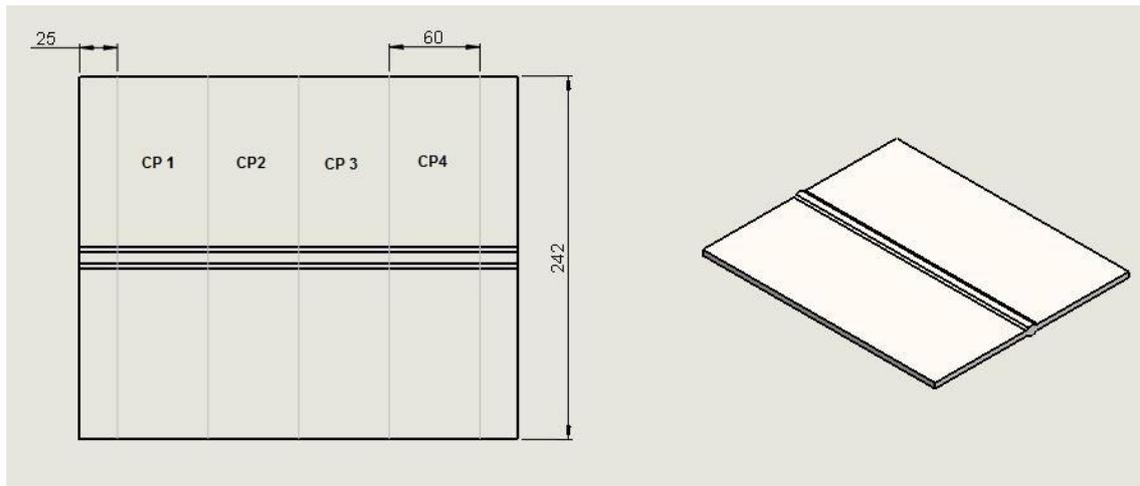
$$Replicação (\%) = 100 * \left( 1 - \frac{N^{\circ} \text{ de diferentes níveis de tensão}}{Quantidade \text{ de corpos de prova}} \right) \quad (2)$$

Para a usinagem dos corpos de prova dois caminhos distintos poderiam ser percorridos, o primeiro é a utilização do centro de usinagem do IFSul – Campus Pelotas o que traria um ganho enorme de tempo de trabalho, a segunda possibilidade é a de utilizar o torno mecânico universal do próprio GEFMat para a usinagem dos CPs.

O primeiro caminho foi o escolhido, pois além do acesso ser mais fácil, a programação do centro de usinagem (CNC) já está em condições de uso, o que trouxe um elevado ganho de tempo para atividades futuras.

Definido o modo de usinagem dos corpos de prova, as chapas foram cortadas descartando o início e fim do cordão conforme mostra a figura 25.

Figura 25 - Corte das placas pós tratamento.



A figura 26 mostra uma peça resultante do processo de corte a plasma após ter sido fresada para garantir as dimensões especificadas em projeto.

Figura 26 - Espécime pronto para usinagem final



Com os espécimes prontos a usinagem final foi realizada com êxito em um centro de usinagem por meio do processo de fresagem resultando no corpo de prova conforme projeto apresentado na figura 27. Já a figura 28 ilustra o processo

de usinagem, enquanto que a figura 29 mostra um corpo de prova em sua forma final.

Figura 27 – Corpo de prova projetado para ensaio de fadiga.

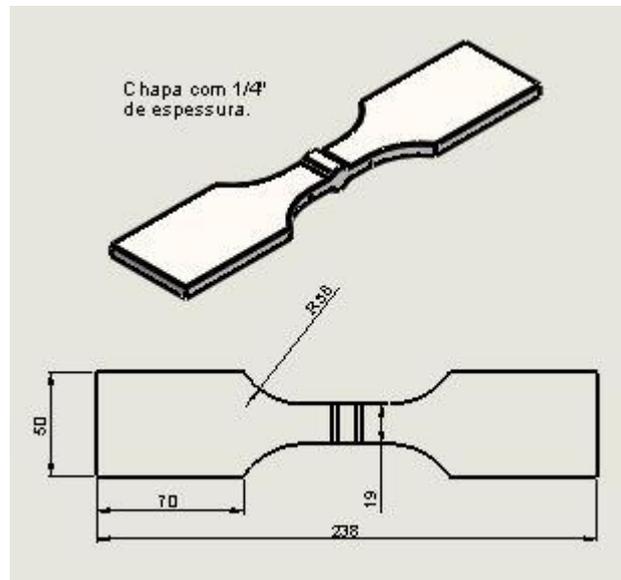


Figura 28 – Usinagem do CP (fadiga) no centro de usinagem



Figura 29 - Corpo de prova para ensaio de fadiga

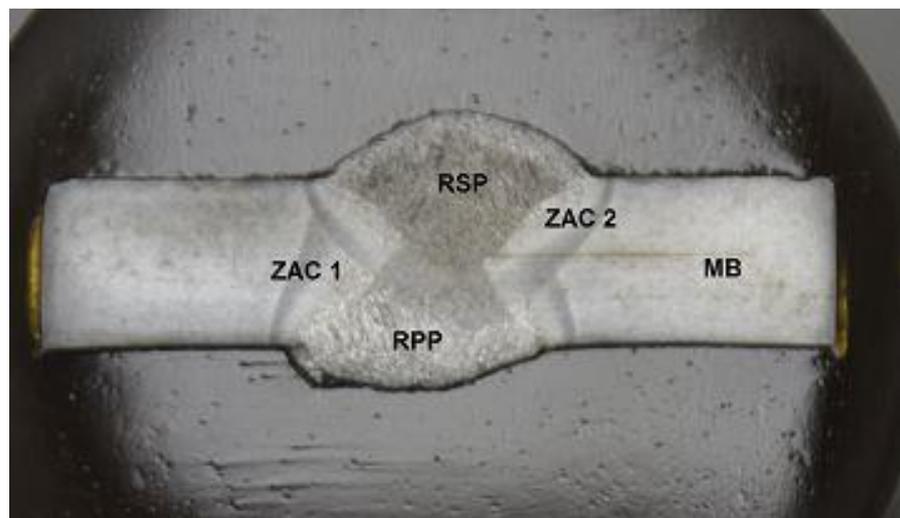


## 5.6. Descrição dos Resultados

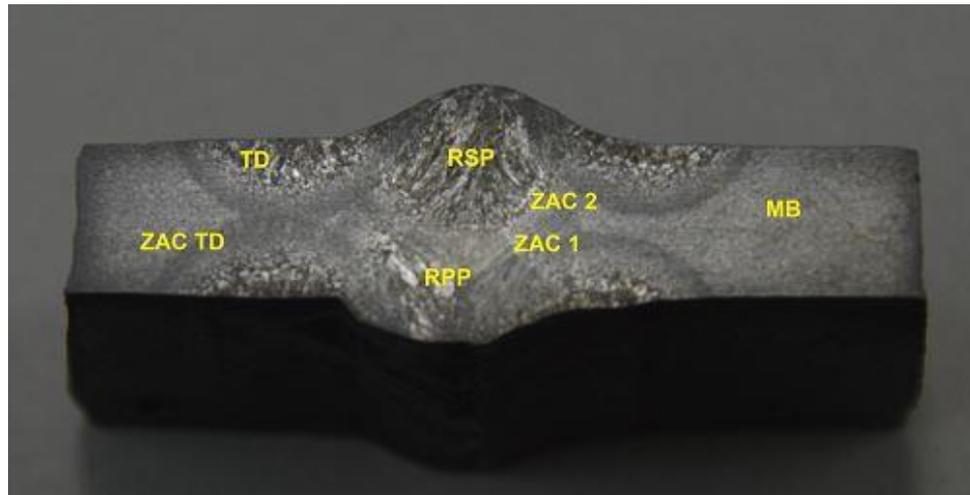
### 5.6.1. Caracterização da junta

Para as análises macro e microestrutural alguns procedimentos metalográficos foram adotados seguindo a metodologia descrita por Colpaert (2008). A figura 30 mostra as regiões da junta somente como soldada (sem tratamento), onde se pode observar a sobreposição do segundo cordão de solda em relação ao primeiro cordão e suas respectivas zonas afetadas pelo calor bem como o metal base da união. As abreviações mostradas na figura 30 são para as regiões de primeiro e segundo passe (RPP e RSP), zonas afetadas pelo calor (ZAC 1 e ZAC 2) e metal base (MB).

Figura 30 – Regiões de soldagem GMAW.

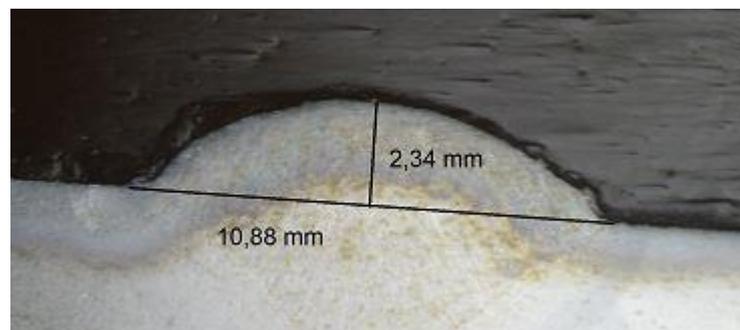


A figura 31 apresenta a macrografia obtida da união após a aplicação da técnica *TIG Dressing*, nesta imagem nota-se além das regiões destacadas na figura 30, regiões refundidas por meio do *TIG Dressing* (TD) e zonas afetadas pelo calor da refusão (ZAC TD).

Figura 31 – Regiões de soldagem e *TIG Dressing*

Segundo a Eurocode3 - parte 1.9 (2003), para a Categoria do Detalhe 80 o reforço de uma união de topo deve possuir altura menor ou igual a 20 % da sua largura. A figura 32 mostra que, depois de realizada a medição, a junta original apresentava dimensões desconformes com a norma.

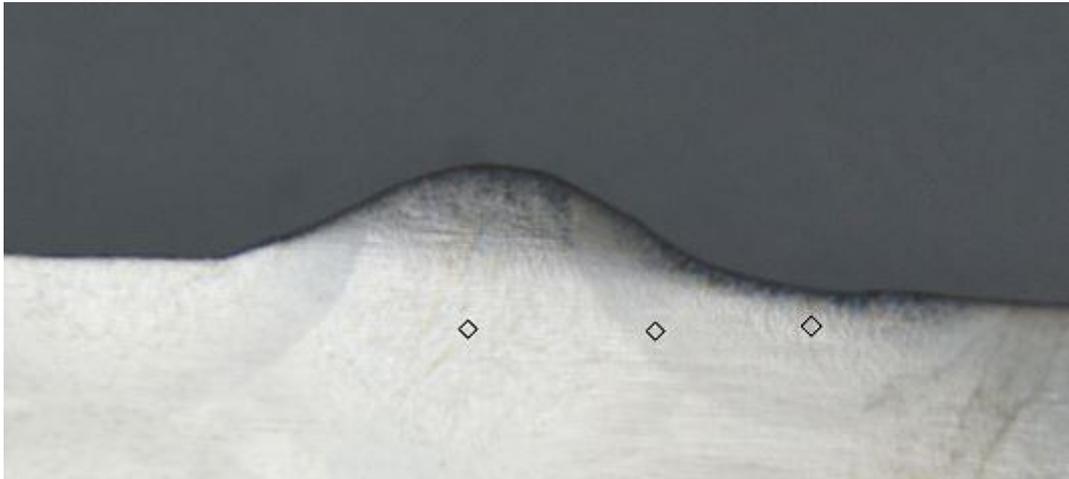
Figura 32 – Dimensões do reforço da união soldada.



### 5.6.2. Microdureza

Foram preparadas três amostras para o ensaio de microdureza. A norma ASTM E384 (1999) foi utilizada como referência do ensaio, o qual foi realizado em um microdurômetro da marca Ernst Leitz, modelo GMBHX Welzlar, aplicando carga de 100 gf durante um período de 10 segundos. A figura 33 mostra os locais de endentação.

Figura 33 – Regiões de ensaio de microdureza Vickers.



Os resultados de microdureza Vickers são apresentados nas tabelas 8 e 9 presentes na seção 4.10 deste trabalho.

### **5.6.3.Fadiga**

Os espécimes sujeitos a este procedimento foram ensaiados nas dependências da FURG, mais precisamente no Laboratório de Ensaio Mecânicos do GEFMat da universidade. A máquina de ensaio foi a servo-hidráulica de fabricação japonesa da marca Shimadzu, modelo EHF-EV200K1-020-1A com 100 kN de capacidade dinâmica. Os corpos de prova foram submetidos ao esforço de tração repetida (Razão de carga  $R = 0$ ).

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga são apresentados na tabela 10 presente na seção 4.11 deste trabalho.

### **5.7.Análise da fratura**

As superfícies de fratura foram divididas em dois grupos: a) Corpos de prova com ruptura no metal base, e b) Corpos de prova com ruptura na região afetada pelo *TIG dressing*.

As observações das características de cada fratura foram realizadas com o propósito de evidenciar os locais de nucleação e propagação das trincas, bem como o modo como ocorreram as rupturas.

Nos corpos de prova onde a falha ocorreu no metal base, em alguns corpos de prova foi verificada a presença de marcas laterais, originárias da usinagem, onde houve a nucleação. Não obstante, outros espécimes com ruptura no metal base apresentaram a trinca nucleada na face superior, esta possivelmente vinda de alguma descontinuidade já contida na chapa metálica.

Nos dois casos mencionados houve uma ruptura típica de componentes submetidos a carregamentos cíclicos, ou seja, as regiões de nucleação, propagação e colapso final ficaram bastante claras.

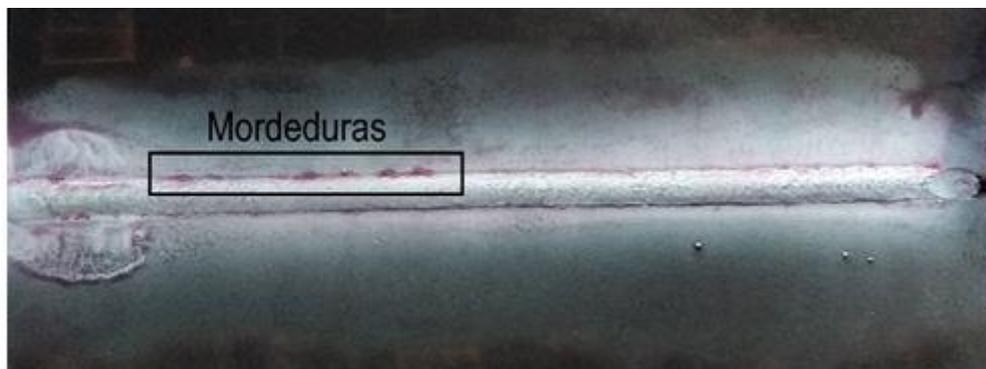
As falhas ocorridas na superfície da região refundida pelo processo TIG *dressing* resultaram da nucleação de trincas iniciadas em saliências das escamas irregulares decorrentes do processo.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Sobre o *TIG dressing*

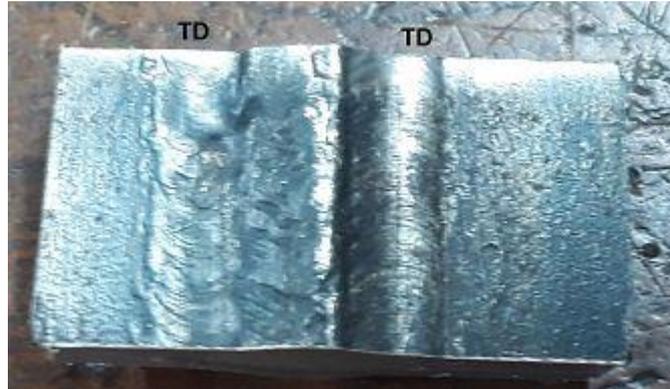
O procedimento mostrou-se muito sensível ao aquecimento oriundo dos diversos passes realizados, isto se deve ao fato das chapas serem de dimensões pequenas tornando mais difícil a dissipação de calor, o que provavelmente não aconteceria no trabalho em campo aplicando esta técnica em componentes maiores. Contudo, a partir do momento em que os passes de refusão TIG passaram a ser efetuados sobre a chapa em temperatura ambiente, obteve-se resultado satisfatório, comprovado por inspeção visual. A técnica eliminou descontinuidades visíveis, como mordeduras, porosidades e pequenos respingos originados pelo processo de deposição GMAW. Isto ocorre porque o metal de solda refundido escoou misturando-se na poça de fusão ao metal base preenchendo a região à margem do cordão. A figura 34 mostra um cordão de solda ainda não submetido a refusão TIG cujo a margem apresenta mordeduras, claramente aparentes na figura devido à aplicação de líquido penetrante.

Figura 34 – Inspeção por LP.



A figura 35 expõe uma amostra da união após a execução do tratamento, nela pode-se perceber que a técnica utilizada pós soldagem eliminou a mordedura outrora existente, permanecendo apenas as escamas decorrentes do procedimento de melhoria.

Figura 35 – Vista superior de amostra após *TIG Dressing*.



## 6.2. Geometria da junta

As imagens obtidas durante os ensaios salientaram a importância da refusão TIG no que diz respeito ao aspecto geométrico da união soldada. Podemos notar nas figuras 38 e 39 a importante diferença existente no entalhe destas amostras. O perfil da junta evidencia que a técnica de melhoria aplicada, além de modificar o entalhe, reduziu satisfatoriamente o ângulo de flanco culminando em um fator suave de concentração de tensões.

Como o acesso a grande parte dos componentes mecânicos presentes na indústria principalmente a indústria naval é dificultado seja por estarem em locais de pequenos volumes livres ou por sua elevada dimensão, é difícil sensibilizar os entalhes existentes de outra forma se não por um tratamento que utiliza maquinário de fácil aquisição e manuseio.

Com isso a mudança do fator geométrico concentrador de tensão torna-se o primeiro aspecto positivo desta técnica de melhoria pós soldagem.

A figura 36 mostra o ângulo de reforço de uma amostra que ainda não havia passado pelo processo refusão TIG, enquanto que a figura 37 mostra o mesmo cordão após ser aplicado o procedimento de refusão. Observa-se a importante suavização do efeito de entalhe obtida. As medidas angulares foram obtidas por meio do software *ImageJ*.

Figura 36 - Ângulo de reforço GMAW.

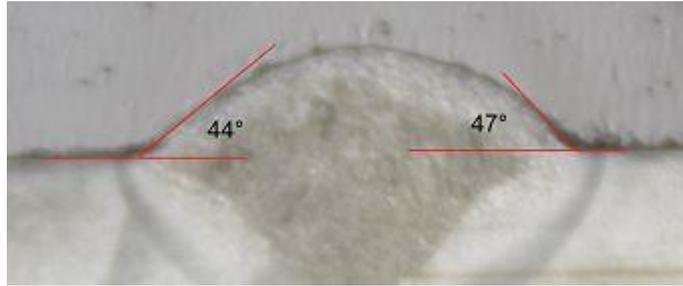
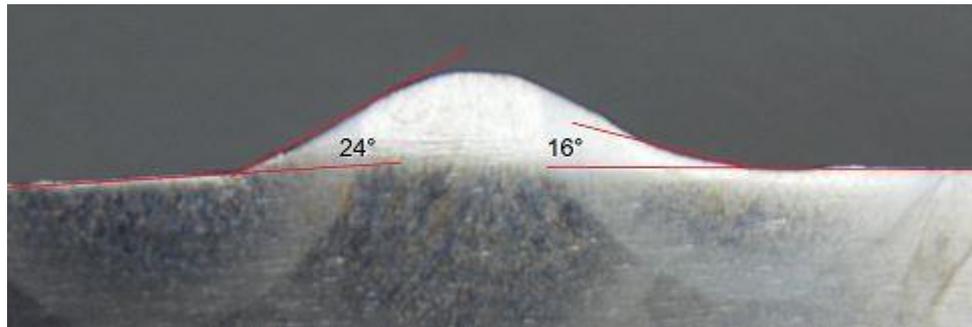


Figura 37 - Ângulo de reforço pós refusão TIG.

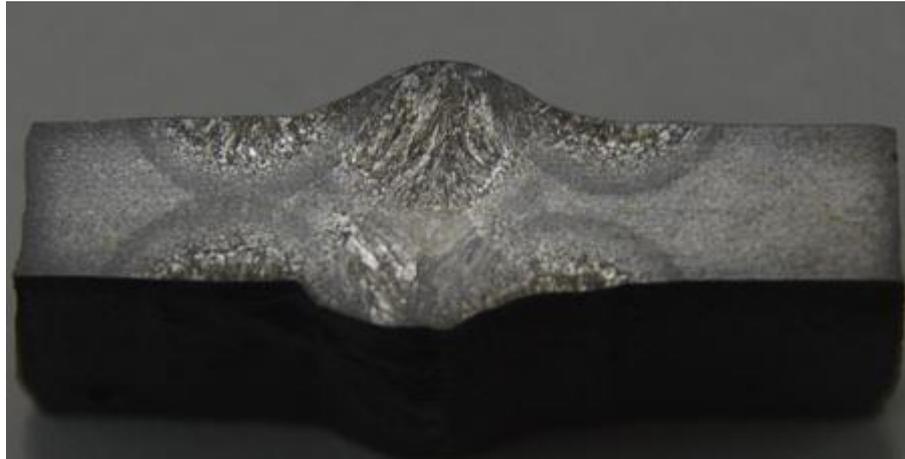


As figuras 38 e 39 obtidas por macrografia executada com Percloroato de Ferro, exibem a seção transversal de duas uniões soldadas respectivamente sem e com tratamento posterior, onde é notória a mudança da severidade do entalhe no flanco do cordão mostrando o perfil de raio variável obtido neste trabalho.

Figura 38 – Geometria da junta GMAW.



Figura 39 – Geometria da junta após refusão TIG.



### 6.3. Resultado do Ensaio de Microdureza

Os ensaios de microdureza mostraram que houve elevação da dureza, de aproximadamente 21% na margem da solda nos corpos de prova submetidos à refusão TIG em relação às amostras não tratadas por esta técnica. Os ensaios também evidenciaram que na região onde o metal de solda não foi refundido e sim reaquecido ocorreu a redução do valor de dureza em aproximadamente 9%.

Como observado na seção anterior, com a atenuação do efeito de entalhe associado a margem do cordão, bem como a possível extinção de microtrincas por meio da refusão, a nucleação de trincas de fadiga tende a ser prorrogada. Portanto, por esse ponto de vista, os efeitos causados pela refusão TIG são claros e positivos.

Contudo, não é possível antever claramente o efeito do aumento de dureza da região refundida, em termos de vida em fadiga. Se por um lado o incremento da resistência mecânica de uma peça proporciona maior resistência à fadiga, por outro lado, a mudança de comportamento do material no sentido de torná-lo mais frágil pode trazer resultados danosos para a propagação de trincas. A quantificação desses efeitos antagônicos associados ao aumento de dureza não é o foco do presente trabalho, mas representa um desafio que pode vir a ser contemplado em estudos futuros.

A tabela 8 aponta os resultados de microdureza Vickers obtidos de três amostras de corpos de prova tratados (submetidos à refusão TIG) e três de corpos

de prova não tratados (somente como soldados), onde foi constatado que nos espécimes ensaiados houve aumento de dureza no pé do cordão após o tratamento.

Tabela 7 – Valores de microdureza Vickers extraídos da margem do cordão.

	<b>CP tratado</b>	<b>CP não tratado</b>
<b>CP1</b>	234,55	187,40
<b>CP2</b>	219,49	188,72
<b>CP3</b>	230,71	184,45
<b>Média</b>	228,25	186,85

A tabela 9 revela que os resultados de microdureza Vickers alcançados foram reduzidos para o metal de solda após a aplicação da refusão TIG.

Tabela 8 - Valores de microdureza Vickers extraídos do metal de solda (GMAW).

	<b>CP tratado</b>	<b>CP não tratado</b>
<b>CP1</b>	179,64	190,63
<b>CP2</b>	174,18	195,32
<b>CP3</b>	172,78	192,81
<b>Média</b>	175,53	192,92

Por outro lado a bibliografia estudada evidenciou que Pedersen et. al. (2009) defende a tese de que uma queda de dureza acontece após a refusão TIG. Esta pesquisa expôs que a antítese mostrou-se verdadeira neste caso especificamente mesmo não obtendo a formação de martensita como observado por Albuquerque (2004). A microestrutura obtida é mostrada na seção 4.12 desta pesquisa.

#### 6.4. Análise dos resultados de vida em fadiga

Alguns corpos de prova apresentaram ruptura fora da região considerada o gargalo de qualquer estrutura soldada, esta região composta pelo metal de solda, zona de refusão (região onde o material foi refundido utilizando o processo TIG) e zona afetada pelo calor (ZAC) mostrou-se nestes CPs mais resistente que a chapa base. Dos dez corpos de prova ensaiados, seis romperam fora da região de união

das placas. A figura 40 mostra um corpo de prova rompido fora da região soldada, nela é possível ver que a fratura ocorreu no início do raio de concordância.

Figura 40 – Corpo de prova com ruptura no metal base.



A falha catastrófica evidenciada nos espécimes citados no parágrafo anterior ocorreu em um dos seguintes locais do corpo de prova (CP): a) no ponto de concordância entre a haste interna de ensaio (região útil do CP) com a parte circular (transição entre a haste e o mordente do CP) e b) na própria haste interna do CP. Es et. al. (2013) também constataram em sua pesquisa que alguns corpos de prova tratados com a técnica de refusão TIG romperam no metal base da junta. Analogamente estas falhas podem ter sido ocasionadas por uma descontinuidade da própria chapa ou por algum entalhe produzido pela ferramenta de corte na superfície usinada.

Nesta pesquisa pode-se perceber que corpos de prova rompidos no metal base tiveram a trinca nucleada nas extremidades dos corpos de prova, seja na superfície frontal (usinada) ou na superfície superior. A figura 41 mostra a ruptura de um CP causada por trinca nucleada na extremidade do metal base em uma região não afetada pelo calor.

Figura 41 – Trinca nucleada na extremidade do metal base.



Mesmo com a incidência da ruptura fora da região esperada acontecendo em alguns CPs ensaiados o número de ciclos atingidos supera os valores obtidos por

Silva (2018) em amostras não tratadas, o que deixou claro que o tratamento realizado obteve êxito. Os resultados obtidos dos ensaios de fadiga realizados em espécimes tratados e seu diagrama S-N são mostrados na tabela 10 e na figura 43 respectivamente.

Os corpos de prova com ruptura na região de solda apresentaram a nucleação da trinca (NT) nas extremidades da seção transversal do CP na margem do cordão de solda. A propagação destas trincas foi considerada normal para a maioria dos corpos de prova conforme apresentado na figura 42, mas alguns CPs tiveram o período de propagação de trinca elevado como mostra a figura 43. Isto foi percebido devido ao tamanho das regiões por onde a trinca se propagou em ambas as figuras, nota-se que na figura 42 a região onde o material foi bruscamente separado é superior a metade da seção analisada o que leva a conclusão de que a propagação da trinca (PT) se deu em tempo menor quando comparado com a figura 43 que claramente aponta para uma propagação de trinca de período mais prolongado levando em consideração a grande área percorrida pela trinca até a ruptura brusca (RB) do material.

Figura 42 – Nucleação e propagação da trinca em espécime tratado

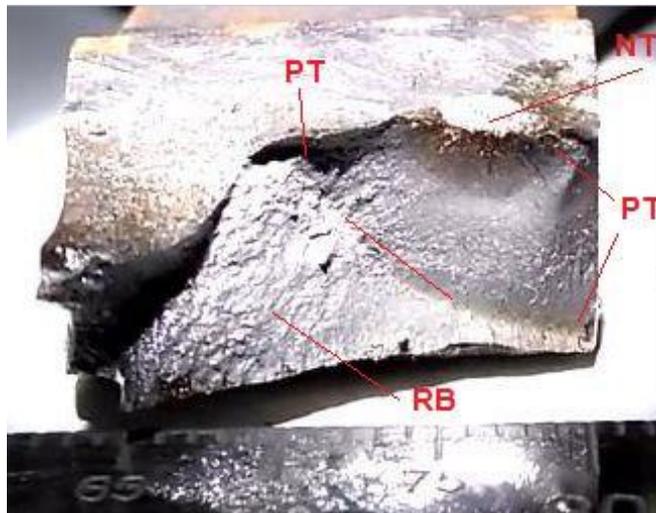
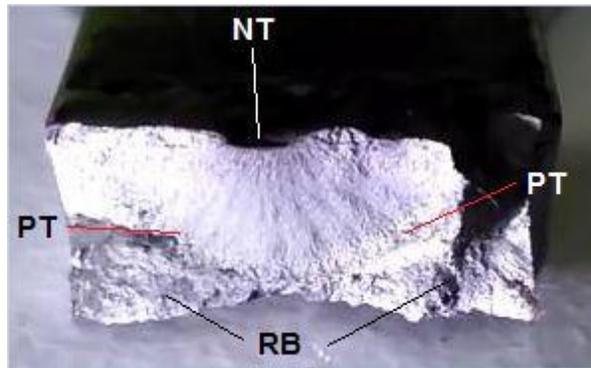


Figura 43 – Corpo de prova com elevado período de propagação da trinca



Imperfeições causadas durante o tratamento e até mesmo as escamas deixadas pelo deslocamento da poça de fusão podem ser pontos de início de trinca em peças submetidas à fadiga.

A figura 44 mostra a ruptura na região refundida e a figura 45 expõe a nucleação da trinca responsável por tal ruptura.

Figura 44 – Ruptura ocorrida na região refundida.



Figura 45 – Nucleação de trinca (figura 44).



A Tabela 10 apresenta os dados de vida obtidos nos ensaios dos corpos de prova que sofreram refusão TIG.

Tabela 9 – Dados dos ensaios de fadiga de CPs tratados por refusão TIG.

Seqüência de ensaio	Identificação do CP	Carga (kN)	Tensão (MPa)	Nº de ciclos	Local de ruptura
CP 1	CH3 CP1	44	364,7	635015	Metal base
CP 2	CH3 CP2	51	422,7	198725	Metal base
CP 3	CH4 CP2	51	422,7	186000	Metal base
CP 4	CH1 CP3	51	422,7	87909	Metal base
CP 5	CH2 CP2	51	422,7	99951	Metal base
CP 6	CH1 CP2	51	422,7	69234	Metal base
CP 11	CH2 CP3	44	364,7	498328	Refusão
CP 12	CH2 CP4	40	331,5	650803	Refusão
CP 13	CH2 CP1	40	331,5	2036992	Refusão
CP 14	CH1 CP1	42	348,1	309145	Refusão

Ao longo dos ensaios foi possível notar que as amostras submetidas ao TIG *dressing* obtiveram acréscimo do tempo de vida em serviço quando comparadas às ensaiadas por Silva (2018) para uma faixa de tensão semelhante, mesmo em casos onde na pesquisa anterior foram retirados os reforços da junta soldada.

Para a determinação das equações e dos respectivos diagramas S-N, foram aplicadas recomendações da norma ASTM E739-10 (2013). A equação utilizada na construção de um diagrama S-N é:

$$\log N = A + B \cdot \log(\Delta\sigma) \quad (3)$$

Onde:

N = Número de ciclos;

A e B = Constante de análise de regressão linear;

$\Delta\zeta$  = Intervalo de tensão aplicada.

As incógnitas que representam as constantes A e B são obtidas mediante a utilização das equações 4 e 5.

$$A = \bar{Y} - B \cdot \bar{X} \quad (4)$$

Onde:

$\bar{Y}$  = Média do  $\log_{10}$  dos números de ciclos;

$\bar{X}$  = Média do  $\log_{10}$  dos intervalos de tensões.

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

Onde:

$Y_i$  =  $\log_{10}$  dos intervalos de tensões;

$X_i$  =  $\log_{10}$  dos números de ciclos.

A variância do conjunto de corpos de prova é dada pela seguinte equação:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2} \quad (6)$$

Após estas considerações o diagrama S-N obtido por meio de resultados dos ensaios realizados nesta pesquisa é exibido na figura 46 e é comparado ao diagrama apresentado por Silva (2018) mostrado na figura 47.

A utilização da técnica de refusão TIG reduz a inclinação da curva S-N em aproximadamente  $8^\circ$  além de estabelecer sua posição em região superior a revelada na figura 47.

Figura 46 – Diagrama S-N GMAW TIG Dressing (refusão TIG).

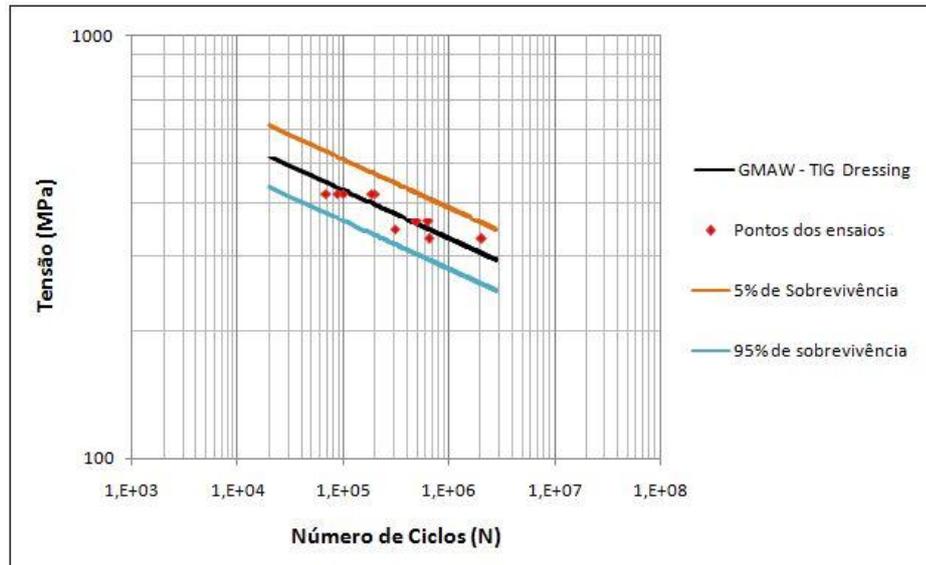
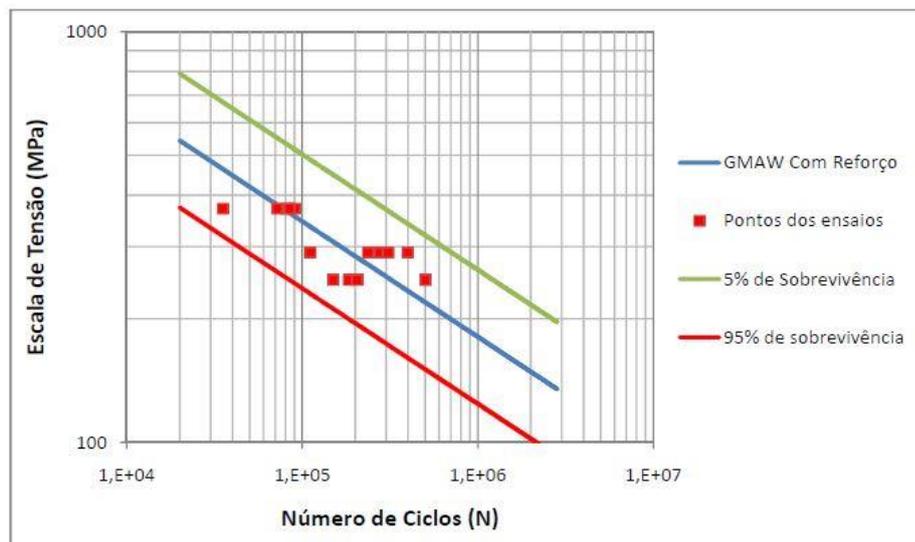


Figura 47 – Diagrama S-N GMAW com reforço



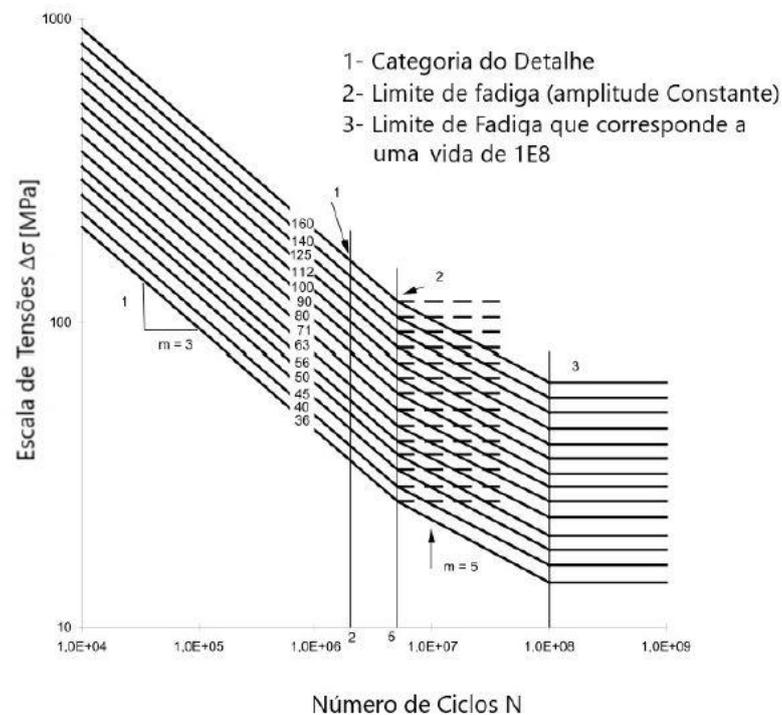
Fonte: Silva (2018).

Por meio das figuras acima, observa-se que a faixa de tensão  $\Delta\zeta$  relacionada à vida de dois milhões de ciclos, para o caso “GMAW original”, é de 148,6 MPa [trabalho de SILVA, M. S. (2018)]. Já no caso “GMAW com refusão TIG (TIG

*Dressing*)”, obtido nesta pesquisa, o valor da faixa de tensão subiu para 306,3 MPa para o mesmo número de ciclos.

O número de ciclos tomado como referência para o comparativo das respectivas faixas de tensão foi determinado tomando por base as informações contidas na norma Eurocode3 – seção 1.9 (1993), esta norma menciona que para uma taxa de sobrevivência igual ou superior a 95%, a figura de mérito (número da categoria do detalhe) é relacionada a  $2 \times 10^6$  ciclos. O diagrama S-N para aços estruturais é mostrado na figura 48 onde pode ser mais bem compreendido o que foi tratado neste parágrafo.

Figura 48 – Diagrama S-N para aços estruturais



Fonte: Adaptado Eurocode3 seção 1.9 (1993).

A tabela 11 aponta a relevante diferença nas faixas de tensão para as curvas de 5% e 95% de sobrevivência levando em consideração os diagramas S-N GMAW e GMAW - TIG Dressing.

Tabela 10 – Dados Comparativos de tensões para 5% e 95% de sobrevivência.

Número de ciclos	5% de sobrevivência		95% de sobrevivência	
	GMAW	GMAW - <i>TIG Dressing</i>	GMAW	GMAW - <i>TIG Dressing</i>
	Valores de tensão em MPa			
5 E+05	319,6	423,8	150,7	303,8
1 E+06	263,0	391,6	124,0	280,7
2 E+06	216,4	361,9	102,1	259,4
4 E+06	178,1	334,4	84,0	239,7

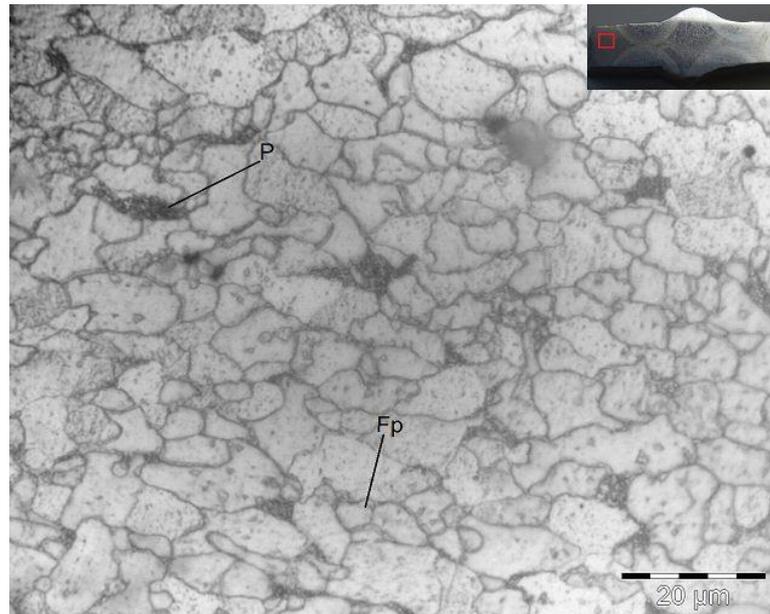
### 6.5. Modificação da microestrutura

Inicialmente, cogitava-se a hipótese da formação de martensita na região de refusão do processo de *TIG dressing*. Contudo, as imagens obtidas por micrografia mostraram apenas a existência de Ferrita Acicular (FA) e Ferrita Widmanstätten (FW) nesta região de refusão.

Uma vez que o metal base não apresenta FA e FW, o surgimento destas microestruturas é resultado do resfriamento da zona refundida dos processos utilizados. Cabe ressaltar que a Ferrita Acicular é conhecida por propiciar boa resistência mecânica e boa tenacidade à fratura, enquanto que a Ferrita de Widmanstätten usualmente apresenta valores de resistência mecânica baixa.

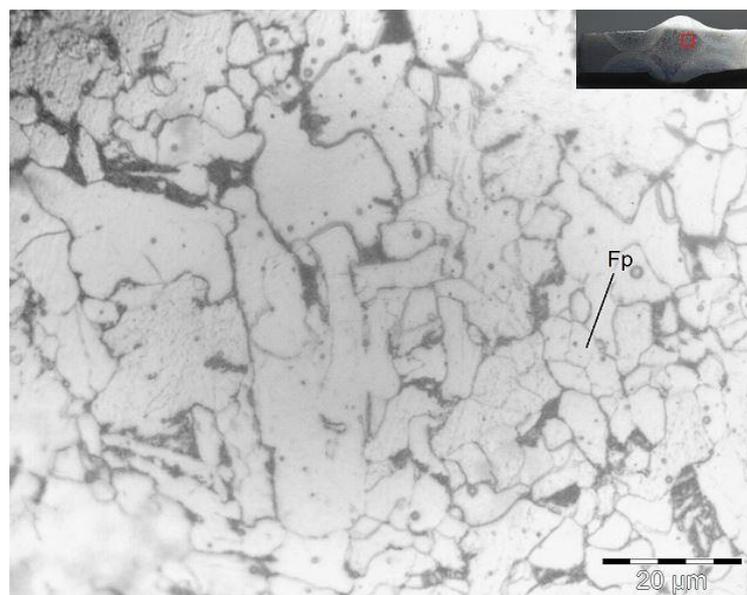
A figura 49 mostra a análise realizada no metal base, onde o mesmo apresenta ferrita poligonal (Fp) e perlita (P).

Figura 49 – Metal de base



O metal de solda exibido na figura 50 apresenta características microestruturais semelhantes ao metal de base apresentando ferrita poligonal (Fp) e perlita (P), porém com sítios onde a ferrita mostra-se em dimensões aparentemente maiores.

Figura 50 – Metal de solda.



As figuras 51 e 52 apresentam a microestrutura resultante do processo de melhoria *TIG Dressing* em duas posições diferentes e opostas. Sítios com Ferrita Acicular (Fa) e Ferrita de Widmanstätten (Fw) são indicados.

Figura 51 – Microestrutura pós *TIG Dressing* 1

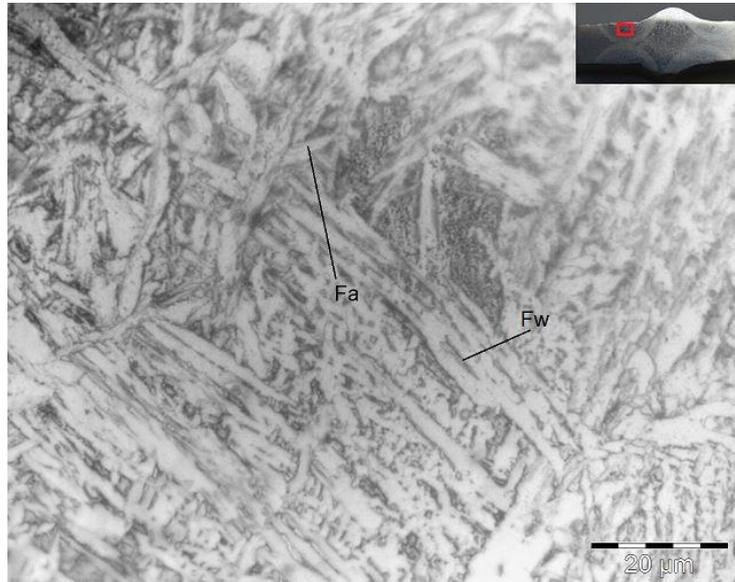
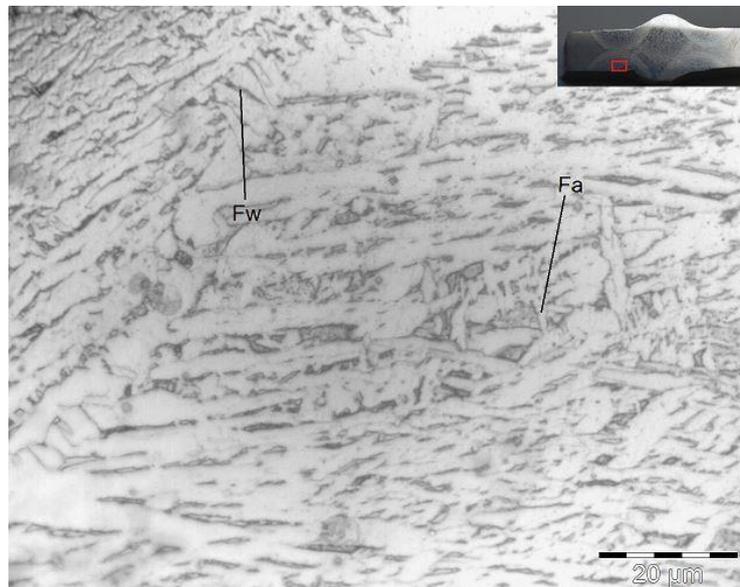


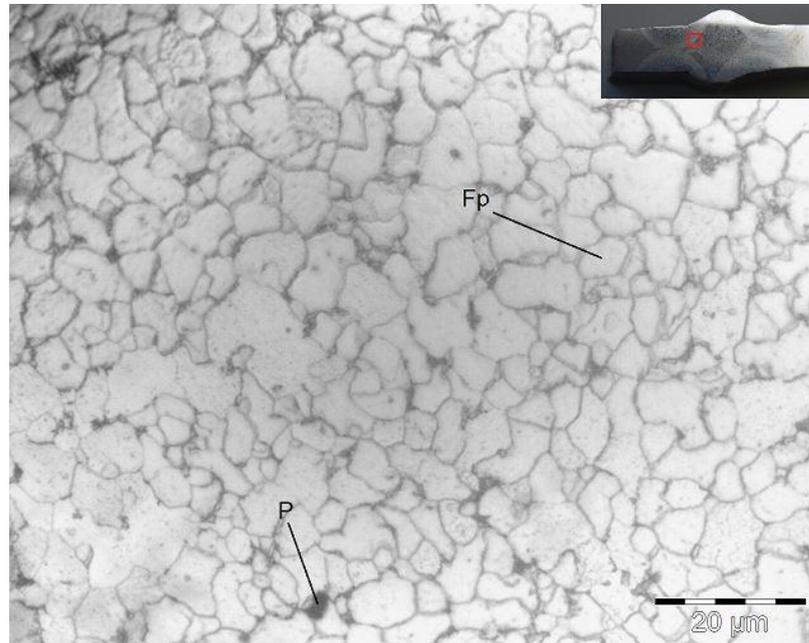
Figura 52 - Microestrutura pós *TIG Dressing* 2



A zona afetada pelo calor (ZAC) resultante do *TIG Dressing* é revelada na figura 53, nela pode-se observar a presença de ferrita poligonal (Fp) e perlita (P) por conta de ser uma região onde a temperatura durante o procedimento manteve-se

mais baixa diminuindo a taxa de resfriamento o que culminou com a não formação de ferrita acicular (Fa) e ferrita Widmanstätten (Fw) presentes na região refundida.

Figura 53 – ZAC TIG Dressing.



## 7. CONCLUSÃO

O processo de execução da técnica de refusão TIG (*TIG Dressing*) apresentou elevada sensibilidade a variações de parâmetros de processo. Porém, tão logo esta etapa foi concluída, observou-se que a realização do procedimento era razoavelmente simples. Por outro lado, o emprego dessa técnica em campo exige pessoal com bom nível de experiência e com treinamento focado à meta de obter suavização do efeito de entalhe no flanco do cordão.

A modificação satisfatória da vida em fadiga de espécimes submetidos ao tratamento de melhoria pós soldagem de refusão TIG torna esta técnica uma ótima alternativa para ampliar o tempo de vida em serviço de componentes expostos a fadiga, principalmente por seu equipamento básico (fonte de soldagem GTAW) estar presente não só em laboratórios, mas também em ambientes fabris de pequeno e grande porte.

O fator concentrador de tensão geométrico é reduzido pelo fato da modificação do entalhe devido à refusão dos materiais presentes à margem do cordão de solda, o que antes era um entalhe predominantemente agudo, agora é um entalhe de raio variável bem menos agressivo a forma do perfil da junta.

A modificação da microestrutura no entorno do cordão de solda fez com que essa região apresentasse maior dureza e resistência mecânica. Porém, uma relação direta de causa e efeito, em termos de vida em fadiga, não pode ser estabelecida. Se por um lado a atenuação do efeito de entalhe é um resultado claramente positivo propiciado pelo *TIG dressing*, o aumento da dureza merece investigação futura.

O conjunto de resultados obtidos indica que a técnica de *TIG dressing*, quando aplicada a juntas soldadas em aços estruturais, propicia importante incremento do desempenho em fadiga.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, A. J., HASHIMOTO T. M., PEREIRA, M. S., ANAZAWA, R. M. Formação de fase bainítica em aços de baixo carbono. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 25, n. 3, 175-181, 2006.
- ALBUQUERQUE M.; MACIEL T.; SANTOS M. CT-25 Efeito da técnica TIG Dressing Sobre o Comportamento à Fadiga de juntas Soldadas de tubulações marítimas - 2004.
- AWS D1.1/D1.1M:2010. Structural Welding Code – Steel.Pg 68, 105 e 107.
- ASTM E-739. Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data, 2013.
- ASTM A131/A131M - 4. Standard Specification for Structural Steel for Ships.Pg 4.
- BABU, S. S. The mechanism of acicular ferrite in weld deposits. Current Opinion in Solid State and Materials Science 8, 2004.
- BABU SS, BHADESHIA HKDH; Mechanism of the transition from bainite to acicular ferrite, 1991.
- BHADESHIA HKDH; Bainite in steels. 2nd Ed, 2001.
- BRACARENSE, A. Q. Processo de soldagem TIG – GTAW. Apostila do programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Belo Horizonte: UFMG, 2000.
- BRACARENSE, A. Q., MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. Soldagem – Fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2012.
- BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. Fadiga de Estruturas Soldadas - 1999.
- COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns . Editora Blucher 2008.
- EUROCODE 3 EN 1993.Design of steel structures: 1.9 –Fatigue.
- ES, S. V.; Effect of TIG-dressing on fatigue strength and weld toe geometry of butt welded connections in high strength steel - 2012.
- ES, S. H. J. V., KOLSTEIN, M. H., PIJPERS, R. J. M., BIJLAARD, F. S. K. TIG-dressing of high strength steel butt welded connections – Part 1: weld toe geometry and local hardness, 2013.
- FERRO, P., BERTO, F., BONOLLO, F., MONTANARI, R. Experimental and numerical analysis of TIG-dressing applied to a steel weldment. Procedia Structural Integrity, 2018.
- GURNEY, T. Cumulative damage of welded joints. Woodhead Publishing and Maney Publishing on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2006.
- HICKS, JOHN. Welded joint design. Elsevier, 1999.

HAAGENSEN, P. J.; MADDOX, S. J. Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures - [2006].

HASHIMOTO, M. M. B. Caracterização microestrutural de um aço baixo carbono e baixos teores de elementos de ligas com estrutura contendo ferrita acicular [dissertação de mestrado]. Guaratinguetá: UNESP, 2010.

KRAUSS, G. Microstructures, processing, and properties of steels. ASM International, Metals Handbook, 1990.

KUILIN, Y. Residual Stress Analysis and Fatigue Strength Assessment of Welded Joints With Ultrasonic Impact Treatment (UIT) - [2015].

MADDOX, S. J. Fatigue strength of welded structures. 2ª edição, 1991.

MILECH, F.B. Determinação de curvas de fadiga em uniões soldadas do aço inoxidável AISI 316L[dissertação de mestrado]. Rio Grande: FURG; 2015.

MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3. ed. BELO HORIZONTE: UFMG, 2009.

OKUMURA, T. TANIGUCHI C., Engenharia de Soldagem e Aplicações. LTC Editora S.A, Rio de Janeiro – RJ, 1982, p. 296-304.

PEDERSEN M.M., MOURITSEN O., HANSEN M. R., ANDERSEN J. G., WENDERBY J. Comparison of Post Weld Treatment of High Strength Steel Welded Joints in Medium Cycle Fatigue, 2010.

RAMALHO A. L., FERREIRA, J. A. M., BRANCO, C. A. G. M. Fatigue behaviour of T welded joints rehabilitated by tungsten inert gas and plasma dressing. Materials and Design, 2011.

RAVI, A. M., SIETSMA J., SANTOFIMIA, M. J. Bainite formation kinetics in steels and the dynamic nature of the autocatalytic nucleation process. Scripta Materialia, 2017.

RIBEIRO, A. C. N. Avaliação da soldagem do aço naval AH36 microligado soldado pelo processo arco submerso com um e dois arames. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SIMÕES, D. A. Entalhes melhorados e otimizados [dissertação de mestrado], Cap. 2. Rio de Janeiro: PUC, 2012.

SHIGLEY, J. Projeto de engenharia mecânica 7ª edição - 2005.

SILVA, M. S. Comparação da vida em fadiga de juntas soldadas pelos processos com proteção gasosa e arame tubular num aço estrutural microligado [Dissertação de mestrado]. Rio Grande: FURG; 2018.

SOUZA, E. R. Caracterizações microestruturais e avaliações das propriedades mecânicas das juntas em aço inoxidável AISI 301 L soldadas por MIG e submetidas ao reparo pelo processo TIG [dissertação de mestrado]. São Paulo: IPEN; 2012.

VILARINHO, L. O. As dimensões do arco elétrico. Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem – UFU. Uberlândia, 2009.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; de MELLO, F. D. H. Soldagem, Processos e Metalurgia. São Paulo, Edgar Blucher. 2010.