

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOLDAGEM**

EMERSON FARIA GOMES

**SOLDAGEM EM RESERVATÓRIOS METÁLICOS PARA
ARMAZENAMENTO DE ÁGUA**

**BELO HORIZONTE
2017**

EMERSON FARIA GOMES

**SOLDAGEM EM RESERVATÓRIOS METÁLICOS PARA
ARMAZENAMENTO DE ÁGUA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Especialização em Engenharia de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, para obtenção do título de especialista.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Queiroz Bracarense

**BELO HORIZONTE
2017**

RESUMO

Os reservatórios metálicos utilizados no armazenamento de água, geralmente são fabricados com chapas de aço ASTM A-36 calandradas e soldadas através dos processos GMAW ou SMAW, dependendo do local de fabricação, seja em galpões fechados ou em campo. Os processos de fabricação podem introduzir descontinuidades nas juntas soldadas, tais como, falta de fusão, falta de penetração, porosidade, mordedura, inclusões entre outros, que podem comprometer a estrutura ou componente, com relação à resistência à propagação de trincas e até mesmo quanto a resistência mecânica. O presente trabalho tem por objetivo demonstrar as principais descontinuidades encontradas nas soldas de reservatórios metálicos e influências destas, na resistência da estrutura soldada. Grande parte das descontinuidades encontradas em campo podem ser evitadas ou minimizadas, pois estão diretamente relacionadas com a preparação do material, perícia do soldador e qualidade dos consumíveis.

Descritores: Soldas; Reservatórios Metálicos.

ABSTRACT

The metal reservoirs used for water storage are usually made of ASTM A-36 steel plates calendered and welded through the GMAW or SMAW processes, depending on the manufacturing site, whether in closed sheds or in the field. The manufacturing processes may introduce discontinuities in welded joints, such as lack of fusion, lack of penetration, porosity, biting, inclusions among others, which may compromise the structure or component with respect to crack propagation resistance and even Mechanical resistance. The present work aims to demonstrate the main discontinuities found in welds of metallic reservoirs and their influence on the strength of the welded structure. Most of the discontinuities can be avoided or minimized, since they are directly related with material preparation, welder expertise and quality of consumables.

Keywords: Welding; Steel Reservoirs.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVO.....	8
3 FABRICAÇÃO.....	8
3.1 Rastreabilidade.....	8
3.2 Preparação das superfícies.....	9
3.3 Calandramento.....	14
3.4 Montagem.....	15
3.5 Soldagem.....	17
3.6 Análises, ensaios e medições.....	19
3.6.1 Ensaios visuais de soldas.....	19
3.6.2 Ensaios dimensionais.....	30
3.6.3 Ensaios com líquido penetrante.....	20
3.6.4 Ensaios com equipamentos de ultrassom.....	20
3.6.5 Ensaios com caixa de vácuo.....	21
3.7 Descontinuidades em soldas.....	21
3.7.1 Significância das descontinuidades no campo da soldagem.....	22
3.8 Cálculo de resistência das soldas.....	24
3.8.1 Solda de filetes.....	24
3.8.2 Soldas de entalhe.....	25
3.9 Acabamento e preparação para pintura.....	26
4 Referências normativas.....	26
5 ANÁLISES DE CAMPO.....	30
5.1 Principais descontinuidades encontradas nos reservatórios avaliados.....	47

ABREVIATURAS E SIMBOLOS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI- American National Standards Institute

ASME- American Society of Mechanical Engineers

ASTM- American Society for Testing and Materials

API- American Petroleum Institute

AWWA- American Water Works Association

DIN- Deutsches Institut für Normung

GMAW- Gas Metal Arc Welding

NBR- Norma Brasileira

NB- Norma Brasileira

NTS- Norma técnica SABESP

SABESP- Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SMAW- Shielded Metal Arc Welding

STRUTURAL WELDING CODE STEEL- Código de soldagem para aço estrutural

Mpa- Mega Pascal

ZTA- Zona Termicamente Afetada

WELDED CARBON STEEL TANKS FOR WATER STORAGE- Tanque de aço carbono soldado para armazenamento de água.

Rn- Resistência de cálculo

f_w- Resistência nominal a ruptura por tração do eletrodo

A_w- Área da seção efetiva da solda

t- Espessura da garganta efetiva

φ – Coeficiente de resistência

A_{MB}- Área do metal de base

f_y- Limite de escoamento do aço

s- Largura da perna do cordão de solda

ΔL - Comprimento

q' - Resistência da solda por unidade de comprimento do cordão

e_x - Desvio local da forma teórica

L_x - Comprimento do calibre para medir a imperfeição local

R - Raio da superfície externa do costado

$^{\circ}C$ - Graus Celsius

Creep failure- Deformação dependente do tempo

LISTA DE FIGURAS

01	ASPECTO ORIGINAL DAS CHAPAS	8
02	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM USO DE FERRAMENTAS MANUAIS	9
03	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM USO DE FERRAMENTAS MECÂNICAS	9
04	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM USO DE FERRAMENTAS MECÂNICAS	10
05	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM USO DE FERRAMENTAS MECÂNICAS	10
06	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM JATEAMENTO ABRASIVO AO METAL QUASE BRANCO	11
07	PADRÕES DE ACABAMENTO SUPERFICIAL COM JATEAMENTO ABRASIVO AO METAL BRANCO	11
08	PROCESSO DE JATEAMENTO ABRASIVO COM GRANALHA DE AÇO	12
09	JATEAMENTO PADRÃO SA3	12
10	CALANDRAMENTO DE CHAPAS	13
11	CONDICIONAMENTO DAS CHAPAS CALANDRADAS	13
12	ANÉIS	14
13	ACOPLAMENTO VERTICAL DOS ANÉIS	15
	ACOPLAMENTO HORIZONTAL DOS ANÉIS	15
14	DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA SOLDAGEM SMAW	16
15	DESENHO ESQUEMÁTICO DE UMA SOLDAGEM GMAW	17
16	PONTEAMENTO DO COSTADO	18
17	CLASSIFICAÇÃO AWS PARA ELETRODOS REVESTIDOS	30
18	ARMAZENAMENTO INADEQUADO DE ELETRODOS	32
19	ARMAZENAMENTO INADEQUADO DE ELETRODOS	32
20	ARMAZENAMENTO CORRETO DE ELETRODOS	33
21	CONDICIONAMENTO INADEQUADO DE ELETRODOS	33
22	CONDICIONAMENTO INADEQUADO DE ELETRODOS	34
23	CONDICIONAMENTO ADEQUADO DOS ELETRODOS	35
24	MONTAGEM DO RESERVATÓRIO ELEVADO CONSTRUÍDO EM CAMPO- RESERVATÓRIO ELEVADO 1	36
25	SOLDAGEM DO RESERVATÓRIO - RESERVATÓRIO ELEVADO 1	

27	ACABAMENTO FINAL -RESERVATÓRIO ELEVADO 1	37
28	MONTAGEM DO RESERVATÓRIO APOIADO DE 3.878 M ³ (RESERVATÓRIO APOIADO 2)	38
29	SOLDAGEM DO RESERVATÓRIO APOIADO DE 3.878 M ³ - RESERVATÓRIO APOAIDO 2	38
30	RESERVATÓRIO APOIADO DE 3.878 M ³ - RESERVATÓRIO APOAIDO 2	38
31	MONTAGEM DO RESERVATÓRIO APOIADO DE 1.200 M ³ - RESERVATÓRIO APOIADO 3	41
32	SOLDAGEM DO RESERVATÓRIO APOIADO DE 1.200 M ³ - RESERVATÓRIO APOIADO 3	42
33	RESERVATÓRIO APOIADO DE 1.200 M ³ (RESERVATÓRIO APOIADO 3	42

1 INTRODUÇÃO

Reservatórios integram o sistema de adução e de distribuição de água com finalidade de compensar as flutuações de consumo ao longo do dia, bem como propiciar reserva de emergência para combate a incêndio, equilíbrio de pressão na rede e regularização do funcionamento das bombas. “Em termos gerais, um reservatório deve conter boa integração paisagística; facilidade no acesso e operações; facilidade na manutenção e eventual substituição de acessórios e órgãos interiores e integração física nos espaços exteriores” (PEREIRA, 2010, p. 3).

Vários materiais são utilizados na construção de reservatórios e sua seleção depende da capacidade de armazenamento, facilidade de instalação, rapidez da sua colocação e entrada em funcionamento, tipo de reservatórios já existentes, custo do fornecimento e manutenção e tempo de vida útil. Segundo Pereira (2007) existem os seguintes tipos de materiais para construção de reservatórios: Concreto armado; concreto armado e protendido; elementos em concreto armado pré-fabricado com pré-esforço; material compósito – resina termo-endurecível reforçada com fibras de vidro; polietileno de média densidade; fibra de vidro; aço, tipo australiano, em chapas pré-moldadas e chapas de aço vitrificado ligadas por cordão de solda.

Percebe-se crescente utilização de reservatórios metálicos pela indústria da construção civil em substituição aos reservatórios construídos em concreto armado, adotados para armazenamento de água potável. Tal fato se deve à versatilidade de formatos, fabricação rápida, maior segurança, facilidade de manutenção e maior vida útil. Contudo, vê-se a fabricação deste tipo de reservatório por empresas desqualificadas ou por profissionais sem conhecimento dos procedimentos de soldagem e fabricação, o que está relacionada, entre outros, à ausência de norma brasileira específica para reservatórios metálicos para água.

As normas comumente utilizadas para referenciar reservatórios metálicos são NBR-7821, API 650 e AWWA-AISI D-100. As duas primeiras são utilizadas para armazenamento de derivados de petróleo e produtos químicos e chamam atenção pela exigência em relação à espessura mínima das chapas e ensaios rigorosos nas soldas, pois, o material envolve riscos de armazenamento e dificuldade de manutenção. A última é uma norma americana, específica para este tipo de reservatório, contudo, não adotada pelo mercado brasileiro devido à espessura mínima recomendada para as chapas e ensaios mais rigorosos das soldas.

Percebe-se, em trabalhos de campo, que a ausência de norma brasileira oportuniza aos fabricantes produzirem reservatórios com baixa espessura de chapa e qualidade de solda insatisfatória, o que resulta em acidentes por ruptura de soldas, deformações de chapas, falhas de fabricação e perda de espessura das chapas por corrosão.

Percebe-se também maior número de acidentes, geralmente associados a ruptura das juntas soldadas do costado, o que se agrava pela localização desses reservatórios, que ficam, em sua maioria, em grandes condomínios residenciais, bairros ou cidades pequenas.

Diante desses fatores e por conviver com essas dificuldades em campo, esse trabalho justifica-se pela importância do tema e por ser pouco abordado na literatura brasileira. Pretende-se discorrer sobre os principais defeitos de montagem e soldagem encontrados na fabricação dos reservatórios metálicos e demonstrar os efeitos e riscos decorrentes destes. Além disso, serão apresentadas medidas preventivas que proporcionam melhor qualidade das soldas e de montagem.

2 OBJETIVO

Apresentar aos fabricantes, engenheiros, soldadores e aos órgãos fiscalizadores uma visão geral dos defeitos normalmente encontrados nas soldas e montagem de reservatórios metálicos e os riscos decorrentes destes, assim como, oferecer informações e medidas preventivas para evitar o surgimento de falhas.

3 FABRICAÇÃO

Antes da construção dos reservatórios há uma análise criteriosa dos materiais, documentações e equipamentos utilizados na fabricação destes, com o intuito de garantir a qualidade e especificação necessária para atender as solicitações e esforços que serão submetidos. Demonstrar-se-á as etapas fundamentais para certificar a qualidade dos materiais que são empregados na fabricação.

3.1 Rastreabilidade

As matérias primas e consumíveis utilizados devem possuir rastreabilidade e certificados de qualidade dos fabricantes, submetidos a aprovação do cliente.

3.2 Preparação das superfícies

Para garantir o correto dimensionamento e alinhamento das chapas utilizadas na fabricação de reservatórios metálicos de armazenamento de água potável é necessário que estas sejam inicialmente esquadrejadas.

Dependendo da espessura das chapas ou das especificações da EPS, estas devem ser chanfradas com uso de chanfradeiras ou esmerilhamento das bordas, formando chanfros angulares.

Em seguida, as chapas devem ser submetidas a jateamento abrasivo ao metal branco com granalha de aço ou oxido de alumínio. Esse procedimento visa atingir o padrão Sa3 para as superfícies em contato com água e Sa2 ½ para as superfícies sem contato direto com a água. Métodos que se diferenciam deste descrito não garantem a eficiência e homogeneidade desta aplicação. Na Tabela 1 estão descritas as equivalências entre diferentes normas sobre o padrão de acabamento das superfícies a serem pintadas.

TABELA 1
EQUIVALÊNCIA DOS GRAUS DE PREPARO DE SUPERFÍCIES DE
DIFERENTES NORMAS

Método de preparo de superfície	NORMAS		
	SIS 055900:1998	Vis 1 SSPC	ISO 8501-2:1994
Com ferramentas manuais	St2	SP2	PSt2
Com ferramentas mecânicas	St3	SP3	PSt3
Com jato abrasivo ligeiro (brush off)	Sa1	SP7	PSa1
Com jato abrasivo comercial	Sa2	SP6	PSa2
Com jato abrasivo ao metal quase branco	Sa2 ^{1/2}	SP10	PSa2 ^{1/2}
Com jato abrasivo ao metal branco	Sa3	SP5	PSa3

Fonte: NTS085 Preparo de superfícies metálicas para pintura.

	A
	B
	C
	D

FIGURA 1: Aspecto original das chapas.

Fonte: SABESP NTS-085.

Os padrões atingidos com uso de limpeza com ferramentas manuais são apresentados na Figura 2.

	Grau B St2
	Grau C St2
	Grau D St2

FIGURA 2: Padrões de acabamento superficial com uso de ferramentas manuais.

Fonte: SABESP NTS-085.

Os padrões atingidos com uso de limpeza com ferramentas mecânicas são apresentados na Figura 3.

	Grau B St3
	Grau C St3
	Grau D St3

FIGURA 3: Padrões de acabamento superficial com uso de ferramentas mecânicas.

Fonte: SABESP NTS-085.

Os padrões atingidos com uso de limpeza com jateamento abrasivo ligeiro são apresentados nas Figuras 4 e 5.

	Grau B Sa1
	Grau C Sa1
	Grau D Sa1

FIGURA 4: Padrões de acabamento superficial com uso de ferramentas mecânicas.

Fonte: SABESP NTS-085.

	Grau B Sa2
	Grau C Sa2
	Grau D Sa2

FIGURA 5: Padrões de acabamento superficial com uso de ferramentas mecânicas.

Fonte: SABESP NTS-085.

Os padrões atingidos com uso de limpeza com jateamento abrasivo ao metal quase branco são apresentados na Figura 6.

	Grau A Sa2½
	Grau B Sa2½
	Grau C Sa2½
	Grau D Sa2½

FIGURA 6: Padrões de acabamento superficial com jateamento abrasivo ao metal quase branco.

Fonte: SABESP NTS-085.

Os padrões atingidos com uso de limpeza com jateamento abrasivo ao metal branco são apresentados na Figura 7.

	Grau A Sa3
	Grau B Sa3
	Grau C Sa3
	Grau D Sa3

FIGURA 7: Padrões de acabamento superficial com jateamento abrasivo ao metal branco.

Fonte: SABESP NTS-085.

Na Figura 8 demonstra-se o processo de jateamento com granalha de aço e na Figura 9 o padrão Sa3 de acabamento superficial com jateamento abrasivo ao metal branco.

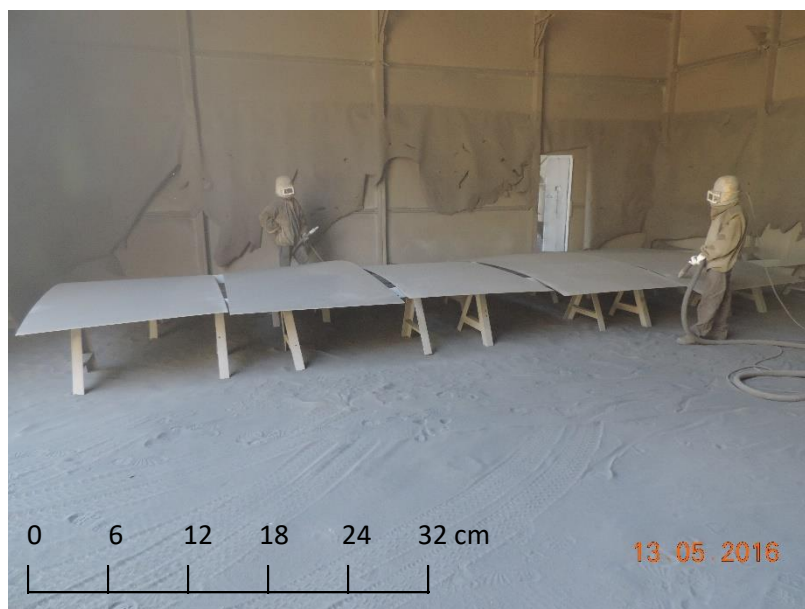


FIGURA 8: Processo de jateamento abrasivo com granalha de aço.

Fonte: Próprio autor.

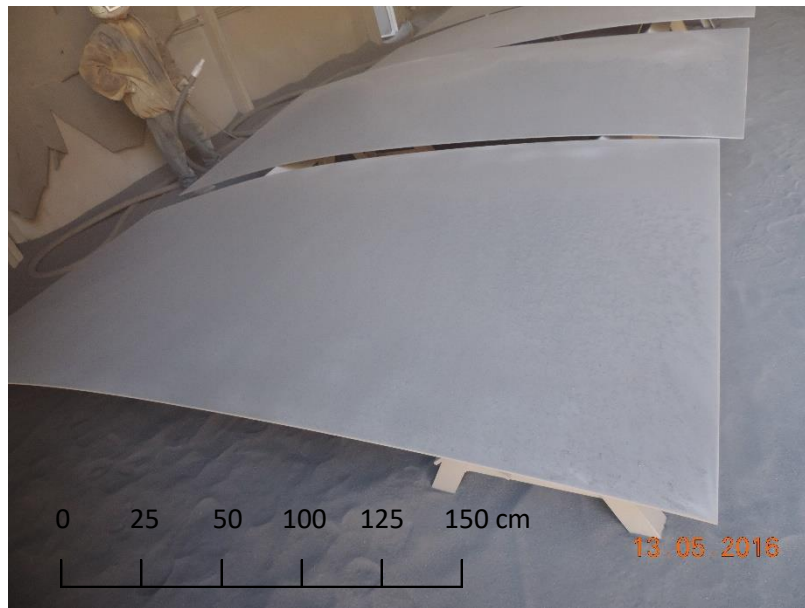


FIGURA 9: Jateamento padrão Sa3.

Fonte: Próprio autor.

3.3 Calandramento

Calandramento consiste na conformação a frio de chapas metálicas para a forma cilíndrica ou côncava- dependendo do diâmetro ou comprimento da chapa utilizada. É um procedimento que demanda calandras hidráulicas ou manuais; em seguida as chapas são ponteadas, formando anéis soldados por soldas verticais.

Na Figura 10 demonstra-se o calandramento de uma chapa com uso de calandra hidráulica. O raio de calandramento é controlado através de padrões previamente determinados.



FIGURA 10: Calandramento de chapas.

Fonte: Próprio autor.

Após o calandramento as chapas devem ser condicionadas para armazenagem e transporte em berços metálicos com o mesmo raio de calandramento das chapas para não sofrerem deformações (FIGURA 11).



FIGURA 11: Condicionamento das chapas calandradas.

Fonte: Próprio autor.

3.4 Montagem

Após o calandramento as chapas são soldadas, formando anéis, conforme demonstrado na Figura 12. As soldas de fechamento dos anéis são denominadas soldas verticais ou travessas.



FIGURA 12: Anéis.

Fonte: Próprio autor.

Em seguida os anéis são acoplados na posição vertical ou horizontal, seguido de ponteamto para alinhamento dos anéis.

A montagem dos anéis na posição vertical, favorecem um melhor alinhamento entre as chapas, pois a circularidade do anel é mantida durante o posicionamento, conforme demonstrado na Figura 13.



FIGURA 13: Acoplamento vertical dos anéis.

Fonte: Próprio autor.

A montagem dos anéis na posição horizontal, dificulta o correto alinhamento entre as chapas, pois os anéis apresentam uma ovalização durante o posicionamento, conforme demonstrado na Figura 14.



FIGURA 14: Acoplamento horizontal dos anéis.

Fonte: Próprio autor.

3.5 Soldagem

O processo de soldagem usualmente utilizados para fabricação em campo de reservatórios metálicos para armazenamento de água é o processo SMAW (Shielded Metal Arc Welding). Este consiste em produzir coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre o eletrodo revestido e a peça que está sendo soldada (FIGURA 15).

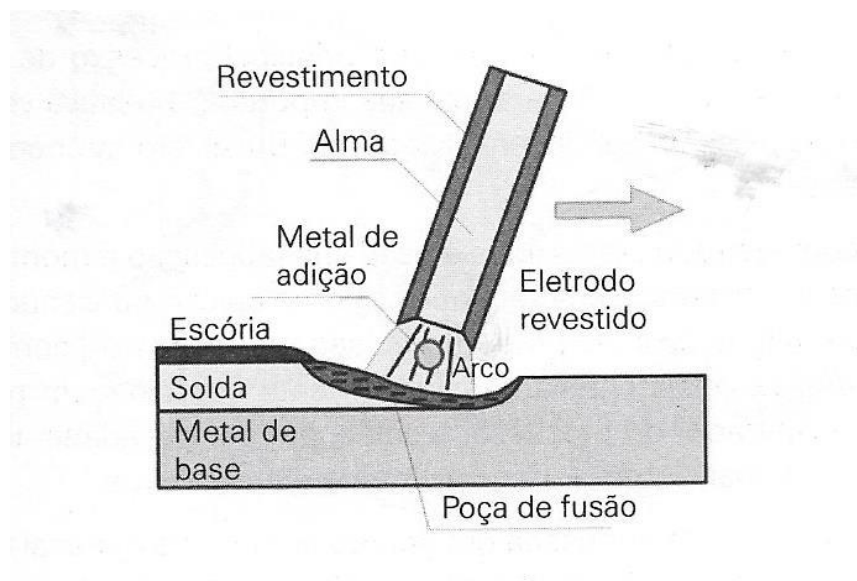


FIGURA 15: Desenho esquemático de uma soldagem SMAW.

Fonte: Soldagem: fundamentos e tecnologia, figura 1 pág. 181.

Para a fabricação de reservatórios construídos em galpões, usualmente é utilizado o processo GMAW (Gas Metal Arc Welding), que consiste em um arco elétrico com proteção gasosa. Este é produzido por um arco elétrico estabelecido entre um arame nú, denominado consumível e peça de trabalho. A proteção contra contaminação atmosférica do arco é feita por gases inertes ou ativos a poça de fusão, conforme demonstrado na Figura 16.

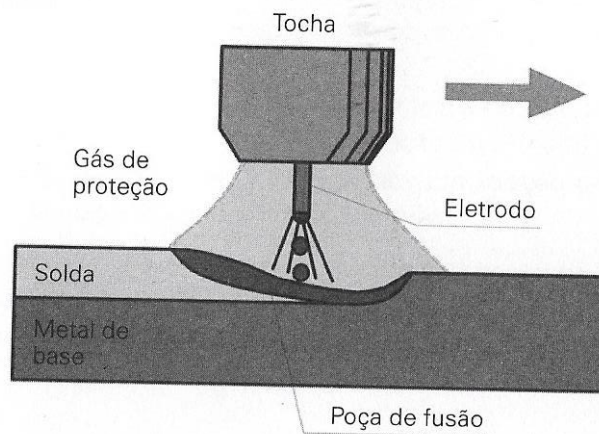


FIGURA 16: Desenho esquemático de uma soldagem GMAW.

Fonte: Soldagem: fundamentos e tecnologia, figura 1 pág. 234.

A sequência de soldagem nas fases de montagem e soldagem, são de suma importância para evitar distorções nas chapas provenientes das contrações geradas durante a solidificação do metal de adição.

Após o correto alinhamento vertical e horizontal das chapas são efetuados pequenos pontos nas extremidades de forma a criar um cilindro, denominado costado do reservatório (FIGURA 17).

Posteriormente é feita a limpeza dos chanfros através de esmerilhamento e é efetuada a solda externa para minimizar as deformações, haja vista que o lado convexo do costado oferece maior rigidez, comparado ao lado côncavo. Em seguida é efetuada a limpeza dos chanfros internos, removendo todos dos pontos de solda e da raiz da solda externa para posteriormente se efetuar as soldas internas.

Atenção especial deve ser tomada para o uso da corrente adequada à espessura da chapa, espaçamento entre as chapas e tamanho do reforço de solda, pois estes são fatores agravantes para deformações em chapas após soldagem.

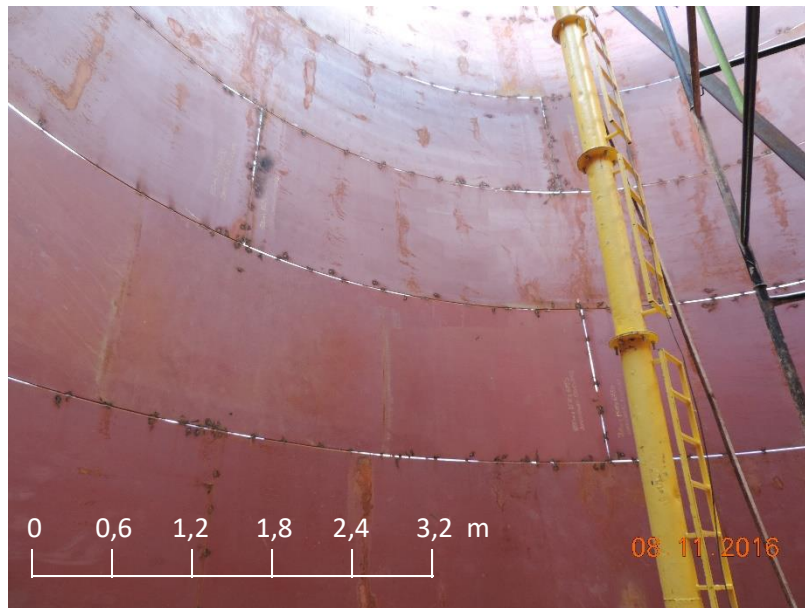


FIGURA 17: Ponteamento do costado.

Fonte: Próprio autor.

3.6 Análises, ensaios e medições

Os processos de montagem e soldagem podem introduzir descontinuidades, tais como desalinhamento na junta, falta de fusão, falta de penetração, porosidade, mordedura, inclusões, falta de preenchimento, deformações nas chapas, entre outros. Tais descontinuidades podem comprometer a estrutura ou componente, com relação à resistência e à propagação de trincas por fadiga, fazendo-se necessário um cuidado especial para identificação correta das descontinuidades no intuito de serem evitadas ou minimizadas.

As descontinuidades usualmente são identificadas através de ensaios não destrutíveis e medições, tais como:

3.6.1 Ensaios visuais das soldas

O ensaio de inspeção visual é o mais simples dos métodos de inspeção não destrutivo. Nestes são efetuadas análises das superfícies a serem soldadas a respeito da presença de descontinuidades, dimensões dos chanfros e limpeza que possam afetar a qualidade das soldas. Após a soldagem são analisados os cordões para verificar a presença de descontinuidade e dimensões nestes. São requisitos para o ensaio de acuidade visual

para perto e de luminescência mínima de 161 lux para exames gerais e de 538 lux para exames de detalhes.

3.6.2 Ensaios dimensionais

Os ensaios dimensionais consistem em efetuar medições de espessuras das chapas, dimensões dos chanfros, espaçamento da raiz, alinhamento das chapas, medição das deformações nas chapas, diâmetro do costado, análise da verticalidade, dimensões dos acessórios, entre outros.

3.6.3 Ensaios com líquido penetrante

Os ensaios com líquidos penetrantes são considerados um dos melhores métodos de ensaios não destrutíveis para detectar discontinuidades superficiais de materiais isentos de porosidade, como: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio, ligas metálicas, cerâmicas, vidros, certos tipos de plásticos ou materiais organo-sintéticos.

O líquido penetrante é aplicado com pincel, pistola, com lata de aerossol ou mesmo por imersão da peça no tanque contendo o líquido, aguarda-se um certo tempo para que ocorra a penetração. Este método está baseado no fenômeno da capilaridade, que é o poder de penetração de um líquido em áreas extremamente pequenas devido a sua baixa tensão superficial.

Efetua-se a remoção deste penetrante da superfície por meio de lavagem com água ou remoção com solventes.

A aplicação de um revelador (pó branco) irá mostrar a localização para detecção de trincas superficiais e discontinuidades com precisão e grande simplicidade, embora suas dimensões sejam ligeiramente ampliadas.

3.6.4 Ensaios com equipamentos de ultrassom

Os ensaios por ultrassom caracterizam-se por ser um método não destrutivo com o objetivo de detectar discontinuidades internas, presentes nos mais variados tipos ou formas de materiais ferrosos ou não ferrosos através da aplicação de ondas mecânicas ou acústicas no meio a ser inspecionado.

As discontinuidades são caracterizadas pelo próprio processo de fabricação da peça ou por componentes, como por exemplo, bolhas de gás em fundidos, dupla laminação em laminados, micro trincas em forjados, escórias em uniões soldadas e outros.

3.6.5 Ensaio com caixa de vácuo

Consiste na aplicação de pressão negativa em uma câmara acrílica de alta resistência que são posicionados sobre os cordões de solda com uma camada de mistura de água e detergente neutro. Após aplicação de vácuo, se houver algum vazamento na solda, é possível visualizar a presença de bolhas dentro da câmara.

Abaixo uma breve descrição das discontinuidades mais comuns em estruturas soldadas encontradas na literatura.

3.7 Descontinuidades em soldas

Conforme Barra (1999), o termo descontinuidade em soldagem denota em uma interrupção ou violação estrutural na região soldada, tal como uma falta de homogeneidade nas características mecânicas, físicas ou metalúrgicas do depósito. A descontinuidade é considerada um defeito quando o efeito isolado ou múltiplo desta, origina uma incapacidade parcial ou total em relação às mínimas exigências padrões.

A categorização das descontinuidades normalmente leva em consideração o seu tipo e natureza. Lundin (1984), condensou as descontinuidades em três distintas categorias como demonstrado na Tabela 2. Estas, porém, não devem necessariamente serem associadas rigorosamente a uma única categoria, haja vista que podem apresentar origens secundárias em outras categorias.

Outro fator importante a ser considerado é a dimensão da descontinuidade, isto é, se a mesma tem característica bidimensional (planar) ou tridimensional (volumétrica).

Descontinuidades planares como trincas e falta de fusão geralmente produzem uma maior amplificação da tensão imposta (efeito de concentração) do que as descontinuidades com características volumétricas (porosidade por exemplo). Além disso, a orientação da descontinuidade em relação ao esforço também é um outro fator a ser cuidadosamente analisado, haja vista que aquelas orientadas na direção da solicitação tendem a ser mais detrimental em comparação a outras com diferente orientação.

TABELA 2- CATEGORIAS DE DESCONTINUIDADES RELACIODADAS Á:

I- PROCESSO E PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM EMPREGADO	A) GEOMÉTRICO	Desalinhamento; Mordedura (undercut); Concavidade ou convexidade; Reforço excessivo; Reforço insuficiente; Ângulo de reforço insuficiente; Sobreposição (overlap); Penetração incompleta ou falta de penetração; Falta de fusão; Contração (shrinkage); Ondulações superficiais irregulares (surface irregularity-ripples); Perfuração na região de incidência do arco (burn through);
	B) OUTROS	Marcas de abertura de arco (arc strikes); Inclusão de escória (slag inclusions); Inclusão de tungstênio; Filmes óxidos; Salpico (spatter); Cratera do arco (arc crater); Defeito de esmerilhamento na solda (weld dressing).
II METALÚRGICO	A) TRINCAS OU FISSURAS	A quente ou de solidificação (hot cracks); A frio ou de hidrogênio (cold or delayed cracks); De reaquecimento; De alívio de tensões (stress-relief); De envelhecimento (strain-age).
	B) POROSIDADE	Esférica; Vermicular (worm-hole).
	C) ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA) – MODIFICAÇÕES ESTRUTURAIS	
	D) SEGREGAÇÕES NO METAL DE BASE E NA ZTA	

II METALÚRGICO	E) DEFEITO DE LAMINAÇÃO NO METAL DE BASE (base plate delamination)	
III DESENHO (PROJETO)	A) MODIFICAÇÕES NA SEÇÃO – CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO	
	B) TIPO DE JUNTA	

TABELA 2- Categorias de descontinuidades.

Fonte: Adaptado de Lundin (1984).

3.7.1 Significância das descontinuidades no campo da soldagem

Não se pode analisar de forma segura o nível de importância de uma determinada descontinuidade sem estabelecer quais os modos de falha estão sendo afetados pela mesma, pois exige a consideração de alguns parâmetros concernentes a temperatura, condição de serviço, estado de tensão e tempo. Para se obter uma análise segura, faz-se necessário um confronto entre o racional e a prática, conforme exemplos abaixo.

- a) Descontinuidades planares localizadas nas soldas externas do costado em regiões que sofrem efeitos de pressão hidrostática apresentam maior tendência de propagação de trincas.
- b) Descontinuidades não planares em regiões internas do costado que sofrem efeitos de pressão hidrostáticas apresentam maior tendência de perda de espessura por corrosão.
- c) Corrosão sob tensão pode servir como elemento nucleante de descontinuidades tanto no metal de solda quanto na ZTA;
- d) Fratura frágil apresenta uma ligação com o tipo de material, ou seja, os aços ferríticos são mais propensos a este mecanismo de fratura quando comparados com os aços inoxidáveis austeníticos, alumínio e ligas a base de níquel. Contudo, em determinadas condições estes materiais, podem apresentar fratura frágil quando sujeitos a uma modificação de ordem metalúrgica local;
- e) Fratura por fadiga apresenta uma relação com 90% dos casos de falha e muita das vezes precede a fratura frágil. Uma descontinuidade sob estado alternado

de tensão (ciclos de fadiga) pode iniciar uma trinca que se propagará sobre condição estável até atingir um instável crescimento (fratura);

- f) Descontinuidades planares tendem a ser mais nocivas ao processo de fadiga, por requererem um menor tempo de iniciação antes da propagação em comparação ao estado tridimensional;
- g) Fluência (creep) não é normalmente associada com descontinuidades em regiões soldadas uma vez que está em temperaturas elevadas (onde os materiais apresentam maior ductilidade). Cuidados especiais com relação a “creep failure” devem ser tomados quando da análise de falhas oriundas de reaquecimento e tratamento térmico para alívio de tensões, onde a fluência pode ser considerável.

3.8 Cálculo de resistência das soldas

Para melhor apresentar as relações entre os defeitos encontrados nas soldas com a resistência das mesmas, faz-se necessário apresentar os parâmetros e metodologias de cálculos de resistência das soldas.

3.8.1 Solda de filetes

Cálculo de resistência das soldas, segundo a NB-14.

Resistência de cálculo do metal de solda (R_n):

$$R_n = (0,6f_w) A_w; \phi = 0,75 \quad (1.2)$$

$$A_w = tL \quad (1.1)$$

Onde:

f_w – resistência nominal a ruptura por tração do eletrodo;

t – espessura da garganta efetiva;

ϕ - coeficiente de resistência;

A_w - área efetiva do cordão de solda

Cálculo da resistência do metal base:

$$R_n = (0,6f_y) A_{MB}; \phi = 0,9 \quad (1.3)$$

$$A_{MB} = sL \quad (1.4)$$

Onde:

f_y – limite de escoamento do aço, valor nominal especificado;

s – largura da perna;

ϕ - coeficiente de resistência;

A_{MB} - área do metal de base

O cálculo da resistência da solda por unidade de cordão de solda q' é dado abaixo.

$$\text{Sen } 45^\circ = \frac{t}{s} \rightarrow t = \frac{\sqrt{2}}{2} x s = \frac{2}{2\sqrt{2}} x s = \frac{s}{\sqrt{2}} = 0,707 x s \quad (1.5)$$

$$q' = (\phi Rn) / \Delta L \quad (1.6)$$

$$Rn = (0,6 x fw) Aw \quad (1.2)$$

$$Aw = t \Delta L \quad (1.1)$$

Com (1.1), (1.2) e (1.5) em (1.6)

$$q' = \phi \frac{0,6fw}{\Delta L} = \phi \frac{(0,6fw)t\Delta L}{\Delta L} = 0,75(0,6fw)s = 0,318 fw s \quad (1.7)$$

TABELA 3

RESISTÊNCIA DA SOLDA DE FILETE POR UNIDADE DE COMPRIMENTO

Eletrodo	fw (MPa)	q'(kN/mm) s= ΔL= 1mm	q'(kgf/mm) s= ΔL= 1mm
E60XX	415	0,1320	13,46
E70XX	485	0,1542	15,78
E80XX	550	0,1749	17,83

Fonte: Fonseca, 2005.

3.8.2 Soldas de entalhe

Penetração total – A espessura efetiva da garganta é a espessura da chapa de menor espessura.

Penetração parcial- A garganta corresponde a espessura do chanfro.

O comprimento efetivo da solda de entalhe é igual ao comprimento real, o qual deve ser igual à largura da parte ligada.

A área efetiva das soldas de entalhe, deve ser calculada como o produto do comprimento efetivo da solda pela espessura da garganta efetiva.

A garganta efetiva de uma solda de entalhe de penetração total deve ser tomada igual a menor das espessuras das partes soldadas.

O cálculo da resistência da solda de entalhe é dado na Tabela 4.

TABELA 4
RESISTÊNCIA DA SOLDA DE ENTALHE POR UNIDADE DE
COMPRIMENTO

Penetração da solda	Tipo de solicitação e orientação	Resistência de cálculo ϕ Rn
Total	Tração ou compressão paralelas ou eixo de solda	Mesma do metal-base
	Tração normal à seção efetiva da solda	$R_n = A_w f_w$; $\phi=0,9$ (1.9)
	Compressão normal à seção efetiva da solda	
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	O menor dos dois vetores: a) metal base: $R_n = 0,6 A_w f_w$; $\phi=0,9$ (1.10) b) metal da solda: $R_n = 0,6 A_w f_w$; $\phi=0,75$ (1.11)
Parcial	Tração ou compressão paralelas ou eixo de solda	Mesma do metal-base
	Tração ou compressão normais à seção efetiva da solda	O menor dos dois vetores: a) metal base: $R_n = A_w f_w$; $\phi=0,9$ (1.9) b) metal da solda: $R_n = 0,6 A_w f_w$; $\phi=0,75$ (1.11)
	Cisalhamento (soma vetorial) na seção efetiva	O menor dos dois vetores: a) metal base: $R_n = 0,6 A_w f_w$; $\phi=0,9$ (1.10) b) metal da solda: $R_n = 0,6 A_w f_w$; $\phi=0,75$ (1.11)

Fonte: Fonseca, 2005.

Alguns defeitos como: Poros, inclusão de escória, cratera, cordão de solda convexo e falta de penetração, influenciam diretamente nas dimensões da garganta efetiva da solda, tanto para soldas de entalhe quanto para soldas de filete.

Considerando um defeito de 1 mm de diâmetro no cordão de solda em uma chapa de 4,75 mm com 1,6 mm de nariz, temos:

$$R_n = 0,6(0,0016*(0,00475-0,001)*415\text{MPa}; \phi=0,75 \text{ (1.11)})$$

$$R_n=0,001494 \text{ KN/mm}$$

$$14,94 \text{ N/mm}$$

Para uma mesma solda com penetração total temos:

$$R_n = A_w f_w; \phi=0,9 \text{ (1.9)}$$

$$R_n = (0,0016 \cdot (0,00475) \cdot 415 \text{MPa})$$

$$R_n = 0,003154 \text{ KN/mm}$$

$$31,54 \text{ N/mm}$$

3.9 Acabamento e preparação para pintura

Após a correção das descontinuidades, as soldas devem ser totalmente limpas com escova rotativa de aço para remover presença de óxidos, respingos e qualquer impureza que possa prejudicar a aderência da tinta. Em seguida é feito o trinchamento das regiões soldadas com primer adequado.

4 REFERÊNCIAS NORMATIVAS

Para os reservatórios de água, a principal norma aplicável é a AISI/AWWA D-100-11 WELDED CARBON STEEL TANKS FOR WATER STORAGE (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Os tanques podem ser soldados por qualquer processo de soldagem que cumpra os requisitos de qualificação da ASME BPVC Sec. IX ou ANSI / AWS B2.1. A soldagem pode ser realizada manualmente, semiautomática ou automaticamente (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Cada especificação de procedimento de soldagem (EPS) deve ser qualificada de acordo com as regras da ASME BPVC Sec. IX, ou, alternativamente, para ANSI / AWS B2.1. Os testes dos procedimentos devem ser realizados para determinar que a soldagem proposta para a construção seja capaz de fornecer as propriedades necessárias para a sua aplicação pretendida (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

“Devem ser utilizados eletrodos de baixo teor de hidrogênio para todas as soldas manuais de arco metálico (SMAW) em anéis anulares e anéis do costado, incluindo a fixação do primeiro anel do costado a chapas inferiores ou anulares” (API-650-12ª EDIÇÃO-2013)

Depois que o eletrodo de baixo teor de hidrogênio foi removido da embalagem original, ele deve ser protegido ou armazenado de modo que suas características e propriedades de soldagem não sejam afetadas. Os eletrodos de baixo teor de hidrogênio devem ser mantidos de acordo com as recomendações de condicionamento de eletrodos

contidas em ANSI / AWS A5.1 ou ANSI / AWS A5.5, conforme o caso (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Não deve ser efetuado a soldagem quando as superfícies a serem soldadas estiverem úmidas ou durante períodos de ventos fortes. As superfícies a serem soldadas devem estar livres de lascas, escória, ferrugem pesada, graxa, óleo, tinta e qualquer outro material estranho. Também devem estar lisas, uniformes e livres de fendas, ondulações e outros defeitos que prejudiquem a soldagem adequada (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Todas as soldas do tanque e as fixações estruturais deverão ser feitas de forma a garantir a fusão completa com o metal de base, dentro dos limites especificados para cada junta e conforme as especificações do procedimento de soldagem (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

As juntas de topo sujeitas a tensões primárias, tais como as juntas longitudinais e juntas posicionadas abaixo dos pontos de apoio dos fundos suspensos de reservatórios elevados, assim como, juntas de topo sujeitas a tensões secundárias, tais como juntas circunferenciais, que possuem espessura menor ou igual a 9,5 mm deverão ser totalmente soldadas e ter penetração total da junta. (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Toda cratera deve ser removida até a seção transversal completa da solda. Cada cordão de solda de multipasses deverá ser limpo de escória e outros depósitos soltos antes da execução do próximo cordão de solda a ser aplicado (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

A espessura do reforço das soldas em todas as juntas de topo não deve exceder as espessuras indicadas na Tabela 5. O reforço não deve ser removido, exceto na medida em que exceda a espessura máxima aceitável ou quando necessário para inspeções radiográficas. Em nenhum caso, a face da solda poderá ficar abaixo da superfície das chapas que estão unidas (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

TABELA 5
ESPESSURA MÁXIMA PARA REFORÇO EM SOLDAS DE TOPO

Espessura da chapa	Espessura máxima de reforço			
	Juntas verticais		Juntas horizontais	
Pol. (mm)	Pol.	mm	Pol.	mm
$\leq 1/2''$ (13)	3/32''	2,4	1/8''	3,2
$> 1/2''$ (13) $\leq 1''$ (25)	1/8''	3,2	3/16''	4,8
$> 1''$ (25)	3/16''	4,8	1/4''	6,4

Fonte: AISI/AWWA D100-11, 2013, Table 20 p.74.

Para a soldagem das chapas do costado na posição vertical, a progressão de soldagem deve ser de cima para baixo para evitar distorções, ou de acordo com a direção especificada no processo de soldagem e utilizada para a qualificação do desempenho do soldador. As chapas do costado devem ser unidas pela soldagem das juntas em uma sequência que resulte na menor distorção causada pelo encolhimento da solda e que evite torções nas juntas longitudinais (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

As bordas adjacentes das juntas de topo devem ser precisamente alinhadas e mantidas na posição durante a soldagem, de modo que as tolerâncias sejam inferiores aos valores apresentados na Tabela 6, ou seja, 1,6 mm para as soldas transversais e 3.2 mm para as soldas circunferenciais para chapas inferiores a 16 mm de espessura (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

TABELA 6
DESALINHAMENTO MÁXIMO DA LINHA DE CENTRO DA JUNTA DE TOPO

Espessura máxima de reforço					
Espessura		Juntas verticais		Juntas horizontais	
Pol. (mm)	mm	mm	mm	Pol.	mm
$0 < t \leq 5/8''$	$0 < t \leq 16$	1/16''	1,6	1/8''	3,2
$t > 5/8''$	$t > 16$	Menor de 0,10t ou 1/4''	Menor de 0,10t ou 6	Menor de 0,20t ou 3/8''	Menor de 0,20t ou 9,5

* t = espessura nominal da placa mais fina na junta

Fonte: AISI/AWWA D100-11, Table 22 p.79.

A inclinação máxima da verticalidade do topo do costado em relação ao fundo não deve exceder 1/200 da altura total do costado (AISI/AWWA D-100-11, 2013).

Os máximos desvios locais da forma teórica permitidos, também chamados de deformações não lineares são definidos pela formula abaixo:

$$ex = 0,01Lx$$

$$Lx = 4\sqrt{Rxt}$$

Onde:

Lx = comprimento do calibre para medir a imperfeição local

Ex = desvio local da forma teórica

t = espessura

R = raio da superfície externa do costado, normal à chapa no ponto considerado e medido a partir da superfície exterior da chapa ao eixo de revolução.

Nota: Todas as unidades devem ser consideradas

A norma AWS D1.1/D1.1M:2010 STRUCTURAL WELDING CODE-STEEL especifica as tolerâncias máximas de 6 mm para abertura da raiz para juntas de topo duplamente soldadas, conforme Tabela 7 (AWS D.1/D1.1M:2010).

TABELA 7
DIMENSÕES E TOLERÂNCIAS PARA JUNTAS DE TOPO E CHANFROS
EM DUPLO V

Chanfro duplo V (3) Junta de topo (B)				Tolerâncias					
				Como desejado (veja 3.13.1)	preparado (veja 3.13.1)				
				R=±0	+6,-0				
				f= ±0	+2,-0				
				α=+10°, -0°	+10°, -5°				
Espaçamento	SAW	±0	+2,-0						
	SMAW	±0	+3,-0						
Todas medidas em mm									
Processo soldagem	Designação da junta	Espessura do metal de base (U= ilimitado)		Preparação do chanfro			Posições de soldagem permitidas	Gás de proteção para FCAW	Notas
		T1	T2	Abertura raiz	Abertura face	Ângulo chanfro			
SMAW	B-U3a	U	-	R=6	f=0 até 3	α = 45°	ALL	-	d, e, h, j
		espaçamento = 1/8"xR		R=10	f=0 até 3	α = 30°	F, V, OH	-	
SAW	B-U3a-S	U	-	R=12	f=0 até 3	α = 20°	F, V, OH	-	d,h,j
		espaçamento = 1/4"xR		R=16	f=0 até 6	α = 20°	F	-	

Fonte: AWS D1.1/D1.1M:2010, 2013, p. 108.

5 ANÁLISES DE CAMPO

As análises apresentadas nesse trabalho foram feitas em reservatórios construídos em canteiros de obras e em fábricas.

Percebe-se que a maioria dos fabricantes não disponibilizam de profissionais qualificados em soldagem para acompanhar os processos e avaliar a qualidade das soldas, ficando esta função a cargo do soldador. Além disso, alguns fabricantes terceirizam a montagem e soldagem em campo, sendo estes, remunerados por metro de solda produzida. Como resultado, encontra-se nessas inspeções um grande número de defeitos em soldas, deformações e falhas de montagem.

Afirma-se que algumas discontinuidades estão diretamente relacionadas com as condições de soldagem em campo, por sofrer interferências de correntes de ar, humidade, temperatura e condicionamento inadequado dos consumíveis.

Para os reservatórios construídos em canteiros de obras geralmente são utilizados o processo SMAW com uso de eletrodos E7018 devido sua versatilidade e facilidade de operação, contudo alguns cuidados devem ser tomados no armazenamento e condições de operação para se obter soldas de qualidade.

A classificação AWS para eletrodos revestido é demonstrada na Figura 18.

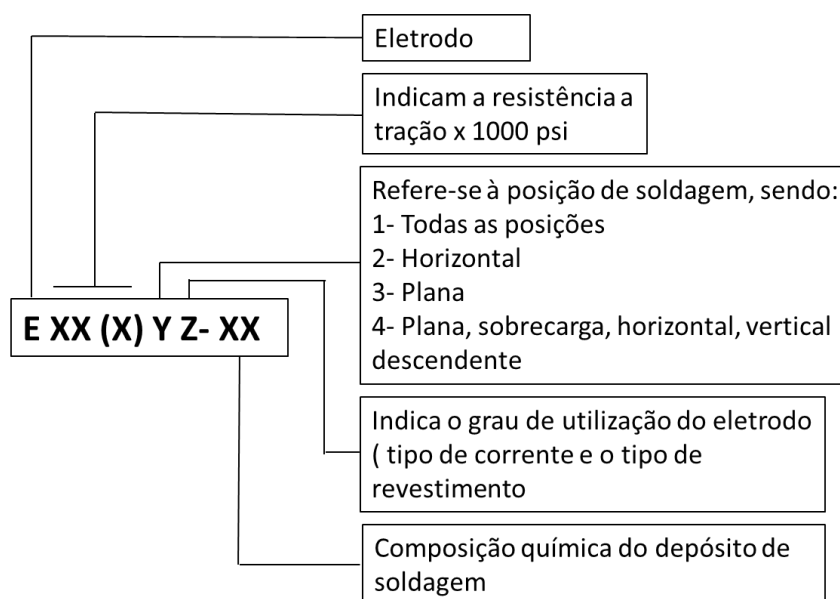


Figura 18- Classificação AWS para eletrodos revestidos: Fonte:

Fonte: http://www.esab.com.br/pt/education/blog/processo_soldagem_eletrodo_revestido_mma_smaw.cfm

Sendo assim, para o eletrodo utilizado E7018 temos:

- Um eletrodo (letra E);
- Um limite de resistência mínimo de 70 ksi (70) ou 485 MPa;
- Soldabilidade em todas as posições (1);
- Básico ou baixo hidrogênio com adição de pó de ferro (8);

As condições adequadas de armazenagem e utilização são disponibilizadas pelos fabricantes de eletrodos.

“Os eletrodos de classificação E7018 são de baixo hidrogênio com adição de pó de ferro. A quantidade considerável de pó de ferro no revestimento e também uma quantidade de revestimento bem maior permitem que esses eletrodos sejam aplicados sob correntes de soldagem mais altas que as empregadas com os eletrodos E7016. O arco mais suave e a facilidade de soldagem do eletrodo E7018 tornam-no o favorito dos soldadores. Correntes

de soldagem relativamente mais altas e adições de pó de ferro fundindo no metal de solda resultam em maiores taxas e eficiências de deposição. O eletrodo básico E7018 deposita o metal de solda de melhor qualidade para a soldagem de aços de baixo carbono. Sua maior desvantagem é que ele precisa ser mantido seco. Eletrodos que absorveram umidade devido à exposição à atmosfera ou a outras fontes de umidade depositam metal de solda com porosidade. Além disso, os eletrodos E7018 não devem ser aplicados na soldagem de passes de raiz em juntas de topo com abertura para não se correr o risco de porosidade excessiva. Quando os eletrodos E7018 tiverem que ser empregados em passes de raiz de juntas de topo, a raiz deve ser selada por um cobre-juntas” (ESAB, 2005, p.15).

Os eletrodos básicos de baixo teor de hidrogênio, que contemplam o eletrodo E7018 são muito higroscópicos e necessitam de alguns cuidados para que suas características não sejam afetadas. A umidade nestes eletrodos poderá ocasionar vários defeitos nas soldas, como, porosidade no início ou em todo o cordão de solda, trincas ao lado e sob o cordão, porosidade vermiforme, arco instável, respingos abundantes e acabamento ruim.

Recomenda-se que as embalagens sejam armazenadas sobre paletes para evitar danos e choques que possam comprometer a estanqueidade da embalagem. Deve-se ter cuidado especial no armazenamento como controlar a temperatura e umidade relativa do ar, da mesma forma, para não danificar as pontas de arco e a abertura da embalagem, o armazenamento deverá ser feito pelo lado da ponta de pega. As condições recomendadas de armazenamento para os eletrodos E7018, são de umidade relativa máxima de 70% e temperatura de 18 a 50°C.

Após a abertura da embalagem os eletrodos devem ser condicionados em estufas fixas em temperaturas de 100°C a 150°C e durante as operações de soldagem em estufas portáteis ou cochicho em temperaturas de 80°C a 150°C.

O armazenamento e condicionamento inadequado dos eletrodos é uma das não conformidades mais identificadas em vistorias nos canteiros de obras, pois são identificados estufas desligadas ou falta delas, embalagens abertas e consumíveis de baixa qualidade. O condicionamento adequado dos eletrodos e temperatura de operação são requisitos básicos e fundamentais para se obter soldas de qualidade.

Nas Figuras 19 e 20 nota-se que várias embalagens estão abertas propiciando a umidificação dos eletrodos. Nota-se também embalagens de vários fabricantes que afeta diretamente a técnica operatória do soldador.

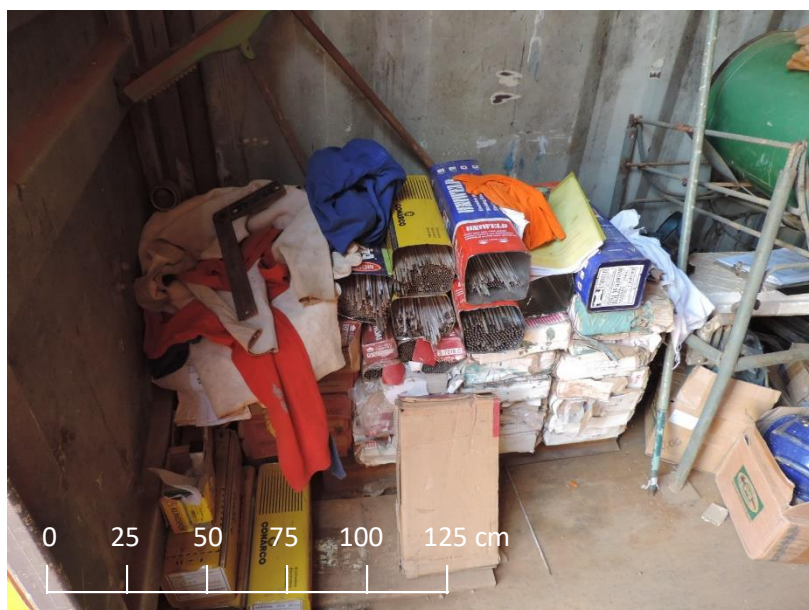


FIGURA 19: Armazenamento inadequado de eletrodos.

Fonte: Próprio autor.

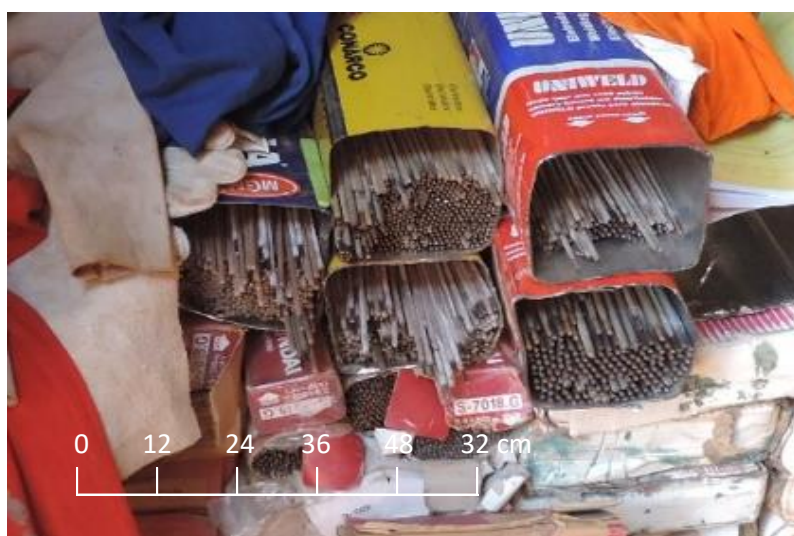


FIGURA 20: Armazenamento inadequado de eletrodos.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 21 demonstra-se a forma correta de armazenagem dos eletrodos em estufa aquecida a 130° C, após a abertura da embalagem.



FIGURA 21: Armazenamento correto de eletrodos.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22 nota-se que o soldador condiciona os eletrodos no bolso submetendo os mesmos a umidade do seu próprio suor. Na Figura 23 nota-se os eletrodos condicionados em embalagem aberta sem controle da temperatura de operação.



FIGURA 22: Condicionamento inadequado de eletrodos.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 23: Condicionamento inadequado de eletrodos.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 24, evidencia-se o condicionamento correto dos eletrodos em estufas portáteis aquecidas a aproximadamente 100°C e recipientes para descarte das pontas dos eletrodos.



FIGURA 24: Condicionamento adequado dos eletrodos.

Fonte: Próprio autor.

Estão apresentados a seguir os reservatórios que foram acompanhados em campo, com a exposição das etapas de montagem, soldagem e acabamento final.

Na Figura 25 há a fase de montagem de um reservatório elevado de 8,6 m de diâmetro e 23 m de altura, utilizado para armazenamento de um volume de armazenamento total de 942 m³ de água potável para um conjunto residencial, sendo dividido em 560 m³ sobre apoiado sobre o fundo apoiado, 191,2 m³ sobre o fundo elevado intermediário e 191,2 m³ sobre o fundo elevado superior.



FIGURA 25: Montagem do reservatório elevado construído em campo- RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 26 apresenta a fase de soldagem externa do costado. Mais adiante apresentaremos algumas descontinuidades identificadas durante esta fase.

Durante as vistorias em obra, foram identificadas falhas no armazenamento dos eletrodos, falta de limpeza nos chanfros, eletrodos sem pré aquecimento, desalinhamento excessivo em algumas chapas, abertura excessiva de raiz em alguns chanfros, que resultaram em grande concentração de descontinuidades, tais como: falta de fusão, poros, deformações excessivas em chapas, inclusões de escória, mordeduras, etc.

Foram efetuadas as correções necessárias nas soldas, contudo algumas descontinuidades, tais como deformações em chapas do costado não permitem uma correção eficiente da forma após soldado, caracterizando um vício ao produto. Sendo importante tomar medidas preventivas durante as fases de montagem e soldagem para evitar tais descontinuidades.



FIGURA 26: Soldagem do reservatório - RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 27 demonstra-se o estado final do reservatório após a pintura e montagem da tubulação.



FIGURA 27: Acabamento final -RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 28 evidencia-se a fase de montagem do reservatório apoiado de 22,9 m de diâmetro e 10,2 metros de altura, utilizado para armazenamento de um volume de 3.800 m³ de água potável para um conjunto residencial, apoiado sobre o fundo apoiado.



FIGURA 28: Montagem do reservatório apoiado de 3.878 m³ (RESERVATÓRIO APOIADO 2).

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 29 demonstra-se a fase de soldagem externa do costado. As soldas foram inspecionadas através de ensaios visuais, com líquido penetrante e com equipamento de ultrassom. Foram identificadas falta de limpeza nos chanfros e entre passes, eletrodos sem pré-aquecimento e soldagem em períodos de ventos fortes e com humidade elevada, que resultaram em descontinuidades, tais como: inclusão de escória, falta de fusão, poros e mordeduras. Foi possível efetuar medidas corretivas para correção de todas as descontinuidades identificadas nos ensaios.



FIGURA 29: Soldagem do reservatório apoiado de 3.878 m³ - RESERVATÓRIO APOAIDO 2).

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 30 demonstra-se o estado final do reservatório após a pintura e montagem da tubulação.



FIGURA 30: Reservatório apoiado de 3.878 m³ - RESERVATÓRIO APOAIDO 2.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 31 representa a fase de montagem do reservatório apoiado de 21 m de diâmetro e 6 metros de altura, utilizado para armazenamento de um volume de 1.200 m³ de água potável para um conjunto residencial, apoiado sobre o fundo apoiado.



FIGURA 31: Montagem do reservatório apoiado de 1.200 m³ - RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 32 demonstra-se a fase de soldagem externa do costado. Mais adiante apresentaremos algumas discontinuidades identificadas durante esta fase.

Durante as vistorias em obra, foram identificadas falhas no armazenamento dos eletrodos, falta de limpeza nos chanfros, eletrodos sem pré-aquecimento, desalinhamento excessivo em algumas chapas, abertura excessiva de raiz em alguns chanfros e utilização de chapas finas que resultaram em grande concentração de descontinuidades, tais como: falta de fusão, poros, deformações excessivas em chapas, inclusões de escória, mordeduras, etc.

Foram efetuadas as correções necessárias nas soldas, contudo algumas descontinuidades, tais como deformações em chapas do costado somente foram minimizadas com a utilização de um argolão de reforço no centro do costado para corrigir a circularidade do mesmo.

Salienta-se a importância de tomar medidas preventivas durante as fases de montagem e soldagem para evitar tais descontinuidades.



FIGURA 32: Soldagem do reservatório apoiado de 1.200 m³ - RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 33 demonstra-se o estado final do reservatório após a pintura e montagem da tubulação e com o argolão de reforço ao centro do costado.



FIGURA 33: Reservatório apoiado de 1.200 m³ (RESERVATÓRIO APOIADO 3.
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 34 demonstra-se uma perícia técnica efetuada em reservatório elevado de 8,5 m de diâmetro e 36,2 metros de altura, destinado para armazenamento de um volume de 1.200 m³ de água potável para um aeroporto, divididos em 8 fundos elevados, que sofreu deformações não lineares em algumas chapas do costado durante o teste de carga.



FIGURA 34: Reservatório apoiado de 1.070 m³ RESERVATÓRIO ELEVADO 4.

Fonte: Próprio autor.

Para os reservatórios metálicos com diâmetro inferior a 3,82 metros a construção é efetuada em fábricas e geralmente usam-se o processo GMAW devido alta produtividade e facilidade de operação, contudo, necessitam de uma atenção especial em relação a qualidade do arame, qualidade do gás de proteção, limpeza adequada da junta, abertura de chanfro, controle da ventilação, controle da corrente adequada para soldagem, equipamento em bom estado de conservação, nivelamento do piso e limpeza, tais como tochas, fonte, reguladores de pressão, manômetro e indicador.

Percebe-se que muitos fabricantes não possuem condições adequadas para execuções de montagens e soldagem de qualidade. É visto produção em galpões com telhados furados ou abertos nas laterais; pisos desnivelados e sem concreto; equipamentos sem manutenções adequadas; profissionais sem qualificação; utilização de consumíveis de baixa qualidade e falta de acompanhamentos dos processos de fabricação. As principais discontinuidades associadas a condição de fabricação em galpões estão

relacionadas a desalinhamento entre chapas, poros, falta de fusão, trincas, falta de preenchimento e deformações.

Abaixo são apresentados exemplos de reservatórios construídos em fábrica, onde a montagem e a soldagem foram efetuadas na posição horizontal do reservatório. Uma atenção especial deve ser tomada durante a etapa de montagem dos anéis, pois é comum a ovalização do mesmo durante esse processo. Diante disso, deve-se ter cuidado para o alinhamento correto das chapas, garantindo que o mesmo não exceda 10% da menor espessura das chapas.

Será demonstrado a seguir, as diferentes realidades de infraestrutura que os fabricantes deste tipo de reservatório dispõem, desde fábricas com galpões fechados, pisos nivelados e concretados, galpões exclusivos para a pintura, fontes de soldagem novas, tochas de soldagem revisadas e limpas, pontes rolantes para manuseio dos anéis e montagem do reservatório, calandras automatizadas, mesa de corte a plasma automatizadas para esquadramento das chapas e equipamentos automatizados para jateamento e aplicação de primer. Em um outro cenário, existem fábricas sem fechamento lateral do galpão, com telhados quebrados, fontes de soldagens velhas e sem manutenção, tochas com emendas e bocais danificados, esquadramento manual com oxicorte, pisos desnivelados de britas ou terra, calandras manuais ou com folgas nos cilindros, empilhadeiras e talhas para o manuseio dos anéis e montagem do reservatório.

Conforme demonstrado nas Figuras 35, 36, 37 e 38, os fabricantes dos reservatórios elevados 5 e 6 não possuem fechamento adequado do galpão propiciando a passagem de correntes de ar e “goteiras” em dias chuvosos que favorecem a formação de oxidação nas juntas durante a montagem e de poros e falta de fusão durante a soldagem. A pintura do reservatório é efetuada no mesmo galpão da montagem e da soldagem, sem a devida exaustão dos gases. Além disso, o piso do fabricante do reservatório elevado 5 não possui nivelamento adequado, nem concreto, o que dificulta o alinhamento correto dos anéis, bem como a contaminação da junta com impurezas.



FIGURA 35: Reservatório elevado montado em fábrica-RESERVATÓRIO ELEVADO 5.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 36: Reservatório elevado montado em fábrica- RESERVATÓRIO ELEVADO 5.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 37: Reservatório elevado montado em fábrica- RESERVATÓRIO ELEVADO 6.
Fonte: Próprio autor.



FIGURA 38: Reservatório elevado montado em fábrica- RESERVATÓRIO ELEVADO 6.
Fonte: Próprio autor.

O fabricante do reservatório elevado 7 possui galpões fechados com pisos nivelados e concretados destinados exclusivamente para jateamento, outro para montagem e soldagem e outro para a pintura devidamente vedado, com exaustores e filtros (FIGURAS 39 e 40). Também possuem pontes rolantes para movimentação dos anéis e pórtico para montagem vertical do reservatório, que favorecem um melhor alinhamento dos anéis.



FIGURA 39: Reservatório elevado montado em fábrica- RESERVATÓRIO ELEVADO 7.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 40: Reservatório elevado montado em fábrica- RESERVATÓRIO ELEVADO 7.

Fonte: Próprio autor.

4.1 Principais descontinuidades encontradas nos reservatórios avaliados

As principais descontinuidades encontradas em reservatórios fabricados em obras e em fábricas são:

- a) *Falta de preenchimento de solda;*
- b) *Inclusão de escória*

- c) Poros;
- d) Mordeduras
- e) Falta de fusão;
- f) Desalinhamento entre chapas;
- g) Deformações nas chapas

a) Falta de preenchimento de solda

A falta de preenchimento ou falta de solda, ocasionam a formação de uma região onde a espessura da solda (garganta efetiva) é inferior à espessura da chapa e gera um grande concentrador de tensão que poderá favorecer o surgimento de trincas e uma possível ruptura do cordão de solda. Geralmente estão localizadas em emendas de soldas, cruzamentos ou regiões onde não foram depositados cordões de solda.

Esta descontinuidade pode ser evitada através da aplicação correta dos procedimentos limpeza e preparação de uma “unha” entre continuidades de cordões de solda e não interrupções nos cordões, para remoção total da cratera no fim do cordão. Tais descontinuidades são identificadas por meio de ensaios visuais dos cordões de solda ou ensaios com líquido penetrante.

Nas Figuras 41 e 42 demonstra-se falta de preenchimento identificada no reservatório apoiado 3, que posteriormente foi corrigida através de esmerilhamento abrasivo mecânico até a raiz da solda externa, formação de uma “unha”, seguido de preenchimento total com cordão de solda.

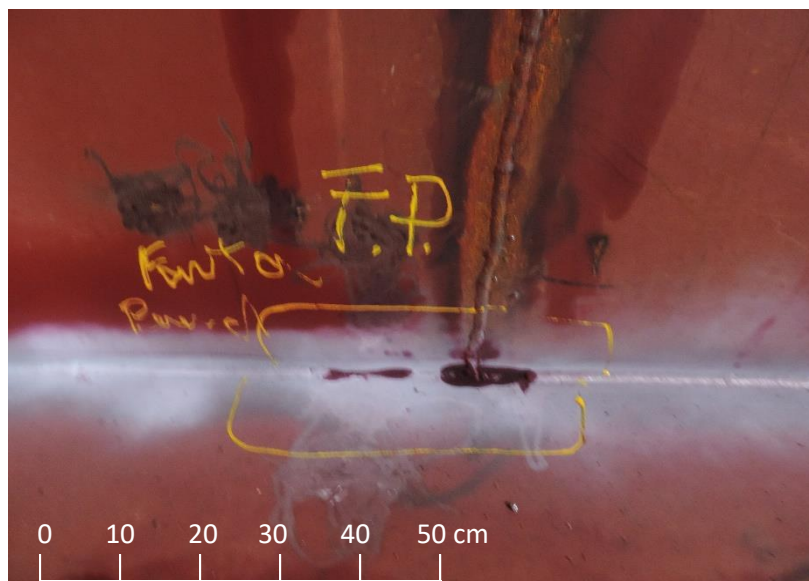


FIGURA 41: Falta de preenchimento de soldas identificada no RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

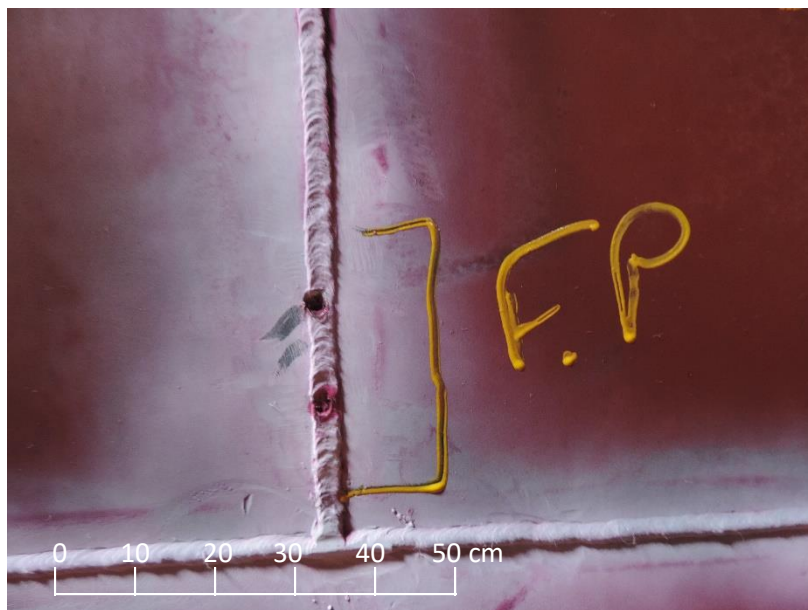


FIGURA 42: Falta de preenchimento de soldas identificada no RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

b) Inclusões de escórias

Estas discontinuidades são originadas no metal de solda em função do aprisionamento de material metálico (inclusão de tungstênio na soldagem TIG) e não metálico retido na zona fundida.

A inclusão de escória ou formação de vazios no interior do cordão de solda atuam como redutores de área útil resistente e como concentradores de tensões e podem ser identificadas com o uso de aparelho de ultrassom ou por ensaios com partículas magnéticas. Mesmo antes da aplicação desses métodos é possível identificar as causas, conforme Figuras 44 e 45.

As causas geralmente estão associadas a falta de limpeza da região a ser soldada ou entre passes, falta de remoção da escória entre passes, aporte térmico abaixo do necessário para fundir toda a escória, manipulação inadequada do eletrodo, projeto do chanfro inadequado e falta de remoção da raiz da solda.

Esta discontinuidade pode ser evitada por meio de limpeza total de óxidos, graxas, de toda junta a ser soldada, remoção de toda escória, soldagem com eletrodos aquecidos e limpeza entre passes. Pode ser identificada utilizando-se ensaios visuais nos chanfros antes da execução das soldas, ensaios com líquido penetrante na raiz e soldagem com eletrodos na temperatura adequada.

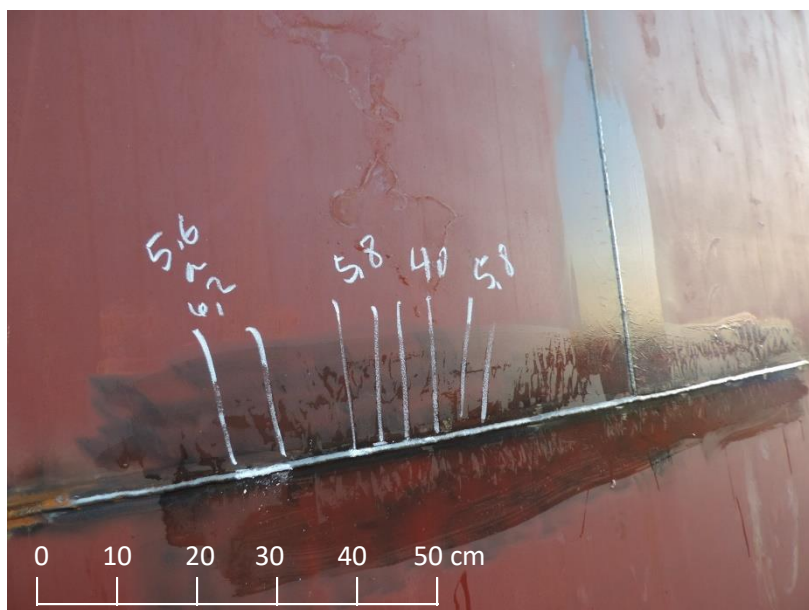


FIGURA 43: Inclusão de escória ou vazios no interior do cordão identificados no RESERVATÓRIO APOIADO 2.

Fonte: Próprio autor.

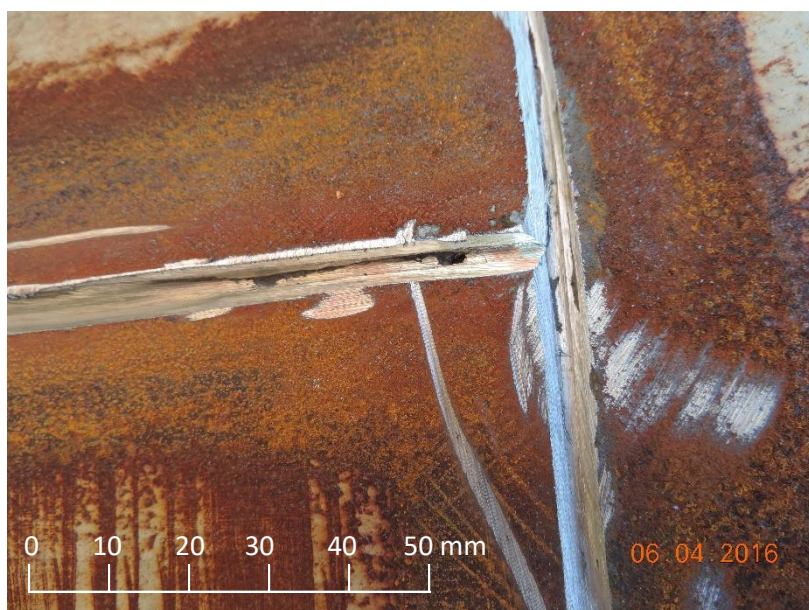


FIGURA 44: Presença de escória na raiz da solda identificado no RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

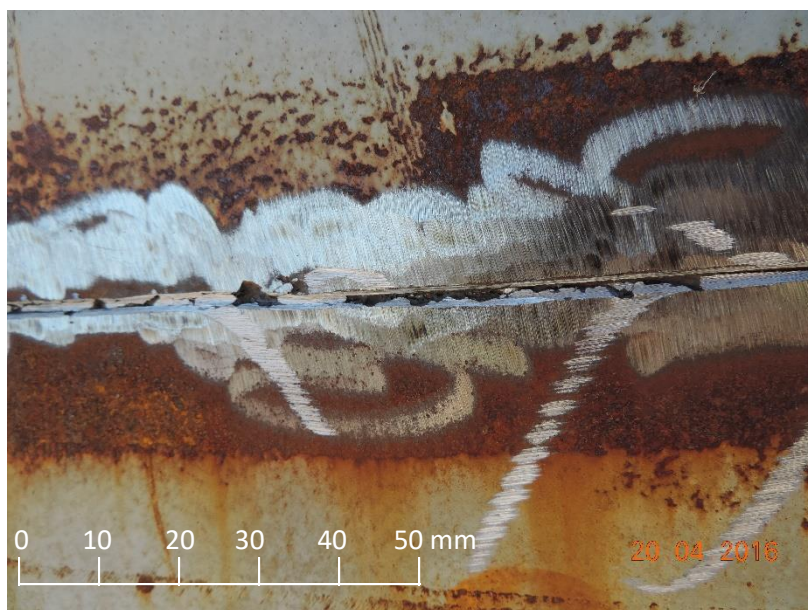


FIGURA 45: Presença de escória na raiz da solda identificado no RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

c) Poros

Poros nos cordões de solda propiciam a formação de um concentrador de tensão que pode favorecer o surgimento de trincas e uma possível ruptura do cordão de solda. Por se tratar de uma das discontinuidades mais identificadas nas soldas dos reservatórios em trabalhos de campo, serão abordados os fenômenos que os envolve.

Os poros são gerados por gases aprisionados durante a solidificação do metal de solda e formam discontinuidades não planares. Estão associados ao processo metalúrgico da poça de fusão e associados aos parâmetros de soldagem e limpeza da junta.

Um dos fatores que influenciam a formação de poros é a utilização de correntes elevadas. Estas aumentam a penetração e eleva a temperatura da poça de fusão que ocasiona aumento da solubilidade do oxigênio e outros gases na poça. Como a solubilidade dos elementos formadores de gases é menor no metal sólido, durante o resfriamento e solidificação da poça de fusão, estes são expulsos do metal líquido a frente da interface de solidificação em formas de bolhas de gás, podendo ficar aprisionados no metal solidificado formando poros. A alta penetração também favorece o aprisionamento dos gases, uma vez que aumenta a distância que os gases deverão percorrer na poça de fusão, podendo inclusive gerar inclusões de gases no interior do cordão de solda (WARREN, 1952).

Outro fator associado a formação de poros é o aumento da tensão, ocasionado pelo aumento do comprimento do arco. Este fator gera uma maior área da superfície da poça de fusão, o que aumenta a área susceptível a absorção dos gases, necessitando de uma proteção gasosa eficiente para evitar a formação de poros (MARQUES, 1991).

O controle da velocidade de soldagem influencia na redução da porosidade, pois reduz o tempo disponível para absorção de gases. A velocidade de soldagem elevada tende a formação de poros refinados, enquanto em velocidades baixas, os poros tendem a coalescer tornando-se grosseiros. Contudo, a distribuição e tamanho dos poros está relacionada ao tempo disponível para nucleação e crescimento durante a solidificação da poça de fusão (WOODS, 1974).

Corrente, tensão e velocidade de soldagem individualmente afetam a formação de porosidade, contudo, em conjunto, estes fatores influenciam diretamente na energia nominal de soldagem. Estes fatores estão associados a quantidade de calor imposta durante a soldagem que é denominado energia nominal de soldagem, representada pela energia fornecida pelo arco por comprimento de solda. Quanto maior a energia nominal, maior será o tempo disponível para os gases serem expulsos para a atmosfera. Diante disso, o aumento da tensão e da corrente e a redução da velocidade de soldagem aumentam a energia nominal de soldagem e favorecem a redução de poros (TREVISAN; MAIA, 2007).

Os poros podem ser detectados através de ensaios visuais dos cordões de solda ou ensaios com líquido penetrante para os poros superficiais e com ultrassom e partículas magnéticas para poros internos, tratados também como inclusões (FIGURAS 46, 47, 48, 49).

Além das questões metalúrgicas abordadas anteriormente, uma das principais causas para favorecimento da formação de poros está diretamente relacionada com limpeza da junta e proteção da poça de fusão. Percebe-se que nas emendas de cordões de solda há grande incidência de poros, tal fato se relaciona a não remoção da cratera e não formação de “unha” antes de iniciar o próximo cordão, assim como a execução de soldas sobre regiões oxidadas ou com presença de tintas nos chanfros das chapas.

É de suma importância para evitar formação de gases, a limpeza adequada da junta a ser soldada, removendo toda oxidação, tintas e umidade; temperatura adequada dos eletrodos com uso de estufas e cochichos para processos SMAW; vazão adequada do gás de proteção para processo GMAW e uso de barreiras contra a ação do vento para processos GMAW.

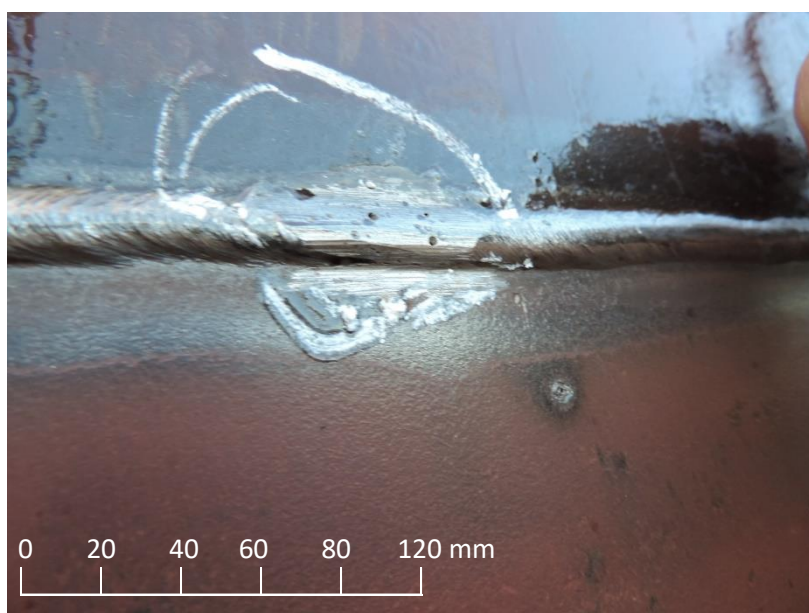


FIGURA 46: Poros em emenda de cordão identificado no RESERVATÓRIO ELEVADO 3.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 47: Poros em emenda de cordão identificados no RESERVATÓRIO ELEVADO 3.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 48: Poros por oxidação identificados no RESERVATÓRIO ELEVADO 6.

Fonte: Próprio autor.

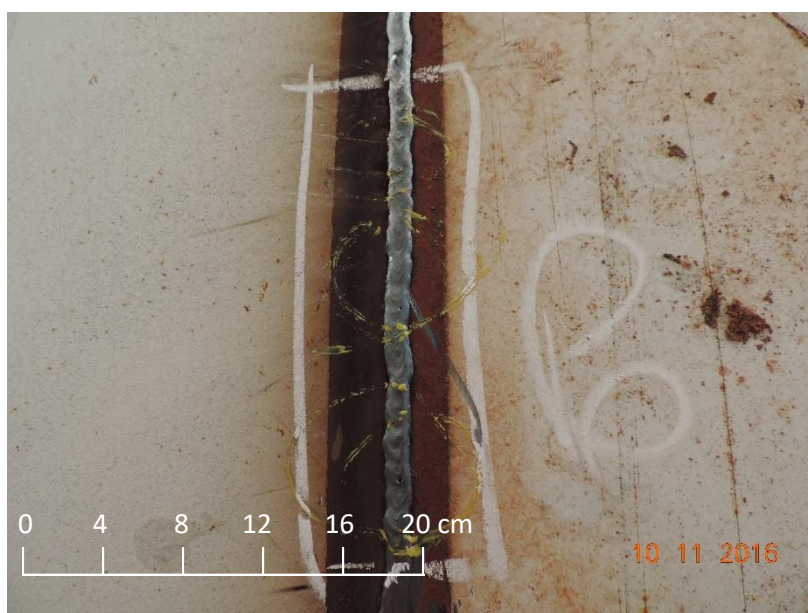


FIGURA 49: Poros por oxidação- RESERVATÓRIO ELEVADO 6.

Fonte: Próprio autor.

d) *Mordeduras*

Mordeduras são discontinuidades em forma de depressões ou entalhes entre o cordão de solda e o metal de base que geram um enfraquecimento da resistência da solda devido a perda de seção e podem ser agravadas quando submetidas a esforços cíclicos. São consideradas como um grave concentrador de tensões e geralmente são ocasionadas

pelo uso de correntes elevadas, velocidade de soldagem elevada, comprimento do arco, manipulação inadequada do eletrodo ou tocha e por sopro magnético.

Em trabalhos de campo percebe-se que geralmente os soldadores não preparam as juntas conforme especificados pelas EPS, ou seja, efetuam as soldas em juntas sem abertura adequada entre as chapas e chanfros sem entalhes ou com ângulo inferior ao especificado. Diante disso, para que se obtenha penetração da solda, os soldadores as operam com correntes muito elevadas e com limpeza inadequada do chanfro o que pode contribuir para surgimento de outras discontinuidades (FIGURAS 50, 51).



FIGURA 50: Mordeduras identificadas no RESERVATÓRIO ELEVADO 2.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 51: Mordeduras identificadas no RESERVATÓRIO ELEVADO 2.

Fonte: Próprio autor.

e) Falta de fusão

Esta descontinuidade caracteriza-se por falta de fusão localizada, ou seja, uma descontinuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base ou entre cordões adjacentes. A falta de fusão atua como um concentrador de tensão severo, podendo facilitar a nucleação e propagação de trincas. Além disso, pode reduzir a seção efetiva da junta.

Está relacionada com a mobilidade do metal depositado e com presença de impurezas. Pode ser detectada através de ensaios visuais dos cordões de solda, ensaios com líquido penetrante, ensaios de partículas magnéticas e com aparelho de ultrassom. As causas para formação de falta de fusão estão diretamente relacionadas à limpeza inadequada da junta (presença de óxidos, tintas e óleos), aporte térmico baixo, manipulação incorreta do eletrodo ou tocha (FIGURAS 52, 53).

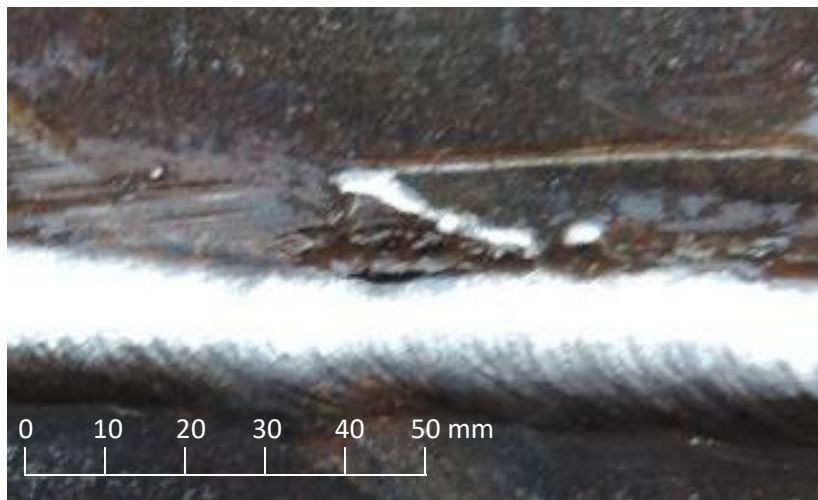


FIGURA 52: Falta de fusão- RESERVATÓRIO APOIADO 2.

Fonte: Próprio autor.

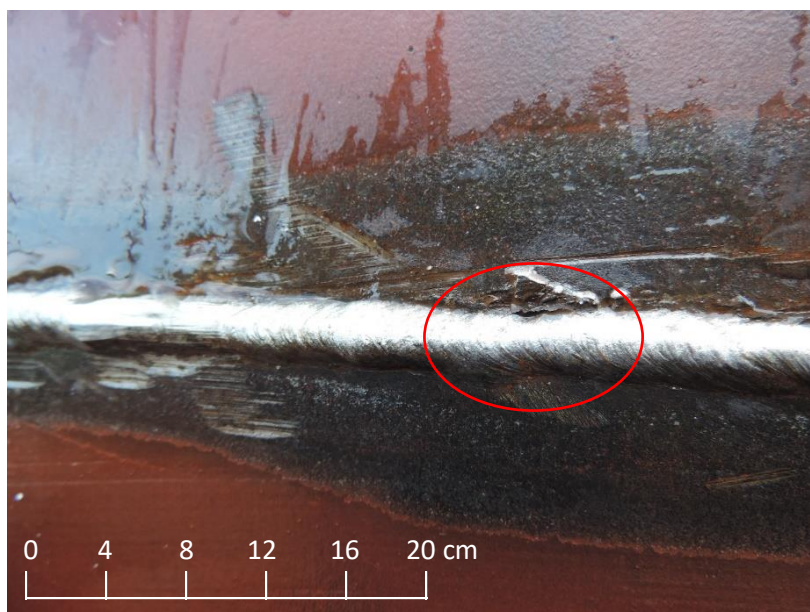


FIGURA 53: Falta de fusão- RESERVATÓRIO APOIADO 2.

Fonte: Próprio autor.

f) Deformações na chapa

Deformações nas chapas e desalinhamentos entre chapas propiciam a formação de regiões fragilizadas que podem favorecer a flambagem não liner da chapa e consequentemente a redução da capacidade de carga pelo efeito de casca. Esta patologia pode ser detectada durante a soldagem ou posterior, através de ensaios visuais da região soldada. As causas para formação de deformações nas chapas estão diretamente relacionadas com o alinhamento entre as chapas e abertura excessiva do chanfro. A deformação também pode ser ocasionada após o carregamento devido as tensões de compressão ou pós soldagem pelo aporte térmico gerado durante a soldagem.

Esta patologia pode ser evitada adotando medidas, tais como: Uso de chapas não inferiores a 6,35 mm onde se tem considerável resistência a carregamento compressivo; alinhamento entre as chapas, com desalinhamento aceitável de 10% da espessura da chapa mais fina; utilização de abertura de chanfros não superior a 6 mm e uso de corrente adequada de soldagem (FIGURAS 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62).



FIGURA 54: Deformações nas chapas após carregamento identificadas no TANQUE ELEVADO 4.

Fonte: Próprio autor.

$$e \leq 0,2 t$$

$$e \leq 3 \text{ mm}$$

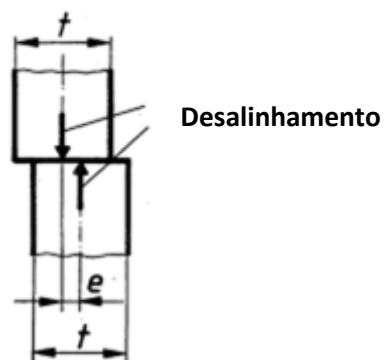


FIGURA 55: Tolerância de desalinhamento.

Fonte: Ilustração retirada da DIN 18800.



FIGURA 56: Desalinhamento entre chapas identificada no RESERVATORIO ELEVADO 5.

Fonte: Próprio autor.

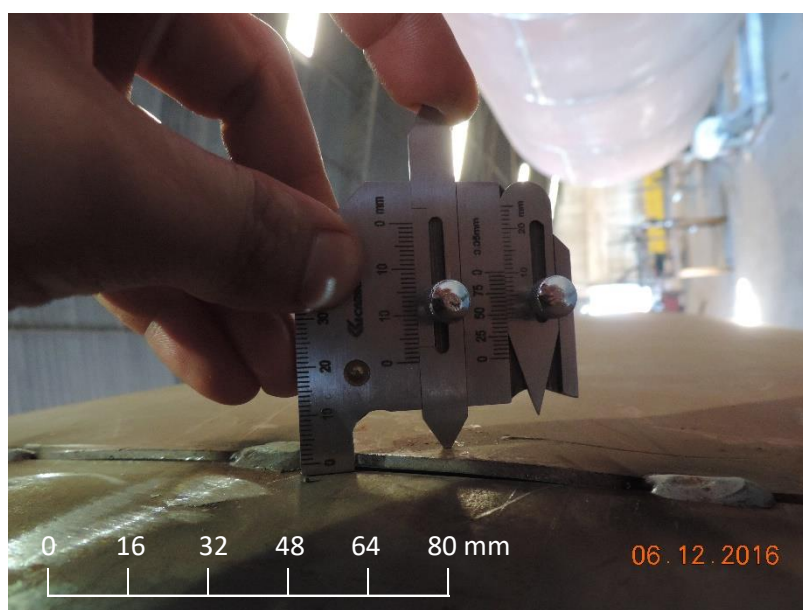


FIGURA 57: Desalinhamento de 3 mm entre chapas identificada no RESERVATÓRIO ELEVADO 5.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 58: Abertura de 7 mm na junta identificada no TANQUE ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 59: Abertura de 7 mm na junta identificada no RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.

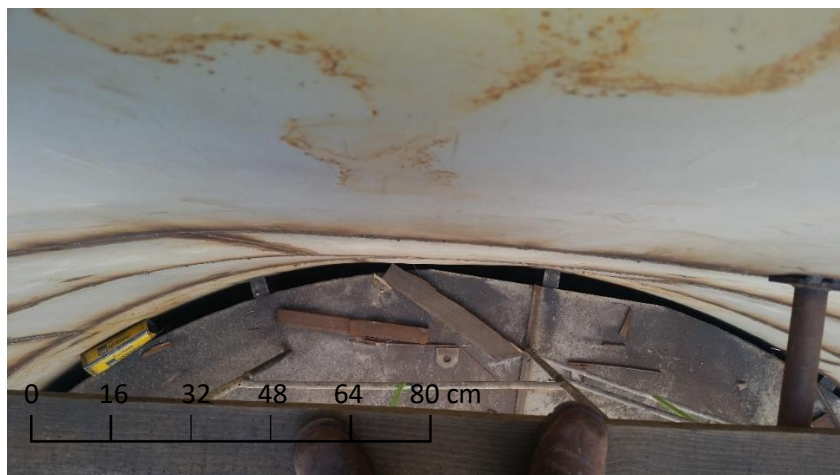


FIGURA 60: Deformações por contrações da solda identificada no RESERVATÓRIO ELEVADO 1.

Fonte: Próprio autor.



FIGURA 61: Deformações por contrações da solda identificada no RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

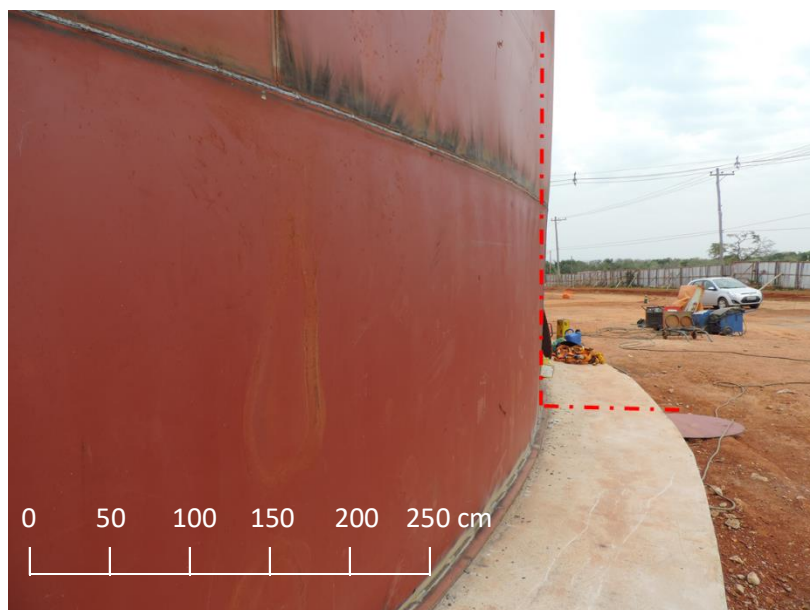


FIGURA 62: Deformações por contrações da solda identificada no RESERVATÓRIO APOIADO 3.

Fonte: Próprio autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As descontinuidades em soldas ou falha de montagem identificadas em campo influenciam diretamente a confiabilidade e estabilidade estrutural do equipamento durante sua vida útil, podendo ser eliminados ou minimizados através de um acompanhamento técnico efetivo.

A importância para a qualidade das soldas, do projeto e da montagem estão relacionadas à segurança das comunidades que vivem nas vizinhanças destes equipamentos e carecem de um maior controle dos órgãos fiscalizadores, afim de garantir que os mesmos sejam acompanhados por engenheiros e técnicos qualificados para tal função.

Este trabalho poderá servir como base para estudos do efeito da perda de espessura por corrosão em chapas de reservatórios metálicos e para análise dos efeitos das deformações em chapas de reservatórios metálicos.

REFERENCIAS

AISI/AWWA D-100-11. Welded carbon steel tanks for wather storege. American Water Works Association (AWWA), 2013.

Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz Bracarense -**Soldagem: fundamentos e tecnologia**- 2009, 3ª edição atualizada.

BARRA, S. R.; PEREIRA, A. S. **Descontinuidades em soldagem**. Trabalho de Pesquisa do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NB14 Projeto e Execução de Estruturas de Aço de Edifícios (Método dos Estados Limites)**. Brasília, 1986.

ESAB. **Apostila de eletrodos revestidos**, 2005. Acesso em: 09 dez 2016. Disponível em: www.esab.com.br

GERMAN. **DIN 18800-1:2008-11**. Steel structures- Part 1: Design and construction, 2008.

FONSECA, A.C.da F. **Estruturas Metálicas**. São Paulo, editora Edgard Blucher, 2ª Edição, 2005.

LUNDIN, C. D. **Fundamentals of Weld Descontinuities and Their Significance**. New York: Welding Research Council, 1984.

MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem**. Belo Horizonte, O Lutador - ESAB, 1ª ed., 1991.

MARTINS, G. DE P.; RABELLO, E. G.; CIMINI JR. C. A.; GODEFROID, L. B. Efeito da falta de penetração em juntas soldadas na resistência à propagação de trinca de fadiga

em aço resistente à corrosão atmosférica. **International Nuclear Atlantic Conference-INAC**, 2005.

PEREIRA, J. C.V. **Reservatórios em material compósito**. Dissertação da Universidade do Minho, Portugal, 2007.

PEREIRA, E. A. **Patologias em reservatórios de água potável e sua correcção**. Dissertação do Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal, 2010.

TREVISAN, R. da E.; MAIA, I.G. **Análise da porosidade em juntas soldadas pelo processo MIG/MAG robotizado**. Acesso em: 02 dez 2016. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/cobef/2007/files/021029281.pdf>

WARREN, D.; STOUT, R. D. Porosity in Mild Steel Weld Metal. **Welding Journal**, v. 31, n. 9, p. 406s-420s, Sep. 1952.

WOODS, R.A. Porosity and Hydrogen Absorption in Aluminum Welds. **Welding Journal**, v. 53, n. 3, p. 97s-108s, Mar. 1974.