

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SOLDAGEM MIG/MAG PARA REPARO DE DUTOVIAS UTILIZANDO
AQUECIMENTO POR INDUÇÃO**

Rodrigo Rodrigues Nogueira

Orientador: Prof. Dr. Mateus Barancelli Schwedersky
Coorientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis, Junho de 2019

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	3
1.1	OBJETIVO GERAL.....	4
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.3	CONTEXTUALIZAÇÃO E ANTECEDENTES	5
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	5
2.1	SOLDAGEM PARA REPARO DE TUBULAÇÕES	5
2.2	SOLDAGEM MIG/MAG	7
2.2.1	MIG/MAG convencional por curto-circuito	7
2.2.2	Processos MIG/MAG modernos.....	8
2.3	SOLDAGEM ORBITAL.....	9
2.4	AQUECIMENTO INDUTIVO PARA SOLDAGEM.....	11
3	MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	14
3.1	MÉTODOS	14
3.2	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	15
4	CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	16
5	PREVISÃO FINANCEIRA	17
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	17
7	BIBLIOGRAFIA	18

1 INTRODUÇÃO

O atual cenário e previsões do setor energético global são desafiadores e o dinamismo da evolução tecnológica impulsiona o crescimento da demanda por energia. Segundo a Agência Internacional de Energia em 2017, a necessidade global por energia deve crescer 30% até 2040, com o gás natural e combustíveis baixo-carbono passando a ser fontes energéticas de destaque, além das energias renováveis [1]. No cenário brasileiro, o Plano Nacional de Energia divulgado pelo Ministério de Minas e Energia em 2014 aponta, até 2050, forte expansão do uso do gás natural como matéria-prima e combustível, tratando este como insumo estratégico [2].

Amplios esforços têm sido empreendidos no sentido de suprir tal demanda, bem como grandes avanços tecnológicos e descobertas impulsionam a exploração e o aprimoramento das fontes energéticas, dando-se cada vez mais ênfase ao conceito de eficiência energética. A Exxonmobil™ com descobertas nos campos petrolíferos *off-shore* Liza e Mero em 2019 na Guiana [3] e a Halliburton™ operando em águas profundas na África e na Ásia-Pacífico [4], são indícios de que a busca por fontes energéticas e a evolução na exploração destas é constante, tratando este isto como uma “nova era”. No Brasil, a Petrobras® vem atuando no pré-sal nos campos Lula e Iracema Sul, com produção cada vez mais rápida, atingindo em 2018 a marca de 1,5 milhão de barris por dia [5]. Tais empresas vêm operando na vanguarda não só de métodos e técnicas de exploração inovadoras, mas como no processo produtivo como um todo. O *Petrobras Rota 3 pipeline* é um exemplo do investimento no processo de transporte do petróleo/gás oriundo do pré-sal. Desenvolvida pela Petrobras® e em conjunto com a Halliburton™, a dutovia será composta de 297km, representando assim, em 2018, a maior e mais profundo projeto de uma única seção de *pipeline* realizado no Brasil, utilizando 100% de pessoal local para o projeto [6] [7].

O Projeto de Lei do Senado 209/2015 para criar o Fundo de Expansão dos Gasodutos de Transporte e de Escoamento da Produção (Brasduto) [8] está em tramitação na câmara há alguns anos, sendo agora alterado para projeto de lei PL 10985/2018. Caso aprovado, este projeto atrairá importantes investimentos para o setor. No cenário regional, o projeto de dutovia Serra Catarinense, iniciado em 2012, chega à quarta etapa em 2019, sendo os investimentos estimados em torno de R\$ 260 milhões no total, contribuindo para o desenvolvimento das regiões mais distantes do litoral [9].

Apesar do desenvolvimento da indústria petrolífera brasileira possuir dificuldades, iniciativas como da SCGas e Petrobras® apontam um cenário favorável e promissor, uma vez que a estatal brasileira trata como força motriz do seu plano estratégico o refino, o transporte e a comercialização do petróleo e seus derivados [10]. A relação entre a academia e a indústria ainda está distante de um patamar ideal para a produção eficiente de ciência e tecnologia, esbarrando muitas vezes na burocracia imposta pelo setor acadêmico e na falta de interesse por parte da indústria, muitas vezes por falta de interlocução adequada. Projetos de P&D como a Ferramenta ENDFlex, software desenvolvido pela Petrobras utilizado para definição de prazos de inspeção de dutos, são de valor inestimável. Na Unidade da Bacia de Campos a redução de custo potencial é de R\$ 120 milhões [11]. Outro exemplo de valor é o caso da WEG® que em 2019 criou seu Centro de Inovação Aberta, em Jaraguá do Sul/SC, destinado a desenvolver dispositivos de monitoramento para máquinas, Indústria 4.0 e buscando estabelecer relações com *startups* [12].

Neste âmbito, o LABSOLDA, como parte da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, desempenha papel fundamental a frente da pesquisa e desenvolvimento de equipamentos e processos de soldagem. Também são firmadas parcerias com outros centros de pesquisa e entidades fomentadoras da área para criação de novos sistemas de soldagem automatizada, bem como estudo dos diversos processos de soldagem aplicados a situações específicas.

Pensando no desenvolvimento desses novos estudos e na manutenção de *pipelines*, que são a maneira mais produtiva e econômica para transporte petróleo e gás [13], este trabalho se propõe a analisar a influência das técnicas de aquecimento indutivo sobre a soldagem para reparo de tubulações em operação, considerando as normas estabelecidas pelas agências regentes, bem como buscar atingir conceitos e situações aplicáveis na prática e na situação de campo. Além disso, é proposto o estudo e revisão dos procedimentos de soldagem associados à soldagem orbital de dutos em contexto de projeto análogo desenvolvido no próprio LABSOLDA juntamente com a Petrobras.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral o estudo da influência das técnicas de pré-aquecimento e pós-aquecimento por indução na soldagem mecanizada para aplicação em restauração de dutovias utilizando o processo MIG/MAG. O estudo busca gerar informações técnicas e dar subsídios para verificação da Técnica de Aquecimento Indutivo (TAI) como forma de realização de reparos sem que seja necessário diminuir ou cessar o transporte do fluido. O reparo nesta condição é dificultado devido à alta taxa de resfriamento resultante do fluxo fluido dentro da tubulação, com risco de geração de trincas a frio, bem como dificuldades advindas do próprio ambiente de campo, resultando muitas vezes em descontinuidades e até defeitos que podem vir a comprometer a solda feita. Dentre os vários tipos de metodologias para reparo de dutovias utilizados no dia-a-dia da indústria, a técnica objeto deste trabalho trata-se do procedimento que faz o uso de calhas soldadas em regiões avariadas, definida como Dupla-Calha Tipo B¹.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para a consecução deste objetivo geral, são vislumbrados os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar bancada específica para simulação da soldagem mecanizada de tubos em operação com aquecimento;
- Análise da influência da vazão de fluido no interior da tubulação, através da variação desta, sobre as taxas de resfriamento envolvidas no processo de aquecimento indutivo;
- Estudo das técnicas de aquecimento utilizando bobinas ao redor da tubulação (método convencional) e aquecimento por indução de forma localizada utilizando aparato concentrador de campo;
- Determinação dos níveis de potência, da fonte aquecimento por indução, necessários para aquecimento e manutenção das temperaturas para cada configuração escolhida (técnica, vazão, etc.) considerando as limitações de temperatura na superfície tubo;
- Avaliar e criar conhecimento sobre o impacto que a técnica de aquecimento indutivo e o transporte de fluido causam nos ciclos térmicos de soldagem em diferentes situações. A influência destes será analisada por meio de:
 - Filmagens termográficas da junta soldada e da superfície aquecida indutivamente e medição das temperaturas através do uso de termopares;
 - Filmagem de alta velocidade do comportamento detalhado de características do processo (arco, poça de fusão) e da tubulação propriamente dita;
 - Análise microestrutural por meio de microscopia ótica, MEV, ensaios de microdureza e ensaios para estudo da influência do aquecimento sobre a formação de microestruturas frágeis;
 - Análise da ocorrência de descontinuidades por meio de ensaio de raio-X;
- Analisar a influência da aplicação de variantes modernas do processo MIG/MAG, como CCC, STT, *Soft*, CMT², sobre a adequabilidade para soldagem fora de posição (orbital), bem como sobre o ciclo térmico envolvidas durante o processo, comparando com o processo convencional;
- Realizar a análise de transferência de calor por intermédio de métodos matemáticos específicos e comparação dos resultados obtidos com dados levantados através de software de simulação (ANSYS®, COMSOL Multiphysics®).

¹ O conceito de reparo por Dupla Calha tipo B é definido no Cap. 2, pág. 6.

² Os processos citados são descritos no Cap. 2, pág. 8

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E ANTECEDENTES

Diversos trabalhos e projetos têm sido desenvolvidos pelo LABSOLDA voltados à área petrolífera, desenvolvendo equipamentos para a automatização e aprimoramento de processos de soldagem e revestimento. Projetos finalizados, como SISASOLDA [14] e SOLDADUTO [15], tiveram como resultado o desenvolvimento de um sistema com tecnologias inovadoras, como sensoriamento e desenvolvimento de uma base de dados com informações sobre modalidades e procedimento de soldagem.

O projeto “Sistema de Soldagem Orbital de Tubos de Grande Diâmetro com Sensoriamento a LASER” [16], projeto em parceria com SENAI, SPS, ENGEMOV E PETROBRAS, trata da utilização de sensores externos (LASER) para escaneamento da junta e a partir destes dados, ajustes dos parâmetros do processo adaptativo na soldagem de dutos de grandes diâmetros. É feito um tratamento para a informação lida pelo sensor, buscando evitar problemas de soldagem devido variações geométricas na junta a ser soldada.

Tratando-se de reparos de dutos propriamente ditos, foi desenvolvido entre 2007 e 2009 o projeto “Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem no Setor Petrolífero e Petroquímico”, em parceria entre a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e o LABSOLDA [17]. Este projeto tinha como objetivo laborar um manipulador robótico compacto, com flexibilidade de adaptação às diversas formas de superfície, com uma interface intuitiva que proporcione uma operação simples para o usuário. Visando a constante evolução de seus equipamentos e embasado nos conhecimentos alcançados em projetos com um e dois graus de liberdade (SDP, Tartílope V1 e Tartílope V2), o LABSOLDA desenvolveu ao fim do projeto um manipulador com quatro graus de liberdade (Tartílope V4) para a soldagem orbital de dutos e de superfícies curvas.

Contudo, a utilização de aquecimento indutivo como ferramenta auxiliar no processo de soldagem é um objeto de estudo ainda não explorado no laboratório, sendo este o primeiro a trabalho a ser desenvolvido neste campo. A prática de aquecimento é muitas vezes realizada por chama e sem nenhum controle (tempo, temperatura), e mesmo assim, de certa forma, é eficaz no sentido de proporcionar uma região a ser soldada livre de umidade e pré-aquecida, evitando problemas que poderiam vir a comprometer o trabalho realizado.

O estudo aprofundado do pré-aquecimento e de seus resultados, tanto operacionais quanto microestruturais, vem a apresentar alternativas construtivas [18] e funcionais que são pouco (ou não são) utilizadas em campo no trabalho de reparo dutovias. Questões intrínsecas a soldagem, como o caso de formação de pontos concentradores de tensão, de trincas à frio, e de microestruturas frágeis devido ao rápido resfriamento do cordão, justificam tal pesquisa, uma vez que esta apresenta grande potencial de trazer soluções para estes problemas, através da aplicação de técnicas controladas de aquecimento utilizando indução eletromagnética e, assim, possuindo a liberdade de atuar sobre parâmetros inerentes ao próprio aquecimento.

Outro ponto de destaque é a investigação sobre os efeitos em aplicações de aquecimento localizado apenas na área a ser soldada, antes e/ou após a prática. A utilização deste tipo de aquecimento é tratada como um sistema híbrido de soldagem que proporciona grandes vantagens nos âmbitos construtivo e operacional [18] [19]. Tratando-se do reparo de dutovias, a aplicação deste tipo de aquecimento ainda seria justificada devido a questões de configuração e disposição de equipamentos, uma vez que a realização da soldagem através de um manipulador orbital (do tipo Tartílope, por exemplo) seria facilitada pela não-utilização de bobinas e mantas envolvendo o duto. Além disso, o aquecimento localizado viria a proporcionar as temperaturas máximas exatamente na região a ser soldada, diferentemente do aquecimento convencional, onde as temperaturas máximas são localizadas abaixo das bobinas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOLDAGEM PARA REPARO DE TUBULAÇÕES

A soldagem de tubos é um processo que exige um conhecimento prático elevado por parte do operador, possuindo alta dificuldade de manter a repetitividade do processo, principalmente quando se trata de uma soldagem fora de posição. Consequentemente, a soldagem para reparo destes não seria diferente. Devido à complexidade de todo o processo deve ser feita uma avaliação da real necessidade da intervenção, seguindo normas que regem a realização dos procedimentos, como a norma *ASME Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines B31G* [20] e a norma *API Fitness-For-Service 579* [21].

A Petrobras® possui a norma interna Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações e Dutos em Operação N 2163 [22], que deve ser seguida para consertos em suas tubulações. Além disso, os procedimentos realizados pela empresa também seguem as normas API 1104 anexo B [23] e ASME PCC-2 [24]. A Figura 1 apresenta procedimentos de soldagem de reparo.



Figura 1. Reparo de dutos em operação em diferentes condições operacionais [25]

A soldagem realizada com o duto em operação é justificada devido o reparo ser realizado sem perda significativa de produção, sem limite de pressão ou vazão. Alguns pontos surgem como restrições, como a possibilidade de perfuração para determinadas espessuras, resfriamento e solidificação rápidos da poça de fusão e o pré-aquecimento restrito. Por exemplo, A N-2163 faz restrições quanto a soldagem de dutos em operação transportando determinados fluidos e faz ponderações quanto a situações especiais, como em situação de vácuo [22].

No sentido de sempre evitar paradas operacionais, o corte e a substituição de dutos deve ser utilizado em casos de avaria grave, corrosão avançada ou perda de estanqueidade. As técnicas usadas para execução de reparos são variadas e também são descritas pelas normas. A escolha da técnica se dará de acordo com a necessidade, complexidade do reparo e disponibilidade do procedimento. Os métodos podem envolver a confecção de derivações na linha, além do uso de elementos secundários, como conectores mecânicos, tampões, chapa de reforço e calhas.

Uma das técnicas de reparo presentes em campo consiste no envolvimento do duto em meio a duas calhas (ou luvas), soldadas ao redor da região avariada, como ilustra a Figura 2. As calhas são confeccionadas de forma com que não haja folga entre estas e o duto, ainda podendo ser injetado entre estas uma resina epóxi na região. Este tipo de reparo pode ser usado para uma ampla variedade de danos, provendo um reparo permanente, sendo uma técnica bastante consolidada.

Quando é realizada apenas a soldagem horizontal unindo as calhas, servindo como reforço para a área danificada, a técnica é classificada como Dupla-Calha tipo A. Quando também são realizadas duas soldagens circunferenciais, unindo o fim da calha ao duto, o reparo é classificado como Dupla-Calha Tipo B. Ainda há a situação onde há a injeção de polímero, onde a técnica é definida como reparo por *grouting*. Estes dois últimos tipos são considerados adequados para reparos de emergência.



Figura 2. Técnica Dupla-Calha tipo B para reparo de tubulações [25]

Este tipo de reparo é adequado para danos como corrosão interna que pode vir a se tornar um vazamento ou um dano que já esteja vazando. Além disso, evita interrupções no fluxo produtivo. Porém é considerado uma técnica com risco de acidentes durante o reparo, uma vez que o tubo em operação é aquecido pelo processo de soldagem. Assim, se faz necessário um estudo das características e dos fenômenos físicos que ocorrem durante esse tipo de reparo.

Dalpiaz [25] cita que quanto maior a pressão de operação do duto, maior será a capacidade do fluido de conduzir o calor oriundo da soldagem, reduzindo assim os riscos de acidentes devido aquecimento e perfuração. Porém, do ponto de vista metalúrgico, este resfriamento rápido pode vir a causar defeitos na junta soldada, onde Palmer-Jones *et al.* [26] cita que os reparos com Dupla-Calha tipo B e com *Grouting* são mais eficazes se instalados com a tubulação operando a uma pressão reduzida. Qualquer redução de pressão é uma boa prática quando se trabalha em um *pipeline* ativo, mas pode ter um impacto na operabilidade. A Tabela 1, presente na norma N-2163 F, apresenta espessuras mínimas, fluxos e requisitos para elaboração desse tipo de reparo.

Tabela 1. Espessuras mínimas para soldagem, fluxos e requisitos segundo a norma Petrobras® N-2163 F [22]

Espessura mínima (t)	Fluxo	Requisito Complementar
$t \geq 12,70$ mm	Com ou sem	Não há risco de perfuração
$6,35$ mm < t < $12,70$ mm	Com	Avaliar risco de perfuração apenas para amanteigamento e enchimento com metal de solda.
$6,35$ mm < t < $12,70$ mm	Sem	Avaliar risco de perfuração (ver Nota)
$5,00$ mm < t < $6,35$ mm	Com ou sem	Avaliar risco de perfuração (ver Nota) e possibilidade de alteração das condições operacionais
$3,20$ mm < t < $5,00$ mm	Com ou sem	Há risco eminente de perfuração. Avaliar risco de perfuração (ver Nota) e possibilidade de alteração das condições operacionais.

2.2 SOLDAGEM MIG/MAG

A soldagem MIG/MAG é um processo que mantém uma geração de calor a partir de um arco elétrico gerado por uma fonte (de tensão ou de corrente), no caso do processo convencional, entre um arame consumível alimentado continuamente e a peça a soldar [27]. A vantagem mais nítida deste processo é a produtividade alcançada em relação a outros processos, como eletrodo revestido e soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*), além da possibilidade de mecanização, que proporciona repetibilidade do processo e não dependência da habilidade do soldador.

2.2.1 MIG/MAG convencional por curto-circuito

No processo MIG/MAG convencional a transferência metálica ocorre por curto-circuito, sendo particularmente útil na união de materiais de variadas espessuras e em qualquer posição, devido ao maior controle e tamanho da poça de fusão. Devido isso, também é indicado para enchimento de aberturas, como o caso da união de calhas, assim como quando se requer uma distorção mínima das peças a serem unidas. O processo caracteriza-se pelo contato entre a gota líquida formada na extremidade do arame eletrodo com a poça de fusão [28]. Sabe-se que quando se tem a passagem de carga através de um condutor, gera-se um campo magnético em torno do mesmo, o que causa a formação de forças perpendiculares ao campo magnético direcionadas para o centro do condutor, sendo estas conhecidas como Forças de Lorentz.

Este fenômeno físico corrobora para a constrição da região de acoplamento entre a gota (esférica) e o arame-eletrodo devido à mudança na direção de atuação das Forças de Lorentz, fenômeno esse denominado de efeito *pinch*. A constrição ocorre progressivamente até o colapso da ponte metálica e separação da gota e do arame-eletrodo. Imediatamente após esse evento ocorre a reabertura do arco elétrico. Este modo de transferência é exemplificado pelo esquema da Figura 3.

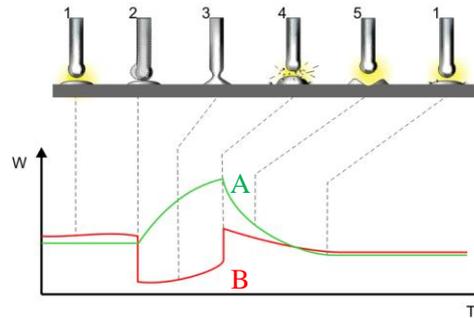


Figura 3. Esquema do modo de transferência metálica por curto-circuito no processo MIG/MAG convencional, onde eixo T representa o tempo e W a magnitude da Corrente (A) e da Tensão (B). Adaptado de [28]

2.2.2 Processos MIG/MAG modernos

Na soldagem de dutos, embora possam ser realizados diversos tipos de soldagem, o processo MIG/MAG ainda é o mais aplicado devido a sua alta taxa de deposição [29]. Característica da soldagem de dutos e de reparo destes usando calhas ou outros elementos, a soldagem pode ser feita de forma orbital, onde o procedimento é realizado em posições variáveis ao longo do tempo, onde a gravidade atua de formas diferentes ao longo do tempo sobre a poça de fusão. São situações críticas para a consecução do projeto e que requerem particularidades bem específicas. Por conta desta condição, empresas como a americana *Lincoln Electric*TM, a austríaca *Fronius*TM, e a japonesa *OTC Daihen*TM promovem pesquisas a fim de desenvolver melhorias neste processo, visando maior eficiência e qualidade dos mesmos. No Brasil, a empresa *IMC*[®] vem atuando na pesquisa e desenvolvimento de tecnologia de controle de parâmetros de soldagem. A Figura 4 apresenta algumas fontes de soldagem dessas empresas.



Figura 4. Fontes *Fronius CMT* [30], *OTC DW 300* [31], *Lincoln Power Wave* [32] e *IMC Digitec 600* [33], da esquerda para direita

Devido a pesquisas que fomentaram o desenvolvimento de métodos de soldagem, foram desenvolvidas fontes para processos MIG/MAG que possibilitam o controle da transferência metálica. Neste contexto surgem o processo CCC (Curto-Circuito Controlado) da empresa *IMC*, no Brasil, o processo STT (*Surface Tension Transfer*) da *Lincoln Electric*, e do CMT (*Cold Metal Transfer*) da Austríaca *Fronius*, além de outras variantes destes mesmos processos com nomes comerciais diversos. A Figura 5 apresenta o gráfico de corrente e tensão para a transferência metálica utilizando o sistema de curto circuito controlado da empresa *IMC*[®].

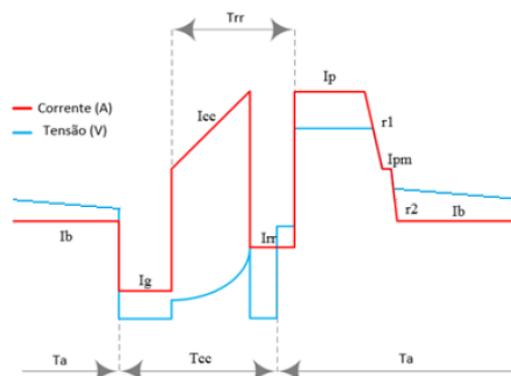


Figura 5. Forma de onda de corrente e tensão do processo CCC da *IMC* [34]

2.3 SOLDAGEM ORBITAL

A soldagem orbital se caracteriza pela trajetória executada pela tocha ao longo da seção transversal externa do tubo. No processo de soldagem orbital, a trajetória de soldagem sobre o tubo pode ser dividida em 4 posições, sendo elas: posição plana, vertical descendente, sobre cabeça e vertical ascendente. Cada posição apresenta uma peculiaridade em função da ação da força da gravidade sobre a poça de fusão. A Figura 6 ilustra esquematicamente o efeito da gravidade sobre a poça.

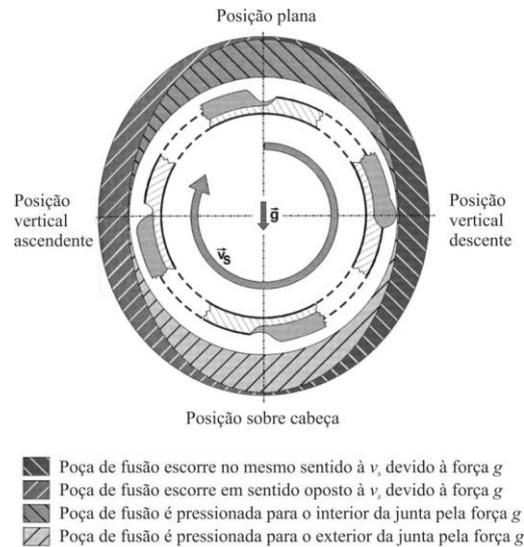


Figura 6. Posições de soldagem encontradas em tubo [35]

Estão disponíveis no mercado diferentes concepções de manipuladores robóticos sobre trilhos, que em maioria convergem para atender a problemática que envolve inferir qualidade e praticidade no processo de soldagem orbital em campo ou em ambiente fabril. Nesta seção serão descritos alguns dos principais modelos de manipuladores sobre trilhos, com foco na apresentação dos trilhos, mostrando suas benesses e restrições quanto a manipulação e operação percebidos durante a utilização destes equipamentos no próprio LABSOLDA.

Dentre os sistemas oferecidos no mercado, uma concepção para a soldagem orbital com o processo MIG/MAG é oferecido pela empresa *MAGNATECH International* [36]. O equipamento conhecido como *Pipeliner II* é composto por um trilho e um manipulador compacto com 3 graus de liberdade motorizados, com contato entre o trilho e o manipulador a partir de um par de fitas borracha e polias, representado pela Figura 7.

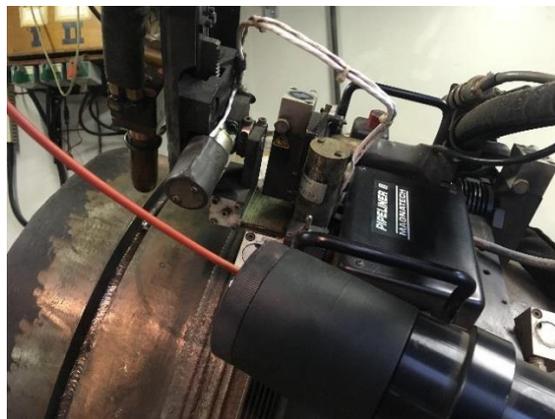


Figura 7. Sistema de soldagem orbital pipeliner II da empresa Magnatech

O equipamento conta com o sistema *push-pull* que, de forma geral, tem a finalidade de minimizar o efeito de *stick-slip* oriundo do atrito entre o arame e o conduíte e das micro soldas, que acontecem entre o bico de contato e o arame-eletrodo, sendo estas as principais causas da parada do arame-eletrodo. Estas paradas prejudicam o processo de soldagem, principalmente quando é feito com controle de corrente.

A empresa brasileira SPS, consolidada em 2006, parceira do Instituto de Mecatrônica e Soldagem LABSOLDA da Universidade de Federal de Santa Catarina [37], tem no mercado um sistema de soldagem orbital denominado Tartilope V4 (Figura 8), contando com 4 graus de liberdade mecanizados e um trilho orbital bipartido feito em aço, unido por dobradiças e fechado por um mecanismo 4 barras regulador por parafuso.

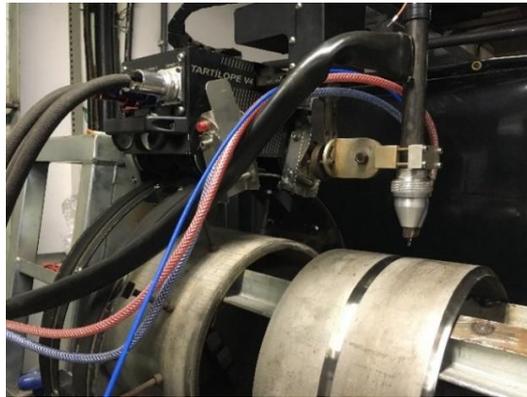


Figura 8. Manipulador robótico Tartilope V4 da empresa SPS

Dentre os sistemas de soldagem orbital apresentados, o representado na Figura 9 é o sistema mais recente e aparenta boa rigidez, tanto do trilho como do manipulador [38]. Este sistema foi concebido através de projeto financiado pela Petrobras, SENAI em parceria com a empresa EngeMovi, atuante no mercado desde 2007 [39], com a visão de gerar soluções de alto nível para automação industrial em parceria com o instituto LABSOLDA. O sistema é composto por um trilho semicircular, que sustenta um robô antropomórfico de 7 graus de liberdade feito em alumínio, conforme mostra a Figura 9.

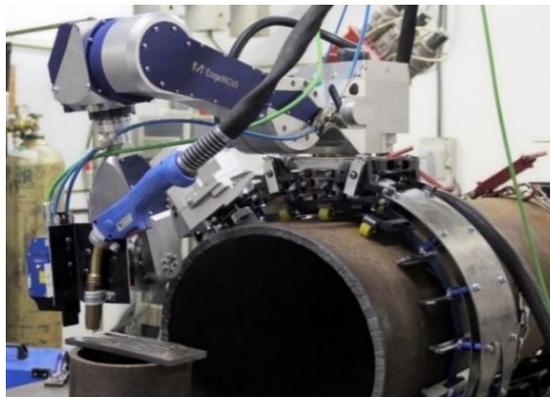


Figura 9. Sistema de soldagem concebido em conjunto com LABSOLDA, SENAI, Petrobras e EngeMovi

O estudo detalhado do sistema de movimentação da tocha de soldagem, configuração de movimentação e a robustez do sistema de soldagem orbital se faz necessário para garantia da execução do processo de soldagem mecanizada requerido. A utilização de braços antropomórficos, como é o caso EngMovi®, ou de manipuladores que trabalham em eixos cartesianos, como a caso do *Pipelinier II*® e *Tartilope V4*®, dependem de fatores como qual será a aplicação e o nível desta aplicação requerida para o processo e da utilização de sistemas auxiliares característicos de cada manipulador.

O sistema necessita ainda atender as necessidades construtivas requeridas, adequando-se às situações de trabalho, possibilitando a utilização de sistemas secundários para consecução, avaliação e parametrização da soldagem, como sistemas de aquisição de dados, sondas e termopares, ou elementos como mantas e bobinas para o aquecimento prévio da região a ser soldada. O manipulador deve permitir disposição destes elementos em conjunto para aplicações específicas.

2.4 AQUECIMENTO INDUTIVO PARA SOLDAGEM

O processo de aquecimento por indução vem sendo estudado e aplicado desde meados dos anos 20, desenvolvendo-se com maior ênfase durante a Segunda Grande Guerra, onde a utilização tinha por finalidade tratamento térmico de peças de forma rápida e confiável. Atualmente, técnicas de manufatura enxuta e melhorias no controle de qualidade elevaram o nível do aquecimento indutivo a um patamar de alta confiabilidade, automatização e repetitividade [19]. Aplicado à soldagem, é um processo auxiliar utilizado na indústria de maneira geral para operações em soldagem que necessitam de aquecimento antes e/ou depois da execução do procedimento de soldagem. No setor da soldagem de manutenção de dutos em campo, é uma prática nova que vem adquirindo popularidade devido proporcionar alguns benefícios quando comparada ao aquecimento convencional por chama. Quando comparado ao método convencional de aquecimento por chama, o aquecimento por indução proporciona um ciclo de tempo menor, custos com consumíveis reduzido, maior segurança para o operador, além de maior uniformidade das temperaturas adquiridas quando se utiliza um sistema com controlador de temperaturas, como o Proheat™ 35 da Miller®, que mantém o perfil de temperaturas estável [40]. A Figura 10 apresenta o conceito onde a junta de uma seção de duto a ser soldada sendo pré-aquecida por indução através de bobinas localizadas em sua vizinhança.

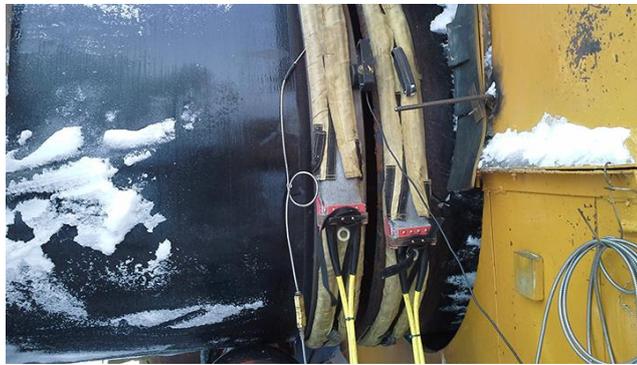


Figura 10. Junta de uma seção de duto a ser soldada pré-aquecida por indução [41]

A utilização de pré-aquecimento e pós-aquecimento na soldagem de recuperação de dutovias vem como solução para problemas como trincas a frio, muito comuns nesse tipo de operação. Esta técnica é comumente utilizada para esta aplicação, porém em baixas temperaturas ($\sim 100^{\circ}\text{C}$), e muitas vezes por chama. Em estudo realizado por Faria *et al.* [42] para soldagem em operação, o resfriamento causado pelo fluido em circulação elevou significativamente a taxa de resfriamento na superfície interna do tubo quando comparado à soldagem convencional. O arrefecimento causado pelo fluido também provocou aumento na dureza da Zona Fundida e na Zona Afetada pelo Calor, onde a principal variável que influenciou na alteração das propriedades mecânicas da junta soldada foi a temperatura interna atingida durante a soldagem. A Figura 11 apresenta o conceito de aquecimento através de bobinas como forma de atuar sobre a taxa de resfriamento oriunda do processo de soldagem.

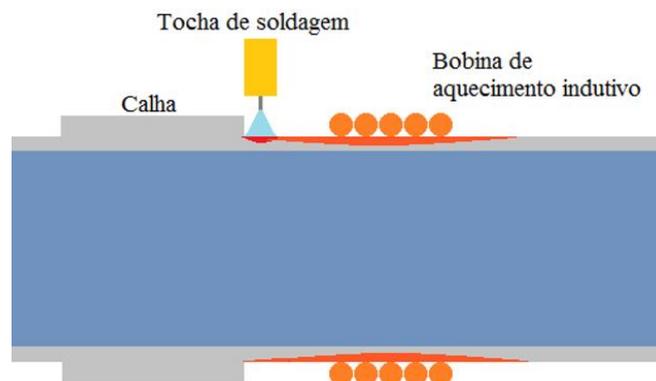


Figura 11 - Conceito de aquecimento indutivo para aquecimento de dutos para reparo com calha

O tempo de resfriamento em faixa de temperaturas críticas, como entre 800°C e 500°C ($T_{800-500}$), é um dos fatores determinantes para formação da microestrutura. A alta taxa de resfriamento proporcionada pelo fluido em circulação, proporcionando uma alta taxa de resfriamento da junta soldada, está relacionada diretamente a microestrutura formada (martensita e bainita, muito duras) e a trincas à frio (Figura 12) devido ao hidrogênio presente na poça de fusão não conseguir difundir-se, ficando incrustado. O hidrogênio acumulado passa da forma atômica a molecular e provoca o aparecimento de altas pressões no interior do cordão de solda [43].

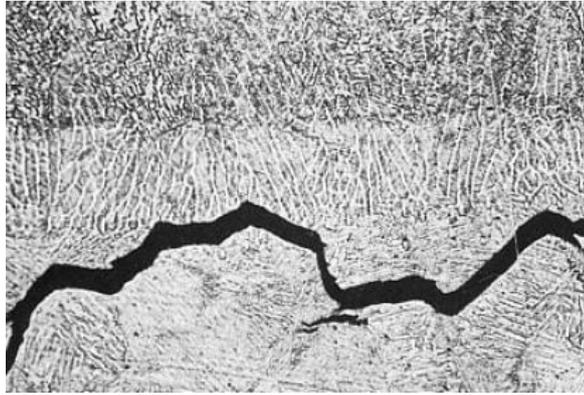


Figura 12. Trinca induzida por hidrogênio segregado [43]

Outros fatores que possuem influência direta sobre a formação de trincas induzidas por hidrogênio são: Hidrogênio presente nos elementos constituintes da solda (metal de adição, metal de base e gás de proteção), tensões elevadas na região soldada e microestrutura susceptível [44]. Kou [43] atribui estes problemas à Zona Parcialmente Fundida da poça fundida e cita soluções que atuam no metal de adição, na fonte de calor e grau de *heat input*, no grau de restrição da junta a ser soldada, e no metal de base.

Um dos desafios que a técnica de aquecimento indutivo convencional apresenta é que o aquecimento é gerado na superfície da peça que está próxima à bobina. No caso da realização dos procedimentos de soldagem, é necessário deixar um espaçamento entre a bobina e a região que será soldada, gerando assim dificuldades em manter a região da junta aquecida dependendo do da capacidade de conduzir calor do fluido que passa pelo duto. Dessa forma, uma das variantes do processo de aquecimento que será avaliada no presente trabalho é o aquecimento localizado utilizando um indutor de pequenas dimensões que se movimenta antes da tocha de soldagem.

Diferentemente da configuração que utiliza bobinas, o equipamento não se encontra em contato com o duto ou com alguma manta, mas de forma distante, similar a tocha de soldagem, aquecendo a região a ser soldada através do forte campo magnético concentrado. Em artigo recente, a revista *Advanced Materials & Processes* [45] trata o pré-aquecimento por aparato de indução localizado à frente da tocha de soldagem como um novo processo híbrido de soldagem denominado *Hybrid Induction Arc Welding* ou *High Deposition Arc Welding (HiDep)*. A bobina localizada à frente da tocha de soldagem é envolta por um aparato concentrador de campo eletromagnético (Figura 13) e pré-aquece de forma indutiva a junta a ser soldada a temperaturas próximas ao ponto de fusão, diminuindo (e até eliminando) distorções e aumentando a produtividade.

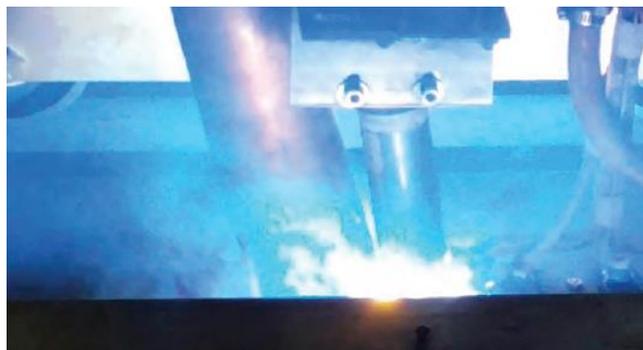


Figura 13. Soldagem *HiDep* em andamento - chapa 5/8" de *Marine Steel*, junta de topo com *gap* 1/8" [45]

Dutra *et al.* [19] avaliaram a influência de parâmetros de soldagem e parâmetros de aquecimento indutivo sobre a geometria do cordão de solda, utilizando o processo *HiDep*. Os resultados destes mostram que, dentro de alguns parâmetros de análise, a potência do indutor e a velocidade de soldagem afetam significativamente características do cordão de solda, como largura, altura do reforço e penetração.

Também voltado à indústria naval, Jones *et al.* [18] apresentam que o conceito de usar um sistema composto de soldagem com pré-aquecimento indutivo localizado (*HiDep*) visando aumentar a produtividade da soldagem de fabricação de navios através da diminuição do número de passes necessários para enchimento da junta e a não-utilização de juntas complexas (Figura 14). Além disso, os autores também fazem referência a diminuição das distorções oriundas do processo, uma vez que é feito o aquecimento localizado.



Figura 14. Solda de topo em chapa de 3/4" de espessura em *marine steel* DH-36 [18]

Ainda como forma de aquecimento por indução de forma localizada, porém realizado não em conjunto, mas de forma auxiliar na preparação para a execução do processo de soldagem, a empresa Miller™ possui como opção para uso em sua fonte ProHeat™ 35 um sistema de aquecimento indutivo localizado rolante que se desloca sobre o duto, aquecendo-o. Permitindo aquecimento à temperaturas de até 315 °C, a empresa entrega este conceito de aquecimento como solução para substituição do aquecimento assistido por chama ou por resistência, que são métodos que demandam insumos, não são tão eficientes e/ou não proporcionam aquecimento controlado e consistente [46]. A Figura 15 apresenta o equipamento Miller™ *ProHeat Rolling Inductor*.

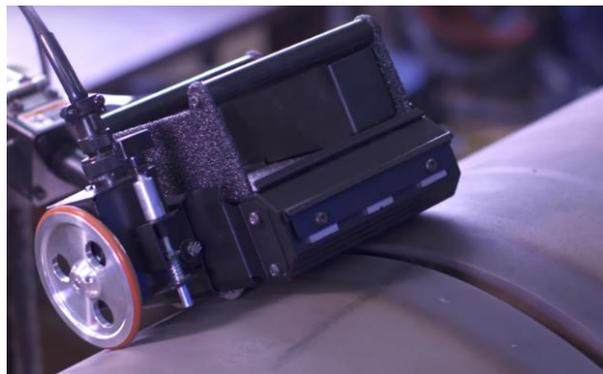


Figura 15. Indutor Miller™ ProHeat Rolling Inductor [46]

3 MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

O desenvolvimento do estudo está inserido no contexto do projeto de pesquisa “Soldagem em operação com GMAW, FCAW e aquecimento por indução”. Abaixo são apresentados os métodos e os materiais que serão utilizados para consecução deste trabalho.

3.1 MÉTODOS

Inicialmente serão realizados ensaios a fim de se obter informações quanto ao aquecimento indutivo utilizando bobinas no tubo em operação, buscando informações acerca da potência fornecida pela fonte para o aquecimento da região a ser soldada à determinada temperatura e vazão do fluido dentro do duto. Nesse sentido, também pretende-se realizar o levantamento desses dados técnicos para o caso de aquecimento localizado utilizando o *Pad* localizador de campo da fonte Miller *ProHeat*TM 35.

Uma vez levantados os dados de aquecimento, pretende-se realizar ensaios de soldagem utilizando os processos MIG/MAG convencional e variantes modernas deste processo, no sentido de realizar a análise comparativa entre estes, a fim de validar os procedimentos que garantem melhor qualidade das juntas orbitais soldadas. As análises que serão realizadas no contexto do presente trabalho foram divididas nos seguintes itens:

- I. Realização da montagem e a calibração da bancada de soldagem com arrefecimento por água;
- II. Estudo baseado em ensaios experimentais para verificar a influência do aquecimento indutivo sobre o local da solda de acordo com a variação da vazão de fluido e da potência fornecidos pela fonte para configuração de aquecimento convencional para diferentes espessuras de tubo;
- III. Verificação do efeito do aquecimento indutivo sobre o local da solda de acordo com a variação da vazão de fluido e da potência fornecidos pela fonte utilizando o aparato concentrador de campo para aquecimento indutivo localizado para diferentes espessuras de tubo;
- IV. Ensaios de soldagem MIG/MAG curto-circuito convencional em diferentes condições operacionais;
- V. Ensaios com as variantes modernas do processo MG/MAG citadas;
- VI. Desenvolvimento de modelo analítico baseado em equações de transferência de calor;

O esquema idealizado para construção da bancada é ilustrado pela Figura 16.

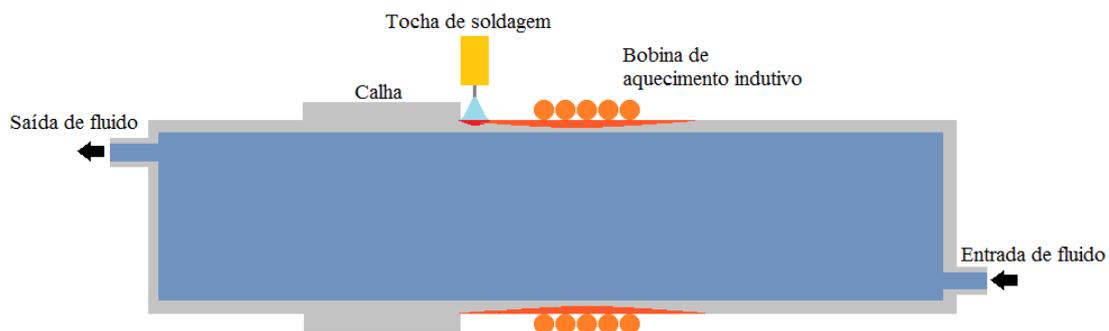


Figura 16. Esquema da bancada para ensaios com aquecimento indutivo

Um modelo analítico baseado em equações de transferência de calor foi desenvolvido com o auxílio do MS Excel® pela equipe envolvida no projeto. Estes cálculos são fundamentados em situações específicas, como tipo de fluido e de fluxo, tipo de fluxo de calor, diâmetro e espessura do tubo e condições de temperatura inicial. Pretende-se avançar no desenvolvimento e aprimoramento deste modelo, aplicando conceitos difundidos na área da soldagem que se aproximem das situações operacionais dos testes a se realizar para obtenção e comparação destes dados com os dados obtidos através dos ensaios e simulações.

Simulações iniciais de gradientes térmicos advindos do processo de aquecimento indutivo e da fonte de calor oriunda do arco elétrico foram feitas através do *software* COMSOL Multiphysics® [47]. A Figura 17 apresenta o resultado da simulação inicial feita a partir de contato realizado com a COMSOL para análise da aplicação do software para com o projeto. A Tabela 2 apresenta os parâmetros de entrada no software de simulação.

Tabela 2. Parâmetros utilizados para simulação

Diâmetro do Tubo (in)	12
Espessura do Tubo (in)	1/2
Vazão do fluido (l/min)	40
Número de espiras	5
Diâmetro das espiras (mm)	10
Corrente da fonte de aquecimento (A)	700
Temperatura ambiente (°C)	25
Frequência (KHz)	5
Temperatura na região de soldagem (°C)	170
Distância da bobina (mm)	50
Temperatura abaixo da bobina (°C)	281

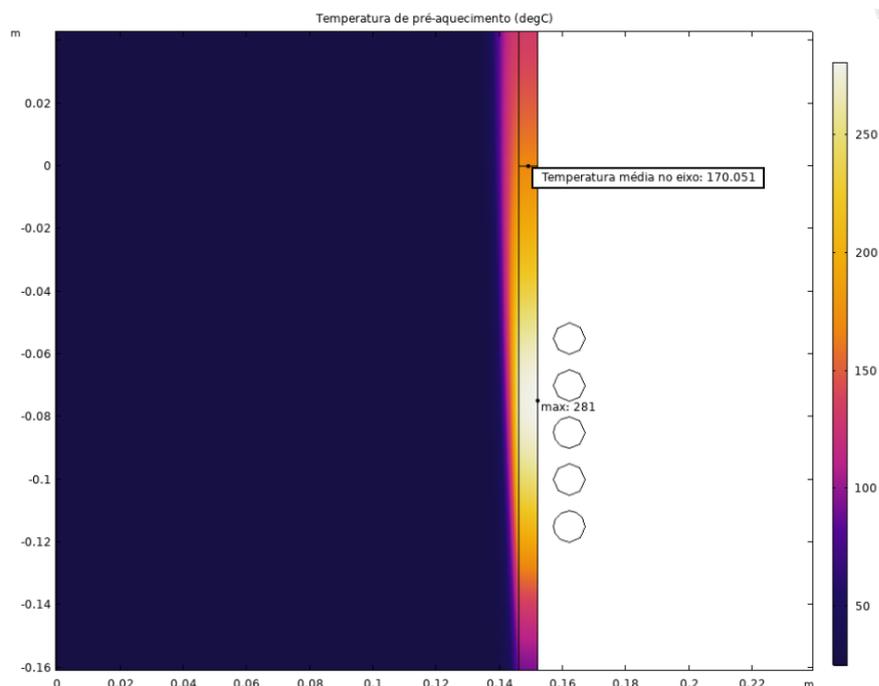


Figura 17. Influência da temperatura de pré-aquecimento sobre a temperatura da interface a ser soldada [47]

Pretende-se desenvolver simulações para os principais testes a serem realizados, prosseguindo estas a partir da compra do *software* junto à COMSOL. Caso se torne necessário as simulações também podem vir a serem realizadas através do ANSYS™ versão estudantil.

3.2 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

A bancada de ensaios será dimensionada e fabricada com tubos de diferentes espessuras e com tamanho de acordo com as dimensões previstas em projeto. Os materiais a serem utilizados para montagem da bancada e auxílio na realização dos ensaios são:

- Tubo API 5L GR B SCH 20 de 12" com espessura de 6,35mm;
- Tubo API 5L GR B SCH 80 de 12" com espessura de 17,48mm;
- Tubo API 5L GR B STD 20 de 12" com espessura de 9,53mm;

5 PREVISÃO FINANCEIRA

O LABSOLDA é referência nacional no desenvolvimento de novas tecnologias para soldagem, além de possuir equipamentos de última geração no que tange a processos de soldagem, dispondo de grande parte dos equipamentos necessários para desenvolvimento da pesquisa, tais como fonte de soldagem, cabeçote orbital, câmera de alta velocidade, câmera termográfica, sistema de aquisição de dados, equipamento de raios-X e ultrassom. Desta forma os gastos previstos serão em insumos e consumíveis para realização dos ensaios, como tubos para corpos de prova, gases, insumos para as tochas de soldagem, abrasivos, serviços de usinagem, melhorias de projeto, entre outros. Na Tabela 4 é apresentada a descrição dos itens com a previsão dos custos.

Tabela 4. Previsão financeira do projeto

Descrição	Valor
Tartilope V4*	R\$ 60.000,00
Fonte DIGIPLUS A7 600A*	R\$ 40.000,00
Fonte Lincoln*	R\$ 120.000,00
Fonte Fronius CMT*	R\$ 120.000,00
Sistema de aquisição portátil (SAP)*	R\$ 20.000,00
Câmera de alta velocidade IDT*	R\$ 200.000,00
Câmera Térmica Flir*	R\$ 230.000,00
Material para corpos de prova**	R\$ 28.285,00
Insumos para tochas e soldagem**	R\$ 4.000,00
Fonte Miller para aquecimento indutivo**	R\$ 235.000,00
Espectrômetro**	R\$ 200.000,00
Câmera termográfica portátil**	R\$ 175.000,00
Consumíveis de soldagem**	R\$ 6.000,00
Valor total:	R\$ 1.318.285,00

* Disponível na infraestrutura do LABSOLDA

** Disponível por meio de projeto em parceria com a Petrobras

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no que foi apresentado no cronograma de atividades, é possível realizar o trabalho no tempo previsto visto que o LABSOLDA conta com uma equipe multidisciplinar, está desenvolvendo outros trabalhos correlacionados, havendo desta forma auxílio direto de bolsistas de iniciação científica, mestrados e doutorandos que podem contribuir para com a pesquisa proposta.

Com este trabalho pretende-se contribuir para o aprimoramento científico do processo de soldagem orbital na recuperação de pipelines utilizando a técnica Dupla-Calha tipo B com o emprego de aquecimento por indução. Sugerindo, criando e implementando melhorias para este processo, com base no que foi proposto nos objetivos deste trabalho, os resultados esperados com esta pesquisa serão de grande valia para aplicação futura desta técnica, contribuindo para com o projeto financiado pela Petrobras®.

7 BIBLIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2017," 14 novembro 2017. [Online]. Available: <https://www.iea.org/weo2017/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [2] Ministério de Minas e Energia, "Cenário sócio-econômico e demanda de Energia - Empresa de Pesquisa Energética," Novembro 2014. [Online]. Available: http://www.mme.gov.br/documents/10584/10745/PNE_2050_workshop_eco_dem_vf.pdf/4203881d-d70b-4050-910e-d4dab0c6600e. [Accessed 16 Maio 2019].
- [3] O Petróleo, "ExxonMobil anuncia investimento para a Fase 2 do Campo de Liza," 6 Maio 2019. [Online]. Available: <https://www.opetroleo.com.br/exxonmobil-hess-sanction-liza-fase-2-de-desenvolvimento/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [4] Halliburton, "Deepwater Areas," [Online]. Available: <https://www.halliburton.com/en-US/ps/solutions/deepwater/deepwater-plays.html?node-id=hgeyxsse>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [5] Petrobras, "Pré-Sal: Desde as primeiras descobertas em águas profundas, temos trilhado uma longa jornada tecnológica.," [Online]. Available: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [6] Halliburton, "Halliburton: Pipeline & Process services," 2016. [Online]. Available: <https://www.halliburton.com/content/dam/ps/public/pps/contents/Multimedia/web/pps-application.html>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [7] World Pipelines, "Victorius Vessels," *World Pipelines*, p. 4, 2018.
- [8] Câmara dos Deputados, "PL 10985/2018," 14 Novembro 2018. [Online]. Available: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2186621>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [9] SC Gás Companhia de Gás de Santa Catarina, "Projeto Serra Catarinense chega à quarta etapa em 2019," 11 Abril 2019. [Online]. Available: http://www.scgas.com.br/noticia/index/idse/0/id/6400?dt_ini=&dt_fim=. [Accessed 16 Maio 2019].
- [10] Petrobras, "Plano Estratégico," 2019. [Online]. Available: <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [11] Petrobras, "Destques de Pesquisa e Desenvolvimento," 2019. [Online]. Available: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/tecnologia-e-inovacao/destaques-de-pesquisa-e-desenvolvimento/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [12] T. Melo, "WEG cria seu Centro de Inovação Aberta em Jaraguá do Sul," O Petróleo, 6 Maio 2019. [Online]. Available: <https://www.opetroleo.com.br/weg-cria-seu-centro-de-inovacao-aberta-em-jaragua-do-sul/>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [13] I. O. Pigozzo, SOLDAGEM TIG ORBITAL: OTIMIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS E PROSPECÇÕES TECNOLÓGICAS PARA PROCEDIMENTOS DE PASSE DE RAIZ, Florianópolis: Dissertação de Mestrado, 2015.
- [14] LABSOLDA, "Sistema Avançado de Soldagem para o Setor de Petróleo e Gás com Ênfase em Estruturas de Alumínio (SISASOLDA)," 05 Novembro 2013. [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/586-sistema-avancado-de-soldagem-para-o-setor-de-petroleo-e-gas-com-enfase-em-estruturas-de-aluminio-sisasolda>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [15] LABSOLDA, "Sistema Multifuncional para Soldagem Automática de Dutos - Acoplamento e Manipulação Robótica (SOLDADUTO)," 12 Julho 2012. [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/587-sistema-multifuncional-para-soldagem-automatica-de-dutos-acoplamento-e-manipulacao-robotica-soldaduto>. [Accessed 16 Maio 2019].
- [16] LABSOLDA, "Sistema de Soldagem Orbital de Tubos de Grande Diâmetro com Sensoriamento a LASER," LABSOLDA - Instituto de Soldagem e Mecatrônica, 01 Janeiro 2012. [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/589-sistema-de-soldagem-orbital-de-tubos-de-grande-diametro-com-sensoriamento-a-laser>. [Accessed 11 Junho 2019].
- [17] LABSOLDA, "Desenvolvimento de Tecnologias e de Equipamentos para a Recuperação por Soldagem no Setor Petrolífero e Petroquímico," LABSOLDA, 01 Janeiro 2009. [Online]. Available: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/realizados/582-desenvolvimento-de-tecnologias-e-de>

- equipamentos-para-a-recuperacao-por-soldagem-no-setor-petrolifero-e-petroquimico. [Accessed 17 Maio 2019].
- [18] J. E. Jones, V. L. Rhoades and S. K. Madden, "High Deposition Welding for Shipbuilding," in *National Shipbuilding research Program. Joint Panel Meeting*, Minneapolis, 2012.
- [19] W. T. Dutra, I. G. Machado and A. R. Gonzalez, "Soldagem a Arco Assistida por Aquecimento Indutivo Localizado," in *XLII CONSOLDA – CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM*, Belo Horizonte – MG, 2016.
- [20] ASME, "ASME B31G-1991 Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines," American Society of Mechanical Engineers, New York, 1991.
- [21] ASME; API, "Fitness-For-Service API 579-1/ASME FFS-1," American Society of Mechanical Engineers, Washington, D. C., 2016.
- [22] PETROBRAS, "Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações Industriais e Dutos em Operação," CONTEC Comissão de Normalização Técnica, 2016.
- [23] American Petroleum Institute API, "Welding of Pipelines and," API Publishing Services, N. W., Washington, D.C., 2001.
- [24] American Society of Mechanical Engineers, "Repair of Pressure Equipment and Piping - ASME PCC-2," New York, NY, 2015.
- [25] G. Dalpiaz, "Manutenção de Dutos/Tubulações – Soldagem em Operação," Petrobras, 2016.
- [26] R. Palmer-Jones, J. Hume, N. Linkleter, V. Minhas and D. Christie, "THE DEVELOPMENT OF AN EMERGENCY REPAIR SYSTEM, AND A CASE STUDY FOR A REMOTE GAS PIPELINE," in *Proceedings of the 7th International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, 2008.
- [27] A. Scotti and V. Ponomarev, Soldagem MIG/MAG melhor entendimento melhor desempenho, São Paulo: Artliber, 2014.
- [28] R. H. G. e. Silva, "Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicada ao Passe de Raiz," Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2005.
- [29] D. Yapp and S. A. Blackman, "Recent Developments in High Productivity Pipeline Welding," *COBEF - II Brazilian Manufacturing Congress*, p. 9, 21 Maio 2003.
- [30] Fronius, "PERFEIÇÃO EM TECNOLOGIA DE SOLDAGEM," [Online]. Available: <https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/sobre-nos/unidade-de-negocio-perfect-welding>. [Accessed 22 Maio 2019].
- [31] OTC Daihen, "DW-300+," 2014. [Online]. Available: <http://otc-daihen.pro/produto/maszyny-spawalnice/dw-300/>. [Accessed 22 Maio 2019].
- [32] Lincoln, "POWER WAVE 455™ OPERATOR'S MANUAL," 1999. [Online]. Available: <https://www.lincolnelectric.com/assets/servicenavigator-public/lincoln3/im583.pdf>. [Accessed 22 Maio 2019].
- [33] IMC Soldagem, "MANUAL DE INSTRUÇÕES MTE DIGITEC 450/600," 2005. [Online]. Available: [https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_\(2002\).pdf](https://www.imc-soldagem.com.br/images/documentos/manuais/digitec_manual_instrucoes_5ed_(2002).pdf). [Accessed 22 Maio 2019].
- [34] H. Direne Filho, MIG/MAG CCC - AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE CONTROLE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA COMO SOLUÇÃO PARA O PASSE DE RAIZ, Florianópolis: Dissertação de mestrado, 2014.
- [35] R. Kindermann, "Soldagem Orbital Do Passe De Raiz – Algo-Ritmos Para Controle Adaptativo Por Meio De Sensoriamento Laser," UFSC, Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 2016.
- [36] "Magnetech International," 2017. [Online]. Available: <http://magnetech-international.com>. [Accessed 22 Outubro 2017].
- [37] "SPS - Sistemas e Processos de Soldagem," 2017. [Online]. Available: <http://sps-soldagem.com.br>. [Accessed 22 Outubro 2017].
- [38] D. Galeazzi, SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL COM SENSORIAMENTO LASER: ANÁLISE E MELHORIAS DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE, Florianópolis: Dissertação de Mestrado, 2019.

- [39] "EngeMovi," 2017. [Online]. Available: <http://www.engemovi.com.br/sobre-nos/>. [Accessed 22 Outubro 2017].
- [40] © Miller Electric Mfg. LLC, "Welding Preheat With Induction Improves Consistency and Saves Time," © Miller Electric Mfg. LLC, [Online]. Available: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/welders-turn-to-induction-heating-for-preheating-stressrelieving>. [Accessed 26 Junho 2019].
- [41] © Miller Electric Mfg. LLC, "Quality Is Critical in Transmission Pipeline Welding — and Induction Heating Can Help," [Online]. Available: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/quality-is-critical-in-transmission-pipeline-welding-and-induction-heating-can-help>. [Accessed 26 Julho 2019].
- [42] P. Faria, J. P. Soares, F. F. d. S. Araujo and R. Paranhos, "Soldagem em Operação: Parte 1 - Efeito do Arrefecimento Causado pelo Fluido em Tubulação de Espessura 11 mm," *Soldagem e Inspeção*, vol. 17, no. 4, pp. 280-287, 2012.
- [43] S. Kou, *Welding Metallurgy*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- [44] M. B. Schwedersky, *UM ESTUDO DA EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DOS PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO*, Florianópolis: Dissertação de Mestrado, 2011.
- [45] *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*, "HYBRID INDUCTION ARC WELDING: REDUCES WELD DISTORTION AND BOOSTS PRODUCTIVITY," *ADVANCED MATERIALS & PROCESSES*, vol. TECHNICAL SPOTLIGHT, pp. 34-37, 2015.
- [46] Miller Electric Mfg. Co., "ProHeat™ Rolling Induction System," Março 2016. [Online]. Available: <https://www.red-d-arc.com/pdf/IN13-0.pdf>. [Accessed 27 Junho 2019].
- [47] COMSOL , "Platform Product: COMSOL MULTIPHYSICS® Understand, Predict, and Optimize Physics-Based Designs and Processes with COMSOL Multiphysics®," COMSOL , [Online]. Available: <https://br.comsol.com/comsol-multiphysics>. [Accessed 22 Maio 2019].
- [48] "TIP TIG International," 2017. [Online]. Available: <http://www.tiptig-international.com>. [Accessed 22 Outubro 2017].