

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

PROJETO DE DISSERTAÇÃO

**SOLDAGEM DE UNIÃO INTERNA EM TUBOS DE AÇO C-MN CLADEADOS COM
INCONEL 625**

Kaue Correa Riffel

Orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis, Novembro de 2016

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 TUBOS DE AÇO C-MN CLADEADOS COM LIGAS RESISTENTES À CORROSÃO.....	4
2.1.1 Tubos cladeados ou revestidos metalurgicamente	5
2.1.2 Tubos cladeados ou revestidos mecanicamente	6
2.2 TUBOS API 5L.....	7
2.3 INCONEL 625	8
2.4 PROCESSOS DE SOLDAGEM TIG	9
2.4.1 TIG com alimentação automática, <i>cold wire</i> e <i>hot wire</i>	10
2.4.2 TIG com alimentação automática contínua e dinâmica	11
2.4.3 TIG com alimentação tangencial.....	12
2.5 TEMAS ASSOCIADOS À SOLDAGEM ORBITAL DE TUBOS CLADEADOS	13
2.5.1 Método Reel-lay	13
2.5.2 Processo de soldagem TIG orbital aplicado a tubos cladeados.....	15
2.5.3 Problemas com Overmatching	16
2.5.4 Procedimento de soldagem alternativo para juntas dissimilares.....	17
2.5.5 Problemas na inspeção de tubos cladeados	19
2.6 SOLDAGEM DE MATERIAIS DISSIMILARES	20
2.6.1 Diluição em juntas dissimilares.....	21
3 OBJETIVOS.....	22
3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4 APARATO EXPERIMENTAL	23
4.1 SERRA DE TUBOS	23
4.2 FONTE DE SOLDAGEM E CABEÇOTE ORBITAL ARC MACHINES	23
4.3 VIDEOSCÓPIO	24
4.4 CÂMERA PARA POSICIONAMENTO E ACOMPANHAMENTO DURANTE A SOLDAGEM	25
5 CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES	25
6 PREVISÃO FINANCEIRA.....	27
7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	27

1 Introdução

A indústria de petróleo e gás foi um dos ramos em maior crescimento nas últimas décadas, pois a demanda por combustíveis, borracha, solventes e demais derivados de petróleo cresce a cada dia. Sendo assim, é indiscutível a elevada importância desse setor na economia mundial e no desenvolvimento do Brasil, o qual tem cerca de 42,1% da sua matriz energética oriunda do gás natural e do petróleo, de acordo com dados estatísticos do Ministério de Minas e Energia.

No mundo, o Brasil é um dos países com as mais avançadas tecnologias de exploração de petróleo em águas profundas. Assim, a Petrobrás tem investido seus esforços no pré-sal, uma região perto da costa brasileira com reservas de hidrocarbonetos situadas de 5 mil a 7 mil metros abaixo do nível do mar. Em tais profundidades, as exigências mecânicas nas estruturas de tubulações para escoamento do petróleo torna-se um grande desafio, além do alto nível de CO₂ e H₂S presente no fluido que exige alta resistência à corrosão interna. Deste modo, fica evidente a necessidade de qualidade na escolha de materiais para as tubulações (*pipelines*), na condição de *risers* rígidos, os quais são responsáveis pela condução do fluido desde o poço até a plataforma.

Normalmente na indústria petrolífera, quando havia-se a necessidade da utilização de componentes estruturais em que se exigia uma alta resistência à corrosão eram utilizadas ligas de aços inoxidáveis como os duplex ou superduplex, porém atualmente este cenário tem mudado, visto o alto custo na fabricação e compra desses materiais. Durante os últimos anos, as companhias do setor de petróleo e gás têm investido fortemente na área de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento). Com isso, houve grande progresso com relação aos materiais empregados para a construção destas tubulações. Pode-se citar como exemplo o desenvolvimento de tubos feitos de aços de alta resistência C-Mn, cladeados internamente com uma liga resistente à corrosão, como as superligas de níquel ou aços inoxidáveis. Este revestimento é também chamado de CRA (*Corrosion Resistant Alloy*). Esta configuração une as propriedades de alta resistência mecânica do aço com a alta resistência à corrosão da liga de revestimento, poupando custos, uma vez que não é necessária a utilização de um tubo fabricado totalmente de materiais nobres como duplex e superduplex.

Com a utilização dos novos materiais em *pipelines*, surgem grandes desafios e problemas a serem resolvidos em termos de soldagem, inspeção, métodos de lançamento e instalação *offshore*. A soldagem consiste em uma das principais etapas na fabricação de tubulações. Nela são garantidas algumas das propriedades necessárias para a futura aplicação

dessa estrutura. Assim, novas técnicas, concepções e processos devem ser criados para acompanhar o surgimento de novos materiais, com o objetivo de conferir a qualidade necessária às juntas soldadas. O método de lançamento de tubulações por *reel-lay*, é uma eficiente alternativa em termos de produtividade (menor tempo de fabricação) e redução de custos. Recentemente, empresas do ramo de energia como a Petrobrás, tem aplicado este método, a fim de agilizar a construção de novos campos para exploração. Porém, o processo de bobinamento e desbobinamento (*reeling*) da tubulação no carretel gera deformações plásticas que modificam a sua microestrutura o que pode gerar complicações na região mais crítica, vinculada à região soldada. Em se tratando de tubos cladeados, isto é ainda mais preocupante visto que a junta é composta por dois materiais diferentes, que possuem propriedades mecânicas e metalúrgicas diferentes. Torna-se obrigatório o uso de um metal de adição com propriedades similares à CRA, classificando a solda como dissimilar.

Na fundamentação teórica serão apresentados e discutidos os desafios de se realizar a soldagem de união em tubos cladeados por meio de trabalhos científicos referentes ao tema em questão.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Tubos de aço C-Mn cladeados com ligas resistentes à corrosão

Tubos C-Mn cladeados são tubos de aço de alta resistência mecânica, revestidos com uma liga de alta resistência à corrosão, chamada de CRA (*Corrosion Resistant Alloy*) normalmente ligas de níquel ou aços inoxidáveis. O cladeamento (*cladding*) é por definição a deposição de um material dissimilar sobre a superfície de um material base ou substrato [1]. O material depositado tem por função revestir e conferir propriedades as quais o substrato por si só não possui. Quando aplicado a tubos para a indústria petroquímica, o revestimento tem como propósito principal proteger e aumentar a vida útil do componente nos ambientes altamente agressivos e corrosivos encontrados em determinadas aplicações como em contato com fluidos na presença de CO₂ e H₂S. Neste caso, os métodos de cladeamento podem ser divididos em dois grupos, os métodos com união metalúrgica por soldagem ou aspensão térmica, e o método com união mecânica por hidroconformação ou expansão hidráulica [1]. A Figura 1 mostra um tubo cladeado internamente.



Figura 1. Tubo de aço carbono cladeado metalurgicamente [2].

2.1.1 Tubos cladeados ou revestidos metalurgicamente

Para tubos cladeados metalurgicamente, também chamados de *clad pipe*, o processo de fabricação pode iniciar a partir de uma chapa feita do material base (podendo ser aço carbono) revestida de uma CRA. As chapas são então conformadas até adquirirem a forma do tubo, e posteriormente é realizada uma soldagem longitudinal de selamento [2]. Neste método a união é feita por meio da fusão do metal de base (substrato) com o metal de adição. A alta temperatura empregada pelo arco elétrico gera o aquecimento da região e consequentemente formação de uma ZAC (Zona Afetada pelo Calor), o que pode exigir um tratamento térmico pós-soldagem, dependendo da sua aplicação e do nível de tensões residuais na chapa [3]. A Figura 2 demonstra um esquema simplificado do procedimento de fabricação para tubos revestidos que possuem costura. Outro método de revestimento com união metalúrgica, é o *overlay* em tubos fabricados por extrusão (sem costura). Neste procedimento é depositado por soldagem um material resistente à corrosão na parede interna do tubo.

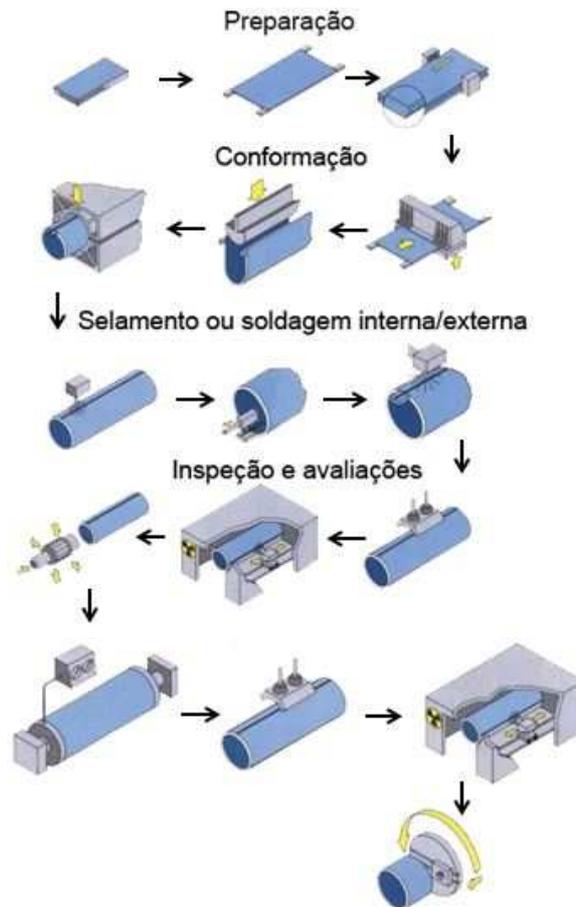


Figura 2. Procedimento de fabricação para tubos cladeados metalurgicamente. Adaptado de [3]

2.1.2 Tubos cladeados ou revestidos mecanicamente

Outra versão existente de tubos revestidos é os que possuem união mecânica, conhecidos como *lined pipe*. Neste método não há modificações e ligações metalúrgicas entre o substrato e o material de revestimento. Desta forma, não há presença de uma zona termicamente afetada (ZTA), e por tanto isenta de transformações metalúrgicas e alterações na microestrutura. Dentre as principais vantagens em relação aos tubos metalurgicamente revestidos destaca-se o seu menor custo e a grande variedade de combinações disponíveis. Não é necessário o desenvolvimento de um procedimento de soldagem específico para depositar determinada liga, o que dificulta ainda mais o processo de fabricação no caso anterior. O processo de fabricação destes tubos é esquematizado pela Figura 3, o qual consiste em inserir um tubo de CRA dentro do tubo que se deseja revestir. Após isso, ambos são expandidos hidrostáticamente gerando uma forte ligação mecânica [2].

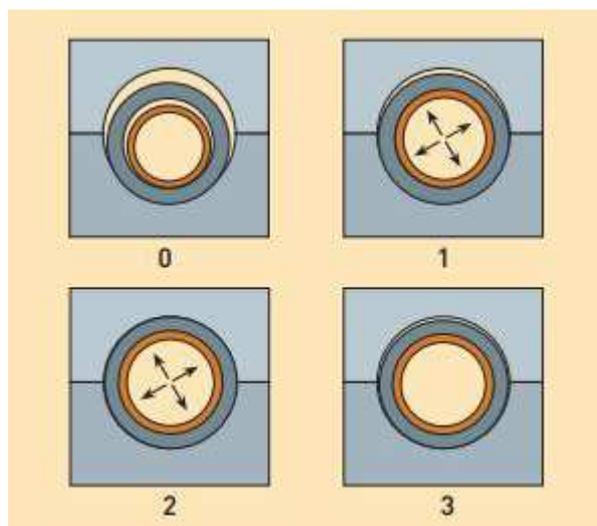


Figura 3: Principais etapas do processo de expansão. Adaptado de [2].

2.2 Tubos API 5L

Os tubos API (*American Petroleum Institute*) são tubos de aço fornecidos com ou sem costura para a utilização principalmente em gasodutos, oleodutos, aplicação que requer alta resistência mecânica. A classificação é dada conforme a denominação 5L (API 5L – *Specification for Line Pipe*), mas possui subclassificações de acordo com a respectiva composição química e resistência mecânica [4]. A Tabela 1 mostra as propriedades mecânicas de alguns aços API.

Tabela 1. Propriedades mecânicas tubos API 5L. Adaptado de [5].

Grau	Limite de escoamento		Resistência à tração	
	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa
X 42	42000	289	60000	413
X 46	46000	317	63000	434
X 52	52000	358	66000	455
X 56	56000	386	71000	489
X 60	60000	413	75000	517
X 65	65000	448	77000	530
X 70	70000	482	82000	565
X 80	80000	551	90000	620

Sendo assim, para realização de um bom trabalho se faz importante o conhecimento dos materiais envolvidos no processo de soldagem. Neste caso o substrato do tubo consiste de um aço C-Mn, e o revestimento de liga Inconel 625, descrito no seguinte tópico.

2.3 Inconel 625

As superligas de níquel são materiais muito utilizados nas indústrias química, aeroespacial e petrolífera. Esta aplicação é oriunda da utilização de estruturas em ambientes altamente agressivos, como água do mar, em contato com ácidos. Uma das ligas mais aplicadas é o Inconel 625 a qual possui adições de nióbio e molibdênio que aumentam a sua resistência mecânica e a corrosão em altas temperaturas.

Em termos de consumíveis de soldagem, a liga 625 é classificada pela AWS (*American Welding Society*) como ER NiCrMo-3, que tem como principais aplicações a união de inconel e outras ligas resistentes à corrosão, além da soldagem de união e revestimento de ligas ferrosas [6]. A composição química deste material é apresentada na Tabela 2, e logo abaixo discutida a função desempenhada por cada um na liga à base de níquel.

Tabela 2. Elementos de liga Inconel 625 [7].

Inconel 625 (ERNiCrMo-3)							
Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	Fe	Al	C
64,43	22,2	9,13	3,53	0,23	0,19	0,09	0,011
Si	Co	Mn	Cu	P	S	W	V
0,05	0,03	0,01	0,01	0,002	0,002	-	-

Cromo: Aumenta a resistência à corrosão, e melhora as propriedades mecânicas da matriz pelo endurecimento por solução sólida. Apenas valores acima de 20% contribuem para o aumento da resistência à corrosão em altas temperaturas, isso se deve ao fato de apenas após esta porcentagem é que a camada passivante Cr_2O_3 adquire a aderência e espessura necessária para impedir o oxigênio de entrar no material por difusão [7].

Molibdênio: Aumenta a resistência em atmosferas ácidas não oxidantes quando exposto às altas temperaturas além de aumentar a resistência à corrosão por pite [8].

Nióbio: Controla a segregação ao final da solidificação, fato que ajuda a evitar trincas, além de ser formador de austenita secundária (γ'), carbonetos e promover mudanças nos contornos de grão [7].

Titânio: Possui efeito formador de precipitados. É mais problemático quando está presente juntamente ao alumínio, que neste caso necessita de um ajuste na composição química a fim de melhorar a interface $\gamma-\gamma'$ [7].

Outros elementos em menores quantidades na liga como o C, devem ser mantidos em pequenas quantidades para evitar uma possível migração para os contornos de grão, gerando a precipitação de fases que reduzem sua resistência à corrosão em altas temperaturas. O Ferro

aumenta a solubilidade do carbono no níquel, evitando assim a precipitação de fases intermetálicas. O alumínio possui efeito semelhante ao titânio, e possui alta solubilidade no níquel em altas temperaturas que devido ao rápido resfriamento mantém a solução sólida supersaturada na temperatura ambiente. Realizando-se um tratamento térmico pós-soldagem por exemplo, é possível controlar a precipitação de fase γ' , gerando um aumento da resistência mecânica do material [8].

2.4 Processo de soldagem TIG

O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) caracteriza-se por um arco elétrico formado entre um eletrodo de tungstênio (cátodo), a peça a ser soldada (ânodo), e um fluxo de gás inerte que quando ionizado conduz corrente elétrica e protege o eletrodo e a poça de fusão. Geralmente utiliza-se argônio, hélio ou misturas de ambos [9]. O processo TIG é comumente relacionado à baixa produtividade quando utilizado na sua configuração tradicional, porém, é preferível a sua utilização em soldagem de responsabilidade, pois produz soldas com baixo nível de defeitos, sem escórias, bom acabamento superficial e taxa de respingos praticamente nula [10]. Neste processo com exceção da soldagem de alumínio, o eletrodo é mantido no polo negativo (cátodo) e a peça no positivo (ânodo) do arco elétrico, sendo os eletrodos normalmente dopados com óxidos de alguns materiais como tório (Th), lantânio (La), Cério (Ce). Estes elementos propiciam uma fácil ignição do arco e maior estabilidade durante a soldagem. Uma vez que o eletrodo não é consumível o processo TIG possibilita a soldagem sem utilização de metal de adição, configuração denominada autógena. Porém algumas vezes é necessária a adição de material para preenchimento de chanfros que pode ser feita de forma manual ou automática.

Como dito anteriormente uma das maiores limitações do TIG na sua configuração tradicional é a baixa produtividade. No entanto, isto pode ser melhorado com algumas modificações na sua configuração original. A seguir serão apresentadas algumas versões do processo TIG, partindo desde as concepções tradicionais de alimentação de arame (*hot wire* e *cold wire*) até as versões mais recentes do processo, com alimentação tangencial e alimentação dinâmica. É fundamental ressaltar que cada variante possui a sua característica singular de funcionalidade podendo trazer benefícios ou malefícios para a aplicação neste trabalho. Isso significa que o processo mais indicado para um passe na raiz, pode não ser o mais indicado para um enchimento, ou um revestimento, por exemplo. A seguir será mostrado

as características das variantes do TIG, com a sua possível contribuição para a união de tubos cladeados.

2.4.1 TIG com alimentação automática, *cold wire* e *hot wire*

Como o próprio nome pressupõe a diferença na adição de arame na configuração *cold wire* e *hot wire* está na temperatura que é introduzido no processo. No *hot wire* o metal de adição é aquecido previamente por efeito joule enquanto que no *cold wire* ele é alimentado à temperatura ambiente [10]. A Figura 4 mostra um esquema da alimentação automática no processo TIG, bem como as variáveis geométricas envolvidas.

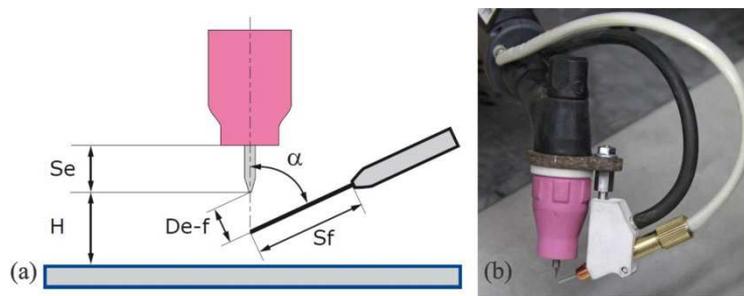


Figura 4. Em a) Variáveis geométricas. b) Tocha de soldagem TIG com direcionador de arame acoplado [11].

No processo com arame frio a posição em que o arame incide no arco elétrico é de fundamental importância para a estabilidade da soldagem, dependendo principalmente do ângulo α e da distância ($De-f$), exibidas na Figura 4a. Sendo assim o arame pode não entrar diretamente na poça de fusão e prejudicar a transferência metálica. Podendo ocorrer a transferência metálica do modo “destacado”, cuja principal força atuante é a da gravidade, aumentando a dificuldade na soldagem orbital onde a posição muda constantemente [10]. A soldagem orbital com arame frio tem sido utilizada na indústria petroquímica para o passe de raiz em tubulações, embora existam trabalhos nos quais o *cold wire* tenha sido aplicado satisfatoriamente em revestimento de aço carbono com Inconel. Com esta técnica, é possível obter baixos níveis de diluição (2%), dependendo dos parâmetros envolvidos no processo [12]. O método com arame quente funciona da mesma forma que o arame frio, porém a corrente que aquece o arame tem como objetivo principal aumentar a taxa de fusão do arame aumentando a produtividade. Neste caso, o arame possui uma temperatura elevada e necessita menor calor do arco para a fusão. Essa temperatura depende do comprimento de *stickout* e da corrente de pré-aquecimento [13]. Desta forma pode-se reduzir o nível de corrente na tocha, uma vez que, esta não é mais a única responsável pela fusão do arame. Logo, menor calor é

recebido pela peça, mantendo-se as propriedades do substrato. Conforme Pigozzo [10], uma das diferenças entre o arame quente e frio diz respeito a posição de incidência na poça de fusão. É mais habitual incidir o arame pela frente (frente de fusão) quando *cold wire* ou na parte traseira (frente de solidificação) quando *hot wire*.

Para a aplicação na soldagem orbital interna dos tubos cladeados, ambas as condições podem ser utilizadas, pois neste contexto, há vantagens e desvantagem para as duas concepções. Com *cold wire*, menos equipamentos envolvidos, pois não há a necessidade de aquecer o arame. Contudo, tem-se menor produtividade e maior probabilidade de obter uma alta diluição. Com relação ao *hot wire* pode-se obter a vantagem de maior taxa de fusão, menor diluição, conseqüentemente menor alteração microestrutural do substrato.

2.4.2 TIG com alimentação automática contínua e dinâmica

Os equipamentos aplicados ao processo TIG alimentado, normalmente trabalham com alimentação contínua de arame, sendo a velocidade definida pelo operador em apenas um sentido de avanço. Dessa forma a alimentação é sempre constante, e possibilita o emprego de equipamentos mais simples quando comparada à alimentação dinâmica.

Algumas aplicações podem exigir uma modificação na alimentação do arame, partindo para uma configuração chamada de alimentação dinâmica. A alimentação dinâmica caracteriza-se pelo movimento de avanço e recuo do arame, sendo a resultante um valor positivo, conforme mostrado na Figura 5. Uma das grandes vantagens desse método é conseguir trabalhar com baixas velocidades de alimentação, pois no momento de entrada do arame no arco elétrico, este possui uma velocidade instantânea muito maior que a média definida entre o avanço e recuo, isso faz o mesmo atravessar as isoterma do arco com alta energia cinética evitando que este funda antes de chegar à poça de fusão.

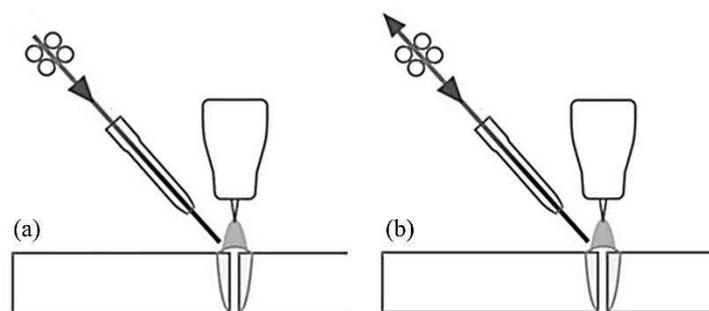


Figura 5. Em a) alimentação contínua. b) alimentação dinâmica [14].

Neste contexto se inserem alguns equipamentos comerciais que oscilam a velocidade do arame, como por exemplo, o TIP TIG, TigSpeed e o Dabber Tig, os quais podem trabalhar com altíssimas frequências de oscilação do arame de até 18 Hz. Nos equipamentos citados, o movimento de oscilação se assemelha a uma vibração, e o operador regula apenas a velocidade resultante [15].

Em sistemas com oscilação em alta frequência a poça de fusão tem sua tensão superficial reduzida, devido à agitação, o que faz com que o metal depositado tenha uma largura maior com menor penetração quando comparado ao processo convencional, formando um cordão característico de baixa diluição, requisito importante em uma soldagem de revestimento. Diante do exposto, o processo TIG com alimentação dinâmica constitui uma boa alternativa para a soldagem de tubos cladeados com Inconel. A baixa diluição garante as propriedades mecânicas e de resistência à corrosão da CRA.

2.4.3 TIG com alimentação tangencial

O processo TIG convencional é caracterizado por uma alimentação de arame realizada radialmente ao eletrodo em ângulos normalmente partindo de 45°. No entanto, foi desenvolvida nos últimos anos uma nova técnica em que o arame é inserido tangencialmente (20°) ao eletrodo, na região mais quente do arco elétrico. Este conceito tem como principal objetivo aumentar a produtividade do processo TIG em termos de taxa de fusão e velocidade de soldagem. Neste contexto, um estudo realizado por Díaz [16], apresenta resultados da utilização desta técnica com velocidade de alimentação semelhante ao processo MIG/MAG e duas vezes maiores que o processo TIG com alimentação radial. Em função da possibilidade de aumento da fusão do metal de adição, torna-se possível também o aumento da velocidade de soldagem. Além desta característica, relacionada com a quantidade de material depositado, outro diferencial diz respeito ao *design* da tocha. O projeto é mais compacto que o tradicional, conforme mostrado na Figura 6. Assim, permite que o arame seja alimentado através do bocal, facilitando também a utilização em geometrias complexas ou até mesmo com restrição de espaço.

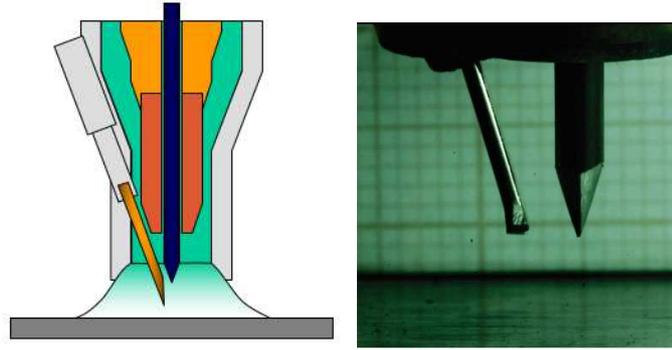


Figura 6 – Design da tocha TOPTIG. Adaptado de [17].

A possibilidade de aplicação deste tipo de configuração, bem como a alimentação dinâmica na soldagem interna de tubos cladeados é real visto que o Laboratório de Soldagem e Mecatrônica-LABSOLDA é formado por equipes interdisciplinares.

2.5 Temas associados à soldagem orbital de tubos cladeados

Recentemente na construção de novos campos para exploração de petróleo no pré-sal a Petrobrás enfrentou problemas relacionados com a soldagem e inspeção de juntas em tubos revestidos [18]. Sendo assim, a fim de explorar os benefícios dos aços de alta resistência revestidos com ligas resistentes à corrosão, vários desafios técnicos devem ser abordados. Quando a instalação e o lançamento são feitos pelo método *reel-lay*, as dificuldades são ainda maiores [18]. Neste tópico serão apresentadas as principais características e problemas existentes na soldagem de *clad pipes* para a aplicação em águas profundas.

2.5.1 Método Reel-lay

Um dos mais eficientes métodos de instalação para tubulações *offshore* é o *reel-lay*. Neste método uma seção do *pipeline* é enrolada em um carretel com aproximadamente 16 m de diâmetro. Após o bobinamento da tubulação, o navio viaja até o local para instalação onde começa o desbobinamento e a fixação no fundo do mar [19]. Toda a linha de soldagem e de fabricação dos *pipelines*, em inglês chamada de *spoolbase*, fica em terra firme [20]. Assim, a realização do processo de fabricação dos *pipelines* é feita *onshore*, e tanto o tempo de instalação como a redução de custos globais do projeto se tornam vantajosos para o aumento da produtividade. Porém, devido às deformações plásticas impostas sobre os tubos no momento de bobinamento e desbobinamento este método está limitado a diâmetros de até 16”, sendo que o nível de deformação é proporcional ao diâmetro do tubo [20]. A Figura 7 mostra uma embarcação aplicada para reel-lay, bem como um esquema do lançamento de *pipelines offshore*.

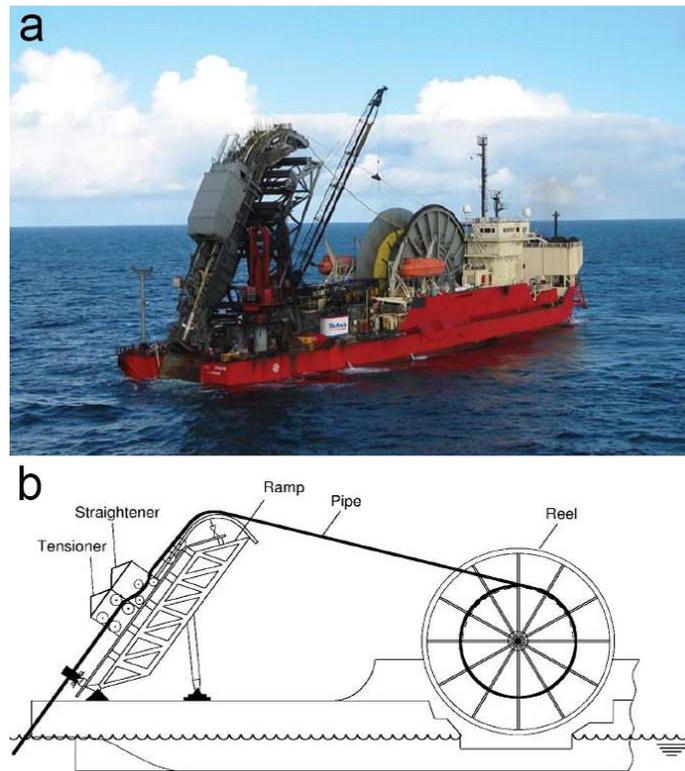


Figura 7. Em a) Embarcação *Technip's Apache* para instalação *reel-lay*. b) Esquemático do lançamento de *pipelines* [19].

A Figura 8 mostra um gráfico tensão (M) por deformação (k), bem como um esquema do ciclo que o *pipeline* percorre durante o processo de bobinamento e desbobinamento no carretel. Primeiramente a tubulação é deformada durante o enrolamento, atingindo k_1 (região 0-1). Durante o desenrolamento o tubo endireita (região 1-2), porém curva novamente, região indicada na Figura 7 como *ramp*, esse ponto é indicado no ciclo como k_3 . Descendo pelo *ramp* o tubo é endireitado novamente (região 3-4), e finalmente é dobrado reversamente (região 4-5) de modo que a tubulação fique isenta de curvatura retornando ao ponto zero, quando lançada ao mar.

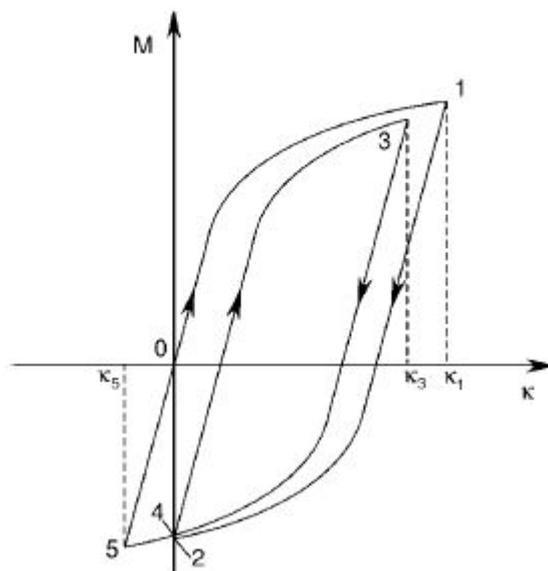


Figura 8. Ciclo de deformações método *reel-lay* [19].

Esse ciclo repetitivo no regime plástico causa deformações geométricas que deixam o tubo ovalizado. E causa também, um alongamento permanente, que pode influenciar no surgimento de defeitos na região soldada, local mais crítico e susceptível à falhas. A situação é mais grave para uma união dissimilar, como em tubos cladeados. A seguir será apresentado o método de soldagem comumente utilizado para união de *pipelines* revestidas.

2.5.2 Processo de soldagem orbital aplicado a tubos cladeados

Após introduzir o leitor ao processo TIG e suas variantes, além dos problemas enfrentados no método *reel-lay* para lançamento de tubos, neste tópico será mostrado mais precisamente o processo de soldagem orbital e suas características de funcionamento aplicado à união de tubos cladeados. A soldagem orbital caracteriza-se pelo movimento da tocha em torno da peça, de forma que o arco está em constante movimento e a peça parada, fazendo um movimento de 360° em torno da mesma [21]. Os processos TIG e MIG são os mais aplicados na soldagem orbital de peças fabricadas com materiais nobres como ligas duplex, e demais aços inoxidáveis, além das ligas de níquel [10].

A soldagem orbital é geralmente a parte mais crítica das etapas de fabricação de uma tubulação, sob responsabilidade de se obter as propriedades mecânicas necessárias e resistência à corrosão adequada [22]. Na realização da união de tubos de aço C-Mn revestidos com CRA, é aplicado o procedimento de soldagem orbital, sendo o passe de raiz realizado pelo processo MIG com curto circuito controlado, ou pelo processo TIG. Onde o restante da junta é normalmente preenchida ou por MIG com corrente pulsada ou TIG *hot wire*, os quais

permitem a utilização de maior velocidade de alimentação e conseqüentemente maior velocidade de soldagem [23]. Tanto o passe de raiz quanto o enchimento da junta são normalmente realizado de forma externa ao tubo. Deste modo, torna-se inviável a utilização de metal de adição de aço carbono, sob o risco de fragilização da junta, sendo obrigatório o preenchimento total utilizando-se metal de adição compatível com a CRA presente na peça, no caso do inonel 625 normalmente utiliza-se o ER NiCrMo-3 [24]. O passe de raiz necessita da utilização de gás de purga, para evitar a oxidação do mesmo (geralmente utilizado Argônio ou Nitrogênio). A Figura 9a, mostra o exemplo de um tubo cladeado sendo soldado pelos processos de soldagem CMT (*Cold Metal Transfer*) para o passe de raiz, e o MIG pulsado para enchimento da junta. Em 9b, uma macrografia de união dissimilar de um tubo de aço C-Mn cladeado com inonel.

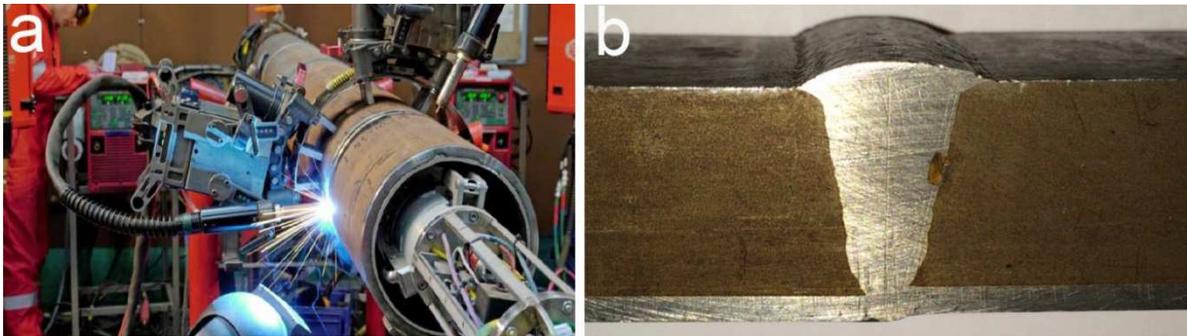


Figura 9. Em a) Soldagem pelo processo MIG orbital em tubo cladeado. b) Macrografia de junta dissimilar aço C-Mn e Inconel 625 [24,25].

Essa abordagem, é a normalmente utilizada na soldagem de união de tubos revestidos, sob risco da existência de alguns problemas de ordem metalúrgica e diferentes propriedades mecânicas da junta, por tratar-se de uma união dissimilar, que podem comprometer a integridade da solda.

2.5.3 Problemas com Overmatching

Geralmente, os aços API de alta resistência como, por exemplo, o X65, X70 e o X80, exibem uma soldabilidade menos favorável. É mais difícil a obtenção das propriedades mecânicas e da condição de *overmatching* para a aplicação do método *reel-lay*, quando aplicada à abordagem convencional do procedimento de soldagem da junta, conforme explanado anteriormente [18]. Durante o bobinamento, o encruamento do inonel resulta em *overmatching*, para deformações plásticas cumulativas acima de 2%. Com o aumento do grau do aço (aumento do escoamento), esse *overmatching* ocorre apenas nos primeiros ciclos de bobinamento, onde o encruamento é maior, sendo que as juntas ao final do carretel ficam com

a condição de *undermatching*. O inonel não atinge a deformação plástica necessária para que o encruamento aumente sua resistência, fazendo com que a sua curva tensão-deformação não ultrapasse a do substrato [24]. A Figura 10, mostra a curva tensão-deformação de dois metais de solda (1 e 2) e de um substrato (3). De acordo com o gráfico, a condição de *overmatching* é alcançada diante de três requisitos. Quando o limite de escoamento do metal de solda ($\sigma_{YS, WM}$) é maior que o metal base ($\sigma_{YS, PM}$). Quando a tensão última de tração do metal de solda ($\sigma_{UTS, WM}$) é 1,15 vezes maior que a do metal base ($\sigma_{UTS, PM}$). Ou ainda, quando a deformação última do metal de solda ($\epsilon_{UTS, WM}$) é maior que a do metal base ($\epsilon_{UTS, PM}$).

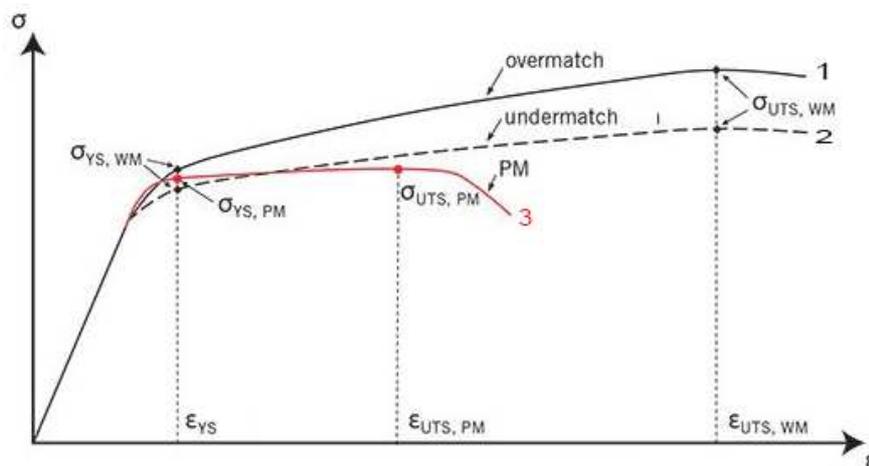


Figura 10. Definição da condição de overmatching pela curva tensão-deformação. Adaptada de [22].

2.5.4 Procedimento de soldagem alternativo para juntas dissimilares

Até pouco tempo atrás, a única abordagem utilizada para de união de tubulações revestidas era pelo método de soldagem orbital externa com metal de adição compatível à CRA presente no tubo, conforme reportado em alguns trabalhos, era impraticável aplicar uma solda circunferencial interna, semelhante à utilizada no selamento longitudinal de chapas revestidas para a fabricação de tubos [22].

Recentemente sugeriram métodos alternativos para a união de tubos cladeados a fim de solucionar os problemas relativos á união dissimilar. Esta abordagem consiste em realizar uma soldagem orbital interna da CRA, atenuando a necessidade da soldagem dissimilar na junta toda e possibilitando a utilização de aço carbono como metal de adição, sem comprometer a resistência à corrosão do tubo. Isto proporciona deformações equilibradas na junta quando aplicado o método *reel-lay* [24]. As etapas utilizadas pelo instituto SubSea7 [24] para realização deste procedimento segue de acordo com a Figura 11.

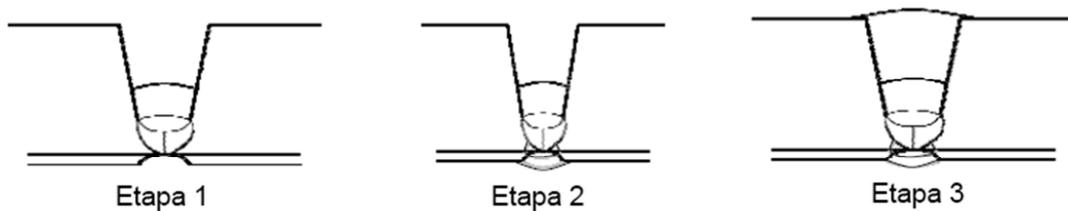


Figura 11. Etapas da soldagem de união em tubos revestidos, utilizando-se orbital externo e interno [24].

Mediante uma avaliação mecânica com ensaios de tração, impacto (Charpy), microdureza e ultrassom das juntas soldadas com este procedimento, foi possível verificar suas principais vantagens, descritas abaixo.

- O aumento da resistência do metal de solda pelo uso de metal de adição de aço C-Mn [24].
- Menor incerteza durante a inspeção por ultrassom da junta, por eliminar grande parte da soldagem dissimilar [24].
- Atenuação do risco de ZPD (Zonas Parcialmente Diluídas) na linha de fusão, as quais podem ser associadas às propriedades mecânicas inadequadas, com tendência a formação de trincas [24].
- Perfil da raiz mais uniforme, menos convexo, atenuando a concentração de tensões [24].
- Redução dos custos devido à menor quantidade de CRA depositada na junta, quando comparado ao processo comumente utilizado [24].
- Eliminação da utilização de gás de purga para as soldas realizadas com CRA [18].
- Maiores chances de fusão total da raiz, visto que o passe interno pode refundir possíveis defeitos ocorridos pela soldagem externa [18].

A Figura 12 apresenta a macrografia de uma junta soldada pelo procedimento descrito acima, bem como um cabeçote de soldagem orbital interna em uma junta formada por um tubo de aço C-Mn classe X80, revestido internamente com inconel 625.

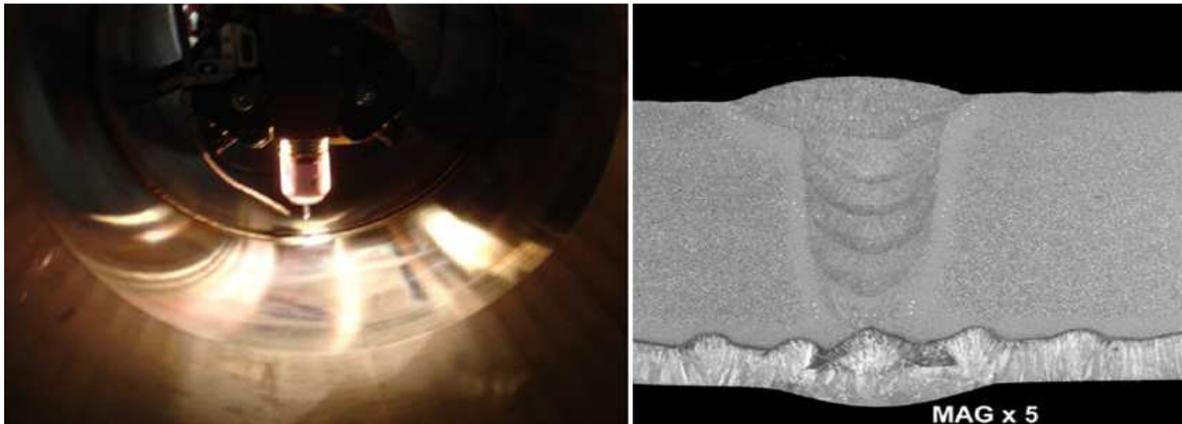


Figura 12. Em a) Cabeçote de soldagem interna em tubo. b) Macrografia de junta soldada internamente com o processo TIG [24].

O conceito utilizado para realização da soldagem externa e interna discutido nesta seção assemelha-se muito da configuração de junta utilizada para a soldagem de costura ou selamento longitudinal em chapas revestidas, as quais são conformadas mecanicamente para formarem um tubo, conforme abordado no tópico sobre fabricação dos tubos cladeados metalurgicamente. A Figura 13 mostra em detalhe o tipo de junta frequentemente utilizado para a soldagem longitudinal na fabricação de tubos, onde 1 simboliza a raiz, 2 o passe externo e 3 o passe interno.

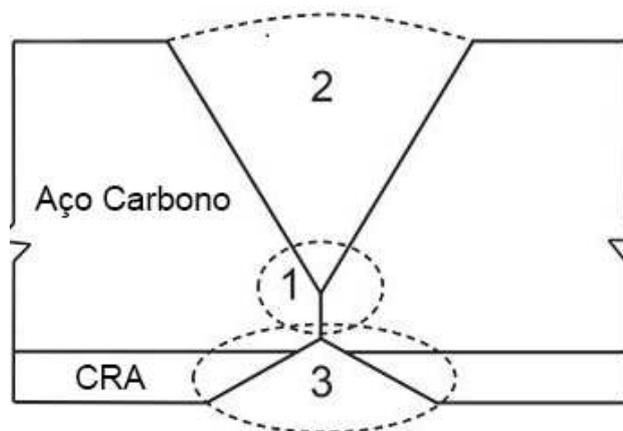


Figura 13. Junta duplo “V” utilizada em solda longitudinal na fabricação de tubos [18].

2.5.5 Problemas na inspeção de tubos cladeados

Para avaliação de soldas orbitais em tubulações, é utilizado geralmente o método por ultrassom em sua configuração automática (*Automated Ultrasonic Test - AUT*). Porém, devido à presença de dois tipos de materiais numa junta de tubos cladeados, ocorre a mudança na velocidade de propagação do som, tornando difícil e muitas vezes duvidosa a inspeção.

Isso decorre do fato que os consumíveis a base de níquel são mais densos e tem grãos mais grosseiros que o aço carbono do substrato [18]. Essa dificuldade na realização do ensaio por ultrassom torna a taxa de reparos de soldas em tubos cladeados muito alta quando comparada a *pipelines* fabricados com união de materiais similares. A norma DNV OS F101 para fabricação e construção de *pipelines*, exige a realização de inspeção por ultrassom em todas as juntas de tubulações expostas à deformações maiores que 0,4% durante a construção ou em serviço [26]. A Figura 14 mostra um procedimento de inspeção por AUT.



Figura 14. Equipamento AUT para inspeção em campo [27].

Com a soldagem externa e interna, a inspeção da raiz da solda pode ser realizada previamente, antes da realização do passe interno, tornando a avaliação por ultrassom menos propícia a dúvidas e erros, visto que a raiz é composta de uma união de aço com aço.

2.6 Soldagem de materiais dissimilares

Na soldagem é frequente a utilização de juntas fabricadas por materiais de composição química e propriedades mecânicas diferentes daquelas presentes no metal de base, esse tipo de processo é conhecido como soldagem dissimilar [28]. Com isso, pode haver problemas com alta diluição além da possibilidade de causar micro e macrosegregação ao longo da linha de fusão, as quais podem prejudicar a qualidade da solda e fazer com que o componente venha a falhar antes do término do seu ciclo de vida. As transformações metalúrgicas também causam tensões internas, provocadas pela migração de carbono e precipitação de fases nos contornos de grão [29]. Além disso, ocorre também a presença de tensões térmicas devido a diferentes coeficientes de dilatação do material da junta.

Há uma grande preocupação com as chamadas zonas parcialmente diluídas (ZPD), as quais são pequenas áreas formadas na interface entre o metal de solda e o metal base. Estas regiões podem ter durezas acima de 400HV, valores típicos de estruturas martensíticas, diminuindo assim a resistência à corrosão sob tensão e perda da tenacidade localizada [30].

Em trabalho realizado por Knapp [31] é possível ver o comportamento de uma união dissimilar entre aço carbono e inonel, quando submetida a um ensaio de tração. Com o início do ensaio, o corpo de prova começa a deformar e atinge o limite elástico primeiramente na solda, onde possui alto teor de inonel, porém devido ao maior coeficiente de encruamento desta região, o aumento da resistência é muito maior que no aço carbono. Isso faz sua tensão máxima de tração aumentar e ultrapassar a do metal de base (aço carbono), por fim o corpo de prova rompe no aço. A Figura 15 mostra os corpos de prova do ensaio feito por [31].

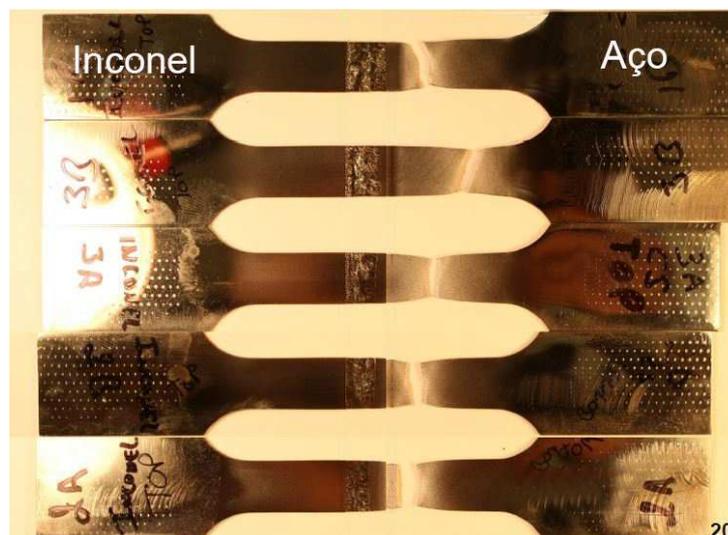


Figura 15. Ensaio de tração em junta dissimilar aço-inconel [31].

Esse comportamento pode ser analogamente comparado com as deformações impostas no método *reel-lay* onde a condição de *overmatching* do metal de solda só é atingido após o ciclo de deformações, porém para aços como o X70 e X80 que possuem a sua resistência mecânica muito alta o inonel não consegue ultrapassá-la, pois o ciclo de deformações não é grande o suficiente para gerar o encruamento necessário.

2.6.1 Diluição em juntas dissimilares

A diluição pode ser definida como a razão entre área de material base que é fundida, e a área total de metal fundido, geralmente é dada em percentual, sendo que seu valor pode

variar de 5% a 100% em uma soldagem autógena, dependendo dos parâmetros elétricos e geométricos [30].

No que tange à aplicação proposta neste trabalho, é de grande valia a busca pela condição de baixa diluição do metal de adição (inconel 625) no metal base (tubo de aço C-Mn). Portanto alguns fatores devem ser levados em consideração já que o aço possui alto teor de Fe, vindo a comprometer a resistência à corrosão da liga á base de níquel. Portanto os consumíveis de soldagem devem ser selecionados levando em consideração a redução dos elementos de liga e a redução na resistência à corrosão da junta devido à diluição de ferro provido pelo metal base ou substrato [26].

Em pesquisa realizada na soldagem dissimilar de tubo X60 com inconel 625, verificou-se que a diluição aumenta com o aumento da corrente, o que também aumenta a formação das ZPD, assim a redução da corrente de soldagem reduz a formação dessas regiões, porém aumenta a dureza na ZAC (Zona Afetada pelo Calor) em decorrência da taxa de resfriamento [30].

3 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é a realização da soldagem circunferencial interna em tubos de aço C-Mn cladeados com inconel 625 para a produção de *risers* rígidos, os quais serão lançados pelo método *reel-lay*.

3.1 Objetivos específicos

- Avaliação das variantes do processo TIG alimentado com o intuito de identificar o mais indicado para a aplicação, a fim de obter uma solda de qualidade de acordo com as especificações em normas técnicas de soldagem em *pipelines*.
- Realizar um procedimento de soldagem interna semelhante ao utilizado em soldagem longitudinal de costura de tubos, equalizando as propriedades mecânicas da junta.
- Utilizar um sistema automatizado de soldagem circunferencial, sendo necessária a criação de adaptações e equipamentos para auxiliar na fixação do dispositivo no interior do tubo, além de possíveis incrementos no mesmo para a aplicação do processo TIG com alimentação tangencial ou dinâmica.
- Caracterizar o processo de soldagem para o desenvolvimento de tecnologias nacionais destinadas à união de tubos cladeados.

4 Aparato experimental

Para a realização dos ensaios referentes à dissertação de mestrado, serão utilizadas as instalações e equipamentos disponíveis no Laboratório de Soldagem e Mecatrônica-LABSOLDA.

4.1 Serra de tubos

A preparação dos corpos de prova em tubos será feita com uma serra pneumática da marca E.H.Wachs, modelo Super D, e capacidade para cortar tubos de 2” a 32”. Este equipamento é muito utilizado por empresas de petróleo e gás devido à sua praticidade e facilidade de operação, pois pode ser aplicada para cortar *pipelines* em operação. Um exemplo de aplicação da serra é mostrado na Figura 16.



Figura 16. Serra de tubos Super D.

4.2 Fonte de soldagem e cabeçote orbital Arc Machines

Para realização das soldas internas em tubos, será utilizada uma fonte de soldagem TIG modelo 227, fabricada pela empresa norte-americana Arc-Machines. Esta fonte permite atuar com corrente contínua constante ou corrente pulsada, além de uma modalidade chamada de syncro pulse, o qual sincroniza o movimento de tecimento com os pulsos de corrente. Também é equipada com controle AVC (*Arc Voltage Control*) e opção de abertura do arco por curto circuito ou alta frequência. A fonte 227 trabalha em conjunto com um cabeçote de soldagem orbital externo e interno, modelo M81 da mesma fabricante. O conjunto fonte-cabeçote é mostrado na Figura 17.

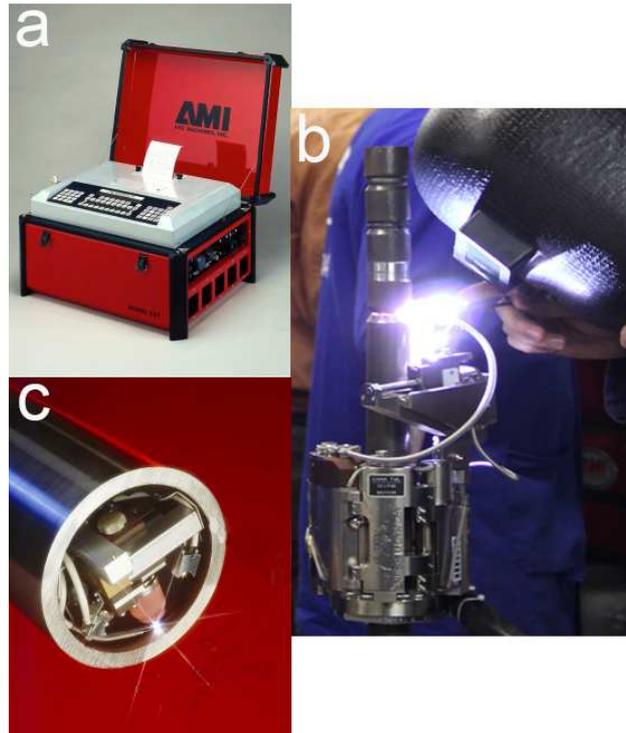


Figura 17. Equipamento Arc Machines. Em a) Fonte de soldagem modelo 227. b) Cabeçote configuração externa. c) Cabeçote configuração interna.

4.3 Videoscópio

Para a inspeção interna das soldas será utilizado um videoscópio modelo Mentor IQ, da marca GE (*General Eletric*), mostrado na Figura 18. Este equipamento possui ponteiros de medição estéreo e medição 3D com diâmetros de 6 mm, ideais para inspeção em locais de difícil acesso. Com a medição 3D é possível uma análise precisa e com grande qualidade de imagem, identificando possíveis defeitos como falta de fusão, porosidade e mordeduras no cordão. Após a identificação de um defeito é possível quantificá-lo por meio de medições.



Figura 18. Videoscópio para inspeção de superfícies em locais de difícil acesso.

4.4 Câmera para posicionamento e acompanhamento durante a soldagem

Por se tratar de um local de difícil acesso, a soldagem interna necessita de equipamentos que possibilitem ao operador de soldagem visualizar ou identificar o local de realização da solda. Para este trabalho foi adquirida uma câmera da marca XIRIS, modelo XVC 1000, que permite o acompanhamento do início ao fim da soldagem. Este equipamento deve ser acoplado ao cabeçote orbital de forma que seja possível posicionar a tocha centralizada com o chanfro interno.



Figura 19. Câmera para acompanhamento da soldagem interna.

5 Cronograma das atividades

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, primeiramente será estudado o comportamento do processo TIG em diferentes posições de soldagem. Isto significa realizar uma parametrização das variáveis elétricas e geométricas do processo a fim de obter o controle da poça de fusão em todas as posições de soldagem, tendo como referência os trabalhos acadêmicos já realizados em soldagem orbital.

Os ensaios iniciais serão realizados em chapa de aço carbono, a fim de atenuar o desperdício de tubos em testes mal sucedidos. Sendo assim, as chapas serão preparadas de forma a simular a junta existente no tubo, esta etapa também servirá para identificação e escolha das variáveis geométricas da junta, como ângulo, “nariz”, tipo de chanfro, entre outros. Para tornar o processo de caracterização mais próximo da junta real, existe a possibilidade de revestir as chapas de aço carbono com inonel 625, pelo processo PTA-P (*Plasma Transferred Arc with Powder*), obtendo-se uma camada de 3mm conforme a encontrada em tubos cladeados. A Figura 20 abaixo demonstra um esquema da soldagem de chapas de modo a simular o procedimento orbital em tubo.

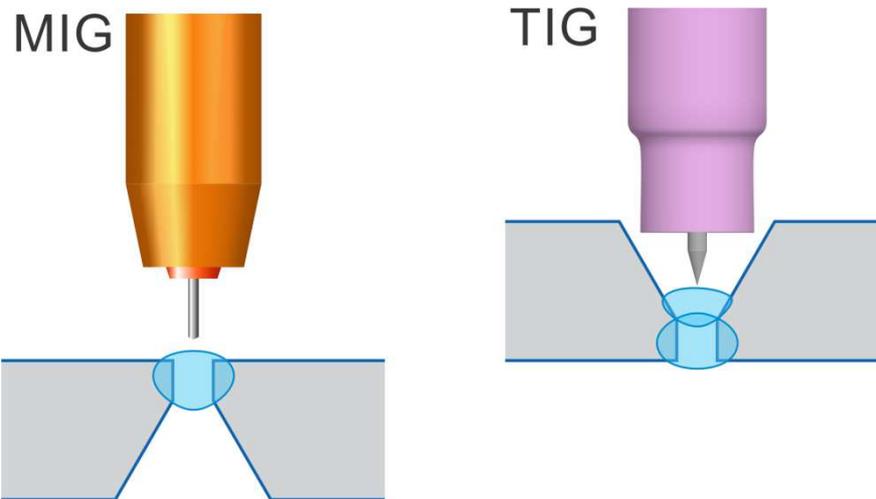


Figura 20. Esquema do procedimento de soldagem bilateral em chapas.

A configuração de solda bilateral tem duas etapas. De um lado, a soldagem com o processo MIG para simular o passe de raiz externo, e depois a chapa é virada e então o processo TIG é utilizado. Com isso é possível utilizar uma bancada de ensaios e posicionar a chapa em diferentes posições de soldagem para imitar os quadrantes da soldagem orbital.

Após o entendimento do processo, será utilizado o cabeçote de soldagem orbital interna, e os parâmetros obtidos nas diferentes posições com chapas serão aplicados no processo em 360° do tubo, considerando as zonas de transição das posições de soldagem no orbital, pressupõe-se a necessidade de pequenos ajustes nas variáveis iniciais.

Atividades:

1. Estudo e análise das diferentes variantes do TIG para a aplicação.
2. Preparação do equipamento e montagem de bancada para testes.
3. Ensaio e parametrização preliminar com chapa de aço carbono, avaliando nas 4 principais posições de soldagem para orbital (plana, vertical descendente, vertical ascendente e sobre cabeça), nesta etapa é possível identificar as limitações do processo TIG convencional onde talvez seja necessário à utilização de alguma variante do mesmo.
4. Ensaio em chapas revestidas com inonel.
5. Soldagem interna em tubo cladeado, utilizando cabeçote orbital, e aplicando os parâmetros levantados inicialmente. Nesta etapa talvez seja necessária à criação de dispositivos que auxiliem na fixação e soldagem com o cabeçote.
6. Análise dos resultados e validação do procedimento por meio de ensaios não destrutivos.

7. Elaborar a dissertação.
8. Defesa da dissertação.

Tabela 3. Cronograma de atividades.

Atividade	2016		2017										2018				
	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	
7																	
8																	

6 Previsão financeira

Para fins de visualização dos gastos envolvidos no presente trabalho, foi realizada a estimativa financeira da Tabela 4, abordando os equipamentos adquiridos pelo LABSOLDA e consumíveis necessários no decorrer do trabalho.

Tabela 4. Previsão financeira.

Ítem	Preço
Fonte de soldagem e cabeçote orbital	R\$ 400.000,00
Serra de tubos	R\$ 120.000,00
Videoscópico	R\$ 200.000,00
Câmera para posicionamento interno	R\$ 34.000,00
Consumíveis para soldagem	R\$ 10.000,00
Implementações em equipamentos	R\$ 5.000,00
Serviços de usinagem	R\$ 5.000,00
Consumíveis para metalografia	R\$ 2.000,00
Corpos de prova	R\$ 5.000,00
TOTAL	R\$ 781.000,00

7 Referência Bibliográfica

[1] NETO, F.A.S. *Avaliação de revestimentos com ligas de níquel aplicados por soldagem em tubulações para o setor de petróleo e gás*. Campina Grande. 2010. 151 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande.

[2] Butting Clad Pipes. Disponível em: <http://www.butting.com/fileadmin/daten/redakteure/Download/EN/Prospekte_EN/BUTTIN_G_Clad_pipes.pdf>. Acesso em Outubro de 2016

[3] FRYER, M. *Development of UOE clad pipe*. Pipeline Technology Conference, 16th, april, 2007, Hanover, Germany.

- [4] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE – Specification for Line Pipe 5L. – API 1104, Washington, April, 1995, 25p.
- [5] Pipesystem Artigos técnicos. Disponível em: <http://www.pipesystem.com.br/Artigos_Tecnicos/Tubos_Aco/Quimica_Tubos/quimica_tubos.html>. Acesso em outubro de 2016.
- [6] MANKINS, W.L; LAMB, S. Nickel and nickel alloys, ASM Handbook. vol 2; Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials, 1990.
- [7] LIPPOLD, J.C.; KISER, S.D.; DUPONT J.N. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. 2011: John Wiley & Sons.
- [8] RAMIREZ, A. J., and J. C. LIPPOLD. *High temperature behavior of Ni-base weld metal: Part I. Ductility and microstructural characterization*. Materials Science and Engineering: A 380.1 (2004): 259-271.
- [9] GERKEN, J.M. Gas Tungsten Arc Welding. James F. Lincoln Arc Welding Foundation. 42 p.
- [10] PIGOZZO, I.O. *Soldagem TIG orbital: otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe de raiz*. Florianópolis. 2014. 118p. Dissertação de Mestrado – Depto. Eng. Mecânica - UFSC.
- [11] POLYSOUDE. *The Orbital Welding Handbook*. 2009.
- [12] MIRANDA, E.C.; SILVA, C.C.; MOTTA, M.F.; MIRANDA, H.C.; FARIAS, J.P. *Avaliação do uso do tecimento sobre o nível de diluição e geometria do cordão de solda na soldagem TIG com alimentação automática de arame frio*. Soldagem e Inspeção. 2015. p 180-190, vol 20.
- [13] SHINOZAKI, K.; YAMAMOTO, M.; NAGAMISTSU Y.; USHIDA, T.; MITSUHATA, K.; NAGASHIMA, T.; KANAZAWA, T.; ARASHIM, H. *Melting phenomenon during ultra-highspeed GTA welding method using pulse-heated hot-wire*. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 2009, v. 27, p. 22s-26s.
- [14] EWM TIG SPEED. Disponível em: <<https://www.ewm-group.com/en/innovationen/tig/tigspeed.html>>. Acesso em outubro de 2016.
- [15] WILSON, M. *TIP TIG: new technology for welding*. Industrial Robot: An International Journal, 2007, v. 34. P. 462-466.
- [16] VERGARA DÍAZ, V., J.M. Cortes, and A. Espinosa Alvarez, A Contribution to the Study of Cold Wire TIG Process in Flat, Vertical and Overhead Positions under New Torch Designs and Wire Feed Methodologies. *Soldagem & Inspeção*, 2015. 20(3): p. 275-286.
- [17] TOP TIG Air Liquide. Disponível em: <http://www.airliquidewelding.com/file/otherelement/pj/w000260373_44403.pdf>. Acesso em outubro de 2016.
- [18] ZAMPANO, P.; ZANON, G.; GARMBIS, A.G. *Challenges about testing and NDT of CRA pipelines in brazilian pre-salt*. Proceedings of the 31st International Conference on Ocean, Offshore and Artic. 10-15 July. 2012, Rio de Janeiro, Brazil.
- [19] KYRIAKIDES, S.; CORONA, E. *Mechanics of offshore pipelines, volume 1: buckling and collapse*, 1 ed. Elsevier BV, 2007, 415p.
- [20] SOUZA, D.M.B.P. *Análise dos métodos de lançamentos de dutos rígidos para diferentes profundidades*. Rio de Janeiro. 2006. 54p. Trabalho de Conclusão de Curso – Depto. Engenharia Naval – Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [21] LUKKARI, J. Orbital TIG - A Great Way to Join Pipes. *The ESAB Welding and Cutting Journal*. 1, 2006, Vol. 60, pp. 3-6.
- [22] TKACZYK, T.; BRISAC, G.; RAI, J.K.; TECHNIP, A.M. *Weld toughness study advances reeled clad pipes deepwater potential*. Oil e gas journal online. 5 de abril de 2015. p 56.

- [23] RAGHUNATHAN, S.; HARVEY, D. *Improve Welding Inspection and Integrity of clad pipeline girth welds*. TWI project outline. Setember 2007.
- [24] JONES, R.; PEPE, N.; BARRITE, G.; TOGUYENI.; MAIR, J.; SCHMIDT, T.; BANSE, J. *High strength carbon steel and CRA lined pipe for reel-lay installation*. Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA. 6-9 May 2013.
- [25] Dual Matrix Arrays for Ultrasonic Inspection. Disponível em: < <http://www.olympus-ims.com/en/applications/dual-matrix-array-for-ultrasonic-inspection>>. Acessado em outubro de 2016.
- [26] Offshore standard. DNV OS F101– Submarine Pipeline Systems.
- [27] GHAEMI, M. Codes for Automatic Ultrasonic Testing (AUT) of pipeline Girth Welds. ECDT 2014, Tehran, Iran. December 2014.
- [28] WELDING HANDBOOK – MATERIALS AND APLICATIONS – PART 1. v.3 – 8th edition. American Welding Society. Miami, Fl. 1998. (p. 218-288).
- [29] KOU, S.; YANG Y. K. *Fusion-Boundary Macrosegregation in Dissimilar-Filler Welds. Fundamental solidification and macrosegregation in welds made with filler metals different in composition from the workpiece are presented*. Welding journal, v. 86. Oct. 2007. (p. 303-312).
- [30] KEJELIN, N.Z.; BUSCHINELLI, A.J.A.; BOHÓRQUEZ, C.E.N. *Soldagem Dissimilar do Aço X-60 com Inconel 625*. 2007. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/noticias/2007/soldagem_dissimilar.pdf>. Acessado em outubro de 2016.
- [31] KNAPP, S. *Dissimilar Metal Welds: Inconel to carbon Steel*. Welding Presentation. University of Ottawa. Dept. Mechanical Engineering. Canadá, 2012. Disponível em: < <http://www.weck.ca/MSS/ppts/21september2012.pdf>>. Acessado em outubro de 2016.