

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

Priscila Machado Amaro

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UMA JUNTA CRUCIFORME
COM USINAGEM NO FLANCO E NA FACE DO CORDÃO DE SOLDA**

Rio Grande

2019

PRISCILA MACHADO AMARO

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UMA JUNTA CRUCIFORME
COM USINAGEM NO FLANCO E NA FACE DO CORDÃO DE SOLDA**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica (PPMec)
da Universidade Federal do Rio Grande
(FURG) como parte dos requisitos
obrigatórios para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica.**

**Área de Concentração:
Engenharia de Fabricação**

**Orientador:
Prof. Dr. Eng. Mec. Kleber Eduardo Bianchi**

**Rio Grande
2019**

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a minha família, por todo o incentivo, apoio, compreensão e carinho ao longo da minha jornada acadêmica. Sem eles eu não teria chegado tão longe.

Não poderia deixar, nesse momento tão importante, de agradecer as pequenas ajudas que vieram durante esse trajeto, mas que juntas constituíram o todo que me auxiliou a chegar até o final, agradeço, portanto, aos técnicos do laboratório de usinagem, Cristiano Celente, pelas orientações na utilização dos equipamentos pertencentes ao laboratório e pelo esforço e empenho em propor soluções para os problemas enfrentados, e, em especial, ao técnico Bruno Soares Laner, o qual foi responsável pela execução do processo de retificação no flanco e na face dos cordões de solda.

À técnica do laboratório de soldagem, Thais Andrezza dos Passos, e ao responsável pelo laboratório Daniel Souza pelo auxílio e apoio.

Aos colegas de mestrado pelos conselhos e conhecimentos compartilhados, em especial ao colega Matheus Baldez.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPMEC) da Universidade Federal do Rio Grande pelos conhecimentos transmitidos.

Gostaria também de agradecer a minha companheira Camila Botelho Shuck, pelo carinho, paciência, compreensão e por permanecer ao meu lado.

À CAPES/CNPq pela bolsa de estudos que propiciou apoio financeiro durante a realização da presente pesquisa.

Finalmente, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Kleber Eduardo Bianchi, pelos ensinamentos, disponibilidade, apoio e incentivo prestados durante a realização do projeto, os quais foram de grande valia para a conclusão do mesmo. Também agradeço a sua preocupação e ajuda na obtenção dos recursos necessários para a execução da presente pesquisa.

RESUMO

O presente trabalho objetivou avaliar a resistência à fadiga de uniões soldadas cruciformes com e sem processo distinto de retificação aplicado aos cordões de solda, tais uniões foram confeccionadas com o aço ASTM A131 AH36, sendo as mesmas soldadas por processo a arco elétrico utilizando Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW) e proteção gasosa. Primeiramente foi realizado procedimento de soldagem para que fosse constatada a correta seleção dos parâmetros, tendo como base a norma AWS D1.1 (2010). A confecção das amostras para os ensaios de fadiga deu-se através da soldagem de seis amostras com comprimento maior e posterior corte destas em peças menores, de maneira que fosse proporcionado o tamanho adequado da seção transversal, tendo como restrição ao seu tamanho, a capacidade da máquina. No total foram submetidas aos ensaios de fadiga, 18 peças, sendo 8 sem processo de retificação, 6 com retificação no flanco do cordão (*toe grinding*) e 4 com retificação na face do cordão de solda. Tais processos de usinagem foram realizados de maneira manual, empregando lima rotativa. Durante a preparação das amostras finais para ensaio, foram constatados indícios relacionados a inclusão de escória e falta de penetração na raiz da união, tal fato influenciou negativamente os resultados finais, além disso, houve também desalinhamento axial e angular, os quais são responsáveis por aumentar a tensão nas regiões onde há entalhes. Os ensaios de fadiga foram realizados com carregamento repetido, tais ensaios mostraram a grande aleatoriedade dos resultados devido a existência ou não dos fatores citados, os quais, associados aos defeitos contidos na solda, como microtrincas, proporcionam vida inferior ao esperado. Como aguardado, as amostras submetidas à retificação apresentaram número de ciclos superior às amostras sem o processo. Por fim, o benefício alcançado, devido à realização dos processos de *toe grinding* e de retificação da face, pode ser constatado pela região de ruptura das amostras sem retificação, dentre as quais apenas uma não falhou no flanco do cordão.

Palavras chave: ASTM A131 Grau AH36, *Toe grinding*, Fadiga.

ABSTRACT

This work objectified to evaluate the fatigue resistance of cruciform welded joints with and without distinct process of grinding applied to welding fillets, these joints were made with the ASTM A131 AH36 steel and then the joints were welded by electric arc process using Flux Cored Arc Welding. Firstly was made a welding procedure specification to verify the correct choice of welding parameters, it was based on AWS D1.1 Code (2010). The manufacture of specimens for the tests were made from six specimens with longer length that were cut to produce smaller length specimens, in a way that it was provided the correct size of cross section because this is a restriction of the test machine. In total were tested 18 specimens: 8 as welded, 6 with toe grinding and 4 with profile improvement. The grinding processes were made manually with burr grinding. During the preparation of final specimens to the test, indications of slag inclusion and incomplete penetration were found, it influenced the result, besides, there was misalignment axial and angular that are responsible for increasing the stress in the region where there is notch effect. The fatigue tests were made with repeated loading that showed the great randomness of results because of the misalignment and the weld inclusions. As expected, the grinded specimens showed life bigger than as welded specimens. Finally, the benefit achieved, due to the toe grinding and profile improvement processes can be verified by the region of rupture of the specimens as welded, among which only one did not fracture in the toe region.

Keywords: ASTM A131 AH36, Toe grinding, Fatigue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplo de rupturas em estruturas soldadas ocorridas por volta de 1940: (a) ruptura de um navio e (b) ruptura em ponte na Bélgica.....	10
Figura 2 – (a) Classificação de 242 casos de falhas de acordo com a região onde ocorreram (b) Causas das 242 falhas observadas.....	11
Figura 3 - Defeitos presentes em um cordão de solda.....	13
Figura 4 – Parâmetros geométricos do flanco de filetes e cordões de solda.....	14
Figura 5 - Perfis de soldas de filete: (a) Perfil convexo; (b) Perfil côncavo.....	14
Figura 6 - Uniões adequadas para receber tratamento: (a) Junta de topo com carregamento transversal ao cordão; (b) Junta em T; (c) Junta cruciforme carregada transversalmente; (d) Placa com nervura e carregamento na placa principal.....	15
Figura 7 – Resultado da aplicação das técnicas de aprimoramento da vida em fadiga: (a) Toe grinding e (b) Profile Improvement.....	16
Figura 8 – Região de ruptura de uniões soldadas submetidas ao ensaio de fadiga: (a) amostra com toe grinding; (b) amostra sem toe grinding.....	18
Figura 9 – Perfis do cordão de solda analisado: (a) perfil côncavo; (b) perfil convexo.....	19
Figura 10 – Máquina e ferramenta para a realização da retificação no cordão de solda.....	20
Figura 11 – Organograma da metodologia empregada.....	21
Figura 12 - Microestrutura do aço ASTM A131 AH36 empregado no trabalho. (Ampliação 50x)	23
Figura 13 – Formato do corpo de prova para ensaio de tração. (Dimensões em mm)	23
Figura 14 – Configuração do detalhe soldado: (a) Localização da solda; (b) Direção de aplicação da carga.....	25
Figura 15 – Dimensões do detalhe considerado, em milímetros.....	27
Figura 16 – Configuração final do chanfro, dimensões em milímetros.....	28
Figura 17 – Disposição das amostras para corte na chapa de teste, dimensões em mm.....	29
Figura 18 – Amostra para dobramento: (a) Vista de topo; (b) Vista lateral.....	29
Figura 19 – Amostra para o teste de tração.....	29
Figura 20 – Máquina INSTRON EMIC 23 - 300 com dispositivo de dobramento instalado...30	30
Figura 21 – Painel soldado com detalhe cruciforme e linhas de corte dos corpos de prova....31	31
Figura 22 – Dimensões do painel para retirada das amostras (milímetros).....	31
Figura 23 – Robô HP20D.....	32
Figura 24 – Parâmetros analisados nos cordões de solda.....	32

Figura 25– Equipamentos empregados no processo de toe grinding: a) ferramenta e b) máquina manual.....	33
Figura 26 – Geometria obtida nas margens dos cordões de solda.....	33
Figura 27 – Geometria obtida na face dos cordões de solda.....	34
Figura 28 – Máquina destinada aos ensaios de fadiga.....	35
Figura 29 – Diagrama S-N.....	37
Figura 30 – Chapas fixadas para a soldagem de topo.....	39
Figura 31 – Amostras prontas para os testes de qualificação: a) Amostra para tração e b) Amostras para dobramento.....	40
Figura 32 – Macrografia da chapa de teste.....	41
Figura 33 – Ensaio de dobramento em execução.....	42
Figura 34 – Inclusões presentes nas amostras de dobramento: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3 e d) Amostra 4.....	42
Figura 35 – Configuração do chanfro: a) Medida do nariz igual a 3 mm; b) Medida do ângulo de bisel igual a 45°.....	44
Figura 36 – Montagem e fixação por pontos das placas da junta cruciforme.....	44
Figura 37 – Peças posicionadas no suporte: a) Vista lateral; b) Vista frontal.....	45
Figura 38 – Cordão de solda feito na chapa de teste.....	45
Figura 39 – Macrografia da junta cruciforme final.....	47
Figura 40 - Amostra com inclinação e excentricidade.....	47
Figura 41 – Processo de toe grinding sendo realizado.....	49
Figura 42 – Aferição dos parâmetros geométricos do toe grinding: a) raio e b) profundidade.....	49
Figura 43 – Geometria resultante do toe grinding.....	50
Figura 44 – Procedimento de usinagem na face do cordão de solda.....	50
Figura 45 – Medição do raio do perfil com gabarito.....	51
Figura 46 – Geometria resultante da usinagem na face da solda.....	51
Figura 47 – Peças submetidas ao ensaio com líquido penetrante: a) Peça com o líquido penetrante; b) Peça com o pó revelador.....	52
Figura 48 – Gráfico S-N contendo todos os casos ensaiados.....	53
Figura 49 - Gráfico S-N contendo todos os casos ensaiados com suas tensões corrigidas.....	55
Figura 50 – Macrografia da amostra 3S3 após ensaio de fadiga.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do material.	22
Tabela 2 – Quantidade mínima de amostras e porcentagem de replicação.....	24
Tabela 3 - Quantidade total de amostras.....	25
Tabela 4 – Enquadramento da categoria nas normas Eurocode E3 (2003), AWS D1.1 (2010) e IIW(2016).....	26
Tabela 5 – Informações referentes às dimensões constantes na Figura 20.....	29
Tabela 6 – Média dos valores do ângulo de reforço e da perna das amostras não submetidas ao processo de retificação.....	32
Tabela 7 – Valores estimados das cargas de ensaio de fadiga.....	35
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração.....	38
Tabela 9 – Variáveis utilizadas no procedimento de soldagem.....	39
Tabela 10 – Resultados ensaio de tração das amostras soldadas.....	41
Tabela 11 – Dimensões (mm) das inclusões presentes nas amostras de dobramento.....	42
Tabela 12 – Dimensões finais da largura das amostras.....	46
Tabela 13 – Valores de excentricidade e desalinhamento angular das amostras ensaiadas.....	48
Tabela 14 – Dados referentes aos ensaios de fadiga.....	52
Tabela 15 - Fator de amplificação da tensão da amostras ensaiadas.....	54
Tabela 16 – Superfície de ruptura das amostras sem retificação.....	57
Tabela 17 – Superfície de ruptura das amostras com retificação no flanco do cordão de solda.....	59
Tabela 18 – Superfícies de ruptura das amostras submetidas à retificação na face da solda....	61

Sumário

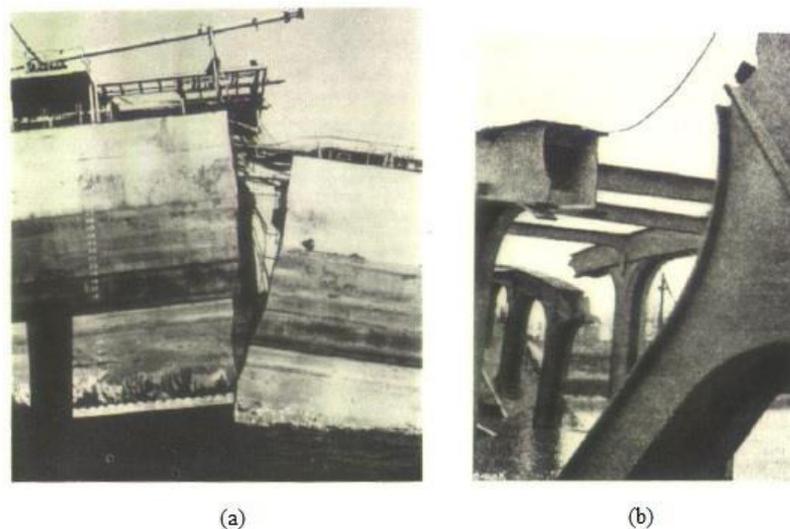
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1 Usinagem do flanco e da face do cordão de solda	16
3 MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1 Caracterizações do Material	21
3.1.1 Avaliação da Composição Química do Material	22
3.1.2 Micrografia	22
3.1.3 Teste de Tração do Metal Base	23
3.2 Definição da Quantidade de Amostras nos Diagramas de Fadiga	24
3.3 Definição do Detalhe e Dimensão	25
3.3.1 Definição da Categoria do Detalhe	25
3.3.2 Definição das Dimensões da União	25
3.4 Definição do Procedimento de Soldagem	27
3.4.1 Especificação do Procedimento de Soldagem	27
3.4.2 Qualificação do Procedimento de Soldagem	28
3.5 Preparação e Soldagem das Amostras para o Ensaio	30
3.5.1 Preparação	30
3.5.2 Soldagem	31
3.6 Análise dos Parâmetros dos Cordões de Solda sem Retificação	32
3.7 Realização do toe grinding e do profile improvement	33
3.7.1 <i>Toe grinding</i>	33
3.7.2 <i>Profile Improvement</i>	33
3.7.3 Realização do Ensaio Não Destrutivo	34
3.8 Ensaio de Fadiga	34
3.9 Determinação do Diagrama S-N	36
4 RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES	38
4.1 Ensaio de Tração	38
4.2 Definição do Procedimento de Soldagem	38
4.2.1 Especificação do Procedimento de Soldagem	38

4.2.2 Qualificação do Procedimento de Soldagem.....	40
4.3 Preparação e Soldagem das Juntas Cruciformes.....	43
4.3.1 Preparação	43
4.3.2 Soldagem.....	44
4.4 Resultado do Corte das Amostras	46
4.5 Realização do Processo de Retificação	48
4.5.1 No Flanco da Solda	48
4.5.2 Na Face da Solda.....	50
4.5.3 Ensaio Não Destrutivo na Região de Usinagem	51
4.6 Ensaio de Fadiga	52
4.7 Determinação do Diagrama S-N.....	53
4.8 Região de Ruptura.....	55
4.8.1 Região de Ruptura das Peças com Cordão Original.....	55
4.8.2 Região de Ruptura das Peças com Usinagem no Flanco.....	58
4.8.3 Região de Ruptura das Peças com Usinagem na Face	60
5 CONCLUSÃO.....	62
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Segundo Okumura e Taniguchi (1982), a partir da primeira metade do século XX os processos de soldagem passaram a ser empregados de forma intensiva na construção de estruturas, máquinas e equipamentos de engenharia. Porém, já naquele tempo começaram a surgir falhas estruturais importantes ou mesmo catastróficas, após períodos de operação relativamente curtos. A Figura 1 mostra dois exemplos de estruturas soldadas de grande porte, um navio e uma ponte, que sofreram colapso a partir de juntas soldadas.

Figura 1 - Exemplo de rupturas em estruturas soldadas ocorridas por volta de 1940:
(a) ruptura de um navio e (b) ruptura em ponte na Bélgica.

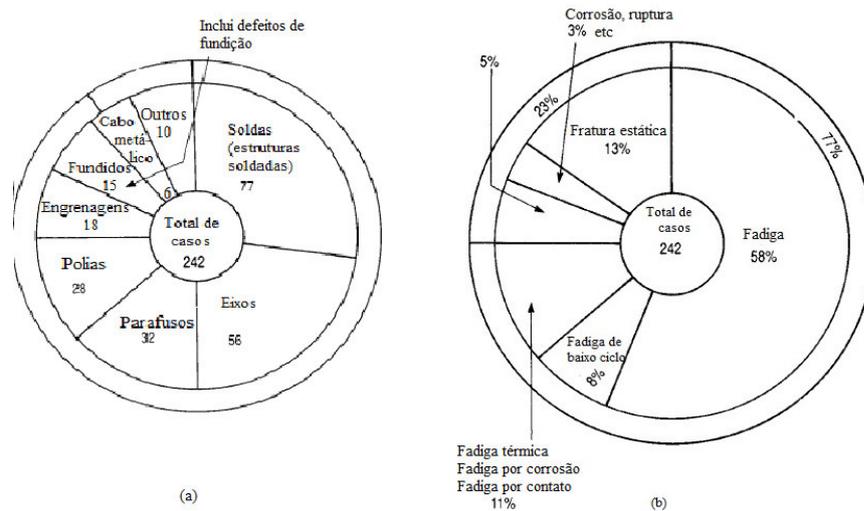


Fonte: Okumura et al. (1982)

Mesmo com todo avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, o colapso de componentes soldados ainda representa um modo de falha importante. A Figura 2 mostra o resultado de um estudo relativamente recente, no qual foram classificados 242 casos de falhas em máquinas e componentes mecânicos. Em números absolutos, as regiões de solda tiveram primazia em relação aos demais sítios de falha. Por outro lado, no que diz respeito ao modo de falha, mais de 70% dos casos estavam relacionados ao dano acumulado por fadiga. Segundo Nishida (1992) e Hughes (2009), tal fenômeno está relacionado aos inúmeros defeitos e descontinuidades que naturalmente surgem durante o processo de soldagem: trincas, porosidades, falta de fusão, inclusões e mordeduras. Tais defeitos podem ser causados pela presença de hidrogênio, perda de gás de proteção, parâmetros incorretos de soldagem, remoção inadequada da escória e velocidade de soldagem excessiva. Já o efeito de tais descontinuidades é a concentração de tensões na região em que se localizam, quando da

aplicação das cargas de trabalho. Por fim, a este efeito também se superpõem tensões residuais de elevada magnitude, causadas pela contração do metal de solda e do metal de base durante o processo de resfriamento (TSAI e KIM, 2005).

Figura 2 – (a) Classificação de 242 casos de falhas de acordo com a região onde ocorreram
(b) Causas das 242 falhas observadas



Fonte: Nishida (1992)

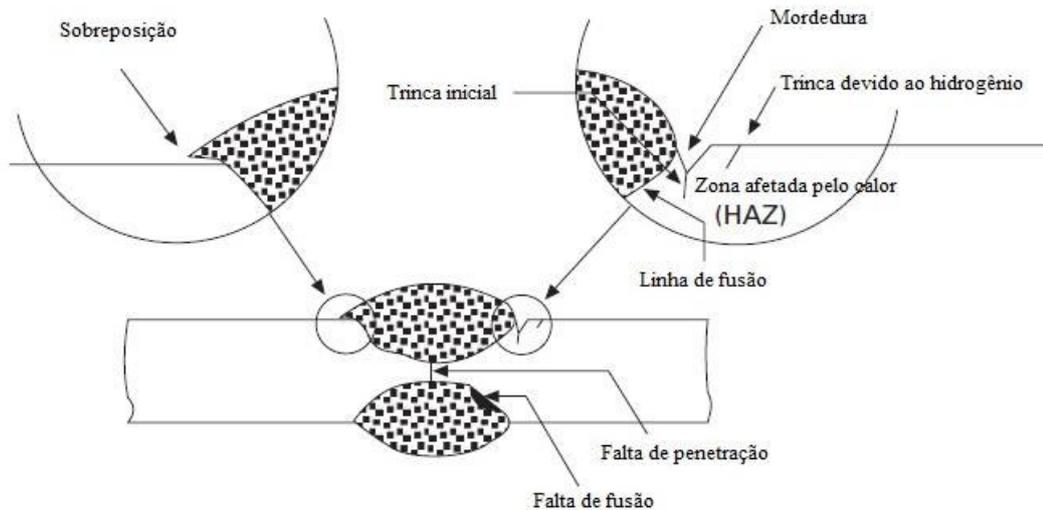
Cabe observar a diferença existente entre tensões térmicas e tensões residuais, que por vezes são apresentadas como sinônimos. Mishchenko et al. (2018) propõem que tensões térmicas sejam entendidas como aquelas geradas durante os ciclos de aquecimento e resfriamento na soldagem, resultantes da dilatação-contração e de transformações metalúrgicas. Já as tensões residuais advêm de tensões térmicas não aliviadas, ou seja, que ficaram retidas na estrutura após o resfriamento.

Nesse contexto, Kirkhope et al. (1996) resumem os principais mecanismos que levam à perda de resistência à fadiga em uniões soldadas: *i*) a presença de defeitos e descontinuidades, pontos propícios para o início do processo de falha, *ii*) o efeito de entalhe associado ao flanco da solda ou à superfície do cordão e *iii*) as tensões residuais de tração. Na Figura 3 podem ser observados, no cordão e região adjacente, os defeitos que mais comumente desencadeiam os fenômenos de fadiga e de fratura numa junta soldada.

A remoção desses defeitos é naturalmente benéfica para o aumento da resistência à fadiga da união, porém, nem sempre isso é viável ou mesmo factível. Diante dos problemas citados, Kirkhope et al. (1996) e Haagensen (2011) destacam algumas atitudes de projeto que propiciam um desempenho em fadiga aceitável nos detalhes estruturais soldados: *i*) sempre que possível, optar por uma configuração que ofereça melhor resistência (uniões de topo em

detrimento de uniões sobrepostas, por exemplo), *ii*) otimizar os procedimentos de soldagem para obter menor quantidade de defeitos, bem como baixo nível de tensões residuais e *iii*) sempre que possível, efetuar tratamento térmico para alívio de tensões ou prescrever procedimentos pós-soldagem em regiões específicas dos cordões.

Figura 3 - Defeitos presentes em um cordão de solda

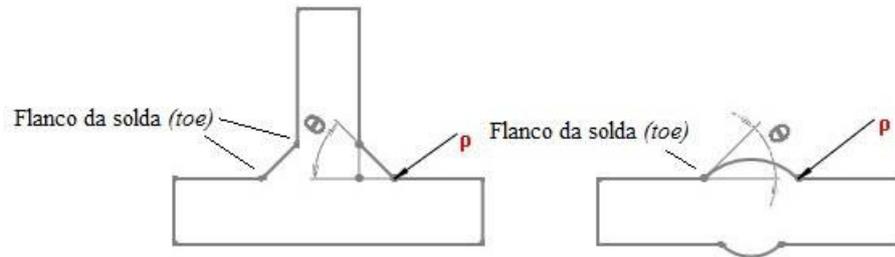


Fonte: Haagensen (2011)

Segundo Kirkhope et al. (1996), caso seja necessário elevar a resistência à fadiga da junta, há um conjunto de técnicas voltado à melhoria da geometria do cordão de solda (*profile improvement*) que é mais eficaz do que o tratamento térmico. Dentre tais procedimentos há aqueles voltados à suavização do flanco do cordão, ponto de encontro entre os metais de solda e de base. Como resultado, há atenuação do efeito geométrico de entalhe associado à região (AWS 2010; KIRKHOPE et al. 1996, BRANCO et al. 1999, HUGHES 2009). A Figura 4 mostra os parâmetros geométricos que caracterizam o fator de entalhe do cordão ou filete de solda: o raio do flanco (ρ) e o ângulo do reforço (θ).

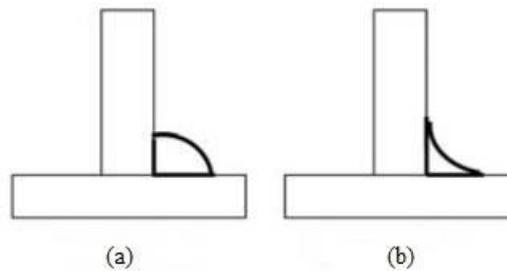
As técnicas de suavização do flanco do cordão incluem a usinagem (*toe grinding*), a qual pode ser efetuada com disco abrasivo (*disc grinding*) ou lima (*burr grinding*), bem como a refusão por processos plasma ou TIG (*plasma dressing* e *TIG dressing*). Um segundo grupo de técnicas tem por objetivo gerar tensões residuais de compressão (ou atenuar as tensões trativas), propiciando adicionalmente certa suavização da geometria. Tal grupo de técnicas inclui o jateamento de esferas (*shot peening*), o martelamento convencional (*hammer peening*) e o martelamento ultrassônico (*ultrasonic impact peening*).

Figura 4 – Parâmetros geométricos do flanco de filetes e cordões de solda.



Outro procedimento por vezes empregado é o faceamento dos filetes para obtenção de um perfil côncavo, tendo em vista que tal perfil propicia um fluxo de forças mais suave e uma atenuação do efeito de entalhe no flanco do cordão. Observa-se, por meio da Figura 5, que o ângulo do reforço é mais favorável em relação ao perfil convexo.

Figura 5 - Perfis de soldas de filete: (a) Perfil convexo; (b) Perfil côncavo.



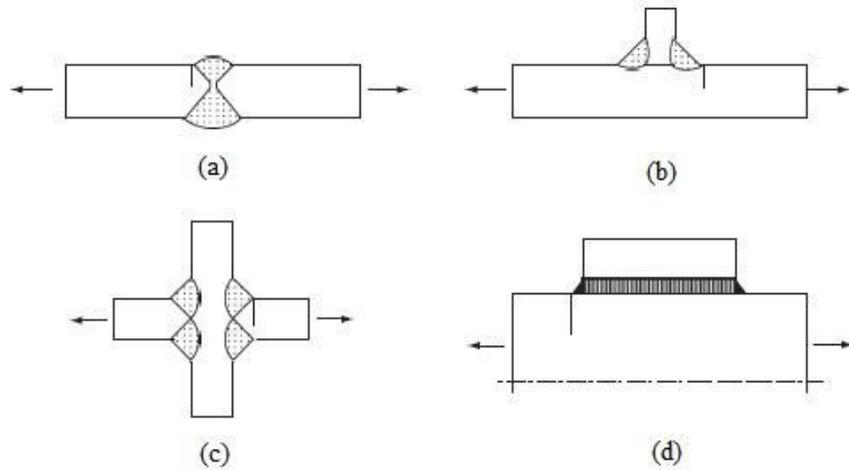
Fonte: Hughes (2009).

Por outro lado, Haagensen et al. (2013) preconizam que a aplicação de qualquer desses métodos deve ser criteriosamente avaliada, tendo em vista que, dependendo do tipo e das características da união, sua aplicação é inócua. A Figura 6 apresenta um elenco de detalhes estruturais passíveis de tratamento pós-soldagem. Cabe acrescentar que as juntas com penetração parcial apresentam, além do flanco, um segundo sítio para nucleação de trincas, na raiz (KIRKHOPE, 1996).

Devido ao significativo incremento do desempenho em fadiga propiciado pelos procedimentos pós-soldagem descritos, faz-se necessário quantificar tais ganhos, no sentido de municiar o projetista de uniões soldadas com parâmetros de resistência confiáveis.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em juntas cruciformes sujeitas aos processos de usinagem do flanco e da face dos filetes (*toe grinding* e *profile improvement*).

Figura 67 - Uniões adequadas para receber tratamento: (a) Junta de topo com carregamento transversal ao cordão; (b) Junta em T; (c) Junta cruciforme carregada transversalmente; (d) Placa com nervura e carregamento na placa principal.



Fonte: Haagensen et al. (2013).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho é analisar e comparar os resultados de resistência à fadiga, obtidos por meio de ensaios de uniões soldadas cruciformes carregadas transversalmente, com e sem usinagem, tanto do flanco (*toe grinding*) como da face do cordão (*profile improvement*).

1.1.2 Objetivos Específicos

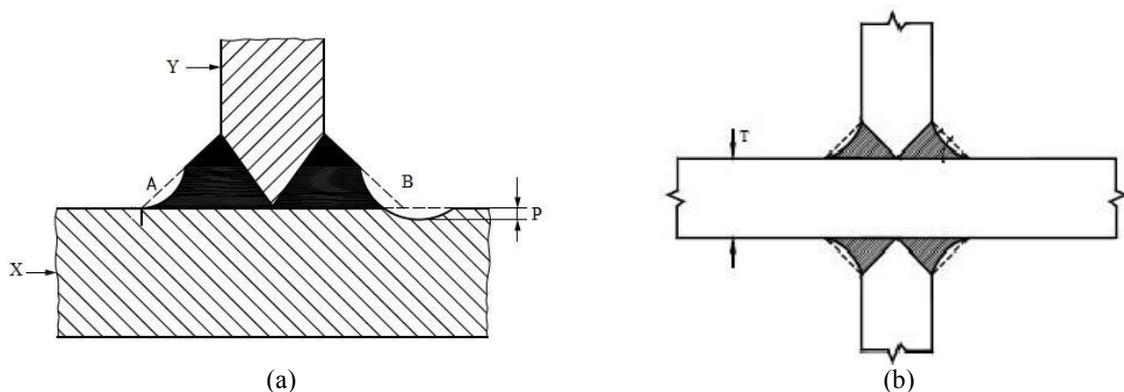
- Caracterização do material a ser utilizado
- Elaboração do procedimento de soldagem a ser utilizado
- Preparação e soldagem das peças
- Realização do processo de *grinding* no pé e na face do cordão de solda (*toe grinding* e *profile improvement*);
- Realização dos ensaios de fadiga;
- Discussão de resultados e conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Usinagem do flanco e da face do cordão de solda

As técnicas de usinagem do flanco do cordão (*toe grinding*) e da face da solda (*profile improvement*) são propostas pelas normas AWS D1.1 (2010), BS 7608 (2014) e DNV RP C203 (2011) para incremento da resistência à fadiga de uniões soldadas. A forma final dos cordões ou filetes, para os dois procedimentos, pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 – Resultado da aplicação das técnicas de aprimoramento da vida em fadiga:
(a) *Toe grinding* e (b) *Profile Improvement*.



Fonte: (a) Adaptado de BS 7608 (2014); (b) Adaptado de DNV (2011).

A Figura 7a apresenta duas formas de ranhura comumente obtidas no *toe grinding*. A ranhura A é claramente inadequada, pelo fato de não eliminar as microtrincas presentes no flanco, anteriormente mostradas na Figura 3. Já quando as duas técnicas são comparadas, percebe-se que ambas têm por resultado a redução do efeito de entalhe. Porém, a usinagem da face não promove a remoção das microtrincas. Por esse motivo, Haagenen (2011) enfatiza que a aplicação isolada do *profile improvement* usualmente não proporciona notável incremento da vida em fadiga, porém, quando ambos os procedimentos são empregados conjuntamente, o resultado é bastante significativo.

No que diz respeito ao *toe grinding*, há importantes considerações quanto à aplicabilidade e à execução do procedimento. Primeiramente, como mostrado na Figura 7a, a ranhura deve ser disposta perpendicularmente à direção de atuação da carga (representada na figura pela direção X). Além disso, a ranhura deve apresentar profundidade P no intervalo de 0,8 a 1 mm abaixo da superfície da chapa. Já quando um método eficaz de inspeção não destrutiva permite a medição das trincas, então é recomendado que a ranhura apresente profundidade de 0,5 a 0,8 mm além do maior comprimento de trinca. A questão da

profundidade de ranhura foi tema da pesquisa realizada por Ye e Moan (2008), na qual foram analisadas juntas cruciformes em 13 corpos de prova com o *toe grinding* e 18 sem, fabricados em alumínio. Observou-se que a profundidade obtida no processo tem grande influência sobre o desempenho da união soldada, pois a amostra que apresentou menor vida em fadiga, quando comparada com as de maior profundidade, foi aquela com menor profundidade de retificação: 0,2 mm. Segundo os autores, os dados no gráfico S-N apresentaram grande dispersão, motivada pelas diferentes profundidades alcançadas, de 0,2 a 1,6 mm. Por outro lado a remoção excessiva pode levar a um aumento das tensões na seção que contém a ranhura, principalmente no caso de chapas finas.

Como já mencionado, o raio do flanco no cordão de solda influencia diretamente no fator de concentração de tensões na região. No estudo realizado por Baptista et al. (2008), o processo de *toe grinding* foi realizado em uniões como a da Figura 6b, soldadas pelo processo MAG, sendo um grupo de amostras feitas de aço inoxidável duplex e o outro de aço inoxidável austenítico. O raio do flanco resultante da realização do *toe grinding*, quando comparado ao existente nas amostras de mesma família de material não submetidas ao tratamento, apresentou aumento igual a 239% para o aço duplex e aumento igual a 73% para o aço Austenítico. Em análise feita por elementos finitos, o fator de concentração de tensões do aço inoxidável austenítico apresentou redução de 14% e, no aço duplex, 28%. O ganho em resistência à fadiga reportado pelos autores foi de 1,69 para o aço duplex e de 1,64 para o aço austenítico, para 10^7 ciclos. Os valores de ganhos citados foram obtidos como resultado da Fórmula 1.

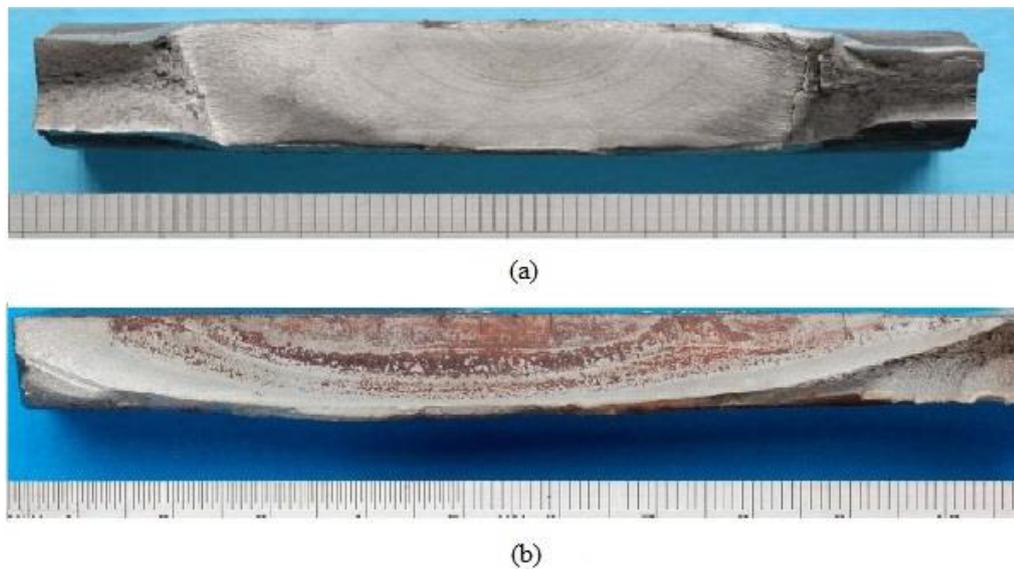
$$\frac{\Delta\sigma_{\text{com } toe \text{ grinding}}}{\Delta\sigma_{\text{sem } toe \text{ grinding}}} = \text{ganho} \quad (1)$$

Na qual: $\Delta\sigma$: *intervalo de tensão* para vida igual a 10^7 .

Já em pesquisa realizada por Zhang e Maddox (2009), uniões cruciformes foram submetidas ao processo de *toe grinding*, tendo sido empregada uma ferramenta com raio de 5 mm para obter uma ranhura de 0,8 mm de profundidade. Os resultados obtidos foram superiores aos alcançados por uniões da mesma classe, mas sem o *grinding*, reportados em outras literaturas. A resistência à fadiga teve incremento de aproximadamente 4,6 vezes. O mesmo estudo mostrou que, mesmo com a aplicação da usinagem do flanco do cordão, trincas podem se formar a partir de defeitos na região citada e que o beneficiamento introduzido pelo

grinding pode estar na redução do fator de concentração de tensão e na redução da taxa de crescimento da trinca. A Figura 8 mostra as superfícies de fratura de corpos de prova com e sem *toe grinding*. O corpo de prova com *grinding* mostrado na imagem (a) sofreu uma ruptura clássica, resultado da progressão de, aparentemente, uma única trinca. Já a figura (b) mostra o caso de uma superfície de fratura de uma peça que não sofreu *grinding*, na qual várias trincas de superfície se propagaram até formarem uma única frente de trinca de maior proporção.

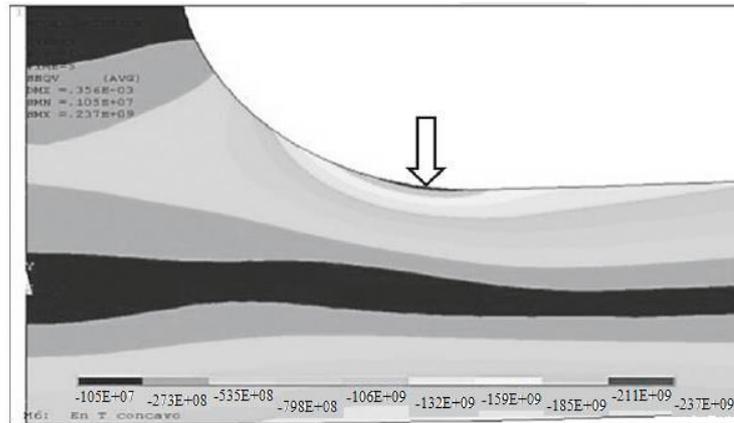
Figura 8 – Região de ruptura de uniões soldadas submetidas ao ensaio de fadiga:
(a) amostra com *toe grinding*; (b) amostra sem *toe grinding*.



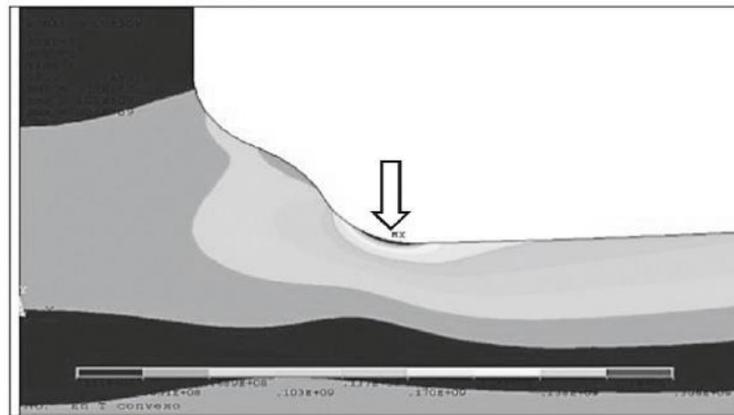
Fonte: Zhang e Maddox (2009)

No que diz respeito à usinagem da face do cordão (*profile improvement*), o estudo realizado por La Peña e Ríos (2014) compara os perfis côncavo, convexo e reto de uma junta em T, por meio de modelagem por Elementos Finitos no software ANSYS. Os resultados mostraram que a concentração de tensão no pé da solda é mais acentuada no perfil convexo, resultando no aumento da vida em fadiga do perfil côncavo igual a 23,5% em relação ao perfil convexo. Em ensaio de fadiga realizado para comprovação do modelo em Elementos Finitos, o perfil côncavo atingiu 20500 ciclos e o perfil convexo, 16600. Na Figura 9 podem ser observados os perfis considerados.

Figura 9 – Perfis do cordão de solda analisado: (a) perfil côncavo; (b) perfil convexo.



(a)



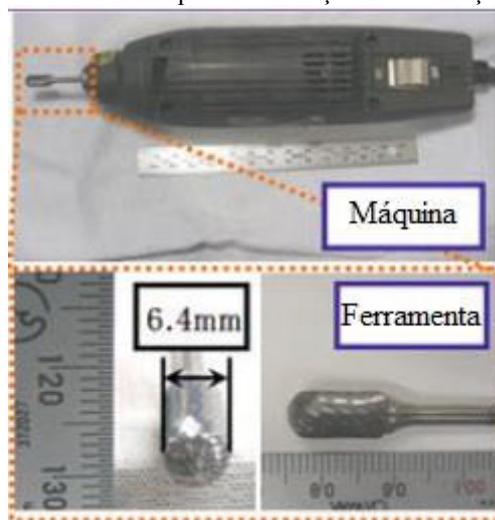
(b)

Fonte: La Peña e Ríos (2014)

Também foram testadas quatro amostras soldadas pelo processo a arco elétrico utilizando eletrodo revestido, produzindo perfis retos, convexos e intermediários, mostrando conformidade com os resultados modelados. Como esperado, o perfil côncavo apresentou a melhor resistência à fadiga, levando à conclusão de que a realização de uma operação pós-soldagem na face do perfil de solda pode aumentar sua resistência ao carregamento dinâmico. A mesma conclusão foi obtida no trabalho de Mashiri et al. (2001), voltado à análise do perfil produzido por processos TIG e MIG em uniões tubulares cruciformes. O cordão de solda produzido pelo processo TIG apresentou perfil côncavo enquanto o processo MIG gerou perfil convexo. A vida em fadiga do perfil côncavo alcançou valor 1,4 vezes superior ao obtido pelo processo MIG. Por fim, Caccese et al. (2006) mostraram que processos especiais de soldagem podem ser utilizados para melhorar o controle da geometria do cordão de solda, como por exemplo, um procedimento híbrido utilizando laser e soldagem a arco elétrico com gás de proteção em uniões cruciformes. Tal procedimento foi o que apresentou perfil próximo ao côncavo, o que fez com que apresentasse menor concentração de tensões. Tais melhorias

obtidas apenas pelo emprego de diferentes processos de soldagem ou pelo controle dos mesmos para a obtenção de perfis de solda com transições mais suaves, dispensam o emprego de processos pós-soldagem. As informações acerca do processo de retificação utilizado para usinar a face do cordão de solda são escassas, mas a mesma ferramenta que é utilizada para realizar o processo de *toe grinding*, também pode ser utilizada para tornar o perfil de solda côncavo. Na Figura 10 pode ser analisado o equipamento utilizado por Tai e Miki (2012) para realizar o processo de *toe grinding*.

Figura 10 – Máquina e ferramenta para a realização da retificação no cordão de solda

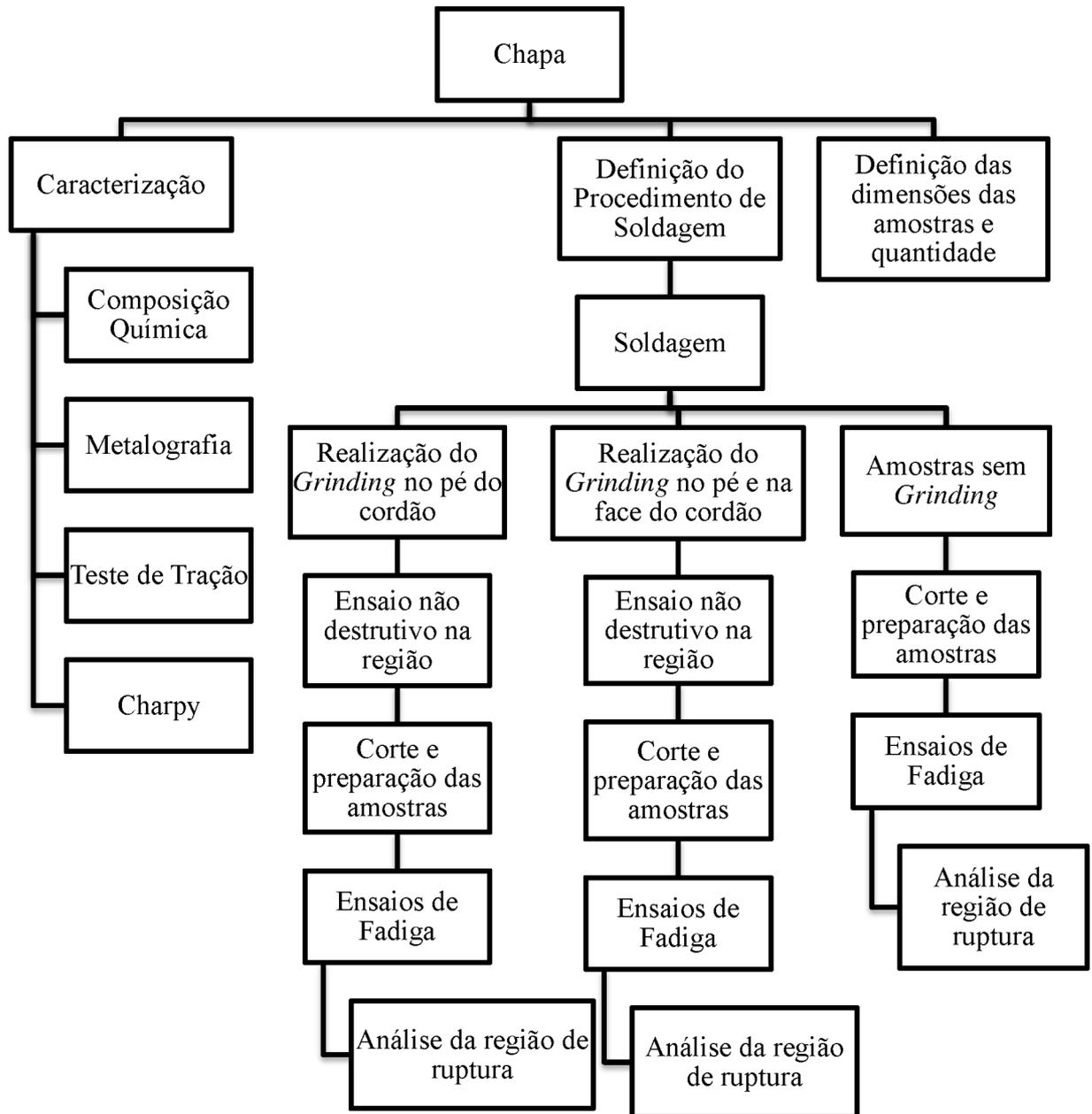


Fonte: Tai e Miki (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades ligadas à parte experimental foram realizadas no Laboratório do Grupo de Estudos em Fabricação e Materiais (GEFMat) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) e estão estruturadas no organograma da Figura 11.

Figura 11 – Organograma da metodologia empregada



Fonte: Autora

3.1 Caracterizações do Material

O material foi caracterizado por meio de ensaios de espectrometria e de tração. Também foi realizada metalografia para observar sua microestrutura. Os testes citados foram realizados para posterior enquadramento do aço na norma ASTM A131.

3.1.1 Avaliação da Composição Química do Material

A composição química foi obtida em espectrômetro de emissão óptica, tendo sido realizadas três medições. O resultado pode ser observado na Tabela 1, cuja coluna “Norma” apresenta os limites para cada elemento, segundo ASTM A131 (2013), ao passo que a coluna “Amostra” apresenta a média das três medições realizadas. Observa-se que a quase totalidade dos limites é respeitada, com exceção do vanádio. Porém, em nota apresentada pela referida norma, o alumínio pode ser utilizado em conjunto com o nióbio ou com o próprio vanádio para atuar como refinador de grão. Portanto, pela quantidade de nióbio apresentada, chega-se à conclusão que este elemento foi utilizado em conjunto com o alumínio. Portanto, a porcentagem a ser respeitada é a que faz referência ao nióbio e ao alumínio, ou seja, mínimo de 0,02% e 0,015%, respectivamente. Portanto, o material em questão pode ser enquadrado como aço ASTM A131 grau AH36.

Tabela 1 – Composição química do material.

Elemento	Norma (%)	Amostra (%)
Carbono (max)	0,18	0,09
Manganês	0,90 - 1,60	1,44
Silício	0,10 - 0,50	0,29
Fósforo (max)	0,035	0,007
Enxofre (max)	0,035	0,011
Al (min)	0,015	0,036
Nióbio	0,02 - 0,05	0,031
Vanádio	0,05 - 0,1	<0,001
Titânio (max)	0,02	0,014
Cobre (max)	0,35	0,012
Cromo (max)	0,2	0,0093
Níquel (max)	0,4	0,0107
Molibdênio (max)	0,08	<0,001

3.1.2 Micrografia

A Figura 12 mostra imagem da microestrutura do material, obtida em amostra sujeita a ataque químico de solução Nital 3%.

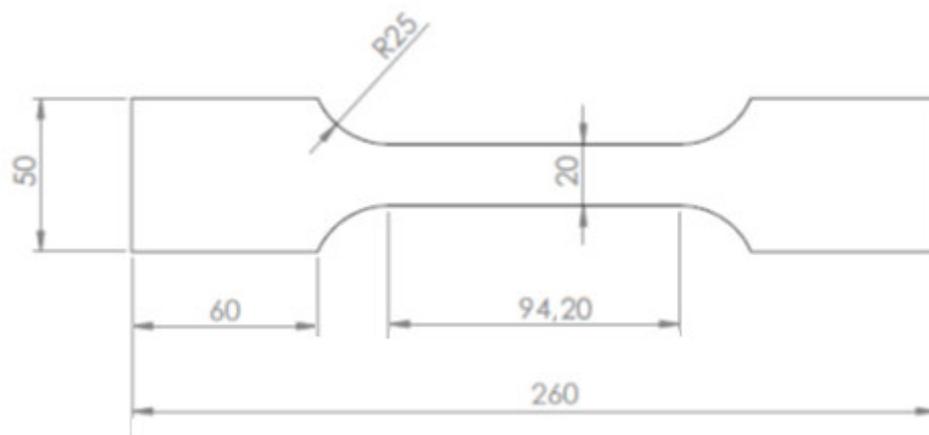
Figura 12 - Microestrutura do aço ASTM A131 AH36 empregado no trabalho. (Ampliação 50x).



3.1.3 Teste de Tração do Metal Base

As dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração foram estabelecidas de acordo com a norma ISO 6892 (2009), sendo os mesmos confeccionados conforme as dimensões estabelecidas para peças não proporcionais. A Figura 13 mostra o aspecto geral do corpo de prova. As peças foram fabricadas utilizando um torno mecânico universal e como ferramenta de corte, foi utilizada uma fresa topo com diâmetro igual a 50 milímetros.

Figura 13 – Formato do corpo de prova para ensaio de tração. (Dimensões em mm)



3.2 Definição da Quantidade de Amostras nos Diagramas de Fadiga

Para realização de análises de curvas S-N de fadiga e para poder caracterizar o material ou prever determinado comportamento futuro, é necessário que os dados sejam representativos de uma população de interesse. Ou seja, é necessário que haja quantidade razoável de informações acerca de determinada condição de interesse. Para definir essa quantidade representativa no presente trabalho, foi utilizada a norma ASTM E739 (2015), a qual diz que o número mínimo de amostras para as curvas S-N depende do tipo de teste que será conduzido, além de estabelecer a porcentagem de replicação exigida para cada situação. Tais informações são mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 – Quantidade mínima de amostras e porcentagem de replicação

Tipo de teste	Quantidade mínima de amostras	Porcentagem de replicação (%)
Preliminar e exploratório (pesquisa e testes de desenvolvimento)	6 a 12	17 a 33
Pesquisa e testes de desenvolvimento de componentes e amostras	6 a 12	33 a 50
Dados para projeto	12 a 24	50 a 75
Dados com confiabilidade	12 a 24	75 a 88

Fonte: Adaptado de ASTM E739(2015)

A replicação é calculada conforme Fórmula 2.

$$\% \text{ de replicação} = 100 \left[1 - \left(\frac{\text{quantidade de níveis de tensão usados no teste}}{\text{quantidade total de amostras testadas}} \right) \right] \quad (2)$$

Prosseguindo com o procedimento para especificação da quantidade de corpos de prova, optou-se por enquadrar os testes realizados no presente trabalho como preliminares e exploratórios. Portanto, de acordo com a Tabela 2, foi estabelecido um total de seis amostras e dois níveis de tensão, ou seja, três amostras por nível. Com tais dados, a porcentagem de replicação resultou em 66%, o que corresponde a uma replicação satisfatória. A quantidade de níveis de tensão escolhido foi igual a dois, devido à quantidade de casos de estudo e das

elevadas cargas de ensaio, tendo em vista a espessura considerável dos corpos de prova. Finalmente, o resumo da quantidade de amostras e dos tipos de corpos de prova pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade total de amostras

Corpo de Prova	Quantidade
Sem retificação	6
Com retificação no pé da solda	6
Com retificação na face da solda	6

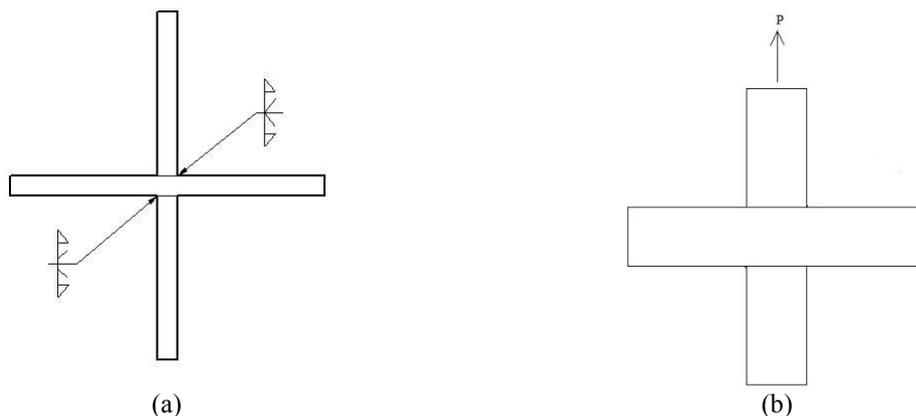
3.3 Definição do Detalhe e Dimensão

Serão aqui apresentadas as dimensões das amostras para ensaio de fadiga, bem como a geometria da junta soldada.

3.3.1 Definição da Categoria do Detalhe

A união analisada se trata de uma junta cruciforme de penetração completa sujeita a carga transversal. Tal detalhe foi escolhido devido à escassez de dados a respeito dessa categoria e, também, pelos motivos apresentados na Seção 1 do presente trabalho. A união proposta e a forma de aplicação da carga podem ser observadas na Figura 14.

Figura 14 – Configuração do detalhe soldado: (a) Localização da solda; (b) Direção de aplicação da carga.

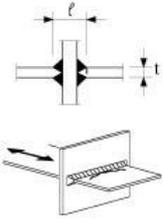
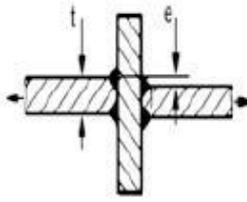
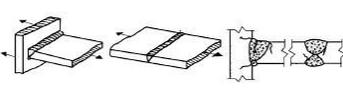


3.3.2 Definição das Dimensões da União

As dimensões das amostras foram estabelecidas de forma a proporcionar uma área de seção resistente que não ocasionasse extrapolação da capacidade de carga dinâmica da máquina de ensaio, no caso, de 100 kN.

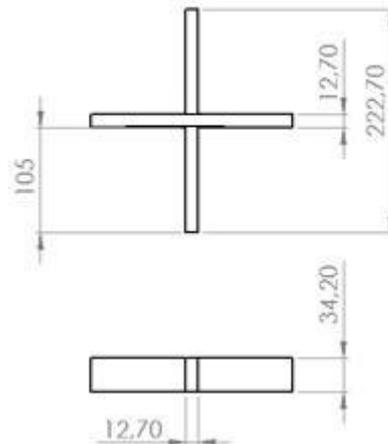
Adicionalmente, para correlacionar a largura das amostras com as amplitudes das cargas de ensaio, foram usados os dados relacionados à junta cruciforme presentes em normas e recomendações. O resumo destes dados é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Enquadramento da categoria nas normas Eurocode E3 (2003), AWS D1.1 (2010) e IIW(2016).

Código	Detalhe	Especificação do Detalhe	2×10^6 ciclos (MPa)	2×10^5 ciclos (MPa)
EUROCODE 3 – Part 1.9 (2003)		Junta cruciforme - Falha no pé da solda em juntas com penetração total. $l < 50$ mm. t – espessura Quanto maior o valor de “ l ”, menor a categoria.	80	172
IIW (2016)		Junta cruciforme, penetração total, falha potencial do pé da solda. O desalinhamento (e) não deve exceder 15% da espessura da chapa.	71	153
AWS D1.1 (2010)		Penetração total, local potencial para falha: pé da solda.	90	192

Para especificação da largura dos corpos de prova, foram usados os seguintes parâmetros: *i*) vida de 200.000 ciclos, *ii*) valor médio das faixas de tensão das normas (última coluna da tabela 5), ou seja, 172 MPa e *iii*) referencial de carga máxima de ensaio = 75 kN. Sabe-se de trabalhos anteriores que o valor da faixa de tensão apresentada pelos gráficos nas normas é conservativo. Portanto, tais parâmetros foram apenas orientativos. A largura nominal obtida foi de 34,2 milímetros. O desenho do detalhe, com suas dimensões, pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Dimensões do detalhe considerado, em milímetros.



3.4 Definição do Procedimento de Soldagem

Será abordada nesta seção a elaboração do procedimento de soldagem utilizado, assim como seus testes de integridade.

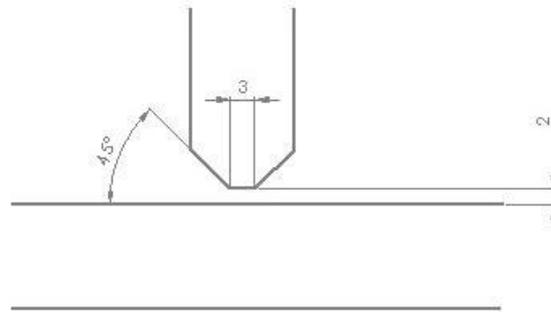
3.4.1 Especificação do Procedimento de Soldagem

O procedimento de soldagem foi elaborado com base na norma AWS D1.1, a qual estabelece alguns valores para as variáveis de corrente elétrica e tensão, além de elencar diversos grupos de materiais, relacionando-os com os processos de soldagem e seus metais de adição. Com base nessas diretrizes, ficou definido que, para a soldagem do aço ASTM A131 grau AH36, seria utilizado processo a arco elétrico com arame tubular.

A norma citada estabelece que juntas em ângulo com penetração completa devem ser qualificadas por meio de procedimento de soldagem realizado em junta de topo, com configuração de chanfro e parâmetros de soldagem idênticos. Por esse motivo, o procedimento de soldagem foi qualificado em uma junta de topo.

De modo a garantir penetração completa e acesso a ambos os lados, optou-se por uma configuração com chanfro em K, tendo abertura de raiz igual a 2 milímetros, nariz igual a 3 milímetros e ângulo de chanfro igual a 45°, tais valores são propostos pela norma AWS D1.1. Tal configuração pode ser observada na Figura 16.

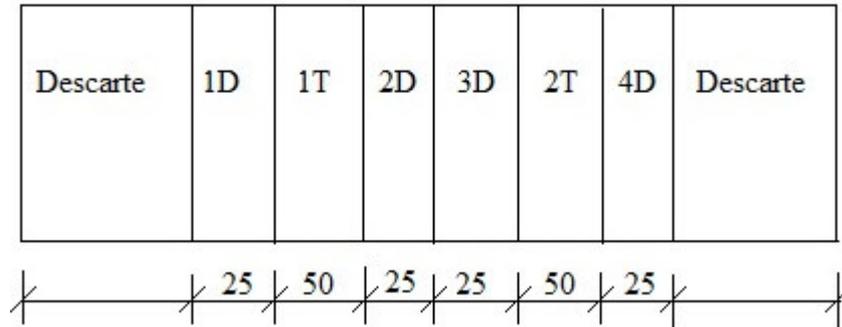
Figura 16 – Configuração final do chanfro, dimensões em milímetros.



3.4.2 Qualificação do Procedimento de Soldagem

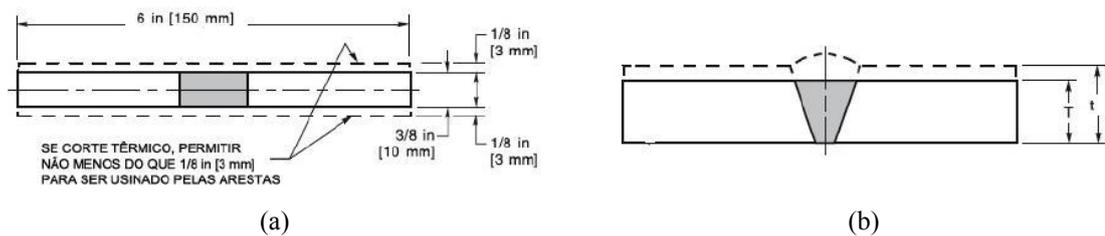
A norma AWS D1.1 (2010) estabelece os testes de qualificação que devem ser realizados após a soldagem da amostra. A quantidade e o tipo de ensaios que devem ser realizados são definidos com base na espessura do material sendo soldado e no tipo de solda realizada, se é filete, penetração parcial ou penetração completa. Como a espessura do material utilizado no presente trabalho é igual a 12,7 milímetros e a solda realizada foi com penetração completa, a norma exige a realização de dois ensaios de tração e quatro ensaios de dobramento lateral. Vale lembrar que as configurações das peças de teste apresentadas nessa seção são específicas para junta de topo, a qual, como mencionado na seção 3.4.1, é a configuração exigida pela norma para qualificar o procedimento de soldagem de juntas em ângulo com penetração completa. A norma também estabelece que a chapa para realização da soldagem deva ter 380 milímetros de comprimento, sendo a solda realizada entre duas chapas com 180 milímetros de largura. Na Figura 17 podemos ver a disposição das amostras sobre a placa, sendo a letra “D” referente a dobramento e “T” referente a tração. A configuração das amostras para os ensaios de dobramento e de tração podem ser observada nas Figuras 18 e 19, respectivamente, sendo que na Figura 18b, o parâmetro t diz respeito à espessura da chapa a ser testada. Como esta dimensão se encontra no intervalo de 10 a 38 milímetros, a espessura para teste T pode ser igual à espessura da chapa.

Figura 17 – Disposição das amostras para corte na chapa de teste, dimensões em mm.



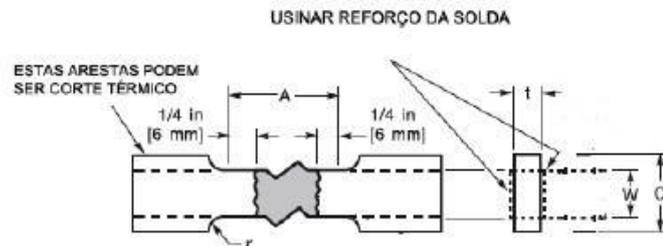
Fonte: Autora

Figura 18 – Amostra para dobramento: (a) Vista de topo; (b) Vista lateral.



Fonte: AWS D1.1 (2010)

Figura 19 – Amostra para o teste de tração



Fonte: AWS D1.1 (2010)

A Tabela 5 traz informações acerca das dimensões consideradas na Figura 19.

Tabela 5 – Informações referentes às dimensões constantes na Figura 20.

Dimensões em mm			
	Espessura da chapa		
	$T_p \leq 25 \text{ mm}$	$25 < T_p < 38 \text{ mm}$	$T_p \geq 38 \text{ mm}$
A compr ^{mt} o seção reduzida	Min. 60	Min. 60	Min. 60
L compr ^{mt} o geral mínimo	Conforme equipamento de ensaio		
W largura seção reduzida	Min. 20 mm	Min. 20 mm	Min. 20 mm
C largura seção de agarre	W + 12 mm, min.	W + 12 mm, min.	W + 12 mm, min.
t (espessura da amostra)	T_p	T_p	T_p
r (raio mínimo)	12	12	12

Fonte: Adaptado de AWS D1.1

Tanto o ensaio de tração quanto o de dobramento foram realizados na máquina mostrada na Figura 20.

Figura 20 – Máquina INSTRON EMIC 23 - 300 com dispositivo de dobramento instalado.

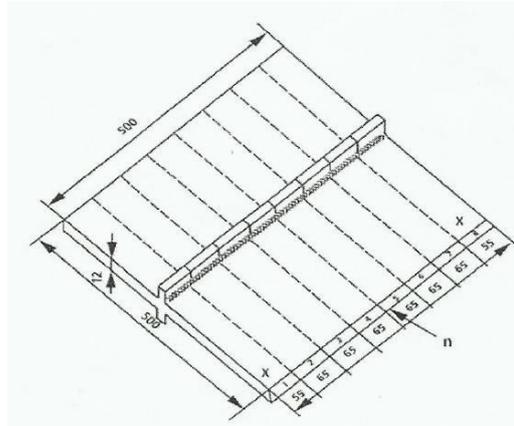


3.5 Preparação e Soldagem das Amostras para o Ensaio

3.5.1 Preparação

A preparação dos corpos de prova para os ensaios de fadiga foi baseada na norma ISO 14345:2012, a qual estabelece a soldagem prévia de placas, a partir das quais são retirados os corpos de prova por processo de corte. A Figura 21 exemplifica o procedimento.

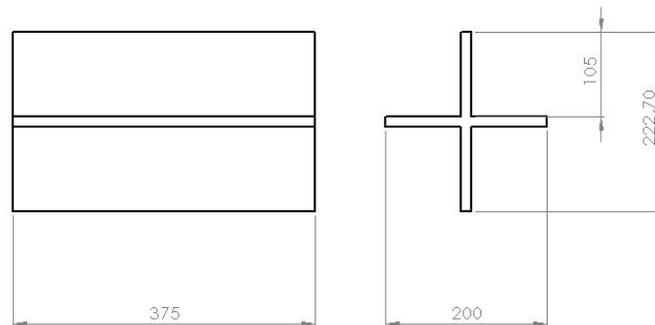
Figura 21 – Painel soldado com detalhe cruciforme e linhas de corte dos corpos de prova.



Fonte: ISO 14345 (2012)

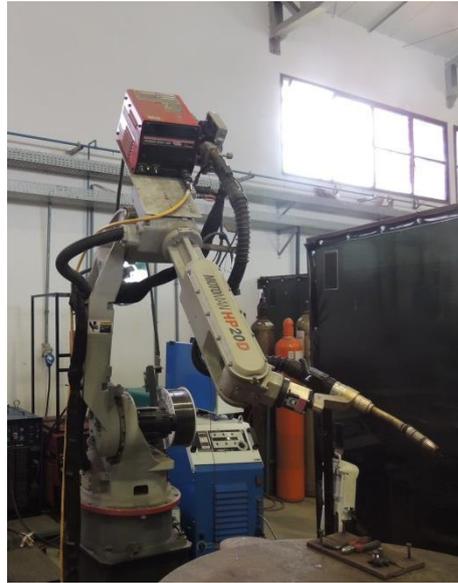
No caso de interesse, foram elaborados painéis de 375 mm de comprimento, compatível com dispositivo de sujeição do Laboratório de Engenharia da Soldagem da EE/FURG. Para manutenção da posição adequada, as placas foram previamente ponteadas com solda nas extremidades. A dimensão das placas pode ser observada na Figura 22.

Figura 22 – Dimensões do painel para retirada das amostras (milímetros).



3.5.2 Soldagem

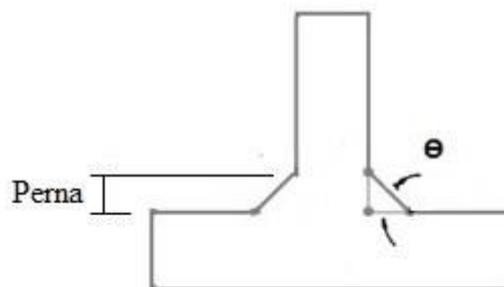
As peças foram soldadas conforme procedimento descrito na seção 3. Foi utilizado um robô de soldagem, mostrado na Figura 23, tanto na elaboração dos corpos de prova de tração e dobramento (junta de topo) como nos corpos de prova de fadiga (detalhe cruciforme com penetração completa).

Figura 23 – Robô HP20D

Após a soldagem, todas as amostras foram cortadas por processo mecânico. Para tal, utilizou-se uma serra fita, de maneira a extrair peças finais com as dimensões estabelecidas na Figura 15.

3.6 Análise dos Parâmetros dos Cordões de Solda sem Retificação

As amostras que não sofreram usinagem em seus cordões de solda, tiveram seus perfis registrados e seus parâmetros de interesse, perna e ângulo de reforço (Θ), foram medidos por meio do *software* ImageJ. Os parâmetros medidos podem ser observados na Figura 24. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 6.

Figura 24 – Parâmetros analisados nos cordões de solda.**Tabela 6** – Média dos valores do ângulo de reforço e da perna das amostras não submetidas ao processo de retificação.

Amostra	Média dos 4 ângulos Θ (°)	Média das 8 pernas (mm)
1S2	56,4	6,2
3S8	57,5	5,9
2S2	59,4	6,0

4S2	58,7	6,5
5S5	58	6,2
5S4	58	4,0
6S2	54,8	5,9
6S3	57,2	6,3

3.7 Realização do *toe grinding* e do *profile improvement*

3.7.1 *Toe grinding*

O processo de usinagem do flanco do cordão foi realizado de maneira manual, com a ferramenta mostrada na Figura 25a. Trata-se de uma lima rotativa, com formato de arco gótico e ponta esférica, sendo seu maior diâmetro igual a 15,8 milímetros. A máquina manual empregada, mostrada na Figura 25b tem taxa de rotação de 26 mil RPM e potência de 445 Watts. A Figura 26 mostra os flancos nos quais a usinagem foi realizada, bem como as dimensões de referência.

Figura 25– Equipamentos empregados no processo de *toe grinding*: a) ferramenta e b) máquina manual.

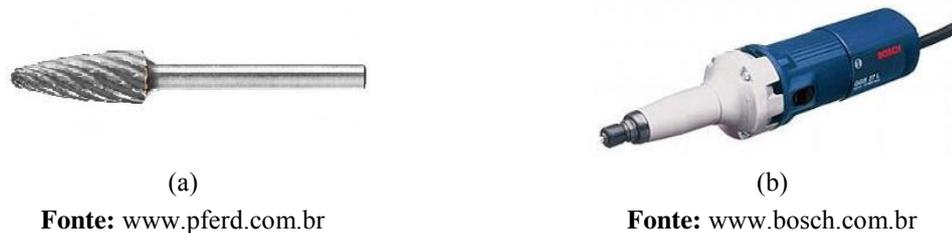
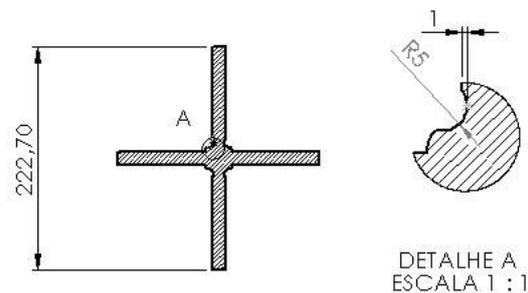


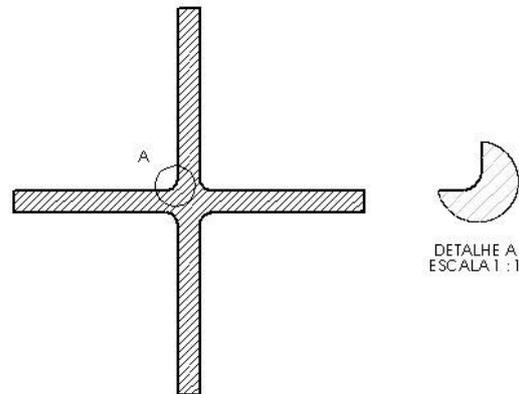
Figura 26 – Geometria obtida nas margens dos cordões de solda.



3.7.2 *Profile Improvement*

A retificação na face, analogamente ao processo realizado no flanco do cordão, foi realizada com a mesma ferramenta e máquina da Figura 25. Desta forma foi possível obter o perfil mostrado na Figura 27. Como já discutido em seções anteriores, a execução de tal perfil elimina defeitos na face e suaviza a geometria no encontro entre cordão e metal base.

Figura 27 – Geometria obtida na face dos cordões de solda



3.7.3 Realização do Ensaio Não Destrutivo

Seguindo as orientações da norma AWS D1.1 (2010), após a realização da usinagem, as faces resultantes sofreram ensaio não destrutivo por líquido penetrante, com o objetivo de detectar quaisquer descontinuidades decorrentes do processo. Para a realização do ensaio, primeiramente a peça foi limpa com solvente. Em seguida, foi aplicado o líquido penetrante e, após decorridos alguns minutos, o pó revelador, procedimento de acordo com a norma ASTM E 165 (1995).

3.8 Ensaios de Fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados na máquina servohidráulica Shimadzu modelo EHF - EV200K1 - 020 - 1A, mostrada na Figura 28. A mesma possui capacidade máxima de 100 kN para ensaios dinâmicos.

Figura 28 – Máquina destinada aos ensaios de fadiga.

Fonte: Catálogo do fabricante.

Os ensaios foram controlados pela carga, com frequência de ciclagem determinada com base no valor máximo e em diagrama fornecido pelo fabricante da máquina. As cargas de ensaio apresentaram razão $R = 0$ (sendo $R = \text{Carga}_{\text{mínima}} / \text{Carga}_{\text{máxima}}$), o que corresponde a carregamento repetido. A Tabela 7 mostra os valores máximos de tensão e carga inicialmente estimados com base na média dos valores de referência fornecidos pelas normas consultadas (anteriormente mostrados na Tabela 4).

Tabela 7 – Valores estimados das cargas de ensaio de fadiga.

Amostra	Vida em fadiga (ciclos)	Tensão Média (MPa)	Carga de ensaio estimada (kN)	Carga de ensaio real (kN)
Cordão original	2×10^5	172,3	75	85
Toe grinding e/ou Profile Improvement	2×10^6	80,3	35	80

3.9 Determinação do Diagrama S-N

Para a construção dos diagramas de fadiga foi utilizada a norma ASTM E739 – 10 (2015), a qual cobre apenas relações entre intervalo de tensão (S) e vida em fadiga (N) que possam ser aproximadas por uma reta. De acordo com a norma, para a construção dos diagramas, o intervalo de tensões é disposto sobre o eixo das ordenadas, enquanto a vida em fadiga corresponde ao eixo das abscissas. A curva é representada pela Equação 3, na qual assume-se, para simplificação de análises estatísticas, que o logaritmo da vida em fadiga é normalmente distribuído, ou seja, que a vida em fadiga é normalmente distribuída.

$$\log(N) = A + B \times \log(S) \quad (3)$$

Na qual: N: número de ciclos até a falha (variável dependente);
S: intervalo de tensões (variável independente);
A e B: constantes obtidas pelas Equações (4) e (5).

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

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

Na qual: X: variável independente [$X_i = \log(S_i)$]
Y: representa a variável dependente [$Y_i = \log(N_i)$]
k: número total de amostras do conjunto

Os valores médios são obtidos pelas Equações (6) e (7):

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^k X_i}{k} \quad (6)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^k Y_i}{k} \quad (7)$$

$$X_i = \log(S_i)$$

$$Y_i = \log(N_i)$$

A variância, constante em toda faixa do diagrama S-N, é calculada por meio das Equações (8) e (9):

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{k-2} \quad (8)$$

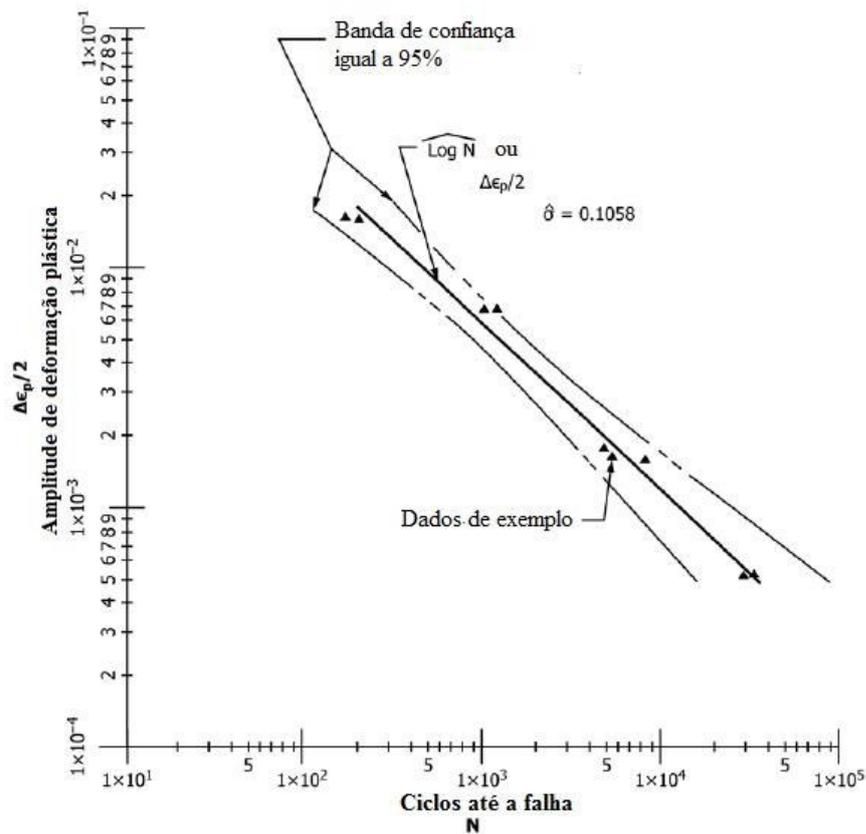
$$\hat{Y}_i = A + B \times X_i \quad (9)$$

Uma banda de confiança correspondente a 95% foi estabelecida a partir da curva média, por meio da Equação 10.

$$\log(N) = A + B \times \log(S) \pm \sqrt{2 \times F_p} \hat{\sigma} \left[\frac{1}{k} + \frac{(X - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \right]^{1/2} \quad (10)$$

A Figura 29 exemplifica a construção do gráfico S-N, com a disposição dos dados sobre os eixos, assim como as curvas resultantes. No diagrama dessa figura, o eixo das ordenadas contém a deformação plástica, a qual também pode ser utilizada como variável controlada nos ensaios de fadiga.

Figura 29 – Diagrama S-N



Fonte: ASTM E739 – 10 (2015).

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES

Nesta seção são mostrados os resultados obtidos nos ensaios realizados. Os comentários a respeito de tais resultados se resumem às informações necessárias para esclarecimento de aspectos específicos, ou seja, pertinentes aos ensaios em si. Uma discussão geral dos resultados será tema de seção posterior.

4.1 Ensaio de Tração

Foram realizados 3 ensaios de tração, produzindo os dados observados na Tabela 8. O resultado obtido está de acordo com a norma AWS D1.1(2010), que estabelece que a média dos resultados de tensão de escoamento e tensão de tração devem ser igual ou superior a 355 MPa e 490 MPa, respectivamente, para o material considerado.

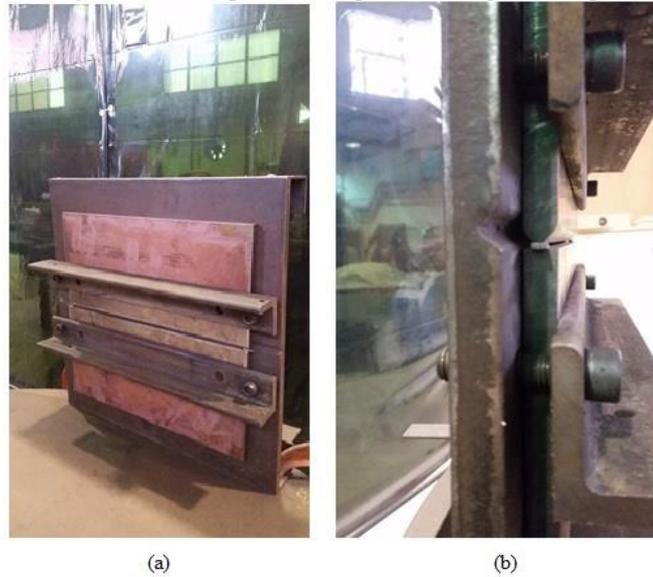
Tabela 8 – Resultados do ensaio de tração.

Parâmetros	Amostra T1 (MPa)	Amostra T2 (MPa)	Amostra T3 (MPa)	Média (MPa)
Sy (Tensão de escoamento)	362,38	360,84	367,60	363,61
Su (Tensão de tração)	489,48	484,98	497,02	490,49

4.2 Definição do Procedimento de Soldagem

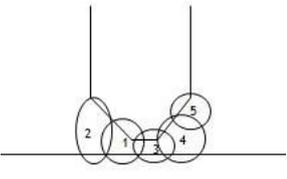
4.2.1 Especificação do Procedimento de Soldagem

O procedimento de soldagem FCAW para a união de topo foi realizado com arame especificação E71T1, de diâmetro igual a 1,2 mm, e gás de proteção 100% CO₂. A soldagem foi realizada na posição horizontal, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Chapas fixadas para a soldagem de topo.

Foram realizados cinco passes de solda, dois passes no primeiro lado e três na contra solda. A disposição dos passes e as variáveis de processo podem ser observadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Variáveis utilizadas no procedimento de soldagem.

Passes 	Corrente Média (A)	Tensão (V)	Velocidade de soldagem v (cm/min)	Velocidade alimentação do arame (m/min)	Vazão do gás de proteção (l/min)	Energia de soldagem (kJ/cm)
1	184	26,8	37	9,01	19	133,27
2	184	26,8	37	9,01	19	133,27
3	184	26,8	37	9,01	19	133,27
4	184	26,8	37	9,01	19	133,27
5	160	24,7	37	7,51	19	106,81

A goivagem da raiz foi realizada de forma mecânica e manual, com disco de corte. A distância do bico de contato até a peça (DBCP) se manteve constante e igual a 20 mm. Não houve pré aquecimento da região de soldagem e a temperatura entre passes manteve-se abaixo de 50°C. Após a soldagem da chapa de teste, as amostras para os ensaios de tração e dobramento foram retiradas da mesma, por corte a plasma. Finalmente, as peças foram levadas à plaina para retirada do excesso de material e para eliminar a parte da peça afetada pelo calor.

4.2.2 Qualificação do Procedimento de Soldagem

Conforme mencionado na seção 3 do presente trabalho, para qualificação do procedimento de soldagem foram realizados dois testes de tração e quatro testes de dobramento lateral. A configuração final das amostras é mostrada na Figura 31. Como pode ser percebido pela Figura, tanto nas amostras para os testes de tração como para os testes de dobramento, houve a retirada do reforço por meio de usinagem realizada em uma plaina, tal procedimento é requerido por norma até que a face do metal de solda esteja alinhada ao metal de base. Porém, nas amostras para tração houve retirada de aproximadamente 1,4 mm em ambos os lados para que mordeduras existentes não viessem a intervir nos resultados do ensaio.

Figura 31 – Amostras prontas para os testes de qualificação: a) Amostra para tração e b) Amostras para dobramento.



(a)



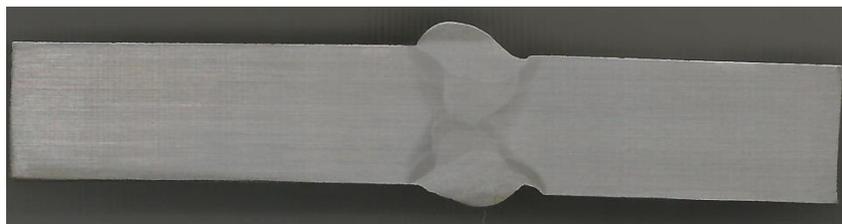
(b)

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração. O primeiro critério de aceitação da AWS D1.1 (2010) estabelece que os corpos de prova com união soldada devem apresentar tensão máxima de tração maior ou igual à apresentada pelo metal base, cujo valor, mostrado na seção 4.1, é de 490 MPa. Como pode ser constatado por meio da Tabela 10, tal critério foi atendido.

Tabela 10 – Resultados ensaio de tração das amostras soldadas.

Parâmetros	Amostra 1	Amostra 2
Tensão de escoamento S_y	358,8 MPa	362,3 MPa
Tensão Máxima S_{ut}	501,6 MPa	507,8 MPa

A Figura 32 mostra imagem macrográfica do perfil da união resultante. Cabe acrescentar aqui observações acerca dos critérios de aceitação do ensaio visual que deve ser realizado previamente na união, segundo os quais é inaceitável a presença de trincas, altura de reforço maior que 3 mm, deposição insuficiente de material de adição, descontinuidades na raiz e, por fim, as mordeduras existentes não devem exceder 1 mm de profundidade. Como não foi possível efetuar ensaio não destrutivo para comprovação da integridade da raiz, foi realizada apenas uma avaliação visual da superfície do cordão de solda. Foram constatados quatro pontos com mordedura igual a 1 mm e dois pontos com mordedura entre 1 e 2 mm, o reforço se manteve abaixo de 3 mm de altura. A macrografia da Figura 32, a qual apresenta mordedura igual a aproximadamente 1 mm, evidencia a característica apresentada pela união de topo soldada, devido a mesma ter sido fabricada na posição horizontal, posição que permite leve escorrimento do metal de adição.

Figura 32 – Macrografia da chapa de teste.

Quanto ao teste de dobramento, a Figura 33 mostra o corpo de prova ao final do ensaio.

Figura 33 – Ensaio de dobramento em execução.



As amostras de dobramento apresentaram pequena inclusão de escória, cujas imagens são apresentadas na Figura 34 e dimensões descritas na Tabela 11.

Figura 34 – Inclusões presentes nas amostras de dobramento: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3 e d) Amostra 4.

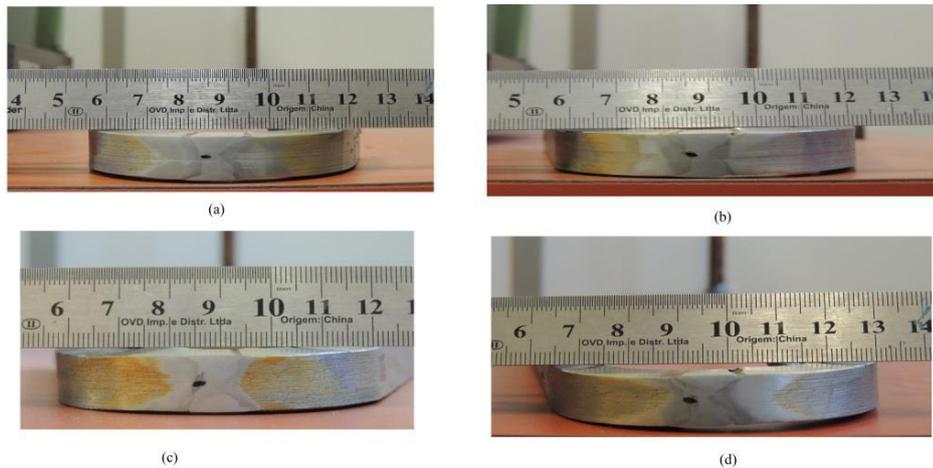


Tabela 11 – Dimensões (mm) das inclusões presentes nas amostras de dobramento.

Amostra	Medida na horizontal	Medida na vertical
1	2,0	1,0
2	2,3	1,0
3	2,3	1,0
4	2,4	1,15

O critério de aceitação da norma AWS D1.1 (2010) relacionado ao ensaio de dobramento estabelece que as discontinuidades constatadas não devem apresentar dimensões maiores que 3 mm, medidas em qualquer direção. Além disso, a soma das discontinuidades maiores que 1 mm e menores que 3 mm não deve ser superior a 10 mm. Como mostrado na

Tabela 11, as dimensões das discontinuidades ficaram abaixo dos 3 mm, mas o somatório destas resultou em 10,15 mm, ou seja 1,5% acima do estipulado pela norma AWS D1.1. Para esse tipo de resultado a norma estipula a realização de novos testes, sendo dois testes por cada amostra reprovada, sendo que as amostras podem ser retiradas da própria chapa de teste confeccionada. Os novos testes não foram realizados, devido à insuficiência de material necessário para a confecção de mais oito amostras de dobramento lateral.

4.3 Preparação e Soldagem das Juntas Cruciformes

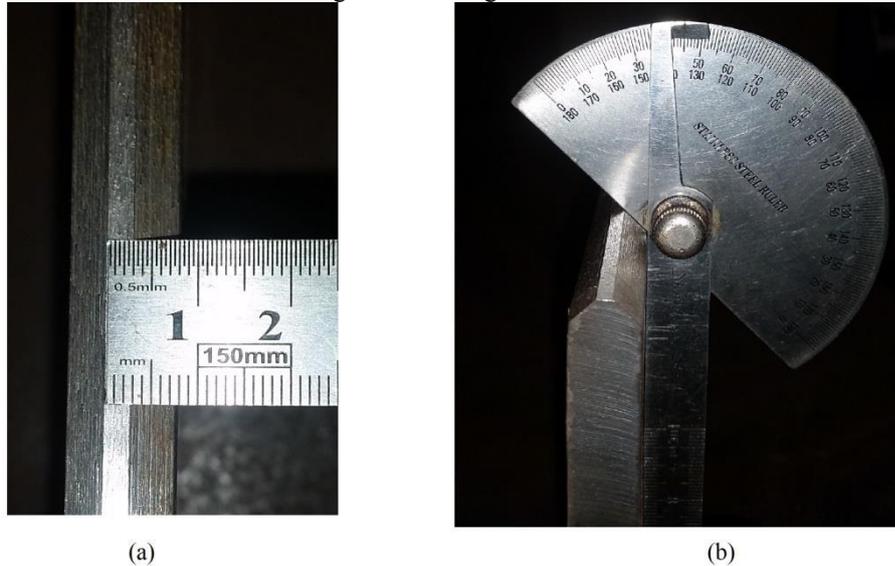
Nessa seção é abordada a preparação das juntas cruciformes anteriormente à soldagem, bem como o processo de soldagem em si.

4.3.1 Preparação

Anteriormente ao processo de soldagem, as placas foram retiradas da chapa do metal base por meio de corte a plasma. Em seguida, essas placas foram usinadas lateralmente nas dimensões de 375 x 200 mm (6 peças, correspondentes à placa contínua da união) e 375 x 105 mm (12 peças, correspondentes às abas das juntas). Um retorno à Figura 22 pode esclarecer dúvidas quanto à geometria empregada.

O chanfro, executado na borda das abas, apresentou as mesmas dimensões empregadas nos corpos de prova da união de topo (testes de tração e dobramento), anteriormente mostradas na Figura 16. O resultado é mostrado na Figura 35.

Figura 35 – Configuração do chanfro: a) Medida do nariz igual a 3 mm; b) Medida do ângulo de bisel igual a 45°.



Para realização da soldagem as peças foram pré-fixadas por meio de pontos de solda, realizados com eletrodo revestido. A Figura 36 mostra essa operação.

Figura 36 – Montagem e fixação por pontos das placas da junta cruciforme.



4.3.2 Soldagem

A soldagem das peças foi realizada com os mesmos parâmetros aplicados na junta de topo, anteriormente mostrados na Tabela 9, excetuando-se o último dos cinco passes (a sequência de execução dos cordões já foi mostrada no desenho interno à Tabela 9), pois a quantidade de passes realizados na união em ângulo proporcionou material de adição suficiente para deixar os cordões aproximadamente simétricos, além disso, caso não houvesse o último passe na união de topo, o cordão de solda ficaria com profundidade de enchimento inferior à espessura do metal base, situação conhecida como deposição insuficiente, a qual é inaceitável pela AWS D1.1 (2010). A goivagem da raiz, entre o segundo e o terceiro passe,

foi realizada por processo mecânico e manual. Mesmo com ângulo de bisel de 45°, houve certa dificuldade de realização efetiva da operação.

Para execução da soldagem por meio do robô, as placas previamente ponteadas foram dispostas sobre um suporte, mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Peças posicionadas no suporte: a) Vista lateral; b) Vista frontal.



Já na Figura 38, podemos observar a peça com um cordão de solda executado.

Figura 38 – Cordão de solda feito na chapa de teste.



Após a soldagem das peças, as mesmas foram cortadas com serra fita. Os pontos de solda inseridos na união, anteriormente a soldagem das mesmas, os quais possibilitaram o seu posicionamento, foram inseridos apenas nas extremidades do eixo longitudinal da união. Em decorrência ao exposto, a abertura de raiz apresentou leve aumento durante a realização do processo de soldagem, fato que colaborou para a redução da garganta e posterior descarte dessas regiões. Foram cortadas seis peças inteiras, o que resultou em 31 amostras. Ao final do corte foram medidas as larguras de cada peça, na Tabela 12 esses valores podem ser conferidos (medições realizadas com paquímetro com resolução de 0,01 mm).

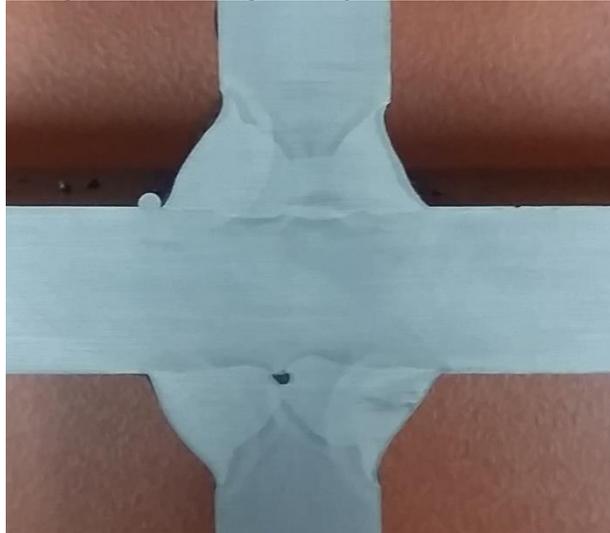
Tabela 12 – Dimensões finais da largura das amostras.

Amostra	Largura (mm)	Amostra	Largura (mm)
1S-6	34,20	4S-1	34,03
3S-5	33,33	1S-8	35,33
4S-2	34,56	3S-8	34,53
3S-6	33,40	1S-1	34,80
1S-3	34,90	3S-7	33,20
3S-1	35,13	1S-5	35,00
2S-1	37,23	1S-4	34,83
2S-3	34,43	2S-4	35,03
3S-2	34,63	6S-1	34,10
3S-3	34,06	5S-6	34,40
2S-2	34,26	5S-7	33,75
3S-4	34,43	5S-4	34,30
1S-2	34,63	6S-2	34,10
4S-4	33,10	6S-3	33,80
4S-3	34,10	5S-5	34,20
1S-7	33,86		

4.4 Visualização da Seção Transversal das Amostras

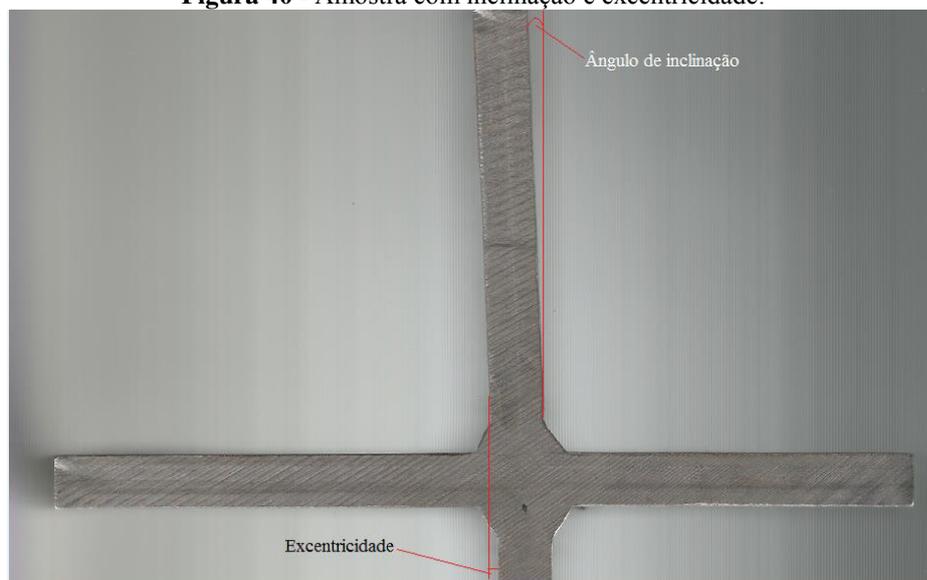
Após o corte das amostras foi verificada a existência de descontinuidade na raiz da solda, mostrada na Figura 39. Os testes de dobramento das juntas de topo haviam indicado que esse problema poderia ocorrer. Trata-se de inclusão de escória, a qual não permitiu a fusão completa na raiz da solda, tal problema influenciou em alguns resultados dos ensaios de fadiga, assunto que será tratado em seção posterior. Conforme mencionado na seção anterior, foram cortadas 31 amostras, mas apenas 20 foram submetidas aos ensaios de fadiga, entre essas, apenas 7 não apresentaram indícios de problemas na raiz, sendo que em algumas amostras o defeito era quase imperceptível.

Figura 39 – Macrografia da junta cruciforme final.



Além do problema de inclusão, percebeu-se também leve excentricidade entre as abas da união, bem como um ângulo de desvio das abas em relação à posição ideal. Tais desalinhamentos são mostrados na Figura 40. Como mencionado por Maddox (1991), o efeito do desalinhamento é a superposição de um momento fletor secundário, responsável por aumentar a tensão à qual a união soldada encontra-se submetida. Em outras palavras, o desalinhamento é responsável pelo aumento do efeito de entalhe associado à união.

Figura 40 - Amostra com inclinação e excentricidade.



Utilizando o software ImageJ foi possível medir o valor da excentricidade e do desalinhamento angular das peças, valores estes que podem ser mostrados na Tabela 13. Na

Tabela constam apenas os valores referentes às amostras selecionadas para realização dos ensaios de fadiga.

Tabela 13 – Valores de excentricidade e desalinhamento angular das amostras ensaiadas.

Amostra	Excentricidade (mm)	Desalinhamento angular aproximado (°) ¹
1S2	0,4	1,2
3S8	0	1,8
2S2	1,6	2,3
4S2	1,1	0,4
5S5	~ 0	1,0
5S4	1	1,0
6S2	0	2,3
6S3	0	1,4
3S7	0,8	1,6
5S7	0,6	1,4
4S3	1,5	0,8
2S3	1,3	1,4
5S6	~ 0	1,0
3S6	0	1,8
3S5	0	1,2
2S1	1,5	2,5
3S3	~ 0	1,4
3S2	0,7	1,3
6S1	0	1,5
4S4	0,5	1,4

¹Foi considerada a maior inclinação apresentada.

4.5 Realização do Processo de Retificação

Nessa seção são mostrados os resultados obtidos após a usinagem do flanco e da face da solda, assim como o resultado do ensaio com líquido penetrante.

4.5.1 No Flanco da Solda

Como já mencionado na seção 3.7, a usinagem foi realizada manualmente, com os equipamentos apresentados na Figura 25. Na Figura 41 pode ser visto o procedimento sendo realizado.

Figura 41 – Processo de *toe grinding* sendo realizado.



A Figura 42 mostra o processo de aferição, por meio de gabaritos, da profundidade e do raio do *toe grinding*. Já na Figura 43 pode ser observado o perfil obtido ao final do processo. A profundidade de ranhura resultante foi de aproximadamente 1 mm e o raio ~ 5 mm.

Figura 42 – Aferição dos parâmetros geométricos do *toe grinding*: a) raio e b) profundidade.



(a)



(b)

Figura 43 – Geometria resultante do *toe grinding*.



4.5.2 Usinagem da Face dos Cordões

A usinagem das faces dos cordões (*profile improvement*) foi efetuada de forma análoga ao processo de *toe grinding*. A usinagem se estendeu por toda a face da solda, alcançando também o flanco e removendo mordeduras, mas sem exagerar na profundidade, só até obter suavização entre o encontro do metal de base com o metal de solda. Nas Figuras 44 e 45 podemos ver a usinagem sendo executada e o processo de aferição do raio, cujo valor ficou entre 7,5 e 8 milímetros.

Figura 44 – Procedimento de usinagem na face do cordão de solda.

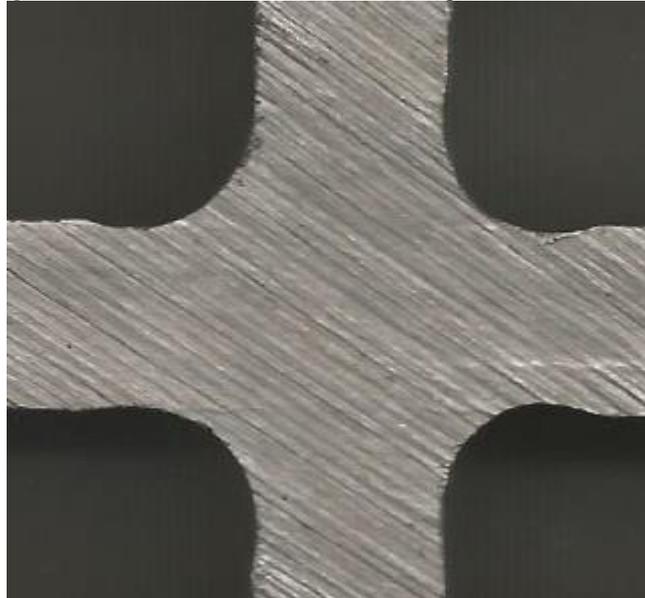


Figura 45 – Medição do raio do perfil com gabarito.



A Figura 46 mostra o formato final do perfil.

Figura 46 – Geometria resultante da usinagem na face da solda.



4.5.3 Ensaio Não Destrutivo nas Regiões de Usinagem dos Cordões

Como mencionado na seção 3.7.3, foi realizado ensaio não destrutivo por líquido penetrante, seguindo orientações da norma utilizada. Todas as peças submetidas à usinagem foram submetidas ao ensaio. Na Figura 47 pode ser vista uma das peças com o líquido penetrante e outra com o pó revelador. O ensaio não revelou descontinuidades superficiais.

Figura 47 – Peças submetidas ao ensaio com líquido penetrante:
a) Peça com o líquido penetrante; b) Peça com o pó revelador.



4.6 Ensaios de Fadiga

Na seção 3.8 foi descrito todo o procedimento empregado nos testes de fadiga. A Tabela 14 apresenta os níveis de tensão aos quais as peças foram submetidas, o número de ciclos alcançado e o local de ruptura. O termo *runout* foi utilizado para a peça 3S3, a qual atingiu o limite preestabelecido de $2,5 \times 10^6$ ciclos. Como esperado as rupturas das amostras originais ocorreram no flanco da solda, porém, nos corpos de prova que sofreram processo de usinagem houve mudança no sítio de falha, o que será objeto de discussão da próxima seção.

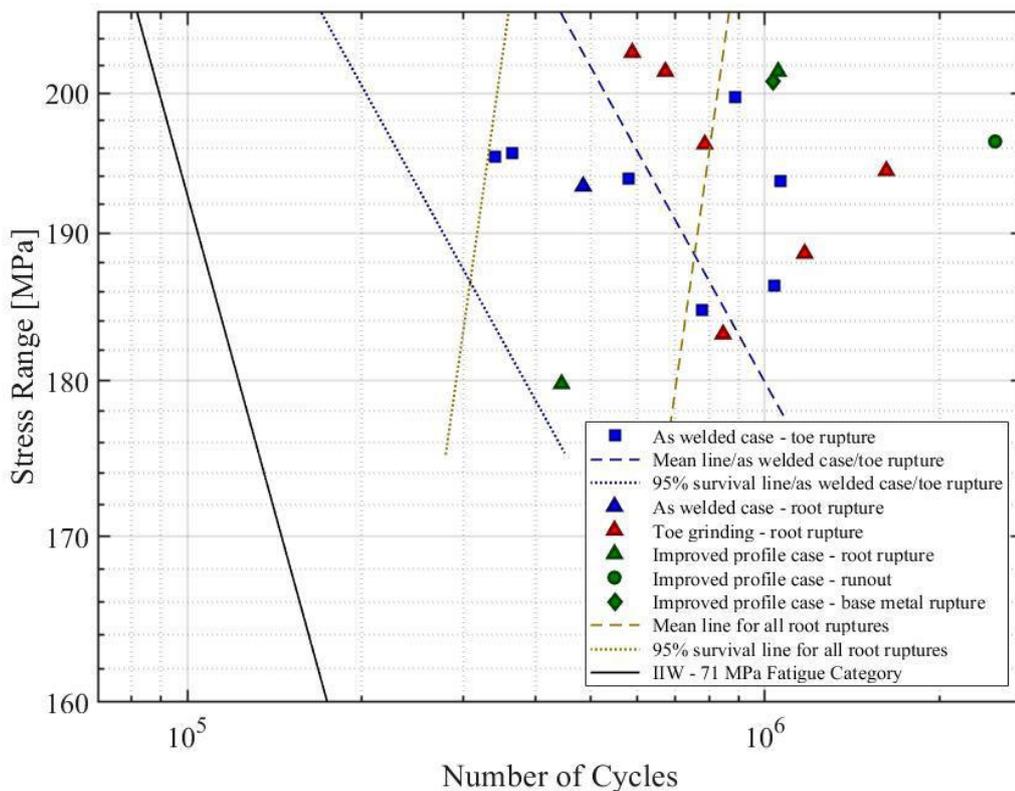
Tabela 14 – Dados referentes aos ensaios de fadiga

Caso	Amostras	Carga de ensaio (kN)	Nível de tensão (MPa)	Número de ciclos	Local de ruptura
Cordão original	1S2	85	193,2692	484380	Raiz
	3S8	85	193,8289	580672	Flanco
	2S2	85	195,3565	341500	Flanco
	4S2	85	193,6607	1064436	Flanco
	5S5	85	195,6992	364332	Flanco
	5S4	87	199,7199	888398	Flanco
	6S2	80	184,7276	778313	Flanco
Toe grinding	6S3	80	186,3672	1038156	Flanco
	3S7	85	201,5938	671980	Raiz
	5S7	87	202,9746	589032	Raiz
	4S3	85	196,2731	786305	Raiz
	2S3	85	194,3919	1621300	Raiz
	5S6	80	183,1166	845843	Raiz
Perfil côncavo	3S6	80	188,5992	1170605	Raiz
	3S5	85	201,5938	1053206	Raiz
	6S1	87	200,8913	1033099	Metal Base
	3S3	85	196,5036	2500000	<i>runout</i>
	2S1	85	179,772	444424	Raiz
	4S4	80	190,3085	Não foi ensaiado	-
	3S2	80	181,9005	Não foi ensaiado	-

4.7 Determinação do Diagrama S-N

Nessa seção é apresentado o diagrama S-N construído com base nos dados apresentados na seção 4.6, o mesmo foi construído seguindo as diretrizes da norma ASTM E739 – 10 (2015), conforme apresentado na seção 3.9. Os casos foram separados em dois grupos, com ruptura na raiz e com ruptura no flanco, e as linhas médias traçadas com base nestes. O gráfico pode ser observado na Figura 48, na qual se percebe as diferentes inclinações das retas obtidas. Claramente, as amostras submetidas aos tratamentos de retificação apresentaram vida superior. Porém, a amostra 2S1 (correspondente ao caso *profile improvement*) parece estar especialmente contribuindo para a inclinação invertida da reta referente aos casos com ruptura na raiz. Como mostrado na Tabela 14, tal amostra apresentou o menor número de ciclos dentre os casos com retificação. Contudo, com o auxílio da Tabela 13 é possível observar que essa amostra apresentava excentricidade de 1,5 mm e desalinhamento angular de 2°, o que ocasionou a superposição de um momento secundário à junta ensaiada.

Figura 48 – Gráfico S-N contendo todos os casos ensaiados.



Como mencionado na seção 4.4, todas as uniões apresentaram algum desalinhamento angular e/ou desalinhamento axial, os quais acabaram causando efeitos

perceptíveis nos resultados finais. Como mencionado por Maddox (1991), quando há a presença dos desalinhamentos mencionados, há uma tensão associada à tensão nominal agindo na seção da amostra, tal efeito pode ser quantificado e associado à tensão nominal, através do fator de amplificação da tensão, K_m , sendo o mesmo calculado pela Fórmula 11 e, após, multiplicado pela tensão nominal.

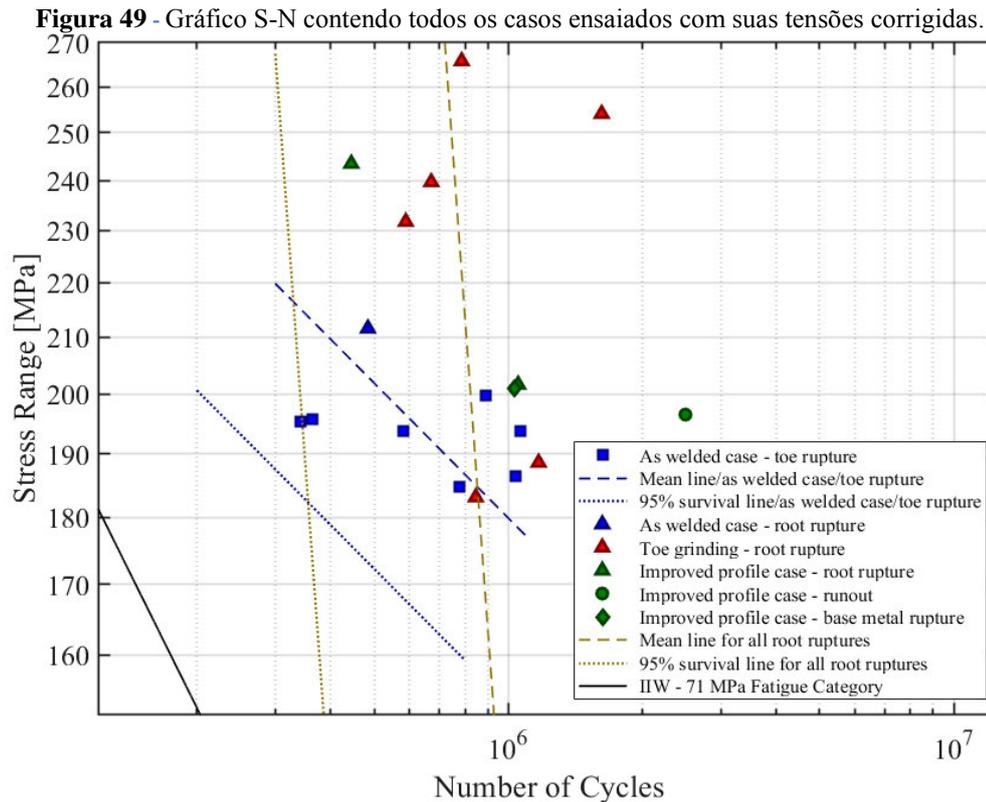
$$K_m = 1 + \frac{3e}{B} \quad (11)$$

Na qual: e: excentricidade
B: espessura

Com o fator K_m calculado, a tensão corrigida pode ser obtida. A Tabela 15 mostra o fator de correção das amostras ensaiadas. Na Figura 49 o gráfico S-N com as tensões corrigidas pode ser observado, nele percebemos que a inclinação referente ao grupo de amostras com ruptura na raiz mudou, pois agora os efeitos dos desalinhamentos são levados em consideração, situação que aumenta a tensão a qual as peças estão submetidas.

Tabela 15 – Fator de amplificação da tensão da amostras ensaiadas

Amostra	K_m	Amostra	K_m
1S2	1,09	4S3	1,35
3S8	1	2S3	1,30
2S2	1,37	5S6	1
4S2	1,25	3S6	1
5S5	1	3S5	1
5S4	1,23	2S1	1,35
6S2	1	3S3	1
6S3	1	3S2	-
3S7	1,18	6S1	1
5S7	1,14	4S4	-



4.8 Análise das Regiões de Ruptura

Nessa seção são analisadas as superfícies de fratura obtidas nos ensaios de fadiga, com o objetivo de identificar fatores importantes, assim como conhecer a região de nucleação e de colapso final.

4.8.1 Região de Ruptura das Peças com Cordão Original

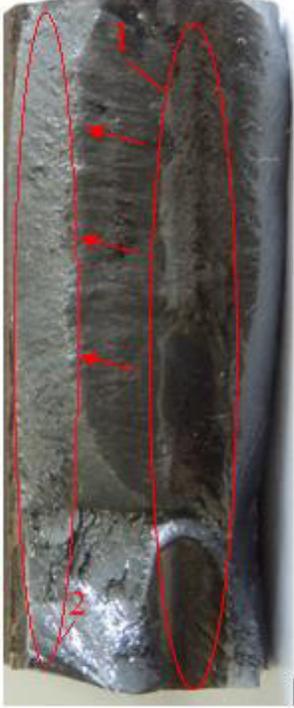
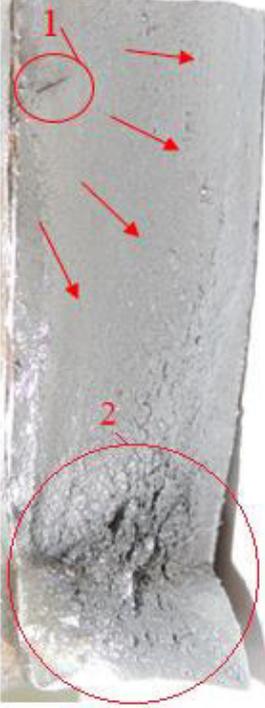
Na Tabela 16 podem ser observadas algumas superfícies de fratura das amostras sem retificação, como se pode perceber, a amostra 1S2 apresentou problema na raiz, indicado pelo círculo 1, tal descontinuidade já havia sido evidenciada na Figura 42, e a provável causa para a ruptura prematura da amostra seria a redução da área resistente e à nucleação de microtrincas existentes no entorno da região. Além disso, mesmo com o indicio de inclusão de escória na raiz, o restante das uniões ensaiadas, nesse caso, rompeu no flanco, sendo a falha governada por microtrincas nessa região, como pode ser observado nas imagens na Tabela 16, e não pela descontinuidade presente na raiz da solda.

Como pode ser evidenciado pelas superfícies de fratura das amostras 4S2 e 5S5, as quais foram submetidas a níveis de tensão próximos, a presença prévia de microtrincas no flanco parece ter colaborado consideravelmente para a ruptura prematura da amostra 5S5, a

qual apresentou número de ciclos, 2,9 vezes, inferior à 4S2. Seguindo a mesma linha de raciocínio, as superfícies das amostras 6S2 e 6S3 também mostram o quanto a quase inexistência de trincas na região do flanco resulta em ganho considerável em resistência à fadiga. A amostra 6S3 apresentou número de ciclos 1,3 vezes superior ao da amostra 6S2, tais considerações mostram a importância da abordagem considerando a existência prévia de trincas na região do flanco, em projetos.

Considerando o efeito nocivo do desalinhamento, a amostra 2S2 pode ser analisada, a mesma, dentre todas ensaiadas no presente grupo, foi a que apresentou menor vida, sendo que a sua superfície de fratura, a qual pode ser observada na Tabela 16, apresentou pequenos pontos de nucleação de trincas se comparada às outras amostras. Recorrendo às Tabelas 13 e 15, pode ser evidenciado que a amostra apresentou maior valor de $K_m(1,37)$ e considerável desalinhamento angular ($2,3^\circ$), tais efeitos, como exposto por Maddox (1991), aumentam a tensão existente na região, ampliando, com isso, o efeito de entalhes existentes. Na Tabela 16, as regiões circuladas 1 e 2 indicam a presença de microtrincas e provável início de falha e a região final de ruptura, respectivamente, as setas indicam o sentido de propagação da ruptura.

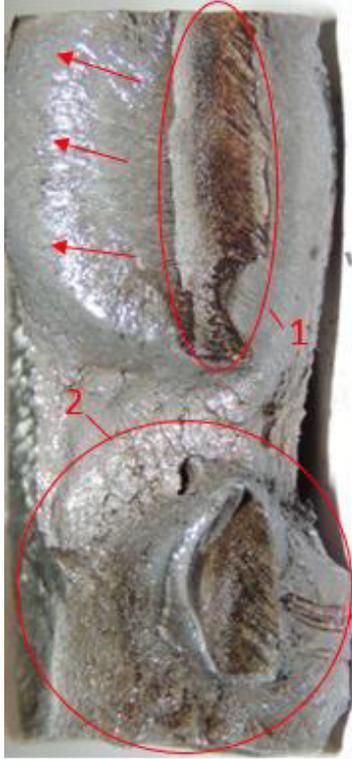
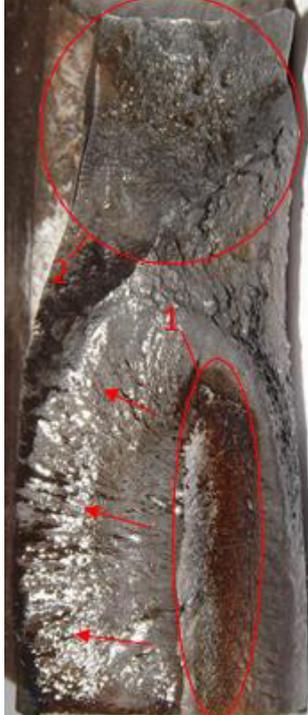
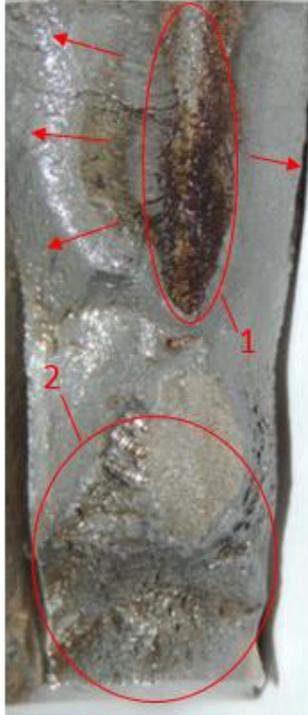
Tabela 16 – Superfície de ruptura das amostras sem retificação

Amostra 1S2	Amostra 4S2	Amostra 5S5
<p data-bbox="347 344 504 434">484.380 ciclos 85 kN Falha na raiz</p> 	<p data-bbox="730 344 903 434">1.064.436 ciclos 85 kN Falha no flanco</p> 	<p data-bbox="1129 344 1302 434">364.332 ciclos 85 kN Falha no flanco</p> 
Amostra 6S2	Amostra 6S3	Amostra 2S2
<p data-bbox="347 1240 504 1330">778.313 ciclos 80 kN Falha no flanco</p> 	<p data-bbox="730 1240 903 1330">1.038.156 ciclos 80 kN Falha no flanco</p> 	<p data-bbox="1129 1240 1302 1330">341.500 ciclos 85 kN Falha no flanco</p> 

4.8.2 Região de Ruptura das Peças com Usinagem no Flanco

Como evidenciado nas imagens contidas na Tabela 17, a ruptura de todas as amostras se deu a partir da raiz, os círculos 1 e 2 mostram as regiões com falta de fusão e de ruptura final, respectivamente, já as setas indicam o sentido de propagação da ruptura. Havia expectativa de que o número de ciclos fosse além do alcançado, porém, em função das descontinuidades presentes na raiz e dos desalinhamentos axial e angular, a vida em fadiga acabou sendo inferior ao esperado. Contudo, mesmo com tais problemas, observou-se que o *toe grinding* proporcionou importante ganho na resistência à fadiga, como exemplificado pelas amostras submetidas a carga de 85 kN. Observou-se também que a amostra 4S3 atingiu vida expressiva, mesmo com falta de penetração de uma extremidade a outra da união. Tais resultados evidenciam que o processo de *toe grinding* foi efetivo na retirada das intrusões no flanco dos cordões.

Tabela 17 – Superfície de ruptura das amostras com retificação no flanco do cordão de solda

Amostra 3S7	Amostra 5S7	Amostra 4S3
<p data-bbox="347 344 501 434">671980 ciclos 85 kN Falha na raiz</p> 	<p data-bbox="742 344 895 434">589032 ciclos 87 kN Falha na raiz</p> 	<p data-bbox="1136 344 1289 434">786305 85 kN Falha na raiz</p> 
Amostra 2S3	Amostra 5S6	Amostra 3S6
<p data-bbox="354 1285 507 1375">1621300 85 kN Falha na raiz</p> 	<p data-bbox="748 1285 901 1375">845843 ciclos 80 kN Falha na raiz</p> 	<p data-bbox="1126 1285 1295 1375">1170605 ciclos 80 kN Falha na raiz</p> 

4.8.3 Região de Ruptura das Peças com Usinagem na Face

As superfícies de ruptura das amostras para esse caso de análise podem ser observadas na Tabela 18. Embora também tenham ocorrido rupturas devido a problemas na raiz, houve dois casos distintos: a amostra 6S1 apresentou ruptura fora da região soldada e a amostra 3S3 atingiu o número de ciclos de interrupção do teste (o que evidenciou desempenho acima da expectativa). No caso da peça 6S1, acredita-se que o processo de falha tenha iniciado no ponto 1, mostrado na imagem contida na Tabela 18. Quanto à peça 3S3, é interessante observar que havia indício de inclusão na raiz, como mostrado na Figura 50. Tal fato aponta para a necessidade de trabalhos futuros relacionados à falha na raiz em juntas cruciformes de penetração completa. Trabalhos anteriores, como o de Funes et al. (2018), o qual mostrou que mesmo com defeitos presentes na raiz de amostras cruciformes submetidas a ensaios de fadiga, as mesmas apresentaram ruptura no flanco da solda, indicam certa tolerância a esse tipo de falha e, portanto, a necessidade de estabelecer dimensões ou níveis de aceitabilidade desse tipo de defeito. Cabe ressaltar que a constatação de defeitos na raiz é bastante comum em juntas cruciformes de penetração completa, o que nem sempre se traduz no modo de falha preponderante. Os mesmos trabalhos anteriores indicam que os parâmetros de aceitabilidade de defeitos na raiz preconizados por normas como a AWS D1.1 (2010) são bastante conservativos. Por outro lado, os corpos de prova implementados neste estudo foram manufacturados com materiais de qualidade, bem como um nível de atenção e esmero elevado. Por tais motivos, os corpos de prova não foram descartados no momento em que os defeitos de raiz foram observados, ainda na fase de preparação.

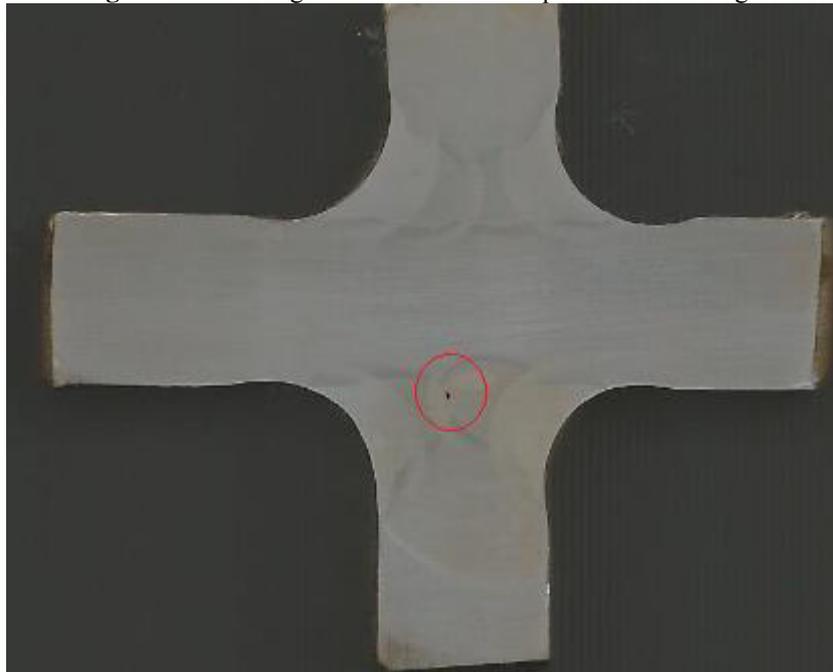
Por fim, retornando a análise dos resultados em fadiga, devido à recorrente falha na raiz, os dois últimos corpos de prova não foram ensaiados. Tais amostras eram provindas de placas soldadas em que o problema já havia sido comprovado (houve ruptura na raiz em corpos de prova vizinhos).

Por fim, mesmo tendo obtido alguns resultados inesperados, o estudo comprovou a viabilidade da aplicação de processos de tratamento do cordão de solda, tendo como prova a migração do sítio de falha para a raiz, esta também propícia à falha, porém, com número de ciclos de carga sensivelmente maior.

Tabela 18 – Superfícies de ruptura das amostras submetidas à retificação na face da solda.

Amostra 3S5	Amostra 6S1	Amostra 2S1
1053206 ciclos 85 kN Falha na raiz	1033099 ciclos 87 kN Falha no metal base	444424 ciclos 85 kN Falha na raiz
		

Figura 50 – Macrografia da amostra 3S3 após ensaio de fadiga.



5 CONCLUSÃO

Devido aos problemas na raiz da união não foi possível obter um conjunto de dados estatisticamente robusto, como inicialmente almejado. Porém, os resultados obtidos representam importantes indícios no seguinte sentido:

- a) A aplicação dos processos de usinagem no flanco e na face do cordão propiciou aumento significativo da vida em fadiga.
- b) A ruptura prematura das peças originais foi ocasionada pela sobreposição dos efeitos causados pela nucleação de microtrincas presentes na região de ruptura, com a eventual excentricidade e inclinação apresentadas pelas abas após a soldagem. Tal fato indica a importância do controle e da especificação de parâmetros de aceitabilidade desses defeitos geométricos em juntas cruciformes de penetração completa.
- c) Na amostras originais, que não sofreram processo de usinagem posterior à soldagem, os efeitos negativos atribuídos ao flanco do cordão de solda se sobrepuseram aos da inclusão na raiz, anteriormente constatada.
- d) O tamanho da inclusão na raiz não é determinante para que uma união suporte menos ciclos que outra, pois há influência de outros fatores associados.
- e) Para aumentar a confiança dos resultados, novos corpos de prova devem ser testados em trabalhos futuros, devido a dispersão elevada apresentada pelos mesmos.

- f) Por fim, todas as amostras apresentaram considerável deformação plástica na região final de colapso, o que evidencia a elevada tenacidade à fratura apresentada pelo aço ASTM A131 AH36.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WELDING SOCIETY. **AWS D1.1**: Structural Welding Code - Steel. 22 ed. Miami: AWS, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E739 – 10 – Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain – Life (ε-N) Fatigue Data**. ASTM International, West Conshohocken, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A131 – 13 – Standard Specification for Structural Steel for Ships**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

BRANCO, C. M. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.

BRANCO, C. M.; INFANTE, V.; BAPTISTA, R.. Fatigue behaviour of welded joints with cracks, repaired by hammer peening. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, [s.l.], v. 27, n. 9, p.785-798, set. 2004. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-2695.2004.00777.x>.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 7608**: Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Products. 2 ed. London: BSI Standards Limited, 2014. 140 p.

BAPTISTA, R.; INFANTE, V.; BRANCO, C.m.. Study of the fatigue behavior in welded joints of stainless steels treated by weld toe grinding and subjected to salt water corrosion. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 30, n. 3, p.453-462, mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.04.011>

CACCESE, V. et al. Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes. **Marine Structures**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.1-22, jan. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.07.002>.

DET NORSKE VERITAS. **DNV - RP - C203: Fatigue Design of Offshore Steel Structures**. 2 ed. Oslo: DNVGL, 2011. 176 p. Disponível em: <<https://www.dnvgl.com/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

EUROCODE 3 EN 1993. **Design of steel structures: 1.9 – Fatigue**.

FUNES, Gabriel Xavier; BIANCHI, Kleber Eduardo; AMARO, Priscila Machado. Estudo do efeito do toe grinding na resposta em fadiga de juntas cruciformes feitas de aço ASTM A131 grau AH36. *Matéria* (rio de Janeiro), [s.l.], v. 23, n. 1, p.1-10, 5 mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0296>.

HUGHES, Steven E.. **A Quick Guide to Welding and Weld Inspection**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited And Matthews Engineering Training Limited, 2009.

HAAGENSEN, P. J.. Fatigue strength improvement methods. In: MACDONALD, Kenneth A.. **Fracture and fatigue of welded joints and structures**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2011. Cap. 11. p. 297-329.

HAAGENSEN, P. J.; MADDOX, S. J. **IIW Recommendations on Methods for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints: IIW - 2142 - 10**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013.

HAAGENSEN, P. J.; MADDOX, S. J. **IIW Recommendations on Post Weld Improving of Steel and Aluminium Structures: XIII - 1815 - 00**. 2006.

HOBACHER, A. F. **IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components**. Second Edition. Villepinte, France. 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. **ISO/TR 14345. Fatigue – Fatigue testing of welded components – Guidance**. Suíça, 2012.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 6892 – 1. Metallic Materials – Tensile Testing – Part 1: Method of Test at Room Temperature.** First Edition. ISO: Geneva, Switzerland, 2009.

KIRKHOPE, K. J.; BELL, R.; CARON, L. **Weld detail fatigue life improvement techniques.** Springfield: NTIS, 1996.

LAPEÑA, Nelson Arzola de; RÍOS, Oscar Javier Araque de Los. Chord profile influence on the fatigue failure of a t-butt weld joint. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**, [s.l.], v. 22, n. 2, p.196-204, abr. 2014. SCIELO Comision Nacional de Investigacion Cientifica Y Tecnologica (CONICYT). <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-33052014000200006>.

MADDOX, S. J.. **Fatigue strength of welded structures.** 2. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd In Association With The Welding Institute, 1991.

MISHCHENKO, Andrii; SCOTTI, Américo. Tensões Residuais em Soldagem a Arco: Uma Visão Holística. **Soldagem & Inspeção**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.93-112, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2301.10>.

MASHIRI, F.r.; ZHAO, X.l.; GRUNDY, P.. Effects of weld profile and undercut on fatigue crack propagation life of thin-walled cruciform joint. **Thin-walled Structures**, [s.l.], v. 39, n. 3, p.261-285, mar. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8231\(00\)00061-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0263-8231(00)00061-6).

NISHIDA, Shin-ichi. **Failure Analysis in Engineering Applications.** Oxford: Butterworth-heinemann Ltd, 1992.

OKUMURA, Toshie; TANIGUCHI, Célio. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** Rio de Janeiro: LTC, 1982.

PHILLIPS, David H.. **Welding Engineering: An Introduction.** Chichester: Jhon Wiley & Sons, Ltda, 2016.

TAI, M.; MIKI, C., Improvement effects of fatigue strength by burr grinding and hammer peening under variable amplitude loading. **Welding in the World**, v. 56, n. 07, 2012.

TSAI, Chon L.; KIM, Dong S.. Understanding Residual Stress and Distortion in Welds: An Overview. In: FENG, Zhili. **Processes and Mechanisms of Welding Residual Stress and Distortion**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. Cap. 1. p. 3-31.

ZHANG, Yan-hui; MADDOX, Stephen J.. Fatigue life prediction for toe ground welded joints. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 31, n. 7, p.1124-1136, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.01.003>.

YANG, Xinjun; LING, Xiang; ZHOU, Jianxin. Optimization of the fatigue resistance of AISI304 stainless steel by ultrasonic impact treatment. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 61, p.28-38, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2013.12.003>.

YILDIRIM, Halid Can. Review of fatigue data for welds improved by tungsten inert gas dressing. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 79, p.36-45, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.04.017>.

YE, N.; MOAN, T.. Improving fatigue life for aluminium cruciform joints by weld toe grinding. **Fatigue & Fracture Of Engineering Materials And Structures**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.152-163, fev. 2008. Wiley-Blackwell. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01210.x>.

ZHANG, Yan-hui; MADDOX, Stephen J.. Fatigue life prediction for toe ground welded joints. **International Journal Of Fatigue**, [s.l.], v. 31, n. 7, p.1124-1136, jul. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2009.01.003>.