

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

EDGAR NATALINO ALVES SOBRINHO
FABIANO ANTÔNIO DE SOUSA FILHO
THIAGO PEIXOTO AMANCIO

**ANÁLISE DE FALHA EM ADAPTADOR DE
ALTA RESISTÊNCIA SOLDADO NA INDÚSTRIA DE
EQUIPAMENTOS PESADOS**

**São Paulo
2023**

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

EDGAR NATALINO ALVES SOBRINHO
FABIANO ANTÔNIO DE SOUSA FILHO
THIAGO PEIXOTO AMANCIO

**ANÁLISE DE FALHA EM ADAPTADOR DE
ALTA RESISTÊNCIA SOLDADO NA INDÚSTRIA DE
EQUIPAMENTOS PESADOS**

Trabalho científico elaborado como requisito
parcial para a conclusão do Curso de
tecnologia em Mecânica: processos de
Soldagem

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

**São Paulo
2023**

EDGAR NATALINO ALVES SOBRINHO
FABIANO ANTÔNIO DE SOUSA FILHO
THIAGO PEIXOTO AMANCIO

**ANÁLISE DE FALHA EM ADAPTADOR DE ALTA RESISTÊNCIA SOLDADO NA
INDÚSTRIA DE EQUIPAMENTOS PESADOS**

Projeto científico elaborado como
requisito parcial para a conclusão do
Curso Superior de Tecnologia Mecânica:
Processos de Soldagem.

Orientador(a): Me. Edgar de Souza Dutra

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Edgar de Souza Dutra (Orientador)

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Prof. Me. Joao Batista da Silva

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

Prof. Dr^a. Litzy Lina Choquechambi Catorceno

Assinatura: _____

Instituição: FATEC ITAQUERA

Data ____/____/____

RESUMO

Neste projeto, foi apresentado o estudo sobre análises de falhas em adaptadores de escavadeiras hidráulicas soldados pelo processo FCAW. O material estudado no implemento da máquina pesada foi o Hensley-4S, aço de alta resistência, apresentando carbono equivalente na ordem de 1,15%. Aplicando os conceitos de análises de falhas em sinergia com ferramentas da qualidade, foi possível evidenciar que a causa da trinca observada, foi a ausência do pós-aquecimento de soldagem com temperaturas entre 590° C e 680° C, refletindo em sinergia com uma microestrutura frágil e tensões residuais elevadas, tendo em vista a soldagem em torno contorno do adaptador. Para evidenciar as causas da trinca a frio, foi realizada análise química do material, além de utilizar os ensaios visual, líquido penetrante, dureza, macrografia e micrografias.

Palavras-Chave: Escavadeiras; soldagem; adaptadores, hidrogênio

ABSTRACT

This project presents a study on failure analysis of hydraulic excavator adapters welded using the FCAW process. The material studied in the heavy machine attachment was Hensley-4S, a high-strength steel with a carbon equivalent of around 1.15%. Applying the concepts of failure analysis in synergy with quality tools, it was possible to show that the cause of the crack observed was the absence of post-heat welding at temperatures between 590° C and 680° C, reflecting in synergy with a fragile microstructure and high residual stresses, given the welding around the adapter contour. In order to highlight the causes of the cold crack, a chemical analysis of the material was carried out, as well as visual, liquid penetrant, hardness, macrography and micrography tests.

Keywords: Excavators; welding; adapters, hydrogen.

Sumário

RESUMO.....	4
1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Justificativa	10
1.2 Objetivo Geral.....	10
1.2.1 Objetivos Específicos.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 União de Materiais	12
2.1.1 Soldagem	13
2.1.2 Soldagem FCAW	14
2.1.3 Equipamentos do Processo FCAW	15
2.1.4 Tipos de Arame Tubulares.....	15
2.2 Equipamentos pesados – Escavadeira hidráulica.....	18
2.2.1 Materiais Utilizados na Caçamba.....	19
2.3 Juntas dissimilares	20
2.3.1 Aços Carbono	20
2.3.2 Aços Fundidos de Alta Resistência.....	22
2.4 Metalurgia da soldagem.....	22
2.4.1 Transformações na Junta Soldada	24
2.4.2 Energia de soldagem	25
2.4.3 Ciclo Térmico.....	26
2.4.4 Diluição	26
2.5.1 Descontinuidades	28
2.5.2 Ensaios Destrutivos	32
2.5.3 Ensaios Não Destrutivos.....	32
2.6 Norma AWS D1.1	34
2.6.1 RQPS e EPS	35

2.7 Soldagem de manutenção e análises de falhas	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1 Ramo de atuação	40
3.2 Passo 1: Identificação do material	40
3.2 Passo 2: Identificação do problema	41
4 RESULTADOS	50
4.1 Passo 4: Determinação da causa raiz;.....	50
4.1.1 Ensaio visual de soldagem (EVS)	50
4.1.2 Ensaio por líquido penetrante (LP).....	51
4.1.3 Composição química	52
4.1.4 Macrografia.....	52
4.1.5 Micrografia.....	54
4.1.6 Dureza	54
4.1.7 Análise da EPS	55
4.1.8 FTA em sinergia com o diagrama de Ishikawa.....	56
4.1.9 5 Porquês	56
4.2 Passo 4: Desenvolvimento de ações corretivas	56
5 CONCLUSÃO	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Esquemática da soldagem por fusão	13
Figura 2 - Equipamento para Soldagem FCAW.	15
Figura 3 - Classificação do arame tubular no padrão AWS	16
Figura 4 – <i>Seção de arames tubulares</i>	18
Figura 5 - Diagrama de Fases Ferro-Carbono.....	23
Figura 6 - Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo.....	27
Figura 7 – Perfis Adequados de Solda de Filete e Suas Dimensões; P1 e P2 – Pernas e G – Garganta. (a) Cordão Côncavo e (b) Convexo.	28
Figura 8 - Exemplos de Perfis Inadequados de Solda de Filete.	29
Figura 9 – Desalinhamento em Junta de Topo.....	29
Figura 10 – Esquema dos Tipos de Distribuição de Porosidade. (a) Distribuída, (b) Agrupada e (c) Alinhada (Radiografia Esquemática).....	29
Figura 11 - Inclusão de Escória.....	30
Figura 12 - Falta De Fusão	30
Figura 13 – Falta de Penetração.	31
Figura 14 – Trinca no centro do cordão de solda	31
Figura 15 - Passo a Passo, Aplicação do Líquido Penetrante.	33
Figura 16 - Documento de Preenchimento RQPS.	36
Figura 17 - Documento de Preenchimento EPS.....	37
Figura 18 - Ilustração Adaptador Hensley	40
Figura 19 - Modelo 3D da caçamba da escavadeira	41
Figura 20 – Região da falha	42
Figura 21 – Componente danificado	42
Figura 22 – Ensaio por líquido penetrante.....	44

Lista De Tabelas

Tabela 1 – Especificação de consumíveis segundo AWS	16
Tabela 2 – Significado do 1º dígito após a letra T na classificação de arames tubulares na soldagem de aços.	17
Tabela 3 - Classificação de Aço Carbono.	21
Tabela 4 - Composição Química do Adaptador Hensley S4	40
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adaptador	41
Tabela 6 - Critérios de aceitação para Inspeção Visual.....	43

1 INTRODUÇÃO

A indústria de equipamentos pesados cresce cada vez mais no Brasil e no mundo e a soldagem é um dos processos de maior importância na união destes materiais.

A soldagem de adaptadores de alta resistência na indústria de equipamentos pesados é de extrema relevância, tendo em vista a difícil soldabilidade dos mesmos, refletindo em grande importância tanto na soldagem de produção, revestimento e de manutenção. Quanto a esta última, em peças que compõem uma caçamba de escavadeira hidráulica, especificamente os adaptadores, devido suas elevadas propriedades mecânicas e composição química.

Visando manter a qualidade e confiabilidade na atividade de soldagem, fazem-se necessários estudos cada vez mais detalhados do ponto de vista técnico, visando obter soldas isentas de descontinuidades e resistentes às solicitações severas durante a operação do equipamento.

Com isso, vem a oportunidade de aumentar o conhecimento pertinente à diferentes técnicas de soldagem, sendo uma delas a *undermatching*, isto é, com um metal de adição de resistência menor que o metal de base, mas garantindo as propriedades mecânicas frente às solicitações futuras.

1.1 Justificativa

A análise de falhas antes da soldagem de manutenção no ramo de máquinas pesadas é de extrema importância para a determinação da causa raiz do problema, refletindo em eficácia nas ações corretivas.

1.2 Objetivo Geral

Analisar as causas da falha no adaptador de uma escavadeira hidráulica.

1.2.1 Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral, é necessário que alguns objetivos específicos sejam abordados:

- Identificação do adaptador danificado;
- Análise de causa raiz do ponto problemático;
- Realização dos ensaios não destrutivos e destrutivos;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente trabalho traz uma breve revisão bibliográfica sobre os assuntos relacionados a este. Para compreender inicialmente os conhecimentos fundamentais de como realizar a manutenção em adaptadores de uma escavadeira hidráulica. Apresentamos assuntos pertinentes ao processo como o tipo de soldagem, materiais e equipamentos utilizados, análise macroestrutural e microestrutural. Dando continuidade, abordamos o processo de soldagem de manutenção no dente da escavadeira, e realizamos ensaios para aprovação da peça.

2.1 União de Materiais

“Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo”. (BRANDI, 1992).

“Processo de união de materiais pela coalescência localizada, produzida pelo aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem aplicação de pressão e/ou material de adição.” (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2000).

Outra definição sobre união de materiais diz que:

Os métodos de união dos metais podem ser divididos em duas categorias principais, isto é, aqueles baseados no aparecimento de forças mecânicas macroscópicas entre as partes a serem unidas e aqueles baseados em forças microscópicas. (MODENESI, 2005).

Também define que:

A união é conseguida pela aproximação dos átomos e moléculas das partes a serem unidas, ou destas e um material intermediário, até distâncias suficientemente pequenas para a formação de ligações químicas primárias (metálica, covalente ou iônica) ou secundárias (ligação de Van der Waals). (MODENESI, 2005).

“Os processos de soldagem são utilizados para fabricar produtos e estruturas metálicas, aviões e veículos espaciais, navios, locomotivas, veículos ferroviários e rodoviários, pontes, prédios, oleodutos, gasodutos, plataformas marítimas, reatores nucleares e periféricos, trocadores de calor, utilidades domésticas, componentes eletrônicos, etc.” (BRANDI, 1992).

Para Brandi (1992) com o desenvolvimento de outras técnicas de união, como a colagem, fica cada vez mais difícil não se ter a nossa volta uma parte soldada ou colada.

2.1.1 Soldagem

A soldagem (Figura 1) é a operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas necessárias ao seu desempenho. (NERIS, 2012).

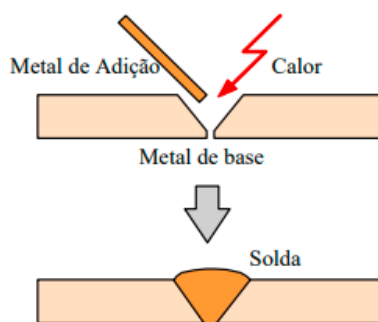
A definição em suma é a união de materiais metálicos com presença de pressão ou largamente utilizada com uma fonte de calor no caso do arco elétrico, proveniente do século XIX ganhou grande destaque no período da Segunda Guerra Mundial.

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm alguma utilização industrial e a soldagem é o mais importante método para a união permanente de metais. Esta importância é ainda mais evidenciada pela presença de processos de soldagem e afins nas mais diferentes atividades industriais, incluindo desde segmentos de baixa tecnologia (a indústria serralheira, por exemplo) até aqueles de elevada tecnologia e complexidade (as indústrias nuclear e aeroespacial, por exemplo). Como consequência, tem-se observado, ao longo das últimas décadas, uma necessidade constante por novos tipos de aço e de outras ligas metálicas com uma soldabilidade³ adequada para novas e mais exigentes aplicações. (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012).

O grande objetivo da soldagem é unir duas peças ou mais sendo similares ou dissimilares garantindo o cumprimento do projeto. Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas (MODENESI; 2002).

“Processo de união de materiais baseado no estabelecimento, na região de contato entre os materiais sendo unidos, de forças de ligação química de natureza similar às atuantes no interior dos próprios materiais.” (Modenesi, 2005).

Figura 1 - Esquemática da soldagem por fusão



Fonte: MODENESI (2001)

2.1.2 Soldagem FCAW

O processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) ou Arame Tubular consiste na junção dos metais após o arco elétrico gerar a fonte de calor no contato contínuo do eletrodo, peça a ser trabalhada e o consumível determinado.

Na década de 50, a introdução da combinação do gás de proteção CO₂ com eletrodos contendo fluxo interno (arames tubulares) propiciou significantes melhorias nas condições de operação e na qualidade da solda. A primeira apresentação pública deste processo (conhecido como FCAW) foi no ano de 1954 e, em 1957, os equipamentos utilizados já possuíam uma configuração similar a atual. Experiências deste período já demonstravam significantes melhorias nas propriedades das soldas quando o arco e o metal fundido estão protegidos da contaminação pela atmosfera. De qualquer modo, o desenvolvimento do eletrodo revestido no final desta década, reduziu o interesse por estes processos. (BARBEDO, 2011).

“O eletrodo tubular apresenta internamente um fluxo que desempenha funções similares ao revestimento do eletrodo em SMAW, isto é, estabilização do arco, ajuste de composição da solda, proteção”. (MODENESI, 2001).

O fluxo em si também dispõe de outras características úteis na soldagem do arame tubular sendo na deposição de elementos de liga, atuar na desoxidação da solda e formar escória.

O processo apresenta duas variações principais: soldagem auto protegida, em que o fluxo fornece toda a proteção necessária na região do arco, e soldagem com proteção gasosa, em que parte da proteção é fornecida por um gás, de forma semelhante ao processo GMAW. (Modenesi, 2001, p21).

FCAW é uma escolha interessante pois possui alta taxa de deposição de material, mais vantajoso pelo menor tempo porque se trata de um processo semiautomatizado, e grande rendimento. Comparativos com a produtividade da solda MIG/MAG são frequentes pela semelhança nas vantagens adquiridas.

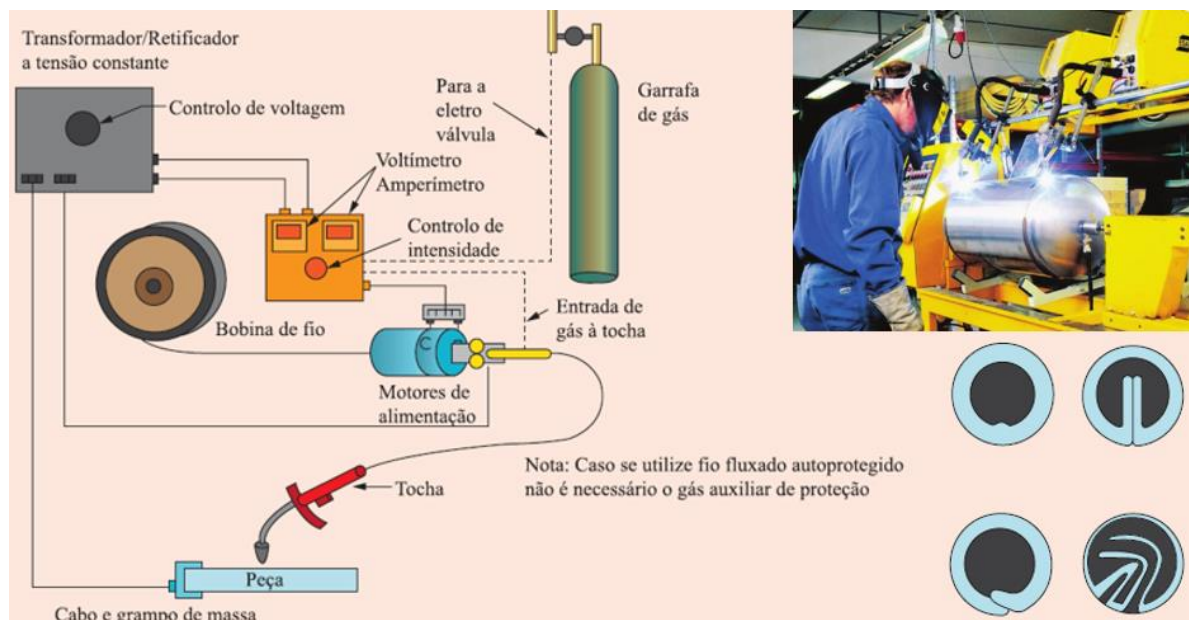
Segundo Modenesi (2005), a transferência metálica na soldagem com arames tubulares é semelhante a que ocorre na soldagem MIG/MAG, contudo algumas particularidades, podem ser observadas.

Aplicado nas ligas carbono, baixas liga e inoxidáveis, a facilidade do processo em campo também leva a escolha de seu processo.

2.1.3 Equipamentos do Processo FCAW

Modenesi (2001) comenta que em ambas as formas, ele é operado, na maioria das aplicações, na forma semiautomática, utilizando basicamente o mesmo equipamento do processo GMAW (Figura 2).

Figura 2 - Equipamento para Soldagem FCAW.



Fonte: Adaptado de SILVA (2014)

2.1.4 Tipos de Arame Tubulares

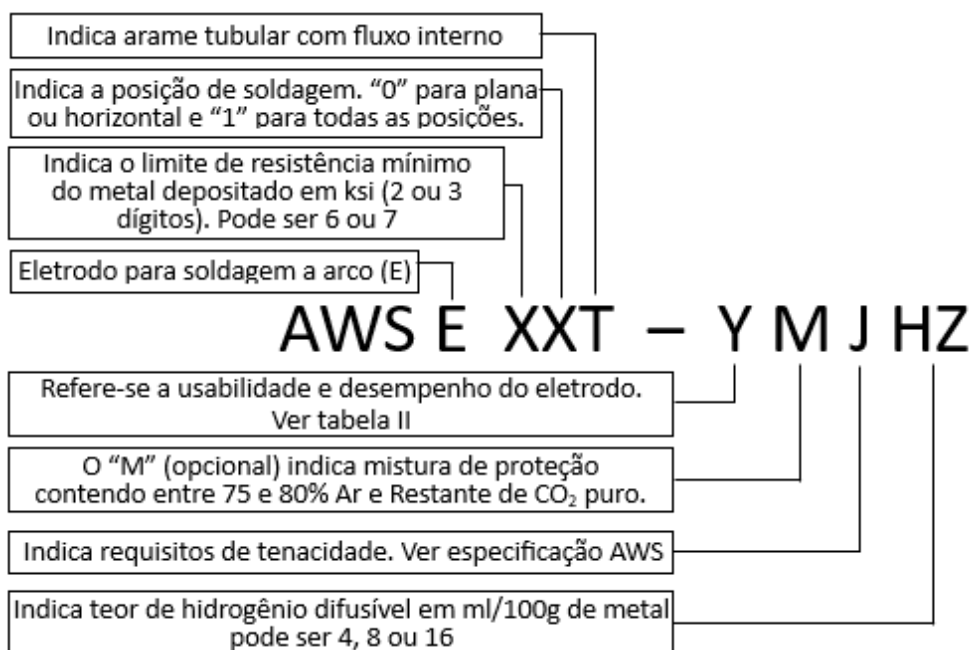
O processo de soldagem por Arame Tubular tem duas variantes, podendo ser protegido por gás inerte, por gás ativo ou mistura destes ("dualshield") ou auto protegido, sem a utilização de gases de proteção ("innershield") (JOAQUIM, 2019).

Segundo Modenesi (2005), os consumíveis utilizados no processo são os arames tubulares, assim classificados dentro da norma AWS denominando todas suas aplicações. Bracarense *et al* (2005), reforça que os arames *metal cored* ou *flux cored*, a diferença consiste que o primeiro se trata majoritariamente de pós-metálicos e ligas de ferro, e o *flux cored* possui grande composição de minérios e minerais. Com o gás de proteção podendo ser uma mistura de argônio e CO₂ ou apenas CO₂ gera um cordão de grande qualidade, a escória obtida pode ser rutilica ou básica no caso dos arames *flux cored* (Tabela 1) e sua classificação pode ser vista na Figura 3 e suas designações do dígito "T" na Tabela 2.

Tabela 1 – Especificação de consumíveis segundo AWS

PROCESSOS DE SOLDAGEM					
Liga Metálica	Oxiacetileno (OFW)	Eletrodo Revestido (SMAW)	TIG (GTAW) MIG/MAG (GMAW) Plasma (PAW)	Arame Tubular (FCAW)	Arco Submerso (SAW)
Aço Carbono	A5.2	A5.1	A5.18	A5.20	A5.17
Aço Baixa Liga	SFA5.2	SFA5.5	SFA5.28	SFA5.29	SFA5.23
Aço Inoxidável	-	A5.4	A5.9 / A5.22	A5.22	A5.9
Ferro Fundido	SFA5.15	SFA5.15	SFA5.15	SFA5.15	-
Ligas de Níquel	-	A5.11	A5.14	A5.34	A5.14
Ligas de Alumínio	-	SFA5.3	SFA5.10	-	-
Ligas de Cobre	-	A5.6	A5.7	-	-
Ligas de Titânio	-	-	SFA5.16	-	-
Ligas de Zircônio	-	-	A5.24	-	-
Ligas de Magnésio	-	-	SFA5.19	-	-
Tungstênio	-	-	A5.12	-	-
Ligas de Metal Duro	SFA5.21	SFA5.13	SFA5.21	SFA5.21	SFA5.21
Gases de Proteção	-	A5.32	A5.32	-	-

Fonte: Adaptado de LINCOLN ELECTRIC (2000)

Figura 3 - Classificação do arame tubular no padrão AWS

Fonte: Adaptado de JOAQUIM (2023)

Tabela 2 – Significado do 1º dígito após a letra T na classificação de arames tubulares na soldagem de aços.

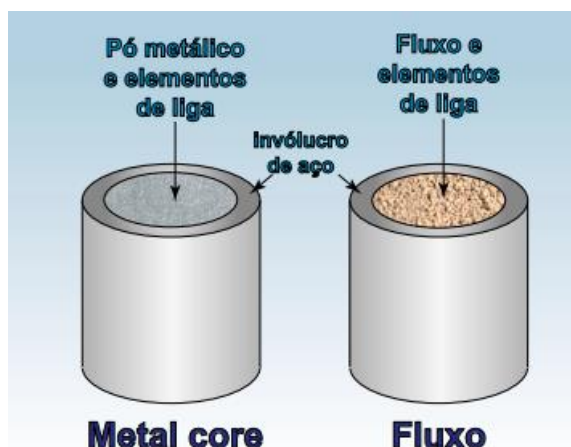
TIPO DO ARAME	PROTEÇÃO GASOSA	APLICAÇÃO (PASSES)	POLARIDADE
T – 1	Sim	Múltiplos	Eletrodo +
T – 2	Sim	Único	Eletrodo +
T – 3	Não	Único	Eletrodo +
T – 4	Não	Múltiplos	Eletrodo +
T – 5	Sim	Múltiplos	Eletrodo +
T – 6	Não	Múltiplos	Eletrodo +
T – 7	Não	Múltiplos	Eletrodo -
T – 8	Não	Múltiplos	Eletrodo -
T – 9	Sim	Múltiplos	Eletrodo +
T – 10	Não	Único	Eletrodo -
T – 11	Não	Múltiplos	Eletrodo -
T – 12	Sim	Múltiplos	Eletrodo +
T – 13	Não	Único	Eletrodo -
T – 14	Não	Único	Eletrodo -
T – G	Fabricante	Múltiplos	Fabricante
T – GS	Fabricante	Único	Fabricante

Fonte: Adaptado de JOAQUIM (2023)

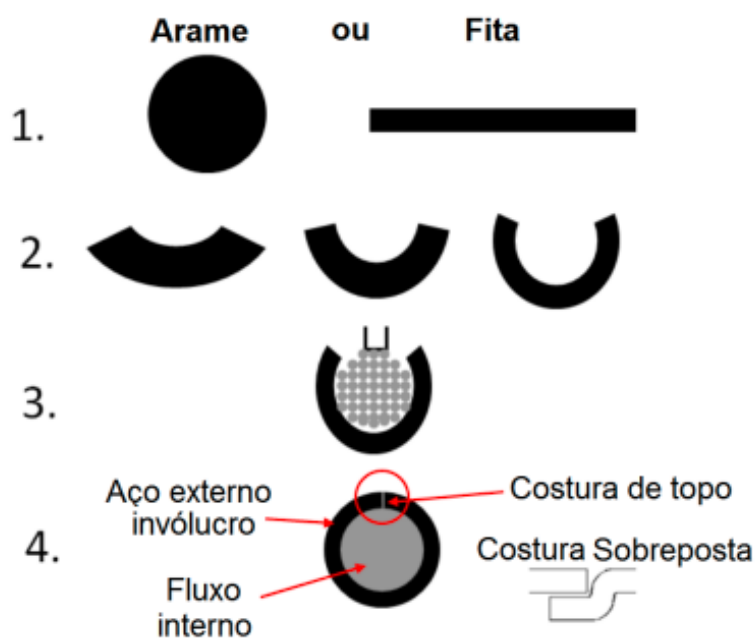
Os arames tubulares possuem algumas formas transversais e possuem classificações descritas em normas internacionais. Arames que tem uma seção mais elaborada possui a característica de maior dificuldade de fabricação e com isso o custo aumenta, embora haja superioridade na parte de operação.

Para Joaquim (2023) os arames tubulares apresentam várias configurações de seção transversal, podendo ser simplesmente um tubo ou configurações mais complexas. A Figura 4 demonstra as seções transversais dos arames tubulares e do tipo *metal cored*.

Figura 4 – Seção de arames tubulares



Fonte: PETROBRAS (2022)



Fonte: PETROBRAS (2022)

Da mesma forma que eletrodos revestidos tem a necessidade de proteção contra a umidade, os arames tubulares também dispõem dessa preocupação no embalo do produto.

2.2 Equipamentos pesados – Escavadeira hidráulica

Segundo Campos et al (2017), a escavadeira hidráulica (Figura 5) é um equipamento para escavar e retirar material e que pode andar sobre qualquer tipo

de superfície. É um equipamento utilizado a muito tempo na indústria, em construções civil e no meio agrícola, com o grande crescimento, as indústrias utilizam desse equipamento para substituir o esforço físico de vários trabalhadores.

Figura 5 - Escavadeira Hidráulica operando.



Fonte: Auto Training Educação.

Segundo Ramires (2017), o apoio das Escavadeiras Hidráulica é feita normalmente em esteiras com sua capacidade de girar sobre seu eixo vertical. Uma escavadeira hidráulica necessita que junto com ela esteja um veículo para tirar e transportar o material escavado, em situação em que a escavadeira trabalha sozinha a terra é retirada de um lado e aterra outro.

A força que é produzida para obter o movimento é constituída pelo sistema hidráulico encontrado no seu interior. O óleo que é usado no equipamento, é bombeado para os pistões com a função de exercer o movimento desejado. Os principais componentes deste maquinário são os chassis, esteiras, lanças e a caçamba, entre outros que completam a escavadeira hidráulicas. (CAMPOS et al, 2017).

2.2.1 Materiais Utilizados na Caçamba

Um dos materiais inseridos na caçamba são os aços estruturais que consistem dos principais aços utilizados na construção, por sua disponibilidade de fabricação, e o custo baixo.

Existem três tipos de aços estruturais: Aço ARBL, aço carbono e os aços termicamente tratados.

Neto (2016) diz que os aços baixa liga, são acrescidos de elementos de liga, e aumentam a resistência à tração e melhoram as propriedades mecânicas do aço.

São adicionados elementos como o Cr, Cu, P, Si, Mn e Ni.

Esses dois aços podem ser melhorados por processos para aumento de suas características.

Neto (2016) tanto os aços-carbono quanto os de baixa liga podem ter suas resistências aumentadas pelo tratamento térmico.

2.3 Juntas dissimilares

“Junta soldada cuja composição química do metal de base dos componentes difere significativamente.” (Adaptado de Infosolda, 2023).

Atualmente, tem-se tornado comum misturar o aço carbono ao aço-inox para manutenção de locais que sofrem com o processo de corrosão devido a exposição ao clima, a produtos químicos e altos índices de umidade (NETO, 2014).

Conforme diz Neto (2014), solda dissimilar é um dos casos de uniões soldadas que é caracterizada pela junção entre diferentes materiais, no caso, aço inox e aço carbono que são largamente utilizados em linhas de vapor em plantas de energia, em reatores nucleares e plantas petroquímicas.

2.3.1 Aços Carbono

“Existem mais de 3500 tipos diferentes de aços e cerca de 75% deles foram desenvolvidos nos últimos 20 anos. Os aços-carbono possuem em sua composição apenas quantidades limitadas dos elementos químicos que é ajustada de acordo com o interesse de sua utilização.” (IMIANOWSKY E WALENDOWSKY).

Aço carbono sendo a grande liga de aço utilizada na metalurgia industrial é dentro das normas que classificam todas as ligas a primeira no topo da lista.

Fortes (2004) comenta que o aço é basicamente uma liga de ferro e carbono, alcançando seus níveis de resistência e de dureza principalmente através da adição de carbono.

Dada sua característica de endurecer devido aos carbonetos presentes na fórmula vindos do carbono, e outras propriedades importantes para a usabilidade do aço é ainda hoje o material mais fabricado dentre as outras ligas.

“O aço-carbono é uma liga de Ferro-Carbono contendo geralmente de 0,008% até 2,11% de carbono, além de certos elementos residuais resultantes dos processos de fabricação.” (IMIANOWSKY E WALENDOWSKY).

Modenesi (2005) cita que elementos residuais (de matérias primas ou do processo de fabricação), são o manganês, silício; enxofre e fósforo.

Invariavelmente tem os contras da facilidade de corrosão e suscetibilidade à trincas.

“O maior problema de soldabilidade destes aços é a formação de trincas induzidas pelo hidrogênio, principalmente na zona termicamente afetada (ZTA)” (MODENESI; 2001, p.6).

Consequentemente são adicionados elementos de liga no aço carbono para aprimorar ou adicionar propriedades, no caso de aumento de resistência a altas temperaturas, resistir a corrosão e desgaste.

Os elementos de liga mais comuns são o manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio e vanádio (FORTES; 2004, p. 5).

Quando adicionados elementos de liga alteram a microestrutura do aço carbono garantindo maior resistência da ferrita, e aumentando a incidência da cementita (Fe_3C), sendo assim um material duro e quebradiço. O aço fundido é pensado para se ter resistência, tenacidade e custo baixo então existem classificações de aço carbono (Tabela 3) levando em consideração o teor de carbono e adição de elementos de liga. Abaixo a tabela com valores:

Tabela 3 - Classificação de Aço Carbono.

Baixo carbono - até 0,14% carbono
Aço doce - de 0,15% até 0,29% carbono
Aço de médio carbono - de 0,30% até 0,59% carbono
Aço de alto carbono - de 0,60% até 2,00% carbono

Fonte: Adaptado de FORTES (2004)

Naturalmente os aços de baixo até alto carbono contém na liga os elementos químicos presentes que são: manganês, silício, fósforo e enxofre.

Fortes (2004) cita que os aços de baixo carbono e doce são os grupos mais produzidos por causa de sua relativa resistência e boa soldabilidade.

2.3.2 Aços Fundidos de Alta Resistência

Os aços ARBL foram desenvolvidos na indústria do aço e atendem o setor automobilístico e estrutural, devido suas propriedades mecânicas.

“De um modo geral, são classificados como aços ARBL os aços resultantes de um processo de manufatura que incorpora na rota de produção destes aços a aplicação de conceitos como endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos micro ligantes associados a diferentes escalas de passes de temperatura de laminação”. (Maxwell, 2023, p.20).

Quando a demanda de energia cresceu e foi necessário diminuir custos de produção e logística, esta categoria de aço deu uma eficiência maior ao aumentar o diâmetro de tubos. Esses tipos de aço reduziram custos em tubulações, pois reduziu-se a espessura, consequentemente necessitando de menos material para a fabricação e de soldagem.

Para Maxwell (2023), estes aços viabilizaram a operação de dutos com pressões maiores do que aquelas utilizadas anteriormente, resultando em um maior volume de gás ou petróleo transportado.

2.4 Metalurgia da soldagem

Questões metalúrgicas são pertinentes na soldagem, os fenômenos que ocorrem no processo são desse campo: fusões, transformações, tensões e deformações podem trazer problemáticas para o cotidiano.

“Uma característica fundamental dos sólidos, e em particular dos metais é a grande influência de sua estrutura na determinação de várias de suas propriedades.” (MODENESI et al, 2012).

Dentro da metalurgia também há o estudo das microestruturas, numa liga de ferro em que há predominância do carbono e alguns elementos de liga inseridos,

onde o tratamento térmico e a composição química são fundamentais para obtenção de microestruturas previsíveis especialmente mostrados no diagrama ferro-carbono.

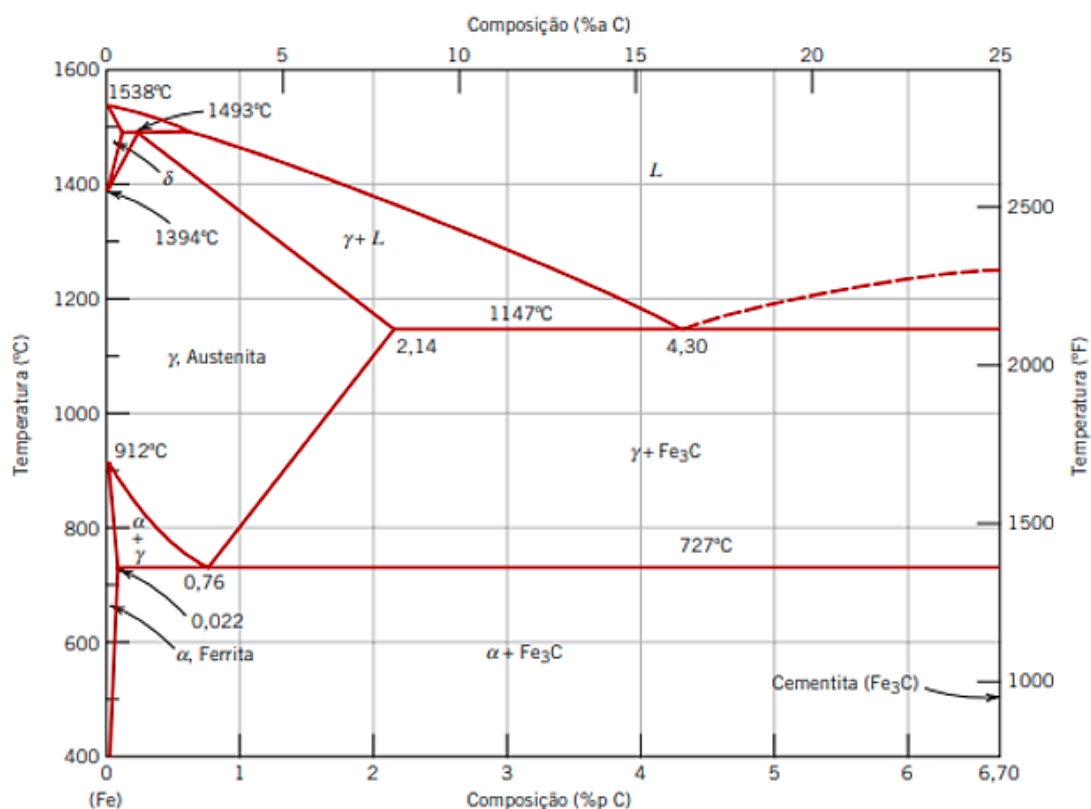
“A microestrutura é fortemente responsável pelas propriedades físicas e mecânicas do metal. Ela é afetada pela composição química, tratamento térmico e histórico mecânico do metal” (FORTES; 2004).

Um metal é afetado de acordo com a soldagem e tratamentos térmicos, portanto sua microestrutura dentro da zona fundida (ZF) é influenciada, porém na zona afetada pelo calor (ZAC) do metal de base também se tem grande relevância na capacidade da junta.

A microestrutura é afetada pela soldagem por causa de seus efeitos térmicos ou mecânicos, ou ambos, mas as alterações ficam confinadas à região da solda. As alterações metalúrgicas na região local do metal de base (chamada de zona termicamente afetada) podem ter um profundo efeito no desempenho em serviço de uma junta soldada. (Fortes, 2004, p. 9)

Microestruturas são descritas em um diagrama de ferro-carbono (Figura 6) e são importantes para analisar o que ocorre dentro de uma liga de aço, entendendo suas fases e os fenômenos implícitos.

Figura 5 - Diagrama de Fases Ferro-Carbono



Fonte: CALLISTER (2016)

O ferro em si é chamado de ferrita ou ferro alpha sendo uma estrutura cúbica de corpo centrado, ao ser aquecido a temperatura acima dos 900°C então é transformado em austenita ou ferro gama, sendo essa uma estrutura cúbica de face centrada.

“O ferro puro, ao ser aquecido, apresenta duas mudanças de estrutura cristalina antes de se fundir” (CALLISTER; 2016, p.305).

Sendo aumentada a temperatura até chegar aos quase 1400°C essa austenita se transforma novamente em ferrita, nesse momento sendo denominado ferro delta, fundindo-se ao alcançar os 1538°C.

A cementita ou carboneto de ferro, que compõe 6,67% de carbono e 93,33% de ferro é formada quando o limite de solubilidade do carbono no ferro alpha é ultrapassado na faixa de 727°C sendo este uma estrutura ortorrômbica, dura e quebradiça.

Mecanicamente, a cementita é muito dura e frágil; a resistência de alguns aços é aumentada substancialmente por sua presença. Rigorosamente falando, a cementita é apenas metaestável; isto é, à temperatura ambiente, ela permanecerá indefinidamente como um composto (Callister; 2016, p.306).

Por fim temos a perlita, que é a união de duas fases a ferrita e a cementita, quando existe a porcentagem de 0,8%, possuindo característica de lâminas variando suas formadoras, é mais dura e resistente que a ferrita.

“Mecanicamente, a perlita apresenta propriedades intermediárias entre a ferrita, macia e dúctil, e a cementita, dura e frágil” (CALLISTER; 2016, p.308).

2.4.1 Transformações na Junta Soldada

“A soldagem envolve aquecimento, fusão, solidificação e resfriamento de um material ou de diversos materiais, dependendo da aplicação do componente soldado. Assim, as transformações que ocorrem no aquecimento, as fases formadas durante a fusão, a solidificação e as transformações que ocorrem no resfriamento determinam o desempenho da junta soldada.” (SENAI, 1997).

“Por soldabilidade entende-se a facilidade com que uma junta soldada é fabricada de tal maneira que preencha os requisitos de um projeto bem executado. Para facilitar a compreensão, é possível desdobrar o conceito de soldabilidade em

soldabilidade operacional, soldabilidade metalúrgica e soldabilidade em serviço”. (SENAI, 1997).

2.4.2 Energia de soldagem

A energia de soldagem é um conceito fundamental na soldagem, os parâmetros podem ser alterados pois a questão é potência sendo a corrente e tensão, junto da velocidade de soldagem, essas condições alteram a energia de soldagem numa junta.

Zeemann (2003), explica que na realidade uma das principais características que distingue os processos de soldagem é a intensidade da fonte de calor utilizada para fundir o material.

No inglês chamado de *heat input*, esta Equação 1 é composta das variáveis demonstradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Equação para calcular a energia de soldagem

$E = n \frac{V \cdot I}{v} \quad (1)$
Onde: n – eficiência de transferência v - tensão em volts (V) I - corrente elétrica em ampéres (A) V - velocidade linear de soldagem em mm/s

Fonte: Adaptado de ZEEMANN (2003)

A quantidade de calor adicionada a um material, por unidade de comprimento linear, é o que se chama **energia de soldagem**, ou **aporte de calor**, ou **aporte térmico**, ou mesmo “*heat input*”, geralmente representada pelas letras E ou H e cuja unidade usual é em kJ/mm, sendo também apresentada em kJ/cm ou J/mm. (ZEEMANN, 2003).

A energia de soldagem varia pelo processo de soldagem escolhido, onde existem situações que o calor adicionado na peça é muito maior que em outros

processos mais simples, o arco submerso é um exemplo de solda com grande aporte de calor.

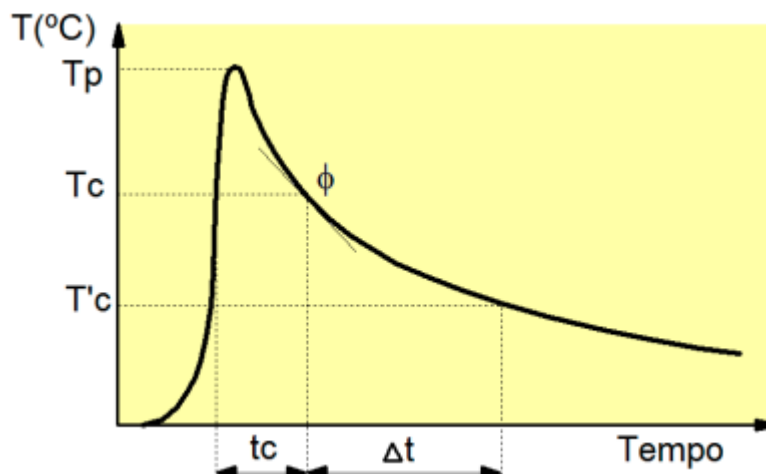
2.4.3 Ciclo Térmico

Por Selma e Ivanisa (1997), no ciclo térmico (Figura 7) é determinado pela geometria onde existem variações de temperatura do cordão de solda em virtude do tempo, fixando a distância do centro do cordão.

Selma e Ivanisa (1997) também mensura que ocorrem transformações de fase no resfriamento da junta quando foi soldada, pode ser explicada num gráfico onde a tangente determinada a velocidade em que é resfriado o material.

“Cada trecho de um material que é exposto próximo a uma junta terá uma variante de temperatura por causa da passagem de calor” (MARQUES, MODENESI, BRACARENSE, 2005).

Figura 7 - Representação Esquemática de um Ciclo Térmico de Soldagem.



Fonte: MODENESI (2005)

2.4.4 Diluição

Na soldagem diluição é uma quantidade do metal de base que adentra a composição da zona fundida. Para algumas aplicações a diluição é importante para manter a integridade de um componente.

“A taxa de diluição na soldagem, é uma medida de análise percentual representada pela razão entre a massa fundida do metal de base sobre a massa total do cordão de solda, que pode ser medida pela relação entre as áreas correspondentes.” (Holanda et al, 2019, p.5).

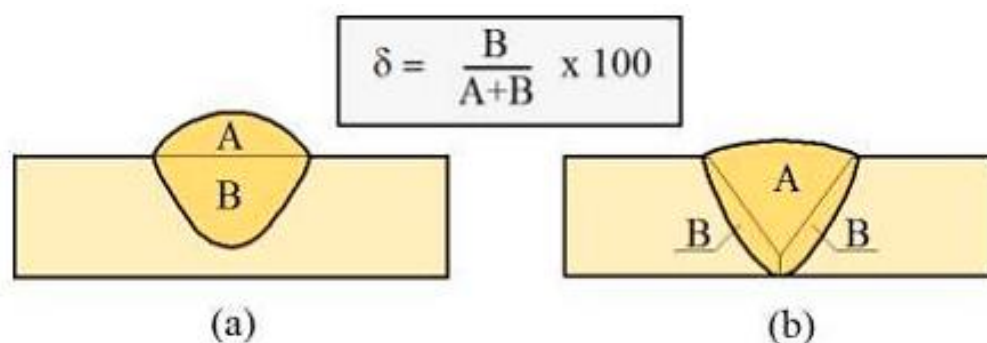
Zeemann (2003), comenta que na soldagem utilizando aços estruturais ou de baixo carbono não se origina problemas devido ao valor diluído porque os consumíveis utilizados como varetas, eletrodos são de composição química semelhante aos materiais de base.

Zeemann (2003), refere que quando existe a necessidade de utilizar em juntas dissimilares aparecem problemas de alta diluição nesses metais de base. Em grande maioria consiste em uso de revestimento protegendo da corrosão e do desgaste no caso de dissimilares.

No uso geral existem cálculos para determinar a quantidade de material depositado na junta.

Abaixo uma esquemática do cálculo de diluição de uma solda (Figura 8).

Figura 6 - Medida da diluição na seção transversal de um cordão de (a) um cordão depositado sobre chapa e (b) uma solda de topo



Fonte: MODENESI (2005)

Zeemann (2003), explica que variando os processos de soldagem, tipo de junta, energia imposta pode acontecer elevada diluição no material, contudo duas são mais frequentes, a solda raiz pois esta depende muito da geometria da junta, e o processo de soldagem em que a energia é alta e consequentemente aumenta a diluição.

Zeemann (2003), demonstra que para contornar estas situações pode se utilizar uma alta temperatura no pré-aquecimento, utilização de um consumível que garanta boa penetração como por exemplo o uso de CO₂ num processo GMAW, ou ainda assim utilizando a TIG onde pode ser empregada a forma autógena do processo.

2.5.1 Descontinuidades

Invariavelmente os problemas numa solda acontecem, e estes também são classificados em normas específicas e analisadas num controle de qualidade de uma empresa.

“As soldas não são totalmente isentas de descontinuidades, podendo apresentar-se em diferentes condições”. (DE LUCA, 2014, p.1).

Porém nem todos os apontamentos são sempre específicos o suficiente, existem condições para análise.

“Descontinuidades são imperfeições que não interferem no funcionamento de um equipamento, como vazios internos formados na estrutura do material, decorrentes do processo de fundição”. (ZOLIN, 2011, p.15).

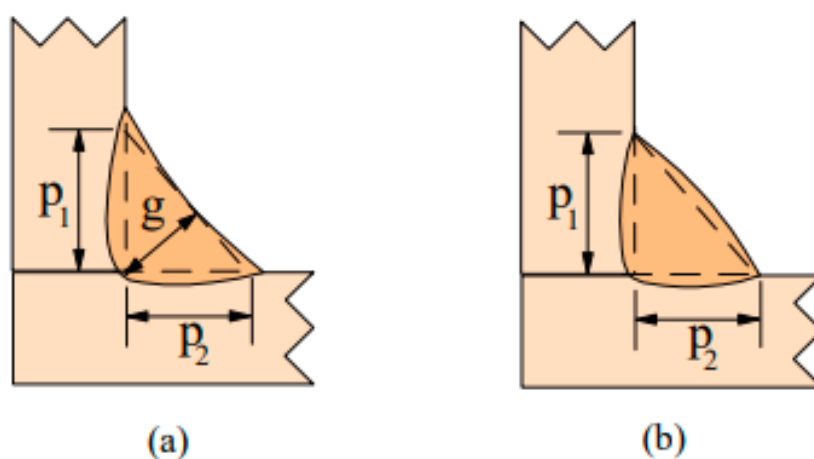
“A existência de descontinuidades em uma junta não significa necessariamente que ela seja defeituosa”. (DE LUCA, 2014, p.1).

“Defeitos quando os vazios internos citados anteriormente, não se restringem à estrutura interna e afloram para a superfície, por exemplo, criando um ponto de vazamento”. (ZOLIN, 2011, p.15).

“Um defeito é uma falha em algo que é essencial para o funcionamento de um equipamento, diferentemente da descontinuidade”. (ZOLIN, 2011, p.15).

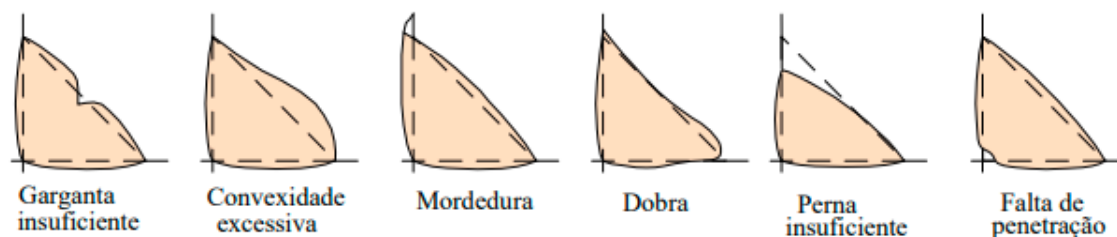
Abaixo, as Figuras de número 9 à 16, demonstram juntas soldadas e suas descontinuidades.

Figura 7 – Perfis Adequados de Solda de Filete e Suas Dimensões; P1 e P2 – Pernas e G – Garganta. (a) Cordão Côncavo e (b) Convexo.



Fonte: MODENESI (2001)

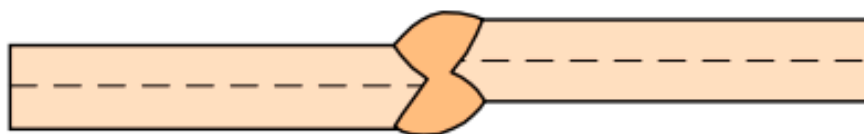
Figura 8 - Exemplos de Perfis Inadequados de Solda de Filete.



Fonte: MODENESI (2001)

Posicionamento incorreto de juntas de topo também são problemas inerentes a soldagem.

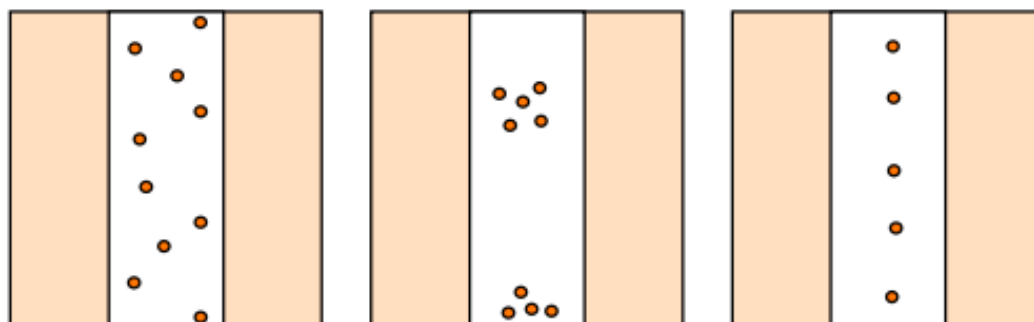
Figura 9 – Desalinhamento em Junta de Topo.



Fonte: MODENESI (2001)

Outro tipo de descontinuidade comumente encontrado é a porosidade, formada por gases que se encontram na poça de fusão durante a fase de solidificação, geralmente de forma esférica é associado ao elemento do hidrogênio. Muito ocasionada pela sujeira na superfície antes da soldagem, oxidação e a umidade em consumíveis e/ ou peça, também identificada nos equipamentos de soldagem e vazão de gás elevado. No uso de eletrodo revestido se houver um comprimento de arco muito grande também ocasiona este tipo de problema. Abaixo uma ilustração sobre tipos de porosidade distribuídas.

Figura 10 – Esquema dos Tipos de Distribuição de Porosidade. (a) Distribuída, (b) Agrupada e (c) Alinhada (Radiografia Esquemática).



Fonte: MODENESI (2001)

Inclusões de escória são óxidos e outros não-metálicos que ficam presos entre passes de solda. Nos processos habituais são materiais que tem pouca solubilidade e devido sua baixa densidade tendem a ficar na parte de cima da poça de fusão. Se o eletrodo ocasionalmente for mal posicionado parte da escória pode ir pra frente da poça de fusão e assim ficando presa no cordão. Numa solda multipasses onde a escória não for removida corretamente o passe seguinte acaba aprisionando este sólido que com o tempo pode acabar ocasionando uma trinca, pois as inclusões agem concentrando tensão.

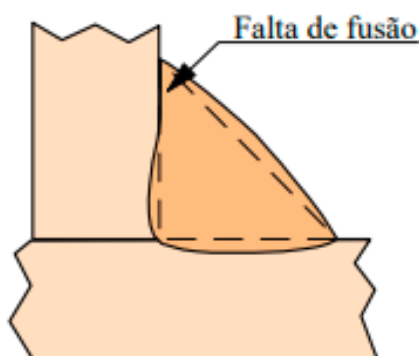
Figura 11 - Inclusão de Escória.



Fonte: MODENESI (2001)

A falta de fusão ocorre por falta de união entre o metal de base e a solda, podendo ter acontecido por baixa energia de soldagem, manipulação equivocada do eletrodo, má limpeza da peça e chanfros apertados. Assim como as inclusões de escória que causam trincas, a falta de fusão também é um grande agente concentrador dessas discontinuidades, além de comprometer a solda para resistir mecanicamente.

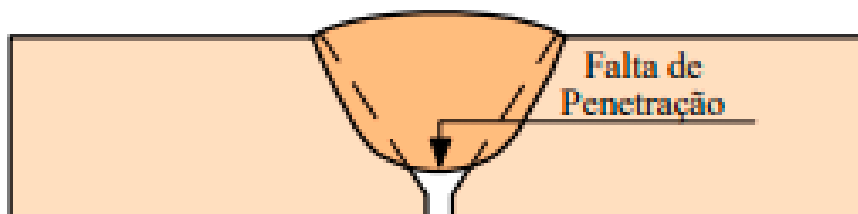
Figura 12 - Falta De Fusão



Fonte: MODENESI (2001)

Falta de penetração é uma falha ocasionada pelo espaço não preenchido na raiz da junta. Causada por erros na abertura pequena do chanfro e ou raiz, manipulação incorreta do eletrodo ou pela escolha de um consumível de diâmetro inadequado para o trabalho. Ocasiona uma seção de solda abaixo do projetado e concentrando tensões.

Figura 13 – Falta de Penetração.



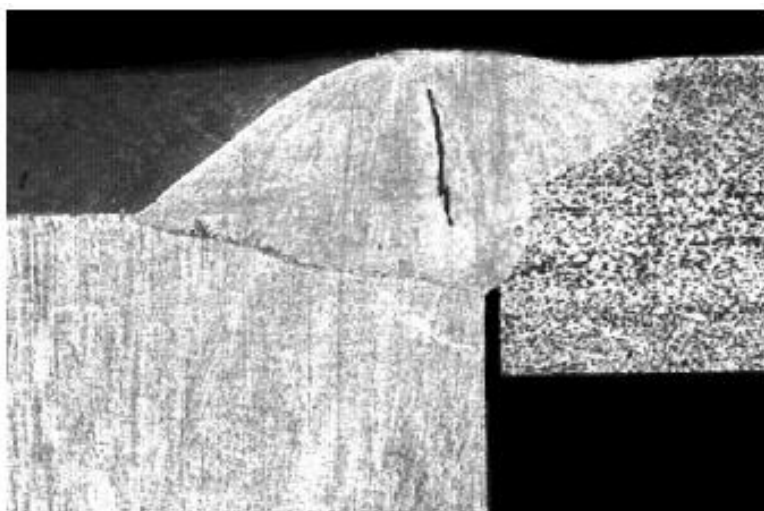
Fonte: MODENESI (2001)

Trincas são descontinuidades consideradas intoleráveis na soldagem, pois afetam o material e o tornam frágeis.

Modenesi (2001) explica que as trincas, que são os problemas mais graves encontrados na soldagem, não sendo toleradas quando identificadas em algum tipo de ensaio.

Modenesi (2001) também diz que devido as tensões impostas onde o material não conseguiu resistir, fragilizou-se provavelmente após o término da soldagem ou durante processos de fabricação, também ocorre durante o uso do equipamento.

Figura 14 – Trinca no centro do cordão de solda



Fonte: MODENESI (2001)

2.5.2 Ensaio Destrutivo

São técnicas e estudos necessários para analisar as características e propriedades mecânicas dos materiais fabricados.

Segundo Gisele (2023), ensaios destrutivos (ED) são técnicas empregadas para analisar o comportamento dos materiais quando sujeitos a esforços mecânicos em condições específicas, semelhantes às de operação.

Quando se analisa por exemplo um aço carbono é levado em consideração que ele possui falhas e suas microestruturas são heterogêneas. Para obter um material de acordo com seu projeto a microestrutura e os valores de tensões devem coincidir com o produto fabricado.

Para Gisele (2023), embora os valores de propriedades de muitos materiais comumente utilizados na engenharia possam ser obtidos de tabelas, pois foram previamente testados, é importante que técnicos e engenheiros tenham conhecimento da metodologia da execução dos ensaios e do significado de cada parâmetro.

No ensaio deve-se retirar o material a ser ensaiado utilizando de processos de fabricação, confeccionar os corpos de prova de acordo com as normas internacionais, e executar o ensaio para posterior resultado.

Gisele (2023), ainda diz que os ED são realizados com rigoroso critério, equipamentos devidamente calibrados, procedimentos e normas técnicas apropriadas e geram informações que auxiliam o projetista a prever o comportamento do material nas condições de trabalho de forma que este dimensione adequadamente peças e componentes mecânicos.

Nesse meio encontra-se a metalografia para se estudar a estrutura do material, podendo este ser macrografia ou micrografia.

2.5.3 Ensaio Não Destrutivo

Notadamente devido ao seu nome as técnicas de ensaios não destrutivos são testes feitos a partir de corpos de prova sem que haja a necessidade de descarte da peça, podendo ser empregado vários tipos de análise com um mesmo material de acordo com a norma especificada.

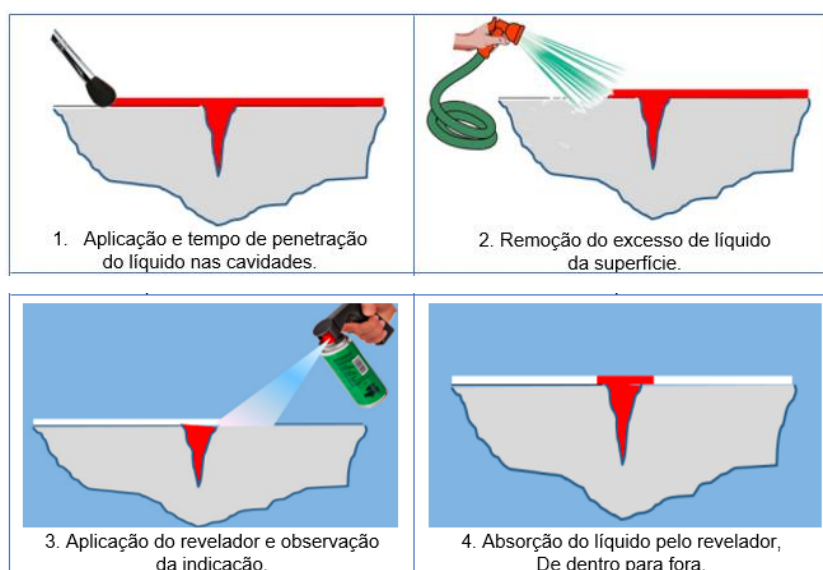
“Os ensaios não destrutivos incluem métodos capazes de identificar discontinuidades e monitorar a degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas. Para obter-se resultado satisfatório e válido é necessário considerar-se alguns elementos essenciais no processo, tais como pessoal treinado, procedimento qualificado, equipamentos devidamente calibrados e normas e critérios de aceitação bem definidos” (SAMPAIO, 2009).

O mais comum é de inspeção visual, sem necessidade de aparelhos específicos, neste caso o olho nu já é capaz de identificar possíveis discontinuidades que levariam a defeitos irreparáveis para o uso da peça, levando em consideração que é necessário experiência por parte do profissional que irá realizar essa inspeção inicial e boa luminosidade no ambiente.

“A inspeção visual, apesar da sua simplicidade, utiliza avançada tecnologia e, para isso, requer profissionais capacitados. Apresenta como principal vantagem, simplicidade de operação e baixo custo operacional”. (ZOLIN, 2011, p. 16).

O ensaio de líquidos penetrantes (Figura 17) tem como finalidade identificar discontinuidades superficiais que ainda esteja aberta a superfície do material. O processo atua muito bem tanto em materiais não magnéticos, quanto em materiais magnéticos, sendo capaz de identificar facilmente pequenas imperfeições (Singh; 2012).

Figura 15 - Passo a Passo, Aplicação do Líquido Penetrante.



Fonte: ANDREUCCI (2018)

2.6 Norma AWS D1.1

Esta norma internacional dada pela Sociedade Americana de Soldagem (AWS) especifica os requisitos para fabricação e montagem das estruturas de aços soldados. Partindo destes requisitos também é dado abordagens sobre uso de filetes, soldas, sulcos e ranhuras pertinentes aos processos de soldagem. São apresentadas em códigos algumas cláusulas:

Requisitos Gerais – Esta cláusula contém informações básicas sobre o escopo e as limitações do código, as principais definições e as principais responsabilidades das partes envolvidas na fabricação de aço.

Referências normativas – Esta cláusula contém uma lista de documentos de referência que ajudam o usuário na implementação deste código ou são necessários para a implementação.

Termos e definições – Esta cláusula contém termos e definições relacionados a este código.

Projeto de conexões soldadas – Esta cláusula contém requisitos para o projeto de conexões soldadas compostas por membros tubulares ou não tubulares do produto.

Pré-qualificação de WPS – Esta cláusula contém os requisitos para isentar uma WPS (*Welding Procedure Specification*) dos requisitos de qualificação WPS deste código.

Qualificação – Esta cláusula contém os requisitos para a qualificação WPS e os ensaios de qualificação de desempenho que devem ser passados por todo o pessoal de soldagem (soldadores, operadores de soldagem e soldadores de aderência) para realizar a soldagem de acordo com este código.

Fabricação – Esta cláusula contém os requisitos gerais de fabricação e montagem aplicáveis às estruturas de aço soldadas regidas por este código, incluindo os requisitos para metais comuns, consumíveis de soldagem, técnica de soldagem, detalhes de soldagem, detalhes de soldagem, preparação e montagem de materiais, fabricação, reparo de solda e outros requisitos.

Inspeção – Esta cláusula contém critérios para as qualificações e responsabilidades dos inspetores, critérios de aceitação para soldas de produção e procedimentos padrão para a realização de inspeção visual e ensaio não destrutivo (END).

Soldagem de rebites – Esta cláusula contém os requisitos para a soldagem de rebites em aço estrutural.

Estruturas tubulares – Esta cláusula contém os requisitos tubulares exclusivos. Além disso, os requisitos de todas as outras cláusulas se aplicam aos tubulares, a menos que especificamente indicado de outra forma.

Fortalecimento e reparo de estruturas existentes – Esta cláusula contém informações básicas pertinentes à modificação ou reparo soldado de estruturas de aço existentes.

Unidades de medida padrão – Esta norma faz uso das unidades habituais dos EUA e do Sistema Internacional de Unidades (SI). Os últimos são mostrados entre colchetes ([]) ou em colunas apropriadas em tabelas e figuras. As medidas podem não ser equivalentes exatas e, portanto, cada sistema deve ser usado independentemente.

2.6.1 RQPS e EPS

Segundo o SENAI (2012), o RQPS é um documento que registra todos os diversos elementos que envolvem a qualificação de um procedimento de soldagem (Figura 19). O RQPS é uma “fotografia” da confecção do procedimento de soldagem, apresentando todos os processos, materiais (base e adição), parâmetros e técnicas utilizados na soldagem da peça de teste, assim como os resultados dos ensaios realizados para avaliar a conformidade do procedimento em comparação com os requisitos estabelecidos pela norma de qualificação.

RQPS – Registro da Qualificação do Processo de Soldagem (Figura 19) é o documento que contesta a qualificação do processo de soldagem, ou seja, registra todos dados executados numa solda, além de testes de ensaio (SENAI; 2012).

Segundo SENAI (2012) a EPS é um documento que determina todas as variáveis que devem ser seguidas para a realização de um serviço específico de soldagem. Toda EPS se baseia em um (ou mais) RQPS. A Especificação de Procedimento de Soldagem, e serve para demonstrar aos operadores de soldagem diretrizes no processo de soldas. Para garantir um bom processo é necessário especificar todos os parâmetros do processo (Figura 19).

2.7 Soldagem de manutenção e análises de falhas

A soldagem de manutenção tem como objetivo recuperar peças ao evitar custos de reposição.

Veiga (2010), destaca que na manutenção a soldagem tem a função de aumentar a disponibilidade dos equipamentos, manter a qualidade dos produtos e reduzir custos.

Na soldagem de manutenção é necessário a identificação para realizar a solda, porém muitas das vezes não se têm uma identificação dos materiais há serem trabalhados, pois nem sempre a documentação é disponibilizada.

Para tanto, o SENAI (1997) e Godefroid e Cândido (2019), determinam que é necessário seguir algumas etapas para as análises de falhas:

- Identificar o material;
- Definir a localização do início e fim da trinca;
- Efetuar as análises de causas;
- Preparar a região da solda, permitindo o acesso dos equipamentos;
- Limpar a região da solda, removendo óleo, graxa e outros contaminantes;
- Definir o processo de soldagem e o consumível, de modo a tentar manter as características mecânicas iniciais;
- Determinar os parâmetros de soldagem, como pré e pós aquecimento, sequência de soldagem.
- Verificar a necessidade de sobremetal para acabamento da junta soldada;

Este é um roteiro determinante para realização da manutenção em um equipamento, para que esta volte a realizar suas características mecânicas projetadas.

Para manter a competitividade nas indústrias a manutenção é fundamental para garantir a funcionalidade dos equipamentos, garantir a vida útil programada, e confiabilidade de uma empresa.

Segundo Godefroid e Cândido (2019), existem diversos métodos e modelos científicos são propostos na literatura para se proceder a uma análise de falha. O Quadro 2, resume as principais ideias para se resolver o problema e se evitar futuras falhas.

Quadro 02 – Exemplo de sequência para análises de falhas.

Passo 1	Passo 2	Passo 3	Passo 4	Passo 5
Identificação do Problema	Determinação da causa raiz	Desenvolvimento de ações corretivas	Validação e verificação das ações corretivas	Padronização

Fonte: Adaptado de GODEFROID e CÂNDIDO (2019),

2.8 Ferramentas básicas da qualidade

De acordo com Lucinda (2010) apud Monteiro e Oliveira (2021), o aumento na complexidade das atividades organizacionais trouxe como consequência um grau elevado de dificuldade em solucionar problemas. Atualmente os problemas exigem uma equipe multidisciplinar para a sua solução, já que uma pessoa por mais conhecimento e habilidade que possua, não irá resolver sozinho problemas mais complexos necessitando então da ajuda de uma equipe.

As ferramentas da qualidade entram em cena para potencializar as habilidades e competências dessas equipes, disponibilizando métodos e técnicas para identificação das possíveis causas e a descoberta de soluções para o problema.

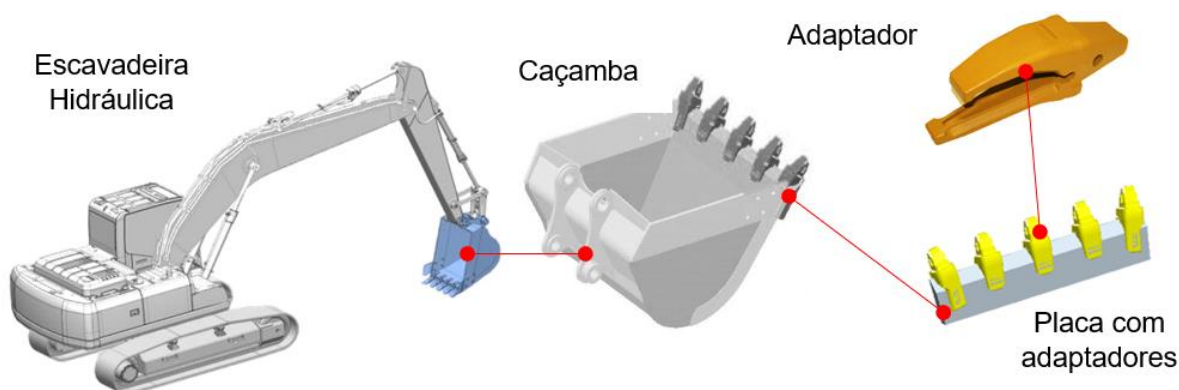
De acordo com Giocondo (2011) apud Monteiro e Oliveira (2021), entre as ferramentas da qualidade pode-se citar o Diagrama de Pareto, Diagrama de causa e efeito, Histograma, Diagrama de dispersão, Fluxograma, Gráfico de controle, Brainstorming e 5W1H.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ramo de atuação

Aços fundidos de alta resistência são utilizados nos adaptadores de caçambas em escavadeiras hidráulicas (Figura 20).

Figura 18 - Ilustração Adaptador Hensley



Fonte: Autoria própria (2023)

O metal de base escolhido é um aço fundido de alta resistência apresentando a composição química especificada conforme cliente (Tabela 4).

Tabela 4 - Composição Química do Adaptador Hensley S4

Elementos	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	W	Ti	V
Mínimo	0,15	0,9	0,85	0	0	0,07	0,85	0,25	0	0,02	0	0	0
Máximo	0,21	1,25	1,5	0,035	0,02	0,95	1,5	0,5	0,5	0,06	0,03	0,02	0,03

Elementos	V	B	Nb	Ca	Zr	Carbono equivalente do material	
Mínimo	0	0	0	0,002	0	Ceq% 1,15	
Máximo	0,03	0,002	0,01	0,006	0,015		

Fonte: Adaptado de HENSLEY (2023)

3.2 Passo 1: Identificação do material

Será analisada uma falha em um componente estrutural da escavadeira hidráulica que compreende a caçamba soldada com os adaptadores fundidos de alta resistência. As propriedades mecânicas podem ser verificadas na Tabela 5.

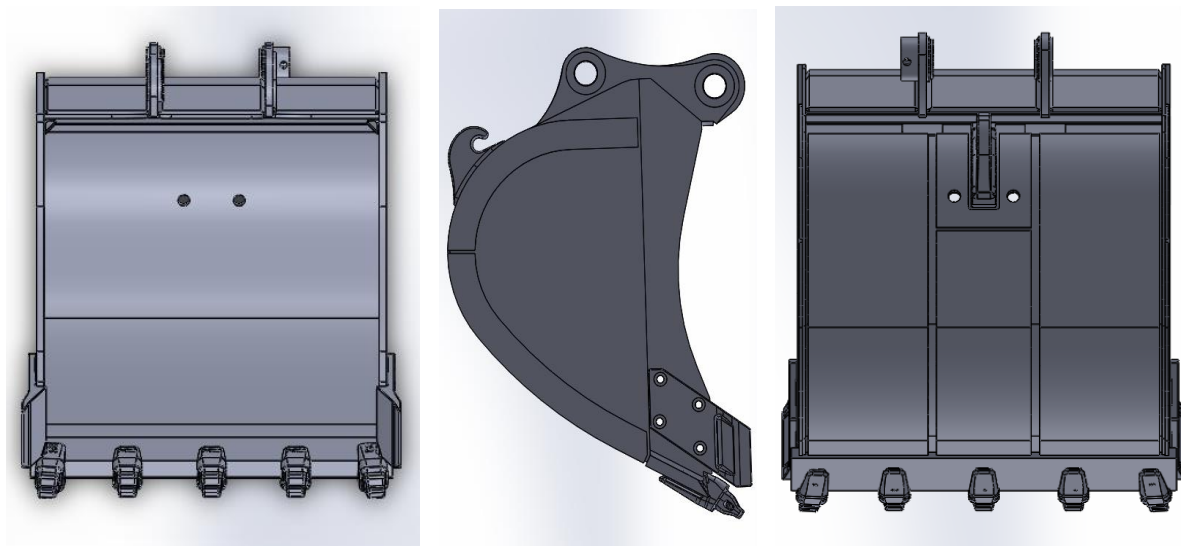
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adaptador

Propriedades	Especificações
Tensão de ruptura	Mínimo de 1200 MPa
Limite de escoamento	Mínimo de 850 Mpa
Alongamento	3%
Tenacidade	Mínimo de 27,1J
Dureza superficial	387 – 444 HB
Dureza do núcleo	363 – 444 HB
Microestrutura	Martensita Revenida

Fonte: Adaptado de HENSLEY (2023)

3.2 Passo 2: Identificação do problema

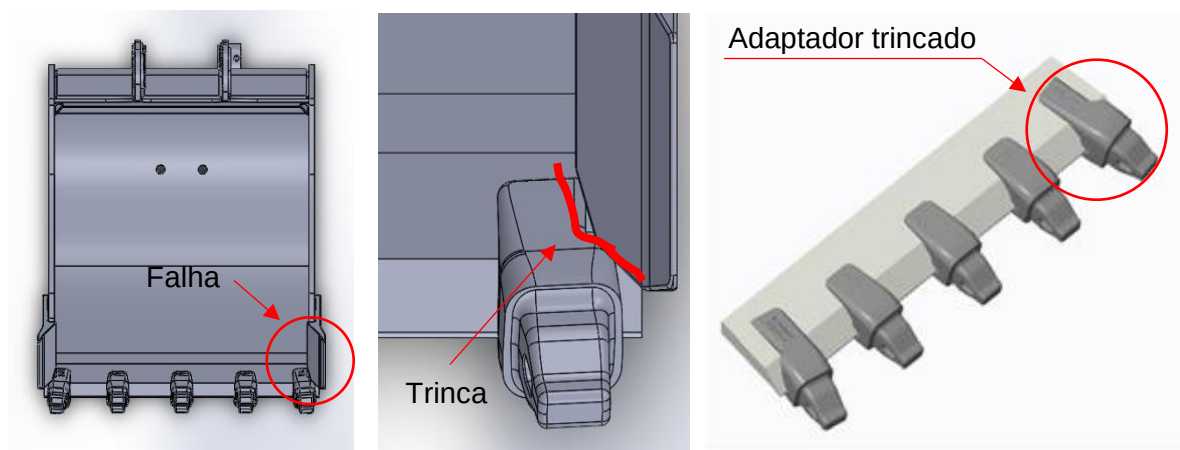
A Figura 21 demonstra os modelos matemáticos da caçamba a ser analisada no presente estudo.

Figura 19 - Modelo 3D da caçamba da escavadeira

Fonte: Autoria própria (2023)

Na Figura 22, existe a visualização da região da falha que se compreende por uma trinca longitudinal no último adaptador esquerdo, a mesma situa-se paralela à solda da placa lateral, definindo a localização do início e fim da trinca.

Figura 20 – Região da falha



Fonte: Autoria própria (2023)

O corpo de prova a ser analisado para o desenvolvimento de um procedimento de soldagem pode ser observado na Figura 23, evidenciando a trinca no adaptador de alta resistência em uma máquina experimental.

Figura 21 – Componente danificado



Fonte: Autoria própria (2023)

3.3 Passo 3: Determinação da causa raiz;

3.3.1 EVS

Após a soldagem será realizado a inspeção visual e o ensaio de líquido penetrante afim de procurar possíveis indicações de descontinuidades na solda.

Os critérios adotados nestas análises, foram conforme Tabela 6 com tradução livre da Tabela 8.1 do AWS D1.1/D1.1 M (2020), adaptada com apenas os itens aplicados a este estudo e considerando a coluna da tabela referente as conexões não tubulares carregadas ciclicamente.

Tabela 6 - Critérios de aceitação para Inspeção Visual.

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.
(4) Perfil das soldas: Devem atender o item 7.23 da AWS D1.1.
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente e nos aços ASTM A514, A517 e A 709 Grau HPS100 e 100W [HPS690W] após 48 horas de a solda estar completada.
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$< 5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$> 8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.
(8) Porosidade: (C) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade. Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.

Fonte: Adaptado de AWS D.1/D1.1 (2020)

3.3.2 Ensaio de líquido penetrante (LP)

O ensaio de líquido penetrante foi realizado logo após a inspeção visual, afim de indicações de descontinuidades na solda. Como critérios de aceitação para o ensaio de liquido penetrante, foi utilizada a mesma referência normativa do ensaio visual conforme item 3.3.1 e Tabela 24.

Figura 22 – Ensaio por líquido penetrante



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.3 EPS

Devido a confidencialidade da empresa do ramo de equipamentos pesados, foram observadas as variáveis essenciais do procedimento de soldagem conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Variáveis essenciais da EPS

Tensão	Corrente	Temperatura de pré-aquecimento	Temperatura de pós-aquecimento
Raiz – 200A – 250A Enchimentos 260A – 280A	Raiz – 22A – 27A Enchimentos 28A – 30A	200°C - 250°C	590°C – 680°C

Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.4 Efetuar análises de caracterização

3.3.4.1 Composição química

O equipamento utilizado para as análises químicas da junta soldada, foi um espectrômetro Shimadzu DPA-7000 (Figura 25), utilizando amostras medindo aproximadamente 25 mm x 40 mm x 20 mm.

Figura 25 – Espectrômetro e amostras



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.4.2 Macrografia

O material será cortado na Empresa de Equipamentos Pesados e no Laboratório de Soldagem da Faculdade de Tecnologia de Itaquera (Figura 26), utilizando uma serra de fita no sentido horizontal.

Figura 26 - Serra fita Franho FMG 5.



Fonte: Autoria própria (2024)

Após o corte, as amostras passaram por etapas de lixamentos com granulometrias de 180, 240, 320, 600, 1200 e polimentos efetuados na lixadeira e politriz modelo PFL conforme demonstrado na Figura 26. Após o término dos lixamentos e polimentos, foi empregado o embutimento, permitindo que o corpo de prova fosse armazenado em resina para posterior visualização metalográfica (Figura 27).

Figura 27 – Lixadeira/politriz e materiais de embutimento



Fonte: Autoria própria (2024)

Para caracterizar as macrografias, foi disponibilizado o estereoscópio com aumento de até 40x, conectado a um computador com o software Top View 64, específico para medições (Figura 28).

Figura 28 - Estereoscópio com Aumento de 40X.

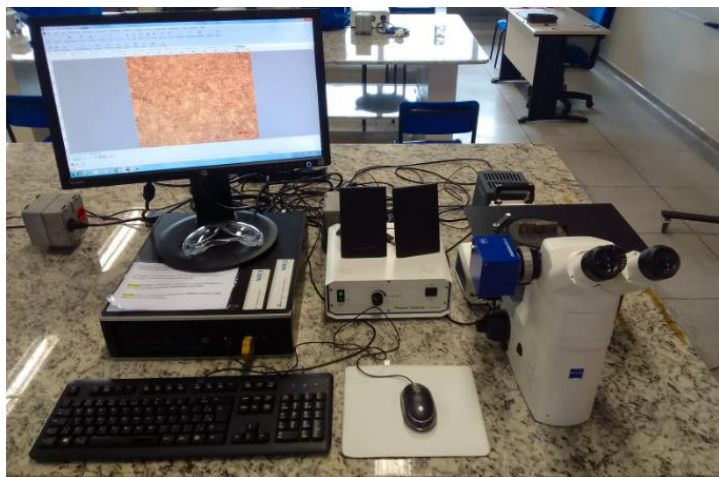


Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.4.3 Micrografia

Também foi realizada a caracterização microestrutural dos corpos de prova em um microscópio Zeiss, conectado em um computador com software Axio Vision LE Modelo AX10, conectado via USB em uma CPU que dará capacidade de análises e capturas das imagens observadas (Figura 29).

Figura 29 - Microscópio



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.4.4 Dureza

Foi empregado o ensaio de dureza Brinell (Figura 30), sendo utilizadas as mesmas seções das amostras usadas para as macrografias, utilizando a referência para os níveis aceitáveis de durezas, a AWS D1.1 (2020) e o próprio fabricante do adaptador fundido (Hensley).

Figura 30 – Durômetro



Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.5 FTA em sinergia com o diagrama de Ishikawa

Com a ferramenta de análises de árvore de falhas (FTA) em sinergia com o diagrama de Ishikawa, foi possível verificar com maior praticidade as causas da falha da trinca; sendo evidenciado problemas em mão de obra e formas de checagem, conforme demonstrado na Tabela 6, bem como as ações corretivas e prazos.

Tabela 6 - FTA

EFEITO	6M	PESQUISA	AValiação	PONTOS PROBLEMÁTICOS	AÇÃO CORRETIVA	RESPONSÁVEL	PRAZO
TRINCA NO ADAPTADOR FUNDIDO	MÃO DE OBRA	O processo de soldagem foi conforme estabelecido?	X	Ausência de pós aquecimento conforme EPS.	Orientação quanto à Folha de Orientação FPS-0001 e delimitação de soldadores	Equipe Técnica	10/10/24
	MATERIAL	Material (placa lateral) apresentá-se conforme especificado?	O				
		O metal fundido apresentá-se imunes de defeitos?	O				
		Pecas fundidas apresentam-se com as especificações conforme especificados?	O				
	MEIO AMBIENTE	Existe alguma dificuldade na execução da soldagem?	O				
	MÁQUINA	O dispositivo garante a montagem correta conforme especificado?	O				
	MEDIÇÃO	Existem folhas de orientação	Δ	Não existem folhas de orientação além da EPS.	Elaboração de folha de processo de soldagem	Equipe Técnica	10/10/24
		Existem meios de checagem?	Δ	Não existem folhas de checagem além da EPS.	Elaboração de folha de processo de checagem	Equipe Técnica	10/10/24
	MÉTODO	O procedimentos de montagem, soldagem estão conformes?	O				

Fonte: Autoria própria (2024)

3.3.7 5 Porquês

Efetuada a análise do 5 Porquês (Tabela 7), ficou evidenciado que o problema ocorreu devido a falha de implementação do processo, permitindo que durante a possível rotatividade de soldadores, existisse a possibilidade de execução do processo apenas com informações limitadas, sem uma padronização, mesmo sendo um equipamento experimental para testes.

Tabela 7 - 5 Porquês

Fator	1° Porquê	2° Porquê	3° Porquê	4° Porquê
Processo de aquecimento fora da EPS	Falta de atendimento à norma interna	Ausência da EPS de forma visível	Documentos controlados não expostos	Falha no método de implementação
Ausência de folha de processo	Inexistência da mesma no processo	Falha no método de implementação		
Ausência da folha de checagem	Inexistência da mesma no processo	Falha no método de implementação		

Fonte: Autoria própria (2024)

4 RESULTADOS

4.1 Passo 4: Determinação da causa raiz;

4.1.1 Ensaio visual de soldagem (EVS)

Para a determinação da causa raiz, realizou-se o EVS (Tabela 8), onde foi constatada a presença trinca na região adjacente a solda, conhecida como zona afetada pelo calor (ZAC), sugerindo problemas relacionado à difusão de hidrogênio.

Tabela 8 - Critérios de aceitação para Inspeção Visual.

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO	LAUDO DA AVALIAÇÃO
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.	Detectado
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.	OK
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.	OK
(4) Perfil das soldas: Devem atender o item 7.23 da AWS D1.1.	OK
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente e nos aços ASTM A514, A517 e A 709 Grau HPS100 e 100W [HPS690W] após 48 horas de a solda estar completada.	NA
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$< 5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$> 8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.	OK
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.	OK
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.	OK
(8) Porosidade: (C) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade. Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.	NA

Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.2 Ensaio por líquido penetrante (LP)

Para a determinação a confirmação da trinca detectada no ensaio visual, executou-se o ensaio de LP, onde foi evidenciada a presença de trinca em toda a extensão da ZAC do adaptador fundido soldado à placa lateral da caçamba da escavadeira. Nos critérios de aceitação do AWS D1.1 (2020), as trincas são inaceitáveis (Tabela 8). Foram observadas pequenas porosidades dentro dos limites observados na norma referenciada (Tabela 9).

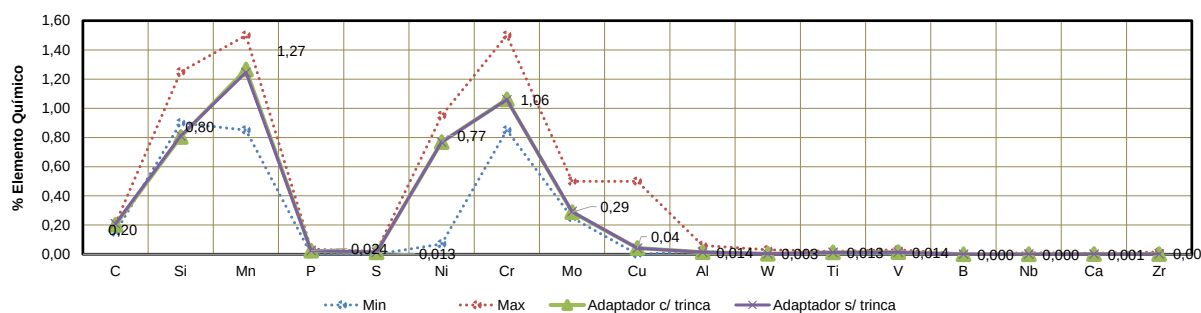
Tabela 9 - Critérios de aceitação para Líquido Penetrante

CATEGORIA DA DESCONTINUIDADE E CRITÉRIOS DA INSPEÇÃO	LAUDO DA AVALIAÇÃO
(1) Proibição de Trincas: São inaceitáveis.	Detectado
(2) Fusão entre metal base e solda: Deve existir fusão completa entre passes adjacentes do metal de solda e do metal base.	OK
(3) Cratera: Todas as crateras devem ser preenchidas para estabelecer a dimensão específica da solda, exceto nos terminais de soldas de filete intermitente externas aos seus comprimentos efetivos.	OK
(4) Perfil das soldas: Devem atender o item 7.23 da AWS D1.1.	OK
(5) Período de Inspeção: Após resfriamento completo em temperatura ambiente e nos aços ASTM A514, A517 e A 709 Grau HPS100 e 100W [HPS690W] após 48 horas de a solda estar completada.	NA
(6) Soldas Subdimensionadas: A dimensão da solda de filete em qualquer trecho contínuo pode ser menor que o valor nominal especificado (L) sem correção pelos seguintes valores de (U): Dimensão nominal específica da solda(mm) Redução permitida de L (mm): [$< 5 < 2$]; [$6 < 2,5$]; [$> 8 < 3$]. Em todos os casos a porção de sobreposição não deve exceder a 10% do comprimento da solda.	OK
(7) Mordedura: Mordeduras não devem ser maiores que 1 mm em profundidade.	OK
(8) Porosidade: (B) A frequência em soldas de filete não deve exceder uma em cada 100 mm de comprimento de solda e com máximo diâmetro de 2,5 mm.	Detectado dentro do limite OK
(8) Porosidade: (C) Juntas de topo com penetração total transversal ao esforço de tensão projetada não deve ter porosidade. Para outras soldas com chanfros, a frequência da porosidade não deve exceder uma em 100 mm de comprimento e o máximo diâmetro não deve exceder 2,5 mm.	NA

4.1.3 Composição química

A análise de composição química observada na Figura 31, demonstrou que todos os elementos, estão dentro do especificado conforme Hensley (2024).

Figura 31 – Análise da composição química

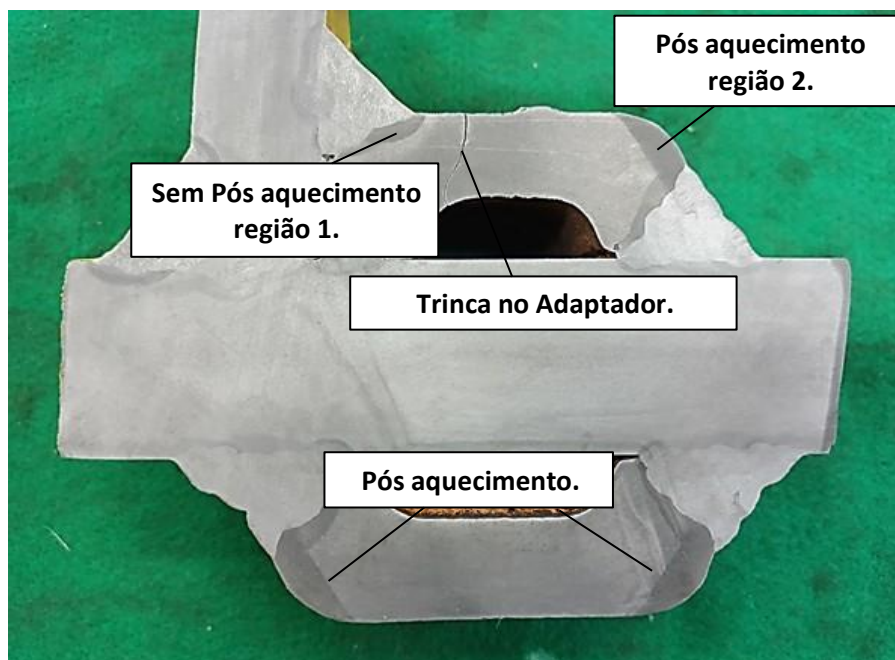


Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.4 Macrografia

A macrografia realizada na junta problemática (Figura 32), demonstra a ZAC do processo de soldagem, no entanto, a ausência da ZAC proveniente do pós-aquecimento, evidenciando a ausência de atendimento aos requisitos da EPS.

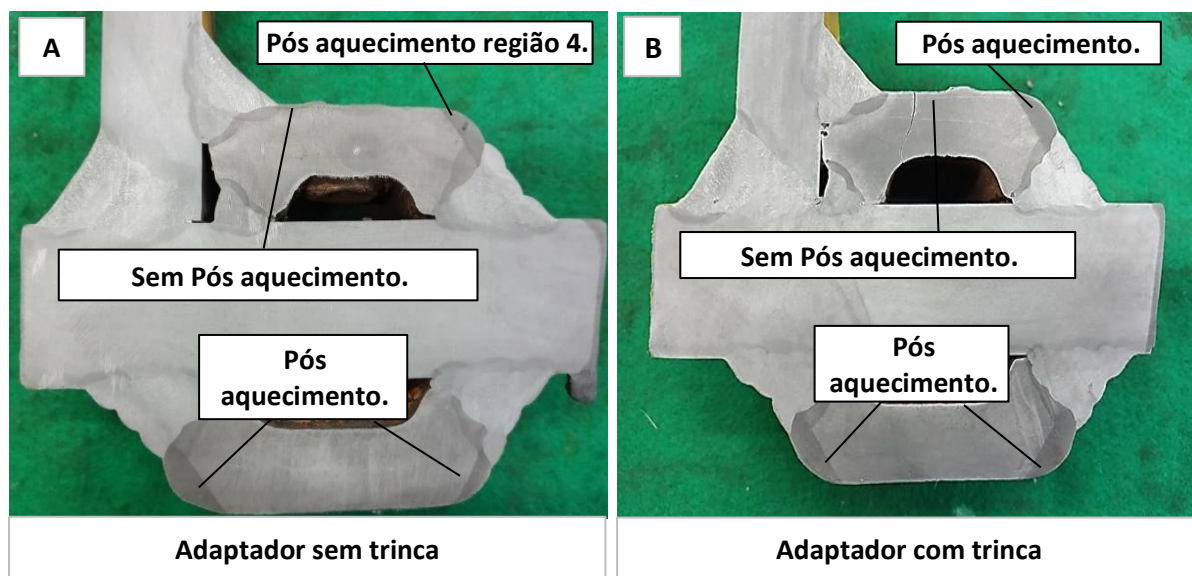
Figura 32 – Macrografia (40X)



Fonte: Autoria própria (2024)

O pós-aquecimento tem a função de difundir o hidrogênio, e o mesmo, não foi evidenciado na união da placa lateral com os adaptadores fundidos (Figura 33).

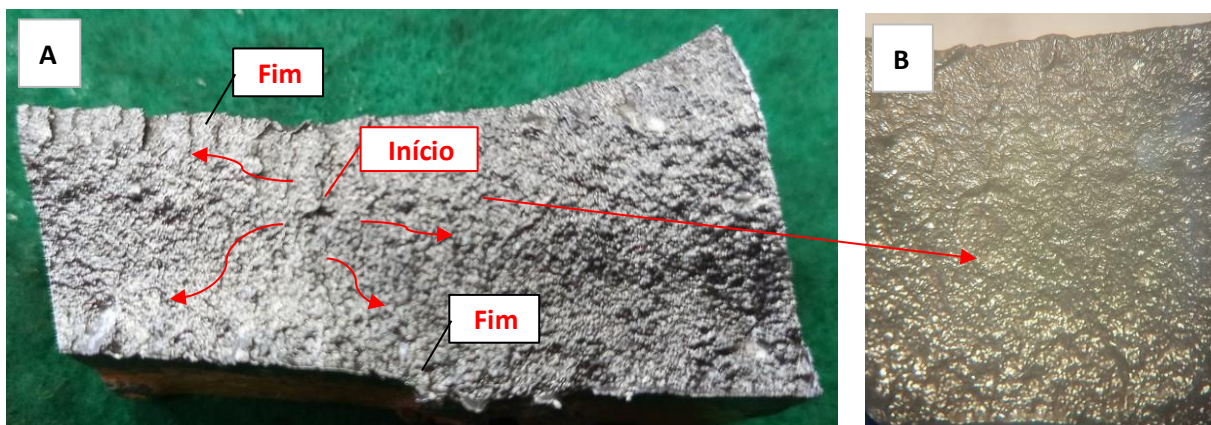
Figura 33 – Macrografia comparativa



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a macrografia, foi realizada a fractografia sem auxílio de lentes (Figura 34 A), constatando uma fratura brilhante, caracterizando sua fragilidade (Figura 34-B). Também foram observadas trincas internas e sem deformações, permitindo-se verificar a nucleação, propagação e ruptura final da fratura.

Figura 34 – Análise da fratura (10X)



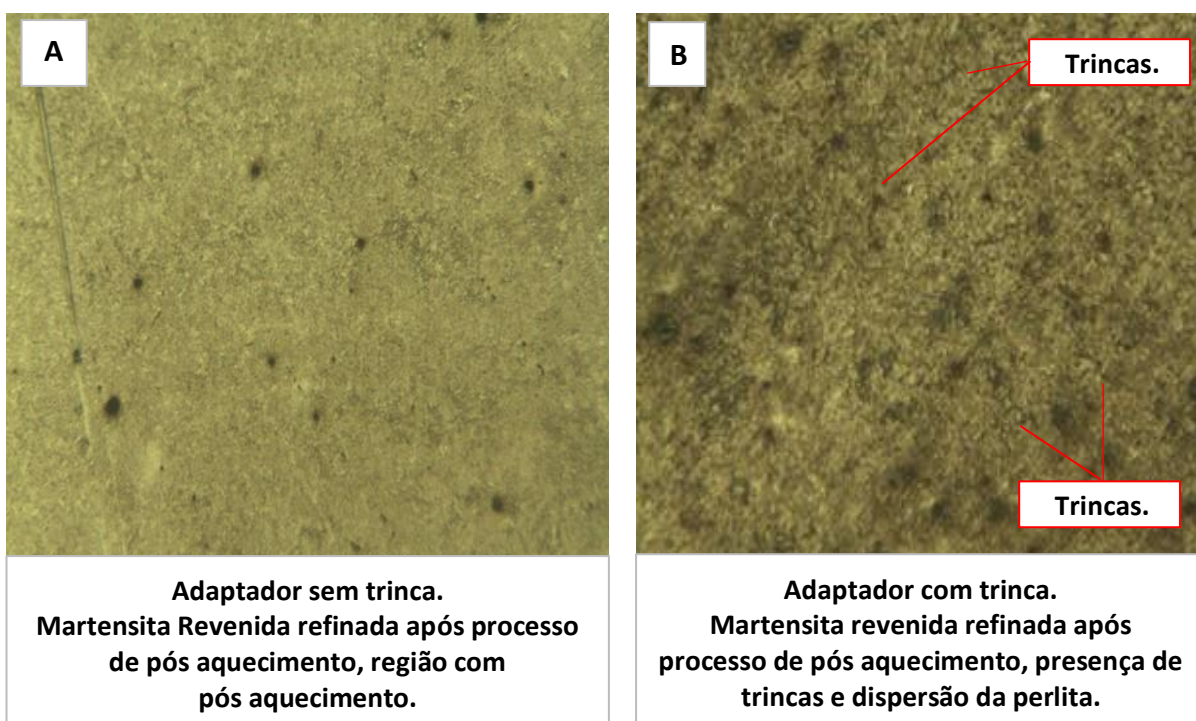
Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.5 Micrografia

Comparando as micrografias das regiões que tiveram o pós-aquecimento e sem o mesmo, foi evidenciado que a junta soldada com pós-aquecimento, obteve uma martensita revenida com tamanho de grão de 8 com alguns precipitados de perlita esferiodizados, onde o especificado pelo material Hensley-4S é 7, conforme demonstrado na Figura 35-A.

Quanto à micrografia da região sem o pós-aquecimento, foi observada a presença de martensita revenida com granulometria 8, no entanto, apresentando perlita dispersa e micro trincas, evidenciando que a região ficou fragilizado por hidrogênio (Figura 35-B).

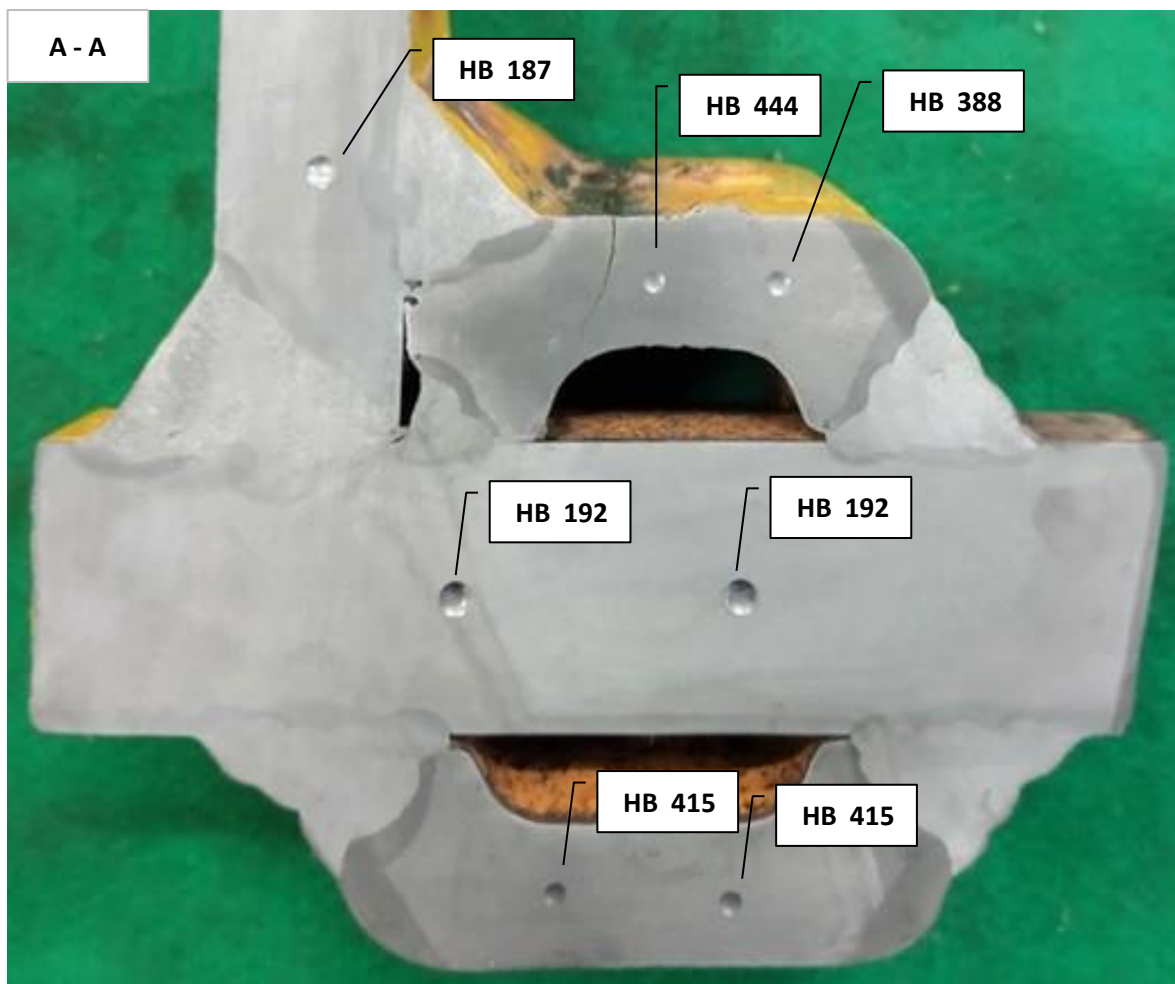
Figura 35 – Micrografia (100X)



Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.6 Dureza

A dureza do adaptador variou entre 415 HB à 444 HB, onde o especificado é de 387 HB à 444 HB, evidenciando que região da trinca obteve o maior valor conforme demonstrado na Figura 36.

Figura 36 – Ensaio de dureza Brinell

Fonte: Autoria própria (2024)

4.1.7 Análise da EPS

Analizando a EPS, notou-se através da localização da trinca em sinergia com as análises de caracterização, que o procedimento de pós-aquecimento de 590°C à 680°C, não foram atendidos conforme evidenciados nos respectivos itens 4.1.4 e 4.1.5, refletindo um uma trinca a frio, causa pela interação entre o hidrogênio, tensões elevadas e microestrutura frágil.

4.1.8 FTA em sinergia com o diagrama de Ishikawa

No FTA em sinergia com diagrama de Ishikawa, foram encontrados problemas quanto a forma de verificação (Medição), atendimento dos procedimentos de soldagem (Mão de Obra).

4.1.9 5 Porquês

A causa raiz foi a ausência de pós-aquecimento de 590°C à 680°C conforme procedimento descrito pelo fabricante Hensley, por não atender a EPS. No entanto, a forma de controle do pós-aquecimento, também foi um fator determinante na trinca a frio ocorrida entre o adaptador fundido e placa laminada, tal problema poderia ser evitado com a padronização do processo (Método).

4.2 Passo 4: Desenvolvimento de ações corretivas

As ações corretivas foram implementadas utilizando a ferramenta 5W1H, permitindo o planejamento assertivo das mesmas, conforme descrito na Tabela 7.

4.3 Passo 5: Validação e verificação das ações corretivas

Tendo em vista que existe a perspectiva de produção seriada do implemento, sugeriu-se o acompanhamento de 10 peças consecutivas por lote, para análises de controle estatístico do processo (CEP), onde as peças foram avaliadas em processo e durante sua vida útil.

4.4 Passo 6: Padronização

Após apuração da causa raiz, foram confeccionadas folhas de processo e checagem (Figura 37), com o objetivo de padronizar a execução dos procedimentos de soldagem e eliminar possíveis falhas futuras.

Figura 37 – Folhas de processo

FOLHA DE ORIENTAÇÃO CALDEIRARIA																																																																																	
Nº		FOLHA 0001		ORIENTAÇÕES SOBRE A SOLDAGEM DA PLACA DE DENTE NA CAÇAMBA		Nº		FOLHA 0001																																																																									
ELABORADO POR	APROVADO POR	DATA	DATA	ELABORADO POR	APROVADO POR	DATA	DATA	ELABORADO POR	APROVADO POR																																																																								
PONTO DE PRÉ AQUECIMENTO FAÇA O PRÉ AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA 1º FAÇA O PRÉ AQUECIMENTO ENTRE 200 - 250°C 2º FAÇA A SOLDAGEM SEGUINDO A EPS PII-006 3º FAÇA O PÓS AQUECIMENTO ENTRE 580 - 690°C 4º UTILIZAR O TERMÔMETRO PARA CHEGAR NAS TEMPERATURAS PONTO DE PÓS AQUECIMENTO FAÇA O PÓS AQUECIMENTO NAS MARGENS DO CORDÃO DE SOLDA CORDÃO DE SOLDA																																																																																	
SEGUIR A SEQUÊNCIA DO PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM DOS ADAPTADORES CONFORME ESPECIFICADO																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>PASSO</th> <th>DESCRIÇÃO</th> <th>FERRAMENTA</th> <th>CARACTERÍSTICA</th> <th>ESPECIFICAÇÃO</th> <th>UNIDADE</th> <th>VALOR</th> <th>REGISTO</th> <th>PLANO DE REPOSIÇÃO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>ESTABELECER A LIMPESA DA JUNTA DE SOLDA PARA EVITAR FALHAS NA SOLDAGEM</td> <td>ESCOVA DE AÇO, ETC.</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>ESTABELECER O ALISTE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM CONFORME EPS-PII-006</td> <td>NÃO SE APLICA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>VERIFICAR A TEMPERATURA DO PRÉ E PÓS AQUECIMENTO</td> <td>TERMÔMETRO</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>ESTABELECER O PRÉ AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA ANTES DA SOLDAGEM</td> <td>INDICADOR DE TEMPERATURA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>ESTABELECER A SOLDAGEM SEGUINDO O PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EM AÇO</td> <td>NÃO SE APLICA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>ESTABELECER O PÓS AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA APÓS A SOLDAGEM</td> <td>INDICADOR DE TEMPERATURA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>ESTABELECER O AQUECIMENTO DA SOLDA CONFORME AOS DADOS DA TABELA 2</td> <td>INDICADOR DE TEMPERATURA</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>										PASSO	DESCRIÇÃO	FERRAMENTA	CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE	VALOR	REGISTO	PLANO DE REPOSIÇÃO	1	ESTABELECER A LIMPESA DA JUNTA DE SOLDA PARA EVITAR FALHAS NA SOLDAGEM	ESCOVA DE AÇO, ETC.							2	ESTABELECER O ALISTE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM CONFORME EPS-PII-006	NÃO SE APLICA							3	VERIFICAR A TEMPERATURA DO PRÉ E PÓS AQUECIMENTO	TERMÔMETRO							4	ESTABELECER O PRÉ AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA ANTES DA SOLDAGEM	INDICADOR DE TEMPERATURA							5	ESTABELECER A SOLDAGEM SEGUINDO O PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EM AÇO	NÃO SE APLICA							6	ESTABELECER O PÓS AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA APÓS A SOLDAGEM	INDICADOR DE TEMPERATURA							7	ESTABELECER O AQUECIMENTO DA SOLDA CONFORME AOS DADOS DA TABELA 2	INDICADOR DE TEMPERATURA						
PASSO	DESCRIÇÃO	FERRAMENTA	CARACTERÍSTICA	ESPECIFICAÇÃO	UNIDADE	VALOR	REGISTO	PLANO DE REPOSIÇÃO																																																																									
1	ESTABELECER A LIMPESA DA JUNTA DE SOLDA PARA EVITAR FALHAS NA SOLDAGEM	ESCOVA DE AÇO, ETC.																																																																															
2	ESTABELECER O ALISTE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM CONFORME EPS-PII-006	NÃO SE APLICA																																																																															
3	VERIFICAR A TEMPERATURA DO PRÉ E PÓS AQUECIMENTO	TERMÔMETRO																																																																															
4	ESTABELECER O PRÉ AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA ANTES DA SOLDAGEM	INDICADOR DE TEMPERATURA																																																																															
5	ESTABELECER A SOLDAGEM SEGUINDO O PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EM AÇO	NÃO SE APLICA																																																																															
6	ESTABELECER O PÓS AQUECIMENTO NA JUNTA DE SOLDA APÓS A SOLDAGEM	INDICADOR DE TEMPERATURA																																																																															
7	ESTABELECER O AQUECIMENTO DA SOLDA CONFORME AOS DADOS DA TABELA 2	INDICADOR DE TEMPERATURA																																																																															

FOLHA DE ORIENTAÇÃO																																						
NOME		MODELO		NÚMERO		REVISÃO		SOLDAGEM DO ADAPTADOR																														
ELABORADO POR	APROVADO POR	DATA	DATA	ELABORADO POR	APROVADO POR	DATA	DATA	ELABORADO POR	APROVADO POR																													
SEQUÊNCIA DE SOLDAGEM PRÉ AQUECIMENTO 200 - 250°C PÓS AQUECIMENTO 580 - 690°C NOTA DE INSPEÇÃO: PARA VALIDAÇÃO DE SOLDAGEM, É FEITA A VERIFICAÇÃO VISUAL NOS PASEIS DE SOLDA COM O OBJETIVO DE IDENTIFICAR TRINCAS, INCLUSÕES, POROSIDADE E TRANSMISSÃO. <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">PASSO</th> <th colspan="2">PRÉ AQUECIMENTO</th> <th colspan="2">PÓS AQUECIMENTO</th> </tr> <tr> <th>TEMPERATURA</th> <th>TEMPO</th> <th>TEMPERATURA</th> <th>TEMPO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>200</td> <td>300</td> <td>580</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>250</td> <td>310</td> <td>690</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>200</td> <td>300</td> <td>580</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>250</td> <td>310</td> <td>690</td> <td>35</td> </tr> </tbody> </table>										PASSO	PRÉ AQUECIMENTO		PÓS AQUECIMENTO		TEMPERATURA	TEMPO	TEMPERATURA	TEMPO	1	200	300	580	30	2	250	310	690	35	3	200	300	580	30	4	250	310	690	35
PASSO	PRÉ AQUECIMENTO		PÓS AQUECIMENTO																																			
	TEMPERATURA	TEMPO	TEMPERATURA	TEMPO																																		
1	200	300	580	30																																		
2	250	310	690	35																																		
3	200	300	580	30																																		
4	250	310	690	35																																		

Fonte: Autoria própria (2024)

Durante o treinamento do procedimento de pré-aquecimento e pós-aquecimento de soldagem (Figura 38), as equipes de trabalho foram orientadas a terem a percepção da fabricação de difícil soldabilidade e qual seria o aspecto final da junta, após o processo. Ficou claro que após o pós-aquecimento na faixa de 590 °C à 680 °C, existe uma oxidação superficial, deferindo da superfície sem o processo, facilitando a identificação da peça executada de forma correta. Tais informações foram difundidas aos setores responsáveis pela Qualidade da Empresa.

Figura 38 – Treinamento prático sobre aquecimentos



Fonte: Autoria própria (2024)

5 CONCLUSÃO

A partir da metodologia de investigação de falhas, que consiste em estudo de caso baseado em dados e fatos, que foram obtidos de acordo as análises dos materiais e métodos, conclui-se que a causa raiz da trinca no adaptador fundido de alta resistência, foi a ausência do pós-aquecimento de 590°C à 680 °C, conforme prescrição direta do fabricante em função do carbono equivalente.

Os dados coletados, refletiram na conclusão a partir da verificação das informações do processo como a Especificação do Procedimento de Soldagem (EPS), caracterização do material e aplicação da metodologia de investigação de falhas.

A composição química do material encontrou-se dentro das especificações, assim como a granulometria do mesmo.

As juntas que receberam pós-aquecimento, obtiveram uma microestrutura de martensita revenida, enquanto a junta sem este procedimento, obteve a mesma microestrutura em sinergia com perlita dispersa, no entanto, com presença de micro trincas.

O nível de dureza da zona afetada pelo calor onde se localizava a trinca, apresentou-se com valor máximo de 444 HB.

A fratura do material estudado, apresentou-se brilhante e sem deformações, caracterizando um tipo de ruptura frágil.

As ferramentas de qualidade foram imprescindíveis para as análises da falha, bem como o direcionamento e controle das medidas preventivas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WELDING SOCIETY; **Structural Welding Code Steel**. Miami, 2000.

BARBEDO, N. D. D.; **Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica**. Dissertação de mestrado apresentada na Universidade Federal de Itajubá (2011).

CALLISTER, W.D.; **Ciência e engenharia de materiais** 9. ed. (2016)

CAMPOS, D. R. C; CASTRO, G. H.; SILVA, I. E.; LOPES, J. J.; ALMEIDA, S. P.; **Escavadeira hidráulica**. Minas Gerais (2017).

FORTES, C. **Apostila de metalurgia de soldagem**. ESAB (2004)

GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C.; MORAIS, W. A.; **Análise de falhas**. Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração – Grupo de pesquisa de análise de falhas. Universidade Santa Cecília - São Paulo – 2019.

IMIANOWSKY, G. W.; WALENDOWSKY, M. A.; **Os principais aços carbono utilizados na construção civil**. Curso de Engenharia Civil pelo Centro Universitário de Brusque – UNIFEBE.

INFOSOLDA, **Juntas, posições e simbologia**. (2023)

JOAQUIM, Roberto. **Processo de soldagem por arame tubular** (2023).

MODENESI, P.; MARQUES, P.; SANTOS, D.; **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. (2012)

MODENESI, P.; **Normas e Qualificação em Soldagem**. Universidade Federal de Minas Gerais - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. (2005).

MONTEIRO, T.; OLIVEIRA, J. R.; **Análise de modos de falha e efeito (FMEA) no processo de soldagem GMAW**. Monografia apresentada na FATEC Itaquerá. São Paulo. 2021

NERIS, M.M.; **Soldagem: Eixo tecnológico: Controle e processos industriais** (Cetec capacitações) (2012).

NETO, C.; VIEIRA, B.; **Comparação de junta soldada aço carbono/aço inox utilizando como metal de adição aço carbono e aço inox** Guaratinguetá, 2014;

RAMIRES, G. J. S.; **Estudo comparativo entre escavadeiras hidráulicas e motoscrapers**. Universidade Federal tecnológica do Paraná (2017).

SAMPAIO, M. V. C.; **Aplicação da inspeção não intrusiva em equipamentos do sistema de dessulfurização de gás natural da plataforma de Pampo**. Universidade Federal do Paraná (2009).

SANTOS, P. B; CARVALHO, D. M. L.; **Caracterização microestrutural de solda dissimilar entre aço carbono e inox pelo processo SMAW**. Faculdade FUCAP, Engenharia Mecânica – Santa Catarina

SENAI – Departamento Regional do Espírito Santo. **Noções básicas de processos de soldagem e corte**. Espírito Santo, 1997.

SILVA, F. J. G. **Tecnologia da Soldadura uma abordagem técnico-didática**. 292 páginas. Edição: Publindústria, Edições Técnicas, Ltda. Porto; 2014.

SILVA, G.; **Ensaio destrutivo**. Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAT, 2023.

SILVA, G.; **Ensaio não destrutivo**. Departamento de Engenharia de Materiais – DEMAT, 2023.

SINGH, R.; **Applied welding engineering: Process, codes and standarts**. Elsevier, 2012.

SOARES, V. G.; **Estudo comparativo da soldagem de manutenção por eletrodo revestido e por arame tubular na redução do desgaste de equipamentos na usina de cana de açúcar**. Ouro Preto, 2019.

SOUZA, A. C.; **CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM**. Lincoln Electric do Brasil, Guarulhos.

TIBURI, F.; **Qualidade em soldagem**. SENAI-RS Centro Tecnológico de Mecatrônica Centro Tecnológico de Mecatrônica, 2011.

VEIGA, E.; **Soldagem de manutenção**. São Paulo, 2010.

WAINER, E; BRANDI, S. D.; MELLO, Fábio D. H.; De. **Soldagem: processos e metalurgia**. São Paulo (1992).

ZEEMANN, A.; Energia de soldagem. (2003)

ZOLIN, I.; **Ensaio mecânicos e análises de falhas**. Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2011.