

Universidade Federal de Minas Gerais  
Departamento de Engenharia Mecânica

Monografia de Especialização em Soldagem

Soldagem de reparo em dutos de transporte pressurizados e em  
operação

Autor: Ayrton Silva Guimarães Torres  
Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Junho/2016

Ayron Silva Guimarães Torres

# Soldagem de reparo em dutos de transporte pressurizados e em operação

Monografia de Especialização em Soldagem  
apresentada ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais.

Orientador: Prof. Paulo José Modenesi

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2016

## **Resumo**

O transporte dutoviário vem se consolidando como uma maneira eficiente e de baixo custo operacional para o transporte de fluidos. Dessa forma, nos últimos anos houve aumento considerável da malha instalada no Brasil. Neste contexto, atividades de manutenção e expansão das malhas serão mais demandadas. Para tal, a utilização do processo de soldagem em operação se torna fundamental para redução de custos e impactos ambientais. Este trabalho sintetiza informações referentes à soldagem de dutos em operação. Neste trabalho são disponibilizadas informações sobre técnicas de inspeção de dutos, os principais tipos defeitos que podem afetar a integridade de um duto, concentrados em três grupos principais (deformação geométrica, perda de metal e trincamento). Ainda são apresentados os métodos de reparo com aplicação de soldagem que podem ser aplicados cada tipo de defeito, com ênfase na aplicação das luvas bipartidas de aço, deposição de metal, trepanação e chapa de reforço estrutural. As preocupações referentes à soldagem em operação de dutos (perfuração e o trincamento induzido por hidrogênio) e medidas para mitigar o risco de ocorrência destes problemas também são abordadas. Foi discutida a possibilidade da aplicação de processos de soldagem automatizados para manutenção de dutos em operação e a necessidade deste desenvolvimento.

## **Abstract**

The pipeline transportation has been consolidated as an efficient and low operating cost method for transporting fluids. Accordingly, in recent years there was a considerable increase in installed pipeline network in Brazil. In this context, more maintenance activities and expansion of the installations are demanded. To this end, the use of the in-service welding process becomes essential to reduce costs and environmental impact. This work provides information about pipeline inspection techniques, the main types of defects that can degrade the integrity of a pipeline. The defects are gathered in three main groups (geometric deformation, metal loss and cracking). The work also informs the welding repair methods that can be applied to correct each defect type with emphasis on the application of steel sleeves, metal deposition, hot tapping and patches. It also addresses the concerns regarding to in-service welding on pipelines (burn through and hydrogen induced cracking), and measures to mitigate the risk of these problems. It discusses the possibility of applying automatic welding processes for maintenance in-service pipelines and how this development is required.

## Lista de Figuras

Figura 1: Desenvolvimento da malha de gasodutos de transporte no Brasil [1].	1
Figura 2: Serie de tubos desfilados para construção de mineroduto [9].	4
Figura 3: Pig instrumentado utilizado para inspeção de um mineroduto [9].	6
Figura 4: Funcionamento da técnica de inspeção EMAT [11].	6
Figura 5: Ilustração do funcionamento da inspeção por de corrente parasita [11].	7
Figura 6: funcionamento do ultrassom para medição de espessura [11].	8
Figura 7: Funcionamento do ultrassom para detecção de trincas em dutos [11].	8
Figura 8: Ilustração da magnetização no método MFL de inspeção [11].	9
Figura 9: Fugas de fluxo magnético para defeitos nas superfícies interna e externa. [11].	9
Figura 10: Exemplo de amassamento em tubulação de mineroduto [9].	10
Figura 11: Corrosão externa em tubulação de mineroduto [9].	11
Figura 12: Arracamento mecânico de material em tubulação de mineroduto [9].	11
Figura 13: Trinca presente em tubulação de mineroduto [9].	11
Figura 14: Distribuição de incidentes (2009–2013) [13].	12
Figura 15: Distribuição de incidentes (2004–2013) [13].	12
Figura 16: Dispositivo mecânico para comprimir a luva bipartida sobre o duto [17].	16
Figura 17: Ilustração da configuração típica luva bipartida tipo A [15].	17
Figura 18: Ilustração detalhes da solda da luva bipartida tipo A [15].	17
Figura 19: Luva bipartida tipo A com chapa lateral de sobreposição [14].	17
Figura 20: Configuração de montagem da luva bipartida tipo B [15].	19
Figura 21: Luva bipartida tipo B instalado em um mineroduto [9].	19
Figura 22: Sequência típica de soldagem de deposição [18].	21
Figura 23: Reparo com deposição de solda. A) Deposição do primeiro passe de perímetro e diversos passes da primeira camada; B) Esmerilhamento do primeiro passe de perímetro; C) Deposição do segundo passe de perímetro e diversos passes da segunda camada; D) Reparo completo [14].	21
Figura 24: Técnica de reparo externo por deposição de solda em defeito interno [18].	22

Figura 25: Reparo interno de um cotovelo realizado com deposição externa de solda [20].	22
Figura 26: Conexão utilizada para trepanação soldada a um duto [9].	23
Figura 27: Exemplo de operação de trepanação em dutos [23].	24
Figura 28: Esquema de trepanação para substituição de trecho sem parada operacional [24].	24
Figura 29: Chapa de reforço estrutural soldada em um gasoduto [25].	25
Figura 30: Perfuração de dutos durante a soldagem [26].	26
Figura 31: Simulação da distribuição de tensões durante a soldagem do primeiro passe [30].	27
Figura 32: Temperatura de pico na superfície interna do duto para processos distintos a uma mesma com energia de 1,29KJ/mm [31].	28
Figura 33: Trinca induzida por hidrogênio na solda de filete de uma luva bipartida [27].	29
Figura 34: Critério de dureza para dutos mais espessos ( $> 9,5$ mm) com 0,1%C em função do carbono equivalente [7].	30
Figura 35: Critério de dureza para dutos menos espessos ( $\leq 9,5$ mm) com 0,1%C e função do carbono equivalente [7].	30
Figura 36: Posicionamento do robô. A) Antes da abertura do arco; B) Depois da extinção do arco [39].	32
Figura 37: Foto do sistema de soldagem automatizado desenvolvido pela EWI [18].	32
Figura 38: Sistema de posicionamento da tocha de soldagem [18].	33

## **Lista de abreviaturas e símbolos**

API – American Petroleum Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

SAW – Submerged arc welding

ERW – Electric resistance welding

END – Ensaio não destrutivo

EMAT – Electro-magnetic acoustic transducer

MFL – Magnetic flux leakage

SMYS – Specified Minimum Yield Strength

ZTA – Zona termicamente afetada

SMAW – Shielded metal arc welding

FCAW-S – Self-Shielded Flux Cored welding

FCAW – Flux-cored arc welding

GMAW-P – Pulsed gas metal arc welding

MCAW-P – Pulsed Metal-Cored Arc Welding

HV – Dureza Vickers

EWI – Edison Welding Institute

LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

## Sumário

1 – Introdução .....	1
2 – Objetivo.....	3
3 – Revisão Bibliográfica.....	4
3.1 – Tubos e tubulações.....	4
3.2 – Inspeção de dutos .....	5
3.3 – Defeitos em dutos.....	9
3.4 – Tipos e métodos de reparo com soldagem .....	13
3.4.1 – Luvas bipartidas de aço.....	15
3.4.1.1 – Luvas tipo A.....	16
3.4.1.2 – Luvas tipo B .....	18
3.4.2 – Deposição de metal com soldagem .....	20
3.4.3 – Trepanação (Hot Tapping) .....	23
3.4.4 – Chapa de Reforço Estrutural (Patch).....	25
3.5 – Problemas de soldagem e controles (soldagem em operação) .....	25
3.5.1 –Perfuração (Burnthrough) .....	26
3.5.2 – Trincamento induzido por hidrogênio (HIC) .....	28
3.6 – Automatização da soldagem em operação .....	31
4 – Conclusões .....	35
5 – Referências bibliográficas .....	36

## 1 – Introdução

O transporte dutoviário vem se consolidando como uma maneira eficiente e de baixo custo operacional para o transporte de minérios, etanol, gás, petróleo e derivados. Dessa forma, foi inevitável a ampliação da malha de dutos nos últimos anos. A figura 1 mostra a evolução da malha de gasodutos de transporte no Brasil nos últimos anos, atingindo 9422 quilômetros até 2014 [1, 2].

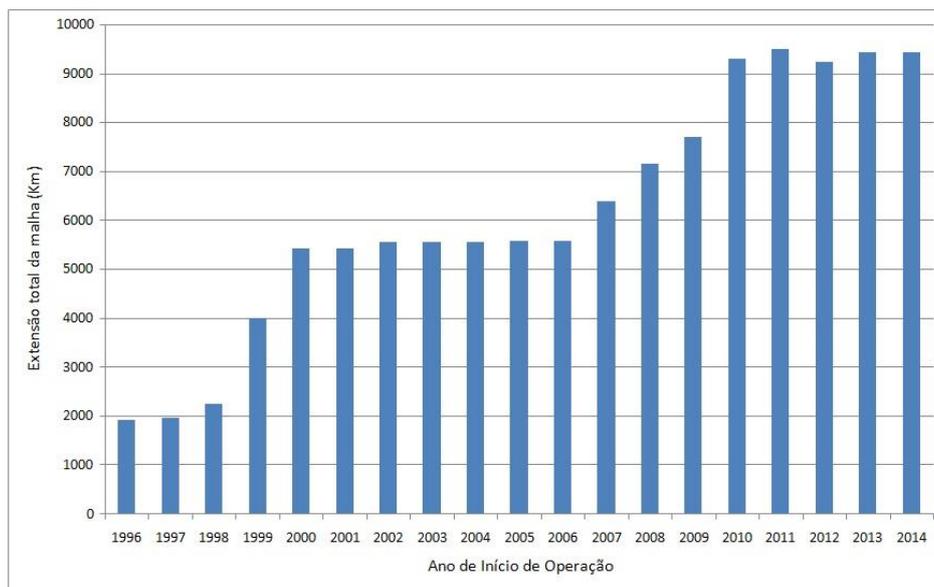


Figura 1: Desenvolvimento da malha de gasodutos de transporte no Brasil [1].

No Brasil existem ainda 2442 quilômetros de dutos para transporte de minério, 7936 quilômetros de dutos para transporte e transferência de etanol, petróleo e seus derivados [2, 3].

De modo geral, os tubos utilizados na construção dos dutos são produzidos com aços fabricados atendendo a norma API 5L [4]. No decorrer de sua utilização defeitos tendem a aparecer na estrutura dos dutos. Como exemplo, pode se citar a ocorrência de corrosões externas e internas, erosões, trincamentos e amassamentos. Neste contexto, reparos com solda são realizados nos dutos ainda em operação, para minimizar as perdas de produção causadas por uma eventual parada do duto para manutenção. Diante deste cenário, o desafio é realizar os reparos soldados garantindo a integridade dos dutos sem introduzir outros defeitos.

O procedimento de soldagem em operação é crítico, pois se trata da soldagem de um duto com um fluxo contínuo que gera uma taxa de resfriamento mais acelerada potencializando os riscos relacionados fragilização da estrutura e aumento da dureza [5].

Em se tratando de soldagem de dutos em operação, são duas as preocupações principais, a ocorrência da perfuração do duto e de trincamento induzido por hidrogênio [6, 7].

Neste contexto, sistemas que automatizem ou mecanizem o processo de soldagem de reparos em operação de dutos se tornam atrativos.

## **2 – Objetivo**

Sintetizar o que há de mais recente em termos de soldagem de dutos em operação e mostrar de maneira clara e objetiva quais os principais problemas, aplicações e desafios deste processo.

Este estudo não visa comparar as diversas maneiras de reabilitação da integridade de tubos, focando apenas aquelas que se utilizam de soldagem para fazê-lo.

### 3 – Revisão Bibliográfica

#### 3.1 – Tubos e tubulações

Tubos são dispositivos com seção circular que se apresentam com cilindros ocos, utilizados para o transporte de fluidos [8].

Tubulação é a união de diversos tubos que interligam os locais de origem e destino do fluido. É comum o emprego da nomenclatura duto para se referir a tubulações de transporte. A figura 2 mostra uma serie de tubos desfilados que serão unidos para construção de um duto.



Figura 2: Serie de tubos desfilados para construção de mineroduto [9].

A demanda pela construção das tubulações é decorrente, na maioria dos casos, da distancia do ponto de utilização do fluido e da fonte geradora [8].

As tubulações podem ser classificadas quanto seu emprego e fluido a ser conduzido e sua construção é normatizada. A norma ASME B31 é largamente utilizada e estabelece os critérios necessários para construção de dutos [8].

Na construção de oleodutos, gasodutos e minerodutos, são usualmente utilizados aços de alta resistência e baixa liga para fabricação dos tubos, nos quais pequenas quantidades de Ti, V e Nb podem estar presentes [8]. A norma API 5L especifica o processo de fabricação destes tubos, que podem ser sem ou com costura, e apresentar níveis de resistência distintos. O aço mais utilizado para construção dutos de gás, petróleo e minério de alta pressão é o com classificação X70, porém no passado os aços X60 e X65 foram bastante empregados. A norma permite a utilização dos processos de

soldagem com e sem adição de metal para realização da solda da costura, que pode ser longitudinal, mais utilizada, ou helicoidal. Os processos mais utilizados para a soldagem da costura são o arco submerso (SAW) e soldagem por resistência elétrica (ERW) [8].

### ***3.2 – Inspeção de dutos***

A depender dos volumes e distâncias de transporte, a utilização de dutos em comparação aos outros modais de transporte, geralmente é mais vantajosa economicamente, confiável e segura [10]. Para assegurar a confiabilidade e o bom funcionamento do sistema é necessária a realização de atividades de manutenção. A inspeção efetiva do duto é primordial para garantir sua função e possibilita a análise da integridade estrutural, podendo detectar defeitos em potencial antes da ocorrência de falhas [11].

A inspeção dos dutos pode ser feita de forma visual ou com a utilização de equipamentos conhecidos como “pigs” [11].

A inspeção visual consiste na forma mais simples de inspeção de um duto, utilizando o olho humano. Este método é restrito para a superfície externa, porém podem ser utilizados endoscópios que permitem a inspeção interna do duto, mas, para isto, existe a necessidade de parada da operação e poucos metros podem ser inspecionados [11].

Para uma verificação completa da condição do duto é necessária a aquisição de informações das superfícies interna e externa do duto, da espessura da parede, posição das soldas circunferências e longitudinais. Para isso, o acesso irrestrito ao duto seria necessário gerando custo elevado e perda de tempo. Para suprir esta necessidade, são utilizados dispositivos montados com equipamentos de END equipados com baterias que se movem no interior dos dutos, estes são conhecidos como “pigs” [11]. A figura 3 mostra um “pig” utilizado para inspeção de um duto.

Dentre as técnicas de END disponíveis, pode ser destacada a aplicação dos testes EMAT, corrente parasita, ultrassom e MFL na inspeção de dutos.

EMAT é um teste não destrutivo com grande aplicação na indústria, utilizado para a avaliação de produtos acabados e tem eficiência satisfatória na detecção de danos por corrosão sob tensão e descolamento de revestimentos [11].



Figura 3: Pig instrumentado utilizado para inspeção de um mineroduto [9].

Este teste consiste na geração e detecção de um pulso ultrassônico dentro do objeto metálico ou ferromagnético pela aplicação de campo magnético. As ondas sonoras são geradas no material não sendo necessária a utilização de acoplantes [11]. A figura 4 ilustra o funcionamento do teste.

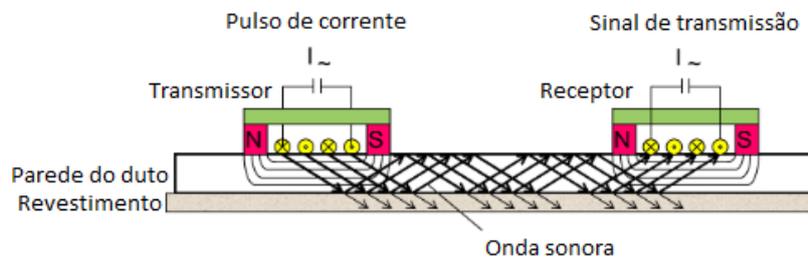


Figura 4: Funcionamento da técnica de inspeção EMAT [11].

O teste de correntes parasitas é baseado em indução eletromagnética. Esta tecnologia pode ser utilizada para detecção de falhas em materiais condutores ou para medir a distância entre o material condutor e o sensor. Neste caso, não existe a necessidade de contato direto entre o equipamento de teste e o material testado [11].

O princípio básico do teste de correntes parasitas envolve a colocação de um sensor na forma de uma bobina alimentada com corrente alternada perto da peça de teste. A corrente na bobina gera um campo magnético variável, o que produz correntes parasitas no material de teste. As variações de fase e a magnitude destas correntes

parasitas são monitoradas usando uma segunda bobina ou pela medição das alterações na corrente que flui na bobina primária [11]. A figura 5 ilustra o funcionamento da técnica de inspeção por corrente parasita. A técnica de correntes parasitas é aplicada na detecção de trincas superficiais ou perto da superfície e na medição da condutividade elétrica e espessura dos revestimentos [11].

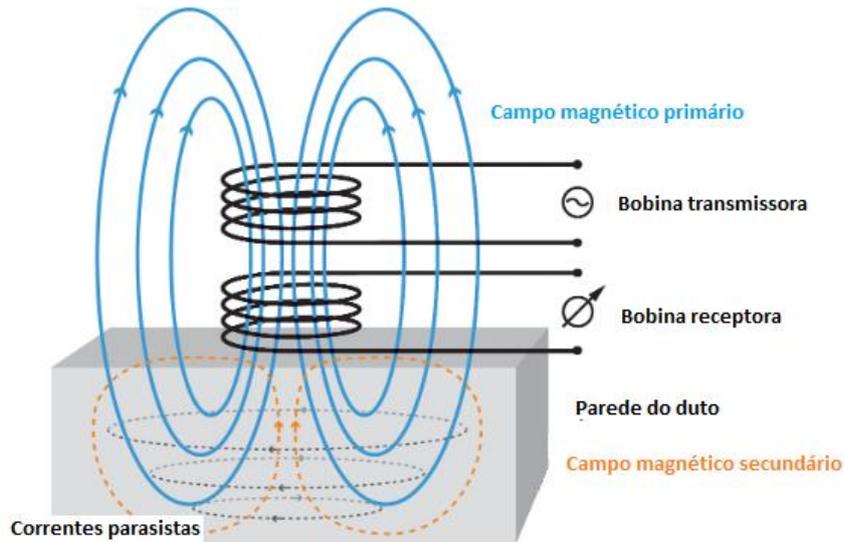


Figura 5: Ilustração do funcionamento da inspeção por corrente parasita [11].

O ensaio por ultrassom é um método não destrutivo, onde feixes de ondas sonoras de alta frequência são introduzidos no material de teste para medir a espessura da parede ou para detectar defeitos no material. A faixa de frequência audível para o ouvido humano é entre 20 Hz e 20 kHz: ondas sonoras com frequências acima de 20 kHz são chamadas de ultrassom [11].

Para a medição da espessura da parede, um transdutor ultrassônico é usado para gerar uma onda sonora no cabeçote, que é então transmitida através de um acoplante líquido para a superfície da peça. O acoplante é necessário para garantir que não exista nenhum intervalo de ar entre a sonda e o material a ser testado, pois o ar não apresenta boas características para condução das ondas sonoras. O transdutor registra as reflexões (ecos) causadas pelas superfícies adjacente e remota do material a ser testado, no caso

de tubos, as suas superfícies internas e externas [11]. A figura 6 ilustra o funcionamento do ultrassom para medição de espessura.

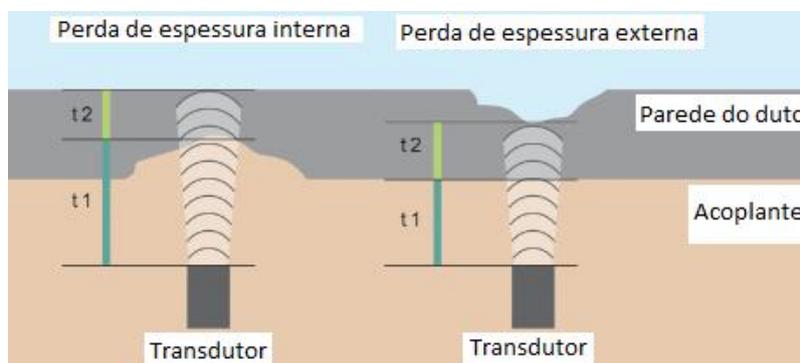


Figura 6: funcionamento do ultrassom para medição de espessura [11].

A diferença nos tempos de chegada destas reflexões está diretamente relacionada com a distância entre o transdutor e as superfícies da peça de teste. Assim, com base nos reflexos da onda ultrassônica, a espessura do material pode ser avaliada.

Um número suficiente de sensores é necessário para garantir a cobertura circunferencial completa do corpo de prova inspecionado [11]. Dependendo da aplicação usa-se inclinar o transdutor para maior confiabilidade na inspeção. A figura 7 ilustra o funcionamento da utilização de ultrassom para detecção de trincas.

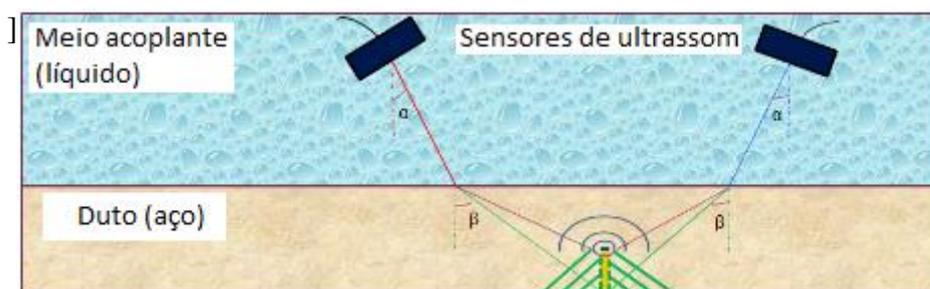


Figura 7: Funcionamento do ultrassom para detecção de trincas em dutos [11].

O teste MFL é largamente utilizado para detecção de corrosão em estruturas de aço. O princípio básico do teste envolve magnetizar um objeto de metal ferroso até o nível de saturação com um poderoso campo magnético. Onde o objeto não tem falhas, o fluxo magnético irá permanecer intacto, conforme mostra a figura 8 [11].

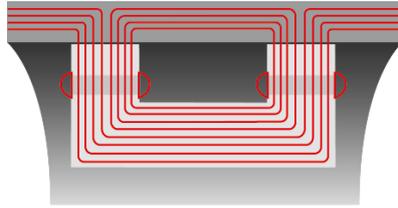


Figura 8: Ilustração da magnetização no método MFL de inspeção [11].

Altos níveis de magnetização são necessários para diferenciar a corrosão de outras características dos dutos, tais como pontos duros, variações tensão e deformação e para minimizar os efeitos de magnetização remanescente e velocidade [11].

Onde há perda interna ou externa de metal, as fugas de fluxo magnético a partir do objeto se diferem conforme figura 9.

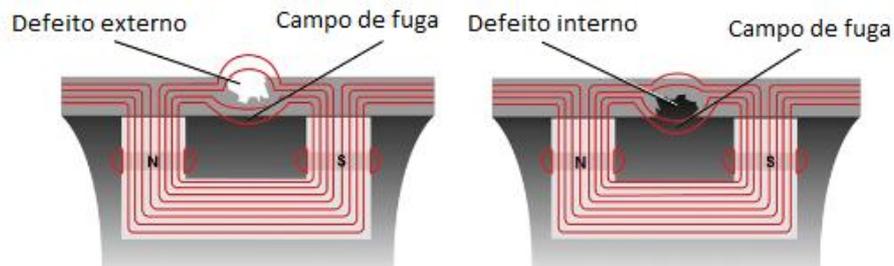


Figura 9: Fugas de fluxo magnético para defeitos nas superfícies interna e externa [11].

No equipamento de teste MFL, um sensor magnético é colocado entre os pólos do ímã para gravar o campo de fuga por meio de sensores de efeito Hall. Sensores de corrente parasita, integrados nos sensores de fluxo magnético, são utilizados para melhorar a diferenciação entre defeitos internos e externos [11].

### 3.3 – Defeitos em dutos

Na maioria dos casos, as substâncias conduzidas pelos dutos têm características que causam risco às pessoas, propriedades e meio ambiente como, por exemplo, a inflamabilidade e toxicidade. Dessa forma, o risco operacional dos dutos deve ser avaliado e gerenciado. Tal avaliação pode ser realizada, através do produto da frequência das falhas pelo potencial de consequência das mesmas [12].

Uma grande variedade de tipos de defeitos é conhecida com uma larga gama de causas, porém são três, as principais categorias de defeitos: deformação geométrica, perda de metal e trincamento [11].

A deformação geométrica em dutos pode ser causada por flutuações de pressão e extremo carregamento mecânico. É possível a ocorrência de amassamento durante o lançamento do duto na vala durante o processo de construção, devido à presença de rochas no leito da mesma, o que pode ser evitado com uma preparação previa adequada. A deformação pode ter várias formas incluindo torções, ondulações ou amassamentos [11]. A figura 10 mostra um amassamento encontrado em mineroduto.



Figura 10: Exemplo de amassamento em tubulação de mineroduto [9].

A perda de espessura causa o afinamento da parede do duto podendo causar a ruptura do mesmo e no caso de duto a grande profundidade causar o esmagamento do mesmo. [11]. As causas da perda de espessura são corrosão, interna ou externa, arrancamento mecânico e erosão. As figuras 11 e 12 mostram exemplos de corrosão externa e arrancamento mecânico em uma tubulação de mineroduto.



Figura 11: Corrosão externa em tubulação de mineroduto [9].



Figura 12: Arrancamento mecânico de material em tubulação de mineroduto [9].

O fato dos dutos serem enterrados, em sua maioria, os protegem das intempéries e do vandalismo, porém os expõe a eventos sísmicos e geológicos que podem fragilizar a estrutura do duto e uma possível falha, especialmente por trincamento [11]. Outras causas de geração de trincas são os ciclos de carregamento ou térmicos que os dutos estão sujeitos e ainda por uma combinação de corrosão e sollicitação mecânica [11]. A figura 13 mostra um exemplo de dutos trincados.



Figura 13: Trinca presente em tubulação de mineroduto [9].

Atualmente, a interferência externa é o principal causador de incidentes na Europa e, em conjunto com a movimentação de terreno, são os que possuem grande potencial de consequências negativas, o que enfatiza a sua importância para os operadores de duto [13]. As figuras 14 e 15 mostram a distribuição de incidentes ocorridos na Europa, por estas causas nos períodos compreendidos entre 2009 e 2013, e 2004 e 2013.

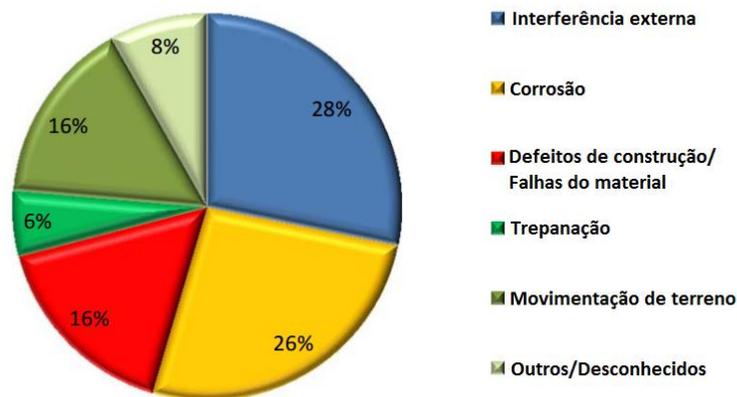


Figura 14: Distribuição de incidentes (2009–2013) [13].

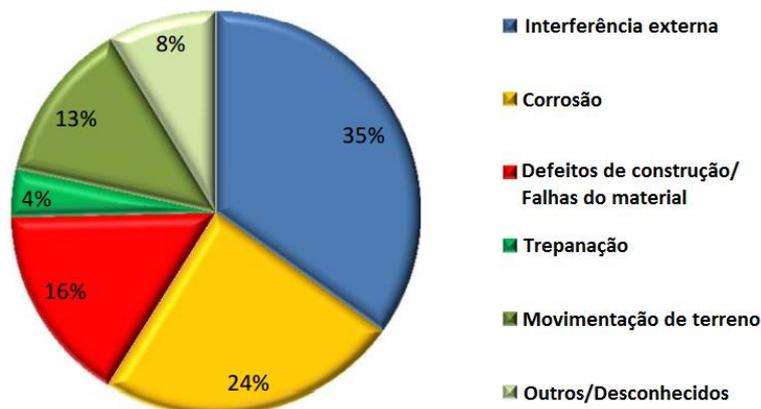


Figura 15: Distribuição de incidentes (2004–2013) [13].

No período compreendido em 2009 e 2013, observa-se que a corrosão como a causa primária de incidentes foi a que mais cresceu, chegando aos mesmos patamares da interferência externa. Contudo suas consequências tendem a ser menos graves [13].

### 3.4 – Tipos e métodos de reparo com soldagem

São duas as principais aplicações de soldagem em tubulações em operação: soldas de manutenção para reforço estrutural do duto ou soldas para instalação de dispositivos necessários para a realização de furos nos dutos. A realização de furos na tubulação pode ser utilizada para a remoção de parte ou trechos defeituosos ou para instalação de instrumentos ou derivações.

Em se tratando das soldas com fins de manutenção, as possibilidades de utilização de soldagem estão listadas a seguir [14]:

- ✓ Instalação de luvas bipartidas de aço (*Sleeves*);
- ✓ Deposição de metal com solda;
- ✓ Trepanação para remoção de defeitos e trechos defeituosos (*Hot Tapping*);
- ✓ Instalação de chapa de reforço estrutural (*Patch*).

Os reparos podem ser aplicados a mais de um tipo de defeitos, assim como um determinado defeito pode ser recuperado por métodos de reparo distintos, sendo necessária uma avaliação para cada situação, considerando a viabilidade da aplicação de cada método. A tabela 1 compara a possibilidade de utilização de cada método, no caso de reparos que necessitam de realização de solda. Na tabela, quando a classificação for *permanente*, ela indica que o método de reparo pode ser utilizado de forma definitiva, enquanto que a classificação como *temporário*, indica que é uma solução paliativa e, como *não*, que o método de reparo não é recomendado. Em casos específicos foram adicionadas notas.

Tabela 1: Opções de reparo com solda para vários tipos de defeitos [14].

<b>Tipo de Defeito (a)</b>	<b>Luva tipo A</b>	<b>Luva tipo B</b>	<b>Deposição com soldagem</b>	<b>Chapa de reforço</b>	<b>Trepanação</b>
Vazamento (por qualquer causa) ou defeito >0,8t	Não	Permanente	Não	Não	Permanente
Corrosão externa					
Rasa para pit moderado < 0,8t	Permanente	Permanente	Permanente	Temporário	Permanente
Pit profundo >= 0,8t	Não	Permanente	Não	Não	Permanente
Seletiva na solda de costura	Não	Permanente (b)	Não	Temporário	Não
Defeito ou corrosão interna	Permanente (c)	Permanente	Não	Não	Não
Perda de metal por arrancamento ou outra perdas	Permanente (d)	Permanente	Permanente (d)	Não	Permanente
Queimadura de arco, inclusões ou laminações	Permanente	Permanente	Permanente (d)	Não	Permanente
Ponto com dureza excessiva	Permanente	Permanente	Não	Não	Permanente
Amassamento					
Amassamento suave	Permanente (e)	Permanente	Não	Não	Não
Amassamento com concentrador de tensão na solda de costura ou parede do duto	Permanente (d) (e) (f)	Permanente	Não	Não	Permanente
Amassamento com concentrador de tensão na solda circunferencial	Não	Permanente	Não	Não	Não
Trinca					
Trinca rasa < 0,4t	Permanente (d)	Permanente (b)	Permanente (d)	Temporário	Permanente
Trinca profunda >=0,4t e < 0,8t	Permanente (d)	Permanente (b)	Permanente (d)	Não	Permanente
Defeito na solda de costura					
Defeito Volumétrico	Permanente (d)	Permanente	Não	Não	Permanente
Defeito linear	Permanente (d)	Permanente (b)	Não	Não	Permanente
Defeito na solda de costura ERW ou próximo desta	Não	Permanente (b)	Não	Não	Não
Defeito na solda circunferencial	Não	Permanente	Permanente (g)	Não	Não
Enrugamento	Não	Permanente (h)	Não	Não	Não
Trincas induzida por hidrogênio	Permanente	Permanente	Não	Não	Não

- (a) A substituição da parte afetada do duto sempre pode ser utilizada para qualquer defeito.
- (b) Deve se garantir que o comprimento do defeito é subcrítico.
- (c) Deve se garantir que o defeito interno não continuará crescendo além dos limites aceitáveis.
- (d) Reparo deve ser utilizado em defeitos menores que 0,8t de profundidade, desde que o material danificado seja removido por esmerilhamento e inspecionado.
- (e) Usar material de adição no amassamento e uma avaliação de engenharia da fadiga é recomendável.
- (f) Devem ser seguidos os tamanhos máximos de amassamentos de acordo com regulamentações e códigos.
- (g) Defeito de ser removido por esmerilhamento e deve ser realizada inspeção antes e depois da solda.
- (h) Luva deve ser projeto e fabricada com configuração especial.

#### **3.4.1 - Luvas bipartidas de aço**

A utilização de luvas bipartidas de aço foi desenvolvida nos anos 70 e vem sendo estudada desde então [15]. A técnica consiste no envelopamento das áreas defeituosas do duto com luvas bipartidas que envolvem toda a superfície externa, sua fixação ocorre aplicando solda diretamente à tubulação em operação ou apenas na luva. Geralmente, sua aplicação se destina a reparação de defeitos de corrosão interna e externa, amassamentos, erosões e trincas. As luvas bipartidas podem ser classificadas de acordo com seu processo de aplicação em tipo A para reforço, onde não é requerida a realização de soldas de filete circunferências, e tipo B para contenção de pressão onde as soldas de filete circunferências são necessárias [15].

A luva bipartida deve ser fabricada para suportar as mesmas condições de trabalho do duto original [10]. Dessa forma, definições de espessura e grau do aço devem ser suficientes para resistir no mínimo o que o duto original resiste. A instalação da luva bipartida deve exceder no mínimo 50 milímetros a partir dos limites do defeito [10]. A luva bipartida de ser posicionada, em caso de dutos com costura, de forma que o chanfro de união das duas partes da luva fique defasado da solda da costura do tubo.

Para que a utilização da luva bipartida seja eficaz, seu ajuste com o duto deve ser o mais perfeito possível a fim de garantir que os esforços aplicados na região do defeito sejam transferidos para a luva bipartida [10]. Contudo, estudos mostram que é possível à soldagem de uma junta com folga de até 5,0 mm entre a luva bipartida e o tubo, sem a geração de trincas [16]. A redução da pressão de operação e a utilização de mecanismos para comprimir a luva bipartida sobre o duto, durante a realização do reparo, favorecem a transferência dos esforços [10]. É usual a aplicação de materiais para preenchimento dos vazios existentes entre a luva bipartida e o duto, normalmente epóxi ou compostos de poliéster, para assegurar maior eficiência do reforço [14]. A figura 16 ilustra a utilização de mecanismo para comprimir a luva bipartida.



Figura 16: Dispositivo mecânico para comprimir a luva bipartida sobre o duto [17].

#### **3.4.1.1 – Luvas tipo A**

A luva bipartida tipo A, simplesmente envolve a duto e proporciona reforço estrutural para a área com defeito [15]. Para tal, não é necessário a realização da soldagem de filete na extremidade da luva bipartida e este é um grande atrativo por evitar a aplicação de solda diretamente no duto em operação [10,15]. As figuras 17, 18 e 19 mostram, respectivamente, uma configuração típica da montagem da luva bipartida tipo A, detalhes da solda e a foto de uma luva com chapa lateral de sobreposição instalada em um duto.

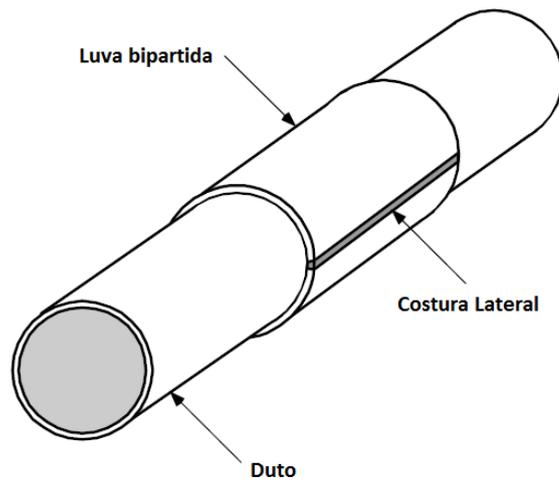


Figura 17: Ilustração da configuração típica luva bipartida tipo A [15].

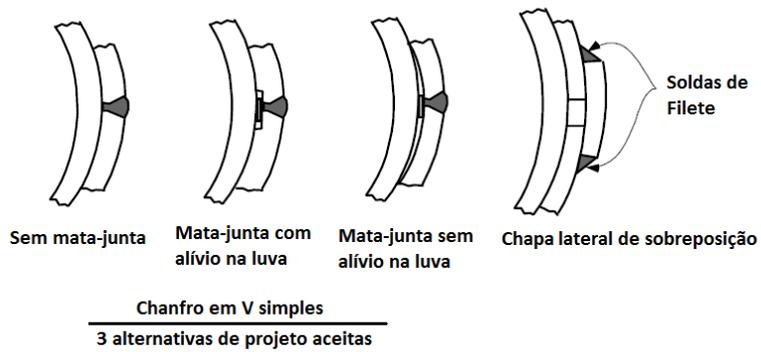


Figura 18: Ilustração detalhes da solda da luva bipartida tipo A [15].



Figura 19: Luva bipartida tipo A com chapa lateral de sobreposição [14].

A utilização da luva bipartida tipo A é mais indicada para defeitos curtos, aqueles os quais o comprimento  $L$ , seja menor ou igual a  $(20Dt)^{1/2}$ , onde  $D$  é o diâmetro do duto e  $t$  é a espessura da parede, neste caso é indicado que a espessura da luva bipartida não seja menor que dois terços da espessura do duto [14]. Nos casos em que o comprimento do defeito é maior que  $(20Dt)^{1/2}$  a espessura deve ser equivalente ou superior à espessura do duto [14]. A inexistência da solda circunferencial torna a aplicação deste método de reparo ineficaz para defeitos com orientação circunferencial, uma vez que, que não tem efeito nas tensões longitudinais exercidas no duto [10,14]. Não pode ser aplicado para reparar defeitos com vazamento ou que possam vir a vazar [10,14]. Outro problema em potencial é a corrosão, que pode ocorrer na fresta formada entre a luva e o duto [14].

#### **3.4.1.2 – Luvas tipo B**

A luva bipartida do tipo B, também envolve o duto e proporciona o reforço estrutural, porém devido à solda de filete circunferencial aplicada nas extremidades da luva bipartida, esta pode conter pressão no caso de um defeito que esteja vazando ou que por ventura venha a vazar [15]. A utilização da luva bipartida tipo B é capaz de recuperar a resistência do duto na área danificada a um nível de pressão que excede os 100% do limite de escoamento mínimo especificado (SMYS) [15]. No caso da utilização da luva bipartida tipo B, não é indicada a utilização da chapa de lateral de sobreposição na junção das duas partes da luva, pois esta é mais vulnerável as tensões induzidas pelo pressurização interna em relação as solda de topo de espessura total [14]. As figuras 20 e 21, ilustram a configuração de montagem da luva bipartida tipo B e sua aplicação na prática.

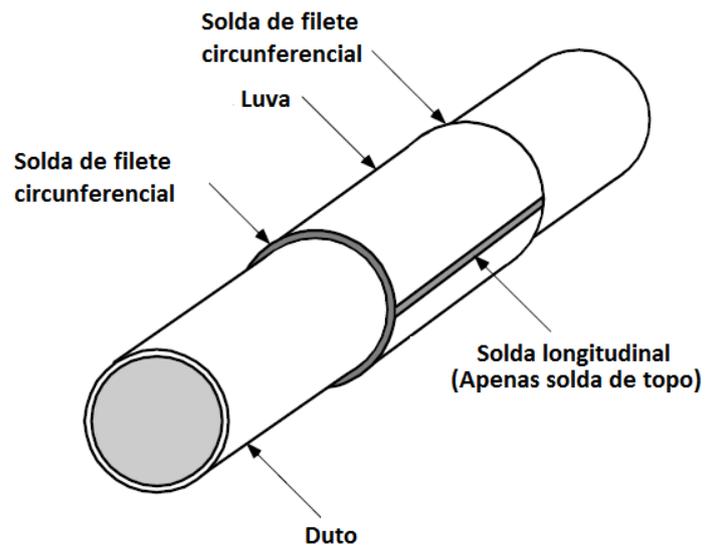


Figura 20: Configuração de montagem da luva bipartida tipo B [15].



Figura 21: Luva bipartida tipo B instalado em um mineroduto [9].

A região onde será aplicada a solda circunferencial deve ser inspecionada para verificar a espessura remanescente a fim de avaliar o risco de perfuração e após a realização do reparo ainda devem ser realizadas inspeções de líquido penetrante e partículas magnéticas como maneira de garantir a integridade do reparo realizado

### **3.4.2 – Deposição de metal com soldagem**

Inicialmente a utilização de reparos com deposição de solda foi desenvolvida para recuperação de defeitos de corrosão externa, porém pode ser aplicada também para recuperar regiões com perda de espessura interna. [18]. Este tipo de reparo é atrativo para situações onde a instalação das luvas bipartidas é difícil ou impossível como em regiões curvas e próximas a instalações [19]. Reparos realizados por deposição de solda podem recuperar a resistência estática e a ciclos de pressão [18,19].

A aplicação deste método para recuperação de corrosão interna tem um benefício adicional, permite que inspeções com ultrassom sejam realizadas, assim é possível monitorar o desenvolvimento do defeito, o que não é possível quando a luva bipartida é utilizada [19].

A sequência de soldagem para o reparo com deposição de solda é mostrada nas figuras 22 e 23. A deposição de solda consiste em uma sequência de soldagem na qual o primeiro cordão é realizado no perímetro delimitando a área de reparo e onde é permitida a realização das demais soldas, a fim de evitar a formação de áreas de ZTA que não sejam tratadas pelos passes seguintes [14]. Posteriormente, são realizadas soldas de enchimento paralelas. Caso seja necessária a aplicação de mais uma camada, é esmerilhada a primeira solda de perímetro até produzir um canto de 1 a 2 milímetros, uma nova solda de perímetro é aplicada consumindo apenas o canto produzido pela etapa de esmerilhamento [14]. O objetivo da segunda solda de perímetro é tratar a ZTA da primeira solda. O esmerilhamento auxilia o soldador proporcionando melhores condições de soldagem [14].

Antes de iniciar o processo é recomendado que sejam removidos todos os produtos de corrosão oriundos do defeito a ser reparado.

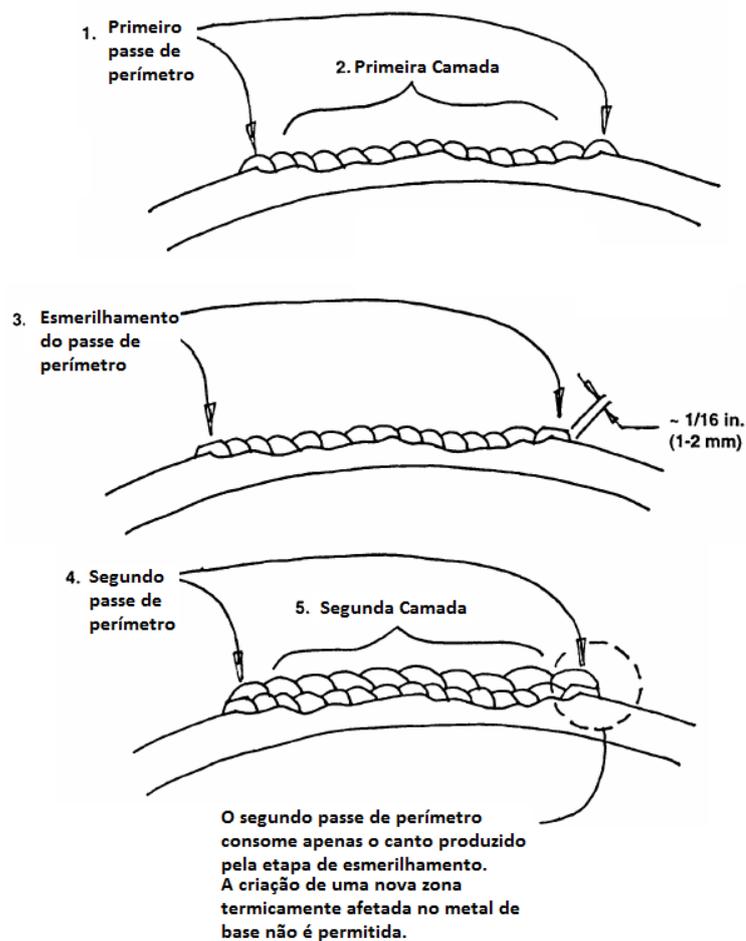


Figura 22: Sequência típica de soldagem de deposição [18].

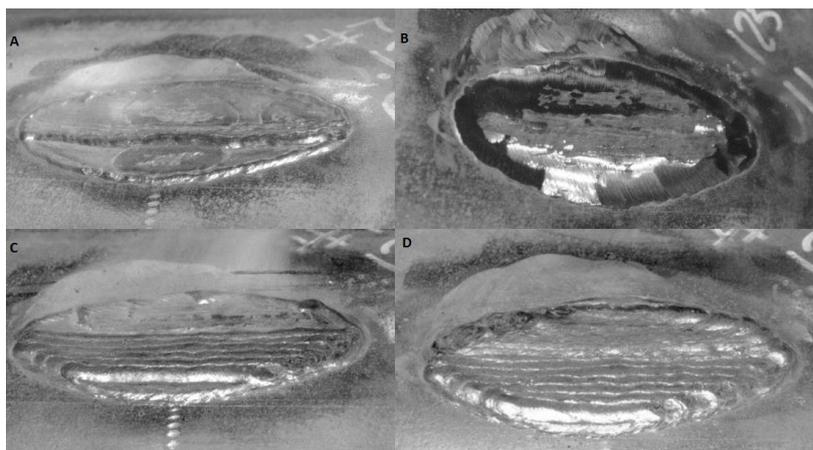


Figura 23: Reparo com deposição de solda. A) Deposição do primeiro passe de perímetro e diversos passes da primeira camada; B) Esmerilhamento do primeiro passe de perímetro; C) Deposição do segundo passe de perímetro e diversos passes da segunda camada; D) Reparo completo [14].

A figura 24 representa a utilização de deposição de solda para reparo de defeito de redução de espessura interna. A figura 25 mostra um reparo de um defeito interno em um cotovelo de 90° realizado com deposição externa de solda.

A técnica de soldagem de deposição externa para reparos internos é similar ao processo de ilustrado na figura 22, contudo a área de deposição deve no mínimo superar a área defeituosa em um comprimento no mínimo equivalente a espessura original, em todas as direções, o mesmo é verdadeiro para a espessura mínima na região do defeito [18].

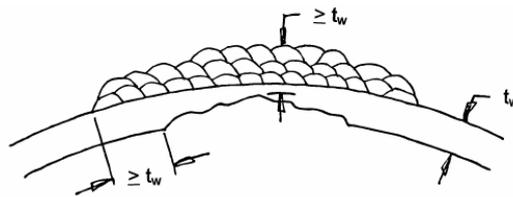


Figura 24: Técnica de reparo externo por deposição de solda em defeito interno [18].



Figura 25: Reparo interno de um cotovelo realizado com deposição externa de solda [20].

Para aumentar a segurança das pessoas envolvidas no processo de deposição de solda, a espessura mínima permitida é de 3,2 milímetros. Quando a espessura remanescente é menor será necessário controlar o *heat input* e os eletrodos deveram ser

de menor diâmetro. A aplicação de reparo por deposição é proibida próximo a soldas longitudinais realizadas pelo processo de soldagem por resistência elétrica (ERW) ou trincas. [18]

### 3.4.3 - Trepanação (*Hot Tapping*)

A trepanação é uma técnica na qual é realizada a perfuração e corte de um duto em operação, para isso é necessária a instalação de conexões soldadas na tubulação [21]. Tais conexões são necessárias para a instalação de uma válvula e máquina de perfuração e corte. A figura 26 mostra uma conexão soldada em um duto.

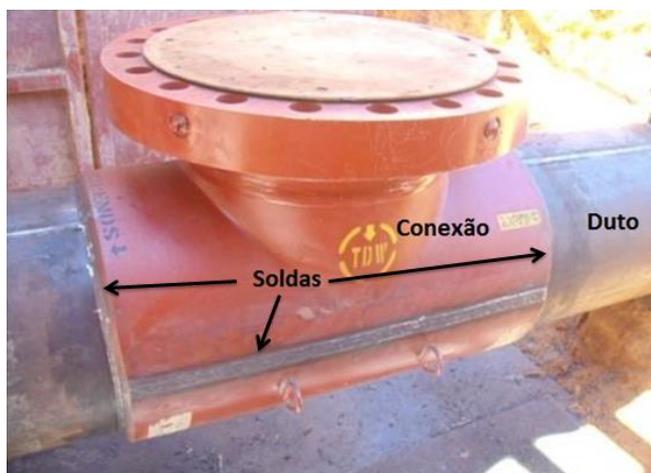


Figura 26: Conexão utilizada para trepanação soldada a um duto [9].

A trepanação é um método bastante atrativo, pois permite estender ou modificar sistemas já existentes, substituir trechos ou partes defeituosas, instalar instrumentos e dispositivos ao duto, sem a necessidade de interromper a operação, reduzindo perdas e custos [10, 22, 23]. No caso de remoção de defeitos do duto com trepanação, deve se assegurar que todo o defeito esteja contido na área a ser removida pelo corte [14].

A operação de trepanação consiste na soldagem das conexões, instalação da máquina de corte e válvula, abertura da válvula, abaixamento da serra e realização do corte, remoção da serra e parte cortada, fechamento da válvula, remoção do produto residual e retirada do equipamento de corte, conforme ilustrado na figura 27 [23].

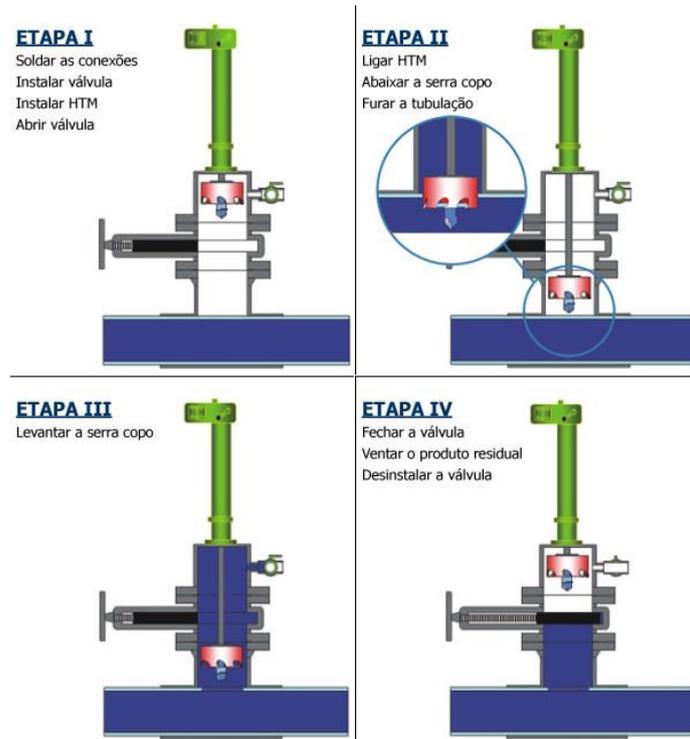


Figura 27: Exemplo de operação de trepanação em dutos [23].

No caso da utilização da trepanação para remoção de trecho defeituoso do duto sem parada operacional, é necessária a execução de quatro furos, conforme esquema ilustrado na figura 28. Neste caso, são inseridos componentes de vedação nos cortes realizados nos limites do trecho a ser substituído.

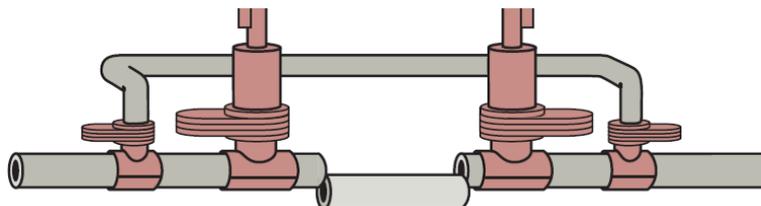


Figura 28: Esquema de trepanação para substituição de trecho sem parada operacional [24].

#### **3.4.4 – Chapa de Reforço Estrutural (Patch)**

A chapa de reforço estrutural é utilizada para cobrir uma região limitada da superfície do duto [14]. A figura 29 mostra uma chapa de reforço estrutural soldada em um gasoduto. É utilizada para reparo de defeitos de menor dimensão e em dutos com material de SMYS menor que 270 MPa [10]. O comprimento máximo é de 150 milímetros e a largura máxima a metade da circunferência do duto [10]. Esta metodologia é muito sensível a defeitos de fabricação e não deve ser utilizada para reparar dutos de alta pressão de trabalho [14].

Em algumas aplicações a utilização de chapa de reforço estrutural se mostra tão eficiente quanto à das luvas bipartidas tipo A no reforço de duto com defeito, porém as soldas de filete longitudinal são um problema em potencial [14].



Figura 29: Chapa de reforço estrutural soldada em um gasoduto [25].

#### **3.5 – Problemas de soldagem e controles (soldagem em operação)**

O processo de soldagem de dutos em operação seja, para modificações na malha existente, realização de reparos, está sujeita a duas limitações [5, 6, 7]. Uma delas é o excesso de penetração do cordão de solda, que pode causar a perfuração do duto e vazamento do fluido e a outra é o trincamento induzido por hidrogênio.

### 3.5.1 -Perfuração (Burnthrough)

A perfuração do duto durante o processo de soldagem ocorrerá quando na superfície interna a temperatura atingir um nível no qual a resistência da parede do duto seja reduzida de modo que este não suporte mais as tensões atuantes [7]. A figura 30 ilustra a perfuração de um duto durante soldagem.



Figura 30: Perfuração de dutos durante a soldagem [26].

O risco de perfuração aumenta com a diminuição da espessura de parede do duto e com o aumento da penetração durante a soldagem [27]. Além disso, é mais fortemente relacionado ao limite máximo de temperatura que se pode alcançar na superfície interna do duto e tem fraca relação com a pressão interna do duto [7]. Testes mostram que para espessuras superiores a 6,4mm (0.250in) e utilização de eletrodos de baixo hidrogênio a probabilidade de ocorrência da perfuração é mínima para as práticas típicas de soldagem em operação [28]. É possível soldar dutos pressurizados com espessuras menores que 3,2mm, porém é necessário controle cuidadoso da energia do processo [7,29].

Estudos empíricos mostram que a perfuração tende a ocorrer quando temperaturas da parede interna do duto alcançam 1260°C (2300°F), por questões de segurança a soldagem com eletrodos de baixo hidrogênio (SMAW) adota-se o limite máximo de temperatura de 982°C (1800°F) e este limite para eletrodos celulósicos é 760°C (1400°F) [7]. É interessante mencionar que a referência consultada não deixa claro se os valores de temperatura indicados são válidos para alguma classe específica de aço ou para qualquer classe.

Estudos com a aplicação de modelagem computacional indicam que os valores de tensão se tornam próximos do máximo admissível sob a poça de fusão e que o risco de perfuração é alto nos primeiro e segundo passes, reduzindo na aplicação do terceiro passe [30]. A figura 31 mostra um resultado da modelagem da distribuição de tensões durante a soldagem do primeiro passe de uma chapa vertical em um canal retangular.

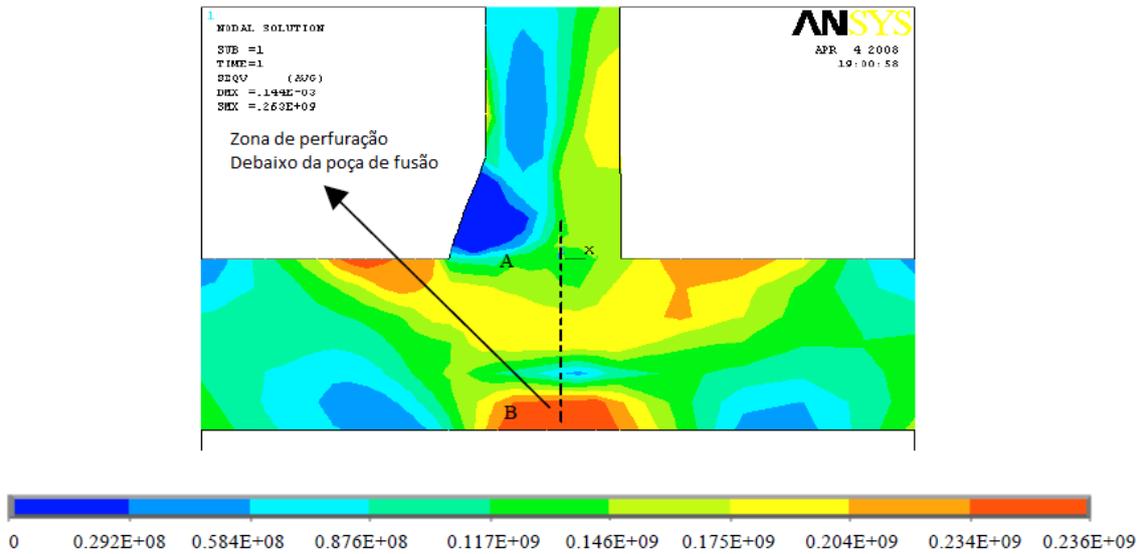


Figura 31: Simulação da distribuição de tensões na soldagem do primeiro passe [30]

Dessa forma, processos de soldagem com maior aporte térmico têm maior tendência à ocorrência da perfuração para uma dada situação. A figura 32 mostra a variação da temperatura de pico medidas na superfície interna do duto durante a soldagem com diferentes processos com energia de 1,29 kJ/mm em função da espessura da parede do tubo. Observa-se que para a maioria dos casos o processo de soldagem SMAW apresenta menores valores de temperatura de pico, enquanto o processo FCAW-S apresenta os maiores valores.

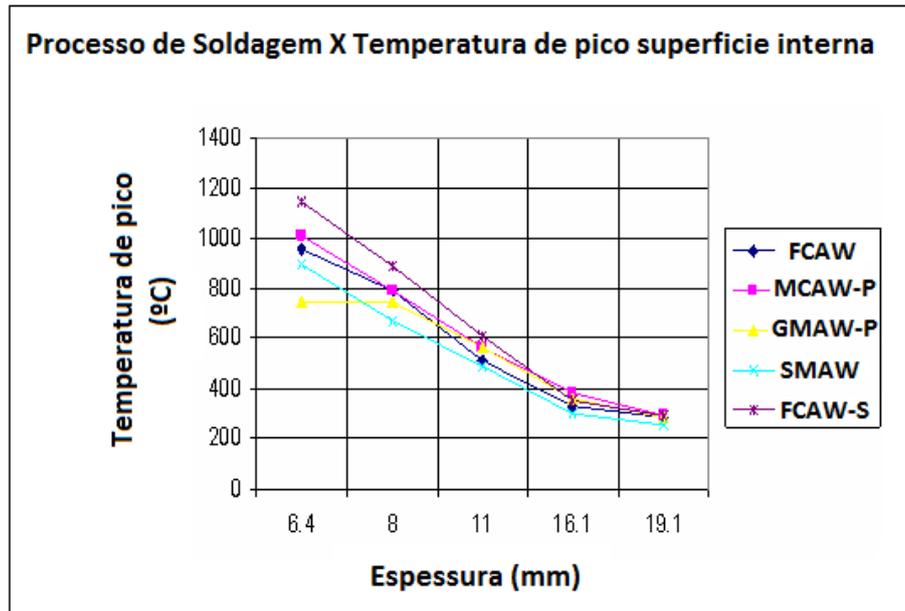


Figura 32: Temperatura de pico na superfície interna do duto para processos distintos a uma mesma com energia de 1,29KJ/mm [31].

Existe ainda a possibilidade da realização de amanteigamento antes das operações de soldagem em dutos em regiões com perda de espessura, permitindo assim um aumento na energia de soldagem do processo [32]. Além disso, com a utilização do amanteigamento os efeitos de endurecimento inerentes à soldagem em operação são reduzidos, uma vez que segunda etapa de soldagem trata a camada de amanteigamento [33].

### 3.5.2 - Trincamento induzido por hidrogênio (HIC)

Na soldagem em operação devido à habilidade do fluido em remover calor da parede do duto, o processo ocorre com uma taxa de resfriamento muito acelerada, podendo formar microestruturas muito duras que são suscetíveis ao trincamento induzido pelo hidrogênio [26]. A figura 33 ilustra uma trinca induzida por hidrogênio que ocorreu na ZTA de uma solda de filete.



Figura 33: Trinca induzida por hidrogênio na solda de filete de uma luva bipartida [27].

As trincas induzidas por hidrogênio podem ocorrer durante o processo de soldagem ou algum tempo depois. Podem se desenvolver horas ou até dias após a soldagem [34]. As trincas são mais frequentes na ZTA, porém podem aparecer no condão de solda [7].

Três condições devem ser atendidas para que esta aconteça, presença de hidrogênio na solda, formação de microestrutura suscetível, geralmente martensita, e atuação de tensões na solda [27]. Para evitar o aparecimento de trincas induzidas por hidrogênio é necessário que um ou mais destes fatores sejam minimizados. Por exemplo, aplicando processos com baixo teor de hidrogênio ou controlar a taxa de resfriamento para evitar formação de martensita [7].

Adota-se um limite de dureza na ZTA de 350 HV, este é um valor de referência e indica a presença de martensita [7]. Apesar da utilização deste valor de referência, a quantidade de martensita que represente uma suscetibilidade significativa depende da quantidade de hidrogênio presente na solda. Soldas com quantidades de hidrogênio menores são mais tolerantes à presença de martensita [7].

A suscetibilidade à formação de trincas pode ser influenciada pela espessura do duto. Dutos com maior espessura podem causar maior resistência à movimentação do hidrogênio em comparação aos dutos menos espessos, assim tendem a ter maior susceptibilidade ao trincamento induzido por hidrogênio [7].

A especificação do limite máximo de dureza deve considerar a composição química do aço, a espessura do duto e a quantidade de hidrogênio presente no processo.

Conforme mostra a figura 34, a referência de 350 HV pode não ser conservadora para casos de aços com carbono equivalente baixo [7].

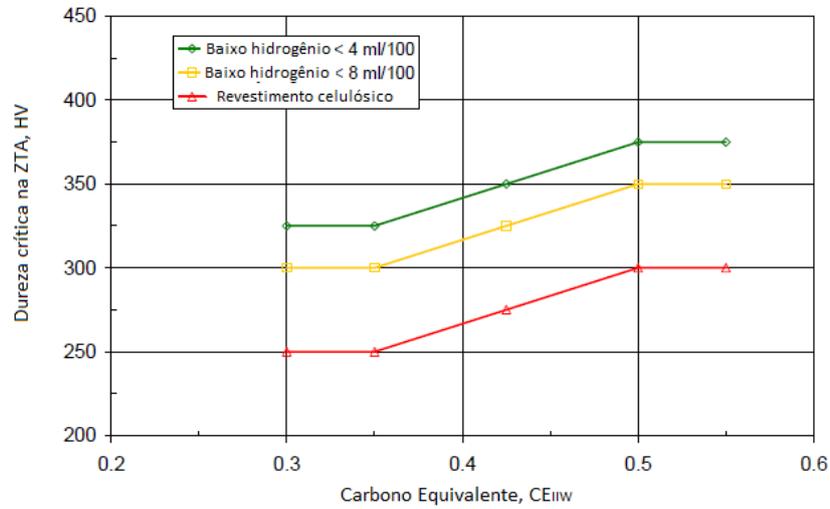


Figura 34: Critério de dureza para dutos mais espessos (> 9,5 mm) com 0,1%C em função do carbono equivalente [7].

Por outro lado, o limite máximo de dureza pode ser maior para aços com carbono equivalente mais elevado desde que sejam utilizados práticas de soldagem de baixo teor de hidrogênio como ilustrado na figura 35, que mostra também que aços com espessuras menores podem ter limites de dureza mais elevados [7].

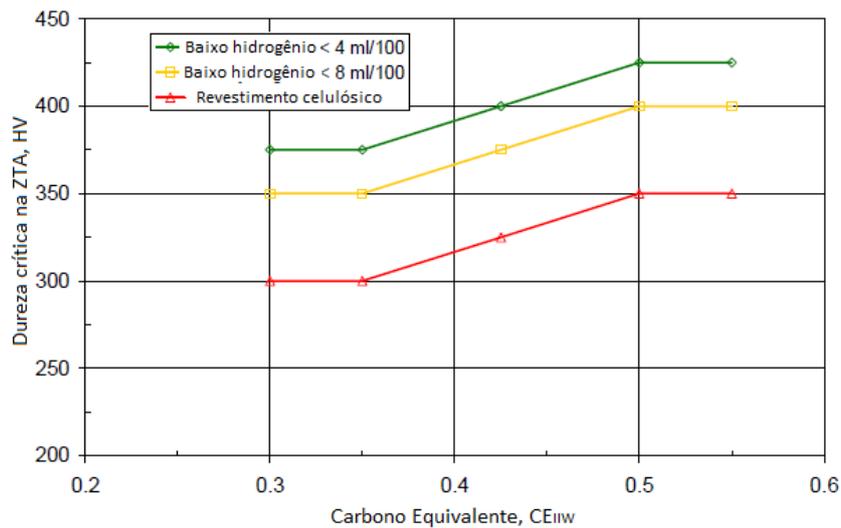


Figura 35: Critério de dureza para dutos menos espessos ( $\leq 9,5$  mm) com 0,1%C e função do carbono equivalente [7].

### ***3.6 – Automação da soldagem em operação***

Nas últimas décadas, a soldagem em operação de dutos vem se desenvolvendo, e sua aplicação foi validada desde então por uma série de reparos realizados em dutos e atualmente é utilizada rotineiramente por operadores de dutos [18]. Para a soldagem em operação de dutos com grandes diâmetros é utilizado o processo SMAW, que por ser manual, acaba por introduzir variações no processo de soldagem que são absorvidas em dutos espessos, o que pode não ocorrer em dutos de menor espessura e alta resistência [18, 35]. Além do mais, a soldagem com processo SMAW de dutos de alta resistência, X80 para cima, tendem a não garantir propriedades adequadas do metal de solda [18]. Estudos realizados mostram que a soldagem robotizada de aços X80 apresenta microestrutura mais refinada e extensão média da ZTA menor em comparação ao processo manual, apesar de apresentar valores médios de dureza superiores [36].

A tendência à utilização de aços de alta resistência mecânica e boa tenacidade será maior, uma vez que, as novas reservas de óleo e gás estão sendo descobertas em ambientes mais agressivos e afastados dos maiores centros de consumo [37]. Neste contexto, a automação do sistema é atrativa e pode garantir melhorias na qualidade, eficiência, repetibilidade do processo de soldagem [35]. Porém, existe a necessidade de programação rápida dos robôs e controle deste processo que, geralmente é complexo, o que acaba reduzindo sua aceitação [35]. Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias e sistemas automatizados eficientes, fáceis de aprender e de usar, pode ser uma alternativa para melhorar utilização da automação [38].

Sistemas de soldagem automatizados garantem grande controle da energia de soldagem, produzindo qualidade superior em comparação ao processo manual, em particular utilizando os processos GMAW ou FCAW, que podem ser aplicados com sucesso na soldagem de reparo em dutos em operação [18, 35].

Estudos realizados comprovam a possibilidade de automação do processo SMAW na soldagem de dutos. Contudo, não foram simuladas condições de soldagem em operação [39]. A figura 36 mostra o posicionamento de um robô durante a soldagem de um tubo.

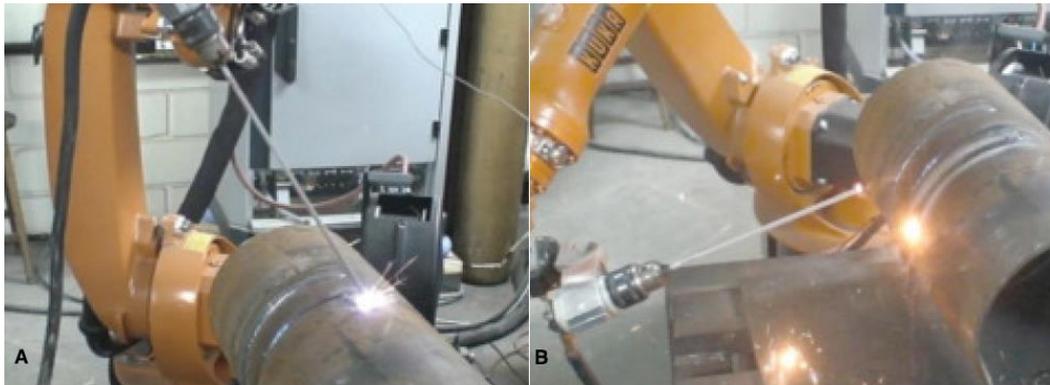


Figura 36: Posicionamento do robô. A) Antes da abertura do arco; B) Depois da extinção do arco [39].

A soldagem automatizada de reparos em dutos ainda não é utilizada em larga escala, porém pesquisadores do *Edson Welding Institute* (EWI) nos Estados Unidos desenvolveram um protótipo que é capaz de soldar luvas bipartidas do tipo A e B e realizar deposição de solda em defeitos de corrosão [18]. As figuras 37 e 38 ilustram o protótipo desenvolvido pelos pesquisadores do EWI e o sistema de posicionamento da tocha de soldagem.

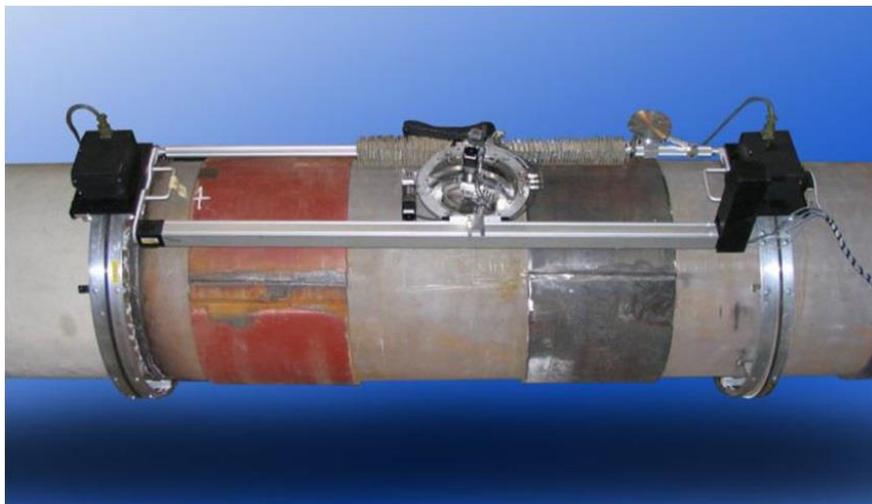


Figura 37: Foto do sistema de soldagem automatizado desenvolvido pela EWI [18].



Figura 38: Sistema de posicionamento da tocha de soldagem [18].

A aplicação deste sistema foi testada de acordo com a norma API 1104. Para a realização do passe de raiz o sistema se mostrou ineficaz, uma vez que, observaram-se muitos defeitos de falta de fusão [18]. Por este motivo o recomendado é realizar o passe de raiz com processo manual antes da aplicação do processo automatizado [18].

Uma vez realizado o passe de raiz, a instalação do sistema automatizado dura cerca de 30 minutos e são necessários dois soldadores. Comparando a soldagem automatizada FCAW com a soldagem manual SMAW, para a instalação de uma luva bipartida do tipo A e considerando apenas as etapas posteriores ao passe de raiz, observa-se que o sistema automatizado é aproximadamente 2,3 vezes mais rápido e seu custo é cerca de 62% menor [11]. Uma vez que se consiga reduzir o tempo de montagem do equipamento, o sistema automatizado será ainda mais eficiente em custo.

Para a soldagem automatizada, um método veloz de aquisição de dados, da área a ser reparada, e o ajuste dos parâmetros do sistema são fundamentais [35]. Para tal, é necessária a utilização de sensores para captura dos dados e *softwares* com algoritmos desenvolvidos para cada situação. Como a velocidade de execução dos cordões de solda na soldagem automatizada é maior, é necessário que as medições e ajustes dos parâmetros de soldagem ocorram o mais rápido possível para garantir requisitos de qualidade.

Atualmente, observa-se a utilização de sensores LASER para a medição e traçamento da junta, porém existe uma gama de soluções alternativas para soldagem a arco, como, por exemplo, técnicas baseadas na medição e controle de mudanças no

comprimento do arco ao longo da junta detectadas por sensores de corrente e/ou tensão de soldagem [40]. Apesar da possibilidade da maior precisão e fornecer informações a respeito da geometria da junta e áreas defeituosas do duto, sensores LASER são mais caros e tem de ser montados na tocha limitando a área de trabalho do robô. Além do mais, a alta intensidade luminosa do arco poder prejudicar na análise da imagem [26]. Por outro lado, as técnicas baseadas no sensoriamento do arco são mais baratas, porém menos precisas e ainda é necessária a aplicação de tecimento para seu funcionamento [40].

Para aplicação de reparos com deposição de solda, o sensor é capaz de mapear a região entorno da tocha e por triangulação é determinada sua posição. Por comparação com relação às informações prévias de posição original do duto e espessura de parede é determinada a perda de espessura [18]. Controlando os parâmetros de soldagem, a profundidade do cordão de solda pode ser variada automaticamente para depositar a quantidade de metal requerida em cada região do defeito [18]. Neste sentido, sensores LASER podem determinar os limites de aplicação do cordão de solda, permitindo uma sobreposição precisa de cada cordão. Métodos que utilizam sensores LASER têm sido muito utilizados em processos com controle adaptativo da soldagem. Procedimentos com controle adaptativo da soldagem garantem maior robustez e acurácia ao processo e modificam parâmetros de soldagem em tempo real compensando variações na preparação da solda, por exemplo.

#### **4 – Conclusões**

Desde o início da construção de dutos de transporte de fluidos a necessidade de garantir operação contínua do sistema e sua disponibilidade é a meta principal, além do atendimento a questões de segurança e meio ambiente. Neste cenário a aplicação de soldagem em dutos em operação para reparo e expansão da malha é crucial. As técnicas de reparo e os processos de soldagem vêm evoluindo nos últimos anos, atualmente a soldagem manual com eletrodo revestido com baixo teor de hidrogênio é o processo mais aplicado, porém com a possibilidade de aumento da utilização de dutos com maior resistência e menores espessuras o desenvolvimento de processos automatizados é fundamental para garantir a segurança e qualidade deste processo.

No tocante à soldagem automatizada, o grande desafio é a sua baixa aceitação na aplicação em dutos em operação. O desenvolvimento de tecnologias mais confiáveis é fundamental, ainda existem muitas incertezas e limitações a aplicação de automação neste contexto. Na soldagem de dutos em operação, a tolerância a erros é extremamente limitada, e os prejuízos decorrentes de uma falha, que cause a interrupção da produção, são enormes.

Diante do exposto, fica clara a importância que a automação do processo terá em aplicações futuras, contudo a correta medição dos parâmetros de soldagem e posicionamento e movimentação da tocha são essenciais, o que será possível com avanços de tecnologia.

## 5 – Referências bibliográficas.

- [1] – Plano decenal de expansão da malha de transporte dutoviário – PEMAT. Disponível em 27/03/2016 no site: <http://www.epe.gov.br/>
- [2] – Resenha energética brasileira, exercício de 2014, edição de junho de 2015. Disponível em 27/03/2016 no site: <http://www.mme.gov.br/>
- [3] – Andrade, R. B. N.; Vieira, R. G.; Costa e Silva, C.; Torres, A. S. G. Samarco's evolution on erosion rate calculation. Rio pipeline 2015, IBP1352\_15.
- [4] – Junior, J. C. S.; Rocha, D. B.; Brandi, S. D. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. Soldagem e Inspeção São Paulo, Vol. 18, Nº. 02, p.176-195, Abr/Jun 2013.
- [5] – Faria, P.; Soares, J. P.; Araujo, F. F. S.; Paranhos, R. Soldagem em Operação: Parte 1 - Efeito do arrefecimento causado pelo fluido em tubulação de espessura 11 mm, Soldagem e Inspeção. São Paulo, Vol. 17, Nº. 4, p.280-287, Out/Dez 2012
- [6] – Oddy, A. S.; McDill, J. M. J. Burnthrough prediction in pipeline welding. International Journal of Fracture 97: 249–261, 1999.
- [7] – Amend, B.; Bruce, W. A. Welding on in service pipelines: dispelling popular myths and misconceptions. Canadian Welding Association Journal, spring 2013, p30-39
- [8] – Telles, P. C. S. Tubulações industriais. Materiais, projetos, montagem. 10ª edição. LTC editora, 2001. ISBN 8521612893.
- [9] – Fotos retiradas durante a realização de atividades no mineroduto da empresa Samarco Mineração entre os municípios de Mariana-MG até Anchieta-ES.
- [10] – Freire, J. L. F. Engenharia de dutos, Rio de Janeiro: ABCM, 2009. ISBN 978-85-85769-44-4.
- [11] – Walker, J. In-line inspection of pipelines. Verlag modern industrie. Germany, 2010. ISBN 978-3-86236-003-1

- [12] – Lima, M. A. O.; Barra, S. R.; Freire, J. L. F. Análise de métodos para avaliar dutos com dano moosa e sulco. Soldagem e Inspeção. São Paulo, Vol. 15, nº.4, Out./Dez. 2010
- [13] – EGIG. 9th Report of the european gas pipeline incident data group. 9th EGIG Report 1970-2013. February, 2015.
- [14] – Bruce, W. A. Updated pipeline repair manual. Final report R2269-01R, August 2006.
- [15] – Bruce, W. A.; Amend, B. Steel sleeves vs. composites for in-service pipeline repair, Welding Journal, June 2011, 72-77.
- [16] – Pereira, A. S.; Buschinelli, A. J. A.; Niño, C. E.; Kejelin, N. Z. Soldagem em Operação de Dutos de Alta Resistência e Baixa Espessura com Ênfase nas Trincas a Frio. Soldagem e Inspeção São Paulo, Vol.17, Nº. 2, p.088-095, Abr/Jun 2012.
- [17] – Catálogo de produto acessado em 10/04/2016 no endereço: <http://www.mathey.com/Pages/clamp-chain-sleeve.htm>
- [18] – LaMorte, C. R.; Boring, M.; Porter, N. Advanced welding repair and remediation methods for in-service pipelines. PR-185-04501, July 30, 2007.
- [19] – Bruce, A. W. Guidelines for weld deposition repair on pipelines. PR-185-9734 - L51782. Edison Welding Institute, 1998.
- [20] – Gordon, R.; Bruce, W. A.; Harris, I.; Harwig, D.; Ritter, G.; Mohr, W.; Boring, M.; Porter, N.; Sullivan, M.; Neary, C. Internal repair of pipelines review & evaluation of internal pipeline repair trials report. EWI Project No. 46211GTH, September 2004.
- [21] – API RP 2201, hot tapping practices in the petroleum & petrochemical industries, fifth edition, July 2003.
- [22] – Lessons learned: using hot taps for in service pipeline connections, acessado no dia 10/04/2016 no endereço: [https://www3.epa.gov/gasstar/documents/ll\\_hottaps.pdf](https://www3.epa.gov/gasstar/documents/ll_hottaps.pdf)
- [23] – Catálogo de serviços acessado em 14/04/2016 no endereço: [http://www.continentalmaquinas.com.br/site/ptbr/serv\\_trepanacao.html](http://www.continentalmaquinas.com.br/site/ptbr/serv_trepanacao.html)

- [24] – Catálogo de serviço fornecido pela empresa TDW Services.
- [25] – Case study gallery of power wrap installations, acessado em 15/04/16 no endereço: <http://www.powerwraplp.com/gallery.php?galid=1>
- [26] – Han, T.; Wang, Y.; Liu, W. Study on burn-through prediction of in-service welding. Transactions of JWRI, special issue on WSE2011, 2011.
- [27] – Bruce, W. A. A simple approach to hop tap and repair sleeve welding. Welding Journal, November 2005, 40-45.
- [28] – Bruce, W. A.; Etheridge, B. Essential elements of an effective in-service welding program. 5th Asian Pacific IIW International Congress,” Welding Technology Institute of Australia, Sydney, Australia, March 7-9, 2007.
- [29] – Pereira, A. S.; Buschinelli, A. J. A.; Kejelin, N. Z. Avaliação da Perfuração na Soldagem em Operação pelo Processo MIG/MAG de Dutos de Alta Resistência e Baixa Espessura. Soldagem e Inspeção São Paulo, Vol. 18, Nº. 03, p.235-244, Jul/Set 2013
- [30] – Vakili-Tahami, F.; Masumi-Asl, H. A two-dimensional thermomechanical analysis of burn-through at in-service welding of pressurized canals. Journal of Applied Sciences 9(4): 615-626, 2009.
- [31] – Begg, Darren. Alternate welding processes for in-service welding. Final report, BMT Group, April, 2009.
- [32] – Novicki, Nilceu et al. Amanteigamento por aspersão térmica na soldagem em operação de dutos de pequena espessura - estabilidade e penetração do arco voltaico. Revista soldagem & inspeção, São Paulo, Vol.16, No. 3, p.243-255, Jul/Set 2011.
- [33] – Dull, M.; Forest, K. Effects of buttering on high-carbon-equivalent in-service pipe. Welding Journal, September 2014, Vol. 93 Issue 9, p48.
- [34] – Nolan, D.; Sterjovski, Z.; Dunne, D. Hardness prediction models based on HAZ simulation for in-service welded pipeline steels. Science and Technology of Welding and Joining. VOL 10, NO 6, p681-694, 2005.

- [35] – Nicholson, A. D.; Norrish, J.; Holdstock, R. Feasibility of robotic weld repair of live pipelines, 2007. University of Wollongong. Faculty of Engineering.
- [36] – Albuquerque, S. F.; Silva, R. S.; Maciel, T. M.; Almeida, D. M.; Bracarense, A. Q. Estudo do comportamento do aço API 5L X80 quando submetido à soldagem por processo automatizado. Soldagem e inspeção. São Paulo, Vol. 17, Nº.2, p.137-146, Abr/Jun 2012.
- [37] – Moojen, R. G.; Machado, I. G.; Mazzaferro, J. A. E.; Gonzalez, A. R. Efeitos da taxa de resfriamento na soldagem do aço API 5L-X80. Soldagem & Inspeção. 2015;20(1):68-80.
- [38] – Okuyama, M. P.; Merino, E. A. D.; Dutra, J. C.; Carvalho, R. S. Engenharia de usabilidade aplicada no desenvolvimento de um sistema interativo para soldagem robotizada. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 17, Nº. 4, p.288-297, Out/Dez 2012.
- [39] – Lima II, E. J.; Bracarense, A. Q. Robotic shielded metal arc welding. Welding Journal, August 2010, Vol. 89, p166-171.
- [40] – Kindermann, R. M.; Gonçalves e Silva, R. H.; Dutra, J. C. Desenvolvimento e validação de algoritmos para emprego de sensores na soldagem robótica orbital do passe de raiz de tubulações. Soldagem & inspeção. 2015; 20 (4):391-402.