

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA NAVAL

ELPIDIO MOURA FALEIROS LIMA

**ANÁLISE DE FALHAS EM PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR NA
INDÚSTRIA NAVAL UTILIZANDO FMEA**

Joinville, 2015

ELPIDIO MOURA FALEIROS LIMA

**ANÁLISE DE FALHAS EM PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR NA
INDÚSTRIA NAVAL UTILIZANDO FMEA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval no Curso de Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Doutor Luis Fernando Peres Calil
Co-Orientador: Doutor Tiago Vieira da Cunha

Joinville, 2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Lima, Elpidio Moura Faleiros
ANÁLISE DE FALHAS EM PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME
TUBULAR NA INDÚSTRIA NAVAL UTILIZANDO FMEA / Elpidio Moura
Faleiros Lima ; orientador, Luis Fernando Peres Calil ;
coorientador, Tiago Vieira da Cunha. - Joinville, SC, 2015.
121 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville.
Graduação em Engenharia Naval.

Inclui referências

1. Engenharia Naval. 2. soldagem com arame tubular. 3.
FMEA. 4. retrabalho. 5. construção naval. I. Calil, Luis
Fernando Peres. II. Cunha, Tiago Vieira da. III.
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em
Engenharia Naval. IV. Título.

ELPIDIO MOURA FALEIROS LIMA

**ANÁLISE DE FALHAS EM PROCESSO DE SOLDAGEM COM ARAME TUBULAR NA
INDÚSTRIA NAVAL UTILIZANDO FMEA**

Esse Trabalho de Graduação foi julgado adequado para a obtenção do título de “Engenheiro Naval”, e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville, 04 de Dezembro de 2015

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.
Coordenador do Curso

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Luis Fernando Peres Calil, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Tiago Vieira da Cunha, Dr. Eng.

Prof. Thiago Pontin Tancredi, Dr. Eng.

Ao meu pai (*in memoriam*), que
foi o maior professor que tive e
me motivou a vencer todas as
dificuldades mesmo distante.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, porque uma pessoa sem fé é uma pessoa sem esperanças.

Ao meu pai, João Luiz, e minha mãe, Vânia, pelo apoio e por tudo que sempre fizeram por mim durante minha vida pessoal e acadêmica. Devo a eles toda a educação para a formação do meu caráter.

Ao meu orientador, Luis Fernando Peres Calil, que me apoiou durante a graduação e na realização deste trabalho, pelas correções, orientações, incentivos e pela amizade. E ao meu co-orientador Tiago Vieira da Cunha, pelas orientações e contribuições.

Ao estaleiro e colaboradores por terem acreditado no trabalho e fornecido todo o apoio necessário para sua realização.

Às minhas irmãs, Vicky, Carol e Júlia pelo companheirismo nos anos de convivência diária, e me apoiaram nos momentos difíceis mesmo à distância.

Aos meus amigos, Guilherme Becker e Ronan Michels, que foram como irmãos, presentes nos momentos tristes e alegres dessa caminhada longe de casa.

Aos meus amigos de Navegantes, José, Everton, Tiago, Vinicius, Hugo, Thales, Ricardo e Ferrari pelo apoio e contribuições ao trabalho.

À minha segunda família em Joinville, que me apoiou e esteve do meu lado durante todos esses anos da graduação.

Por fim, agradeço à todos que de alguma forma ajudaram no trabalho ou na minha graduação.

RESUMO

Dada a atual competitividade na indústria naval, vê-se a importância da eficiência na produtividade, e o retrabalho ainda é um gargalo que deve ser eliminado. Este trabalho mostra uma análise de falhas em processos de soldagem com arame tubular (FCAW) em juntas estanques na construção naval. Os modos de falha discutidos são descontinuidades e variações no processo, que geram um não cumprimento de normas aplicadas ou falta de estanqueidade na junta. A técnica Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) é utilizada, para tal análise, em soldas de porta de visitas e juntas de ângulo. Um experimento em bancada é feito de forma a avaliar as ações propostas e recomendar parâmetros desejáveis do processo. Nota-se que a falta de padronização gera margem para falhas e as principais causas estão relacionadas à falta de limpeza na junta; deficiência nas emendas dos cordões devidas principalmente a obstáculos na junta e falta de planejamento da sequência de soldagem; variações nas variáveis dentro dos limites estabelecidos na EPS (Especificação de Procedimento de Soldagem) que permitam a incidência de descontinuidades. Falta de penetração mostra-se um modo de falha importante, devido principalmente a sua dificuldade de detecção.

Palavras-chave: soldagem com arame-tubular, FMEA, estanqueidade, retrabalho, construção naval

ABSTRACT

Considering the current competitiveness in shipbuilding industry, the importance of efficiency in productivity is evident, and rework is still a big issue that must be eliminated. This paper presents a failure analysis in flux-cored arc welding (FCAW) processes in watertight weld joints in shipbuilding. Discussed failure modes are discontinuities and variations in the welding process, which might fail to comply with applicable rules or lack of water tightness in the joint. The Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) technique is used for this analysis, in hatches and fillet or corner joints. An experiment is made in order to evaluate the proposed actions and to recommend desirable process parameters. It is noticed that the lack of standardization provides a margin for failure, and the main causes are related to lack of cleanliness in the joint; deficit in the weld beads seams, primarily due to obstacles in the joint and to a lack of welding sequence planning; welding variables variations among the specified values in the Welding Procedure Specification (WPS) which enables the incidence of discontinuities. Lack of penetration appears to be a major failure mode, mainly due to its difficulty of detection.

Keywords: flux-cored arc welding, FMEA, water tightness, rework, shipbuilding

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	SOLDAGEM NA INDÚSTRIA NAVAL	16
2.1	SOLDAGEM A ARCO COM ARAME TUBULAR (FCAW – <i>FLUX-CORED ARC WELDING</i>)	17
2.2	FALHAS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	21
2.2.1	Respingos	22
2.2.2	Deficiência na Emenda dos Cordões	24
2.2.3	Falta de Fusão	25
2.2.4	Falta de Penetração	26
2.2.5	Porosidade.....	28
2.2.6	Trincas ou Rachaduras.....	29
2.2.7	Distorção.....	30
2.2.8	Inclusão de escória	31
2.2.9	Mordeduras.....	33
2.2.10	Aspecto Irregular do Cordão de Solda	34
2.3	CLASSIFICAÇÃO DE SOLDAS NA INDÚSTRIA NAVAL	36
2.3.1	Testes de Vazamentos	38
3	ESTUDO DE CASO	41
4	APLICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO	44
4.1	APRESENTAÇÃO DA EMPRESA	44

4.2 UNIÕES ESTUDADAS.....	46
4.2.1 Solda nas Portas de Visita	47
4.2.2 Soldas em Juntas em Ângulo	53
4.3 APLICAÇÃO DA FMEA.....	56
4.3.1 Função da Junta.....	58
4.3.2 Modos de Falha	58
4.3.3 Efeitos de Falhas.....	59
4.3.4 Controles Atuais de Detecção.....	59
4.3.5 Controles Atuais Preventivos ou Corretivos	60
5 RESULTADOS	61
5.1 FMEA	61
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS	81
5.2.1 Solda nas Portas de Visita	83
5.2.2 Soldas de Juntas em Ângulo	87
5.3 AVALIAÇÃO DAS AÇÕES PROPOSTAS.....	89
6 CONCLUSÃO	117
REFERÊNCIAS.....	117
ANEXOS	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Ângulo de variação tolerado para soldas em juntas de ângulo no sentido de avanço da tocha, à esquerda o ângulo é considerado negativo; à direita positivo.....	21
Figura 2 (1) concavidade na solda ou deposição de metal insuficiente; (2) inclusão no cordão de solda; (3) trinca; (4) metal base; (5) falta de penetração.	22
Figura 3 Padrão de respingos proposto na norma <i>47 Shipbuilding Repair and Quality Standard</i>	23
Figura 4 Deficiência na emenda dos cordões feita de forma exagerada, a fim de ilustrar a descontinuidade	24
Figura 5 Falta de fusão em uma junta em ângulo	26
Figura 6 Cordão de solda com concavidade e falta de penetração.....	27
Figura 7 Sequência de Soldagem com distorções minimizadas	31
Figura 8 Preparação de chanfro recomendada na norma IACS <i>47 Shipbuilding and Repair Quality Standard</i> , a faixa de valores para o ângulo θ recomendado é de 45°-60°.	33
Figura 9 Tolerância à mordeduras para juntas de topo; D deve ser menor ou igual a 0,5 mm para reforçadores, e menor ou igual a 0,8 mm para outras aplicações.....	34
Figura 10 Tolerância à mordeduras para juntas em ângulo, D deve ser menor ou igual a 0,8 mm	34
Figura 11 Exemplos de perfis incorretos de solda.....	35
Figura 12 Ângulo apropriado de trabalho para soldagem nas juntas em ângulo	36
Figura 13 Padrão de reforço do cordão de solda proposto na norma <i>47 Shipbuilding and Repair Quality</i> para juntas de topo, o padrão para o ângulo “ θ ” é menor ou igual a 60°, sendo que o limite é aceitável é de 90°. A altura do reforço “h” deve ser menor ou igual a 6 mm	37
Figura 14 Padrão de cordão de solda proposto na norma <i>47 Shipbuilding and Repair Quality</i> para juntas em ângulo, “s” é o comprimento da perna especificado na EPS e “a” é a espessura da garganta também especificada na EPS.....	37
Figura 15 Coluna diferencial de água utilizada nos testes pneumáticos e hidrostáticos	39

Figura 16 Pulverização de água e sabão nas soldas estanques durante um teste de pressão.....	40
Figura 17 Embarcação do tipo PSV	44
Figura 18 Arranjo geral de uma embarcação do tipo PSV, ilustra alguns tanques presentes na embarcação	46
Figura 19 Típica porta de visita de aço galvanizado nas embarcações do estaleiro	47
Figura 20 Limpeza da camada galvanizada nas áreas periféricas da porta de visita, onde será soldada	48
Figura 21 Porta de visita galvanizada montada.....	49
Figura 22 Pontos de fixação na parte externa da porta de visitas.....	49
Figura 23 Pontos de fixação com descontinuidades	50
Figura 24 Ponto de fixação com poros e escória	51
Figura 25 Modelo de porta de visitas comum nas embarcações, com vazamento indicado no teste de pressão.....	52
Figura 26 Correção de aberturas no chanfro segundo a norma 47 Shipbuilding and Repair Quality Standard, a abertura de raiz “G” deve ser menor ou igual a 3 mm, caso esteja entre 3 e 5 mm, deve-se aumentar a perna da solda em “G-2 ”mm	53
Figura 27 Correção de chanfro para aberturas de raiz acima de 5 mm e menor do que uma vez e meia a espessura da chapa, deve-se chanfrar com ângulo de 30° a 45° e utilizar cobre-junta.	54
Figura 28 Ilustra alguns locais propícios de vazamentos	55
Figura 29 Vazamento durante um teste em junta de ângulo.....	56
Figura 30 Causas prováveis (porta de visitas)	84
Figura 31 Ações Recomendadas Preventivas para a solda nas portas de visitas	86
Figura 32 Causas (soldas de juntas em ângulo)	88
Figura 33 Ações Recomendadas Preventivas (Junta em ângulo).....	89
Figura 34 Preparação de junta anterior à montagem	90
Figura 35 Montagem da peça com a junta preparada.....	91
Figura 36 Travamento das peças com pontos em locais acessíveis a lixadeira	92
Figura 37 Goivagem da junta de topo na posição sobre-cabeça	93
Figura 38 Junta após ser goivada, ainda sem acabamento de esmeril.....	94

Figura 39 Acabamento e preparação da junta após a goivagem	94
Figura 40 Junta de topo chanfrada pronta para soldagem	95
Figura 41 Preparação da junta de topo com goivagem e acabamento com a lixadeira .	95
Figura 42 Soldagem da junta de topo sobre-cabeça	96
Figura 43 Soldagem vertical ascendente da junta de topo.....	96
Figura 44 A figura ilustra os passes de acabamento da solda de topo, e recomendações propostas com fechamento e abertura de arco em locais de acesso à lixadeira, para que possa ser feito o acabamento	98
Figura 45 Preparação da junta	99
Figura 46 Limpeza da junta com escova rotativa, e passes com fechamento e abertura de arco em posições distintas	99
Figura 47 Sequência de soldagem proposta.....	101
Figura 48 Continuidade do passe de raiz.....	101
Figura 49 Continuidade do segundo passe conforme sugerido na sequência de soldagem.....	102
Figura 50 Continuidade do segundo passe de solda	102
Figura 51 Sequência de solda encerrada no pé de galinha	103
Figura 52 Remoção da escória em locais de acesso restrito à lixadeira	104
Figura 53 Preparação da junta em locais restritos a lixadeira	104
Figura 54 Preparação da junta anterior à montagem da porta de visita.....	105
Figura 55 Suporte Galvanizado da porta de visita lixado, preparado para montagem .	106
Figura 56 Montagem da porta de visita, com pontos de fixação no interior da mesma	106
Figura 57 Ilustra a obstrução do acesso da lixadeira	107
Figura 58 Ilustra a obstrução do acesso da lixadeira à parte de trás do suporte	107
Figura 59 Acabamento nos locais de fechamento e abertura de arco	109
Figura 60 Unha de Acabamento feita com retífica na porta de visitas	109
Figura 61 Acabamento e continuidade do cordão	110
Figura 62 Soldagem na porta de visitas	110
Figura 63 Ilustra a não-sobreposição dos locais de abertura e fechamento de arco entre passes.....	111

Figura 64 Remoção dos pontos de montagem no interior da porta após a soldagem externa	111
Figura 65 Inspeção de Líquido penetrante na solda da porta de visitas	112
Figura 66 Teste de pressão no tanque protótipo.....	113
Figura 67 Pressurização do tanque durante o teste.....	113
Figura 68 Teste de pressão.....	114
Figura 69 Ângulo de inclinação no sentido transversal de avanço da tocha	116
Figura 70 Tecimento do cordão em soldas ascendentes	116

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita.....	63
Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo	71
Quadro 3 Especificação de procedimento interno.....	115

1 INTRODUÇÃO

A Indústria Naval tem papel de grande importância no cenário mundial e nacional. Além de ser geradora de empregos e desenvolvimento nas regiões que se localiza, de acordo com o Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval – SINAVAL (2014), cerca de noventa e cinco por cento do comércio mundial é realizado por via marítima ou hidrovias. O litoral brasileiro possui cerca de oito mil quilômetros, além de um potencial fluvial privilegiado, o que ressalta o quanto o transporte marítimo e fluvial nacional tem a crescer.

Um grande desafio para a indústria naval nos dias de hoje é encontrar mão-de-obra especializada. A defasagem de anos de estaleiros fechados no âmbito nacional fez com que uma migração de profissionais para outras indústrias acontecesse. Houve também um envelhecimento da mão-de-obra especializada e é de grande importância para empresas deste setor que o seu pátio seja ocupado com profissionais capazes, uma vez que erros no processo de construção podem trazer grandes prejuízos.

De acordo com Estefen *et al.* (2013), o retrabalho na indústria naval representa cerca de 25% do custo da obra e Ribeiro (2009) mostra que um dos principais problemas encontrados em estaleiros é o índice de retrabalho na área de soldagem. Mesmo utilizando profissionais qualificados e procedimentos já conhecidos e certificados, a incidência de problemas é grande, vê-se estruturas com grandes deformações, distorções e outras discontinuidades que, na maioria das vezes, exigem que a união seja completamente refeita.

Este cenário reforça a importância da documentação de falhas e erros nos processos, pois com esta ficaria facilitada a capacitação de profissionais para tarefas bem específicas. A experiência, ao invés de se perder no tempo e envelhecer com os profissionais, ficaria sintetizada e disponível, evitando erros comuns que são passados por gerações nos estaleiros e continuam gerando necessidade de retrabalho. Assim, como a documentação de propostas de ações preventivas ou que mitiguem os efeitos de falhas.

Uma forma de promover a solução desse problema é uma análise detalhada do processo nas áreas onde se vê maior necessidade, maior incidência do não cumprimento da função esperada das juntas, seguido do desenvolvimento de um banco de dados que permita uma identificação das causas dos efeitos. Para tanto, pode-se utilizar técnicas de análise de falha, a exemplo da Análise de Modo e Efeito de Falha – FMEA.

A indústria Naval de Santa Catarina, cuja vocação é a manufatura e reparo de empurradores e rebocadores, embarcações de apoio (*offshore*) e de pesca, teve uma boa fase, devido a exploração do pré-sal, a qual a Petrobras contratou o fretamento e a operação de 24 embarcações que serão construídas nos estaleiros do estado, movimentando mais de quatro bilhões de reais de acordo com a revista Portos e Navios (2014), mas passa por um período de incertezas e turbulências devido a problemas conjunturais na estatal.

Em boa fase ou não, vê-se o problema descrito presente. Na construção naval *offshore* a soldagem fora de posição é muito utilizada nos processos de edificação de embarcações, e geralmente é onde se vê o maior índice de defeitos, como mostrado por Cotta (2014) em um estudo de caso.

Assim sendo, neste trabalho procura-se analisar um processo de soldagem já consolidado em estaleiros, no caso soldagem com arame tubular, a fim de diminuir as discontinuidades nas junções estudadas, aumentando a eficiência do processo em questão, com enfoque em um ganho na qualidade e diminuição das horas/homem gastas. Contudo, não é objetivo deste trabalho solucionar todos os problemas de soldagem presentes no estaleiro, tampouco a análise metalográfica das juntas soldadas. Mas procura-se desenvolver um estudo de caso. Com a aplicação da FMEA espera-se que a função desejada da união seja cumprida, mesmo que fiquem discontinuidades, as mesmas não se tornem falhas, satisfazendo as normas aplicadas.

Ficando a seguinte pergunta a ser respondida neste trabalho: “Como melhorar/promover a estanqueidade das soldas estanques nas portas de visita, tanques e anteparas de forma que o retrabalho seja evitado?”.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar falhas no processo de soldagem com arame tubular a fim de ganhar produtividade e minimizar ou eliminar o retrabalho. Para tanto, são analisados soldas estanques do chapeamento externo, tanques e portas de visita, utilizando a técnica FMEA.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar os processos de soldagem críticos para o estaleiro;
- Caracterizar os processos selecionados;
- Estudar práticas existentes no estaleiro e parâmetros referência nas especificações de procedimento de soldagem (EPS);
- Elaborar FMEAs para os processos selecionados;
- Propor ações de melhoria nos processos;
- Explicitar os motivos geradores de falhas;
- Realizar experimentos em bancada para identificar os parâmetros desejáveis para cada união;

2 SOLDAGEM NA INDÚSTRIA NAVAL

Cordões de solda, além de serem concentradores de tensão, podem gerar descontinuidades que comprometam a impermeabilização da junta. Este trabalho busca explicitar os motivos para tal evento e vencer ou diminuir a ocorrência das falhas, de forma a melhorar a eficiência produtiva do estaleiro.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2010), descontinuidade em soldas é a interrupção das estruturas típicas, causando heterogeneidade das propriedades físicas, mecânicas ou metalúrgicas. A mesma só é considerada defeito quando por sua natureza, ou efeito acumulado tornar a peça inaceitável, não satisfazendo os requisitos mínimos da norma aplicada ou a função esperada da junção.

No contexto da análise de falha, por sua vez, defeito e falha são definidos respectivamente como "Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos" e "Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida" (ABNT, 1994, pg. 3). Assim, o que tipicamente se chama de defeito na soldagem pode ser considerada uma falha do processo, pois compromete o desempenho do item de forma inaceitável.

Por outro lado, defeito no contexto da análise de falha incluem descontinuidades menores, que não comprometem o desempenho do item.

Em decorrência desta incompatibilidade na definição de "defeito" no contexto da soldagem e no contexto da análise de falha. Neste trabalho optou-se por adotar a terminologia adotada nas análises de falha, dando ênfase nas descontinuidades que se caracterizem como modos de falha para as soldas analisadas.

A pergunta proposta neste trabalho, pode ser respondida através de diversas abordagens. O método utilizado será uma combinação da proposição de Yin (2010) de estudo de caso com a técnica FMEA para análise e coleta de dados, ambos apresentados no Capítulo 3.

Dentro do processo de construção naval *offshore*, a soldagem é a principal forma de união utilizada para fazer a ligação permanente de peças metálicas. De acordo com Ribeiro (2000), entre os processos mais utilizados em estaleiros estão o arco submerso, arame tubular, MIG/MAG e eletrodo revestido. No presente trabalho, será feito um estudo mais detalhado do segundo pois é o processo tipicamente utilizado nas uniões a serem estudadas.

Procedimentos para soldagem de quaisquer juntas, assim como especificações de processos, tipos de arame-eletrodo, chanfros e técnicas em geral estão propostas no Apêndice 9, da Parte 2 da norma *Rules For Materials and Welding* (ABS, 2014), a qual acorda com o padrão estabelecido pela *International Association of Classification Societies (IACS)* na norma *47 Shipbuilding and Repair Quality Standard*. (2013). Há outras normas equivalentes publicadas pelas organizações: *American Weld Society (AWS)*, *European Comitee for Standardization (EN)* , *International Organization for Standardization (ISO)*, *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, *Military Standard (MIL)* e *Japan Welding Engineering Society (JIS)*.

Os testes e ensaios feitos em solda, por classificadoras em embarcações *offshore* estão descritos na Parte 3 da norma *Rules for Building and Classing Steel Vessels Under 90 meters in length* (ABS, 2014).

2.1 SOLDAGEM A ARCO COM ARAME TUBULAR (FCAW – FLUX-CORED ARC WELDING)

Segundo Machado (1996), a história dos processos de soldagem com arames tubulares começou na década de 1920 na Alemanha, porém devido a dificuldade de se controlar a escória líquida, este tipo de processo só se popularizou na década de 50. Fortes (2006) afirma que só se tornaram disponíveis para compra em 1957, com grande crescimento na América do norte nas décadas de 60 e 70.

Neste processo de soldagem, o arco elétrico é estabelecido entre o eletrodo tubular, contínuo, consumível e a peça de trabalho. A proteção do arco e da poça de fusão é feita pelo fluxo contido internamente no arame-eletrodo consumível, podendo

ter uma proteção auxiliar fornecida por um fluxo de gás de fonte externa. É caracterizado por sua alta produção e versatilidade. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009). De acordo com Machado (1996), na posição horizontal a taxa de deposição de material pode chegar até 11kg/h. Na posição sobre-cabeça, a produtividade com arames tubulares é cerca de 20% maior do que com arames maciços contabilizando o tempo global de trabalho na junta, afirma Meller *et al.* (2011).

Modenesi, Marques e Bracarense (2009) relatam que além da proteção contra contaminação atmosférica, os fluxos contidos no arame podem ter outras funções, como melhorar a estabilidade do arco, adicionar elementos desoxidantes, refinar o metal de solda e adicionar elementos de liga.

É um processo semiautomático no qual alimentação de arame eletrodo é feita por um alimentador motorizado, o que permite uma extensão do cordão de solda maior do que em processos que não possuem esse mecanismo, como a soldagem com eletrodo revestido. Fica ao soldador a responsabilidade de iniciar o processo, conduzir a tocha ao longo da junta e interrompê-lo (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009).

Ainda Modenesi, Marques e Bracarense (2009), afirmam que este processo possui como principais vantagens a alta produtividade e alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição e rendimento, alta versatilidade, possibilidade de ajustes de composição química do metal de solda e facilidade de operação em campo. A aplicação é em aços carbono, de baixa liga e inoxidáveis. Bracarense, Soragi e Felizardo (2006) afirmam que o tempo para soldagem de um quilômetro de tubulação é cerca de 56% e 14% maior utilizando-se eletrodo revestido e MIG/MAG respectivamente, quando comparados ao processo FCAW.

De acordo com Machado (1996) a faixa de espessuras de arame varia de 0,8 milímetros utilizados com fonte de tensão e alimentador de velocidade constante, até arames de maior diâmetro como 2,4 milímetros utilizados com fonte de corrente constante e alimentadores de velocidade variável.

O processo combina pontos fortes da soldagem por arco submerso, como a combinação dos ingredientes do fluxo no núcleo com as vantagens da soldagem empregando dióxido de carbono como gás de proteção, a saber: produzir soldas de alta

qualidade, boa estabilidade do arco e uma controlada quantidade de respingos (FORTES, 2006) .

Por outro lado, segundo Wainer, Brandi e Mello (2010), entre as desvantagens estão: as dimensões do bocal, superiores ao diâmetro de um eletrodo revestido, que muitas vezes limitam a sua utilização em locais de difícil acesso; a necessidade de proteger a soldagem de correntes de ar; a grande emissão de raios ultravioleta; a complexidade do equipamento que o torna mais caro e menos portátil do que em alguns outros processos como eletrodo revestido

Machado (1996) formula que todo processo de união deve satisfazer os seguintes requisitos: fornecer energia para realizar a união; possuir mecanismos para remover contaminação das superfícies a serem unidas e permitir que os fenômenos envolvidos sejam controlados. Ainda Machado (1996) define as principais variáveis no processo: tensão do arco, corrente de soldagem, velocidade de soldagem, distância entre o bico de contato e a peça de trabalho. Rodrigues (2005) cita ainda a proteção gasosa (quando utilizada) e a inclinação da tocha. Outros fatores secundários de grande importância no produto final do processo são: movimento oscilatório ou contínuo da tocha, posição de soldagem, condições superficiais da peça entre outros.

Martins Filho (2012) define a tensão do arco como a diferença de potencial entre o eletrodo e a peça de trabalho. Essa é proporcional ao comprimento do arco, Machado (1996) relata que esse parâmetro tem grande influência no formato do cordão, produzindo uma maior convexidade quando baixo, e um cordão mais largo quando mais alto.

A corrente de soldagem está relacionada de maneira diretamente proporcional à velocidade de alimentação do arame. Mohamat *et al* (2012) afirma que este parâmetro tem grande influência na penetração, associando-se de maneira diretamente proporcional, quanto maior a corrente, maior a penetração. Machado (1996) afirma que a taxa de deposição também é influenciada diretamente por este parâmetro. Rodrigues (2005) afirma que valores muito elevados de corrente resultam em poças de fusão de dimensões exageradas, o que pode ocasionar mordeduras.

Rodrigues (2005) relata a influência da velocidade de soldagem na energia global do processo. A qual afirma que quanto menor a velocidade de soldagem, maior

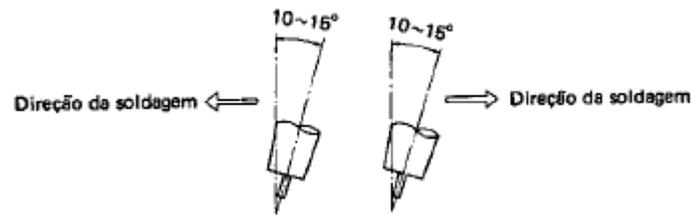
a quantidade de calor cedido à peça por unidade de comprimento, logo há um aumento de penetração. Araújo (2004) relata que velocidades muito baixas resultam em uma poça de fusão muito grande, o que pode fazer com que a escória flutue à frente da poça de fusão, podendo ocasionar inclusões não-metálicas no metal soldado.

Em equipamentos com fonte do tipo tensão constante, a distância entre o bico de contato e a peça não influencia no comprimento de arco, porém afeta a eficiência térmica do processo, pois quanto maior o comprimento livre do arame-eletrodo, maior seu aquecimento devido ao efeito *Joule*. A corrente é influenciada por esta variável, de maneira inversamente proporcional, conforme a distância aumenta a corrente de soldagem diminui, pois a resistência elétrica do arame tem maior magnitude (Machado, 1996). O mesmo autor ainda recomenda um distanciamento entre a peça e o bocal de até 40 milímetros quando proteção gasosa auxiliar é utilizada, pois a mesma pode ser prejudicada com uma distância grande do bocal à peça. Rodrigues (2005) afirma que a taxa de deposição é bastante influenciada por esta variável, pois o aumento no aporte térmico do processo permitindo uma maior taxa de fusão de arame.

Segundo Rodrigues (2010), o gás de proteção exerce influência sobre a morfologia do cordão, nas características do arco, modo de transferência metálica e propriedades mecânicas do cordão. Garcia e Scotti (2009) afirmam que para soldagem com arame tubular, a geração de respingos é relativamente menor em misturas de argônio e dióxido de carbono, quando comparadas a utilização somente do segundo.

A inclinação da tocha influencia na distribuição de calor do arco, na penetração e geometria do cordão (Rodrigues, 2005). Em alguns casos perde-se o controle sobre a poça de fusão, e algumas descontinuidades como inclusão de escória podem ocorrer. Okumura e Tanigushi (1982) recomendam um ângulo de 90 graus com relação à peça para soldas de topo, enquanto para soldas em ângulo, o ângulo com relação à horizontal deve ser reto idealmente, mas inclinações de até 15 graus são toleráveis caso deseja-se alterar a geometria ou penetração do cordão, a Figura 1 ilustra a inclinação da tocha no sentido de avanço. Com relação a vertical, Kobe Steel Ltd. (2015) propõe que a tocha deve variar entre 45 e 30 graus, ilustrada na Figura 12. Modenesi (2000) recomenda ângulos semelhantes, ilustrados na Figura 69.

Figura 1 Ângulo de variação tolerado para soldas em juntas de ângulo no sentido de avanço da tocha, à esquerda o ângulo é considerado negativo; à direita positivo



Fonte: Okumura e Tanigushi (1982)

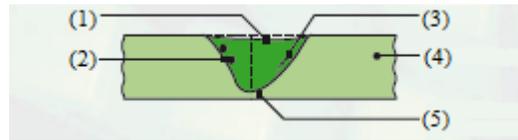
Outros fatores como por exemplo a abertura de arco são críticos nos processos de soldagem e podem causar imperfeições na superfície do metal (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010) pois o arco passa por um período de instabilidade nos primeiros segundos do processo até que atinja uma estabilidade nos parâmetros de trabalho, resultando em uma adição de material heterogênea com relação ao restante do cordão podendo vir a caracterizar defeito ou descontinuidades.

2.2 FALHAS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM

As falhas que virão a ser utilizadas posteriormente neste trabalho estão detalhadas nesta seção.

Uma variedade de descontinuidades em processos de soldagem, são mostradas por Wainer, Brandi e Mello (2010) ou por Modenesi, Marques e Bracarense (2009) de maneira mais aprofundada. Neste trabalho algumas descontinuidades são descritas como modos de falha, devido ao fato de poderem gerar um não cumprimento da função esperada das juntas analisadas. Também são listados como modos de falha alguns fatores operacionais os quais podem não ser considerados descontinuidades pela literatura. A Figura 2 ilustra algumas descontinuidades comuns em soldagem, que podem ser caracterizadas como falhas.

Figura 2 (1) Concavidade na solda ou deposição de metal insuficiente; (2) inclusão no cordão de solda; (3) trinca; (4) metal base; (5) falta de penetração.



Fonte: Adaptado pelo autor de Kalpakijan e Schmid (2008)

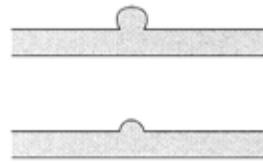
2.2.1 Respingos

Garcia e Scotti (2009) afirmam que respingos são desperdício de material que poderia ter sido depositado na junta e fazem com que seja gasto tempo de trabalho em limpeza e a adesão dos mesmos à peça soldada geram uma dificuldade operacional à parede do bocal prejudicando a saída do gás de proteção. Dantas e Costa (2004) relatam que a geração de respingos tem grande influência na qualidade e produtividade final da solda.

Segundo o tópico 5.15, parte 2, capítulo 4, seção 1 da norma *Rules for Materials and Welding* ABS (2014) a superfície dos cordões de solda e arredores devem estar livres de respingos.

A presença desta descontinuidade geralmente gera reprovação na norma IACS 47 e a remoção é exigida em etapa anterior ao jateamento. Na prática há casos onde essa descontinuidade não é uma falha, como em locais de difícil acesso onde não estão muito aparentes. A Figura 3 ilustra um padrão de respingo proposto pela IACS (2013), o perfil de respingo ilustrado na parte superior é considerado uma falha. A interpretação da norma propõe que os respingos devem ser removidos antes do jateamento com piqueta, espátula ou escova rotativa. Caso sejam encontrados respingos após o jateamento, estes devem ser removidos da mesma forma citada acima. Caso as ferramentas propostas para remoção não consigam retirar a descontinuidade, deve-se esmerilhar os ângulos a fim de deixá-los obtusos como na parte inferior da figura.

Figura 3 - Padrão de respingos proposto na norma 47 *Shipbuilding Repair and Quality Standard*



Fonte: IACS (2013)

A geração de respingos depende de diversos fatores, como o modo de transferência metálica, composição do gás de proteção e a falta de estabilidade do arco (GARCIA; SCOTTI, 2009). Segundo Fortes (2006) misturas de Ar-CO₂ geram menos respingos do que apenas o dióxido de carbono.

O conceito de estabilidade do arco é definido de maneira diferente por diversos autores. Costa (2006) aponta que a estabilidade do arco está diretamente relacionada ao tipo de transferência metálica, o que evidencia a importância de uma boa regulagem dos parâmetros de soldagem. Machado (1996) afirma que a estabilidade do arco é influenciada pela maioria das variáveis de soldagem. Vaidya (2002) define como a frequência de oscilação da poça de fusão; Amin (1983) como o equilíbrio entre a velocidade de alimentação do arame e sua velocidade de fusão; por último Scotti (1998) atribui estabilidade à um formato regular do cordão.

A instabilidade do arco pode estar relacionada a algum parâmetro mal regulado no cabeçote, aterramento mal feito, impurezas na superfície do material, umidade na junta ou arame-eletrodo, inclinação excessiva da tocha ou uma manipulação instável da mesma.

Podem ser evitados com uma boa preparação de junta; armazenamento de arames-eletrodo em estufa; em caso de umidade na peça, o pré-aquecimento desta elimina a umidade presente; utilização do cabeçote ou máquina de solda em boas condições, com bom aterramento.

Segundo Machado (1996), um comprimento de arco muito longo também pode gerar respingos, o que explicita a importância de parâmetros bem regulados conforme especificados na EPS.

2.2.2 Deficiência na Emenda dos Cordões

Na soldagem manual a extensão dos cordões de solda contínuos é menor do que em processos automatizados, tal fato se dá principalmente devido à fadiga do soldador. A união entre um cordão e outro deve ser feita com sobreposição, de forma que não haja falta de fusão entre os cordões e a estrutura da solda se torne contínua e homogênea. Para tal é necessário que seja feito um acabamento nos locais de início e fim do processo, para que a emenda possa ser feita de forma suave sem alterações bruscas na geometria da junta e manipulação da tocha.

Uma deficiência na emenda pode comportar-se como uma trinca, não promovendo a estanqueidade da junta, ou gerando concentração de tensões o que pode fazer com que o cordão de solda falhe mecanicamente. A descontinuidade citada está ilustrada na Figura 4.

Figura 4 Deficiência na emenda dos cordões feita de forma exagerada, a fim de ilustrar a descontinuidade



Fonte: Autor

2.2.3 Falta de Fusão

Falta de fusão é tida quando a fusão entre a zona fundida e o metal de base é incompleta (WAINER; BRANDI; MELLO, 2010). Costuma ocorrer quando o aquecimento do metal presente na junta é insuficiente (falta de energia de soldagem); quando há uma camada de óxido (ferrugem ou carepa) espessa o suficiente para dificultar a fusão do metal base; quando a tocha é manipulada incorretamente, quando não é feita uma limpeza adequada na região da junta ou quando o arco não consegue atingir certas regiões da junta (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009). A Figura 5 ilustra a descontinuidade.

A não-homogeneidade gerada é caracterizada pela ausência de continuidade metalúrgica entre o metal adicionado e o metal base (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009) e costuma trazer como consequências: o aparecimento e propagação de trincas, a redução da seção efetiva da solda e concentração de tensões. Também, pode ocasionar a falta de estanqueidade para a junta, pois a falta de continuidade entre o cordão de solda e o metal base podem servir como via para determinado fluido.

Não há medidas de reparo práticas, deve-se eliminar o cordão e fazer novamente a soldagem da junta, o que explicita a importância de se evitá-la, fazendo uma boa limpeza da junta e um bom dimensionamento da mesma combinados com boas práticas de soldagem. Falta de energia de soldagem pode ser corrigida diminuindo-se a velocidade de condução da tocha e aumentando a corrente ou tensão.

Figura 5 Falta de fusão em uma junta em ângulo



Fonte: Alves e Maiorka (20--?)

2.2.4 Falta de Penetração

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2010), falta de penetração é caracterizada como insuficiência de metal na raiz da solda. Causas práticas são: a manipulação incorreta do eletrodo (o arco deve ser dirigido de forma que ambas chapas sejam aquecidas uniformemente), projeto ineficiente de junta, falta de energia de soldagem (corrente ou tensão insuficiente ou velocidade de soldagem muito elevada), diâmetro do eletrodo excessivo, peça muito fria. Ribeiro (2000) afirma que a causa mais frequente para esta descontinuidade é um ineficiente projeto de junta.

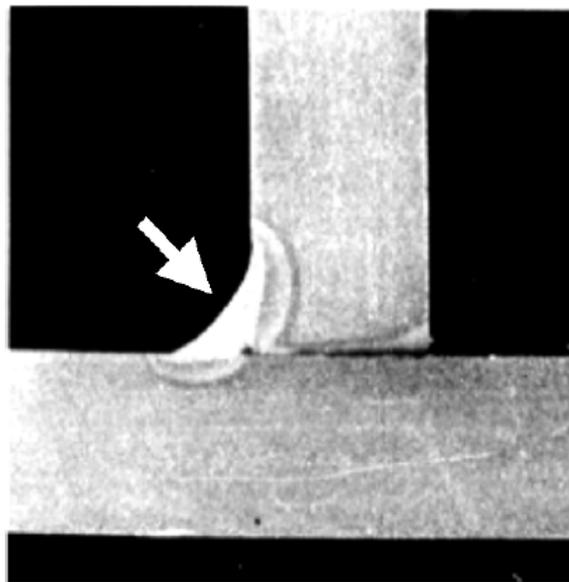
Esta descontinuidade gera concentradores de tensão, reduz a seção útil da solda, pode causar trincas e gerar falta de estanqueidade. Atinge-se uma penetração adequada com uma boa regulagem dos parâmetros, escolha adequada do processo de soldagem e um bom dimensionamento e escolha de junta, associados à uma técnica de soldagem correta. (MODENESI; MARQUES; BRACARENSE, 2009)

De acordo com Mostafa e Khajavi (2006), uma velocidade de soldagem excessiva pode gerar falta de penetração, devido ao menor aporte de calor. Em contrapartida, um aumento da voltagem ou corrente aumentam a energia de soldagem o que aumenta a penetração. O autor ainda afirma que um aumento do comprimento livre do eletrodo aumenta a penetração, pois há uma maior área de contato elétrico o que aumenta a resistência elétrica e gera um acréscimo de temperatura das gotas do metal de adição gerado por efeito Joule.

Mohamat *et al.* (2012) afirma que um aumento na corrente de soldagem aumenta a penetração independente do comprimento do arco, dentro da faixa de valores de valores de corrente de 22 a 30 V. Kobe Steel Ltd. (2015) ilustra que uma inclinação incorreta do eletrodo, ou um comprimento excessivo de arco podem causar falta de penetração, pois o primeiro pode gerar uma não-uniformidade da distribuição de calor, enquanto o segundo uma poça de fusão excessivamente grande o que faz com que o calor seja espalhado e a penetração desejada não ocorra.

A Figura 6 ilustra um cordão de solda com concavidade e falta de penetração. Nota-se que fica um espaço entre o cordão e a peça, que pode ser ocupado por um fluido ou outro corpo estranho. Associada a uma saída do filete de solda como uma deficiência na emenda, poro ou mordedura pode ocasionar um vazamento.

Figura 6 Cordão de solda com concavidade e falta de penetração



Fonte: Kobe Steel Ltd. (2015)

2.2.5 Porosidade

De acordo com Modenesi, Marques e Bracarense (2009), porosidades no metal de solda, podem ser originárias de bolhas de gás aprisionadas pelo metal solidificado durante o deslocamento da poça de fusão, ou serem resultantes de umidade ou contaminações como graxa, tinta, ferrugem, óleo, matéria orgânica presentes tanto na região de soldagem como no eletrodo ou fluxo de gás de proteção.

A proteção gasosa tem papel vital quando se tenta prevenir porosidades no cordão, Machado (2015) mostra de maneira aprofundada os débitos gerados pela falta da mesma e conclui que a influência da proteção gasosa sobre porosidades é significativa. Outros geradores de porosidades comuns são: valores excessivos de tensão ou/e comprimento de arco, pois resultam em consumo indevido de elementos desoxidantes do eletrodo.

Valores baixos de corrente podem causar porosidades também, pois com o menor aporte térmico, a solidificação do metal será mais rápida, podendo aprisionar gases produzidos no processo.

Segundo Ribeiro (2000), quando os metais na junta contém mais de 0,05% de enxofre, e estão na presença do hidrogênio contido na atmosfera do arco, formam-se bolhas de ácido sulfídrico as quais ficam aprisionadas no metal base, da mesma forma o carbono do metal base pode formar monóxido de carbono e ficar aprisionado.

Kim e Park (2005) afirmam que o zinco contido em *primers* utilizados na construção naval possui um ponto de ebulição mais baixo do que a temperatura de fusão do aço. Tal evento, faz com que o zinco tente emergir para a superfície do cordão e possa deteriorar a qualidade da solda quando o trajeto percorrido fica na forma de porosidade.

Há níveis aceitáveis para porosidade, porém em grande quantidade são muito prejudiciais. Pois geram uma diminuição da seção efetiva, são concentradores de tensão, reduzem as propriedades mecânicas do cordão e podem vir a causar falta de estanqueidade.

São detectadas em vários testes executados por sociedades classificadoras como ultrassom, radiografias, líquido penetrante e partícula magnética. Em soldas onde

é feita apenas a inspeção visual o seguinte critério é recomendado pela ABS (2014): poros superficiais devem ser abertos o suficiente para permitir a penetração de tinta, caso contrário devem ser removidos. (tradução nossa)

As ações corretivas para excesso de porosidade não são muito eficientes, para combate de falta de estanqueidade pode-se adicionar mais material, porém é difícil de se corrigir o débito de propriedades mecânicas, o que torna o cordão frágil e mais propício à corrosão, uma vez que estes poros poderão reter umidade. Logo conclui-se que é mais eficiente evitar a porosidade, com boas práticas de soldagem como o uso de materiais limpos e secos, equipamentos em boas condições, um uso de parâmetros de soldagem adequados e boa preparação de junta conforme especificações de procedimento.

Ribeiro (2010) propõe que caso a manipulação do eletrodo esteja incorreta deve-se corrigir a técnica de soldagem. Caso haja excesso de umidade na junta deve-se pré-aquecer a mesma para secá-la e os arames-eletrodo devem ser mantidos em estufa. Em caso de desenho incorreto da junta deve-se corrigir o afastamento ou realizar uma boa preparação da mesma, utilizando cobre-juntas quando necessários.

2.2.6 Trincas ou Rachaduras

Rachadura ou trinca é quando há ruptura do local do material, podem ser micro ou macroscópicas. Wainer, Brandi e Mello, (2010) as consideram as descontinuidades mais graves em soldagem, pois são grandes concentradoras de tensão e podem favorecer o início de uma fratura frágil.

A aplicação de calor gera contrações no material, o que favorece a ocorrência de tensões residuais no material, as quais associadas à fragilização ocorrida nas mudanças microestruturais podem resultar na formação de trincas.

As trincas podem ser superficiais ou internas, sendo detectadas visualmente ou em testes como raio X, líquido penetrante, ultrassom e partícula magnética. A formação de rachaduras pode ocorrer tanto no processo de soldagem como no resfriamento do cordão e até mesmo após a soldagem, o que torna uma inspeção logo após o processo

de soldagem ineficiente em alguns casos. Alguns fatores causadores de trinca são: a absorção de hidrogênio pela poça de fusão, vindo de umidade ou material orgânico na superfície da junta; a sensibilização e fragilização da microestrutura ocorridas durante o processo de soldagem ou resfriamento; elevada sollicitação mecânica.

Modenesi, Marques e Santos (2012) afirmam que a presença de enxofre no metal pode ocasionar trincas, pois o mesmo reage com o ferro para formar o sulfeto de ferro nas soldas de aço o qual cerca os cristais e retarda a solidificação. Uma forma de evitar-se a formação do sulfeto de ferro é a adição de manganês que possui mais afinidade com o enxofre do que o ferro.

Ainda Modenesi, Marques e Santos (2012) relatam que o aprisionamento de escória pode causar trincas, pois escórias geradas no processo de soldagem possuem densidade baixa, o que facilita sua emersão à superfície, porém podem ainda ficar aprisionadas no metal solidificado, gerando concentração de tensão e nucleando trincas. A presença em quantidades críticas de alguns elementos residuais do aço como: estanho, fósforo e hidrogênio também pode ocasionar trincas.

Crateras no fim do cordão de solda geram concentração de tensão e podem ocasionar trincas, por isso devem ser evitadas, antes do arco ser interrompido deve-se manipular o eletrodo de volta à cratera e deixar o arco apagar-se sobre o passe recém executado (Ribeiro, 2000). Também, vibrações na peça de trabalho durante o processo de soldagem podem ocasionar esse modo de falha.

2.2.7 Distorção

Distorção é uma alteração de forma ou dimensão resultante de deformações plásticas geradas no aquecimento do processo de solda. As principais causas práticas de acordo com Modenesi, Marques e Bracarense (2009) são soldagem em excesso ou em juntas livres, seleção incorreta do chanfro e sequência de soldagem.

Pode-se evitar distorções diminuindo-se a quantidade de calor e metal depositado, fazendo-se uma seleção adequada de chanfro e sequência de soldagem, utilizando dispositivos de fixação na peça e com martelamento entre passes.

Medidas corretivas comuns são onerosas tais como desempenamento mecânico ou térmico, remoção da solda e ressoldagem, etc.

De acordo com Cotta (2014), distorções podem ser minimizadas utilizando uma sequência de passes-a-ré com simetria na junta, de forma a minimizar a energia total do sistema (o pré-aquecimento é menor). A sequência proposta é mostrada na Figura 7, porém ressalta-se que a produtividade pode ser prejudicada com tal sequência, devido a necessidade de movimentação do soldador entre passes.

Figura 7 Sequência de Soldagem com distorções minimizadas



Fonte: Cotta (2014)

2.2.8 Inclusão de escória

Ribeiro (2000) define inclusão de escória como elementos não-metálicos, ou ainda metálicos de natureza diferente do metal base e metal adicionado, que se

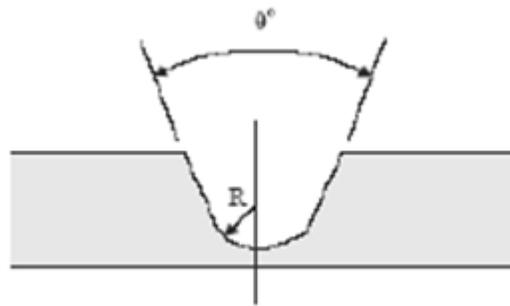
solidificam na cordão de solda. Muitas vezes a escória produzida no processo flutua a frente da poça e pode solidificar-se junto do metal quando o tempo de resfriamento da junta é baixo, ou ser incoberta pelo metal de solda, também a escória pode ser forçada para baixo pela força do arco. Quando se solda fora de posição, principalmente sobre-cabeça é mais comum a ocorrência de tais inclusões, devido a manipulação incorreta do arco.

Na soldagem com múltiplos passes, caso a limpeza entre passes não seja eficiente, escória fica aprisionada. Recomenda-se sempre fazer uma boa limpeza da junta. Outros fatores como a viscosidade do material também influenciam no aprisionamento de escória: quanto mais viscoso o metal, maior a dificuldade de a escória subir a superfície; quanto maior a temperatura, mais a escória dissolve-se no metal e mesmo que se atinja uma viscosidade menor devido ao aumento de temperatura; a agitação do banho será maior e mais provável o aprisionamento de escória, a não ser que seja um movimento proposital estudado.

Quanto maior a velocidade de resfriamento, maior a probabilidade de inclusão de escória, pois as mesmas não tem tempo para subir a superfície do metal. Uma boa preparação da junta, tomando-se o cuidado de retirar contornos que dificultam a liberação de escória é fundamental para que se evite o aprisionamento de escória no metal. Chanfros em formato de “U” muitas vezes dificultam a saída da escória, deve-se tentar sempre substituir as faces verticais por inclinadas para fora, semelhante a um “V”, facilitando a evolução da escória para a superfície.

A norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard*, da IACS propõe um ângulo entre as superfícies de 45 a 60 graus, conforme mostrado na Figura 8. Segundo o tópico 5.15, parte 2, capítulo 4, seção 1 da norma *Rules for Materials and Welding* ABS (2014) a superfície dos cordões de solda e arredores devem estar livres de escória.

Figura 8 Preparação de chanfro recomendada na norma IACS 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard*, a faixa de valores para o ângulo θ recomendado é de 45° - 60°



Fonte: IACS (2013)

2.2.9 Mordeduras

Segundo Ribeiro (2000), mordeduras são entalhos que aparecem nas bordas do cordão de solda. De acordo com Modenesi, Marques e Bracarense (2009) geralmente ocorrem devido à fusão do metal de base nas laterais da junta sem a adição de material; pela manipulação incorreta do eletrodo; comprimento do arco excessivo; corrente ou energia de soldagem muito elevadas; bitola excessiva do eletrodo gerando uma poça de fusão muito grande, costuramento excessivo, e em soldas em ângulo, quando o ângulo é pequeno demais com a superfície vertical (RIBEIRO, 2000).

O fenômeno sopro magnético (arco se desvia sem que se mova o eletrodo), também ocasiona essa descontinuidade, pois faz a fusão do metal sem adição do mesmo. Tal fenômeno é evitado alterando-se a posição do cabo terra ou melhorando o contato do cabo com a peça.

Juntas muito estreitas podem ocasionar mordeduras. Tal efeito pode ser evitado alargando-se o ângulo de chanfro de forma a relacionar a abertura do entalhe com o diâmetro do eletrodo.

Esta descontinuidade reduz a resistência à fadiga da solda, diminui a seção efetiva da solda, é forte concentradora de tensão e pode reprovar o cordão em inspeção visual.

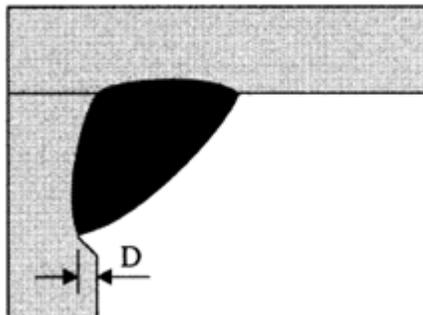
As Figuras 9 e 10 ilustram os limites aceitáveis para mordeduras de acordo com a norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard* (IACS, 2013) para juntas de topo e juntas em ângulo respectivamente.

Figura 9 Tolerância à mordeduras para juntas de topo; D deve ser menor ou igual a 0,5 mm para reforçadores, e menor ou igual a 0,8 mm para outras aplicações



Fonte: IACS (2013)

Figura 10 Tolerância à mordeduras para juntas em ângulo, D deve ser menor ou igual a 0,8 mm



Fonte: IACS (2013)

2.2.10 Aspecto Irregular do Cordão de Solda

Segundo o tópico 5.15, parte 2, capítulo 4, seção 1 da norma *Rules for Materials and Welding* ABS (2014) a superfície dos cordões de solda devem ter geometria regular e uniforme, com o mínimo de reforço possível, livres de mordeduras, contornos afiados e sobreposição. A mesma norma, ainda afirma que tanto a solda quanto o metal de base devem estar livres de golpes de arco ou esmeril.

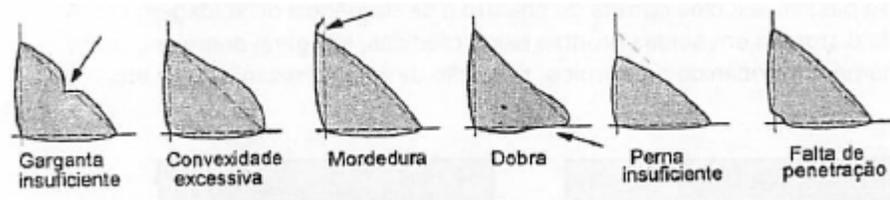
Excesso de metal de solda no cordão é caracterizado como um reforço ou convexidade excessiva e gera um não cumprimento da norma. A deposição de metal e formato do cordão é afetada diretamente pela escolha dos parâmetros de soldagem. Mohamat *et al.* (2012) ressalta a importância de se conhecer a influência dos mesmos para que se tenha uma boa geometria do cordão.

A morfologia do cordão de solda é diretamente influenciada pelos parâmetros e técnica utilizada. Rodrigues, Oliveira e Costa (2007) afirmam que a corrente de soldagem, ou velocidade do arame são os fatores de maior influência com relação a taxa de deposição de material, também ressaltam a influência do aumento do comprimento livre do eletrodo, quando excessivo pode ocasionar uma convexidade excessiva do cordão, se não aliados a uma velocidade de soldagem adequada. De acordo com Mostafa e Khajavi (2006), uma maior velocidade de soldagem resulta em uma menor poça de fusão, gerando um cordão mais fino, e se aliada à uma alta taxa de deposição de material produzirá um cordão com convexidade inadequada.

Da mesma forma, uma baixa taxa de deposição de metal, técnica incorreta de soldagem ou uma escolha incorreta de parâmetros pode ocasionar em uma concavidade no cordão, garganta insuficiente, ou perna abaixo do especificado, demonstrados na Figura 11. O que resulta em um não cumprimento da norma, podendo vir a trazer outros problemas como concentração de tensão ou ocasionar o aparecimento de trincas. (MODENESI, MARQUES E BRACARENSE, 2009)

Perfis incorretos de cordões de solda estão ilustrados na Figura 11.

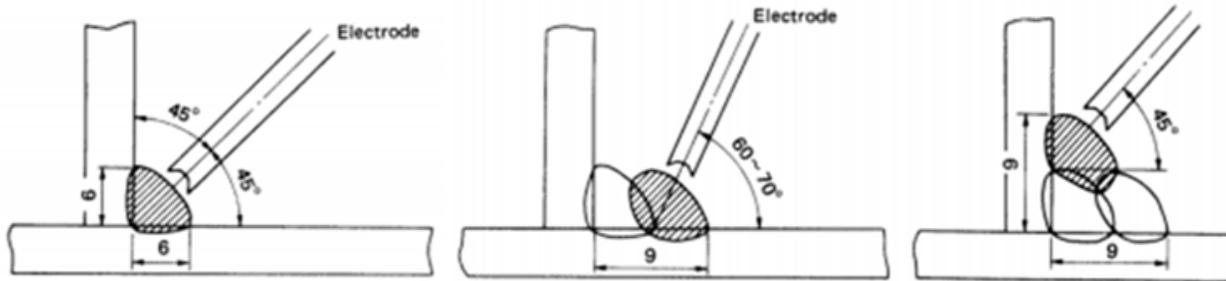
Figura 11 Exemplos de perfis incorretos de solda



Fonte: Modenesi, Marques e Bracarense (2009)

A Figura 12 ilustra boas dimensões para cordões de solda em uma junta de ângulo, nota-se que o ângulo de trabalho sugerido pelo autor é variável nos passes de acabamento e raiz e as deve haver simetria entre as pernas da solda.

Figura 12 Ângulo apropriado de trabalho para soldagem nas juntas em ângulo



Fonte: Kobe Steel Ltd. (2015)

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE SOLDAS NA INDÚSTRIA NAVAL

Entre as principais classificadoras presentes no Brasil estão a Det Norske Veritas, Bureau Veritas, Lloyds Register entre outras. A classificadora responsável pela fiscalização e garantia do controle de qualidade no estaleiro em questão é a ABS, a qual se baseia no padrão estabelecido pela IACS.

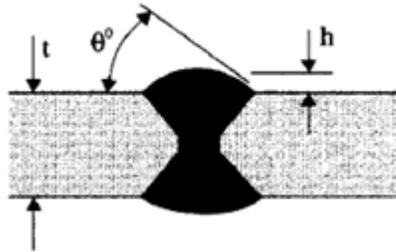
A classificação de soldas é feita através de vários testes nas diferentes peças com rigor de defeitos diferentes em diferentes aplicações. O principal defeito que procura ser evitado nesse trabalho é a falta de estanqueidade, pois estatisticamente é a principal causa de retrabalho no estaleiro nas soldas estudadas.

Testes de estanqueidade são feitos em tanques, anteparas e em todo o chapeamento externo nas embarcações novas, antes de serem lançadas e em estruturas envolvidas em mudanças de grande dimensões ou reparos que afetem a integridade estrutural. Aplicações estão detalhadas na Parte 3, Capítulo 7, Seção 1 na norma *Rules for Building and Classing Steel Vessels Under 90 meters in length* (ABS, 2014).

Em tanques, são feitos testes estruturais, por pressurização pneumática ou hidrostática, assim como testes de vazamentos de natureza hidrostática, pneumática ou com fluxos de ar. Testes com mangueiras também são aceitáveis (ABS, 2014).

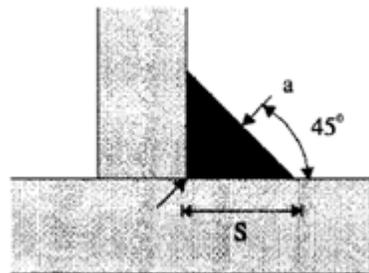
Além de estanqueidade, o cordão de solda deve passar em uma inspeção visual. As Figuras 13 e 14 ilustram alguns padrões de qualidade estabelecidos na norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard* para dimensões e aspecto do cordão de solda.

Figura 13 Padrão de reforço do cordão de solda proposto na norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard* para juntas de topo, o padrão para o ângulo " θ " é menor ou igual a 60° , sendo que o limite é aceitável é de 90° . A altura do reforço " h " deve ser menor ou igual a 6 mm



Fonte: IACS (2013)

Figura 14 Padrão de cordão de solda proposto na norma 47 *Shipbuilding and Repair Quality Standard* para juntas em ângulo, " s " é o comprimento da perna especificado na EPS e " a " é a espessura da garganta também especificada na EPS.



Fonte IACS (2013)

2.3.1 Testes de Vazamentos

A função de testes de vazamentos é bastante simples, a verificação da integridade impermeável de uma peça, ou seja, sua estanqueidade.

Os mesmos podem ser de natureza hidrostática, pneumática, através de bomba de vácuo, ar comprimido, ou da combinação de dois ou mais métodos. Testes com mangueiras não possuem aplicações estruturais. Testes ultrassônicos e de penetração (aplicação de líquidos de baixa tensão superficial) também são utilizados (ABS, 2014).

O princípio ativo de tais testes é submeter a solda a uma pressão especificada para cada método, e a verificação da presença do fluido no outro lado da peça. Quando ar é utilizado como fluido utiliza-se artifícios como passar água e sabão na parte externa da junta e monitora-se os vazamentos pela formação de bolhas.

O procedimento padrão seguido nos testes de pressão no estaleiro é feito na seguinte sequência: após a pintura com *primer* e inspeção visual de todas as soldas ter sido realizada, é requerida a liberação do setor de segurança, seguida do fechamento de quaisquer periféricos do tanque, e da instalação de uma válvula de alívio/segurança com regulagem de 3% além da pressão de teste, afim de evitar o acúmulo excessivo de pressão no sistema.

Os instrumentos e equipamentos que não podem ser submetidos a pressão de teste são substituídos por tampões e/ou flanges cegos e algumas outras medidas de segurança que são detalhadas no documento de procedimento interno “Teste Pneumático e Hidrostático” do estaleiro.

O tanque é selado com uma tampa com periféricos para engate de entrada de ar e outra para régua de coluna d’água, a qual vai indicar se há perda de pressão no tanque. O ar comprimido é oriundo do sistema de ar da empresa, ou de um compressor quando necessário. A pressurização é feita de forma gradativa, realizando o monitoramento da régua de pressão até que esta alcance a pressão de 190g/cm².

Finalizada a etapa de pressurização, realiza-se o monitoramento da régua de pressão (coluna diferencial), checando estabilização ou não do nível da mesma. Concomitantemente, o estaleiro realiza uma busca por vazamentos em todas anteparas, conexões e demais periféricos com uso de pulverizador de água e sabão.

A Figura 15 ilustra a coluna diferencial, a qual indica a estabilização da pressão do sistema em um teste no estaleiro.

Figura 15 Coluna diferencial de água utilizada nos testes pneumáticos e hidrostáticos



Fonte: Autor

A Figura 16 ilustra o operador pulverizando água e sabão nas soldas estanques de um sistema. Quando há um vazamento há formação de bolhas no local.

Figura 16 Pulverização de água e sabão nas soldas estanques durante um teste de pressão



Fonte: Autor

3 ESTUDO DE CASO

Segundo Yin (2010), existem cinco abordagens principais para pesquisas: experimentos, levantamentos, análises de arquivos, pesquisas históricas e estudos de caso. O último forma a questão de pesquisa questionando como e por quê? E enfoca eventos contemporâneos, ou seja, aqueles em que existem pessoas para relatar o que ocorreu e é possível a observação direta dos eventos sendo estudados. Enquadrando-se como a maneira mais adequada para abordar o problema em questão.

O método do estudo de caso permite que os investigadores retenham as características holísticas e significativas dos eventos da vida real – como os ciclos individuais da vida, o comportamento dos pequenos grupos, os processos organizacionais e administrativos, a mudança de vizinhança, o desempenho escolar, as relações internacionais e a maturação das indústrias (YIN 2010, p. 24).

O autor também destaca que “O estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo em profundidade e em seu contexto de vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes” (YIN, 2010, p.32).

Um estudo de caso diferencia-se de um experimento, pois no segundo pode deliberar-se o fenômeno de seu contexto, isolando as principais variáveis, e testar os efeitos em laboratório de forma isolada. Em uma investigação de estudo de caso, existem muito mais variáveis de interesse do que fontes de dados, por isso procura-se utilizar a fundamentação teórica para orientação de análise e coleta de dados (YIN, 2010).

Foi utilizada a metodologia de estudo de caso para análise da solução da questão, em conjunto com a técnica FMEA para coleta de dados e análise dos resultados. Também, foi feito um pré-experimento, para avaliar as ações propostas. Note-se que a caracterização de pré-experimento é devida ao fato de se ter certo controle sobre eventos contemporâneos, porém não se tem o controle total sobre variáveis isoladas, o que não permite a caracterização do experimento (YIN, 2010).

FMEA é uma técnica na qual se analisa os modos de falhas, efeitos e causas associadas. Esta potencializa a síntese do conhecimento, baseando-se na experiência,

ocorrências registradas ou sabidas e tecnologias potenciais (DIAS *et al.*, 2011). É um método que procura assegurar que todos os potenciais problemas tenham sido levados em consideração, assim como seus riscos ou severidade. Seu aspecto mais visível é a documentação do conhecimento levantado de áreas diferentes que influenciem um processo ou projeto (CHRYSLER; FORD; GENERAL MOTORS, 2008).

A *Society of Automotive Engineers* – SAE, propõe na norma SAE J1739 que pode-se aplicar FMEA tanto em processos, quanto na fase de projeto e é ressaltado que quanto mais cedo for a implementação, maior o sucesso (SAE, 2008).

FMEA não deve ser considerado como um evento isolado, mas sim um compromisso de longo termo que complementa o processo, de forma a assegurar que as falhas potenciais sejam evitadas (CHRYSLER; FORD; GENERAL MOTORS, 2008).

A construção e implementação da FMEA será feita seguindo metodologia descrita nas normas de padrão internacional existentes, destacadamente a SAE J1739. A norma propõe a utilização de índices que compõem o número de prioridade de risco (NPR), estes não foram utilizados pois não havia um banco de dados que quantificasse a ocorrência de falhas e seus respectivos modos de falha, ou tempo hábil para a construção de tal.

O rigor utilizado para avaliação da qualidade das juntas será o proposto por normas de sociedades classificadoras, no presente caso a ABS.

A referência de estudo de caso orienta como abordar a questão inicial e se mostra adequada para a análise que será feita.

Como produto deste trabalho foi elaborada a documentação de erros nos processos e também propostas ações para prevenir as causas ou mitigar os efeitos das falhas, evitando assim, as ações de retrabalho as quais geram atrasos e maior custo na produção, além de potencialmente melhorar a produtividade da empresa.

Outra forma de avaliação dos resultados poderá ser feita no próprio estaleiro caso as ações recomendadas sejam implementadas, porém ressalta-se que as mesmas possuem embasamento teórico da literatura, seguem recomendações especificadas na EPS ou tiveram aprovação de senso comum nas reuniões do setor.

O aspecto chave do progresso trazido por uma aplicação de FMEA é a sintetização do conhecimento já existente. A implementação consiste no levantamento

dos possíveis modos de falha e efeitos do processo em questão, assim como as possíveis causas de tais eventos. Em seguida aponta-se o risco associado a cada cenário e, se necessário, identifica-se atividades corretivas. Um modelo de planilha FMEA é trazido no Anexo A, conforme proposto pela norma SAE J1739.

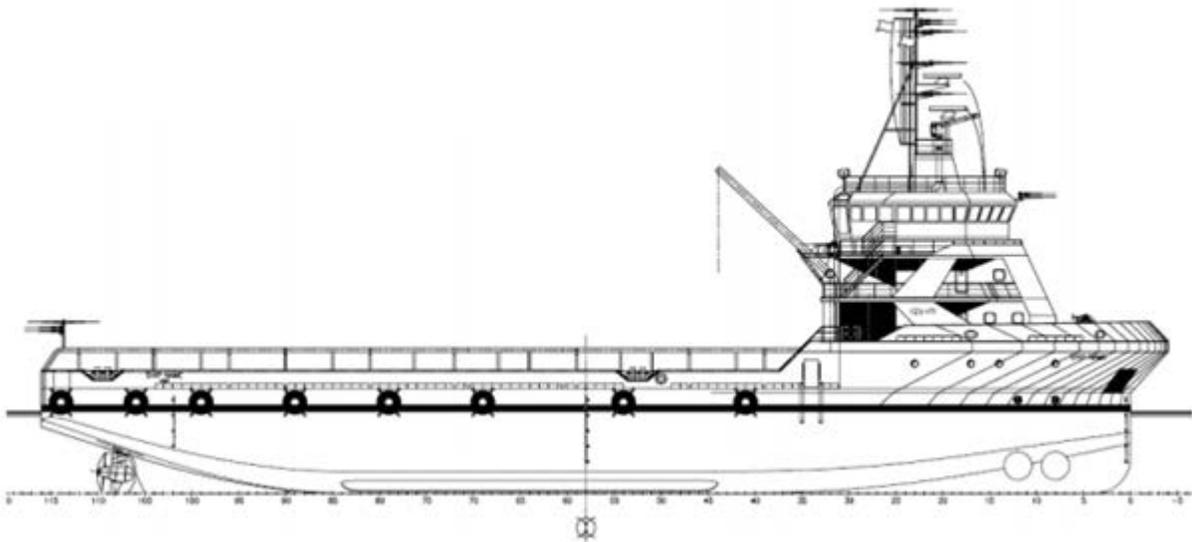
A informação é coletada através de diversas reuniões entre representantes de diferentes níveis de envolvimento no processo, e através de pesquisas – tais como pesquisa bibliográfica, experimentos, etc. Em uma aplicação no processo de soldagem em um estaleiro, por exemplo, teríamos presentes soldadores, encarregados de soldagem, supervisores do setor, engenheiros de soldagem, engenheiros de controle de qualidade, entre outros.

4 APLICAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

4.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

O estaleiro no qual se fez o estudo de caso está localizado na região de Itajaí SC. Esse manufatura embarcações que virão atuar no ramo de apoio a indústria *offshore*, produção e exploração de petróleo e gás. Em sua maioria AHTSs, *Anchor Handling Tug Supply* e PSVs, *Platform Supply Vessel*. A Figura 17 ilustra um exemplo de embarcação do tipo PSV.

Figura 17 Embarcação do tipo PSV



Fonte: Adaptado pelo autor de Guido Perla & Associates Inc. (2005)

O estaleiro produz embarcações de excelência em nível mundial, com altíssima produtividade na manufatura e alto padrão de qualidade.

A infraestrutura conta com galpões onde são construídos os blocos livre de condições adversas como chuva e vento, auxiliados por pontes rolantes, as quais são muito úteis na movimentação dos blocos. Há um galpão onde é possível fazer a

edificação de uma embarcação, e movimentá-la para fora por meio de trilhos posicionados embaixo dos blocos, os quais a levam para a carreira nova onde a embarcação recebe os últimos estágios de construção antes do lançamento.

A grande maioria do aço utilizado na empresa é o ASTM A36, comprado em chapas de diferentes espessuras. Estas passam por uma máquina de corte CNC (Comando Numérico Computadorizado) com tecnologia de corte à plasma.

Uma vez cortadas, as chapas planas são encaminhadas para uma máquina automática de soldagem a arco submerso. Após a união, as mesmas são encaminhadas para a *Panel Line*, onde grande parte dos reforços estruturais são fixados e soldados. Os perfis leves são comprados prontos e são fixados às chapas por montadores em cima de esteiras que encaminham para uma máquina de solda semi-automática com 6 tochas do tipo MIG/MAG as quais soldam os painéis com arame tubular. Após esta etapa, os perfis pesados são ponteados nos painéis e em seguida soldados com arame tubular. Nesta mesma seção, chapas grossas são unidas em juntas de topo pelo processo de arco submerso .

Uma vez prontos os painéis, os mesmos são encaminhados para uma unidade de jateamento, e recebem um tratamento com *primer* . Após receberem esta primeira pintura, os painéis são encaminhados para os galpões onde são unidos, formando os blocos, de forma consecutiva o setor de soldagem solda os blocos durante a montagem. Quando prontos, são transferidos para o pátio, onde aguardam a edificação.

As formas arredondadas como bojo e bulbo são deformadas em um sistema de calandragem que funciona em paralelo com a *panel line*, e vão para o jateamento e pintura após receberem a forma desejada.

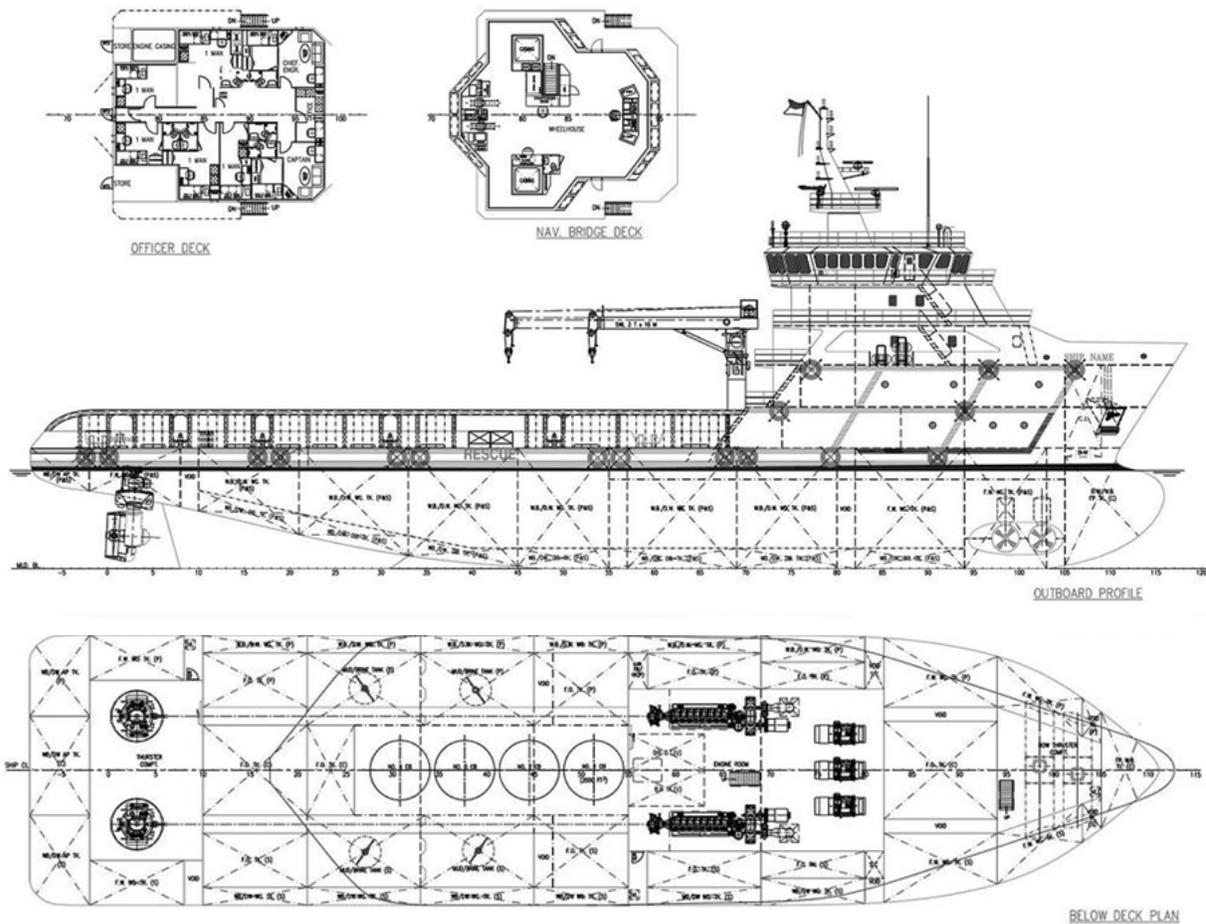
Tubulações são compradas nos diâmetros desejados, normalmente de 4, 6 e 8 polegadas e são cortadas e dobradas no *Pipe Shop*, pré-montadas e pré-soldadas nos galpões. Em sua maioria são montadas após a edificação, mas em alguns casos são montadas e soldadas já nos blocos, principalmente em locais que terão difícil acesso como no fundo duplo.

4.2 UNIÕES ESTUDADAS

As embarcações construídas são projetadas com fundo e costado duplo, os quais são utilizados como tanques, geralmente para transporte de água com propósitos diversos.

A Figura 18 traz o arranjo geral de uma embarcação do tipo PSV, o qual ilustra alguns tanques no costado e fundo duplo.

Figura 18 Arranjo geral de uma embarcação do tipo PSV, ilustra alguns tanques presentes na embarcação



Fonte: Adaptado pelo Autor de Guido Perla & Associates Inc. (2005)

Os tanques e compartimentos estanques em embarcações são munidos de portas de visita, as quais permitem o acesso de pessoas ou tripulação nos mesmos durante o período de construção e reparos.

Relatos de funcionários da empresa indicaram que há ocorrência de retrabalho relacionado à solda devido à falta de estanqueidade apontada em testes nos tanques das embarcações.

4.2.1 Solda nas Portas de Visita

Entre as diversas soldas presentes em tanques, destaca-se a solda nas portas de visita, ilustrada na Figura 19, as quais são feitas de aço e recebem uma galvanização quando posicionadas em locais internos da embarcação, e de aço inoxidável quando em áreas externas. Esta união apresenta vazamentos nos testes em proporção maior do que nas outras, isto serviu como motivação de aplicar a FMEA primeiramente na solda das portas de visita galvanizadas.

Figura 19 – Típica porta de visita de aço galvanizado nas embarcações do estaleiro



Fonte: Autor

A especificação de procedimento de soldagem (EPS) aplicável à junta, é a mesma aplicada à juntas em ângulo, pois as portas são montadas com 90° em relação à chapa. Como a superfície é galvanizada, deve se remover a camada de zinco por esmerilhamento, anteriormente à montagem, ilustrada na Figura 20. Após posicionada, a porta é fixada por pontos de solda feitos pelos montadores, e soldada.

A EPS recomenda a utilização de arame tubular ESAB® E71T-1 com um passe de raiz e dois de acabamento tanto no interior quanto na parte externa. Na prática ocorre uma tentativa de melhorar a solda que é fazer o primeiro passe com eletrodo revestido, pois de acordo com profissionais do estaleiro, é um processo mais lento e na maioria das vezes produz uma vedação melhor na junta, porém não há especificação de procedimento de soldagem (EPS) para este processo. Nota-se também que não há uma especificação de procedimento para pontear as portas, o que gera uma margem para defeitos. As Figuras 21 e 22 retratam que os pontos podem ser feitos tanto pela parte interna, quanto pela externa, com espaçamentos e dimensões variadas.

A Figura 20 ilustra a remoção da camada de metal galvanizado na superfície da área a ser soldada

Figura 20 Limpeza da camada galvanizada nas áreas periféricas da porta de visita, onde será soldada



Fonte: Autor

Figura 21 Porta de visita galvanizada montada



Fonte: Autor

A Figura 22 ilustra uma porta de visita ponteadada externamente em sua montagem.

Figura 22 Pontos de fixação na parte externa da porta de visitas



Fonte: Autor

A capacitação de ponteadores é muito importante, pois a falta dela pode levar a pontos com descontinuidades. As Figuras 23 e 24 ilustram um ponteamto sem que seja feita uma limpeza adequada do metal galvanizado e do *primer* na junta, resultando em descontinuidades como poros, aspecto irregular e escória, o que explicita a necessidade de remoção dos mesmos, frisando a necessidade de que sejam feitos em locais de acesso da lixadeira o que não acontece na parte externa da porta, conforme ilustrado nas Figuras 57 e 58.

Figura 23 Pontos de fixação com descontinuidades



Fonte: Autor

Figura 24 Ponto de fixação com poros e escória



Fonte: Autor

Figura 25 ilustra uma porta de visita de outro modelo, durante teste de pressão e vazamento indicado no canto apontado pela notação “VZ” em amarelo.

Figura 25 Modelo de porta de visitas comum nas embarcações, com vazamento indicado no teste de pressão



Fonte: Autor

4.2.2 Soldas em juntas em ângulo

Esta junta é a mais comum na construção de tanques nas embarcações, pois soldas de topo geralmente são feitas em fases anteriores com arco submerso, e acontecem novamente apenas em alguns casos como na união de dois blocos na edificação e junção de chapas quando a extensão do bloco é grande ou de formatos irregulares como o bojo.

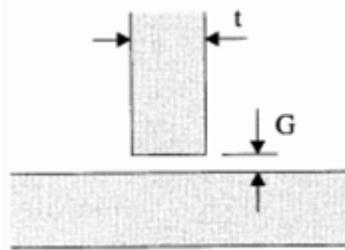
Na montagem dos blocos, as chapas são posicionadas e ponteadas. A EPS aplicada permite uma abertura de até 3 milímetros na junta. Mais uma vez nota-se que não há especificação de procedimento para o ponteamto o que possibilita uma margem para espaçamento variado entre pontos, tamanho variado dos mesmos e uma possível não preparação da junta, a qual pode estar com excesso de *primer* ou impurezas.

Após a montagem, a limpeza da junta é dificultada, pois o *primer* algumas vezes com espessura excessiva e outros possíveis contaminantes ficam em alguns pontos inacessíveis. Estes tendem a evaporar durante o processo de soldagem podendo causar descontinuidades como poros ou inclusão de escória.

Constatou-se no acompanhamento de testes e em entrevistas não documentadas com profissionais do estaleiro que estatisticamente a maior ocorrência de vazamentos é em cantos dos tanques ou perto de escalopes e perfis estruturais.

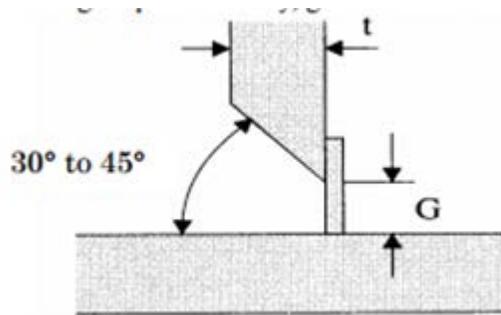
A Figura 26 detalha a abertura permitida em juntas em ângulo, de até 5 milímetros sem utilização de cobre-junta, sendo que quando entre 3 e 5 milímetros deve-se aumentar a perna da solda. No caso de uma abertura superior a 5 milímetros deve se chanfrar com bisel de 30 a 45 graus e utilizar cobre-junta ilustrado na Figura 27.

Figura 26 Correção de aberturas no chanfro segundo a norma 47 Shipbuilding and Repair Quality Standard, a abertura de raiz "G" deve ser menor ou igual a 3 mm, caso esteja entre 3 e 5 mm, deve-se aumentar a perna da solda em "G-2 "mm



Fonte: IACS (2013)

Figura 27 Correção de chanfro para aberturas de raiz acima de 5 mm e menor do que uma vez e meia a espessura da chapa, deve-se chanfrar com ângulo de 30° a 45° e utilizar cobre-junta



Fonte: IACS (2013)

A Figura 28 ilustra alguns locais de maior incidência de vazamentos, que são quinas, ângulos ou escalopes.

Figura 28 Ilustra alguns locais propícios de vazamentos



Fonte: Autor

A Figura 29 ilustra um vazamento durante um teste de pressão em uma junta de ângulo soldada caracterizado pela formação de bolhas de sabão.

Figura 29 Vazamento durante um teste em junta de ângulo



Fonte: Autor

4.3 APLICAÇÃO DA FMEA

A clareza dos conceitos é imprescindível na elaboração de uma FMEA, assim as definições de falha, causas e efeitos devem estar muito claras.

O conceito de falha é muito similar ao conceito de defeito, um evento ou condição indesejável, ou seja, em um termo geral, um componente não consegue cumprir sua função de forma adequada. Ou até mesmo um sistema que cumpre a sua função, mas não é confiável ou seguro. Por exemplo, uma escolha inadequada de metal de adição em soldagem proporciona uma alta diferença de potencial para com a peça soldada levando à uma corrosão precoce. Tal evento, pode causar uma fratura do material ou comprometer a qualidade de algum fluido em quando em contato.

No presente trabalho, procura-se diminuir um efeito decorrente de falhas, que é o não cumprimento da norma IACS 47, utilizada pela sociedade classificadora. Em outras palavras, espera-se que as soldas nos tanques sejam estanques, possuam boas propriedades mecânicas e bom aspecto visual. Assim, os diversos modos de falha que

possam causar este efeito devem ser levantados, para que suas causas também possam ser identificadas e prevenidas.

O cliente do produto deve ser especificado na FMEA, no presente caso o cliente escolhido foi o setor de testes, objetivou-se entregar os tanques soldados, livres de retrabalho com relação à falta de estanqueidade e à inspeção visual, a qual será feita por um vistoriador de sociedade classificadora durante apresentação do tanque.

A FMEA foi elaborado através da seguinte abordagem: entrevistas direcionadas com encarregados do setor, supervisores, assistentes e soldadores, seguidos de pesquisa na literatura disponível, a qual está embasada na seção 2.1 e por último foram feitas duas reuniões de FMEA, as quais tiveram presentes funcionários de diferentes níveis de envolvimento no setor, são eles, um soldador, um encarregado, um assistente e um supervisor. Além dos funcionários do estaleiro, em uma das reuniões esteve presente um inspetor de soldagem e em outra um vistoriador da sociedade classificadora. Ressalta-se que as planilhas FMEA já foram para as reuniões em grande parte preenchidas, pois os modos de falha já haviam sido levantados na literatura disponível e nas entrevistas, portanto as reuniões serviram para consolidar as planilhas, adicionar informações, discutir a importância dos modos de falha e, eventualmente, reformular alguma análise.

A norma SAE J1739 propõe a utilização de índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção. Os mesmos não foram utilizados neste trabalho devido à falta de um banco de dados para análise de ocorrência de falhas ou de tempo hábil para a coleta de forma a promover uma amostragem confiável. Porém os índices de severidade, ocorrência e dificuldade de detecção foram discutidos qualitativamente nas reuniões de FMEA.

Algumas considerações foram levadas em conta na construção das análises de falha:

- O arame utilizado nos processos de soldagem é o recomendado nas especificações de procedimento, no caso o E71T-1, de 1,2 milímetros de diâmetro;
- Utilização de polaridade direta;

- Durante o processo de soldagem, o soldador conduz a tocha ao longo da junta, deixando de levar em conta possíveis modos de falha como desalinhamento do cordão;
- A composição do gás de proteção é 75% de Argônio com 25% de dióxido de carbono;
- O termo “manipulação da tocha inadequada” foi atribuído ao sentido de condução da tocha, em outras palavras, pelo movimento realizado pelo soldador, não levando em conta a inclinação da tocha, a qual foi detalhada separadamente;
- No sentido de avanço da tocha, é recomendado um ângulo de 90 graus para com a peça de trabalho, variações aceitáveis estão ilustradas na Figura 1;
- No sentido transversal ao avanço da tocha, a inclinação recomendada está ilustrada na Figura 69.

4.3.1 Função da Junta

As funções do produto, no caso o resultado do processo de soldagem, foram definidas da mesma forma para as duas juntas em questão, a saber: cumprir os requisitos das normas aplicadas quanto à inspeção visual satisfatória; apresentar propriedades mecânicas condizentes com o exigido pela sociedade classificadora; e promover estanqueidade.

4.3.2 Modos de Falha

Os modos de falha listados foram descontinuidades de soldagem, ou erros no processo que possam promover a falta de cumprimento da função esperada da junta, tais eventos foram detalhados na seção 2.1. São eles para as soldas de junta em ângulo: porosidades, cordão de solda incompleto, deficiência na emenda dos cordões, respingos, convexidade do cordão excessiva/perna acima do especificado, perna

abaixo do especificado, mordeduras, inclusão de escória, falta de fusão, falta de penetração, distorção e trincas.

Para as soldas nas portas de visita não há o modo de falha distorção, pois a ocorrência desta descontinuidade com probabilidade de vir a tornar-se uma falha foi considerada remota.

4.3.3 Efeitos de Falhas

Os efeitos foram definidos como o produto da falta do cumprimento da função esperada da junta, ou seja, a falta de estanqueidade, débito de propriedades mecânicas ou um não cumprimento dos padrões visuais propostos pela norma, causando a obrigatoriedade de um retrabalho.

No caso, o cliente definido na FMEA não foi o armador, mas sim o setor de testes, o qual necessita fazer reparos em soldas quando há efeitos indesejados, pois o produto (cordão de solda) não cumpre todas as funções desejadas. De certa forma, pode-se considerar também como cliente o próprio setor de soldagem, pois parte do retrabalho é feito pelo mesmo, quando detectadas as falhas em estágios anteriores ao teste de estanqueidade ou vistoria da sociedade classificadora.

O retrabalho produzido feito pelo setor de testes é consideravelmente mais laborioso do que o realizado pela soldagem, pois precisam despressurizar o tanque, realizar a goivagem do trecho de solda que apresentou o vazamento, ressoldá-lo e testar o tanque todo novamente. Nesta etapa de reparo de soldas outros vazamentos podem vir a ocorrer devido aos esforços mecânicos e térmicos que a junta é submetida, por isso a importância de se testar o tanque todo novamente.

4.3.4 Controles Atuais de Detecção

Controles de detecção são aqueles utilizados para identificar a causa ou o modo de falha, são indicadores para medidas corretivas.

No caso em questão, para as análises em solda no estaleiro, a inspeção visual é sempre o primeiro controle aplicado, em alguns casos como cruzamentos de soldagem são feitos outros ensaios não destrutivos como partícula magnética, líquido penetrante, ultrassom ou raio X. Nas soldas estanques de tanques e chapeamento do casco são feitos testes de estanqueidade por pressurização.

4.3.5 Controles Atuais Preventivos ou Corretivos

Os controles preventivos, são medidas preventivas que buscam eliminar as causas de modos de falha, enquanto corretivos procuram eliminar os efeitos e corrigir os modos de falha após a detecção.

Medidas preventivas são sempre mais interessantes do que medidas corretivas, pois evitam o retrabalho. Após o modo de falha ser detectado, a medida já é considerada corretiva e provavelmente aquele trecho de solda deverá ser refeito. Ressalta-se que o quanto antes um modo de falha é detectado, mais interessante, pois evita-se a propagação de erros.

5 RESULTADOS

Como o número de prioridade de risco não foi calculado, algumas estatísticas sobre as planilhas FMEA foram contabilizadas: em quantas causas determinada ação recomendada preventiva atua e em quantos modos de falha determinada causa atua.

De maneira qualitativa os modos de falha foram pontuados em severidade, ocorrência e dificuldade de detecção.

Respingos foram apontados como uma falha de baixa severidade, pois não afetam a função esperada da junta (vide seção 4.3.1).

Deficiência na emenda dos cordões foi apontado como um dos modos de falha mais ocorrentes, outros modos de falha como falta de fusão, falta de penetração e porosidades vieram em segundo plano, seguidas das demais com uma importância pouco menor. Trincas foram apontadas como um modo de falha de baixa ocorrência, assim como distorções a ponto de tornar-se um modo de falha.

Falta de penetração foi apontada como o modo de falha de mais difícil detecção, poros quando de dimensões muito pequenas também são difíceis de serem percebidas a olho nu, quando são internos são detectados apenas nos testes de estanqueidade se estiverem combinados com outro modo de falha, caso contrário não são considerados falhas nessas juntas. Falta de fusão em alguns casos também é de difícil detecção, quando a parte superior da junta foi fundida, mas o interior não.

5.1 FMEA

Esta seção traz as informações coletadas nas planilhas FMEA. Rajenthirakumar *et al.* (2014) caracteriza os modos de falha e causas de maneira semelhante à abordagem neste trabalho. Já Araújo (2011) caracteriza os modos de falha aqui citados como efeitos.

Algumas diferenças entre as duas planilhas estão relacionadas à determinadas causas de um modo de falha não serem aplicáveis à outra, como por exemplo “Abertura

de raiz acima do especificado (3mm)” tem ocorrência considerada remota nas portas de visita, porém é uma causa que pode vir a acontecer na montagem das chapas dos tanques.

Na soldagem das portas de visita é recomendado uma maior continuidade nos cordões e que o acabamento na parte de trás das portas seja feito com retífica, uma vez que o acesso à lixadeira é restrito.

Os Quadros 1 e 2 trazem as FMEAs para o processo de soldagem nas portas de visita e nas juntas estanques em ângulo respectivamente.

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

Processo: Soldagem com arame tubular E71T-1 de 1,2 milímetros nas portas de visitas de tanques nas embarcações
Função: Satisfazer os padrões de qualidade propostos pela IACS (2013) e ABS (2014) nas inspeções visuais e testes de estanqueidade

(continua)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles Atuais	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Porosidades	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Camada de zinco ou metal galvanizado na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Corrente de soldagem insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampéres
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto
		Umidade na junta	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta até que a umidade esteja controlada
		Tempo de resfriamento da junta insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta, intervenção nos fatores climáticos (bloquear correntes de vento)

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Porosidades	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Conduíte do arame sujo	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Substituição do conduíte
		Porosidades nos pontos feitos pela montagem	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento e instrução aos montadores, correção e padronização da técnica com limpeza da junta, ponteamento pelo lado de dentro da porta, em locais de acesso da lixadeira; eliminação dos pontos após travar a porta com solda definitiva
Cordão de Solda Incompleto	Reprovação na norma IACS, falta de estanqueidade, resistência prejudicada	Soldador não termina a solda (erro do soldador)	Inspeção visual	Terminar a solda	Aumentar a inspeção; atribuir ao soldador a responsabilidade de soldar determinada região, com obrigação de realizar todas as soldas demandadas de forma completa, com possíveis retoques e caso não seja possível que o mesmo termine, avisar o encarregado ou delegar a falta de solda pertinente
Deficiência na emenda dos cordões	Falta de estanqueidade da junta, não continuidade de propriedades mecânicas do cordão de solda	Soldador abre o arco em uma área da junta na qual não foi ainda preenchida por material, e não retorna à área onde o metal já foi depositado (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Acabamento com esmeril ou lixadeira e cobrir o local com o próximo cordão de solda	Realizar o acabamento com esmeril ou lixadeira em um comprimento de 3 cm no local onde se interrompeu o arco do cordão a ser continuado, para que se possa estabilizar o arco onde o metal já foi depositado, salva a excessão do passe de raiz, onde deve ser feito o acabamento no local de abertura do arco para se permitir uma boa emenda
		Soldador abre o arco em uma área da junta na qual não foi ainda preenchida por material e o acesso da lixadeira é restrito (cantos, parte de trás da porta)(manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Passar os cordões de solda da sequência por cima do local onde faltou sobreposição	Realizar o acabamento com retífica em um comprimento de 3 cm no local onde se interrompeu o arco do cordão a ser continuado, para que se possa estabilizar o arco onde o metal já foi depositado, salva a excessão do passe de raiz, onde deve ser feito o acabamento no local de abertura do arco para se permitir uma boa emenda
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Acabamento com esmeril ou lixadeira e cobrir o local com o próximo cordão de solda	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não extingui-lo em locais restritos à retífica; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da retífica)

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Deficiência na emenda dos cordões	Falta de estanqueidade da junta, não continuidade de propriedades mecânicas do cordão de solda	Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha) em local de acesso restrito a lixadeira (cantos, parte de trás da portas)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Na parte de trás do suporte da porta, tentar prolongar os cordões de solda o máximo possível e retornar o arco à solda já feita antes de extinguir o arco, utilizar retífica para fazer acabamentos entre passes
		Local de finalização do arco consecutivo entre passes	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Distanciar a emenda dos cordões subsequentes com pelo menos 4 cm; planejamento dos locais de abertura extinção do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo que proporcione boa evasão da escória e movimentação da tocha
		Local de abertura do arco consecutivo entre passes	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Distanciar a emenda dos cordões subsequentes com pelo menos 4 cm; planejamento dos locais de abertura extinção do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo que proporcione boa evasão da escória e movimentação da tocha
Convexidade do cordão excessiva/ Perna acima do especificado	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho do arame-eletrodo excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Aproximar o bocal à junta, a distância recomendada no EPS é de 15 a 35 mm
		Corrente de soldagem de excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Inclinação da tocha excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação recomendada no sentido transversal ao avanço da tocha para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Velocidade de soldagem insuficiente	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Aumentar a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Número de passes superior ao recomendado no EPS, 1 passe de raiz e 2 de acabamento	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Correção na técnica; caso o(s) passe(s) excedente(s) sejam para correção de outra descontinuidade, verificar ações de correção da mesma

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Perna abaixo do especificado (9mm)/ Deposição de metal insuficiente	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Velocidade de soldagem excessiva	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não extingui-lo em locais restritos à retífica; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da retífica)
		Quinas e pés de galinha sem reforço adequado	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento ao soldador da sequência de soldagem e reforços
		Corrente de soldagem insuficiente	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampères
		Obstáculos na posição impedem que o soldador veja a junta	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento do soldador para atividade na posição de trabalho; utilização de espelho; antecipação da solda da junta com relação a fixação dos obstáculos
Mordeduras	Reprovação na norma IACS 47 quando superiores a 0,5 mm, seção da seção útil reduzida, concentração de tensões, redução na resistência a fadiga	Fusão do metal de base nas laterais da junta sem a adição de material (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Correção da técnica de soldagem, treinamento aos soldadores; a tocha deverá ser manipulada de forma que o metal seja fundido apenas onde será depositado
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não extingui-lo em locais restritos à retífica; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da retífica)
		Sopro Magnético: o arco se desvia sem que se mova a tocha	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Mudar a posição do cabo terra; melhorar o contato elétrico do cabo com a peça; não deixar cabos enrolados; inclinar a tocha para o lado em que se dirige o arco; reduzir o comprimento do arco; reduzir a corrente de soldagem
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Inclusão de escória	Reprovação na norma IACS, concentração de tensão, redução da seção efetiva da junta, falta de estanqueidade	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente, vide seção 2.2	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Corrente de soldagem insuficiente	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampéres
		Escória flutua à frente da poça de fusão (inclinação da tocha no sentido de avanço excessiva)	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento aos soldadores, utilizar inclinação no sentido de avanço da tocha de 90 graus
		Abertura de raiz acima do especificado (3 mm)	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Em caso de cortes com maçarico na montagem, preparação e limpeza da junta anterior à soldagem, caso a abertura exceda 3 mm deve-se utilizar cobre-junta e chanfrar a peça
		Escória nos pontos da montagem	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento e instrução aos montadores, correção da técnica e padronização dos pontos feitos pela montagem; eliminação completa dos pontos com lixadeira após travar a porta com solda definitiva
Falta de fusão	Falta de estanqueidade, possível promoção de trincas, redução da seção efetiva da solda e de propriedades mecânicas	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Camada de zinco ou metal galvanizado na junta (contaminante)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Corrente de soldagem insuficiente	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampéres

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Falta de fusão	Falta de estanqueidade, possível promoção de trincas, redução da seção efetiva da solda e de propriedades mecânicas	Tensão insuficiente	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Velocidade de soldagem excessiva	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Não uniformidade da distribuição de calor do arco (manipulação inadequada da tocha)	Teste de estanqueidade, Inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Dirigir o arco de forma que ambas chapas sejam aquecidas de forma uniforme, especialmente onde tende a acontecer a falta de fusão
		Impossibilidade de o arco atingir certas regiões da junta (região entre passes possui convexidade excessiva),	Teste de estanqueidade, Inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Pontos feitos pela montagem de tamanho excessivo impedindo que o arco promova a fusão completa da região pontuada	Teste de estanqueidade, Inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento de soldagem aos montadores para que façam pontos menores e com parâmetros e técnicas adequadas; eliminar os mesmos com lixadeira após travar a porta com solda definitiva
Falta de penetração	Falta de estanqueidade, redução da seção útil da solda, concentração de tensões	Não uniformidade da distribuição de calor do arco (manipulação inadequada da tocha)	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Dirigir o arco de forma que ambas chapas sejam aquecidas de forma uniforme, especialmente onde a penetração tende a ser imperfeita
		Inclinação da tocha excessiva	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Velocidade de soldagem excessiva	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Corrente de soldagem insuficiente	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampères

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Falta de penetração	Falta de estanqueidade, redução da seção útil da solda, concentração de tensões	Penetração insuficiente nos pontos da montagem, tamanho dos mesmos excessivos impedindo a penetração total da solda no seu entorno	Teste de Estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento de soldagem aos montadores para que façam pontos menores e com parâmetros e técnicas adequadas; eliminar os mesmos com lixadeira após travar a porta com solda definitiva
Presença de respingos	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente, vide seção 2.2	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Umidade na junta	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Pré-aquecimento da junta até que a umidade esteja controlada
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto
		Respingos provenientes da montagem	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Treinamento de soldagem aos montadores
		Inclinação da tocha excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Movimentos muito rápidos que gerem instabilidade no arco (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Treinamento e instrução ao soldador para correção da técnica, diminuir a velocidade de manipulação da tocha; a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Camada de zinco ou metal galvanizado na junta (contaminante)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante		

Quadro 1 FMEA do processo de soldagem em portas de visita

(conclusão)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Trincas	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Tempo de resfriamento da junta insuficiente	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta, intervenção nos fatores climáticos (bloquear correntes de vento)
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não extingui-lo em locais restritos à retífica; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da retífica)
		Vibrações durante a soldagem	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Nunca soldar uma peça que esteja sofrendo simultaneamente trabalho com ferramentas pneumáticas ou mecânicas que gerem vibração
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Aprisionamento de escória	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Eliminação da escória, ver item inclusão de escória
		Trincas nos pontos da montagem	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento e instrução aos montadores, correção e padronização da técnica com limpeza da junta e ponteamto pelo lado de dentro da porta, em locais de acesso da lixadeira; eliminação dos pontos após travar a porta com solda definitiva

Fonte: Autor

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

Processo: Soldagem com arame tubular E71T-1 de 1,2 milímetros em juntas em ângulo (90 graus) para soldas estanques de tanques
 Função: Satisfazer os padrões de qualidade propostos pela IACS (2013) e ABS (2014) nas inspeções visuais e testes de estanqueidade

(continua)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Porosidades	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Corrente de soldagem insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampéres
		Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente, vide seção 2.2	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto
		Umidade na junta	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta até que a umidade esteja controlada
		Tempo de resfriamento da junta insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta, intervenção nos fatores climáticos (bloquear correntes de vento)
		Conduíte do arame sujo	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Substituição do conduíte

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Porosidades	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Porosidades nos pontos feitos pela montagem	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento e instrução aos montadores, correção e padronização da técnica com limpeza da junta; eliminação dos pontos com lixadeira ou goiva após travar a porta com solda definitiva
Cordão de solda Incompleto	Reprovação na norma IACS, falta de estanqueidade, resistência prejudicada	Soldador não termina a solda (erro do soldador)	Inspeção visual	Terminar a solda	Aumentar a inspeção; atribuir ao soldador a responsabilidade de soldar determinada região, com obrigação de realizar todas as soldas demandadas de forma completa, com possíveis retoques e caso não seja possível que o mesmo termine, avisar o encarregado ou delegar a falta de solda pertinente
Deficiência na emenda dos cordões	Falta de estanqueidade da junta, não continuidade de propriedades mecânicas do cordão de solda	Soldador abre o arco em uma área da junta na qual não foi ainda preenchida por material, e não retorna a tocha à area onde o metal já foi depositado (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Acabamento com esmeril ou lixadeira e cobrir o local com o próximo cordão de solda	Realizar o acabamento com esmeril ou lixadeira em um comprimento de 4 cm no local onde se interrompeu o arco do cordão a ser continuado, para que se possa estabilizar o arco onde o metal já foi depositado, salva a excessão do passe de raiz, onde deve ser feito o acabamento no local de abertura do arco para se permitir uma boa emenda
		Soldador abre o arco em uma área da junta na qual não foi ainda preenchida por material, não retorna a tocha à area onde o metal já foi depositado e o acesso da lixadeira é restrito (cantos, escalopes, locais obstruídos por tubos ou perfis estruturais) (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Passar os cordões de solda subsequentes por cima do local onde faltou sobreposição	Não realizar a abertura do arco em locais restritos, planejamento dos locais de abertura e fechamento do arco, acabamento de lixadeira nos locais onde o arco teve seu início e fim para permitir uma transição do passe seguinte sobre o mesmo com boa geometria para evasão da escória e movimentação da tocha; Caso necessário utilizar retífica para acabamento
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Acabamento com esmeril ou lixadeira e cobrir o local com o próximo cordão de solda	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não fechar o mesmo em locais restritos; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da lixadeira)
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha) em local de acesso restrito a lixadeira	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Não extinguir o arco em locais restritos, planejamento dos locais de abertura e finalização do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo proporcionando boa evasão da escória e movimentação da tocha; quando necessário, utilizar retífica para acabamento

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Deficiência na emenda dos cordões	Falta de estanqueidade da junta, não continuidade de propriedades mecânicas do cordão de solda	Local de finalização do arco consecutivo entre passes	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Distanciar a emenda dos cordões subsequentes com pelo menos 4 cm; planejamento dos locais de abertura extinção do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo que proporcione boa evasão da escória e movimentação da tocha
		Local de abertura do arco consecutivo entre passes	Inspeção visual, Teste de Estanqueidade	Cobrir o local com o próximo cordão de solda	Distanciar a emenda dos cordões subsequentes com pelo menos 4 cm; planejamento dos locais de abertura extinção do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo que proporcione boa evasão da escória e movimentação da tocha
Respingos	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente, vide seção 2.2	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Umidade na junta	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Pré-aquecimento da junta até que a umidade esteja controlada
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto
		Respingos provenientes da montagem	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Treinamento de soldagem aos montadores
		Inclinação da tocha excessiva	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Movimentos muito rápidos que gerem instabilidade no arco (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Treinamento e instrução ao soldador para correção da técnica, diminuir a velocidade de manipulação da tocha; a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Respingos	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual	Remoção da descontinuidade com retífica ou esmeril	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
Convexidade do cordão excessiva/ Perna acima do especificado (9mm)	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Tensão insuficiente	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Aumentar a tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Velocidade de soldagem insuficiente	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Aumentar a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Inclinação da tocha excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Abertura de raiz acima do especificado (3 mm)	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Em caso de cortes com maçarico na montagem, preparação e limpeza da junta anterior à soldagem, caso a abertura exceda 3 mm deve-se utilizar cobre-junta e chanfrar a peça
		Distância entre o bico de contato e a peça de trabalho do arame-eletrodo excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Aproximar o bocal à junta, a distância recomendada no EPS é de 15 a 35 mm
		Número de passes superior ao recomendado no EPS, 1 passe de raiz e 2 de acabamento	Inspeção Visual	Acabamento com retífica ou esmeril	Trabalhar no sentido de evitar a necessidade do número de passes excessivo, aberturas deixadas na montagem geram a necessidade de um aumento de material depositado. Podem ser corrigidas através de tratamentos térmicos para eliminação de tensões residuais ou com a adição de "inserts" nos locais de abertura
Perna abaixo do especificado (9mm)/ Deposição de metal insuficiente	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não fechar o mesmo em locais restritos; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da lixadeira)
		Velocidade de soldagem excessiva	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Quinas e pés de galinha sem reforço adequado	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento ao soldador da sequência de soldagem e reforços

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Perna abaixo do especificado (9mm)/ Deposição de metal insuficiente	Reprovação na norma IACS, acabamento irregular	Corrente de soldagem insuficiente	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampères
		Obstáculos na posição impedem que o soldador continue o cordão de solda, por exemplo escalopes	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Não extinguir o arco em locais restritos, planejamento dos locais de abertura e finalização do arco em todas as soldas onde seja possível o acabamento de lixadeira ou esmeril de forma a permitir uma boa geometria para transição do passe subsequente sobre o mesmo proporcionando boa evasão da escória e movimentação da tocha; quando necessário, utilizar retífica para acabamento
		Obstáculos na posição impedem que o soldador veja a junta	Inspeção visual e teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento do soldador para atividade na posição de trabalho; utilização de espelho; antecipação da solda da junta com relação a fixação dos obstáculos
Mordeduras	Reprovação na norma IACS 47 quando superiores a 0,5 mm, seção da seção útil reduzida, concentração de tensões, redução na resistência a fadiga	Fusão do metal de base nas laterais da junta sem a adição de material (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Correção da técnica de soldagem, treinamento aos soldadores; a tocha deverá ser manipulada de forma que o metal seja fundido apenas onde será depositado
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não fechar o mesmo em locais restritos; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da lixadeira)
		Sopro magnético: o arco se desvia sem que se mova o eletrodo	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Mudar a posição do cabo terra; melhorar o contato elétrico do cabo com a peça; não deixar cabos enrolados; inclinar a tocha para o lado em que se dirige o arco; reduzir o comprimento do arco; reduzir a corrente de soldagem
		Umidade no arame-eletrodo	Inspeção Visual	Acabamento com esmeril e adição de metal	Armazenamento do arame embalado á vacuo em estufa com a temperatura entre 50°C e 60°C até o momento da utilização do mesmo, descartar após 24 horas de aberto
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Inclusão de escória	Reprovação na norma IACS 47, concentração de tensão, redução da seção efetiva da junta, falta de estanqueidade	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Proteção gasosa na poça de fusão insuficiente, vide seção 2.2	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Regulagem do gás, a faixa de valores recomendados é de 12 a 20 L/min
		Corrente de soldagem insuficiente	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampères
		Escória flutua à frente da poça de fusão (inclinação da tocha excessiva)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento aos soldadores, utilizar inclinação no sentido de avanço da tocha de 90 graus
		Abertura de raiz acima do especificado (3 mm)	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Em caso de cortes com maçarico na montagem, preparação e limpeza da junta anterior à soldagem, caso a abertura exceda 3 mm deve-se utilizar cobre-junta e chanfrar a peça
		Escória nos pontos da montagem	Inspeção Visual, Teste de estanqueidade	Acabamento com retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento de soldagem aos montadores para que façam pontos menores, com parâmetros e técnicas corretas, padronização dos pontos feitos pela montagem; eliminação total dos pontos com lixadeira ou goiva quando possuírem descontinuidades, após travar a peça com solda definitiva
Falta de fusão	Falta de estanqueidade, possível promoção de trincas, redução da seção efetiva da solda e de propriedades mecânicas	Excesso de primer na junta (contaminantes)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Carepas ou ferrugem na junta (contaminantes)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante
		Impurezas ou escória na junta ou entre passes (contaminantes)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Limpeza da junta com escova rotativa, flaps ou disco de desbaste; a junta deve estar no metal brilhante

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Falta de fusão	Falta de estanqueidade, possível promoção de trincas, redução da seção efetiva da solda e de propriedades mecânicas	Corrente de soldagem insuficiente	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampères
		Tensão insuficiente	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Velocidade de soldagem excessiva	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Não uniformidade da distribuição de calor do arco (manipulação inadequada da tocha)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Dirigir o arco de forma que ambas chapas sejam aquecidas de forma uniforme, especialmente onde tende a acontecer a falta de fusão
		Aporte de calor insuficiente (soldagem descendente)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar o aporte de calor com correção da técnica, no caso de solda na vertical realizar a mesma ascendente, ou das extremidades para o centro no caso de soldagem na posição
		Obstáculos na posição impedem que o arco tenha acesso a toda a junta, por exemplo escalopes	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Não interromper o cordão de solda sobre o escalope, caso o mesmo seja menor que o bocal, utilizar eletrodo revestido ou substituir o bocal
		Impossibilidade de o arco atingir certas regiões da junta (região entre passes possui convexidade excessiva)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação no sentido transversal ao avanço da tocha recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Pontos feitos pela montagem de tamanho excessivo impedindo que o arco promova a fusão completa da região pontuada	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento de soldagem aos montadores para que façam pontos menores, com parâmetros e técnicas corretas, padronização dos pontos feitos pela montagem; eliminação total dos pontos com lixadeira ou goiva quando possuírem descontinuidades, após travar a peça com solda definitiva

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Falta de penetração	Falta de estanqueidade, redução da seção útil da solda, concentração de tensões	Não uniformidade da distribuição de calor do arco (manipulação inadequada da tocha)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Dirigir o arco de forma que ambas chapas sejam aquecidas de forma uniforme, especialmente onde a penetração tende a ser imperfeita
		Inclinação da tocha excessiva	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a inclinação da tocha; a inclinação recomendada para o passe de raiz é 45°, entre 60° e 70° com a horizontal no passe de acabamento da chapa horizontal e 45° novamente para o segundo passe de acabamento sobre os dois, a figura 69 ilustra o ângulo de trabalho recomendado
		Velocidade de soldagem excessiva	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Corrente de soldagem insuficiente	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar a corrente de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 ampéres
		Aporte de calor insuficiente (soldagem descendente)	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Aumentar o aporte de calor com correção da técnica, no caso de solda na vertical realizar a mesma ascendente, ou das extremidades para o centro no caso de soldagem na posição
		Peça muito fria, temperatura inferior a 16 graus Celsius	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Pré-aquecimento da junta à temperatura recomendada pelo EPS para início do processo, 25 °C
		Obstáculos na posição impedem que o arco tenha acesso a toda a junta, por exemplo escalopes	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Não interromper o cordão de solda sobre o escalope, caso o mesmo seja menor que o bocal, utilizar eletrodo revestido ou substituir o bocal
		Penetração insuficiente nos pontos da montagem, tamanho dos mesmos excessivos impedindo a penetração total da solda no seu entorno	Teste de estanqueidade	Remoção da descontinuidade com esmeril ou goiva seguido de ressoldagem da junta	Treinamento de soldagem aos montadores para que façam pontos menores e com parâmetros e técnicas corretas, padronização dos pontos feitos pela montagem; eliminação total dos pontos com lixadeira ou goiva quando possuírem descontinuidades, após travar a peça com solda definitiva

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(continuação)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Distorção	Alterações de forma que prejudiquem a integridade ou a geometria desejada; podendo causar falta de estanqueidade ou reprovação na norma, ou a montagem correta de blocos	Sequência de soldagem incorreta (passes consecutivos no mesmo local)	Inspeção visual	Desempenamento mecânico ou térmico; remoção da solda e ressoldagem; martelamento entre passes; substituição da peça	Correção da técnica e sequência de soldagem conforme recomendações no EPS e no capítulo 5, treinamento e instrução aos soldadores; a sequência correta é um passe de raiz, seguido de dois passes de acabamento
		Corrente de soldagem excessiva	Inspeção visual	Desempenamento mecânico ou térmico; remoção da solda e ressoldagem; martelamento entre passes; substituição da peça	Diminuir valor de corrente, a faixa recomendada no EPS é de 100 a 220 Ampères
		Velocidade de soldagem insuficiente	Inspeção visual	Desempenamento mecânico ou térmico; remoção da solda e ressoldagem; martelamento entre passes; substituição da peça	Diminuir a velocidade de soldagem, a faixa recomendada no EPS é de 25 a 50 cm/min
		Tempo de resfriamento da junta insuficiente	Inspeção visual	Desempenamento mecânico ou térmico; remoção da solda e ressoldagem; martelamento entre passes; substituição da peça	Pré-aquecimento da junta, intervenção nos fatores climáticos (bloquear correntes de vento)
		Número de passes superior ao recomendado no EPS, 1 passe de raiz e 2 de acabamento	Inspeção visual	Desempenamento mecânico ou térmico; remoção da solda e ressoldagem; martelamento entre passes; substituição da peça	Trabalhar no sentido de evitar a necessidade do número de passes excessivo, aberturas deixadas na montagem geram a necessidade de um aumento de material depositado. Podem ser corrigidas através de tratamentos térmicos para eliminação de tensões residuais ou com a adição de "inserts" nos locais de abertura
Trincas	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Tempo de resfriamento da junta insuficiente	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Pré-aquecimento da junta, intervenção nos fatores climáticos (bloquear correntes de vento)

Quadro 2 FMEA do processo de soldagem de juntas em ângulo

(conclusão)

Modo de falha potencial	Efeito Potencial	Causas/Mecanismos Potenciais	Controles de Detecção	Controles Corretivos	Ações Recomendadas Preventivas
Trincas	Falta de estanqueidade, redução de propriedades mecânicas, concentração de tensão	Soldador extingue o arco antes de depositar metal suficiente para garantir um bom acabamento (manipulação inadequada da tocha)	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Aguardar até que a junta seja preenchida com metal antes de extinguir o arco, não extingui-lo em locais restritos; retornar a tocha até o cordão já soldado para apagar o arco (em local de acesso da lixadeira)
		Montagem muito rígida	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Escolher uma sequência de soldagem que acarrete as menores tensões possíveis no metal de solda; melhora nos pontos da montagem, diminuindo os mesmos ou corrigindo o espaçamento entre pontos
		Vibrações durante a soldagem	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Nunca soldar uma peça que esteja sofrendo simultaneamente trabalho com ferramentas pneumáticas ou mecânicas que gerem vibração
		Tensão (comprimento do arco) excessiva	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Diminuir valor de tensão, a faixa de valores recomendada no EPS é de 19 a 28 volts
		Aprisionamento de escória	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Eliminação da escória, ver item inclusão de escória
		Trincas nos pontos da montagem	Testes de estanqueidade e inspeção visual	Remoção da descontinuidade com goiva, retífica ou esmeril, adição de metal	Treinamento de soldagem aos montadores, correção e padronização da técnica; eliminação completa dos pontos com lixadeira ou goiva após travar a peça com solda definitiva

Fonte: Autor

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise dos dados, combinada às decisões que foram consenso nas reuniões da FMEA, evidenciam as ações que devem ser levadas como prioridades, a fim de se reduzir a probabilidade das falhas e/ou mitigar seus efeitos.

Causas e Ações Recomendadas Preventivas foram organizadas em grupos menores para uma melhor visualização.

Os termos “manipulação inadequada no início ou fim do processo” e “manipulação inadequada durante o processo” são distintos. O primeiro refere-se à condução da tocha de maneira incorreta logo após a abertura ou logo antes da extinção do arco, ou seja, engloba os primeiros ou últimos 2 ou 3 centímetros de cordão de solda. Enquanto o segundo termo se refere à manipulação da tocha no processo como um todo. Tal distinção foi feita em uma tentativa de segmentar as instruções em um possível treinamento de soldadores.

O estudo feito apontou que a maioria das soluções para os problemas relacionados ao retrabalho no estaleiro já são conhecidas pelos funcionários. Porém tais soluções não são realizadas devido à grande pressão por produtividade e à falta de interação entre setores visando a produtividade como um todo, e não individualmente de cada setor.

Segundo Harsanyi e Selten (1988), a teoria de jogos é um método para análise de situações de conflitos e cooperação, as quais dependem do comportamento estratégico, onde ações dos agentes são parcialmente dependentes do que outros agentes podem fazer. Neumann e Morgenstern (1944) analisam duas abordagens na teoria dos jogos, a primeira, dos jogos cooperativos, descreve um comportamento ótimo em jogos com um número muito grande de jogadores. A segunda abordagem, estratégica ou de jogos não-cooperativos, foi restringida pelos autores a uma análise de dois jogadores com preferências diametralmente opostas, chamados de soma zero ou estritamente competitivos, onde o ganho de um é a perda do outro, como por exemplo um jogo de xadrez.

Nash (1950) propõe na teoria do equilíbrio cooperativo, que se dois jogadores escolhem estratégias que são as melhores respostas para o outro, então nenhum jogador tem motivo para utilizar uma estratégia diferente, logo estão em equilíbrio.

Em outras palavras, estratégias unilaterais não conseguem aumentar o ganho a um ponto ótimo, mas que devem ser formuladas de forma integrada, adotando abordagens que considerem as condições do panorama como um todo. Um conceito parecido é aplicado também por Nash (1950) em outro trabalho que aplica a teoria dos jogos um número “n” de jogadores superior a 2. Haneke e Saddi (1995) mostram algumas aplicações desta teoria.

No meio naval a teoria do equilíbrio possui diversas aplicações. A exemplo disso, temos o projeto de uma embarcação graneleira. Consegue-se uma menor resistência ao avanço com formas mais finas e menores dimensões no casco, porém o espaço interno é diretamente prejudicado por reduções na forma, e o ganho com economia de combustível e desempenho da embarcação caso a geometria fosse otimizada visando apenas a performance, seria mascarado pela baixa arqueação bruta obtida, resultando em uma embarcação que não cumpre sua função de forma eficiente. Evidenciando a busca de um ponto de equilíbrio na geometria o qual requira a menor força necessária de propulsão e concomitantemente comporte a arqueação necessária.

Na produção um cenário muito parecido é visto. Em uma situação hipotética um bloco poderia ser montado da maneira mais rápida possível, sem limpeza, chanfragem, ponteada de forma grosseira, visando otimizar o tempo de montagem. Isto faria com que a soldagem levasse muito mais tempo para preparar as juntas, possivelmente tendo que refazer cordões de solda, gerando um aumento de trabalho e retrabalho grande o que, de acordo com Cotta (2014), promove a geração de tensões residuais e contrações grandes no bloco, tipicamente acarretando em um tempo muito maior na edificação para desempenho e alinhamento. Assim, possivelmente o tempo total gasto para construir e edificar a embarcação é muito maior do que se tivesse sido aplicado um equilíbrio desde os primeiros estágios da fabricação.

Caso houvesse um melhor planejamento vindo do departamento de engenharia para o corte das chapas, de forma a saírem já chanfradas, combinadas com uma limpeza na montagem padronizada, controle de espessura do primer, boa preparação de junta feita pelo soldador, e sequências de soldagem adotadas de forma a trazer um mínimo de tensões residuais e distorções trariam dinamicidade à

soldagem e edificação, eliminando grande parte do retrabalho e do aumento de trabalho necessário para suprir possíveis deficiências e descontinuidades que possam vir a ocorrer durante a soldagem e a edificação.

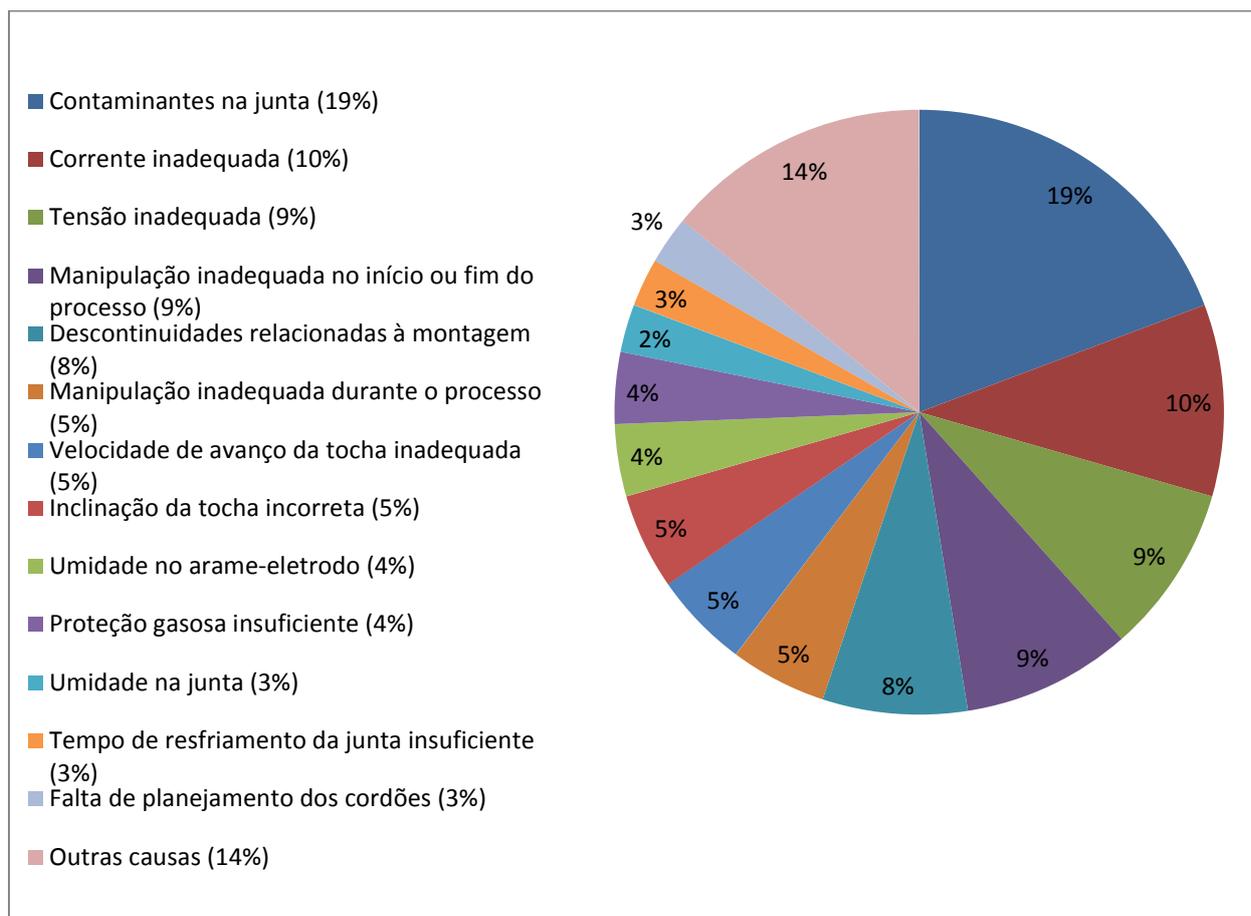
Outro fator que possibilita muitas falhas e retrabalho na produção é a falta de padronização de processos. Processos padronizados seguidos à risca não apresentam falhas. No setor de soldagem vê-se especificações de procedimento de soldagem para processos muito generalizados, englobando muitas espessuras de chapas o que proporciona uma margem grande para erros, e acaba tornando as especificações um documento pouco utilizado na produção. A criação de especificações de procedimentos internos seria uma boa maneira de padronizar a maioria dos processos, como recomendado na TQM – Total Quality Management – deve-se fazer o procedimento correto desde a primeira vez e todas as vezes, eliminando a necessidade de retrabalho. (WILSON; DELL; ANDERSON, 1993)

De acordo com Harry e Schroeder (1999) pressões em negócios ou culturais tendem a fazer com que algumas organizações se comportem da seguinte maneira quando se deparam com problemas: não fazer nada e esperar o problema desaparecer; negar a existência do mesmo, minimizando sua importância e questionando os motivos de quem identifica o problema; ou partem para tentativa e erro e perseguindo falsas pistas. Em contrapartida, a análise de falha esclarece os modos de falha e identifica as causas permitindo o desenvolvimento de um plano de ações eficaz, o qual permite a padronização de processos com as principais soluções incorporadas. Ressalta-se que a padronização deve ser assumida como um compromisso de longo termo, para um benefício maior de mitigação de falhas. (SMITH, 1998)

5.2.1 Solda nas Portas de Visita

A Figura 30 ilustra a porcentagem na qual cada grupo de causas atuam nos diversos modos de falha.

Figura 30 Causas (porta de visitas)



Fonte: Autor

Verificou-se que uma limpeza da junta está relacionada à prevenção de aproximadamente 19% dos modos de falha, caracterizando-a como a principal ação preventiva. Devido às restrições após a montagem, a importância da padronização no processo de montagem desta peça é evidenciada.

Parâmetros de soldagem especificados de maneira muito ampla na EPS como velocidade de soldagem, tensão e corrente, somados relacionam-se à 24% das causas, atuando de forma muito importante nas características físicas e mecânicas do cordão.

Descontinuidades relacionadas à montagem somam 8% influenciando de maneira importante a solda nas peças.

A manipulação da tocha inadequada soma 14% em seus dois tópicos de causas, sendo que a maioria das deficiências no movimento está relacionada à

abertura ou finalização do arco e acabamento nos mesmos, atuando de maneira importante nas emendas dos cordões.

As extremidades da porta onde serão soldadas devem estar no metal brilhante, livres de metal galvanizado, assim como a chapa base do tanque onde será soldada. A peça deve ser ponteadada apenas no seu interior, para que todos os pontos possam ser removidos permitindo uma solda uniforme, de forma a atuar na prevenção de aproximadamente 8% das causas relacionadas à descontinuidades na montagem.

Algumas correções na técnica podem ser aprimoradas nos soldadores para que soldem as portas de visita, estes podem receber um treinamento esporádico de modo a reforçar as boas práticas de soldagem, para que executem a técnica com bom desempenho.

Foi de unânime opinião nas reuniões que a emenda dos cordões deve ser muito bem feita em soldas estanques, principalmente nas portas de visita. Os locais de abertura e fechamento de arco não devem se sobrepor entre passes. Deve ser feito um acabamento, comumente chamado de unha, nos pontos de emendas, de forma a promover uma movimentação uniforme da tocha e bom acabamento. Para tal, na parte externa das portas recomenda-se o uso de retíficas, enquanto no interior pode-se utilizar a lixadeira.

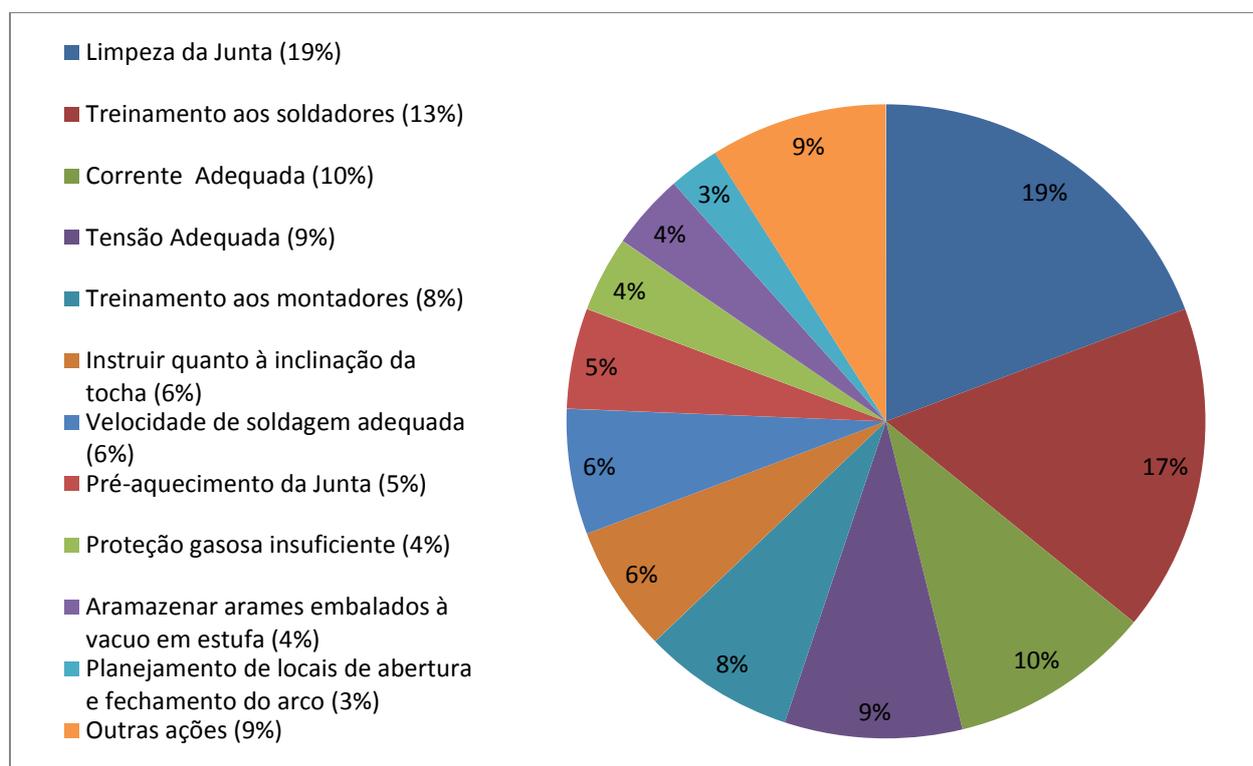
Durante os testes feitos em bancada, constatou-se que o cabeçote leva cerca de 4 segundos para estabilizar os parâmetros de soldagem quando o arco é aberto. Tal fato indica uma possível falta de qualidade nos primeiros centímetros de solda, uma vez que não são feitos com os parâmetros recomendados na EPS, reforçando a necessidade do acabamento nas emendas, e o distanciamento entre elas. Estimou-se que o comprimento do cordão feito nesse período de instabilidade de arco não é superior a 33 milímetros levando como base a velocidade de 50 centímetros/minuto, valor limite recomendado na EPS. Portanto o distanciamento entre emendas de cordões deve ser de no mínimo 35 milímetros a fim de promover uma vedação com solda de qualidade.

Outra recomendação que facilitaria a etapa de fabricação seria uma alteração no projeto da porta, aumentando em 1 polegada a distância do suporte à chapa, já

permitiria uma melhor preparação da junta com a utilização da lixadeira na parte de trás.

Também, foi de consenso nas reuniões que vazamentos podem decorrer de uma combinação de modos de falha, por exemplo, uma deficiência na emenda dos cordões de um lado permite a passagem de fluido, que atravessa um canal onde houve falta de penetração e pode vazar por uma mordedura ou falta de fusão. A Figura 31 ilustra as ações preventivas agrupadas.

Figura 31 Ações Recomendadas Preventivas para a solda nas portas de visitas



Fonte: Autor

Limpeza da junta mostrou-se como uma das ações mais influentes quanto à prevenção de causas de modos de falha, englobando a preparação da junta feita pelo soldador e a limpeza anterior à montagem, que neste caso é tão importante quanto.

Treinamento e conscientização dos soldadores sobre os possíveis erros comuns a serem cometidos nesta solda específica, tanto quanto à inclinação, acabamentos nas emendas e movimento de translação da tocha.

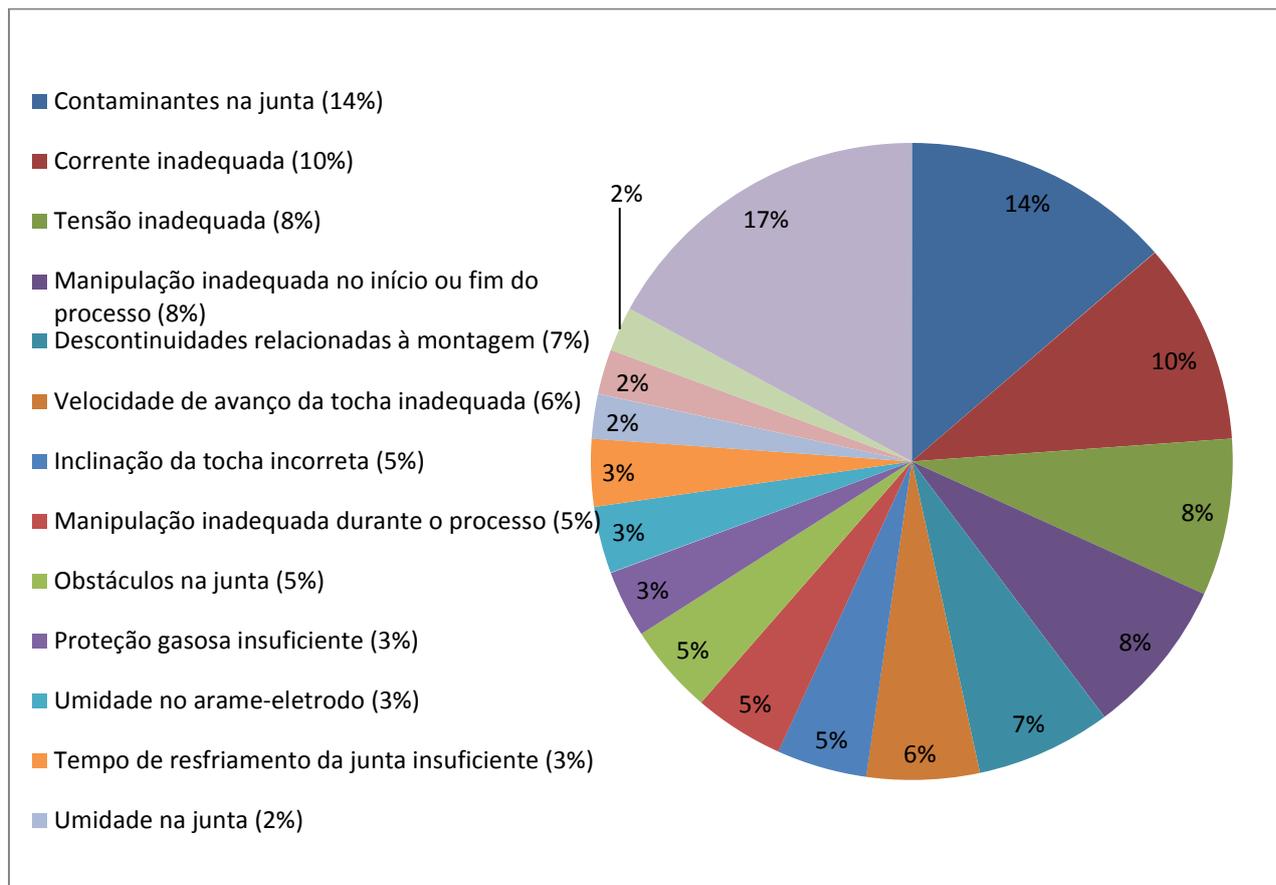
5.2.2 Soldas de Juntas em Ângulo

De maneira similar à solda nas portas de visita, a limpeza e preparação da junta mostrou ter um papel de importância, estando relacionada a prevenção de 14% dos modos de falha, enquanto a utilização de parâmetros adequados de soldagem (corrente, tensão e velocidade) está relacionada a 24% dos modos de falha. Tais dados encontram-se nas Figuras 32 e 33.

Foi consenso nas reuniões a importância da eficiência na emenda dos cordões e foi observado que em sua grande maioria, as falhas ocorrem em locais onde há obstrução para acesso da lixadeira, como vértices ou escalopes. Portanto, recomendou-se a não sobreposição das emendas, e planejá-las sempre fora destes locais de difícil acesso, facilitando o acabamento para as emendas.

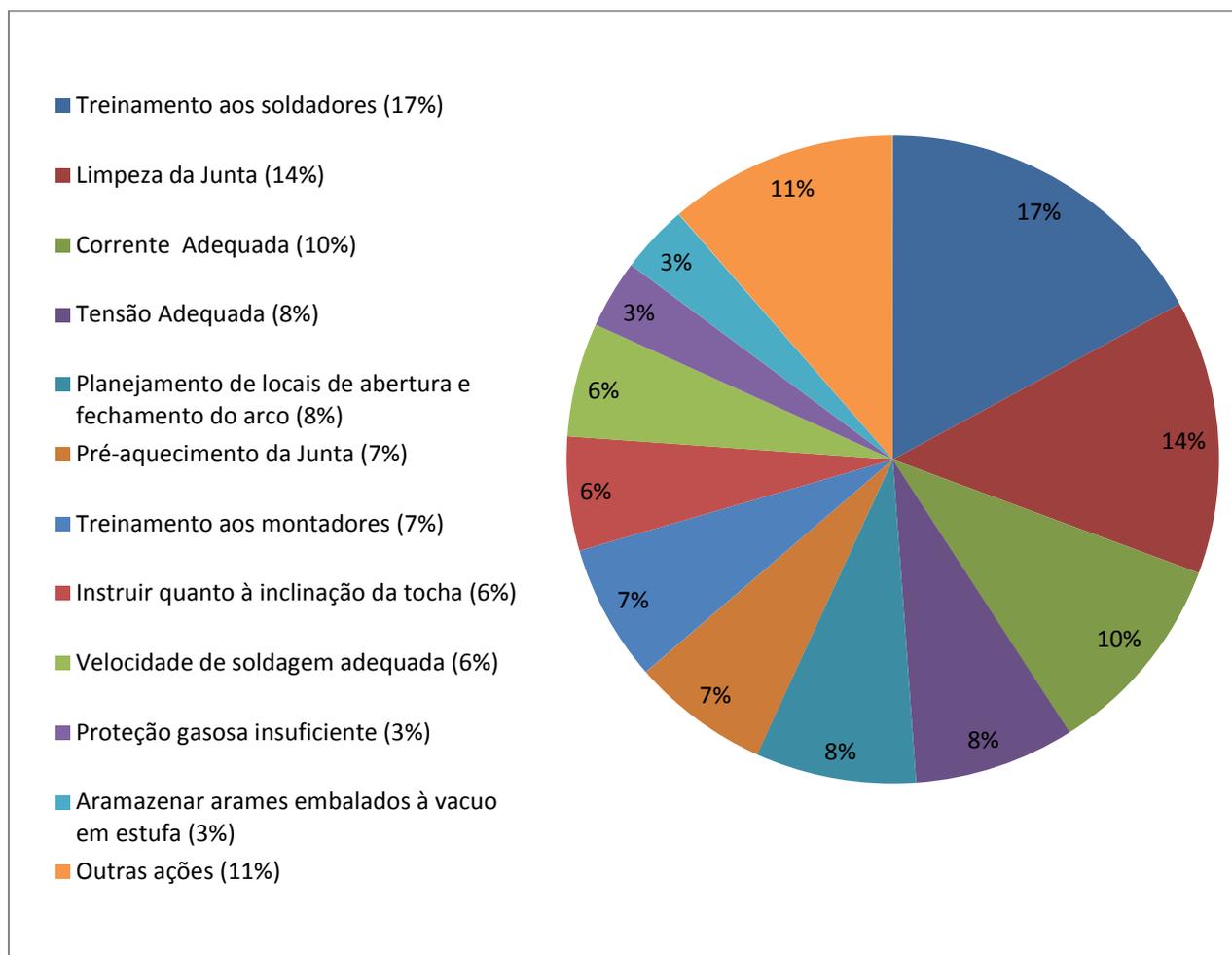
Em locais onde o acesso da tocha é dificultado, recomenda-se a utilização de uma tocha flexível a qual possui um bocal com menores dimensões ou a utilização de eletrodos revestidos para cobrir estas deficiências.

Figura 32 Causas (soldas de juntas em ângulo)



Fonte: Autor

Figura 33 Ações Recomendadas Preventivas (Junta em ângulo)



Fonte: Autor

5.3 AVALIAÇÃO DAS AÇÕES PROPOSTAS

A validação das ações propostas foi feita no teste de um protótipo de tanque em formato de cubo, com lados de 1 metro. A espessura escolhida das chapas foi de meia polegada, pois é uma espessura frequentemente utilizada nas embarcações.

O protótipo possui uma porta de visita e juntas em ângulo com soldas em posições comuns de soldagem no estaleiro, são elas: plana, vertical e sobre cabeça. Também foram realizadas soldas de topo nas posições plana, sobre cabeça e vertical.

Apesar da análise de falhas proposta limitar-se as soldas das portas de visita e de juntas em ângulo, procurou-se especificar o procedimento para a solda em juntas de topo praticando as boas práticas de soldagem propostas. São elas: a boa preparação de junta; limpeza; padronização do ponteamto das chapas durante a montagem em posições de acesso da lixadeira; fazer acabamentos nos locais de emenda dos cordões; utilização de parâmetros de soldagem compatíveis com os especificados; propôs-se uma sequência de soldagem na qual o arco não é extinguido ou aberto em posições de acesso restrito à lixadeira e os locais de abertura e fechamento não se sobrepõe entre passes.

As Figuras 34 e 35 ilustram a preparação da junta e a montagem inicial das chapas. Recomenda-se a limpeza da junta até que a mesma tenha a aparência de metal brilhante, livre de impurezas e contaminantes, de forma a não afetarem o processo de soldagem.

Figura 34 Preparação de junta anterior à montagem



Fonte: Autor

Figura 35 Montagem da peça com a junta preparada



Fonte: Autor

A Figura 36 ilustra o travamento das chapas de topo, anterior à fabricação do chanfro por goivagem. Os pontos serão removidos neste processo, porém ainda é recomendado, com menor ênfase, a preparação da junta anterior ao ponteamto. Visto que uma remoção ineficiente dos mesmos na goivagem pode favorecer a presença de descontinuidades.

Nas laterais, estão ilustrados os pontos de fixação feitos em locais de acesso da lixadeira, os quais permitem uma remoção facilitada. Esta é necessária para a soldagem, a qual é feita após a peça ser travada do outro lado. Neste protótipo foram feitos pontos apenas de um lado da junta, para que a soldagem iniciasse do lado oposto, travando a peça com o passe de raiz. Como distorções da geometria podem ocorrer, recomenda-se a utilização de cantoneiras que não interfiram na junta, e tenham fácil remoção. Não é recomendado que os três passes de solda sejam feitos de uma vez de um só lado da chapa, pois podem acarretar em distorções na peça caso o outro lado não esteja bem travado.

Figura 36 Travamento das peças com pontos em locais acessíveis a lixadeira



Fonte: Autor

A chanfragem das chapas é ilustrada na Figura 37. Este processo é feito por goivagem a arco com eletrodo de grafite. Após a goivagem é necessário um acabamento com esmeril, pois há resíduos do processo e o formato do chanfro pode ser propício ao aprisionamento de escória. O chanfro deve ter um formato entre um "U" e um "V", ou seja, deve ser mais arredondado do que um "V", porém não deve ter faces verticais como um "U", as mesmas devem possuir inclinação, como recomendado pela norma IACS, ilustrado na Figura 8.

Figura 37 Goivagem da junta de topo na posição sobre-cabeça



Fonte: Autor

As Figura 38, 39, 40 e 41 ilustram respectivamente: as borras que ficam na junta logo após o processo de goivagem; a terminação do chanfro com acabamento de esmeril a fim de remover as borras, carepas e também corrigir a inclinação da face do chanfro; chanfro preparado para soldagem; formato adequado do chanfro após o acabamento com esmeril e goivagem.

Figura 38 Junta após ser goivada, ainda sem acabamento de esmeril



Fonte: Autor

Figura 39 Acabamento e preparação da junta após a goivagem



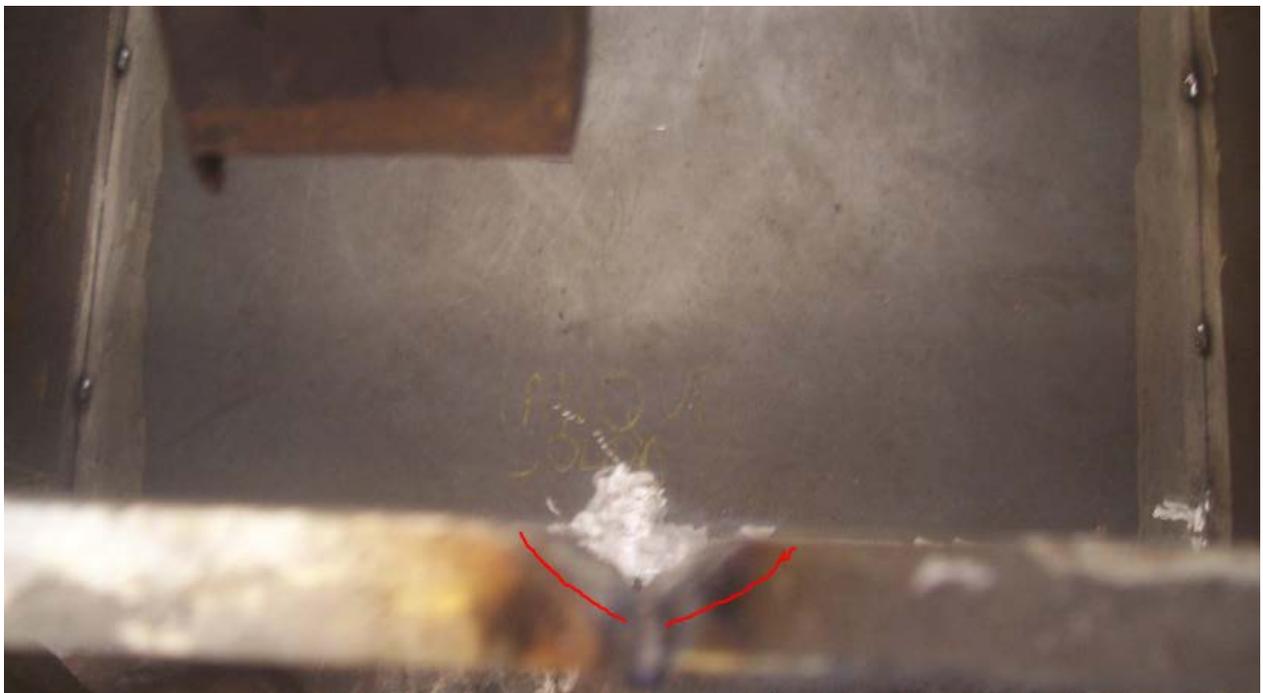
Fonte: Autor

Figura 40 Junta de topo chanfrada pronta para soldagem



Fonte: Autor

Figura 41 Preparação da junta de topo com goivagem e acabamento com a lixadeira



Fonte: Autor

As Figuras 42 e 43 ilustram os processos de soldagem de juntas de topo nas posições sobre cabeça e vertical ascendente. Recomenda-se sempre utilizar valores de parâmetros dentro dos especificados na EPS.

Figura 42 Soldagem da junta de topo sobre-cabeça



Fonte: Autor

Figura 43 Soldagem vertical ascendente da junta de topo



Fonte: Autor

Durante a construção do protótipo, foi observado que após a abertura de arco o cabeçote leva cerca de 4 segundos para estabilizar o arco nos parâmetros desejados, ou seja, a uma velocidade de soldagem de 50 centímetros/minuto, os primeiros 3,3 centímetros de solda não são feitos com os valores especificados na EPS, o que pode levar a uma não obtenção dos resultados desejados de penetração, fusão e propriedades mecânicas. Explicitando a importância de remover estes trechos, fazendo acabamentos com retífica ou esmeril, estes são coloquialmente chamados de “unhas”, e devem ter dimensões entre 1,5 a 2,5 centímetros nos locais de abertura de arco, e também de não os sobrepor entrepasses.

O fechamento de arco também é um momento crítico para o processo, pois o resfriamento da poça de fusão é muito veloz comparado ao restante do cordão, o que pode acarretar na geração de discontinuidades como o aprisionamento de escória, ou de gases na forma de porosidades. Logo, o acabamento também deve ser feito nos locais de fechamento de arco.

Uma forma de garantir que estes acabamentos sejam feitos é realizar a abertura e fechamento de arco em posições de acesso da lixadeira, e espaçá-los com pelo menos 4 centímetros entre passes, garantindo que solda de qualidade cubra a junta em pelo menos 2 passes.

A Figura 44 ilustra o local de início do processo do passe de acabamento na solda de topo, foi feito fora do vértice, pois é um local onde a fusão tende a ser dificultada.

Rodrigues (2010) mostra comparativamente que para cordões com bom aspecto visual, mesmos valores de corrente e velocidade de soldagem, a penetração e largura do cordão, diminuirá e aumentará respectivamente com uma elevação dos valores de tensão. Nos passes de raiz, onde o chanfro é mais estreito e deseja-se uma boa penetração é interessante utilizar um comprimento de arco um pouco menor, selando a junta desde o primeiro passe.

Modenesi, Marques e Bracarense (2009) recomendam que deve-se ter o cuidado de manter a concavidade do cordão dentro do aspecto desejado, pois quando excessiva pode ocasionar falta de fusão.

Figura 44 ilustra os passes de acabamento da solda de topo, e recomendações propostas com fechamento e abertura de arco em locais de acesso à lixadeira, para que possa ser feito o acabamento



Fonte: Autor

A Figura 45 ilustra a preparação da junta e entre passes que deve ser feita com disco de desbaste ou chanfro, a fim de promover um melhor acabamento e remover possíveis contaminantes como, por exemplo, excesso de *primer*. Caso seja necessária apenas a limpeza superficial e remoção de respingos de baixa aderência pode-se utilizar a escova rotativa, ilustrada na Figura 46.

Figura 45 Preparação da junta



Fonte: Autor

Figura 46 Limpeza da junta com escova rotativa, e passes com fechamento e abertura de arco em posições distintas



Fonte: Autor

Foi proposta uma sequência de soldagem para os cantos, a qual evita a abertura de arco nos mesmos. O fechamento nos vértices é feito apenas no pé de galinha, onde não há necessidade de acabamento, visto que esse é apenas um reforço.

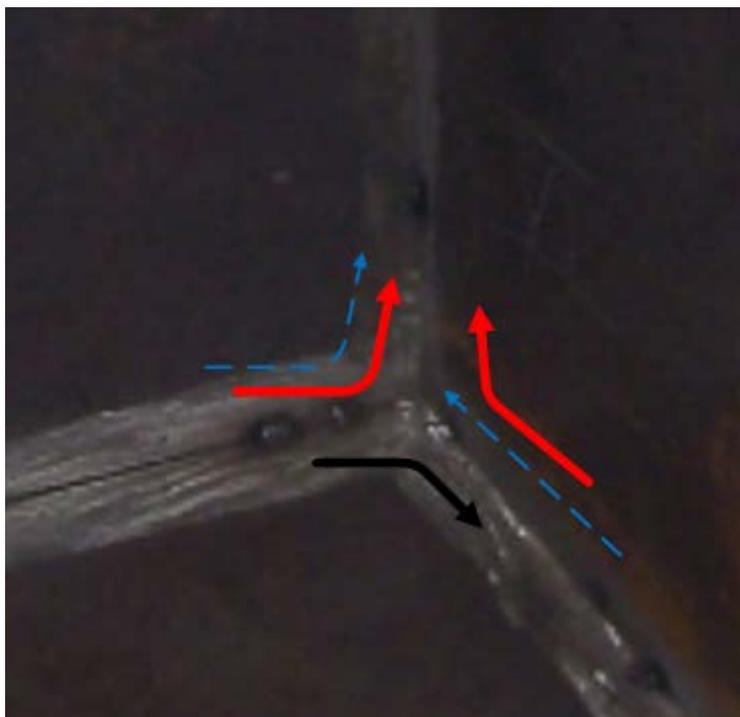
- O passe de raiz é feito em uma mesma posição, no caso da figura posição plana, é importante que o cordão continue até se distanciar da quina, conforme ilustra a Figura 48;
- O primeiro passe de acabamento em um dos lados na horizontal é feito em direção ao vértice e continua na posição vertical ascendente, fazendo o passe de raiz nesta posição;
- O primeiro passe de acabamento na posição plana, do outro lado, é feito em direção ao vértice e continua na vertical ascendente, distanciando-se da quina e o arco é interrompido a uma distância de pelo menos 4 centímetros do passe de raiz;
- O segundo passe de acabamento em um dos lados da posição plana é feito em direção ao vértice e tem continuidade na posição vertical, como passe de acabamento também;
- O último passe de acabamento na posição plana é feito e se interrompe no vértice fazendo um reforço, o pé de galinha.

A Figura 47 ilustra a sequência proposta, em preto está o primeiro cordão a ser soldado, seguido por um dos dois em vermelho contínuos, a ordem entre os dois fica por conta da preferência do soldador. O passe mostrado do lado direito em azul na linha pontilhada pode ser feito do outro lado, conforme preferência. Por último deve ser feito o terceiro passe na posição plana encerrado no pé de galinha.

Esta sequência de soldagem procura apenas padronizar os locais de abertura e fechamento de arco. Não é sugerido que os cordões sejam feitos de forma simultânea nestes locais, o que poderia acarretar em níveis de distorções que se tornem problema. A sequência de cordões deve ser feita de forma a minimizar a distorção e empenamento das chapas.

As Figuras 48, 49 50 e 51 ilustram alguns passos da sequência proposta.

Figura 47 Sequência de soldagem proposta



Fonte: Autor

Figura 48 Continuidade do passe de raiz



Fonte: Autor

Figura 49 Continuidade do segundo passe conforme sugerido na sequência de soldagem



Fonte: Autor

Figura 50 Continuidade do segundo passe de solda



Fonte: Autor

Figura 51 Sequência de solda encerrada no pé de galinha



Fonte: Autor

Em locais de acesso restrito à lixadeira a limpeza entre passes deve ser feita utilizando as ferramentas disponíveis. São sugeridas piqueta, escova de aço e pincel. Cada passe de solda deve ser devidamente limpo de escórias ou outras impurezas antes do passe subsequente. As Figuras 52 e 53 ilustram o uso de algumas dessas ferramentas.

Figura 52 Remoção da escória em locais de acesso restrito à lixadeira



Fonte: Autor

Figura 53 Preparação da junta em locais restritos a lixadeira



Fonte: Autor

A montagem das portas de visita deve ser feita de maneira padronizada, de forma a permitir uma boa sequência de soldagem e a facilitar a limpeza. Antes de pontear a porta deve-se remover as impurezas do metal base com esmeril, como mostrado na Figura 54. A área da porta onde será soldada deve ser lixada, de forma que a camada de metal galvanizado seja completamente removida, como ilustrado na Figura 20. Segundo a EPS, a perna da solda nas portas deve ter 9 milímetros de largura, portanto deve-se lixar o metal galvanizado em pelo menos 2 centímetros nos locais onde será feita a fixação, a fim de evitar contaminação, tanto na parte interna quanto externa. A Figura 55 mostra a porta pronta para fixação.

Os pontos de travamento da montagem devem ser feitos apenas no interior, como ilustrados na Figura 56, onde o acesso da lixadeira é facilitado. Após a soldagem do passe de raiz na parte externa, os pontos de fixação já podem ser removidos, ilustrados na Figura 64.

Figura 54 Preparação da junta anterior à montagem da porta de visita



Fonte: Autor

Figura 55 Suporte Galvanizado da porta de visita lixado, preparado para montagem



Fonte: Autor

Figura 56 Montagem da porta de visita, com pontos de fixação no interior da mesma



Fonte: Autor

Figura 57 Obstrução do acesso da lixadeira



Fonte: Autor

Figura 58 Obstrução do acesso da lixadeira à parte de trás do suporte



Fonte: Autor

As Figuras 57 e 58 ilustram que o acesso da lixadeira é restrito na parte externa da porta, porém a limpeza entre passes ainda deve ser feita utilizando piqueta, escova de aço, e pincel. O acabamento nos locais de fechamento e abertura de arco deve ser feito com retífica, de aproximadamente 2 centímetros no local de abertura, pois corresponde ao período de instabilidade inicial do arco. No local de fechamento deve-se tomar o cuidado apenas de promover uma superfície adequada para o avanço do cordão que virá emendar aquele passe. As Figuras 59, 60 e 61 ilustram o acabamento a ser feito.

Recomenda-se um distanciamento entre aberturas de arco de pelo menos 4 centímetros, de forma que seja promovida uma boa emenda nos cordões e entre passes conforme consenso nas reuniões de FMEA e recomendado por Nunes e Carvalho (2010) a não sobreposições das emendas.

O processo de soldagem da porta de visita é relativamente lento, mas a produtividade é garantida devido a alta taxa de deposição do processo e velocidade do arame. A Figura 62 ilustra o processo de soldagem na porta de visita. Ressalta-se que todas os cordões na posição vertical devem ser feitos com progressão ascendente. Notou-se que a experiência do soldador o faz conduzir a tocha com velocidades relativamente mais lentas em comparação às outras juntas de ângulo, também a regulagem da máquina estava com uma tensão relativamente mais alta. Os valores de velocidade estavam sempre na margem inferior da recomendação da EPS. Segundo Modenesi, Marques e Bracarense (2009) isto garante um aumento no aporte térmico e garante uma boa fusão. Enquanto os valores de tensão variaram entre 28 e 30 V, a utilização deste comprimento de arco em combinação com os valores de corrente utilizados (184-200 A).

Figura 59 Acabamento nos locais de fechamento e abertura de arco



Fonte: Autor

Figura 60 Unha de Acabamento feita com retífica na porta de visitas



Fonte: Autor

Figura 61 Acabamento e continuidade do cordão



Fonte: Autor

Figura 62 Soldagem na porta de visitas



Fonte: Autor

Figura 63 Não-sobreposição dos locais de abertura e fechamento de arco entre passes



Fonte: Autor

Figura 64 Remoção dos pontos de montagem no interior da porta após a soldagem externa



Fonte: Autor

A fim de avaliar a integridade e estanqueidade dos cordões de solda produzidas no protótipo foram realizados ensaios não destrutivos de líquido penetrante e teste de pressão, seguindo o procedimento padrão da empresa.

A Figura 65 ilustra o ensaio de líquido penetrante no interior da porta de visitas, já a Figura 66 ilustra o mesmo ensaio em algumas outras juntas do protótipo.

Figura 65 Inspeção de Líquido penetrante na solda da porta de visitas



Fonte: Autor

As Figuras 66 e 67 ilustram o teste de pressão. Já a Figura 68 ilustra a pulverização de água e sabão nas juntas soldadas. O protótipo obteve êxito nos dois testes, validando as hipóteses recomendadas no trabalho.

Figura 66 Teste de pressão no tanque protótipo



Fonte: Autor

Figura 67 Pressurização do tanque durante o teste



Fonte: Autor

Figura 68 Teste de pressão



Fonte: Autor

O quadro 3 propõe alguns valores utilizados na soldagem do protótipo como sugestão de padronização, uma vez que os valores especificados na EPS são muito abrangentes. Ressalta-se que estes valores não foram otimizados para o processo. São valores obtidos utilizados dentro das recomendações do EPS que tiveram boa aparência e promoveram a estanqueidade das juntas. Conhece-se a dificuldade em manter estabelecidos os valores de forma exata, pois há variações nos mesmos durante o processo. Sugere-se um estudo futuro da sensibilidade da variação dos parâmetros.

Quadro 3 Especificação de procedimento interno

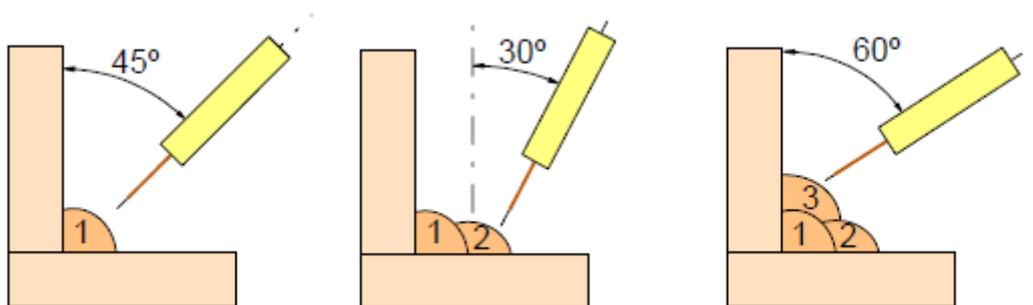
Junta	Posição	Camada	Processo	Metal depositado		Polaridade	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade (cm/min)	Inclinação
				Classe	Diâmetro (mm)					
Topo	Vertical Ascendente	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	160	27	19,6	90°
Topo	Vertical Ascendente	Enchimento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	198	28	22,8	90°
Topo	Vertical Ascendente	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	198	28	22,8	90°
Topo	Sobre cabeça	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	170	26,6	25	90°
Topo	Sobre cabeça	Enchimento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	182	27,4	27,5	90°
Topo	Sobre cabeça	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	182	27,4	27,5	90°
Topo	Plana	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	165	27	25	90°
Topo	Plana	Enchimento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	192	28	31,6	90°
Topo	Plana	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	192	28	31,6	90°
Ângulo	Vertical Ascendente	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	182	26,4	25	45°
Ângulo	Vertical Ascendente	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	208	27,2	31,8	65°/45°
Ângulo	Sobre cabeça	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	200	26	29	45°
Ângulo	Sobre cabeça	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	204	27,2	38	65°/45°
Ângulo	Plana	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	174	26,4	31	45°
Ângulo	Plana	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	200	28	30	65°/45°
Porta de visita	Vertical Ascendente	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	196	27,5	25,2	45°
Porta de visita	Vertical Ascendente	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	192	28,8	25	65°/45°
Porta de visita	Arredondado Ascendente	Raiz	FCAW	E71T1	1,2	CC+	194	28,4	25	45°
Porta de visita	Arredondado Ascendente	Acabamento	FCAW	E71T1	1,2	CC+	190	28,8	25,8	65°/45°

Fonte: Autor

Nas FMEAs, constatou-se que um ângulo de inclinação excessivo pode vir a gerar modos de falha, por isso foram sugeridos alguns padrões. A inclinação indicada no Quadro 3 é correspondente ao sentido transversal ao avanço da tocha. Okumura e Tanigushi (1982) recomendam que nas soldas de junta de topo a inclinação deve ser de 90° no sentido transversal ao avanço da tocha. Caso um cordão de solda com dimensões e penetração equilibrada seja desejado utiliza-se este ângulo no sentido de avanço também. A Figura 1 indica o sentido negativo e positivo de avanço da tocha, nos limites de 10 a 15 graus de variação se obtém uma baixa penetração e um cordão de convexidade larga para a inclinação negativa, enquanto quando positiva tem-se um cordão convexo e boa penetração.

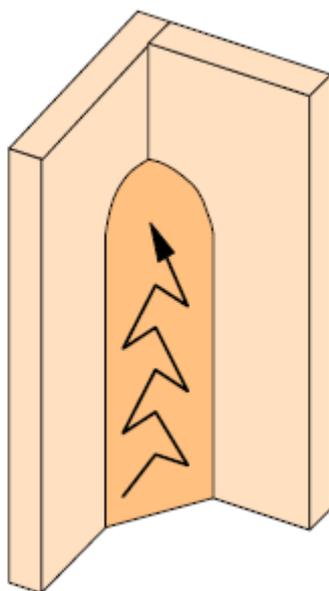
Para soldas de junta em ângulo a mesma recomendação serve para o sentido de avanço da tocha, sendo que no sentido transversal é recomendada por Modenesi (2000) uma inclinação na tocha, ilustrada na Figura 69. O mesmo autor recomenda um sentido de tecimento em soldas ascendentes para juntas de ângulo ilustrados na Figura 70.

Figura 69 Ângulo de inclinação no sentido transversal de avanço da tocha



Fonte: Modenesi (2000)

Figura 70 Tecimento do cordão em soldas ascendentes



Fonte: Modenesi (2000)

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como proposta analisar possíveis modos de falha em um processo de soldagem crítico ao estaleiro e propor ações preventivas que minimizassem o retrabalho relacionado ao processo.

O primeiro passo foi a identificação do processo crítico, através de um acompanhamento por investigação *in loco* e entrevistas não documentadas com profissionais do estaleiro. Quando foram identificadas ocorrências de falhas com relação á falta de estanqueidade em soldas de juntas de ângulo e de portas de visita nos tanques das embarcações.

Os processos foram caracterizados pelo acompanhamento da produção e por meio da construção das planilhas de FMEA.

As práticas existentes no estaleiro foram comparadas com as proposições da EPS. Notou-se que os documentos eram abrangentes, de forma a permitir uma margem para falhas.

As planilhas FMEA foram construídas sistematizando o conhecimento elicitado nas entrevistas, por observação dos processos, por pesquisa bibliográfica e em reuniões específicas de FMEA. .

Baseado nas análises dos modos de falha e seus efeitos (FMEA), propôs-se algumas alterações nos procedimentos de montagem e soldagem, destaca-se principalmente:

- nas portas de visita, a limpeza padronizada do metal galvanizado e do metal base da chapa, o ponteamto apenas na parte interna, a utilização de retífica para acabamento nas emendas na parte externa e a não sobreposição dos passes; e
- nas soldas em ângulo, foi proposta uma sequência de soldagem que melhora a emenda nos cordões, a utilização de tochas flexíveis ou eletrodo revestido para soldar lugares obstruídos como escalopes e as boas práticas de soldagem foram reforçadas.

Além disso, foi realizado um experimento em bancada que serviu como base para testar algumas das ações propostas e propor valores de referência para os parâmetros de soldagem.

Os motivos que levam os modos de falha a acontecer foram explicitados nas planilhas FMEA, e na revisão bibliográfica, como as causas de modos de falha.

Ressalta-se as dificuldades na aplicação da técnica FMEA no estaleiro. A reunião de pessoas de diferentes níveis de envolvimento no processo faz com que alguns sintam-se pouco a vontade para participar e omitam sua participação. Também, por ser uma técnica desconhecida à maioria, em alguns momentos foi empregado grande parte do tempo da reunião para a justificar os motivos da mesma estar acontecendo e para explicação dos conceitos aplicados na técnica. Uma vez esclarecidas as informações sobre a técnica e o trabalho, as reuniões desenvolveram bastante e o conhecimento dos presentes agregou muito, acrescentando informações que muitas vezes não estão presentes na literatura, ou passam despercebidas.

Por fim, foram identificadas algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Análise de falhas em soldas de tubulação, as quais também apresentam um índice de retrabalho nas etapas de teste;
- Análise de falhas para soldas de arco submerso;
- Estudo comparativo entre no tempo gasto e geração de tensões residuais geradas na chanfragem de chapas feitas com maçarico oxi-acetilênico, goivagem a arco e mecanicamente;
- Estudo comparativo entre tempo gasto e geração de tensões residuais das soldas de topo feitas com uso de cobre-juntas cerâmicos, montadas com abertura de raiz e chanfro em duplo U feito atualmente;
- Análise de falhas nas soldas de juntas de topo e cruzamentos, onde há um índice de retrabalho devido à testes de ultrassom e Raio-X exigidos pela sociedade classificadora;
- Experimentos para quantificar a influência do *primer* na junta;
- Análise da qualidade do cordão de solda nos 4 segundos iniciais à abertura do arco;
- Estudo da sensibilidade/otimização de parâmetros para o processo estudado.

REFERÊNCIAS

ABS (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING), **Rules for Building and Classing Steel Vessels Under 90 Meters in Length**, Part 3, 2014. Disponível em <http://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/5_Under90_2014/Part3> Acessado em 02/12/2014.

_____. **Rules for Materials and Welding**. Part 2, 2014. Disponível em <http://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/generic/linkedgeneralguidetitles/current/part2_2014/Part_2_e-July14.pdf> Acessado em 02/12/2014.

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). **NBR 5462: Confiabilidade e Mantabilidade**. Rio de Janeiro, 1994.

ALVES, D.; MAIORKA, J. V. **Análise macrográfica e medições de dureza da zona afetada pelo calor de junta soldada**. Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 6 p. Trabalho não publicado

AMIN, M. **Pulsed current parameters for arc stability and controlles metal transfer in arc welding**. Metal Constrution, p. 272-278, 1983.

ARAÚJO, E. T. **Integração da ferramenta FMEA com a avaliação dos custos da qualidade: Uma aplicação no processo de soldagem GMAW**. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2011.

BRACARENSE, A. Q.; SORAGI, C.; FELIZARDO, I. **Parametrização para soldagem orbital robotizada de tubos com arame tubular**. Belo Horizonte, p.1-5, jan. 2006.

CHRYSLER LLC, FORD MOTOR COMPANY, GENERAL MOTORS CORPORATION. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)**: Reference Manual. 2008. 4 ed. Estados Unidos, AIAG, 2008.

COSTA, C. M. S. **Fenômenos de instabilidade do arco na soldagem GMAW com gases de baixo potencial de oxidação**. 2006. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.

COTTA, M. A. D. **Melhorias em Qualidade de Solda: Estudo de Caso em Estaleiro**. 2014. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

DANTAS, M. S.; COSTA, S. C. **Uma Contribuição ao Estudo da Influência dos Parâmetros de Pulso na Qualidade da Solda em um Processo MIG/MAG Pulsado através da Técnica DOE**, XXIV Enegep, 2004.

DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco: Mitigação de perda de SF₆ em disjuntores**. Florianópolis, Nova Letra Gráfica & Editora, 2011.

ESTEFEN, S. F. et al. **Alívio das Tensões Residuais de Soldagem por Shot Peening**, São Paulo, p.1-14, ago. 2013.

FORTES, C. **Arames Tubulares**. Apostila ESAB S/A, Contagem: 2006.

GARCIA, R. P.; SCOTTI, A. Análise da Geração de Respingo Para o Processo FCAW e o Processo GMAW. **19º Posmec – Simpósio do Programa de Pós-graduação**, Uberlândia, p.1-2, out. 2009.

GUIDO PERLA & ASSOCIATES INC. Naval Architects/Marine, Mechanical & Electrical Engineers. **GPA 670 PSV SERIES**. Estados Unidos, 2005, p 7

HANEKE, U.; SADDI, V.; **Prêmio Nobel de Economia de 1994: Contribuições de Nash, Harsanyi e Selten à Teoria de Jogos**. Revista de Economia Política, vol 15, n 1, 1995.

HARRY M.; SCHROEDER S., **Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations**, Doubleday & Co., Inc., 1999

HARSANYI, J. C.; SELTER, R. **A General Theory of Equilibrium Selection in Games**. Cambridge, MIT Press, 1988.

IACS (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES). **No. 47 Shipbuilding and Repair Quality Standard**, 2013. Disponível em <http://www.iacs.org.uk/document/public/Publications/Guidelines_and_recommendations/PDF/REC_47_pdf193.pdf> Acessado em 10/08/2015.

KIM, J.; PARK, H. J. **The Weldability of 6mm Primer-coated Steel for Shipbuilding by CO₂ Laser (I)**: Effects of Primer Coating Condition and Gap Clearance. Korea Maritime University, Korea, 2005

KALPAKIJAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing Processes for Engineering Materials**. 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2008.

KOBE STEEL LTD. (Japão) (Org.). **Weld Imperfections and Preventive Measures**. Tokyo: Kobe Steel, Ltd, 2015.

MACHADO, E. **Influência dos ventos sobre a qualidade das soldas realizadas em estaleiros pelo processo arame tubular**. 2015. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Engenharias da Mobilidade, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MACHADO, I. G.. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre, 1996.

MARTINS FILHO, E. G. **Estudo da Influência relativa das variáveis do processo de soldagem MIG-MAG (GMAW) no passe de raiz.** 2012. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

MELLER, R. N. et al. **Análise Comparativa entre o Arame Maciço e o Tubular no Processo de Soldagem MIG/MAG - Posição Sobre-Cabeça.** Caxias do Sul p.1-9, abr. 2011.

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

MODENESI, P. J; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem.** Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. 209 p.

MODENESI, P. J. **Técnica Operatória de Soldagem GMAW,** Notas de Aula, Brasil, 2000

MOHAMAT, S. A. et al. **The Effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) processes on different parameters.** Elsevier, Selangor, p.1-5, 2012.

MOSTAFA, N. B.; KHAJAVI, M. N. **Optimisation of Welding parameters for weld penetration in FCAW.** Journal Of Achievements In Materials And Manufacturing Engineering. Gliwice, p. 1-7 2006.

NASH, J. F. **Two-Person Cooperative Games.** Econometrica n 18, Estados Unidos, 1950.

_____. **Equilibrium Points in N-Person Games.** Princeton University, Estados Unidos, 1950

NUNES, R. A.; CARVALHO, V. **Processos de Soldagem na Construção de Embarcações no Vale do Itajaí - SC.** 2010. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Tecnologia em Construção Naval, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, 2010.

OKUMURA, T.; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações.** Rio de Janeiro: Ltc - Livros e Técnicos Científicos Editora S. A., 1982. 461 p.

RAJENTHIRAKUMAR, D. et al. **Defect Reduction in Gas Tungsten Arc Welding Process Using Failure Mode Effects Analysis.** In: ACTA TEHNICA CORVINIENSIS, 2014, India. Bulletin of Engineering. Tamil Nadu: University Politehnica Timisoara, 2014. p. 1 - 4.

RIBEIRO, D. M. **Tecnologia da Solda.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.

RIBEIRO, P. L.. **Construção de PSV's: Análise de Casos Reais**. 2009. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RODRIGUES, E. R. **Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36**. 2010. 96 f. Monografia - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

RODRIGUES, L. O.; OLIVEIRA, L M; COSTA, S C. **Análise e Otimização do Rendimento da Taxa de Deposição no Processo de Soldagem com Eletrodo Tubular**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, out. 2007.

RODRIGUES, L. de O. **Análise e Otimização de Parâmetros na Soldagem com Arame Tubular**. 2005. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

SAE (Society of Automotive Engineering). **J1739**. Surface Vehicle Recommended Practice: Processes and Potential Failure Mode and Effects Analysis for Machinery, 2008.

SCOTTI, A. **A review on special metal transfer modes in gas metal arc welding**. RBCMJ. of the Braz. Soc. Mechanical Sciences, , v.XX, n.3, p. 465 –478, 1998.

SCUTTI, J. J., et al. Introduction to Failure Analysis and Prevention. In: **ASM Handbook**, vol. 11. Materials Park, OH: ASM International, 2002.

SMITH, G. F., **Quality Problem Solving**, ASQ Quality Press, 1998, p 7

USA Military Standard (MIL-STD), 1629A, **Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis**, 1980.

VAIDYA, V. **Shielding gas mixtures for semiautomatic welds**. Welding Journal, v.81, n.9, p.43-48, set. 2002.

VERAS, D. Santa Catarina registra pedidos de R\$ 4,1 bilhões. **Revista Portos e Navios**, Florianópolis, 2014. Disponível em <<http://www.portosenavios.com.br/industria-naval-e-offshore/25521-santa-catarina-registra-pedidos-de-r-4-1-bilhoes>>. Acessado em 10/09/2014

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

WILSON, P. F.; DELL L. D.; ANDERSON, G. F, **Root Causa Analysis: A Tool for Total Quality Management**, ASQ Quality PRESS, Estados Unidos, 1993 p 216

YIN, R. K. **Estudo de Caso: Planejamento e Métodos**. 4. ed, São Paulo, SP: Bookman, 2010.

