



Mauro dos Santos Alcatrão

**Estudo de Viabilidade da Aplicação do
Processo de Soldagem Mag com Controle de
Corrente Mecanizada sobre Tubulação em
Operação**

40/2013

**CAMPINAS
2013**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

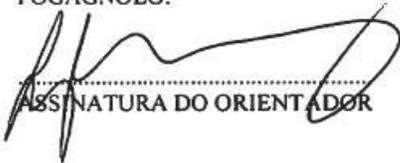
Mauro dos Santos Alcatrão

Estudo de Viabilidade da Aplicação do Processo de Soldagem Mag com Controle de Corrente Mecanizada sobre Tubulação em Operação

Orientador: Prof. Dr. João Batista Fogagnolo

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Materiais e Processos de Fabricação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO MAURO DOS SANTOS ALCATRÃO, E
ORIENTADO PELO PROF. DR. JOÃO BATISTA
FOGAGNOLO.


ASSINATURA DO ORIENTADOR

**CAMPINAS
2013**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F884p Alcatrão, Mauro dos Santos
Título: Estudo da viabilidade da aplicação do processo de soldagem MAG com controle de corrente mecanizada sobre tubulação em operação/ Mauro dos Santos
Alcatrão–Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: João Batista Fogagnolo
Dissertação/de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1.Mag com controle de corrente. 2.Soldagem sobre duto operação. 3.trepanação. I.Fogagnolo, João Batista. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Feasibility of the application of MAG welding process with current control on mechanized pipe in operation.

Palavras-chave em Inglês: MAG with current control, welding onto in service, trepanation.

Área de concentração: Materiais e Processo de Fabricação

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Prof. Dr. João Batista Fogagnolo, Prof. Dr. Eugênio José Zoqui, Dr. Afonso Santos Verges

Data da defesa: 24/04/2013

Programa de Pós-Graduação:Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

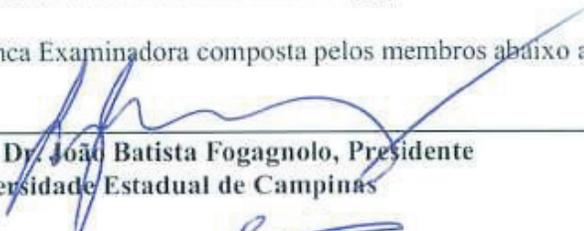
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

**Estudo de Viabilidade da Aplicação do
Processo de Soldagem Mag com Controle de
Corrente Mecanizada sobre Tubulação em
Operação**

Autor: Mauro dos Santos Alcatrão

Orientador: Prof. Dr. João Batista Fogagnolo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. João Batista Fogagnolo, Presidente
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Eugênio José Zoqui
Universidade Estadual de Campinas



Dr. Afonso Santos Verges
Petróleo Brasileiro SA PETROBRÁS

Campinas, 24 de abril de 2012

Aos meus pais, Belarmino e Leonidea, por sua infinita paciência, amor, compreensão e dedicação.

À Cristina, sempre ao meu lado, cuja determinação e inteligência sempre será um exemplo a ser seguido. Agradeço sua paciência e incentivo.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. João Batista Fogagnolo – mais do que um orientador, agradeço profundamente pela sua palavra de confiança e estímulo, pela sua densa orientação e dedicação neste árduo trabalho que é filtrar nosso conhecimento empírico e mesclar com o verniz do conhecimento acadêmico, ainda agradeço por sua competência, determinação, respeito e responsabilidade acadêmica, ajudando a conduzir de forma brilhante, incansável e incentivadora o desenvolvimento dessa dissertação.

À Dra. Roseana E. Trevisan – por sua paciência, compreensão, carinho, amizade e oportunas sugestões no desenvolvimento de alguns conceitos experimentais.

À Engenharia/SI/Sequi pela oportunidade de desenvolver meus conhecimentos e por toda colaboração obtida, e principalmente pela confiança em mim depositada.

Aos meus irmãos Marcio, Marisa, Miriam e Mirtes pela paciência, incentivos e pelas palavras de encorajamento nos momentos de desespero.

Ao Cássio, meu estagiário e sobrinho, pela sua criatividade e dedicação na execução dos trabalhos mais difíceis das soldagens em laboratório. Não seria possível sem sua ajuda e empenho.

Ao colega Paulo Roberto da Silva – por sua competência, amizade, paciência e imprescindível estímulo para continuar a árdua batalha da aquisição de conhecimento.

Ninguém ignora tudo. Ninguém sabe tudo.

Todos nós sabemos alguma coisa.

Todos nós ignoramos alguma coisa.

Por isso aprendemos sempre.

Paulo Freire

Resumo

A grande expansão da malha de duto terrestre que vem ocorrendo nos últimos anos no Brasil, principalmente com a construção de linhas únicas para o escoamento de gás natural, representa um novo desafio às equipes de manutenção. A interrupção do fornecimento de gás, devido à parada para manutenção pode representar o colapso de muitas cidades. Situações programadas de paradas operacionais são muito comuns porém envolve recursos humanos e financeiros vultosos, nem sempre disponíveis. Os riscos envolvidos no preparo e condicionamento para a retirada de operação de um gasoduto ou oleoduto, além dos mesmos cuidados ao retorno normal às atividades requer planejamento minucioso. Nas aplicações envolvendo processos de soldagem sobre o duto em operação, isto é, com fluxo interno na forma gás ou líquido, é necessário garantir a ausência de vazamento de produto, ou seja, onde se tenha o produto totalmente confinado no interior da linha, viabilizando a execução de soldagem e, portanto, não ocorrendo a possibilidade de ignição do produto nela contido. Em uma soldagem executada diretamente sobre uma tubulação com fluxo interno é necessário considerar-se dois tipos de riscos de origem antagônica: Perfuração e trincas a frio. O objetivo deste trabalho é discutir a aplicação do processo de soldagem MAG mecanizado com transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente, alternativo ao comumente utilizado, eletrodo revestido, com intuito de obtenção de maior segurança nas aplicações para baixas espessuras na parede do duto, além de almejar maior produtividade e qualidade das soldagens.

Palavras Chave: GMAW; Solda em Operação; STT; Soldagem em Serviço; Gasodutos.

Abstract

The great expansion of the onshore pipeline grid that has been occurring in recent years in Brazil, especially with the construction of single lines for the flow of natural gas, represents a new challenge to the maintenance teams. The interruption of gas supply due to maintenance downtime can represent the collapse of many cities. Scheduled stops operating situations are very common however involve financial and human resources heavily, not always available. The risks involved in the preparation and conditioning for the withdrawal of operation of a pipeline or pipeline, besides the same care to return to normal activities require careful planning. In applications involving welding process on the pipe in operation, ie, internal flow with the gas or liquid form, it is necessary to ensure no leakage of product, ie, where the product has completely confined within the line, allowing performing welding and therefore not occurring the possibility of ignition of the product contained therein. In welding performed directly on a pipe with internal flow is necessary to consider two types of risks antagonistic source: Drilling and cracking cold. The objective of this study and discuss the application of mechanized MAG welding process with metal transfer short-circuit with current control, alternative to the commonly used electrode coated with the aim of achieving greater safety in applications for low thicknesses in the duct wall , and aim for higher productivity and quality of the welds.

Key Words: GMAW; In-service Welding Operation; STT; Welding Onto-in Service; Gas Transmission Pipeline.

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Distribuição das linhas de gasodutos no Brasil.....	1
Figura 1.2 – Esquema de montagem de dupla calha sobre duto, indicando as soldas circunferenciais e longitudinais.....	4
Figura 2.1 – Dispositivo para simulação de soldagem em operação com resfriamento com passagem de água	9
Figura 2.2 – Cinta hidráulica sobre dupla calha em gasoduto.....	11
Figura 2.3 – Sistema de ajuste com tensionamento hidráulico.....	11
Figura 2.4 – Quantidade de água absorvida, após secagem a 250°C por uma hora, pelo revestimento de um eletrodo básico (AWS E7018), em função do tempo e da umidade relativa do ar	13
Figura 2.5 – Trinca na solda circunferencial de selagem em dupla calha.	14
Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do processo STT®.	18
Figura 2.7 – Influência da corrente de pico na soldagem de raiz.	20
Figura 2.8 – influência da corrente de base na soldagem de raiz.	21
Figura 2.9 – Ângulo de trabalho.....	21
Figura 2.10 – Aplicação de amanteigamento na superfície do chanfro da dupla calha.	27
Figura 2.11 – Perfuração provocada por procedimento de soldagem incorreto.	29
Figura 3.1-a – Dispositivo construído para soldagem.	36
Figura 3.1-b – Posição de montagem da calha sobre o tubo.	36
Figura 3.2 – Tartaruga: Dispositivo de fixação e movimentação da tocha.	37
Figura 3.3 – Inclinação da tocha em relação à junta - ângulo de trabalho de 45°.	37
Figura 3.4 – Ângulos de trabalho utilizados no posicionamento da tocha.	39
Figura 4.1 – Juntas soldadas de calha sobre duto com espessuras de 6,4 mm, corrente de pico de 300 A, corrente de base de 65 A, QEC intermediária entre alta e baixa, sem refrigeração, com ângulo de trabalho de 10° (a), 20° (b), 35° (c), 45° (d), 55° (e), 65° (f), com indicação da zona fundida	44

Figura 4.2 – Juntas soldadas de tubo e calha com 5,3 mm de espessura, com correntes de pico de 250 (a, d, g, j, m, p), 300 (b, h, k, n, q) e 350 A (c, f, i, l, o, r), correntes de base de 65 (a, b, c, g, h, i, m, n, o) e 80 A (d, e, f, j, k, l, p, q, r), QEC lenta (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), QEC rápida (m, n, o, p, q, r), sem refrigeração (a, b, c, d, e, f) e com refrigeração (g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r).	45/46
Figura 4.3 – Juntas soldadas de tubo e calha com 6,4 mm de espessura, com correntes de pico de 250 (a, d, g, j, m, p), 300 (b, h, k, n, q) e 350 A (c, f, i, l, o, r), correntes de base de 65 (a, b, c, g, h, i, m, n, o) e 80 A (d, e, f, j, k, l, p, q, r), QEC lenta (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), QEC rápida (m, n, o, p, q, r), sem refrigeração (a, b, c, d, e, f) e com refrigeração (g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r).	52/53
Figura 4.4 – Média de dureza HV10 da ZTA, sem refrigeração e QEC lenta (condição de resfriamento 1), com refrigeração e QEC lenta (condição de resfriamento 2), com refrigeração e QEC rápida (condição de resfriamento3), espessura de 5,3 e 6,4 mm.	60

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Composição química do metal base e do metal de adição após soldagem.	34
Tabela 3.2 – Corrente de base e pico, com e sem refrigeração, em dois níveis de Q.E.C.	40
Tabela 3.3 – Corrente de base e pico, com e sem refrigeração, em dois níveis de Q.E.C.	41
Tabela 4.1 – Resultado do ensaio visual nos 36 corpos de prova de soldagem, para cada condição de aporte aplicado.	58
Tabela 4.2 – Média de dureza HV10 e desvio padrão (dp), sem refrigeração e QEC lenta, com refrigeração e QEC lenta, com refrigeração e QEC rápida, para espessura de 5,3 e 6,4 mm, na região do MB, ZTA e MS.	59

Lista de Abreviaturas e Siglas

A – Ampere

API – *American Petroleum Institute*

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*

AWS – *American Welding Society*

CCO – Centro de Controle Operacional

CE – Carbono Equivalente

CO₂ – Dióxido de Carbono

CP – Corpo de prova

CREDUTO – Centro Regional de Emergências Dutoviárias

EPS – Especificação de Procedimento de Soldagem

ER – Eletrodo Revestido

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem

FCAW – *Flux-Cored Arc Welding*

FF – Falta de Fusão

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

GMAW – *Gás Metal Arc Welding*

GN – Gás Natural

I_{pico} – Corrente de Pico

I_{base} – Corrente de Base

MAG – Metal Active Gás

MB – Metal Base

MA – Metal de Adição

MIG – *Metal Inert Gas*

PCM – *Parameter Crack Measurement*

PRCI – *Pipeline Research Council International*

QEC – Queda Exponencial de Corrente

RQPS – Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem

SMAW – *Shielded Metal Arc Welding*

STT[®] – *Surface Tension Transfer* marca registrada de *Lincoln Electric*

TIG – *Tungsten Inert Gas*

TMCCC – Transferência Metálica por Curto-Circuito Com Controle de Corrente

T.O. – *Tail-Out*

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZF – Zona de Fusão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1 Objetivos gerais	4
1.1.2 Objetivo específico	5
1.2 Justificativa.....	5
1.3 Estrutura do trabalho	6
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	7
2.1 Fundamentos teóricos para soldagem em operação	7
2.1.1 Riscos relevantes	9
2.2 Processo de soldagem MIG/MAG TM4C.....	16
2.2.1 Aplicações comerciais do processo TM4C	16
2.2.2 Influência das variáveis na presença de descontinuidades	22
2.2.3 Vantagens e desvantagens	22
2.3 Aços API	24
2.3.1 Soldabilidade dos aços API.....	24
2.4 Considerações metalúrgicas - descontinuidades na soldagem	25
2.5 Técnicas para evitar o risco de perfuração e trinca pelo hidrogênio	27
2.6 Aplicações de normas e procedimentos técnicos	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1 Materiais e equipamentos	33
3.1.1 Metal base e consumíveis.....	33
3.1.2 Equipamentos	34
3.2 Métodos	35
3.2.1 Preparação do dispositivo para soldagem.....	35
3.2.2 Parâmetros de soldagem.....	38
3.2.3 Caracterização das juntas	39

3.2.4 Identificação dos corpos de prova	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Influência do ângulo de trabalho	43
4.2 Inspeção macrográfica, inspeção visual e defeitos e dureza	45
4.2.1 Ensaio de Macrografia e análises dos corpos de prova de 5,3 mm	45
4.2.1.1 Análise da corrente de pico	47
4.2.1.2 Análise da corrente de base	48
4.2.1.3 Análise da condição de refrigeração.....	49
4.2.1.4 Análise da queda exponencial de corrente -QEC lenta x rápida	50
4.2.2 Ensaio de macrografia e análises dos corpos de prova de 6,4 mm.....	52
4.2.2.1 Análise da corrente de pico	53
4.2.2.2 Análise da corrente de base	54
4.2.2.3 Análise da condição de refrigeração.....	55
4.2.2.4 Análise da queda exponencial de corrente rápida x lenta.....	56
4.2.3 Ensaio visual.....	57
4.2.4 Ensaio de dureza.....	59
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
5.1 Conclusões.....	61
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	63
Referências.....	65

1 INTRODUÇÃO

Uma linha de dutos, utilizada para transporte de fluidos, pode movimentar óleo cru e derivados claros de petróleo, como diesel, gasolina, querosene, GN e GLP. Pode movimentar água e álcool e outros fluidos em suspensão.

Diversos projetos de linhas de dutos contemplam alterações montadas em futuras revisões, sendo, na maioria dos casos, executadas com a linha em operação.

Montagens de equipamentos adicionais como válvulas de bloqueio, pontos de entrega de produtos para grandes consumidores, como termoeletricas e indústrias que acabam sendo instaladas devido à disponibilidade de energia ou montagem de estações de compressão para aumento de vazão são alguns dos itens atendidos por estes procedimentos, sendo todos extremamente onerosos caso ocorra a parada operacional e, portanto, interrupção de fornecimento de produtos, principalmente em gasodutos, onde as linhas frequentemente são únicas como pode ser visto na Figura 1.1.

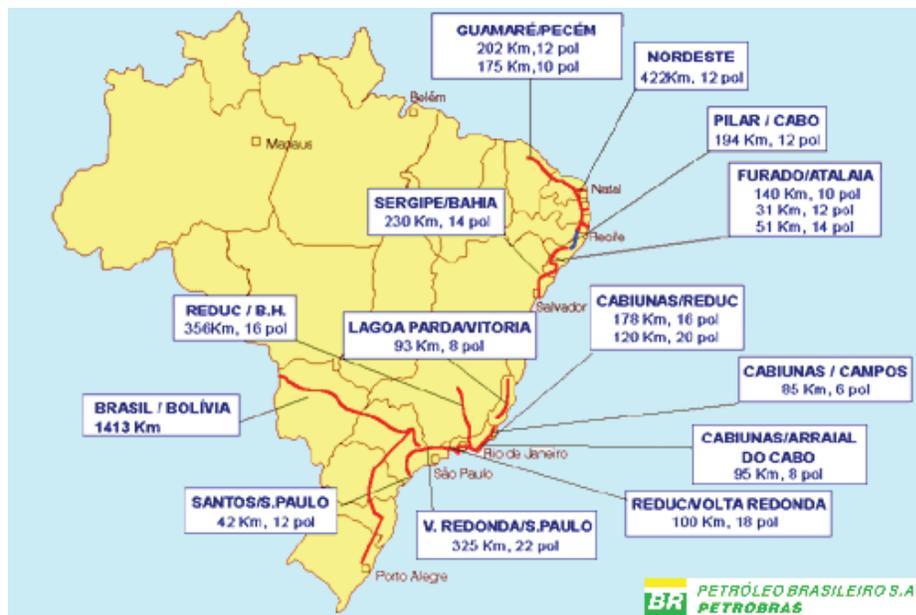


Figura 1.1 – Distribuição das linhas de gasodutos no Brasil (Cedida por Transpetro).

Por outro lado, linhas existentes, quando em manutenção programada ou emergencial, podem exigir reparos envolvendo processos de soldagem que, por motivos econômicos e operacionais, devem ser executados sem que a linha sofra parada operacional.

Em situações onde processos de soldagem são aplicados diretamente sobre o duto simultaneamente às atividades de bombeio, isto é, com produtos líquidos ou gasosos sendo movimentados no interior da linha, tornam-se necessários cuidados adicionais aos normalmente empregados nas soldagens de construção de gasodutos e oleodutos.

A parada operacional de um oleoduto ou gasodutos em geral envolve um contingente de pessoas e recursos financeiros consideráveis, além do lucro cessante. Situações como essas requerem planejamento prévio que envolve uma trama de processos que vai da produção nas refinarias ao armazenamento final nos terminais de entrega de produtos, passando por alterações nas taxas de utilização de dutos e programações de operações de recebimento e armazenagens em diversos pontos estratégicos para o mercado que pretende abastecer.

Na execução desses trabalhos o controle de qualidade da soldagem é de vital importância, exigindo a adoção de códigos de procedimentos de reparos que sejam adequados aos códigos de projetos. Dutos construídos no Brasil, para movimentação de petróleo e seus derivados e álcool atendem as normas de sociedades americanas, tais como ASME e API.

A implementação de reparo ou alteração para inclusão de equipamentos e acessórios em dutos apóia-se na norma API 1104 (2010). As atividades de soldagens são garantidas por uma sequência de exigências que inclui o modo como a soldagem é executada e a garantia da habilidade do soldador ou operador de soldagem.

A garantia da qualidade na execução da soldagem é obtida com base em alguns documentos técnicos de soldagem. O processo é iniciado pela confecção de um documento escrito que contenha todos os parâmetros de soldagem e variáveis intervenientes ao processo, que deverão ser empregadas na execução da soldagem. As variáveis que, se alteradas posteriormente, possam ocasionar alteração na qualidade da soldagem recebem a denominação de variáveis essenciais. As demais serão não essenciais ou suplementares. Todas as variáveis, essenciais, não essenciais e quando existente, as variáveis suplementares, farão parte deste documento escrito que será denominado Especificação de Procedimento de Soldagem (EPS), e que deverá ser executada, em condições controladas, e testada para garantir que a região soldada possui ao menos a resistência mecânica igual à do metal base.

A EPS, com todas as informações citadas no parágrafo anterior, deverá ser testada para verificar a possibilidade de execução. Este teste constará de soldagem de uma peça que represente as condições e parâmetros térmicos descritos na EPS. Durante a execução do teste todos os parâmetros realmente utilizados deverão ser registrados.

Após a finalização do processo de soldagem, corpos de prova serão retirados e testados, segundo a norma de soldagem utilizada, com intuito de garantir propriedades mecânicas e metalúrgicas. Todos os resultados dos ensaios mecânicos, análise química do metal base utilizado e o resumo das anotações dos parâmetros de soldagem utilizados, serão reunidos em um dossiê que será chamado de Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem, doravante designado apenas por RQPS, como citado em API 1104 (2010) e ASME IX (2010).

Na soldagem de duto em operação, deverá ser criada uma EPS e qualificada tendo como base os princípios contidos na norma API 1104 (2010) apêndice B. Adicionalmente deverão ser observados cuidados com aspectos térmicos deste processo.

A aplicação de uma fonte de calor diretamente sobre uma tubulação com fluxo interno terá como forma de dissipação dessa energia além das normalmente esperadas, condução pela chapa e dissipação para o meio, irradiação e convecção, ainda se considera a parcela que o próprio fluxo interno irá transportar.

A parcela dissipada pelo fluxo interno, sendo bastante significativa controla o processo, pois se coloca como divisor de águas entre a possibilidade de perfuração e a formação de trincas pelo hidrogênio.

O processo de soldagem com transferência por curto-circuito com controle de corrente originalmente foi desenvolvido para aplicação específica em soldagem de raiz conforme citado no *Pipeline & Journal Gás* (2004). Já é utilizado com sucesso para montagem dutoviária em algumas obras na Europa, América do Norte e Ásia, porém no Brasil ainda está em fase de adaptação. Na soldagem de raiz apresenta vantagens excepcionais sobre o *ER*, em relação ao rendimento e velocidade de fechamento (ALCATRÃO, 2005).

A inovação pretendida por este trabalho é a aplicação do processo de soldagem conhecido por *MAG* com controle de corrente, *STT*[®], às soldas circunferenciais de selagem de duplas calhas, sobre o duto em operação, isto é, durante a movimentação de fluxo no interior da tubulação.

Para tanto será desenvolvido e montado um dispositivo que facilite as simulações de uma soldagem em junta sobreposta, representando a solda circunferencial da dupla calha, mostrado na Figura 1.2.

O dispositivo permitirá a passagem de água em seu interior, fornecendo uma condição de refrigeração da região soldada, semelhante à condição de resfriamento real fornecida pelo fluxo no interior do gasoduto ou oleoduto.

A refrigeração obtida pela presença de água no interior do dispositivo pode ser obtida com fluxo ou sem fluxo, bastando a presença de água em seu interior.

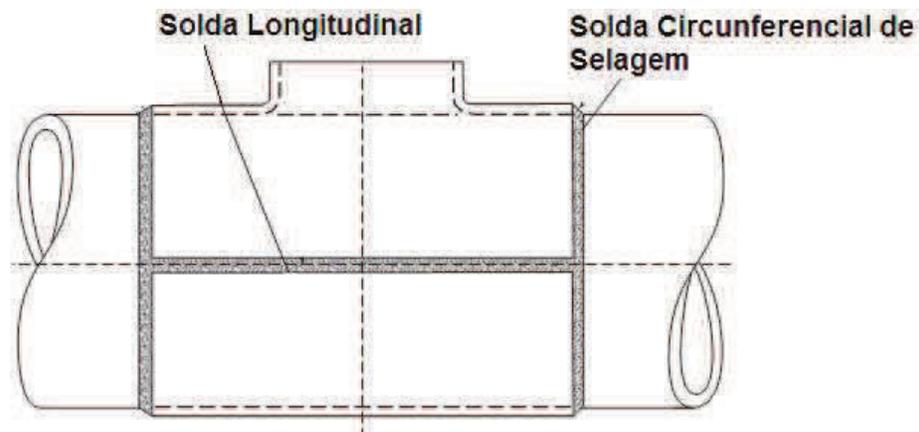


Figura 1.2 – Esquema de montagem de dupla calha sobre duto, indicando as soldas circunferenciais e longitudinais (API 1104, 2010).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Discutir a aplicabilidade do processo de soldagem mecanizado com transferência metálica por curto-circuito com controle de corrente, utilizando a marca comercial *STT*[®], como alternativa ao comumente utilizado, eletrodo revestido, com intuito de obtenção de maior segurança nas

aplicações para baixas espessuras de parede do duto, além de almejar maior produtividade e qualidade das soldagens.

1.1.2 Objetivo específico

Definição dos parâmetros aplicáveis ao processo STT® e a influência destes parâmetros na morfologia do cordão de solda depositado.

1.2 Justificativa

A soldagem em operação comumente utiliza rígido controle de aporte térmico devido ao risco de perfuração. A necessidade de reduzir o risco de obtenção de estruturas suscetíveis com a aplicação de elevados aportes térmicos gera uma situação de antagonismo, dificultando a obtenção de uma condição de soldagem possível.

A utilização de processo de soldagem que possibilite o controle da concentração de hidrogênio em teores ultra baixos, inferior a 4 ml de hidrogênio para cada 100 g de metal depositado, tal como obtido pela soldagem com arame sólido e processo de soldagem por proteção gasosa, foi a idéia que orientou este trabalho.

A opção pelo processo de soldagem MAG com controle de corrente representou a opção mais vantajosa pelo reduzido custo do gás de proteção e pela produtividade inerente ao processo.

A escolha da marca comercial STT®, para o processo de soldagem com proteção gasosa e transferência metálica por curto circuito, se deu devido ao trabalho inicialmente conduzido pela Engenharia da Petrobras, para aplicação deste processo na construção de gasodutos novos, como citado no trabalho de Alcatrão e Menezes (2005).

1.3 Estrutura do trabalho

Numa fase inicial será estudada a influência do ângulo de trabalho na distribuição do calor disponível para soldagem em cada componente da junta soldada, associando o aporte à penetração e tamanho da zona termicamente afetada (ZTA).

Numa segunda fase serão testados parâmetros de soldagem como variável de entrada e morfologia do cordão de solda juntamente com a penetração e profundidade da ZTA como variável de resposta.

Os parâmetros de soldagem testados serão correntes de pico, correntes de base, queda exponencial de corrente (QEC). A presença ou ausência de refrigeração e duas espessuras diferentes da dupla calha também serão objeto de pesquisa.

A resposta positiva aos parâmetros de soldagem adequados serão obtidos pela ausência da detecção de defeitos como falta de fusão ou falta de penetração.

Complementando o trabalho, será realizado ensaio de dureza nos corpos de prova soldados em condição de alta taxa de resfriamento, pela aplicação de aporte térmico baixo e refrigeração por água e comparado com corpos de prova soldados com baixa taxa de resfriamento, isto é, com aporte mais levado sem refrigeração.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fundamentos teóricos para soldagem em operação

A execução de manutenção de gasodutos ou oleodutos pode exigir a substituição de um ou mais tubos motivado por processo corrosivo externo ou interno, ou a localização de dano mecânico, tais como um amassamento. A companhia operadora poderá então decidir pela retirada do equipamento de operação.

O processo de condicionamento e preparação para retirada de operação de uma linha de transmissão exige o deslocamento de seu fluxo interno. Este serviço pode ser feito pela passagem de água em seu interior para deslocar todo seu conteúdo original. Posteriormente essa água, contaminada com resíduos do produto deslocado, deverá ser tratada e devolvida ao ambiente, isenta de hidrocarbonetos e outras substâncias tóxicas como benzeno e outros produtos altamente tóxicos.

Alternativamente algumas companhias operadoras de dutos utilizam o gás nitrogênio para o processo de deslocamento e limpeza, porém ainda assim muitos cuidados são necessários. O nitrogênio desloca o oxigênio e pode provocar asfíxia em animais e humanos nas proximidades dos locais de descarga para a atmosfera. Os custos financeiros envolvidos nestas operações são dispendiosos e tecnicamente discutíveis.

Existem alguns procedimentos alternativos que podem ser utilizados para a realização da manutenção em tubulações, sem a necessidade de substituição de tubos.

Um desses procedimentos é descrito como a aplicação de uma cobertura metálica diretamente sobre a área afetada, através de soldagem de um segmento de tubo bi-partido. Esse segmento bi partido é obtido a partir de um segmento de tubo cortado na direção longitudinal, formando duas calhas. Estas calhas serão então novamente reunidas por soldagem na região que apresentou o dano, através da aplicação de soldagem na direção longitudinal e circunferencial. A soldagem longitudinal irá unir novamente as duas metades do segmento de tubo.

A soldagem circunferencial promoverá o confinamento do espaço compreendido entre o

tubo original do oleoduto ou gasoduto e as calhas, com objetivo de criar uma selagem neste espaço. Esta solda será designada por soldagem circunferencial ou soldagem de selagem. O conjunto dos dois segmentos de tubos recortados em formato de calha será designado por dupla calha.

A soldagem longitudinal de montagem da dupla calha não tocará na tubulação, pois será utilizado um dispositivo denominado mata-junta. Este recurso é utilizado para servir de anteparo e localiza-se na região inferior da junta soldada, porém a soldagem circunferencial de selagem unirá a dupla calha ao tubo da tubulação.

A soldagem circunferencial, por ser aplicada diretamente sobre o corpo da tubulação, e sendo aplicada durante a operação normal da tubulação, isto é, durante o processo de bombeio dos fluidos no interior da tubulação, será chamada de soldagem em operação. Este tipo de soldagem executada diretamente sobre o corpo da tubulação utiliza o fluido conduzido em seu interior como fluxo refrigerante.

Baek e coautores (2006) comentam vários métodos de reparos em tubulações executados diretamente sobre as tubulações em operação e conclui pela viabilidade econômica do procedimento.

A indústria petrolífera brasileira adota os padrões da indústria americana, referência mundial em tecnologia nessa área. Os projetos construtivos de gasodutos seguem o código ASME B31.8 (2010), e para polidutos e oleodutos o código é o ASME B31.4 (2010). Ambos remetem ao API 1104 (2010) apêndice B, para intervenções de soldagem em operação, para instalações de acessórios ou para execução de reparos por soldagem diretamente sobre a parede da tubulação. Logo no início do capítulo observa-se o alerta quanto aos riscos inerentes a esses procedimentos: risco de perfuração e trincamento a frio.

A simulação do resfriamento é obtida pela passagem de água no interior de um segmento de tubulação representativa do duto que se pretende aplicar o procedimento de soldagem, como mostrado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Dispositivo para simulação de soldagem em operação com resfriamento com passagem de água (Cedida por Creduto/Transpetro).

O apêndice B do código API 1104 (2010) recomenda a qualificação de um procedimento de soldagem, utilizando água como fluido refrigerante. Nessa condição de teste a utilização de água deverá fornecer refrigeração equivalente ou mais severa que a condição típica do duto em operação. Outros fluidos poderão ser utilizados para simulação de condições menos severas de refrigeração como óleo lubrificante de motor.

A norma API 2201 (2003) recomenda a utilização de procedimentos de soldagem qualificados e pessoal treinado no procedimento específico a ser aplicado na soldagem em operação, além de cuidados na segurança do processo.

2.1.1 Riscos relevantes

A solda em carga é uma soldagem executada diretamente sobre o duto onde, internamente, há movimento de fluido pressurizado. Durante a soldagem pode ocorrer que a pressão do arco seja suficiente para causar a perfuração do duto ou reduzir a seção resistente do tubo causando a perfuração em função da pressão interna do fluido.

A perfuração ocorre quando é aplicado aporte de calor extremamente elevado para a espessura que se pretende soldar. Atualmente é possível prever através de métodos computacionais (Battelle e PRCI) o risco de perfuração da superfície do tubo. Estes métodos consideram como dados de entrada os parâmetros de soldagem (corrente, tensão e velocidade de avanço), a temperatura e velocidade do fluxo no interior da linha, o tempo de resfriamento ou a habilidade do fluxo em roubar calor, o tipo de produto presente no seu interior. Os dados de saída envolvem a temperatura da superfície interna do tubo e o tempo de resfriamento entre 850⁰C e 500⁰C.

Küchler (2009) conclui que os programas computacionais, PRCI e Battelle, atualmente utilizados, fornecem resultados confiáveis para a previsão da condição de perfuração da parede do duto, durante a aplicação da soldagem circunferencial.

Holden (1975) e Cassie (1974), em trabalhos distintos, concluem que o uso de consumível básico, portanto baixa penetração, reduz o risco de perfuração. A temperatura da superfície interna do tubo, para espessuras de 6,4 mm ou maior ficaria abaixo de 982⁰C, quando utilizado eletrodo revestido com diâmetro igual ou inferior a 3,2 mm, o que reduz o risco de perfuração.

Cisilino e coautores (2002) discutem a espessura da região a ser soldada em função da pressão operacional do duto. A redução na pressão operacional implica no aumento da espessura mínima a ser soldada, para evitar a perfuração. Entretanto a espessura mínima para soldagem aumenta com o aumento do fluxo do gás na linha. Em condições de escoamento de gases, isto significa redução na pressão operacional. O trabalho cita ainda como alternativa operacional, o bloqueio do segmento em reparo, executando a manobra de aliviar a linha para reduzir a pressão e simultaneamente aumentar o fluxo.

Vakili (2009) cita o efeito da habilidade térmica do fluido e cargas externas como pressão do duto e suportes deste, tem efeito significativo sobre as tensões que causam a perfuração. O trabalho conclui que o risco de perfuração é maior na primeira camada de solda aplicada e que a utilização de suporte de fixação adequado contribui significativamente para reduzir o risco de perfuração. O suporte é um dispositivo que auxilia a fixação das duplas calhas ou acessórios durante a montagem, tais como cinta hidráulica e corrente, como mostrado nas Figuras 2.2 e 2.3.



Figura 2.2 – Cinta hidráulica sobre dupla calha em gasoduto.

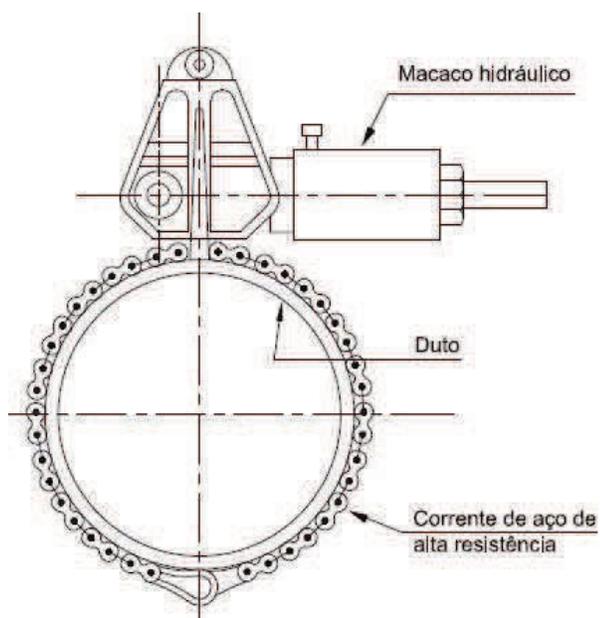


Figura 2.3 – Sistema de ajuste com tensionamento hidráulico (Norma Petrobrás N-2163, 2011).

Sarafan e coautores (2012) e outros discutem a maior incidência de trincas de hidrogênio em soldagem circunferência em dutos em operação, com uso de eletrodo celulósico na posição

vertical e sobre cabeça. Concluem que as alterações de parâmetros de soldagem, notadamente a condição de aporte térmico é determinante dessa característica.

A microestrutura favorável à trinca a frio é a martensita. Neste caso a martensita pode originar-se em função dos elementos de liga presente no metal de base associados à taxa de resfriamento do material. A seleção do material da dupla calha, a espessura e a preparação, entre outros, são fatores que devem ser considerados na seleção da dupla-calha, pois, é através desses fatores que se consegue uma melhor mudança de microestrutura de modo a reduzir susceptibilidade da trinca a frio.

Para que ocorra a trinca a frio são necessários 3 fatores:

- Microestrutura susceptível; presença de hidrogênio; tensões residuais;

As trincas irão surgir a temperaturas inferiores a 150°C. Trincas a frio costumam surgir até 72 horas após o término do processo de soldagem, devido à presença de hidrogênio presente em diversas fontes, principalmente no revestimento dos consumíveis básicos. Durante a soldagem o hidrogênio penetra na poça de fusão e dali para a zona termicamente afetada (ZTA), durante o processo de resfriamento do cordão de soldagem, provocando o surgimento de trincas.

A principal fonte de hidrogênio é o revestimento para os processos de soldagem que utilizam fluxo (soldagem com ER, com arame tubular ou arco submerso) (MODENESI, 2004).

A umidade presente na atmosfera também pode fornecer hidrogênio para a poça de fusão, como mostra a Figura 2.4. A taxa de absorção de umidade depende das características de fabricação do eletrodo ou fluxo, o tipo de ligante usado e a temperatura de secagem e, também das condições do ambiente, principalmente a temperatura e a umidade relativa do ar, conclui Modenesi (2004) em seu livro “Soldabilidade dos aços transformáveis”.

Ainda segundo Modenesi (2004), a melhor forma de controle deste parâmetro é medir o nível de hidrogênio difusível, pois a umidade presente no consumível provém da umidade absorvida e água de cristalização. A primeira é parcialmente evaporada durante o aquecimento sob efeito joule, durante a soldagem.

Limpeza inadequada da superfície do metal também são fatores complicadores.

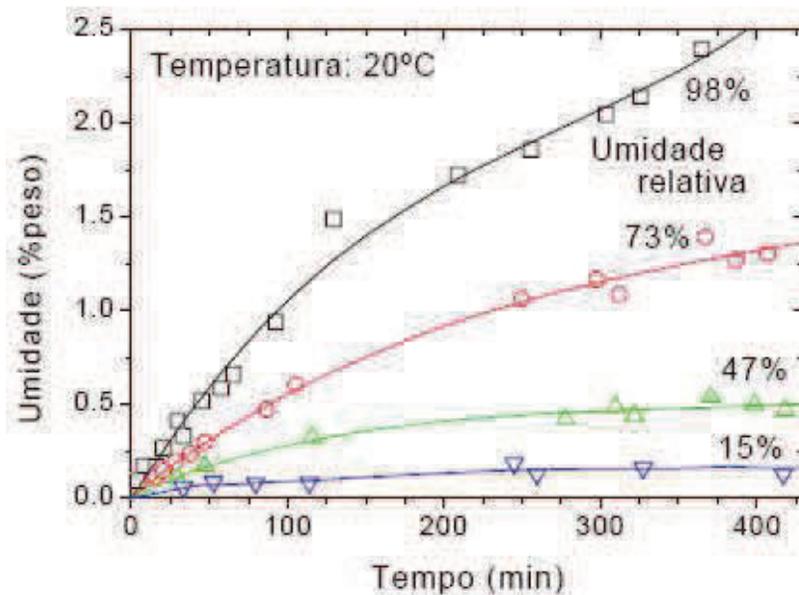


Figura 2.4 – Quantidade de água absorvida, após secagem a 250°C por uma hora, pelo revestimento de um eletrodo básico (AWS E7018), em função do tempo e da umidade relativa do ar (MODENESI, 2004).

Ainda citando os comentários de Modenesi (2004), recomenda-se a aplicação de pré-aquecimento para reduzir a possibilidade de trincas pelo hidrogênio, quando o CE estiver acima de 0,35.

Nas aplicações de campo, onde os consumíveis estarão sujeitos às intempéries durante o período de trabalho, a utilização de processo de soldagem com consumível de revestimento higroscópico requer cuidados nem sempre fáceis de serem aplicados.

Atualmente tem-se adotado consumível com revestimento básico, como recomenda a norma Petrobras N2163 (2011), fornecido em embalagem a vácuo, com o intuito de evitar a necessidade de tratamento de secagem no canteiro de obras, transferindo a garantia da qualidade ao fabricante do consumível. Apesar disso, este procedimento não tem garantido a qualidade e sanidade das soldas de reparo realizadas em campo, como pode ser visto na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Trinca na solda circunferencial de selagem em dupla calha.

Otegui e coautores (2001) relatam os problemas causados pela utilização de procedimento de soldagem com eletrodo celulósico e material de dupla calha com grande quantidade de inclusões, em soldagem em operação. Cita a presença recorrente de trincas causadas pelo hidrogênio. As soldas circunferenciais, de filete, favoreceram o surgimento de trincas devido ao acúmulo de hidrogênio molecular em torno das inclusões ali presentes.

Otegui e coautores (2001) conclui que as principais causas das falhas são relacionadas ao alto aporte térmico e uso de ER celulósico de alto nível de hidrogênio difusível, material de confecção das duplas calhas inadequado devido à presença de inclusões alinhadas desfavoravelmente às tensões de montagem, associados ao hidrogênio molecular associado às inclusões que afetaram tanto o metal depositado quanto a ZTA. Relatou ainda a presença de falta de fusão e outros defeitos associados ao procedimento de soldagem.

Sarafan e coautores (2012) realizaram testes de campo com validação em condições de laboratório e confirmaram a dependência da posição de soldagem e o nível de hidrogênio absorvido, durante a execução de soldas circunferenciais na posição sobre cabeça, posição conhecida como seis horas.

A aplicação de eletrodo sólido, típica do processo MAG, visa evitar esse efeito deletério.

Do ponto de vista térmico, a soldagem longitudinal difere da soldagem circunferencial, pois naquela não ocorre a interferência térmica do fluxo sobre o processo de soldagem, pois é

utilizado chapa mata-junta. Como esta chapa suporta a fusão parcial da penetração da raiz, o material do duto não sofrerá fusão durante o processo de soldagem.

A solda circunferencial de selagem da dupla calha, sendo aplicada diretamente sobre o duto sofrerá interações térmicas do fluxo interno, sendo o principal objetivo deste trabalho.

Assim, para efeito de compreensão, apenas a solda circunferência será tratada nos procedimentos simulatórios provenientes deste trabalho, sendo a peça principal nos eventos estudados.

Para a qualificação de uma EPS aplicada em soldagem em operação devem ser considerados ao menos quatro fatores intervenientes ao processo segundo a N2163E (2011):

- Nível de Hidrogênio do consumível empregado no processo de soldagem;
- Espessura do tubo a ser soldado;
- Taxa de resfriamento da solda;
- Composição química do tubo.

A soldagem será executada sobre a superfície de um segmento de tubulação possuindo as extremidades fechadas, formando um volume interno que deverá ser preenchido por água para simular o resfriamento produzido pelo fluxo interno da tubulação, quando em condições normais de operação. Dessa forma todas as soldas realizadas nesse teste sofrerão um resfriamento mais intenso que o obtido durante um processo de soldagem convencional de montagem.

A vazão de água no interior do segmento de tubulação será controlada para obter-se controle do tempo de resfriamento. Esse tempo de resfriamento deverá ser igual ou menor que o tempo obtido em condições de soldagens reais, isto é, durante a aplicação do processo de soldagem sobre o duto em operação.

A habilidade de escoamento do calor oriundo do processo de soldagem é uma característica de cada sistema de tubulação de acordo com a API 1104 (2010) dependendo intrinsecamente desse sistema, tais como pressão interna, velocidade e vazão do fluxo no interior da tubulação e espessura da parede, presente em um escoamento típico em tubulações de gás natural.

A velocidade de escoamento recomendável do fluxo gasoso em um gasoduto típico fica entre 10 a 13 m/s podendo atingir o limite de até 17 m/s segundo o *Pipeline Design and Construction* (2003), porém a faixa operacional de velocidade de escoamento do fluxo gasoso recomendável varia entre 2 m/s e 9 m/s, segundo informações do CCO da Transpetro. Como a velocidade é uma importante variável na definição do processo, será importante a definição exata

no ponto que se pretende realizar a intervenção por soldagem. A norma ASME B31.3 (2010) cita, para condições excepcionais de fluxo, a possibilidade de atingir picos de 30 m/s.

Não será utilizada variação de pressão no processo simulatório, apenas controle de vazão. A variação de pressão não altera a habilidade de retirada de calor pelo fluxo e, portanto, o resfriamento do corpo de prova durante a soldagem (BELANGER, 2000).

2.2 Processo de soldagem MIG/MAG TM4C

Varias designações comerciais são dadas para processos que utilizam controle de corrente em processos de soldagem com gás de proteção inerte ou ativo, para minimizar os inconvenientes da transferência metálica por curto-circuito (SILVA, 2005).

Neste processo a corrente é controlada para que logo após a formação da gota, esta corrente é reduzida a um nível onde há menor sobre-aquecimento e menor desperdício de energia por evaporação (ZAPATA, 2003).

Uma boa definição para o processo encontra-se no trabalho de Gohr (2002) “O curto-circuito controlado é uma forma de se obter a transferência por curto-circuito com baixos níveis de respingos, que consiste em manter valores baixos de corrente no instante final ou inicial do curto-circuito, ou em ambos, apontados como críticos na produção de respingos”.

2.2.1 Aplicações comerciais do processo TM4C

A característica natural da transferência metálica no processo *MIG*/por curto circuito aliado a instabilidade do processo e o risco de altos níveis de respingos tornam o processo limitado para aplicações em dutos. Recentes desenvolvimentos de tecnologias associadas às inversoras para soldagem *MIG/MAG* trouxeram novas possibilidades para este processo com o controle do respingo durante a transferência metálica. Uma dessas tecnologias foi desenvolvida pela *Lincoln*

Electric com nome comercial *STT*[®] – “*Surface Tension Transfer*”. Essa tecnologia permite maior grau de controle sobre a forma de onda da corrente durante a transferência metálica que a exercida pelo processo por indutância (SILVA, 2005).

A tecnologia *STT*[®] foi utilizada na construção de gasoduto de 8 polegadas, na costa da Irlanda, com extensão de 25 km, 12,7 mm de espessura em material API grau X52. O processo utilizou uma inversora *LINCOLN POWER WAVE 455 STT*[®], para execução do passe de raiz, que em conjunto com arame tubular para enchimento e acabamento resultou em um aumento de produtividade da ordem de 15% com redução de mão de obra de 50%, o que representa enorme redução no custo final da obra de acordo com o *Pipeline & Journal Gás* (2004).

A descrição do processo poderá ser obtida com base na Figura 2.6, que descreve o processo, pode-se observar que (A) uma corrente de base (de fundo) entre 50A e 100A mantém o arco e contribui para o aquecimento do metal de base. (B) Após o curto circuito inicial na poça de fusão, a corrente é rapidamente reduzida apenas para garantir a manutenção do curto circuito. (C) Uma *pinch current* é aplicada para estrangular a gota de metal formada, enquanto o circuito é monitorado pelo contato da ponte líquida na poça de fusão. (D) Quando a ponte líquida estiver na iminência de partir, a máquina inversora reage reduzindo a corrente para a faixa de 45 A a 50 A. (E) O restabelecimento da corrente de arco é obtido pela aplicação de uma corrente instantânea de pico apenas para reiniciar o arco. (A) Finalmente a corrente de base (de fundo) é restabelecida através de uma queda exponencial, cujo objetivo é reduzir o aporte e fornecer bom controle para este processo.

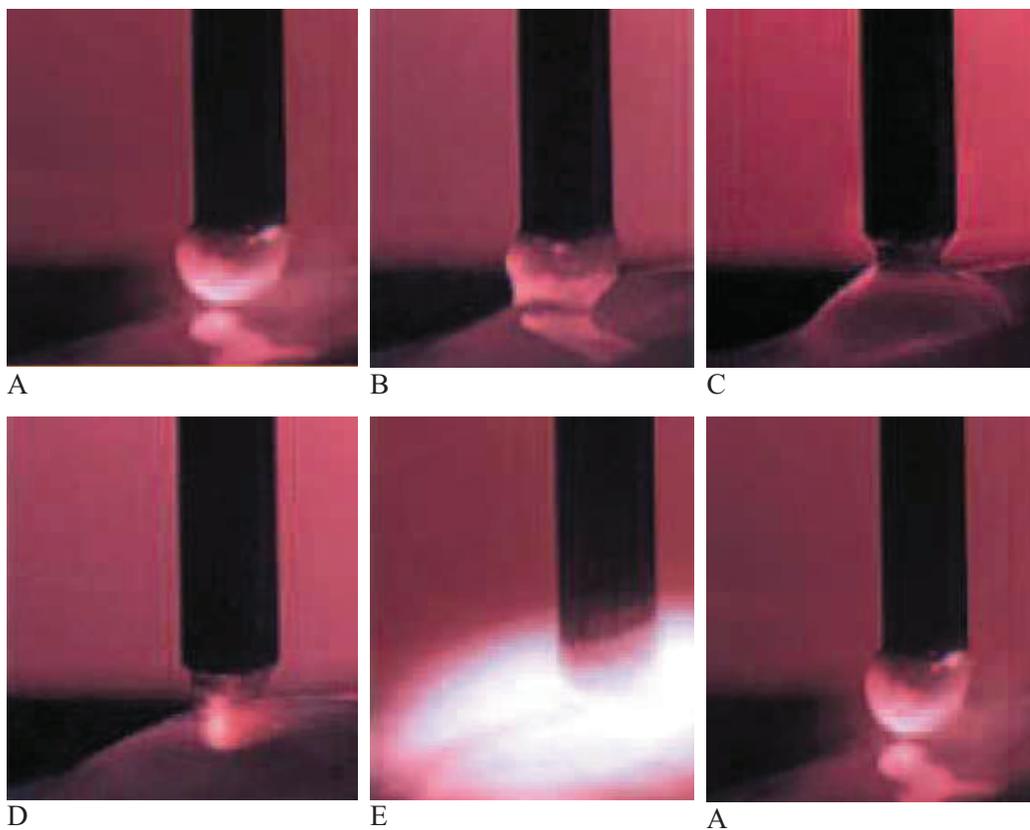
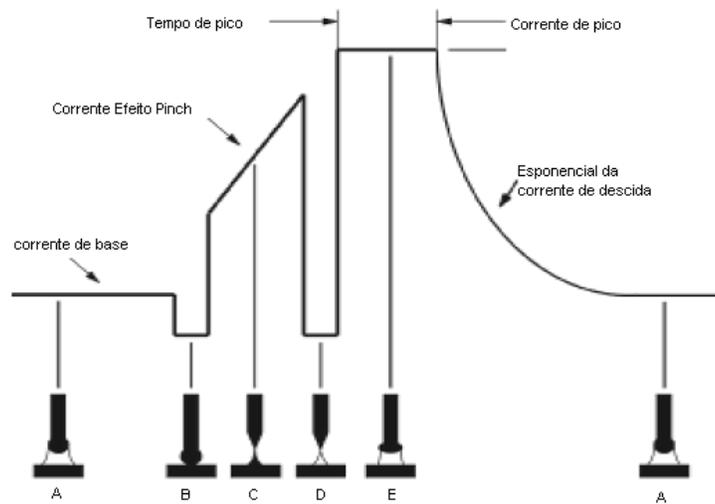


Figura 2.6 – Esquema de funcionamento do processo *STT*[®].

As variáveis do processo podem ser compreendidas pelo entendimento da operação da fonte inversora. A fonte inversora Invertec *STT*[®] II (Guia de operação da máquina *STT*[®]) não é uma fonte de corrente constante, nem uma fonte de tensão constante. Comparando com fontes convencionais, o processo *STT*[®] utiliza em geral diâmetro do arame pouco maior que as fontes de energia convencionais. O maior diâmetro do fio eleva a taxa de deposição até o limite de 1,58 mm. Arame com diâmetro inferior a 0,9 mm não são usuais para a maioria das aplicações. A fonte *Invertec STT*[®] II é uma máquina de corrente controlada que é capaz de mudar a corrente do eletrodo de forma rápida, a fim de responder às exigências instantâneas de desempenho do arco e otimizá-lo. Através de sensíveis mudanças na corrente de soldagem e, por isso, mudanças no estado do eletrodo, a fonte forneceu diferentes correntes de saída para minimizar o respingo. A corrente de pico e a corrente de base são os ajustes que podem ser manipulados. A velocidade de alimentação do arame controla a taxa de deposição. A corrente de pico controla o comprimento do arco. A corrente de base controla o contorno do cordão. QEC. aumenta a potência do arco.

Corrente de pico - Nadzam (2012) comenta que a corrente de pico é a corrente nominal para o pulso de alta energia. Durante o tempo de duração da corrente de pico a gota fundida se destaca do eletrodo. O aumento da corrente de pico aumenta a corrente média de soldagem e a região de penetração na soldagem. O tempo de permanência da corrente no pico, expressa em milissegundos, está associado ao tamanho das gotas de metal fundido.

À medida que o tempo de permanência na corrente de pico aumenta ocorre a diminuição do tamanho das gotas metálicas fundidas. O controle da corrente de pico ajuda a estabelecer o comprimento do arco e promover boa fusão pelo preaquecimento que fornece à região da solda. O comprimento do arco controla a forma da face da soldagem de raiz, como mostra a Figura 2.7.

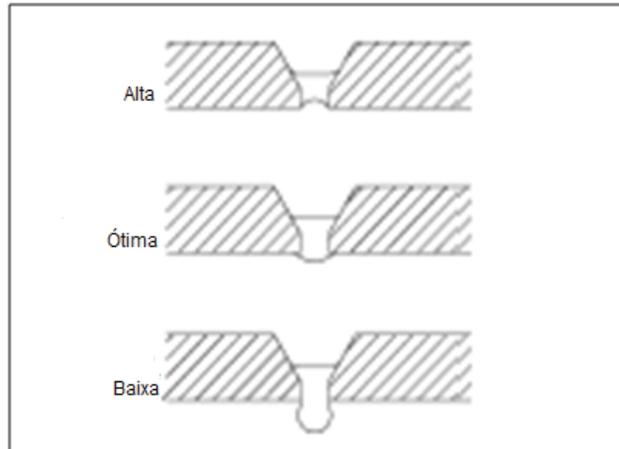


Figura 2.7 – Influência da corrente de pico na soldagem de raiz.

Níveis altos de corrente de pico provocam o alargamento do cordão enquanto aumenta o comprimento do arco. Valor demasiadamente alto favorece transferência metálica globular e aumento região da penetração, enquanto valor muito baixo provoca instabilidade do arco e colamento do arame sobre a poça. O ajuste perfeito leva a ausência de respingos para um mínimo de agitação do banho metálico. A utilização de gás CO_2 sem misturas (100% CO_2) requer uma corrente de pico levemente mais alta que a usada para mistura de gases com o argônio em altas concentrações.

Corrente de base - O controle da corrente de base fornece o ajuste fino para controle do arco que afeta a curvatura da superfície do metal depositado, como mostra a Figura 2.8. Fornece o controle mais preciso para o aporte térmico na soldagem. Um ajuste muito alto neste nível modifica o modo de transferência metálica para globular e aumenta o nível de respingos. Ajustes baixos dificultam a recepção da gota metálica tornando a superfície do cordão mais curvo, devido ao prejuízo na característica de molhamento da poça de fusão, como pode ser visto na Figura 2.8.

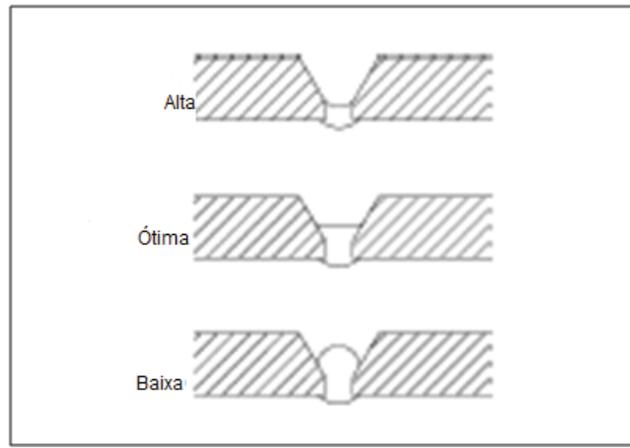


Figura 2.8 – influencia da corrente de base na soldagem de raiz.

Ângulo de trabalho - Este parâmetro representa o posicionamento da tocha tomado sobre um plano perpendicular ao seu movimento de avanço, como mostra a Figura 2.9. Influência diretamente na distribuição do calor gerado no processo.

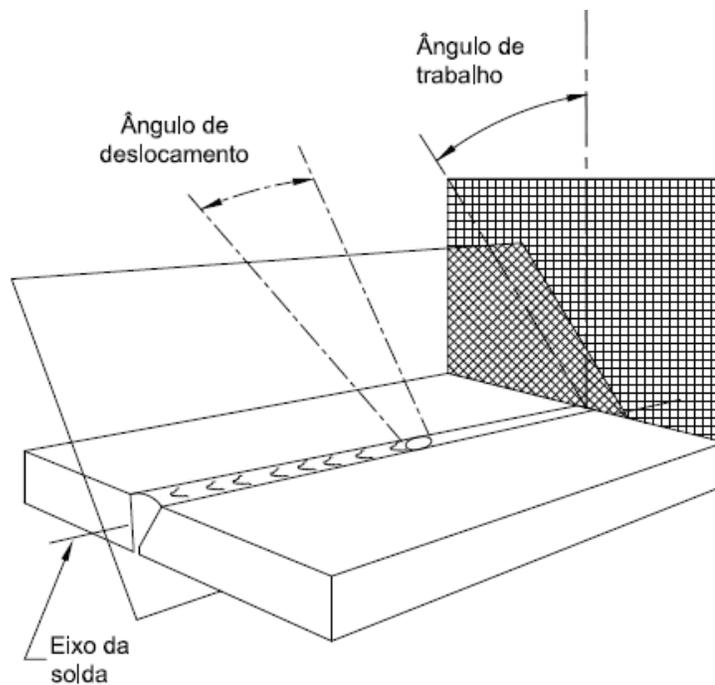


Figura 2.9 – Ângulo de trabalho.

2.2.2 Influência das variáveis na presença de descontinuidades

A literatura cita a relação entre o diâmetro do arame e a falta de fusão - PRCI project N° 43675CAP (2002). A utilização do diâmetro do arame consumível de 1,1 mm tem por objetivo reduzir esse problema.

A morfologia do cordão é fortemente influenciada pelos parâmetros de soldagem aplicados. A manipulação dos parâmetros corrente de base, corrente de pico e QEC – Caimento Acentuado de Corrente - definem as características morfológicas do cordão.

Os defeitos normalmente esperados para o processo *STT*[®] estão relacionados com o baixo aporte de calor e baixo nível de penetração, portanto a falta de fusão é um defeito recorrente PRCI project N° 43675CAP (2002). A forma de tentar reduzir ou eliminar este defeito será a pesquisa de parâmetros de soldagem finamente ajustados.

2.2.3 Vantagens e desvantagens

A busca por um processo semi-automatizado foi, sem dúvida, o fator que orientou a busca por esta solução. Os trabalhos até então desenvolvidos com soldadores qualificados em ER exigem desta grande habilidade manual, o que nem sempre é possível em atividade de campo.

Soldagem em todas as posições, baixo nível de respingos e alto rendimento na deposição metálica foram vantagens encontradas em soldagens de montagem de oleodutos e gasodutos com o processo *STT*[®] (ALCATRÃO, 2005).

Srinivasan (2011) discute a taxa de formação de fumos metálicos como parâmetros de tensão e velocidade de alimentação de arame, na soldagem de chapas de aço baixa liga e alta resistência, com processo *FCAW* com corrente constante e com *STT*[®]. O trabalho conclui que a utilização do processo *STT*[®] leva a redução na taxa de formação de fumos entre 40% a 50%, quando comparado com o modo de corrente constante apenas.

O processo é essencialmente utilizado na soldagem de raiz, sendo aplicado em montagens dutoviárias e estruturas tubulares de plataformas.

Por utilizar arame sólido com proteção gasosa a formação de escoria é bastante incipiente o que acarreta tempo reduzido para limpeza, requerendo apenas uma breve escovação mecanizada. Com isso o tempo para execução do passe de raiz fica restrito à 10 minutos, para um duto de 36 polegadas, uma redução significativa quando comparada aos 40 ou 50 minutos, em média, para aplicação de dois passes de raiz e esmerilhamento, pelo processo convencional, como citado no trabalho de (ALCATRÃO, 2005).

Recentemente o processo foi utilizado na construção de um gasoduto de 25 km, 203 mm de diâmetro, notadamente na solda de raiz, citado em artigo no *Pipeline and Journal Gás* (2004). O processo *STT*[®] foi utilizado em conjunto com arame tubular com proteção gasosa obtendo aumento da produção entre 10 a 15%, com redução da mão de obra em 50%, que representa uma redução significativa nos custos do projeto. Foram soldadas 2778 juntas de topo com índice de reparo inferior a 1%. No Brasil os contratos apontam para o índice limite de 5% , como cita a norma Petrobras N-133J (2005).

A espessura do passe de raiz deposita entre 3 mm e 6 mm, equivalente ao passe de raiz mais o passe quente como no processo por ER celulósico, podendo ser aplicado sobre aquele, enchimento por algum processo de maior rendimento, tal como arame tubular ou arco submerso, sem risco de perfurar a raiz de *STT*[®]. O processo proporciona baixíssimos níveis de hidrogênio difusível, como citado em PRCI project N° 43675CAP (2002), sendo aplicado a todos os tipos de aços API, além de tubos construídos em aços inoxidáveis. Substitui o passe de raiz com *TIG* com vantagens em custos e simplicidade operacional. Minimiza distorções devido a ser um processo de baixo aporte térmico. Controla corrente independente da velocidade de alimentação do arame, ainda utiliza somente CO₂ para aços carbono (ZAPATA, 2003).

A utilização do processo *STT*[®] para tubos que apresentem composição química com CE acima de 0,40% - PRCI project N° 43675CAP (2002), encontrados em linhas antigas construídas com material com classificação *API 5L* revisão 2010, pode ser vantajosa.

As desvantagens são relacionadas principalmente ao alto custo dos equipamentos, máquina inversora, além do treinamento necessário para as equipes de soldadores que devem ter qualificação certificada pelas normas internacionais – API 1104 (2010), ASME B31.8 (2010) e

ASME B31.4 (2010) e treinamento específico no processo, que vai de 8 horas para soldadores *TIG/MIG/MAG* até 24 horas para soldadores ER (ALCATRÃO, 2005).

Durand e coautores (2007), comentam a aplicação de uma EPS para soldagem de aço *API 5L X80* com *TM4C* na raiz e arame tubular com proteção gasosa no enchimento e acabamento, com vantagens no tempo de execução e penetração adequada no passe de raiz.

A aplicação de dupla calha sobre a região danificada, isto é, para conter a região que apresenta perda de espessura, possui maior fator de segurança que opção por reparo aplicado pela técnica de deposição de camadas soldadas diretamente sobre o ponto de baixa espessura. Além disso este processo é limitado a aplicações onde a perda de espessura fique abaixo de 65% da espessura nominal do tubo (BAEK, 2006).

2.3 Aços API

A indústria do petróleo utiliza, para especificação dos tubos empregados na construção de gasodutos e oleodutos, o critério da norma *API 5L*. Esta designação utiliza a composição química e os limites das propriedades mecânicas para especificação dos dutos.

2.3.1 Soldabilidade dos aços API

A soldabilidade dos aços API pode ser prevista analiticamente através de fórmulas empíricas de CE. Para tanto é necessário o conhecimento da composição química do material de fabricação do tubo. A seleção da formulação para CE adequada depende exclusivamente do teor de carbono obtido pela análise química. A fórmula de obtenção deste parâmetro é indicada na norma API 5L, conforme segue:

Até 0,12% C, inclusive:

$$CE_{Pcm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \quad (\text{Equação 2.1})$$

Observação: Para teores de Boro inferior a 0,0005% o teor de Boro poderá ser considerado nulo para cálculo do CE_{Pcm} . API 5L 2010.

A equação (1), conhecida como equação de Ito e Bessyo, considera que um aço com CE_{Pcm} de 0,35 ou inferior terá boa soldabilidade – Departments of Defense – USA-2005.

Acima de 0,12%C:

$$CE_{IIW} = C + Mn/6 + (Cu + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (\text{Equação 2.2})$$

Onde :

- . $C_{IIW} < 0.40$, o material é considerado insensível ao problema;
- . $C_{IIW} > 0.40$, o material é fortemente sensível, exigindo a soldagem com processos de baixo hidrogênio, aplicação de alto aporte térmico e uso de pré-aquecimento.

Observação: Os símbolos dos elementos químicos representam sua fração em massa.

2.4 Considerações metalúrgicas - descontinuidades na soldagem

Os defeitos estão estruturalmente relacionados com os parâmetros metalúrgicos e tecnológicos do processo de soldagem (MODENESI, 2004).

Os defeitos que podem ocorrer no processo de soldagem aplicado são:

- Poros;
- Trincas;
- Mordeduras;
- Falta de penetração;
- Falta de fusão.

Poros - Evolução de gases durante a solidificação da solda.

Trincas - São consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem. São fortes concentradores de tensão, podendo favorecer o início da fratura frágil na estrutura soldada. As

trincas podem ser externas, isto é atingirem a superfície, ou totalmente internas, sendo detectados apenas por ensaios não destrutivos como ultra som ou radiografia.

A trinca a frio, ocorre principalmente na ZTA, podendo ocorrer também na ZF de aços de maior resistência mecânica. A trinca aparece depois de um período e cresce lentamente. Os principais fatores que favorecem o surgimento de trinca a frio são:

A - Quantidade de hidrogênio absorvido;

B – Nível de tensões residuais;

C - Microestrutura sensível;

D – Temperatura abaixo de 100°C;

O hidrogênio é gerado principalmente pela decomposição da umidade presente no revestimento de eletrodos ou nos fluxos, pela presença de umidade. Contaminantes (graxas, tinta, etc.) na superfície da junta e a decomposição de material orgânico presente no revestimento dos eletrodos também devem ser considerados.

As tensões residuais são inerentes ao processo de soldagem e provem de montagens isostáticas, onde restrições ao movimento durante a solidificação da poça de fusão ocasionam elevado nível de tensões trativas. Um projeto adequado e uma sequência de montagem correta podem minimizar esse efeito. As tensões trativas favorecem o coalescimento de micro trincas levando ao rompimento.

A microestrutura martensítica é o constituinte mais sensível à esse problema, originada pela velocidade de resfriamento acelerada, apresenta pouca ou nenhuma possibilidade de dissolução de hidrogênio em sua estrutura tetragonal de corpo centrado. Durante o rápido resfriamento do cordão de solda, a transformação da austenita formará parcelas crescentes de martensita, quanto mais rápido for este processo de resfriamento (GRANJON, 2004).

Alguns controles podem ser adotados para evitar este tipo de problema, tais como:

Seleção de materiais - A sensibilidade aumenta com o aumento da temperabilidade do material. Uma forma simples de se estimar a temperabilidade pode ser obtida pela aplicação das equações 1 ou 2, que calcula o índice CE.

Para materiais que apresentem valores inapropriados de CE pode-se utilizar a recurso de diluição através da aplicação de uma camada de deposição com consumível de baixo CE, selecionado apropriadamente. Este processo é conhecido como amanteigamento (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Aplicação de amanteigamento na superfície do chanfro da dupla calha.

Controle de velocidade de resfriamento: Utilizar menor velocidade de resfriamento, pela adoção de alto aporte térmico. Evita a formação de martensita e possibilita maior tempo para o hidrogênio se difundir para fora do material, e por último minimizar o nível de tensões, através de um projeto adequado de montagem, evitando movimento das peças durante a solidificação do cordão de soldagem. A aplicação de cintas metálicas para fixar as DC auxilia o processo (Figura 2.3).

Falta de Fusão - O termo refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal de base. É causado pela manipulação incorreta do eletrodo falta de limpeza da junta, energia de soldagem insuficiente impossibilitando o arco atingir algumas regiões da junta.

2.5 Técnicas para evitar o risco de perfuração e trinca pelo hidrogênio

A presença do hidrogênio pode ter origem no ar atmosférico, na umidade do consumível, na ausência ou inadequação de limpeza da junta a soldar, entre outras (HOWDEN, 1975).

Quando o metal de adição é depositado e se funde com o metal de base, ele está no seu estado de expansão máximo. No resfriamento, o metal de solda tende a se contrair para o volume que normalmente ocuparia à temperaturas mais baixas, mas como ele está ligado ao metal base que possui regiões de menor temperatura, a sua contração fica restringida causando assim as tensões residuais.

Com uma sequência de soldagem bem definida associada a uma boa técnica de soldagem pode-se conseguir avanços no intuito de reduzir o nível de tensões residuais.

Acima de 100°C o hidrogênio tem mobilidade na microestrutura ferrítica sendo assim, a trinca a frio ocorre normalmente abaixo desta temperatura. Esta trinca a frio pode ocorrer até 72 horas após a soldagem. Eliminando qualquer um dos três itens geradores do processo, pode-se evitar a trinca a frio.

Uma inspeção prévia deve verificar a condição física das instalações, garantir adequação dos materiais às especificações técnicas e certificar que os procedimentos atendam as exigências da norma aplicável.

Quanto ao risco de perfuração, como mostra a Figura 2.11, alguns cuidados são recomendados, como os citados abaixo:

Evitar a soldagem ou trepanação a uma distância inferior a 460 mm de um flange ou de uma conexão soldada ou roscada ou inferior a 70 mm de uma junta soldada, incluindo a solda longitudinal de tubulação, exceto quando uma revisão da engenharia determinar sua aceitação segundo a N2163E (2011). Deve-se garantir que a espessura local do metal base suporte a instalação de uma nova conexão assim como atender requisitos da norma aplicável. O CE deve ser determinado e avaliado o risco de obtenção de estruturas suscetíveis ao trincamento. Caso seja detectada dupla laminação no metal base, deve ser mantida uma distancia mínima da solda. É essencial o planejamento, dimensionamento, identificação, duração prevista para os trabalhos, previsão meteorológica, espaço físico, acesso, preparação da superfície de montagem e soldagem, atribuição de responsabilidade do corpo técnico envolvido, análise do tipo e condições operacionais do fluido movimentado, presença de processo corrosivo no local (interno e externo) da soldagem.



Figura 2.11 – Perfuração provocada por procedimento de soldagem incorreto.

Nos trabalhos de Silva (2005), é citado que a penetração é determinada pelo tempo de arco aberto, quando o processo é transferência por curto-circuito com controle de corrente. Conclui que este fato influencia o tamanho médio das gotas metálicas transferidas.

Existem programas computacionais para estimar a temperatura interna da parede do duto, com intuito de evitar perfuração durante a soldagem. A temperatura interna alcançada durante a soldagem, nesses casos, poderá ser obtida em função dos parâmetros de soldagem e das condições operacionais, podendo ser utilizado o modelo de análise térmica do Instituto Battelle (PEREZ, 2005) (PRCI V4.2, 2002).

A realização da qualificação do procedimento de soldagem deverá atender as condições térmicas avaliadas no duto. O aporte térmico, condições de fluxo (temperatura e velocidade) deverão ser reproduzidas para obter a habilidade térmica do duto compatível com o CE deste. É importante a simulação considerando a possibilidade de fluxo parado, pois nesta condição os riscos de perfuração pelo aporte aplicado são maiores.

Quando o material possui composição química em tal concentração que o índice CE supere o limite recomendável de 0,40, recomenda-se aplicar a técnica de amanteigamento, como mostrado na Figura 2.10. Esta técnica consiste na aplicação de passes com elevado aporte térmico, com uso de consumível com CE baixo, para promover a diluição do metal base, e dessa forma alterar o CE, eliminando o risco de formação de estruturas suscetíveis, como mostra a Figura 2.10. Para a aplicação em soldagem de duplas calhas, é comum utilizar-se o eletrodo

básico embalado à vácuo com certificado de garantia fornecido pelo fabricante, de tal modo que o nível de hidrogênio difusível atinja no máximo 4 ml por 100 g de metal depositado.

Este processo poderá ser aplicado na superfície do chanfro da dupla calha ou diretamente sobre a tubulação, em passes com aporte controlado, em camadas duplas, utilizando a técnica de passes de revenimento, que consiste em recobrir um passe com outro imediatamente seguinte, aplicando aporte levemente mais alto, de acordo com a N2163E (2011).

Outro parâmetro utilizado como referencia é a dureza que permite prever a microestrutura. A dureza deverá ser inferior a 350 HV10 [32]. O controle do pré-aquecimento, e a temperatura interpasse são fatores que também auxiliam no controle de trinca a frio (N2163E, 2011).

Na soldagem em operação a técnica de aplicação de pré-aquecimento não encontra facilidades, pois o fluxo rapidamente retira o calor aplicado. Esta operação deverá ser aplicada apenas para garantir a ausência de umidade da superfície.

2.6 Aplicações de normas e procedimentos técnicos

O sistema da qualidade exige a aplicação de normas e procedimentos técnicos a fim de se obter uma garantia de menor índice de defeitos ou retrabalhos possíveis, além, obviamente, do respaldo jurídico associado ao seu uso.

O documento que detalha as condições na qual o processo de soldagem de soldagem deverá ser aplicado é chamado de Especificação de Procedimento de Soldagem, simplesmente chamado por EPS. Segundo a visão de Marques (2005), “A EPS é um documento no qual os valores permitidos de diversas variáveis do processo estão registradas para serem adotados, pelo soldador ou operador de soldagem, durante a fabricação de uma dada junta de soldagem”. Nesta EPS são especificadas as variáveis essenciais, não essenciais e suplementares (ASME IX, 2010).

As variáveis essenciais são parâmetros que se alteradas requerem nova qualificação da EPS (ASME IX, 2010).

As variáveis não essenciais são parâmetros que se alterados não requerem nova qualificação da EPS (ASME IX, 2010).

As variáveis essenciais suplementares são exigidas quando é requerido tenacidade na qualificação do procedimento de soldagem.

O Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem - RQPS - é um documento técnico que evidencia que a solda executada conforme a EPS atende aos requisitos mínimos de projeto. Para qualificação da EPS são feitos ensaios mecânicos para estabelecer as propriedades mecânicas da solda (ASME IX, 2010).

A norma de qualificação aplicada estabelece os critérios de aceitação dos testes e ensaios requeridos para qualificação do procedimento de soldagem.

O apêndice B da norma API 1104 (2010) define as condições de qualificação de soldadores e procedimento de soldagem em operação. Este documento normativo é indicado pelas normas de projeto de dutos e gasodutos (ASME B31.8, 2010) (ASME B31.4, 2010) e linhas internas (ASME B31.3, 2010) para situações de soldagem em carga.

Entende-se por inspetor de soldagem, o profissional qualificado e certificado, segundo os requisitos estabelecidos pelo sistema nacional de qualificação e certificação de inspetores de soldagem, para exercer as atividades de controle de qualidade relativas à soldagem (ABNT 14832 – 2003).

Entende-se por soldador ou operador de soldagem o profissional capacitado e qualificado para operar o equipamento de soldagem manual, automático, mecanizado ou robotizado (N1438E, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e equipamentos

3.1.1 Metal base e consumíveis

Foram utilizados dois tubos de aço de especificação API 5L X65 PSL2 de 610 mm de diâmetro e 550 mm de comprimento, sendo um deles com 5,3 mm de espessura e o outro com 6,4 mm de espessura.

Cada um deles foi seccionado em dois segmentos, um com 300 mm de comprimento e o outro com 250 mm de comprimento. Os segmentos de tubos com 250 mm de comprimento foram recortados para dar origem às calhas, com as dimensões de 250 mm de comprimento por 50 mm de largura. Foram recortadas oito calhas para cada espessura de parede de duto, formando dois conjuntos de um tubo com oito calhas para cada espessura. As quatro primeiras calhas foram soldadas sobre o tubo aberto, com sua superfície interna exposta ao ar, as quatro restantes foram soldadas sobre o mesmo tubo, porém com as extremidades tampadas, formando um volume confinado no interior deste tubo e preenchido com água, à temperatura ambiente. Ao final do processo de soldagem das amostras foram obtidas quatro calhas soldadas sobre um tubo aberto e quatro calhas soldadas sobre um tubo com água em seu interior, para cada espessura. Como consumível, marca *Pipeliner 80S-G*, fabricante *Lincoln Electric CO*. Sua composição química deve ser determinada após o processo de deposição, como determina a norma AWS A5.28 (2005). A Tabela 3.1 mostra a composição química do metal base e do metal de adição após soldagem. Como gás de proteção, utilizou-se CO_2 , com pureza 99,99%. Utilizou-se a vazão de 14 litros por minuto.

Tabela 3.1 – Composição química do metal base e do metal de adição após soldagem. As porcentagens são dadas em massa.

Materiais	C	Mn	Cu	Ni	Cr	Mo	V	C_{eq} P_{cm}
Conjunto tubo / calha com espessura de 5,3mm	0,11	1,30	0,0	0,0	0,02	0,004	0	0,18
Conjunto tubo / calha com espessura de 6,4mm	0,12	0,75	0,0	0,0	0,02	0,004	0,0	0,16
Consumível como soldado	0,106	1,08	0,0	0,004	0,016	0,30	0,002	0,18

3.1.2 Equipamentos

Foi utilizada uma fonte de soldagem do tipo inversora modelo Invertec *STT[®] II* acoplada à uma máquina alimentadora de arame modelo *LN742* e uma tocha modelo *Magnum 200* montada com bico modelo M16093, de 0,50 polegadas de diâmetro, todos produzidos pela fabricante *Lincoln Electric Co.*

O dispositivo para movimentação da tocha foi uma tartaruga de oxi-corte modelo *GO-Fer III* produzido pela empresa *Bug-O Systems*, com motor, permitindo variações de velocidades entre 50 mm por minuto a 1600 mm por minuto.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação do dispositivo para soldagem

Para analisar a viabilidade do processo de soldagem MAG com transferência por curto circuito com controle de corrente, comercialmente chamado *STT*[®], para aplicação na soldagem circunferencial de selagem da dupla calha, construiu-se o dispositivo mostrado na Figura 3.1-a. Para tanto, utilizou-se a infraestrutura do Laboratório de Soldagem do Serviço de Inspeção e Qualificação (SEQUI) da Unidade de Negócios Engenharia, da Petrobras, localizado na área da Refinaria Henrique Lage (REVAP).

O dispositivo, construído para possibilitar a soldagem de junta sobreposta, formada entre a calha e o tubo, posicionada na direção longitudinal, é formado por uma base rotatória que sustenta o tubo e garante o nivelamento da junta sobreposta e o alinhamento da direção de soldagem. O tubo é selado em suas extremidades, visando que água seja armazenada em seu interior, para simulação de dutos em operação de transporte de fluidos. Adicionalmente, a soldagem foi também realizada em tubo vazio, em condição de menor taxa de resfriamento. Uma calha com 250 mm de comprimento por 50 mm de largura, retirada do próprio tubo com espessura de 5,3 ou 6,4 mm, é posicionada longitudinalmente sobre o tubo, conforme esquema mostrado na Figura 3.1-b.



Figura 3.1-a – Dispositivo construído para soldagem.

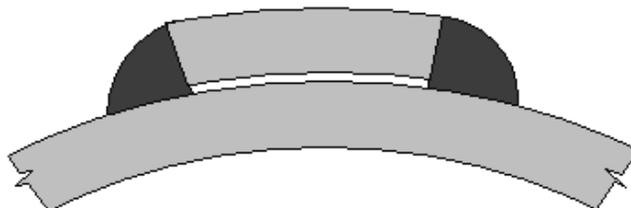


Figura 3.1-b – Posição de montagem da calha sobre o tubo.

A montagem é finalizada pela fixação da calha ao tubo por ponteamto em suas extremidades. Tal montagem permite a deposição de um filete de soldagem na direção longitudinal do tubo e, desta forma, simular as condições de soldagem de uma dupla calha.

A tocha foi montada em uma tartaruga, dispositivo para realizar sua movimentação sobre a junta, com um ângulo de trabalho de 45° , possibilitando atingir o vértice da calha em contato com o tubo. As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a tocha fixada ao dispositivo de movimentação e a inclinação da mesma em relação à junta, respectivamente.



Figura 3.2 – Tartaruga: Dispositivo de fixação e movimentação da tocha.



Figura 3.3 – Inclinação da tocha em relação à junta - ângulo de trabalho de 45°.

3.2.2 Parâmetros de soldagem

A corrente de soldagem utilizada foi de 250, 300 e 350 A como corrente de pico e 65 e 80 A como corrente de base. Com estas correntes de soldagem, obteve-se um processo com estabilidade do arco, baixo nível de respingos e deposição adequada do metal de adição..

A queda exponencial de corrente (QEC) caracteriza a forma como a corrente de pico cai para a corrente de base, o que interfere diretamente no aporte térmico e volume de metal depositado. Para uma queda mais acentuada, tem-se um menor aporte térmico, enquanto que uma queda mais lenta resulta em um maior aporte térmico. Foram utilizados três níveis para a QEC, os quais foram definidos como rápida, intermediária e lenta, resultando em aportes térmicos baixo, intermediário e alto, respectivamente.

A Velocidade do avanço da tocha foi mantida em 24 cm/min. Tal velocidade foi obtida pela regulagem diretamente na tartaruga, dispositivo de fixação e movimentação da tocha.

Para a definição da melhor distribuição de calor entre as partes da junta sobreposta, tais como a calha e o tubo, foram utilizados seis ângulos de trabalho, 10°, 20°, 35°, 45°, 55° e 65°, mostrados na Figura 3.4, mantendo-se a corrente de pico e de base em 300 A e 65 A, respectivamente, e QEC intermediário. Após a definição do ângulo de trabalho que forneça a distribuição de calor equilibrada, o mesmo foi mantido para as demais etapas do estudo.

Não foi utilizado pré aquecimento. Os tubos foram soldados com temperatura ambiente, entre 24° C a 27° C.

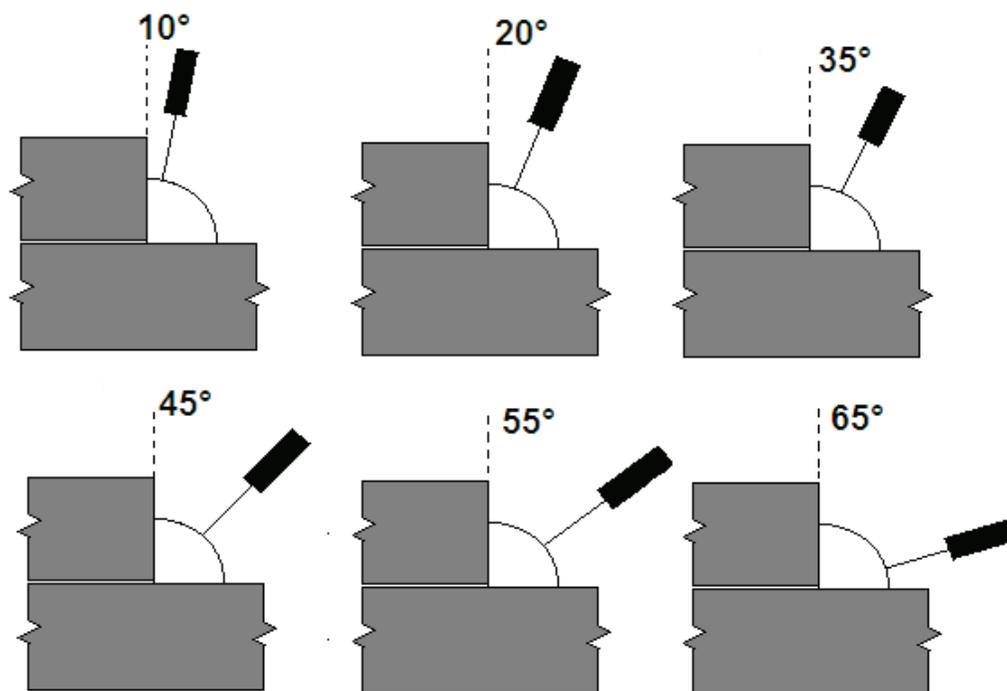


Figura 3.4 – Ângulos de trabalho utilizados no posicionamento da tocha.

3.2.3 Caracterização das juntas

A caracterização das juntas será obtida através ensaio visual, análise metalográfica e ensaio de dureza:

A) Inspeção visual. Os corpos de prova soldados devem estar isentos de mordeduras, trincas superficiais, cratera de fusão, falta de fusão e sobreposição. Após a soldagem, os corpos de prova foram inspecionados visualmente para se checar a qualidade da solda obtida quanto a presença ou ausência destes defeitos.

B) Análise metalográfica. Todos os ensaios metalográficos foram realizados nos laboratórios da empresa Proaqt Empreendimentos Tecnológicos Ltda, localizada no município de Osasco na grande São Paulo. Os corpos de prova foram preparados para análise metalográfica conforme ASME IX (2010) parágrafo *QW-470*. Foram seccionados, embutidos, polidos e

atacados com reagente nital 2%, realizado à temperatura ambiente. Foi utilizado microscópio digital Insize.

C) Ensaio de dureza. Foram realizados ensaios de dureza *Vickers*, com carga de 10 N.

Todos os ensaios de dureza foram realizados no laboratório da empresa Proaqt Empreendimentos Tecnológicos Ltda.

3.2.4 Identificação dos corpos de prova

A Tabela 3.2 apresenta o mapa da distribuição dos ensaios realizados sobre os corpos de prova obtidos na etapa experimental, para espessura de 5,3mm. O ângulo de trabalho foi fixado em 45°.

Tabela 3.2 – Corrente de base e pico, com e sem refrigeração, em dois níveis de Q.E.C.

esp. 5,3mm	sem refrigeração	com refrigeração	
correntes	Q.E.C.		
$I_{\text{pico}} / I_{\text{base}}$	lenta	lenta	rápida
250/65	11A3	15A3	15A1
250/80	13B2	16A3	16A1
300/65	13A3	17A3	17A1
300/80	14A3	15B3	15B1
350/65	11B3	16B3	14B1
350/80	13B1	14B2	17B1

A Tabela 3.3 apresenta o mapa da distribuição dos ensaios realizados sobre os corpos de prova obtidos experimentalmente, para espessura de 6,4mm, e ângulo de trabalho fixado em 45°:

Tabela 3.3 – Corrente de base e pico, com e sem refrigeração, em dois níveis de Q.E.C.

esp. 6,4mm	sem refrigeração	com refrigeração	
correntes	Q.E.C.		
$I_{\text{pico}} / I_{\text{base}}$	lenta	lenta	rápida
250/65	04B2	07A3	07A1
250/80	04A2	08A3	08A1
300/65	05B2	09A3	09A1
300/80	03A2	09B3	09B1
350/65	06A1	08B3	08B1
350/80	05B1	07B3	07B1

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Influência do ângulo de trabalho

A Figura 4.1 mostra as juntas soldadas de calha sobre duto com espessuras de 6,4 mm, corrente de pico de 300 A, corrente de base de 65 A, QEC intermediária entre alta e baixa, sem refrigeração, com ângulo de trabalho de 10° (a), 20° (b), 35° (c), 45° (d), 55° (e), 65° (f).

Os ângulos de trabalho que forneceram a melhor distribuição de penetração entre calha e duto foram os ângulos de 20° e 45°.

A distribuição de penetração equilibrada entre calha e duto observada na macrografia 4.1-b, ângulo de trabalho de 20°, pode explicada pela perda de alinhamento da tocha ao focar o vértice da junta, durante a aplicação da soldagem. O ângulo reto formado entre o perfil do cordão de solda e a superfície do metal base do duto representa um fator de concentração de tensões, portanto desfavorável. As amostras 4.1-e e 4.1-f apresentam falta de fusão e este defeito pode ser atribuído ao excessivo ângulo de trabalho. Com o posicionamento do ângulo de trabalho acima ou abaixo de 45°, o posicionamento da tocha favorece a deposição preferencial sobre o duto ou sobre a calha, respectivamente.

O ângulo de 45° é o que fornece a penetração balanceada entre a calha e o duto com a tocha posicionada corretamente no vértice da junta e, em conjunto com parâmetros de soldagem adequados, poderá fornecer concavidade adequada ao perfil do cordão de solda, evitando a concentração de tensão nos vértices do cordão de solda.

Nas soldagens com ângulo de trabalho de 55° e 65° observou-se perda estabilidade do processo de soldagem causado pelo distanciamento da tocha à superfície de soldagem, prejudicando o fornecimento de gás de proteção, o que propiciou a perda de estabilidade do arco. Observou-se que o aumento na vazão de gás para 20 litros por minuto não resultou em correção para esta anomalia.

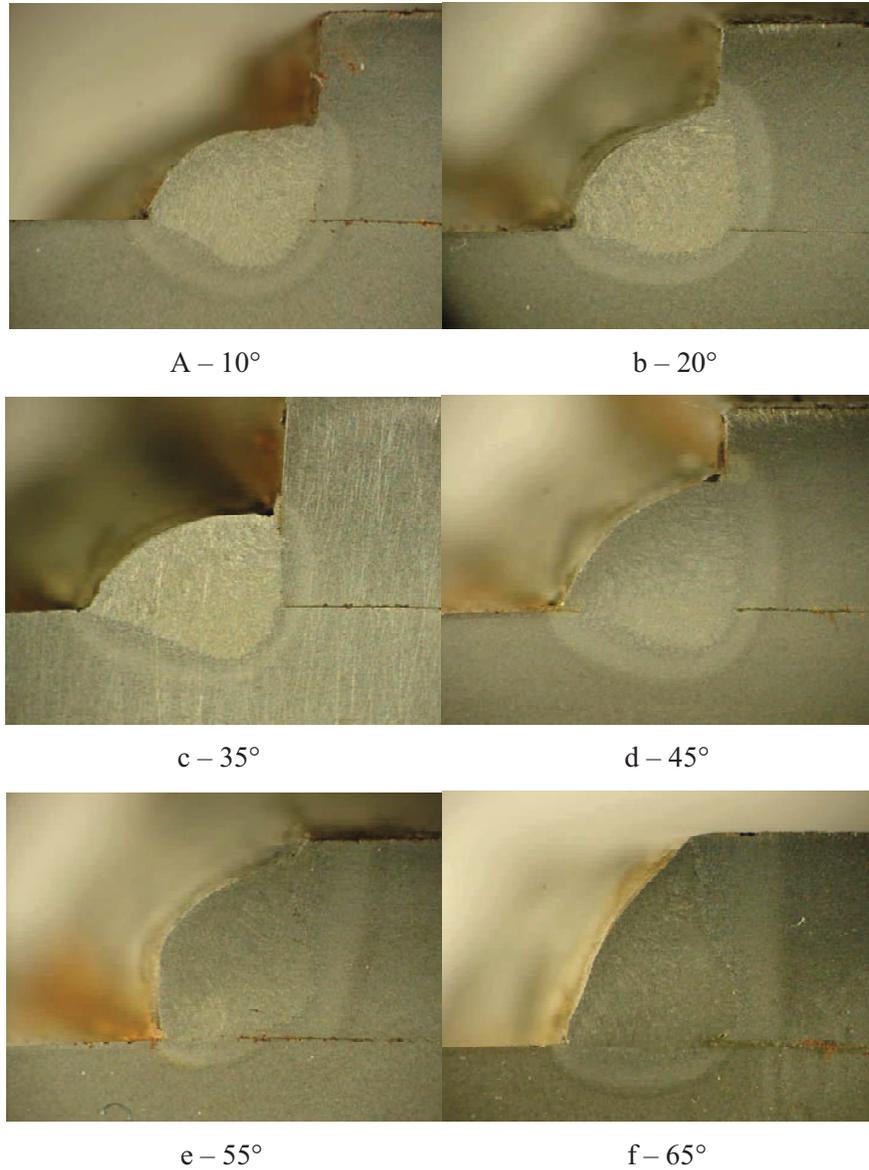
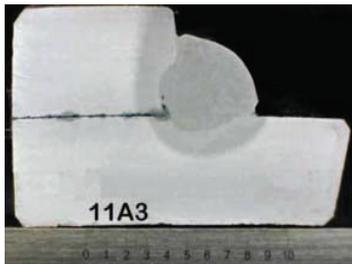


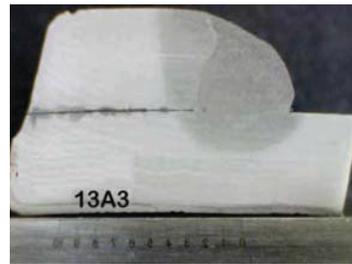
Figura 4.1 – Juntas soldadas de calha sobre duto com espessuras de 6,4 mm, corrente de pico de 300 A, corrente de base de 65 A, QEC intermediária entre alta e baixa, sem refrigeração, com ângulo de trabalho de 10° (a), 20° (b), 35° (c), 45° (d), 55° (e), 65° (f), com indicação da zona fundida.

4.2 Inspeção macrográfica, inspeção visual e defeitos e dureza

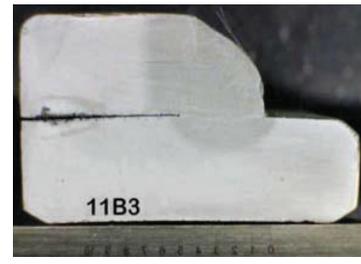
4.2.1 Ensaio de Macrografia e análises dos corpos de prova de 5,3 mm



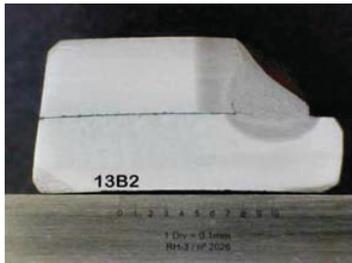
a



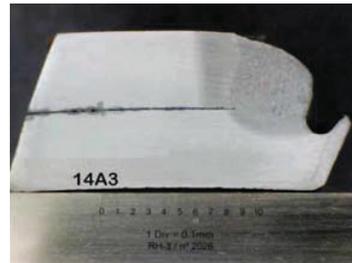
b



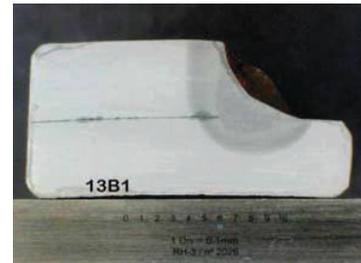
c



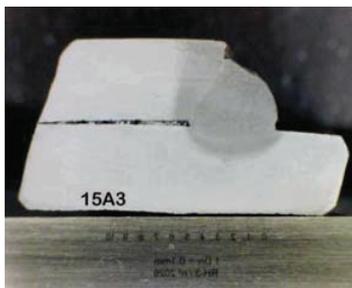
d



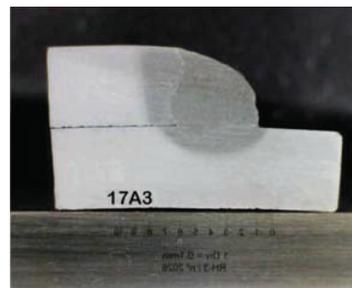
e



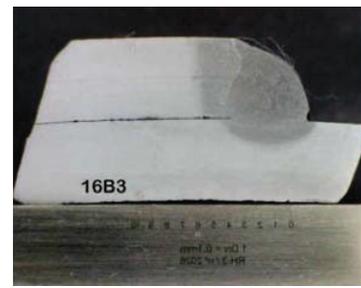
f



g



h



i

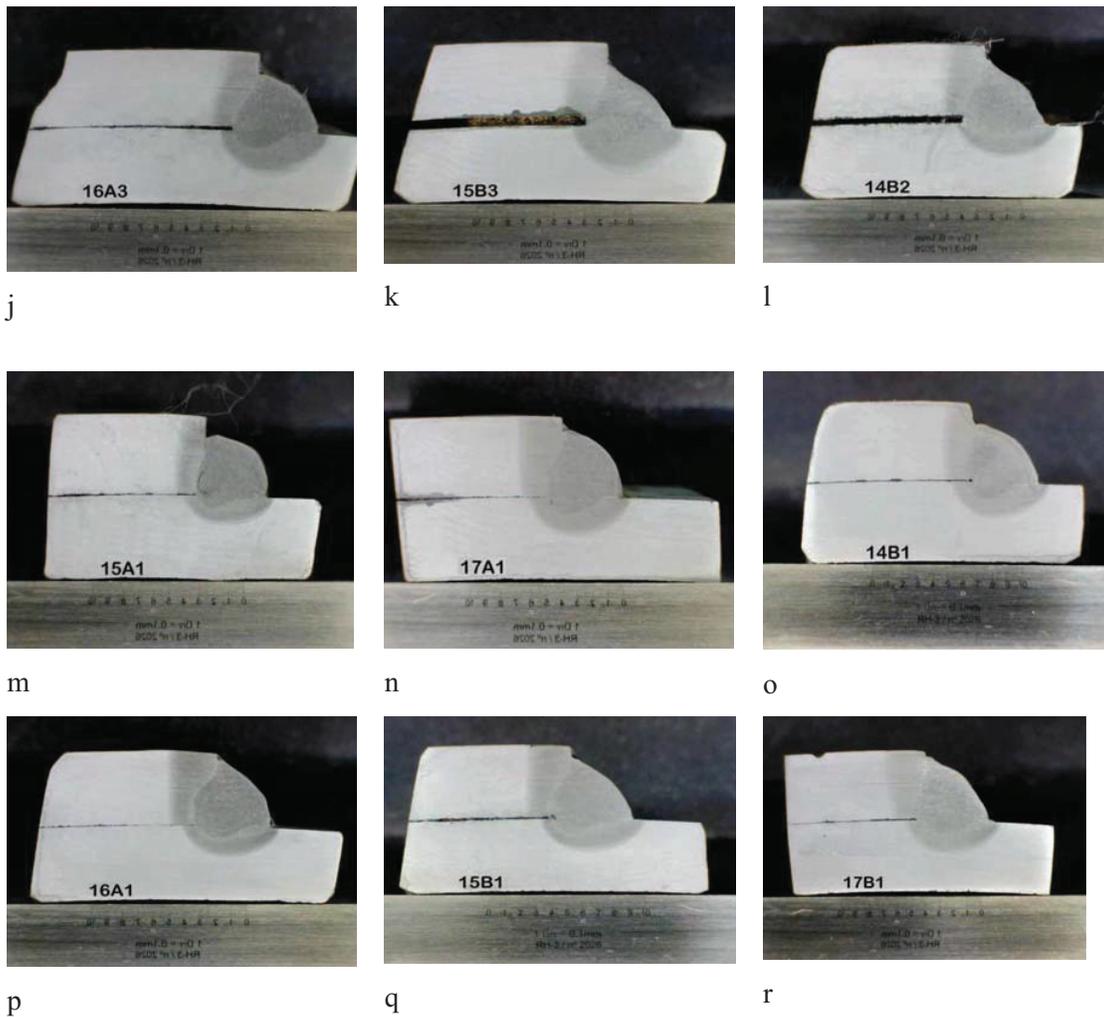


Figura 4.2 – Juntas soldadas de tubo e calha com 5,3 mm de espessura, com correntes de pico de 250 (a, d, g, j, m, p), 300 (b, h, k, n, q) e 350 A (c, f, i, l, o, r), correntes de base de 65 (a, b, c, g, h, i, m, n, o) e 80 A (d, e, f, j, k, l, p, q, r), QEC lenta (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), QEC rápida (m, n, o, p, q, r), sem refrigeração (a, b, c, d, e, f) e com refrigeração (g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r).

4.2.1.1 Análise da corrente de pico

As Figuras 4.2-a, 4.2-b e 4.2-c mostram macrografias de juntas soldadas de tubo e calha com ambos 5,3 mm de espessura, com parâmetros de soldagem iniciais, isto é, sem refrigeração, QEC lenta e corrente de base de 65 A, com diferentes correntes de pico: 250 (a), 300 (b) e 350 A (c). Pode observar-se que o aumento da corrente de pico, de 250 para 300 A, com os demais parâmetros constantes, produziu uma redução da penetração e aumento da ZTA. Pode-se observar que o aumento na corrente de pico de 250, 300 e 350 A produziu aumento no volume depositado. O aumento da corrente de pico produz aumento da corrente média de soldagem e produz ainda o alargamento do cordão, concomitante à tendência a produzir transferência metálica globular.

O efeito do aumento da corrente de pico também pode ser verificado pela análise das amostras soldadas com corrente de base de 80 A e demais condições idênticas às iniciais, macrografias 4.2-d, 4.2-e e 4.2-f, onde é possível observar redução na penetração com aumento da corrente de pico. A macrografia 4.2-e sofreu limpeza por disco abrasivo, na margem da solda, gerando alterações no volume depositado e aspecto da ZTA.

Nas Figuras 4.2-g, 4.2-h e 4.2-i, soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de resfriamento pode-se observar que o aumento da corrente de pico gerou aumento da ZTA e aumento do volume metálico depositado e, portanto, alargamento do cordão. Nestas Figuras não foi observado redução da penetração. Este fato pode ser explicado pela provável perda de centralização da tocha em direção ao vértice da junta associado ao aumento da distribuição de aporte obtida pelo alargamento do cordão.

Analisando as seguintes Figuras: 4.2-j, 4.2-k e 4.2-l, soldadas em condições que diferem da condição inicial pela aplicação de resfriamento e corrente de base de 80 A; as Figuras 4.2-m, 4.2-n e 4.2-o, soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de resfriamento e QEC rápida e, finalmente as Figuras 4.2-p, 4.2-q e 4.2-r, soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de resfriamento, QEC lenta e corrente de base de 80 A, observam-se que ambas apresentam redução na penetração e aumento na ZTA com o aumento da corrente de pico.

4.2.1.2 Análise da corrente de base

Analisando a sequência de Figuras:

- Figuras 4.2-a e 4.2-d mostram as macrografias obtidas de juntas soldadas entre tubo e calha com 5,3 mm de espessura, na condição inicial, isto é, sem refrigeração, QEC lenta, com corrente de pico de 250 A e diferentes correntes de base: 65 (4.2-a) e 80 A (4.2-d);

- Figuras 4.2-b e 4.2-e, mostram macrografias obtidas em juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de corrente de pico de 300 A e respectivas correntes de base de 65 (4.2-b) e 80 A (4.2-e);

- Figuras 4.2-c e 4.2-f, mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de corrente de pico de 350 A e respectivas correntes de base de 65 (4.2-c) e 80 A (4.2-f);

No primeiro par de Figuras e no último, isto é o par de Figuras 4.2-a e 4.2-d, 4.2-c e 4.2-f, observa-se redução na convexidade da superfície do cordão de soldagem aplicado, como efeito do aumento da corrente de base. O efeito não foi observado entre as Figuras 4.2-b e 4.2-e, e pode ser explicado pela destruição da margem da solda em contato com o tubo, motivada pela limpeza por disco abrasivo das imperfeições formadas por respingos.

A seguinte sequência de figuras abaixo apresentadas confirmam os comentários iniciais:

- Figuras 4.2-g e 4.2-j mostram as macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de refrigeração, e correntes de base de 65 (4.2-g) e 80 A (4.2-j);

- Figuras 4.2-h e 4.2-k mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de corrente de pico de 300 A e correntes de base de 65 (4.2-h) e 80 A (4.2-k);

- Figuras 4.2-i e 4.2-l mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de refrigeração e corrente de pico de 350 A e correntes de base de 65 (4.2-i) e 80 A (4.2-l);

- Figuras 4.2-m e 4.2-p mostram as macrografias obtidas das juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de refrigeração, QEC baixa, com correntes de base: 65 (4.2-m) e 80 A (4.2-p);

- Figuras 4.2-h e 4.2-q mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da inicial pela aplicação de corrente de pico de 300 A, refrigeração, QEC rápida, com correntes de base: 65 (4.2-h) e 80 A (4.2-q);

- Figuras 4.2-o e 4.2-r mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de corrente de pico de 350 A, refrigeração, QEC rápida, com correntes de base: 65 (4.2-o) e 80 A (4.2-r);

Em todas as figuras observa-se o mesmo efeito citado, redução na convexidade da superfície do cordão de soldagem aplicado, como efeito do aumento da corrente de base de 65 A para 80 A.

Os níveis mais baixos aplicados à corrente de base podem atrapalhar a recepção da gota metálica sobre a superfície da poça de fusão e gerar alteração do perfil da superfície do cordão, tornando mais curvo, devido à redução no molhamento da poça de fusão.

4.2.1.3 Análise da condição de refrigeração

As Figuras das macrografias 4.2-a e 4.2-g, (soldadas com corrente de base de 65 A, corrente de pico de 250 A, QEC lenta, sem (4.2-a) e com (4.2-g) refrigeração não apresentaram alterações perceptíveis na penetração. A morfologia do cordão tampouco foi influenciada pela alteração da condição de refrigeração. Estas observações são válidas para as macrografia 4.2-b e 4.2-h (corrente de base de 65 A, corrente de pico de 300 A, QEC lenta, sem (4.2-b) e com (4.2-h) refrigeração) e finalmente 4.2-c e 4.2-i (corrente de base de 65 A, corrente de pico de 350 A, QEC alta, sem (4.2-c) e com (4.2-i) refrigeração).

A utilização de refrigeração com água no interior do tubo, sem fluxo, não permitiu o resfriamento previsto em norma. A simulação da condição de resfriamento causada pelo fluxo interno, pressuposto da soldagem em operação, não foi efetiva. A principal causa para a deficiência de refrigeração é explicada pela formação de vapor sob a porção da parede do duto sujeita à energia de soldagem. A ausência de velocidade no fluxo de água e a posição de aplicação do cordão de soldagem, posição plana, não permitiram a retirada da energia

proveniente da soldagem, favorecendo a formação de uma película de vapor, reduzindo a troca térmica entre a água e a superfície quente do duto.

Dessa forma não foram observadas alterações na característica de penetração quando comparadas as diversas condições de soldagem nas situações com e sem refrigeração.

4.2.1.4 Análise da queda exponencial de corrente -QEC lenta x rápida

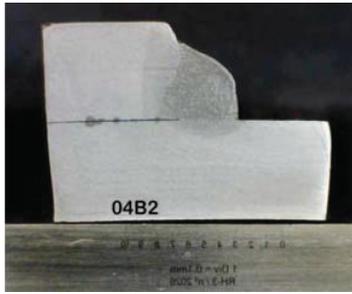
O efeito da variação da QEC pode ser observado comparando-se as Figuras 4.2-g, 4.2-h e 4.2-i (QEC lenta) com as Figuras 4.2-m, 4.2-n e 4.2-o (QEC rápida), respectivamente. Pode-se observar que a QEC lenta, quando comparada com a QEC rápida, promoveu maior deposição de metal, porém menor penetração e formação ZTA mais estreita. A explicação para este resultado está no maior aporte de calor fornecido pela condição de QEC lenta. O aumento do aporte térmico elevou a fluidez da poça e aumentou a região fundida, distribuindo o calor por maior área. Esse efeito reduziu a penetração, porém favoreceu a distribuição de calor por maior área.

Observa-se em todas as figuras o aumento do volume e o alargamento do cordão depositado com a alteração de QEC lenta para QEC rápida.

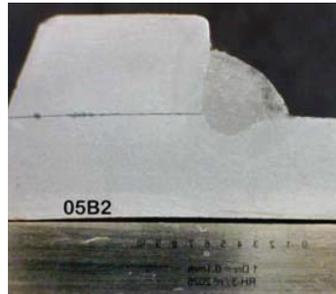
Quando se comparam as Figuras 4.2-j, 4.2-k e 4.2-l (QEC lenta) com as Figuras 4.2-p, 4.2-q e 4.2-r (QEC rápida), respectivamente, pode ser observado aumento da penetração com a alteração de QEC lento para QEC rápido, porém com menor intensidade. Nas Figuras 4.2-k, 4.2-l e nas Figuras 4.2-q, 4.2-r, com o aumento da corrente de pico, associado ao alto valor para a corrente de base pode haver fornecido reforço ao aporte térmico, necessário para obter aumento no volume depositado, mesmo com a alteração de QEC lenta para QEC rápida. Nadzam (2012) cita a corrente de pico como fator importante na definição do aporte térmico para o processo. Observa-se redução no volume de metal depositado, acompanhado de redução na penetração. Observa-se o alargamento no formato da zona fundida, onde se apresentava em formato de cunha para valores maiores de QEC e com a redução deste parâmetro tornou-se mais larga. Esta característica concorda com a literatura (NADZAM, 2012) que recomenda a soldagem de raiz em

duto com QEC rápido para controle da penetração, quando o processo é aplicado no primeiro passe de soldagens circunferências de montagens de dutos, para controle da penetração.

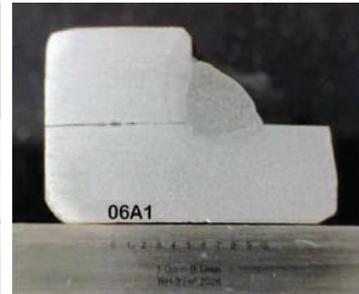
4.2.2 Ensaio de macrografia e análises dos corpos de prova de 6,4 mm



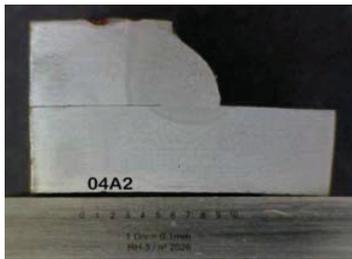
a



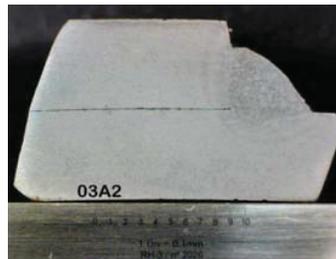
b



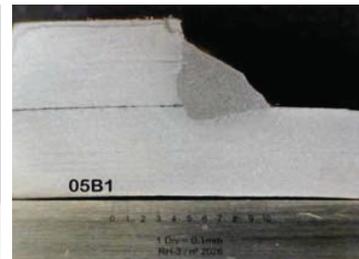
c



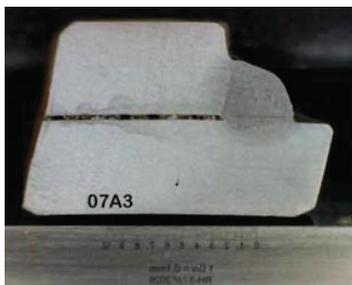
d



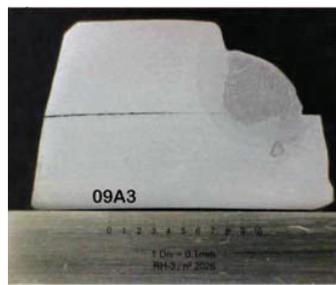
e



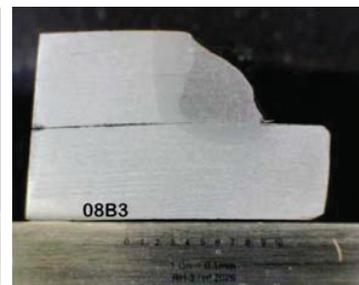
f



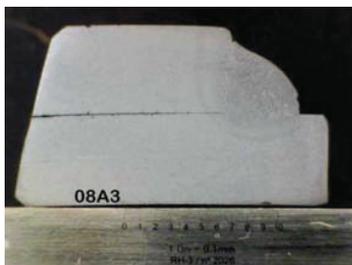
g



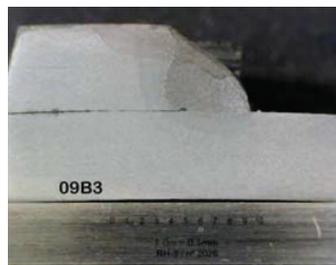
h



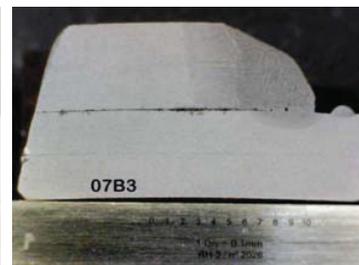
i



j



k



l

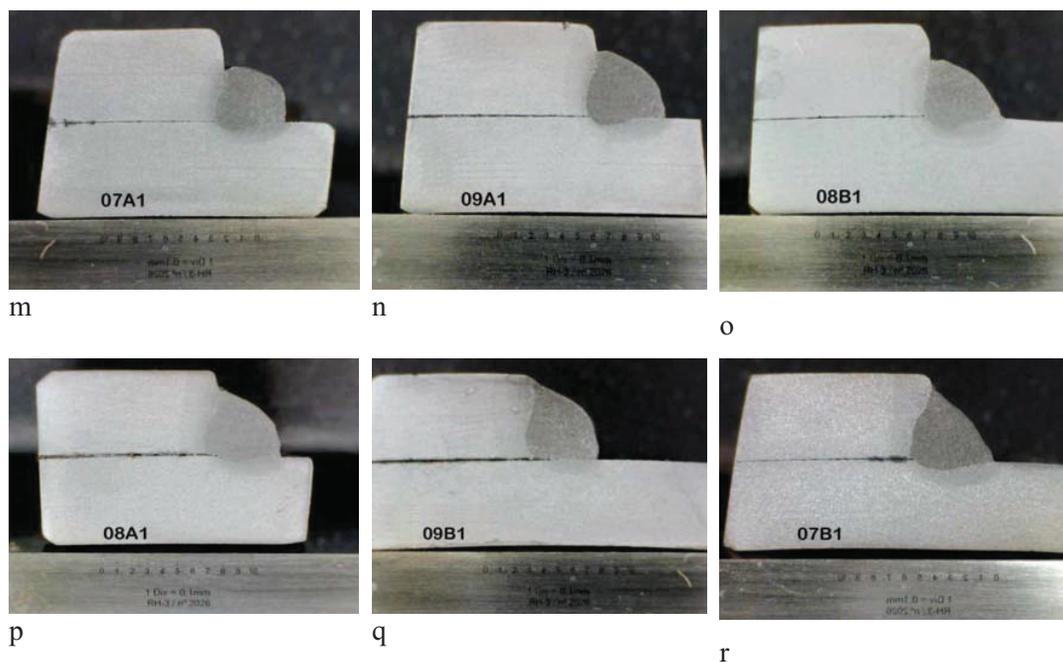


Figura 4.3 – Juntas soldadas de tubo e calha com 6,4 mm de espessura, com correntes de pico de 250 (a, d, g, j, m, p), 300 (b, h, k, n, q) e 350 A (c, f, i, l, o, r), correntes de base de 65 (a, b, c, g, h, i, m, n, o) e 80 A (d, e, f, j, k, l, p, q, r), QEC lenta (a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l), QEC rápida (m, n, o, p, q, r), sem refrigeração (a, b, c, d, e, f) e com refrigeração (g, h, i, j, k, l, m, n, o, p, q, r).

4.2.2.1 Análise da corrente de pico

As Figuras 4.3-a, 4.3-b e 4.3-c mostram as macrografias das juntas soldadas de tubo e calha com 6,4 mm de espessura, na condição padrão, isto é, sem refrigeração, QEC lenta e corrente de base de 65 A, com diferentes correntes de pico: 250 (4.3-a), 300 (4.3-b) e 350 A (4.3-c). Pode observar-se que o aumento da corrente de pico, de 250 para 300 A, com os demais parâmetros constantes, produziu um aumento da penetração e aumento da ZTA. Tal efeito não foi observado na transição de corrente de pico de 300 para 350 A, mantidas as demais condições inalteradas. Supõe-se que uma pequena perda de posicionamento da tocha durante a aplicação da soldagem

tenha ocasionado esse evento, distorcendo o comportamento esperado. Não foi observada nenhuma alteração na morfologia da superfície. A tendência de aumento da ZTA e da penetração pode ser observada nas macrografias 4.3-d, 4.3-e e 4.3-f, das juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de corrente de base de 80 A. A mesma tendência pode ser observada nas macrografias 4.3-g, 4.3-h e 4.3-i, soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de resfriamento, nas macrografias 4.3-j, 4.3-k e 4.3-l soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de resfriamento e corrente de base de 80 A, nas macrografias 4.3-m, 4.3-n e 4.3-o, soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de resfriamento e QEC lenta e, finalmente nas macrografias 4.3-p, 4.3-q e 4.3-r, soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de resfriamento, QEC rápida e corrente de base de 80 A, ambas apresentam penetração e ZTA crescentes com o aumento da corrente de pico. Observa-se que a junta 4.3-i apresenta aumento da ZTA na direção da calha em maior proporção que o aumento na direção do tubo. Este efeito pode ser entendido pela provável perda de centralização da tocha durante o processo de soldagem, no local de retirada da amostra.

O aumento da corrente de pico favorece a transferência metálica globular que pode explicar o aumento da penetração e pelo aumento do aporte pode-se entender o aumento simultâneo da ZTA.

4.2.2.2 Análise da corrente de base

As Figuras 4.3-a e 4.3-d mostram as macrografias obtidas de juntas soldadas entre tubo e calha com 6,4 mm de espessura, na condição inicial, isto é, sem refrigeração, QEC rápida, com corrente de pico de 250 A e diferentes correntes de base: 65 (4.3-a) e 80 A (4.3-d). As Figuras 4.3-b e 4.3-e, mostram macrografias obtidas em juntas soldadas em condições que diferem da condição inicial por aplicação de corrente de pico de 300 A e respectivas correntes de base de 65 (4.3-b) e 80 A (4.3-e). As Figuras 4.3-c e 4.3-f, mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem da condição inicial pela aplicação de corrente de pico de 350 A e respectivas correntes de base de 65 (4.3-c) e 80 A (4.3-f). Em todas estas figuras observa-se redução na convexidade da superfície do cordão de soldagem aplicado, como efeito do aumento

da corrente de base. As Figuras 4.3-g e 4.3-j mostram as macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de refrigeração, e correntes de base de 65 (4.3-g) e 80 A (4.3-j). As Figuras 4.3-h e 4.3-k mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de corrente de pico de 300 A e correntes de base de 65 (4.3-h) e 80 A (4.3-k). As Figuras 4.3-i e 4.3-l mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de refrigeração e corrente de pico de 350 A e correntes de base de 65 (4.3-i) e 80 A (4.3-l). Em todas estas figuras observa-se o mesmo efeito anteriormente citado, redução na convexidade da superfície do cordão de soldagem aplicado, como efeito do aumento da corrente de base. As Figuras 4.3-m e 4.3-p mostram as macrografias obtidas das juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de refrigeração, QEC rápida, com correntes de base: 65 (4.3-m) e 80 A (4.3-p). As Figuras 4.3-h e 4.3-q mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de corrente de pico de 300 A, refrigeração, QEC lenta, com correntes de base: 65 (4.3-h) e 80 A (4.3-q). As Figuras 4.3-o e 4.3-r mostram macrografias obtidas de juntas soldadas em condições que diferem do padrão por aplicação de corrente de pico de 350 A, refrigeração, QEC rápida, com correntes de base: 65 (4.3-o) e 80 A (4.3-r). Em todas estas figuras observa-se o mesmo efeito anteriormente citado, redução na convexidade da superfície do cordão de soldagem aplicado, como efeito do aumento da corrente de base.

Os níveis mais baixos aplicados à corrente de base podem atrapalhar a recepção da gota metálica sobre a superfície da poça de fusão e podem alterar o perfil da superfície do cordão, tornando mais curvo, devido à redução no molhamento da poça de fusão.

4.2.2.3 Análise da condição de refrigeração

As Figuras 4.3-a e 4.3-g, (soldadas com corrente de base de 65 A, corrente de pico de 250 A, QEC rápida, sem (4.3-a) e com (4.3-g) refrigeração) não apresentaram alterações perceptíveis na penetração. A morfologia do cordão tampouco foi influenciada pela alteração da condição de refrigeração. Estas observações são válidas para as macrografia 4.3-b e 4.3-h (corrente de base de 65 A, corrente de pico de 300 A, QEC rápida, sem (4.3-b) e com (4.3-h) refrigeração e finalmente

4.3-c e 4.3-i (corrente de base de 65 A, corrente de pico de 350 A, QEC rápida, sem (4.3-c) e com (4.3-i) refrigeração).

A utilização de refrigeração com água no interior do tubo, sem fluxo, não permitiu o resfriamento previsto em norma. A simulação da condição de resfriamento causada pelo fluxo interno, pressuposto da soldagem em operação, não foi efetiva. A principal causa para a deficiência de refrigeração é explicada pela formação de vapor sob a porção da parede do duto sujeita à energia de soldagem. A ausência de velocidade no fluxo de água e a posição de aplicação do cordão de soldagem, posição plana, não permitiram a retirada da energia proveniente da soldagem, favorecendo a formação de uma película de vapor, reduzindo a troca térmica entre a água e a superfície quente do duto.

Dessa forma não foram observadas alterações na característica de penetração quando comparadas as diversas condições de soldagem nas situações com e sem refrigeração, confirmando as observações citadas no item 4.2.1.3, para a espessura de 5,3 mm.

4.2.2.4 Análise da queda exponencial de corrente rápida x lenta

As Figuras 4.3-g e 4.3-m mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 250 A, corrente de base de 65 A, com refrigeração e duas condições de QEC, lenta e rápida, respectivamente. As Figuras 4.3-h e 4.3-n mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 300 A, corrente de base de 65 A, com refrigeração e duas condições de QEC, rápida e lenta, respectivamente. As Figuras 4.3-i e 4.3-o mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 350 A, corrente de base de 65 A, com refrigeração e duas condições de QEC, rápida e lenta, respectivamente.

Pode-se observar redução no volume de metal depositado, acompanhado de redução na penetração. Observa-se que a Figura 4.3-g e a Figura 4.3-i apresentam maior altura de depósito de metal de solda sobre a perna vertical. E associado ao menor módulo para a corrente de pico, a superfície do cordão apresenta maior curvatura. Estes fatos também podem ser observados nas Figuras 4.3-h e 4.3-n. As Figuras 4.3-i e 4.3-o apresentam a mesma característica, exceto que

apresentaram aumento de penetração. Este aumento na penetração, inesperado para a característica do parâmetro de soldagem utilizado, pode ser explicado pela possível perda de centralização da tocha na amostra 4.3-i, durante o deslocamento desta tocha de soldagem.

As Figuras 4.3-j e 4.3-p mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 250 A, corrente de base de 80 A, com refrigeração e duas condições de QEC, rápida e lenta, respectivamente. As Figuras 4.3-k e 4.3-q mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 300 A, corrente de base de 80 A, com refrigeração e duas condições de QEC, lenta e rápida, respectivamente. As Figuras 4.3-l e 4.3-r mostram macrografias de juntas soldadas de tubo sobre calha com corrente de pico de 350 A, corrente de base de 80 A, com refrigeração e duas condições de QEC, lenta e rápida, respectivamente.

Pela observação de cada par das amostras apresentadas, observar-se redução no volume de metal depositado, acompanhado de redução na penetração. Observa-se que as Figuras 4.3-g e 4.3-p apresentaram falta de fusão. Todas as figuras apresentadas nesta etapa mostram uma pequena redução de convexidade nos cordões. A Figura 4.3-l, apresentou falta de fusão e respingos, evidenciando a inadequação do parâmetro de soldagem utilizado, como cita Nadzam (2012).

4.2.3 Ensaio visual

Todos os 36 corpos de prova foram ensaiados visualmente antes e após o corte para a realização de ensaio macrográfico. O ensaio visual objetivou a detecção de defeitos dos tipos falta de fusão, poros, respingos e sobreposição.

O resultado do ensaio visual é apresentado na Tabela 4.1, e são distribuídos conforme a espessura e os parâmetros de soldagem aplicados.

Foi observada de falta de fusão em cinco corpos de prova, 13B2, 15A1, 09B3, 07B3 E 09B1. A falta de fusão foi observada no local onde foi realizado o corte para execução do ensaio macrográfico, em cada corpo de prova.

A maior quantidade de corpos de prova com falta de fusão, (80%) foi observada quando o parâmetro corrente de base aplicado foi de 80 A (13B2, 09B3, 07B3, 09B1). Valores altos para

corrente de base promove a alteração no modo de transferência metálica de curto circuito para globular e facilita o aparecimento de falta de fusão. Observou-se uma prevalência de falta de fusão nos corpos de prova com valores de QEC rápida, sugerindo a dependência neste parâmetro, concordando com a teoria apresentada, pois a QEC influencia o volume e o conteúdo calorífico da gota metálica.

Tabela 4.1 – Resultado do ensaio visual nos 36 corpos de prova de soldagem, para cada condição de aporte aplicado.

RESULTADOS PERCENTUAIS						
Espessura	5,3mm			6,3mm		
Resfrigeração	com		sem	com		sem
QEC	lenta	rápida	lenta	lenta	rápida	lenta
falta de fusão		2,8%	2,8%	5,6%	2,8%	
Poros		8,3%	5,6%			
Respingos				2,8%		
Sobreposição				2,8%		

Poros foi detectado em 14% dos corpos de provas, sendo que apenas os corpos de prova de espessura 5,3 mm apresentaram essa descontinuidade. Este defeito pode estar associado a perda de posicionamento da tocha, durante a soldagem.

Não foi observada falta de penetração em nenhum dos corpos de prova, considerando os parâmetros de soldagem aplicados. Em três corpos de prova foi observado assimetria do cordão indicando provável perda do posicionamento da tocha em direção ao vértice da junta.

Em ensaios iniciais, utilizados para ajuste do processo e definição da faixa dos parâmetros de soldagem aplicáveis ao experimento, foi possível observar alto nível de respingos quando utilizadas corrente de pico acima de 350 A. Observa-se que o único corpo de prova que apresentou respingos foi soldado com corrente de pico de 350 A.

Foi observada certa dificuldade para estabilizar o processo, com colamento do arame sobre o cordão, quando a corrente de pico foi mantida em torno de 150 A. A corrente de pico é aplicada para reiniciar o arco, em níveis baixos, espera-se maior dificuldade para esta reabertura de arco.

4.2.4 Ensaio de dureza

A dureza média foi calculada com base nos valores apresentados pelos corpos de provas agrupados por condição de resfriamento crescente. A condição de resfriamento crescente será QEC lenta e sem refrigeração, QEC lenta e com refrigeração e, finalmente, QEC rápida e com refrigeração. Os valores são apresentados na tabela 4.2 e Figura 4.4.

Tabela 4.2 – Média de dureza HV10 e desvio padrão (dp), sem refrigeração e QEC lenta, com refrigeração e QEC lenta, com refrigeração e QEC rápida, para espessura de 5,3 e 6,4 mm, na região do MB, ZTA e MS.

			DUREZA					
			MB		ZTA		MS	
Espessura	QEC	refrigeração	HV10	Desvio padrão	HV10	Desvio padrão	HV10	Desvio padrão
5,3mm	Lenta	sem	207	4	239	15	253	10
	Lenta	com	206	1	222	11	253	9
	Rápida	com	206	11	249	32	280	14
6,4 mm	Lenta	sem	145	8	189	24	254	11
	Lenta	com	151	4	175	15	262	14
	rápida	com	147	6	196	23	283	30

Observa-se, pela análise da Tabela 4.2, que a dureza do metal base apresenta valor constante para cada espessura considerada. O metal base do tubo de 5,3 mm de espessura é diferente do metal base do tubo de 6,4 mm de espessura.

O valor de dureza medido na região do metal de solda, para os dois tubos, apresenta o mesmo valor com desvio padrão alto. O valor mais alto apresentado pelo desvio padrão pode ser motivado pela participação do metal base na poça de fusão em proporções distintas a cada condição de aporte térmico.

Seria esperado aumento de dureza com o aumento da velocidade de resfriamento da solda, isto obtido tanto pela redução do aporte aplicado como pela adoção de um método de refrigeração. Esta evolução não foi verificada por motivos já expostos nos itens 4.2.1.3 e 4.2.2.3. O valor de dureza média medido na ZTA, na condição de resfriamento médio (condição 2), foi

inferior ao esperado. Nas duas situações testadas com refrigeração, aporte alto e baixo, observa-se maior dureza na condição de aporte inferior, como esperado, porém com valor próximo ao apresentado na condição de ausência de refrigeração, ou resfriamento ao ar.

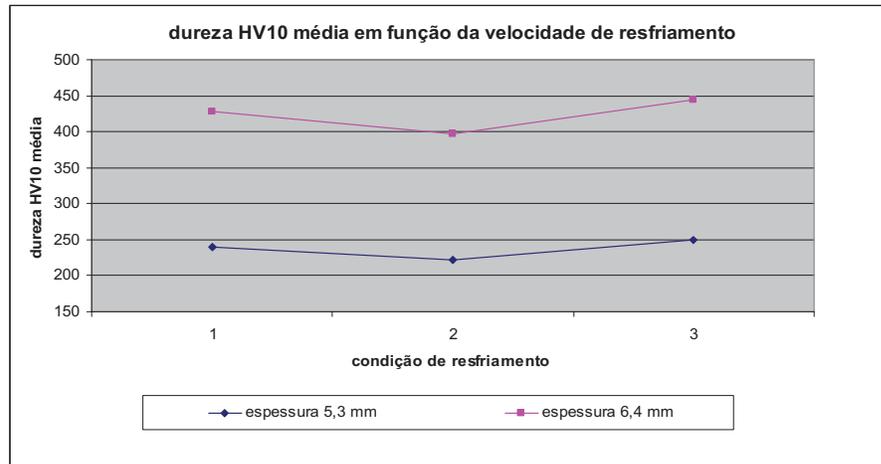


Figura 4.4 – Média de dureza HV10 da ZTA, sem refrigeração e QEC lenta (condição de resfriamento 1), com refrigeração e QEC lenta (condição de resfriamento 2), com refrigeração e QEC rápida (condição de resfriamento 3), espessura de 5,3 e 6,4 mm.

Os valores de dureza em todos os corpos de prova medidos ficaram abaixo do valor recomendado pela literatura, 350 HV10. Este valor é apresentado para soldagens típicas com eletrodos básicos, com teores de hidrogênio entre 4 e 8 ml de hidrogênio por cem gramas de metal depositado.

Na soldagem proposta, objeto deste trabalho, com a utilização de consumível arame sólido, gás de proteção isento de hidrogênio, limpeza adequada da superfície, em condições típicas de proteção da atmosfera para processo MIG/, espera-se obter teores ainda mais baixos de hidrogênio difusível, portanto o nível de dureza máximo recomendado poderia ser mais relaxado. A *Lincoln Electric* cita valores inferiores a 1,5 ml de hidrogênio por 100g de metal depositado.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

A) O procedimento proposto para simulação das condições de soldagem em carga com processo *STT*[®] poderá ser utilizado para qualificar um procedimento de soldagem em operação. O processo proposto permite a seleção de parâmetros de soldagem que evitem a ocorrência tanto de trincas pelo hidrogênio quanto a condição de perfuração.

B) A definição do ângulo de trabalho tem influencia na penetração e distribuição do calor entre os elementos, calha e duto, soldados. O posicionamento da tocha em relação ao vértice da junta de ângulo igualmente influencia a distribuição de calor entre os elementos calha e duto. Este fator poderá contribuir para controle e distribuição do aporte térmico aplicado sobre a parede do corpo da tubulação, favorecendo o controle de perfuração.

C) O processo de soldagem *STT*[®], mesmo com característica de baixos aportes térmicos, quando comparado com o convencional, poderá ser utilizado para soldagem em condição de resfriamento moderado, apresentando baixo nível de falta de fusão.

D) O controle da penetração ou, no limite, a perfuração poderá ser obtido pela definição de valores adequados de QEC, corrente de pico e ângulo de trabalho. Terá influência ainda o posicionamento da tocha em relação ao vértice da junta.

E) A definição de um procedimento de soldagem deverá incluir os parâmetros de soldagem corrente de base, corrente de pico e QEC, velocidade de alimentação do arame, velocidade de avanço da tocha e ângulo de trabalho. Estes parâmetros serão avaliados durante a qualificação do procedimento de soldagem em carga. A condição de refrigeração aplicada ao processo de qualificação deverá ser definida e explicitada no procedimento de soldagem e deverá representar, no mínimo, a habilidade térmica do duto a ser soldado.

F) Os valores considerados adequados para soldagem sobre dutos com espessuras entre 5,3 e 6,4 mm, em condição de refrigeração moderada, são: corrente de base entre 65 e 70 A, corrente de pico entre 280 e 320 A, QEC rápida ou intermediária, ângulo de trabalho de 45° para uma distribuição de aporte com igualdade de condições entre duto e calha, velocidade de avanço da tocha de 24 cm/min, consumível arame sólido, especificação AWS A5.28 (2005) / AWS SFA 5.28, com 1,1 mm de diâmetro, gás de proteção CO₂, com pureza 99,99%, na vazão de 14 litros por minuto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

O desenvolvimento de simulações digitais para estimativas de aporte térmico, projeção da temperatura da superfície interna da tubulação poderá ser trazer maior conforto na definição dos parâmetros de soldagem, pois os métodos atuais não consideram o ângulo de trabalho como variável.

Deverá ser objeto de estudo futuro o desenvolvimento de documentos de soldagem tais como Especificação de Procedimento de Soldagem e a qualificação da mesma através de ensaios atendendo a norma para reparo de tubulações, API 1104 (2010).

Referências

ALCATRÃO, M. S.; MENEZES, M. S. Aplicação do Processo STT na Soldagem de Dutos – Missão à Polônia. In: ENCONTRO TÉCNICO-GERENCIAL DA ENGENHARIA – PETROBRÁS, 2005, Rio de Janeiro. 10 p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 1104**: Welding Pipeline and Related Facilities. Washington, 2010. 70p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API Recommended Practice 2201**: Safe Hot Tapping Practice in the Petroleum & Petrochemical Industries. Washington, 2003. 27p.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5L**: Specification for line pipe. Washington, 2010, 158p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME IX**: Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operator. New York, 2010. 290p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B 31.3**: Process Piping. New York, 2010. 330p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B 31.4**: Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids. New York, 2010. 106p.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME B31.8**: Gas Transmission and Distribution Piping Systems. New York, 2010. 173p.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **A5.28 A5.28M**: Specification for Low-Alloy Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding. Miami, 2005. 33p.

ASM. **Metals Handbook**. 10ed. Metals Handbook, v.06, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14842**: critérios para qualificação e certificação de inspetores de soldagem. Rio de Janeiro, 2003. 12p.

BAEK, J-H; KIM, W. S.; KIM, Y. P. Comparative Study for Various Repair Methods of In-Service Pipeline Using Full Escale Burst Test. In: 23rd World Gas Conference, 2006, Amsterdam. p.06-10.

BELANGER, R. J.; PATCHETT, B. M. The Influence of Working Fluid Physical Properties on Weld Qualification for In-Service Pipeline. **Welding Journal**, v.79, n.8, p.209-s-214-s, 2000.

BRUCE, W. A.; ETHERIDGE, B. C.; CARMAN, A. Heat-affected zone hardness limits for in-service welding. In: Proceedings of IPC 2008 – 64003 - 7^o International Pipeline Conference, 2008, Alberta. p.04-05.

CASSIE, B. A. The welding of hot tap connections to high pressure gas pipelines. JW Jones Memorial Lectures, Pipe Line Industries Guild, 1974.

CISILINO, A. P.; CHAPETTI, M.D.; OTEGUI, J. L. Minimum thickness for circumferential sleeve repair fillet welds in corroded gas pipelines. **International Journal of Pressure Vessel and Piping**, v.79, n.1, p.67-76, 2002.

DURAND, R. S. et al. Qualificação de Procedimento para Soldagem Circunferencial de Tubos API 5L X80. In: Rio Pipeline 2007, Conference & Exposition, 2007, Rio de Janeiro, p.09.

DUTRA, J.C.; SILVA, R.G. **MIG/MAG Transferência metálica por curto circuito sob controle da forma de onda – Sistema CCC e STT – Fundamentos**. Revista Soldagem e Inspeção. v.13, n.2, p.92-96, 2008.

GOHR Jr., Raul. **Novos Métodos de Controle da Soldagem MIG/MAG**. 2002. 165p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GRANJON, H. **Bases Metalúrgicas da Soldadura**. Paris, 2000. 271p.

HOWDEN, D. G. Welding on pressurized pipeline. Loss Prevention, 9. **American Institute of Chemical Engineers**, p.8-10, 1975.

JONES, J. W. Memorial Lecture, JW Jones Memorial Lectures. Pipe Line Industries Guild, 1974.

KÜCHLER, M. M. **Aplicação da técnica de dupla camada na soldagem de dutos em operação**. 2009. 78p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LINCOLN ELETRIC. **Guia de operação da máquina STT – Operator’s Manual Invertec STT II**. Cleveland, p.B-5-B-6, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. 363p.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis**. Belo Horizonte: UFMG , 2004. 77p.

MOHITPOUR M.; GOLSHAN, H.; MURRAY, A. Pipeline Designer and Construction – A practical Approach second Edition, 2003, p.94-95.

NADZAM, J. Gás Metal ArcWelding Guidelines. Em: www.lincolnelectric.com, acesso em 29 de março de 2012, 00h23.

OKUMURA, T; TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. São Paulo: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora,1982. 417p.

OTEGUI, J.L.; RIVAS, A.; MANFREDI, C.; MARTINS, C. Weld failure in sleeve reinforcements of pipeline. **Engineering Failure Analysis**, v.8, n.1, p.57-73, 2001.

PEREZ, G. E. G. **Estabelecimento de Critérios para Evitar a Perfuração na Soldagem de Tubulações em Operação de Pequena Espessura**. 2005. 85p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N133J**: reparo de dutos – revisão J. Rio de Janeiro, 2005. 45p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-1438E**: Terminologia de Soldagem – revisão E. Rio de Janeiro, 2008. 41p.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. **N-2163E**: – Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações Industriais e Dutos em Operação – revisão E. Rio de Janeiro, 2011. 33p.

PIPELINE & JOURNAL GAS. Lincoln Electric marks first use of STT power source in Europe. 2004.

PIPELINE RESEARCH COUNCIL INTERNATIONAL. Inc. - PRCI Thermal Analysis Model for Hot-Tap Welding. v.4.2, 2002.

PIPELINE RESEARCH COUNCIL INTERNATIONAL . Inc. - PRCI. Alternative Processes for Welding Onto In-Service Pipelines, 2002 EWI Project No. 43675CAP Contract No. PR-185-0002. 53 p.

SARAFAN, S.; GHAINI, F. M. Alek; RAHIMI, E. Effect of welding Direction and position on susceptibility to weld metal transverse cracking in welding high-strength pipeline steel with cellulosic electrodes. **Welding Journal**, v.91, p.182-185, 2012.

SILVA, R. H. G. Aporte Térmico, Penetração e Rendimento de Deposição na Soldagem MIG/MAG em Curto Circuito Controlado. In: Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador.

SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicado ao passe de raiz**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SRINIVASAN, K.; BALASUBRAMANIAN, V. Effect of surface tension metal transfer on fume formation rate during flux-cored arc welding of HSLA steel. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.56, p.125-134, 2011.

VAKILI-TAHAMI, F.; MASUMI-ASI, H.; A two-dimensional thermomechanical analysis of burn-through at in-service welding of pressurized canals. **Journal of Applied Sciences**, v.9, p. 615-626, 2009.

ZAPATA, H. A. Tecnologia en La Soldadura de Tuberia: Ventajas del Processo “STT” para el Pase de Raiz. **Catálogo Lincoln Electric**, 2003.