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

PROJETO DE DISSERTAÇÃO

Uma Mudança de Paradigma na Soldagem de Tubos de Grande Diâmetro e Espessura

Rafael Costa Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra
Co-orientador: Prof. Dr. Régis Henrique Gonçalves e Silva

Florianópolis, Novembro de 2015

Sumário

1. INTRODUÇÃO 3

2. OBJETIVOS 5

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 7

3.1. Soldagem manual de tubos 7

3.2. Soldagem orbital mecanizada 8

3.3. Fontes de Soldagem 11

3.3.1. Arames Tubulares *versus* Arames Maciços 12

3.4. Curto-circuito convencional 12

3.5. Corrente Pulsada 14

3.6. Curto-circuito Controlado 15

3.7. Pulsado Térmico 16

4. APARATO EXPERIMENTAL 18

4.1. Bancada de Soldagem 18

5. METODOLOGIA E CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES 20

5.1. Resultados 21

6. PREVISÃO FINANCEIRA 23

7. BIBLIOGRAFIAS 24

1. INTRODUÇÃO

A soldagem orbital de tubulações de grande diâmetro e grandes espessuras de parede é um tema abordado sob muitas distintas facetas. Sua problemática vem desde a concepção de como será executado o passe de raiz, passando pela definição da forma geométrica da junta, chegando a nada fácil decisão de qual processo utilizar ou qual versão de um determinado processo. No tocante ao passe de raiz, a questão que é colocada primordialmente diz respeito à utilização ou não de anteparo (backing) no verso da solda. Se for possível a utilização do anteparo, o que é realizado pela utilização de acopladeiras internas, a raiz pode ser executada com maior rapidez e segurança de penetração pela utilização do processo MIG/MAG. Todavia, neste caso, é discutida ainda com destacada veemência a inclusão de cobre na solda, já que os anteparos são fabricados normalmente de cobre [7]. Se por questões de especificações técnicas e isto depende de caso para caso e de país para país, os anteparos não puderem ser utilizados, então restam as seguintes possibilidades: a utilização de versões de processos MIG/MAG com as modernas técnicas de controle da transferência metálica, a utilização do processo TIG ou a utilização do processo a eletrodo revestido. Nos dois primeiros casos é possível a utilização dos sistemas orbitais, mas com todos os riscos de falhas de fusão devido a grande sensibilidade deste passe de solda, pois a ausência da atuação de um soldador com sua sensibilidade inerente propicia este tipo de falhas. Por isso, é recorrente a execução deste passe de solda de forma manual, ainda que o preenchimento final da junta seja executado automaticamente pelos sistemas orbitais. A utilização do processo eletrodo revestido com eletrodos celulósicos para o passe de raiz continua ainda sendo uma solução altamente utilizada, mesmo em países avançados e até novos desenvolvimentos de eletrodos para tal continuam em voga. Uma diferença fundamental que resulta quando o passe de raiz é executado de forma manual ou automaticamente está na abertura da raiz. Normalmente o soldador trabalha com afastamento bem maior do que é necessário para uma operação manual e isto implica na necessidade de maior quantidade de material de adição para o preenchimento da junta. Por exemplo, para uma espessura de parede de tubo de 19 mm, uma operação automatizada requer entre 1,5 e 3,0 mm de afastamento entre os tubos e um soldador trabalha com cerca de 6,0 mm de afastamento. Na referida espessura, isto implica em cerca de 20 % a mais de material de adição, resultando em um acréscimo de tempo de soldagem. Este é um dado importante para ser considerado em termos de produtividade.

Na execução dos passes de enchimento há discussões estabelecidas sobre várias questões. Entre elas está a utilização de arames maciços ou de arames tubulares em que são discutidos aspectos ligados à produtividade, aos custos, à quantidade de defeitos e às características mecânicas. Existem várias vertentes de opiniões, mas quase todas sem fundamentação teórica e sem dados práticos levantados. Isto acaba conduzindo à formação do que se denomina de escolas de opiniões; americanos são favoráveis à utilização de eletrodos tubulares e europeus à utilização de arames maciços. Um fato irrefutável que está por traz disto é o interesse econômico ou a decisão de investimento em fontes de energia de soldagem mais apropriadas, por exemplo, ao caso dos eletrodos maciços, já que suas propriedades influem muito mais sobre os eletrodos maciços do que sobre os eletrodos tubulares. Em relação a este ponto que surgem especificações também sem fundamentações científicas e técnicas em que são prescritas, por exemplo, MIG/MAG pulsado e vetando a utilização do MIG/MAG por curto-circuito. Neste caso, a razão alegada é de que o curto-circuito produz falhas de fusão, já que a potência é menor do que no pulsado. Acontece que esta especificação de utilização do pulsado pode ter tido como origem a soldagem com juntas extremamente fechadas, na tendência a um *narrow gap* (normalmente com preparação em "U"). Neste tipo de junta a ancoragem da poça de fusão é razoavelmente mais facilitada porque os flancos estão mais próximos, o que é muito diferente do que acontece em juntas muito abertas (normalmente com preparação em "V"). Neste caso, a poça de fusão não encontra ancoragem suficiente e limita em muito uma adequada liberdade de seleção de uma velocidade de soldagem que propicie uma solda com adequada sanidade.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva primordialmente uma solução pragmática, embasada no estado atual de soldagem de tubulações que vem sendo realizado no estaleiro para construções de módulos para FPSO. É uma situação totalmente manual, tanto do passe de raiz, como dos passes de enchimento, todos realizados com eletrodos revestidos. De análises rápidas realizadas, a produtividade é extremamente baixa com uma expectativa de aumento de dez vezes se a metodologia de soldagem for aplicada com sistemas orbitais. Entretanto, embora no cenário mundial não haja dúvidas que os sistemas orbitais são ferramentas revolucionárias para o aumento da produtividade com a qualidade necessária, a mudança do *modus operandi* de uma empresa não se dá de maneira fácil e para se conseguir este intento, são necessárias provas cabais sob diferentes ângulos de visão. Os ensaios para aprovação de uma nova tecnologia acabam sendo mais rigorosos do que os aplicados nos processos já estabelecidos porque há sempre uma grande resistência a mudanças.

Neste trabalho não se propõe a automatização do passe de raiz. Este deverá ser executado manualmente sob duas diferentes formas. Uma delas é como está sendo executada atualmente no citado estaleiro, ou seja, por eletrodo revestido. A segunda maneira será realizada no LABSOLDA com a utilização do Curto Circuito Controlado (CCC). A grande diferença entre as duas situações deverá estar na abertura da junta, que certamente será bem menor quando a raiz for executada pelo CCC, antevendo-se, neste caso uma maior produtividade.

No caso da raiz já executada pela empresa, duas situações cabais serão testadas; uma com arame maciço e outra com arame tubular. A primeira situação (com arame maciço) terá duas versões; uma com MIG/MAG convencional e outra com o CCC. A ideia desta dupla verificação é porque o CCC se aproxima mais de uma interpretação de transferência pulsada e, possivelmente, terá uma potência levemente superior ao curto circuito convencional.

No caso da raiz ser executada no LABSOLDA, denotando-se aí uma mudança mais impactante do que é realizado atualmente, ela será executada pelo CCC com folga de junta de maneira a ser obtida a menor quantidade de material no preenchimento da junta, resultando em maior produtividade. Com a raiz executada, duas situações macros serão consideradas para o preenchimento; arame maciço e arame tubular. Na situação de arame maciço, além da abordagem com MIG/MAG convencional e CCC, será abordada

a situação com o pulsado. Neste último caso, em dependência da susceptibilidade a defeitos, serão desenvolvidas metodologias de pulsação térmica sincronizadas com a utilização de diferentes trajetórias; triangular com paradas nos extremos, trapezoidal e senoidal.

Além dos aspectos de verificação da robustez das várias opções citadas no que diz respeito a defeitos macros, serão verificadas suas propriedades mecânicas, principalmente na comparação entre as opções com arame maciço e arame tubular. Esta comparação visa a dirimir controvérsias entre diferentes grupos que trabalham no ramo da soldagem.

Por último, mas com realização concomitante a todo o desenvolvimento, o sistema orbital deverá ser aprimorado, principalmente no que concerne à interface de comunicação com o usuário. Os menus desta interface deverão ser de fácil interpretação e monitoração, bem como, todos os procedimentos de soldagem levantados deverão ter acessibilidade de fácil recorrência.

Com respeito à escrita, deverá haver uma preocupação desde a fase inicial a fim de que seja realizada pelo menos uma publicação em revista indexada.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como se trata de levantamento e qualificação de procedimentos para soldagem é importante que se estude sobre as diferentes maneiras (modos de transferência, técnicas de movimentos etc.) para realizar a soldagem orbital de dutos. Só assim poderá haver um entendimento sobre as limitações de cada processo e de como os ensaios deverão ser conduzidos.

3.1. Soldagem manual de tubos

Devido sua versatilidade e facilidade de operação, a soldagem orbital para fabricação e manutenção de dutovias, é ainda na sua maioria feita com eletrodo revestido [4]. No entanto, por maior que seja a habilidade do soldador, o uso do eletrodo revestido limita a velocidade de soldagem a valores bem menores comparados ao MIG/MAG. Este fator está atrelado a baixa densidade de corrente intrínseco ao processo que consequentemente ocasiona baixa taxa de deposição. Outro fator limitante é o próprio comprimento do eletrodo, que ocasiona longos períodos de tempos mortos para troca de eletrodo e preparação do cordão (unha) para o próximo passe.

Além das características do processo, a maneira com que as juntas são confeccionadas, para atenderem as necessidades do soldador, implica em aumento do volume de material a ser depositado, consequentemente no tempo de preenchimento (Figura 1).

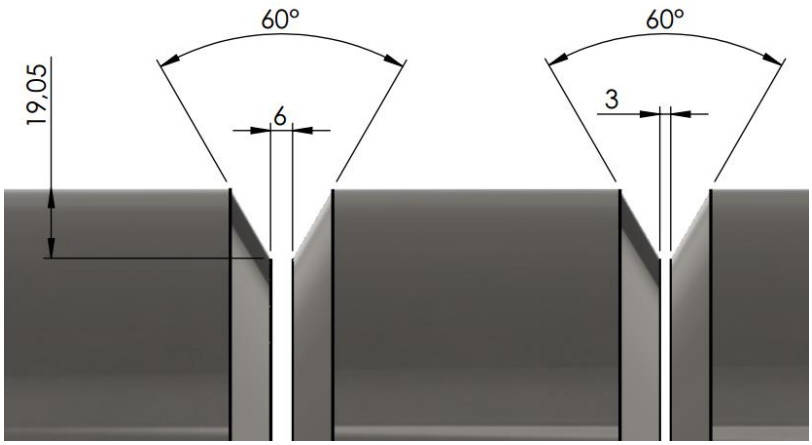


Figura 1 – Modelo de junta com diferentes aberturas de raiz

Levando em conta um tubo com 19,05 mm de espessura de parede, a simples diferença de abertura de raiz (*gap*), que no caso da soldagem manual é maior, implica em um aumento de 21 % no volume de material a ser depositado.

3.2. Soldagem orbital mecanizada

A soldagem orbital baseia-se na utilização de um manipulador robótico responsável pela manipulação da tocha, por meio de um trilho, ao longo da órbita do tubo (Figura 2). Esse manipulador não é somente responsável pelo movimento de translação da tocha, mas também pelo tecimento e regulagem da DBCP (distância bico de contato-peça). Através da interface homem-máquina, um operador treinado acompanha a realização de cada passe, realizando pequenos ajustes de movimento, se necessário. São esses parâmetros de movimento, aliados aos parâmetros elétricos que garantem o sucesso da automatização.

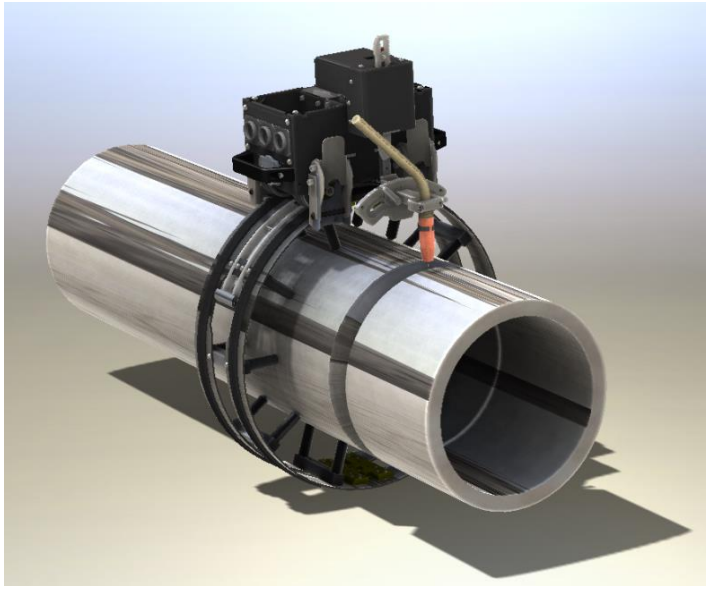


Figura 2 – Configuração de montagem do manipulador robótico

Apesar do nome “orbital”, cada passe na soldagem MIG/MAG acaba sendo realizada em duas etapas, ao longo das duas semi-órbitas do tubo. Levando em consideração os vários trechos do orbital têm-se diferentes posições de soldagem e consequentemente diferentes comportamentos da poça de fusão. Na Figura 3, os números II e IV referem-se a posição vertical, o número I define a posição plana e o III a sobre-cabeça.

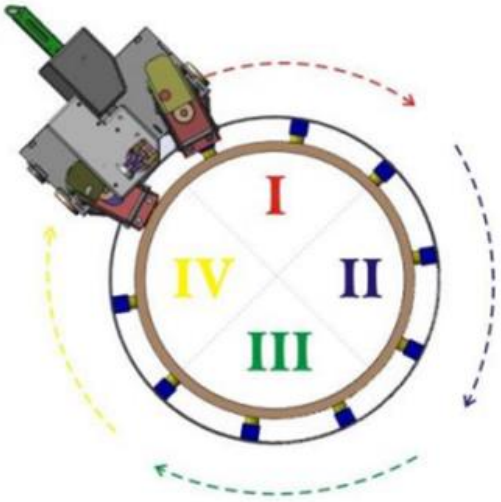
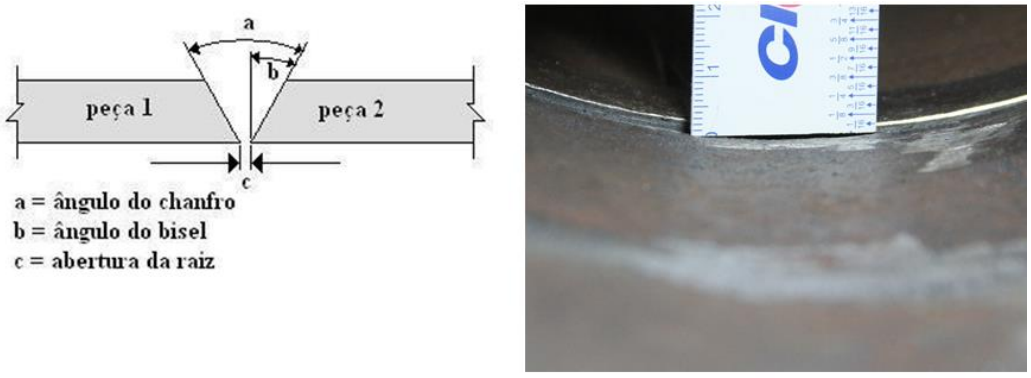


Figura 3 – Diagrama das posições de soldagem

Há de se adotar estratégias bem definidas para contornar os efeitos da gravidade sentidos pela poça de fusão. Ao mesmo tempo em que se busca alta taxa de fusão tem-se, consequentemente, uma maior fluidez da poça tornando mais difícil sua sustentação. Por esse motivo, numa soldagem MIG/MAG em 360º, os parâmetros de movimento e posicionamento da tocha (ângulo de ataque) que funcionariam para uma semicircunferência, não atenderiam de forma alguma a outra.

Outra dificuldade, encontrada na soldagem orbital mecanizada, é a padronização do chanfro. Abertura de *gap*, ângulo de bizel (Figura 4-a), presença de *high-low* (Figura 4-b) e de adoçamento (Figura 5) são configurações que seriam capazes de inviabilizar totalmente o sucesso da mecanização, não importando o quanto os parâmetros de movimentação e elétricos estejam bem ajustados.



a- Características da junta b- *High-low*

Figura 4 – Variabilidades do chanfro

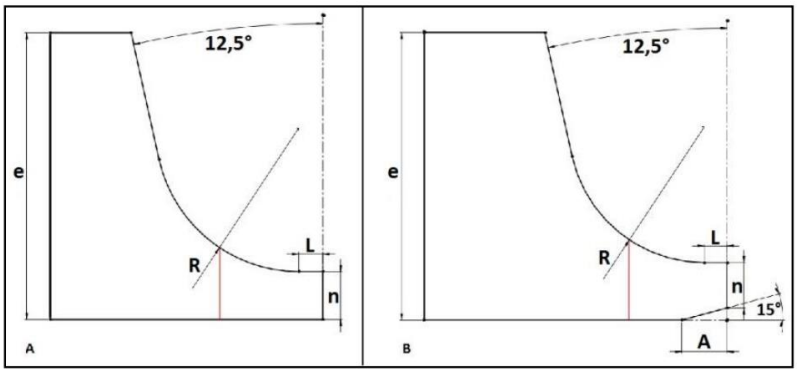


Figura 5 - Representação do processo de adoçamento (usinagem do diâmetro interno)

Como citado anteriormente, variações no gap e no ângulo de bizel, acarretariam em maior ou menor volume de material a ser depositado. O *high-low* e o adoçamento influenciam na forma de ancoramento da poça líquida e possível falta de fusão nos passes subsequentes. Além das imperfeições resultantes da confecção das juntas, existe a diferença inerentes ao tipo de junta, no caso, V ou U, mas que nesse trabalho não serão abordadas.

As técnicas de tecimento, movimentação periódica, das tochas de soldagem são realizadas com o objetivo de diminuir o tempo de soldagem e o número de cordões de solda, pois proporcionam um cordão mais largo, além de controlar a poça de fusão. Existem diversos tipos de trajetórias de soldagem, Figura 6, sendo as mais utilizadas a linear, a triangular e a trapezoidal [10].

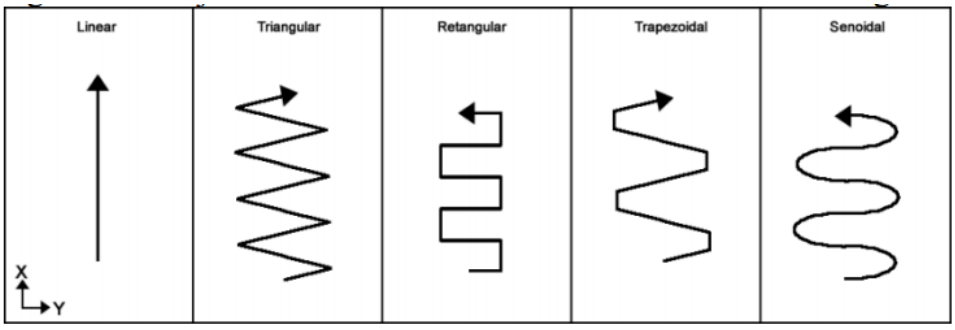


Figura 6 – Trajetórias utilizadas em soldagem

O tipo de trajetória pode ser definido pelas características de aplicação, do tipo de junta ou pelo processo de soldagem utilizado. O tecimento trapezoidal, por exemplo, com tempos de parada nas extremidades (TP1 e TP2) são caracterizados pela movimentação retilínea do manipulador somente no sentido de soldagem, garantindo

que o arco fique um tempo maior agindo nos flancos do chanfro. Esse comportamento proporciona melhores características ao cordão de solda, tanto no aspecto visual, pois a poça metálica se ancora melhor, quanto no aspecto de sanidade da junta, garantindo melhor fusão dessa região crítica.

A utilização de certos processos de soldagem só faz sentindo seguindo uma metodologia adequada de movimentação. Para o Pulsado Térmico, descrito a seguir, é necessário que haja uma concatenação entre os parâmetros elétricos e de movimento. O pulso térmico deve acorrer nos flancos dos chanfros, enquanto a base térmica age nos momentos em que a tocha se movimenta de um lado para o outro.

3.3. Fontes de Soldagem

As fontes de energia, para serem aplicadas à soldagem devem atender a certos requisitos básicos. Um desses requisitos refere-se ao comportamento da mesma, tendo em vista a tensão e corrente. As fontes de energia segundo suas características estáticas, classificam-se fontes de tensão constante ou fonte de corrente constante, Figura 7 (1).

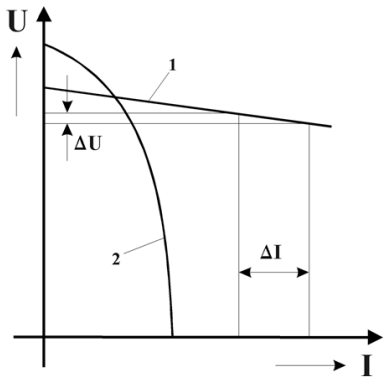


Figura 7 - Característica estática

Outra característica das fontes de soldagem está ligada a dinâmica da fonte de energia que confere características físicas ao arco e, por consequência da formação e destacamento da gota com o tipo de arame e gás. Esta questão de dinâmica se refere ao que é conhecido convencionalmente como indutância nas fontes de energia convencionais (característica estática é consequência basicamente do transformador) e por efeito indutivo nas fontes transistorizadas (fontes eletrônicas utilizando tiristores e transistores) [2].

3.3.1. Arames Tubulares *versus* Arames Maciços

Estes processos (FCAW e GMAW) são evidenciados no meio industrial por apresentarem grande capacidade produtiva pela alta taxa de fusão, garantindo alto fator de trabalho e automatização do processo. Entretanto, apresentam uma complexa correlação entre suas variáveis as quais requerem certo grau de conhecimento [13]. Os arames tubulares por apresentarem uma maior densidade relativa de corrente e uma transferência metálica menos caracterizada e complexa possibilita o emprego de fontes, também menos complexas. As propriedades de uma fonte de energia que se relacionam com o tipo de arame-eletrodo é a característica dinâmica, que em fontes convencionais nem sempre são reguláveis e, quando são, a regulagem é feita por uma indutância, que é fisicamente uma bobina por onde circula toda corrente de soldagem. Em fontes com tecnologia transistorizada, a resposta dinâmica é um atributo das características dos transistores e de seus sistemas de controle (Dutra, MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco, 2008). Já para os arame maciços, essa regulagem de indutância possibilita transferências metálicas mais suaves, menor geração de respingos, melhor molhabilidade do cordão etc..

3.4. Curto-circuito convencional

Apesar da amplamente difundido como sendo um processo de soldagem “frio”, o presente trabalho busca extrair, do modo de transferência por curto-circuito convencional, as vantagens que este processo traz em relação à controlabilidade da poça de fusão em diferentes posições de soldagem, por ser mais “frio” a sustentação da poça se dá de maneira mais fácil. É também possível explorar no campo de parâmetros de movimento, situações nas quais, o próprio fato de haver contato gota-poça causaria uma agitação do metal líquido fundido que implicaria em boa fusão das regiões.

Como o próprio nome já diz a transferência metálica por curto-circuito ocorre pelo contato do material de adição, em forma de gota, com o material de base. De forma didática, a Figura 8, ilustra a formação e desprendimento de uma gota.

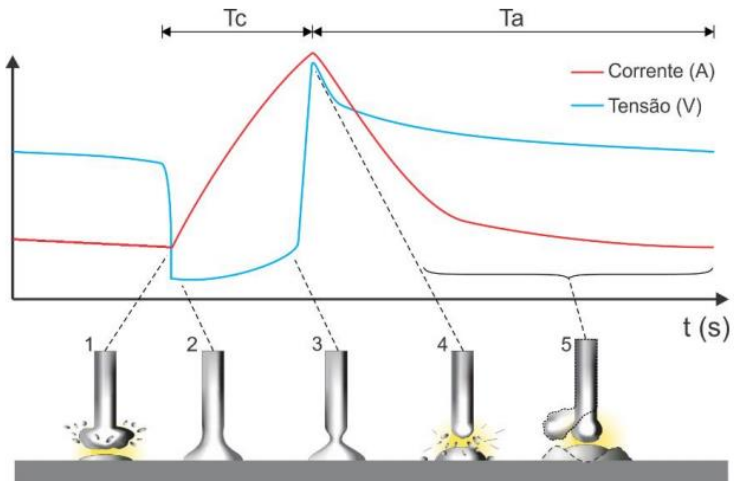


Figura 8 – Forma de onda para tranferência por curto-circuito convencional

A formação da gota metálica (Figura 8 (4)) se dá basicamente através de dois fenômenos, o Efeito Joule é responsável por um aquecimento prévio da porção de arame, que se torna energizada, após entrar em contato com o bico de contato. O Efeito de Campo, caracterizado pelo choque de elétrons e íons no arame, é responsável pela outra porção de aquecimento. Juntos são capazes de fundir um pequeno volume de arame-eletrodo, que por ser constantemente alimentado acaba colidindo-se com o metal de base. No momento em que essa parte fundida entra em contato com a peça (Figura 8 (2)) há a formação de uma ponte metálica, é neste momento que se estabelece o curto-circuito. A tensão tende a zero e a corrente tende a assumir valores tão altos quanto for necessário para romper esta ponte. Com o aumento da corrente as forças eletromagnéticas existentes atuam no sentido de causar um estriccionamento da ponte metálica, o chamado Efeito *Pinch* (Figura 8 (2 e 3)). A combinação desse efeito com a tensão superficial, existente entre gota e poça metálica, resultam no rompimento dessa ponte, possibilitando a reabertura do arco e início de um novo ciclo [11].

Pelo princípio de funcionamento do curto-circuito exige-se trabalhar com uma fonte com característica estática do tipo tensão constante, pela qual se ajusta a tensão de referência e a velocidade de arame. A corrente média é então o resultado dessas duas variáveis, isso explica em parte o termo “frio”. Outra razão para essa denominação está ligado ao fato de que, apesar da corrente assumir valores altos, a tensão tende a zero e assim sendo a potência também. Se calculada a potência média do processo como sendo a média de todas as potências ponto a ponto e não simplesmente como sendo a relação corrente média x tensão média, chegará ao resultado de que o curto-circuito

convencional apresenta uma menor relação entre potência e velocidade de arame, se comparado aos demais processos MIG/MAG [1].

3.5. Corrente Pulsada

A corrente pulsada se caracteriza por uma forma de transferência em voo livre de forma controlada, basicamente uma gota por pulso. Para obter uma transferência metálica de forma regular é preciso haver a concatenação de alguns parâmetros elétricos (Figura 9): corrente de pulso (Ip), tempo de pulso (tp), corrente de base (Ib), tempo de base (tb) e velocidade de arame. Essa regulagem de parâmetros só se torna possível pela utilização de uma fonte com característica estática do tipo corrente constante.

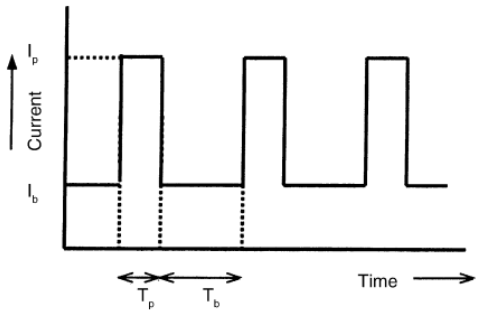


Figura 9 - formato de onda corrente pulsada

A corrente de pulso atinge valores acima da faixa de transição (spray), é responsável pela formação e destacamento da gota; o tempo de pulso é caracterizado pelo período de início de subida da corrente até o início da descida. A corrente de base assume valores suficientemente baixos, capaz de manter estabelecido o arco elétrico, mas não alta o suficiente para proporcionar formação e destacamento da gota. O tempo em que essa corrente permanece nesse patamar é intuitivamente chamado de tempo de base [8].

Com base nesses parâmetros é possível obter grandes vantagens a partir da soldagem com corrente pulsada. A principal está ligada ao fato de se conseguir um tipo de transferência spray, livres de respingos, com baixos valores de corrente média, ou seja, baixo calor aportado, porém alto rendimento de fusão [8]. O que se busca com a corrente pulsada na soldagem orbital é exatamente isto, baixa corrente média para controle da poça de fusão, nas posições desfavoráveis e, maior potência para não haver problemas de falta de fusão entre passes e entre as paredes do chanfro, ou seja, uma

maior relação entre potência e velocidade de arame. A quem diga que o pulsado ainda é capaz de conferir melhores propriedades mecânicas [6].

Por outro lado, devido as características de destacamento, tem-se um comprimento de arco mais susceptível as variações de DBPC deparadas ao longo da soldagem orbital, podendo causar descontinuidades no cordão de solda, como depósito irregular de material, mordeduras etc..

3.6. Curto-circuito Controlado

A princípio o CCC, abreviatura para curto-circuito controlado, desenvolvido no LABSOLDA, surgiu para atender as necessidades dos passes de raiz. A sua forma de onde e controle de corrente baseado na leitura de tensão, contrapõe alguns aspectos negativos que são melhor explicados no capítulo sobre curto-circuito convencional. Esse controle confere ao CCC características almejadas na corrente pulsada como, menor geração de respingos e maior potência para a mesma velocidade de arame. Ao mesmo tempo, ainda confere características do curto-circuito convencional, ainda existe o curto-circuito, com momentos de baixa potência, poça menos fluida que no pulsado, melhor controlabilidade do metal líquido.

O CCC, diferente do convencional, utiliza uma fonte de soldagem com comando de corrente. Só assim consegue cumprir seu objetivo, de controle de corrente em diferentes momentos da transferência, baseado na leitura de tensão. Sua forma de onda está representada na Figura 10.

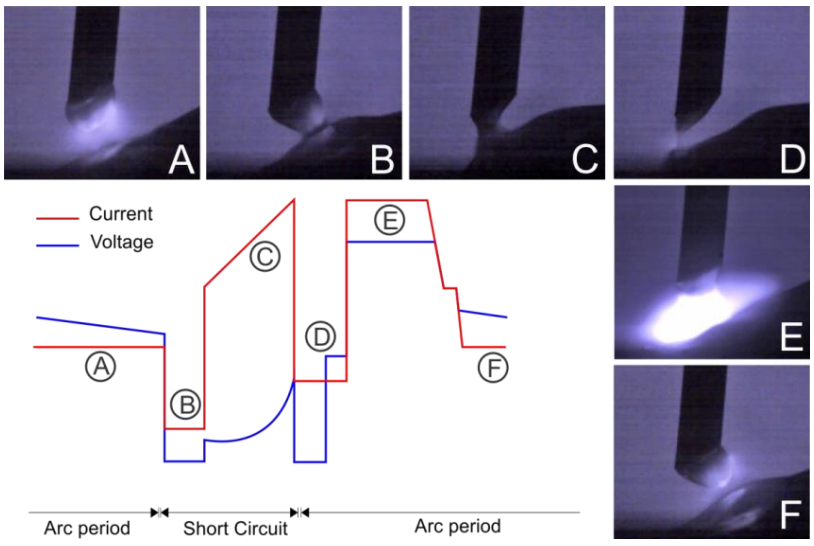


Figura 10 – Forma de onda da transferêcia por curto-circuito controlado

Os pontos mais críticos de uma transferência por curto-circuito são o momento de contato gota-poça e o momento de ruptura da ponte metálica (reabertura do arco). No primeiro há um aumento considerável da corrente e proporcionalmente das forças eletromagnéticas. Isso pode causar um efeito de repulsão da gota gerando respingos, deformação da gota e da poça de fusão e oscilações indesejadas na região. Somando ainda ao fato de que a região irá sofrer um elevadíssimo aquecimento por efeito Joule, formando gases no interior da gota fundida, que podem causar micro explosões e expulsão de material. No momento da ruptura da ponte metálica a intensidade da corrente é muito elevada, o que, também, gera a repulsão da gota e a expulsão de material da região formando respingos; Como a intensidade de corrente cai após o rompimento da ponte metálica não existe um tempo definido de fusão da região, formando gotas de tamanho muito variável acarretando em dificuldades na dinâmica da transferência [3].

O CCC segue o princípio de manutenção da corrente em baixo nível no momento do contato entre a gota fundida e a poça de fusão, com a finalidade de se reduzir o nível de respingos e se formar uma ponte líquida estável, seguindo-se um surto de corrente que causa o estriccionamento desta ponte, propiciando a transferência definitiva da gota e, novamente visando-se um baixo nível de respingos e fumos, reduz-se a corrente na iminência do desprendimento [11].

3.7. Pulsado Térmico

Buscando desbravar ainda mais o campo de controle de corrente e comportamento da poça metálica, o pulsado térmico é visto como umas das alternativas. Aqui se consegue, através de uma comunicação fonte de soldagem e robô manipulador, uma sincronia entre pulsos energéticos e oscilação da tocha. Com isso espera-se impor maior energia nas regiões do chanfro que estão mais sujeitas a defeitos, como falta de fusão.

Desenvolvido como uma alternativa para controle da poça metálica no MIG Pulsado, o Pulsado Térmico ou, MIG Duplo Pulso como é conhecido também, tem como principal objetivo usufruir das vantagens oferecidas pelo MIG Pulsado e pelo TIG Pulsado. Enquanto a pulsação em alta frequência é responsável pela formação e destacamento da gota, a pulsação em baixa frequência é responsável pelo ciclo térmico, influenciando na corrente média [12].

A Figura 11 esquematiza o princípio de funcionamento dessa vertente do processo MIG/MAG. A dupla pulsação é representada pela alternância de períodos de baixa frequência de base térmica (τb) e pulso térmico (τp). Durante cada período térmico há uma coexistência de uma corrente pulsada em alta frequência, na qual os valores de corrente de pulso e tempo de pulso são mantidos os mesmo. A corrente e tempo de base são ajustados de acordo com a corrente média desejada em cada período térmico. A variação da corrente média em cada período térmico é sincronizada com a velocidade de alimentação do arame, assim o comprimento do arco é mantido o mesmo [9].

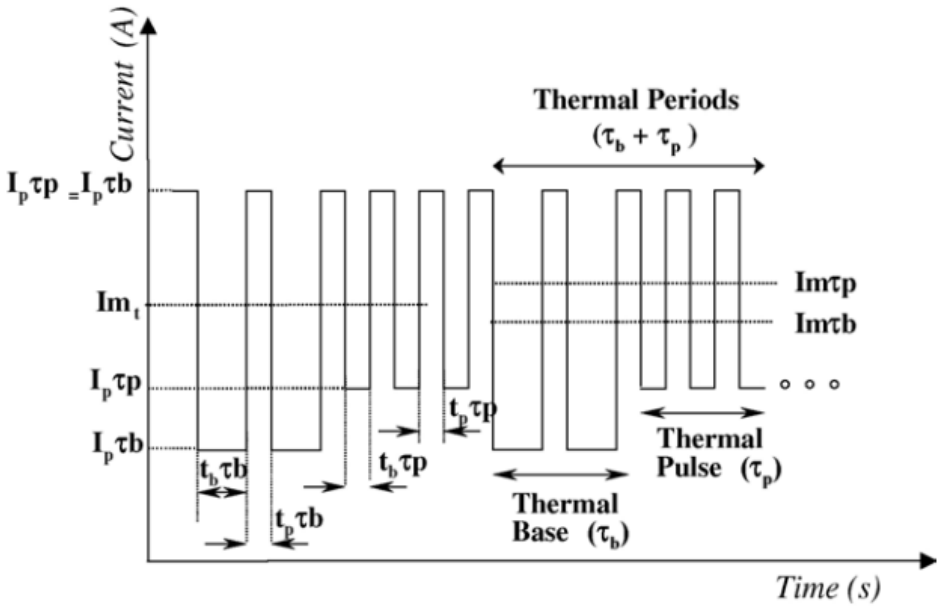


Figura 11 – Forma de onda do pulsado térmico

4. APARATO EXPERIMENTAL

O trabalho será desenvolvido utilizando o amplo aparto experimental do LABSOLDA. Haverá necessidade de constante comunicação entre as equipes de projeto e eletrônica para possíveis adaptações, nos equipamentos, que viabilizem de forma eficiente o objetivo desse trabalho.

A primeira etapa a ser cumprida é a fabricação do chanfro, para isso será utilizada uma bizeladora hidráulica da marca PROTEM, com ferramenta capaz de fabricar chanfros com angulação de 30º.

Figura 12 - Chanfradeira utilizada para confecção do ângulo de bizel

4.1. Bancada de Soldagem

A bancada de soldagem orbital seguirá os moldes da Figura 13 e será composta por uma fonte de soldagem IMC - DIGIPlus A7 que permite operar com diversas modalidades de soldagem com elevado desempenho no controle do arco e da transferência metálica. Um sistema tracionador de arame da IMC modelo Inversal STA-20. Um medidor de vazão de gás (MVG-3), Figura 14 e um Sistema de Aquisição Portátil, que permite leitura instantânea da corrente, tensão e velocidade de arame, também possibilita extrair dados médios da corrente e tensão, potência, tempo de arco aberto e quantidade de arame para acompanhamento da produção.

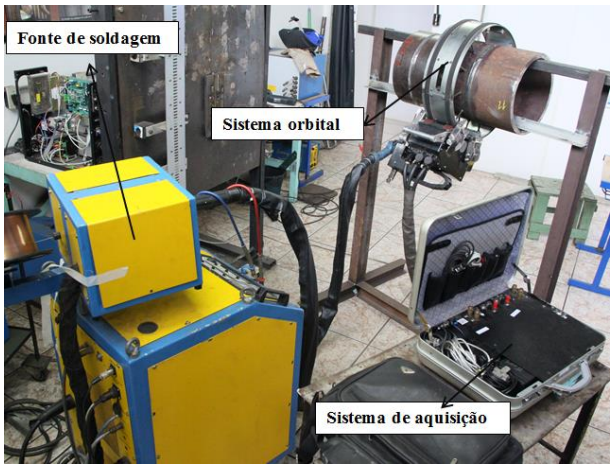


Figura 13 – Disposição dos equipamento para realização dos ensaios

Figura 14 - Equipamento para medição da vazão de gás

A versatilidade da fonte de soldagem possibilitará trabalhar com todos os derivativos do processo MIG/MAG supracitados e ainda, fazer a integração com o manipulador robótico, como mostra a Figura 15.

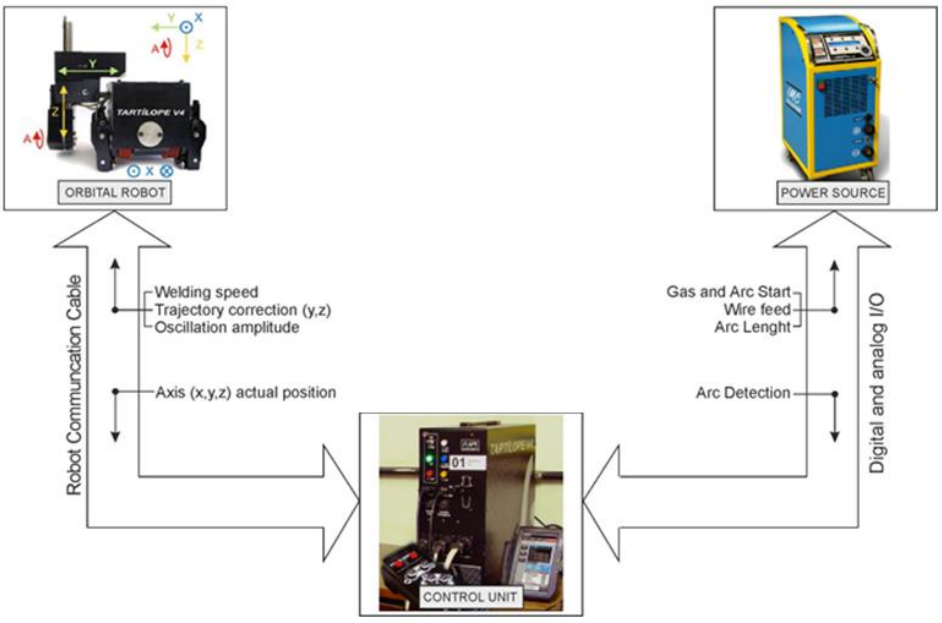


Figura 15 – Integração proposta para o sistema orbital adaptativo

5. METODOLOGIA E CRONOGRAMA DAS ATIVIDADES

Todos os ensaios serão feitos em tubos API 5L X60MS, com diâmetro de 13” e ¾” de espessura. Os chanfros terão configuração em V, seguindo o requisito de fabricação da junta em campo.

Os materiais de adição utilizados serão arames-eletrodos de 1,2 mm de diâmetro nominal de aço comum, ER-70S-6 e o tubular fluxado, ET1T-1. Para os processos de curto-circuito convencional e curto-circuito controlado será utilizada, como proteção gasosa, uma mistura comercial com 75 % de Argônio e 25 % de CO_2. Já para os ensaios com corrente pulsada e o pulsado térmico, a mistura, também comercial, será de 92 % de Argônio com 8 % CO_2.

Os parâmetros elétricos serão levantados primeiramente em chapas aço, chanfradas em 30º, reproduzindo a junta do tubo. O motivo da utilização de chapas está na facilidade de fabricação do chanfro e no custo da matéria-prima. Os ensaios terão a seguinte ordem:

1- Explorando o que se expõe na literatura e o *know-how* do laboratório em soldagem orbital de tubos de paredes finas, iniciar-se-ão os ensaios utilizando o MIG/MAG convencional. Essa etapa seguirá duas vertentes, primeiro utilizando material de adição na forma de arames maciços e depois na forma de arame tubular. Sabe-se que apesar de ambos utilizarem os princípios da transferência por curto-circuito, o comportamento e as características da solda são completamente diferentes. Fato que será apresentado de forma conclusiva neste trabalho.

2- O ensaio seguinte ficaria por conta do MIG/MAG pulsado, que para muitos, seria a solução não só para as tendências de falta de fusão provenientes do convencional, mas também proporcionando um refino de grão e garantindo maior resistência mecânica à junta [6].

3- Aproveitando os resultados do MIG/MAG pulsado serão realizados os ensaios com o pulsado térmico, para isso será necessário adaptações do manipulador robótico, como já dito anteriormente, o pulsado térmico só faz sentido quando há a concatenação de parâmetros elétricos e de movimentação.

4- Destina-se a última parte dos ensaios a utilização do CCC, processo no qual é amplamente difundido para os passes de raiz, mas que se tem poucos ou quase

nada de resultados conclusivos acerca de sua utilização para passes de preenchimento.

5- Para validação dos procedimentos, as juntas serão inspecionadas através de raios-X e ultrassom. Para isso devem atender o requisito mínimo, ou seja, apresentar bom acabamento superficial. Para as amostras que forem aprovadas nas inspeções, serão realizados ensaios de impacto, a fim de se obter resultados convincentes acerca das propriedades mecânicas decorrentes de cada processo e material de adição.

6- A escrita da dissertação acontecerá de forma simultânea às realizações dos testes, através de relatórios. Com isso, ao longo do trabalho e como exposto nos objetivos, espera-se poder publicar ao menos um artigo em revista.

Tabela 1 - Cronograma de atividades

Atividades	**2015**					**2016**						
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho
1	x	x										
2			x	x								
3					x	x						
4							x	x				
5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
6	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

5.1. Resultados

Como parte inicial da metodologia, foram realizados os primeiros ensaios utilizando MIG/MAG com curto-circuito convencional. Os parâmetros elétricos, Tabela 2, foram os que conferiram melhor estabilidade da transferência metálica e, portanto utilizados em todos os cordões de preenchimento. Já os parâmetros de movimentos são específicos para cada passe e os apresentados na Tabela 3 foram os que resultaram em um cordão com bom acabamento superficial (Figura 16).

Tabela 2 - Parâmetros elétricos

U [V]	Va [m/min]	Ks	Kd
17,5	3,0	95	60

U- tensão; Va- velocidade de alimentação de arame; Ks e Kd- efeito indutivo de subida e descida respectivamente.

Tabela 3 – Parâmetros de movimentos para os passes de preenchimento

Camadas	Vs [m/min]	f [Hz]	Amp. [mm]	Tp [ms]
1ª	14,5	0,8	8,0	200
2ª	14,0	0,7	11,0	250
3ª	11,0	0,6	14,0	250
4ª	15,5	0,8	8,0	200
5ª	28,0	1,4	9,0	0

Vs- velocidade de soldagem; f- frequência de tecimento; Amp- Amplitude de tecimento; Tp- tempo de parada nas extremidades.

Figura 16 – Resultado do preenchimento realizado com curto-circuito convencional

O tempo de arco aberto foi calculado em 85 minutos de solda para o preenchimento total da junta. Apesar de apresentarem bom acabamento superficial, os testes radiográficos revelaram trechos de falta de fusão, Figura 17.

Figura 17 – Radiografias para verificação da sanidade da junta

6. PREVISÃO FINANCEIRA

Graças aos projetos anteriores, o LABSOLDA já possui os equipamentos de custo mais elevados para as atividades que serão necessárias na elaboração da dissertação, tais como, fonte de soldagem, periféricos de soldagem e os manipuladores robóticos. Os gastos previstos serão em materiais de consumo para realização dos ensaios, como corpos de prova, gases, consumíveis para as tochas de soldagem, abrasivos, consumíveis para metalografias, serviços de usinagem, entre outros. Existe também a necessidade de implementações eletrônicas nas fontes de soldagem e nos manipuladores robóticos a medida que o projeto for sendo desenvolvido. Apresenta-se a previsão de custos na Tabela 4.

Tabela 4 – Previsão financeira

Custos estimados para o projeto	
Materiais para corpos de prova	R$ 10.000,00
Consumíveis para Soldagem	R$ 2.000,00
Consumíveis para metalografias	R$ 500,00
Serviços de Usinagem	R$ 3.000,00
Implementações em equipamentos	R$ 7.000,00
TOTAL	R$ 22.700,00

7. BIBLIOGRAFIAS

1. Dutra, J. C. (2008). MIG/MAG - Transferência Metálica por Curto-Circuito - Fontes de Soldagem versus Gases do Arco. *Soldagem e Inspeção*, 19-24.
2. Dutra, J. C. (a ser publicado). *Fontes de Energia para Soldagem a Arco Voltaico.* Florianópolis.
3. Filho, H. D. (2014). *MIG/MAG CCC- Avanços na Tecnologia de Controle da Transferência Metálica como Solução para o Passe de Raiz.* Florianópolis: UFSC, Dissertação de Mestrado.
4. Fortes, C., & Domingues, J. R. (2004). *Soldagem de Tubulações.*
5. *IMC Soldagem*. (s.d.). Acesso em 26 de Outubro de 2015, disponível em http://www.imc-soldagem.com.br/
6. Johnsen, M. R. (1999). U.S. Pipeline Industry Enters New Era. *Welding Journal*, 37-41.
7. Kim, C. (2010). Back Bead Characteristics during Butt Welding of a Thick Plate . *Materials Science Forum*, 350-355.
8. P.K.Palani, & N.Murugan. (2005). Selection of Parameters of Pulsed Current Gas Metal Arc Welding. *Journal of Materials*.
9. Silva, C. L., & Scotti, A. (2006). The influence of double pulse on porosity formation in aluminum GMAW. *Journal of Materials Processing Technology*, 366-372.
10. Silva, F. C. (2012). *Desenvolvimento de Algorítimos para Geração de Trajetórias de Revestimento por Soldagem Automatizadas Aplicados em Caldeiras de Usinas Termoelétricas.* Florianópolis: UFSC - Dissertação de Mestrado.
11. Silva, R. H. (Fevereiro de 2005). *Soldagem MIG/MAG em Transferência Metálica por Curto-Circuito Controlado Aplicado ao Passe de Raiz.* Florianópolis, Santa Catarina, Brasil: Dissertação de Mestrado, UFSC.
12. Silva, R. H., & Dutra, J. C. (2009). Thermal Pulsed MIG/MAG Welding Applied to the Repair of Cavitation Erosion on Large-scale Hydraulic Turbines. *Welding and Cutting*, 27-30.
13. Souza, C. I., & Ferraresi, V. A. (2013). Análise Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW com Transferência Metálica por Curto-circuito . *Soldagem e Inspeção*, 268-280.

14. *SPS - Sistemas e Processos de Soldagem*. (s.d.). Acesso em 26 de Outubro de 2015, disponível em SPS: http://www.sps-soldagem.com.br/mvg_3.php