



*Federação das Indústrias do Estado da Bahia*

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
GESTÃO E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**RAUL PAIVA CONRADO**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**

Salvador  
2017

**RAUL PAIVA CONRADO**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josiane Dantas Viana Barbosa

Salvador  
2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

C754a Conrado, Raul Paiva

Análise de parâmetros de soldagem para atividades de manutenção: um estudo de caso / Raul Paiva Conrado. – Salvador, 2017.

62 f. : il. color.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Josiane Dantas Viana Barbosa.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial - GETEC) - Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2017.

Inclui referências.

1. Processo de soldagem TIG. 2. Soldagem em operação. 3. Variáveis do processo. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Barbosa, Josiane Dantas Viana. III. Título.

CDD: 671.52

**RAUL PAIVA CONRADO**

**ANÁLISE DE PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA  
ATIVIDADES DE MANUTENÇÃO: UM ESTUDO DE CASO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial, Centro Universitário SENAI CIMATEC

Aprovada em 19 de maio de 2017

Banca Examinadora:

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Josiane Dantas Viana Barbosa - SENAI-CIMATEC

Membro Interno: Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos - SENAI-CIMATEC

Membro Externo: Prof. Dr. Ivo Andrei de Oliveira Lino Lima - BRASKEM

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que acreditam na educação e tecnologias como meios para melhorar o mundo.

“Educar é crescer. E crescer é viver. Educar é, assim, vida no sentido mais autêntico da palavra”

Anísio Teixeira

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por todas as oportunidades e a natureza que tem nos concedido aqui na terra.

As Professoras e Orientadoras Dra. Carla Dalmolin e Dra. Josiane Dantas pela paciência, entendimento e ajuda frente às dificuldades que passamos até o presente momento, orientando sempre com sabedoria e dedicação.

Aos meus Pais Sr. Maris Gonçalves Conrado e Sra. Maria de Jesus Paiva Conrado que sempre apoiaram e incentivaram os filhos a serem pessoas voltadas para o bem.

Aos colegas e colaboradores do SENAI CIMATEC pelo apoio nos laboratórios de soldagem, metalografia e ensaios mecânicos que se dedicam à educação.

Aos colegas e colaboradores do IFBA de Simões Filho pelo apoio nos laboratórios de usinagem, metrologia e soldagem.

Aos colegas da metalúrgica AJAD de Simões Filho.

A minha companheira Gisélia Ferreira Flores que com carinho, compreensão, e paciência, nos momentos difíceis de saúde e desemprego, me ajudou, dando forças para concluir.

## RESUMO

A necessidade de estabelecer critérios com segurança nas soldagens de dutos em operação leva os profissionais da área de soldagem a se qualificarem cada vez mais para a realização desse tipo de atividade, até então consideradas “perigosas” devido ao não conhecimento dos parâmetros necessários à sua execução. A técnica aplicada no reparo garante a continuidade do fornecimento do fluido. O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver uma bancada experimental para resolução de problemas em campo, tornando possível o treinamento para reparos em dutos com espessura mínima de 3 mm, considerando as variáveis do processo contínuo envolvidos na malha dutoviária. A bancada foi construída sobre suportes em aço com um trecho de um tubo de 4” com espessuras escalonadas, conexões flangeadas e soldadas com um sistema de monitoração manométrica, que controlou as variáveis durante os testes de soldagem e ajustados de acordo com a espessura da parede do tubo soldado, permitindo angulação de 0° e 90° para testes de soldagem nestas posições. O processo de soldagem TIG (Gás Inerte de Tungstênio) foi analisado pela versatilidade e características de soldagem. Através dos ensaios visuais, macrográficos e de dureza, pode ser analisado com clareza os efeitos produzidos na ZTA (Zona Termicamente Afetada) e distinguir as variáveis que influenciam no desempenho da soldagem para que não haja risco de perfuração pelo arco de soldagem aplicáveis aos aços ferríticos.

Palavras-chave: Processo de soldagem TIG, soldagem em operação, variáveis do processo.

## **ABSTRACT**

The need to establish security criteria in the welding of pipelines in operation takes welding professionals to qualify increasingly to conduct this type of activity, hitherto considered "dangerous" due to no knowledge of the parameters required for its implementation. The technique applied in the repair ensures the continuity of supply of the fluid. The aim of this study was to develop an experimental bench for problem solving in the field, making it possible training for repairs of pipelines with a minimum thickness of 3 mm, considering the variables of the ongoing process involved in the pipeline network. The test apparatus was built on steel substrates with a portion of a tube 4' with stepped thickness, flanged fittings and welded with a manometric monitoring system, which controlled variables during welding tests and adjusted according to wall thickness the welded tube, enabling angulation 0° and 90° for welding tests in these positions. The TIG welding process (Tungsten Inert Gas) was analyzed by the versatility and welding characteristics. Through visual, macrográficos and hardness tests can be analyzed clearly the effects produced in the HAZ (heat affected zone) and distinguish the variables that influence the performance of the welding so that there is risk of perforation by the welding arc applicable to ferritic steels.

Keywords: TIG welding process, welding operation process variables

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Tipos de corrente elétrica para cada objetivo ..... | 21 |
| Tabela 2 - Comparativo entre os processos de soldagem .....    | 29 |
| Tabela 3 - Fluxo para selecionar o processo de soldagem .....  | 30 |

## LISTAS DE FIGURAS

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Figura 1   | - Equipamentos utilizados na soldagem TIG .....   | 14 |
| Figura 2   | - Fluxo da corrente contínua com polaridade negativa .....  | 17 |
| Figura 3   | - Fluxo da corrente com polaridade positiva .....   | 18 |
| Figura 4   | - Fluxo da corrente alternada .....   | 19 |
| Figura 5   | - Ciclo da corrente alternada .....   | 20 |
| Figura 6   | - Curvas características do processo de soldagem TIG .....  | 21 |
| Figura 7   | - Comportamento da corrente elétrica fornecida pela fonte .....   | 28 |
| Figura 8   | - Tipos de reparos em dutos .....   | 31 |
| Figura 9   | - Painel frontal do equipamento TIG com zoom lateral .....  | 33 |
| Figura 10  | - Foto da tocha de máquina TIG .....  | 34 |
| Figura 11  | - Macrografias em cordões de solda .....  | 36 |
| Figura 12  | - Ilustração do critério utilizado para definir o limite de aporte térmico em função da aparência macrográfica das soldas .....                         | 38 |
| Figura 13  | - Deflexão radial calculada em função da pressão do fluido, para a soldagem de um tubo de 3mm de espessura utilizando aporte térmico de 7,5 kJ/cm ..... | 39 |
| Figura 14  | - Comparação das condições previstas para ocorrer a perfuração com aquelas observadas por Wade .....  | 40 |
| Figura 15a | - Fluxograma da parte experimental .....  | 43 |
| Figura 15b | - Desenho em meio corte do tubo escalonado .....  | 46 |
| Figura 16  | - Tubo usinado e com flangeamento soldado .....   | 47 |
| Figura 17  | - Tubo de testes com manômetro acoplado .....   | 48 |
| Figura 18  | - Primeiro cordão de solda .....  | 49 |
| Figura 19  | - Anéis soldados em passes únicos .....   | 50 |
| Figura 20  | - Sequência de soldas no primeiro anel (A) com espessura de 3mm .....   | 52 |
| Figura 21  | - Sequência de soldas no segundo anel (B) com espessura de 3,5mm .....  | 53 |

## LISTAS DE SIGLAS

|                  |   |
|------------------|---|
| <b>API</b>       | American Petroleum Institute                    |
| <b>AISI</b>      | American Iron and Steel Institute               |
| <b>ASME</b>      | American Society of Mechanical Engineers        |
| <b>CC</b>        | Corrente Continua                               |
| <b>CA</b>        | Corrente Alternada                              |
| <b>CIMATEC</b>   | Campus Integrado de Manufatura e Tecnologias    |
| <b>GMAW</b>      | Gas Metal Arc Welding                           |
| <b>GTAW</b>      | Gas Tungsten Arc Welding                        |
| <b>MAG</b>       | Metal Active Gas                                |
| <b>MIG</b>       | Metal Inert Gas                                 |
| <b>N-2163</b>    | Norma PETROBRÁS 2163                            |
| <b>PPG-GETEC</b> | Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial |
| <b>PT</b>        | Permissão de Trabalho                           |
| <b>SENAI</b>     | Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial     |
| <b>SMAW</b>      | Shielded Metal Arc Welding                      |
| <b>TF</b>        | Trinca a Frio                                   |
| <b>TIG</b>       | Tungsten Inert Gas                              |
| <b>WWW</b>       | Word Wilde Web                                  |
| <b>ZF</b>        | Zona Fundida                                    |
| <b>ZTA</b>       | Zona Termicamente Afetada                       |

# SUMÁRIO

|          |   |    |
|----------|---|----|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | 11 |
| 1.1      | DEFINIÇÕES DO PROBLEMA .....                                      | 12 |
| 1.2      | OBJETIVO .....  | 12 |
| 1.2.1    | <b>Objetivo geral</b> .....                                       | 12 |
| 1.2.2    | <b>Objetivos específicos</b> .....                                | 12 |
| 1.3      | LIMITES E LIMITAÇÕES .....  | 12 |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO DA LITERATURA ESPECIALIZADA</b> .....                  | 14 |
| 2.1      | O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG .....                                  | 14 |
| 2.1.1    | <b>Variáveis do processo TIG</b> .....                            | 15 |
| 2.1.2    | <b>Influência da polaridade</b> .....                             | 17 |
| 2.1.3    | <b>Corrente de alta frequência</b> .....                          | 20 |
| 2.2      | DIFERENÇAS ENTRE A SOLDAGEM EM OPERAÇÃO E A<br>CONVENCIONAL ..... | 21 |
| 2.3      | CONSUMÍVEIS E GASES UTILIZÁVEIS .....                             | 23 |
| 2.4      | INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM .....                  | 26 |
| 2.5      | INFLUÊNCIA DOS GASES .....  | 26 |
| 2.6      | SELEÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM .....                             | 29 |
| 2.7      | EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM TIG .....                              | 33 |
| 2.7.1    | <b>A Tocha</b> .....  | 34 |
| 2.7.2    | <b>Dispositivos especiais</b> .....                               | 34 |
| 2.8      | ENSAIOS MACROGRÁFICOS .....                                       | 35 |
| 2.9      | MACROESTRUTURA .....  | 37 |
| 2.10     | LIMITES PARA EVITAR PERFURAÇÃO .....                              | 37 |
| 2.11     | PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA DUTOS COM GÁS .....                   | 40 |
| <b>3</b> | <b>EXPERIMENTAL</b> .....   | 43 |
| 3.1      | MATERIAIS .....   | 44 |
| 3.1.1    | <b>Preparação das amostras</b> .....                              | 44 |
| 3.1.2    | <b>Modelo proposto</b> .....                                      | 45 |
| 3.1.3    | <b>Dados construtivos</b> .....                                   | 45 |
| 3.2      | DADOS DOS TESTES .....  | 48 |
| 3.3      | MACROGRAFIAS DOS ANÉIS .....                                      | 50 |
| 3.4      | RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES .....                                   | 54 |
| <b>4</b> | <b>VANTAGENS DO MODELO</b> .....                                  | 56 |
| 4.1      | VANTAGEM DO MODELO PARA INDÚSTRIA.....                            | 56 |
| <b>5</b> | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                                 | 57 |
| 5.1      | CONCLUSÕES FINAIS .....   | 57 |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b> .....  | 58 |
|          | <b>ANEXOS</b> .....   | 61 |

## 1 INTRODUÇÃO

As soldagens em operação são técnicas onde se realizam soldas com movimento de fluxo contínuo no interior da tubulação de processo, ou seja, com duto em operação, sem a necessidade de paradas operacionais. Pode ser realizada para reparos diretos na parede, reforços e instalação de conexões para posterior trepanação (N-2163, 2008).

Na soldagem de dutos em operação, há dois riscos principais a serem considerados: O primeiro é a perfuração pelo arco durante a soldagem, que ocasionará no vazamento do fluido e conseqüentemente problemas para a segurança do soldador. O segundo é devido as altas da velocidade de resfriamento da solda que derivam microestruturas duras aumentando assim o risco de trincas induzidas por hidrogênio, deteriorando a tenacidade do material. Para tal, a bancada de testes deve permitir o controle do aporte térmico para reduzir a velocidade de resfriamento. O risco aumenta à medida que a espessura fica abaixo de 6,4mm até a espessura requerida de 3mm, por causa da proximidade da ZTA (Zona Termicamente Afetada) com a poça de fusão. Ao observar as macrográfias de uma solda de um duto em operação, percebem-se a formação de um constituinte eutético de baixa ductilidade, que inclusive pode apresentar trincas das quais enfraquecerá a região soldada. O responsável para executar esta operação deve ter conhecimentos suficientes para discernir sobre o processo e sua viabilidade operacional, no qual os riscos serão minimizados através de um treinamento a partir de uma bancada simuladora antes do procedimento em campo. Caso não seja possível o reparo, ele imediatamente recomendará a aplicação de outros processos envolvendo a trepanação ou paralisação temporária do trecho que se quer reparar.

Para ajudar a definir as margens de segurança, os testes de simples deposição e cordões autógenos sobre o duto com várias velocidades de fluxo podem prosseguir, e as macrográfias das secções transversais podem ser utilizadas para classificar as ocorrências de perfuração em: seguras, marginais e perfuradas.

Desta maneira, pretende-se com esse trabalho desenvolver uma bancada de testes para soldagem de dutos em operação, visando a simulação e treinamento de soldadores ou pessoas envolvidas diretamente através do processo de soldagem TIG.

## 1.1 DEFINIÇÕES DO PROBLEMA

Na malha dutoviária da indústria ocorrem vazamentos, principalmente devido à corrosão e podem ter consequências drásticas, pois afeta o meio ambiente, a imagem da empresa e induz riscos à segurança operacional, portanto, possuir um grupo de trabalho bem treinado facilita muito na tomada de decisões corretas para diminuir a incerteza no momento em que seja necessária a intervenção para o reparo de dutos e garantia da continuidade do fluxo.

## 1.2 OBJETIVO

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma bancada de testes para soldagem em duto escalonado de forma que viabilize a observação dos ensaios visuais e macrográficos da expansão térmica nos corpos de provas após do processo de soldagem TIG.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar parâmetros necessários à intervenção na soldagem de manutenção através do processo TIG.
- Analisar a ZTA em trecho escalonado de um tubo após soldagem pelo processo TIG.
- Analisar variáveis que influenciam no desempenho da soldagem pelo processo TIG.
- Mostrar a necessidade de treinamentos de soldadores envolvidos no processo de soldagem TIG, após identificação da atividade a ser executada.

## 1.3 LIMITES E LIMITAÇÕES

Para realizar testes experimentais no momento da soldagem da parte escalonada do corpo de prova, foi necessário o preenchimento do tubo com água invés de outro fluido como óleo ou gás, para melhorar a segurança do operador no

caso de vazamento (que ocorreu) no momento em que a soldagem fosse atingindo a espessura mínima requerida.

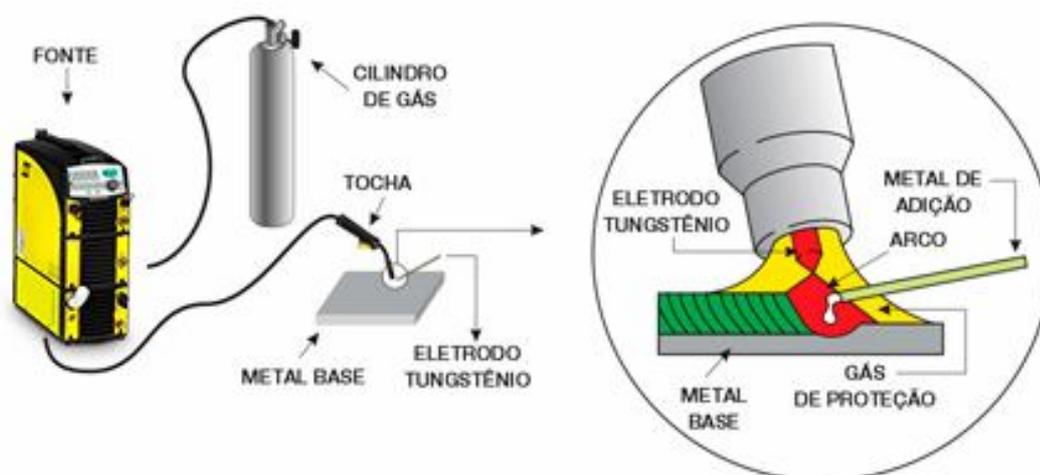
## 2 REVISÃO DA LITERATURA ESPECIALIZADA

### 2.1 O PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem TIG é largamente utilizado em produção e manutenção industrial para soldar chapas de baixas espessuras (0,2 mm a 8 mm) de aços carbono, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, cobre e suas ligas, titânio, zircônio, níquel e suas ligas. Utiliza fonte de energia de corrente contínua (retificador ou transformador), cabos, tochas, gás de proteção e refrigeradores de água. (MARQUES 2007)

TIG (Tungsten Inert Gas), também conhecido como GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é um processo no qual a união de peças metálicas são produzidas pelo aquecimento e fusão através de um arco elétrico entre um eletrodo de tungstênio, não consumível, e as peças a serem unidas. A proteção da poça de fusão e do arco elétrico contra a contaminação atmosférica é feita por uma nuvem de gás inerte ou mistura de gases inertes, conforme ilustra a Figura 1. (MOLDENESI 2007).

**Figura 1.** Equipamentos utilizados na soldagem TIG



Fonte: <http://www.esab.com.br>, 2015

De acordo com (BRANDI, 2011), as principais vantagens do processo de soldagem TIG são:

- Adequada para soldas de responsabilidade (passe de raiz);
- Facilita a soldagem em locais de difícil acesso;

- O processo pode ser mecanizado ou robotizado;
- Oferece alta qualidade e precisão em relação a outros processos de soldagem;
- Ótimas resistências mecânicas da junta soldada;
- Pouca geração de fumos;
- Soldas claras, brilhantes e com ótimo acabamento, sem usar fluxo de limpeza, dispensando acabamento final e reduzindo custos de produtividade;
- Soldagem em todas as posições;
- Versatilidade - solda praticamente todos os metais industrialmente utilizados.
- Entretanto, algumas limitações ainda são encontradas (BRANDI, 2011):
- Dificuldade de utilização em presença de corrente de ar;
- Inadequado para soldagem de chapas de mais de 6 mm;
- Produtividade baixa devido à taxa de deposição;
- Custo do equipamento em comparação com o processo de eletrodo revestido;
- Processo depende da habilidade do soldador, quando não automatizado.

### **2.1.1 Variáveis do processo TIG**

As variáveis envolvidas no processo de soldagem TIG são: a tensão do arco, a corrente de soldagem, velocidade de avanço da tocha e o gás de proteção. Essas variáveis não agem de forma independente, havendo forte interação entre elas, e estão associadas aos equipamentos de soldagem conforme esquematizado na ampliação da Figura 1 (MODENESI, 2006).

De acordo com Marques (2009), a tensão entre o eletrodo e a peça é fortemente influenciada pela corrente do arco, perfil da ponta do eletrodo, distância entre o eletrodo e a peça, e o tipo de proteção gasosa. Por sua vez, o comprimento do arco afeta diretamente a largura da poça de fusão. Há outros fatores que também afetam a tensão como contaminação do eletrodo e do gás de proteção, alimentação imprópria do material de adição, mudanças de temperatura no eletrodo e erosão do eletrodo.

A velocidade de avanço da tocha afeta a penetração e a largura do cordão de solda, sendo esta última, porém, muito mais afetada. Entretanto, muitas vezes, a velocidade torna-se apenas uma consequência a partir da definição de padrões de

qualidade e uniformidade. A forma de alimentação do material de adição é outro parâmetro importante.

Aumentando-se a velocidade de alimentação do arame produz-se soldas com menor penetração e perfis convexos. Diminuindo-se a velocidade, aumenta-se a penetração e tem-se perfis mais achatados. Entretanto, a redução da velocidade tem um limite, pois pode levar a fissuras e falta de material.

A utilização do gás Hélio nos permite obter uma solda com maior penetração, devido ao maior potencial de ionização (MARQUES, 2007).

De forma geral, a corrente de soldagem controla a penetração da solda com efeito diretamente proporcional. Afeta também a tensão do arco, sendo que para um mesmo comprimento de arco, um aumento na corrente causará um aumento na tensão do arco. A utilização de corrente contínua com eletrodo com polaridade CC- oferece elevada penetração e maiores velocidades de soldagem; A corrente alternada é especialmente eficaz na soldagem de materiais com óxidos refratários, como alumínio e magnésio, pois se pode realizar a chamada limpeza catódica, quando o eletrodo encontra-se no pólo positivo.

O principal fator de influência nas características citadas é a emissividade termoiônica, pelo fato do cátodo apresentar diferentes condições em cada uma das polaridades. Considerando que a emissividade termoiônica dos óxidos é maior que a do metal puro e que há uma maior formação de óxidos na periferia do fundido, a maior dimensão da poça de fusão em comparação com o eletrodo, implica em maior emissividade termoiônica da poça de fusão que do eletrodo. Devido a esta diferença, a utilização da polaridade CC- resulta em um arco voltaico de menor aquecimento e penetração, o que é vantajoso para a soldagem de chapas finas, porém o arco apresenta-se instável, com uma elevada taxa de fusão do arame e resulta em uma transferência metálica na qual a gota está sujeita a forças que tendem a projetar a gota para cima ou para os lados. A utilização da polaridade CC+ embora resulte em um elevado aquecimento e penetração, indesejáveis para a soldagem de chapas finas, apresenta uma boa estabilidade do arco, e permite uma transferência metálica por projeção axial, adequada ao processo TIG do alumínio (MODENESI, 2006).

Fazendo uso das características das duas polaridades, é possível estabelecer um melhor controle do aporte térmico com estabilidade do arco através da combinação de intervalos em cada polaridade, ou seja, utilizando corrente alternada com intervalos controlados.

Além da dificuldade de estabilização do arco voltaico, deve-se considerar a complexidade de fenômenos que ocorrem durante a operação de soldagem, para as quais dispõe-se de poucas informações técnicas, tanto com relação ao processo de transferência metálica, como da influência dos parâmetros, tornando difícil a seleção dos parâmetros para os intervalos em cada polaridade.

### 2.1.2 Influência da polaridade

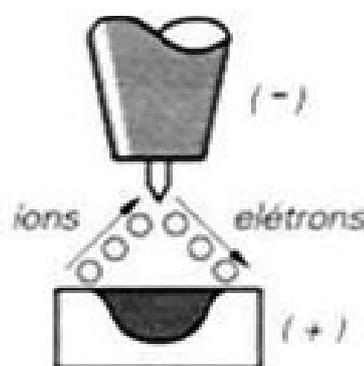
Quando se trabalha com CC (Corrente Contínua), o ignitor de alta frequência é usado apenas para abrir o arco e em seguida é desligado. Geralmente os aparelhos possuem um dispositivo que inibe as faíscas do ignitor quando o arco está aberto. Na soldagem com CC, o circuito pode ter o eletrodo ligado tanto ao polo negativo quanto ao positivo (MARQUES, 2009).

#### - Corrente contínua com polaridade negativa (CC<sup>-</sup>)

Quando o eletrodo está ligado ao polo negativo, CC<sup>-</sup>, os elétrons fluem do eletrodo em altas velocidades, bombardeando o metal de base e provocando um aquecimento considerável nesse metal; a concentração de calor, portanto, é de aproximadamente 70% na peça e 30% no eletrodo (SENAI-SP).

Conforme Figura 2, o cordão de solda obtido com CC<sup>-</sup> é estreito e com grande penetração. Este tipo de corrente é aplicado na soldagem de aço, cobre, aços austeníticos ao cromo-níquel e ligas resistentes ao calor.

**Figura 2** - fluxo da corrente contínua com polaridade negativa

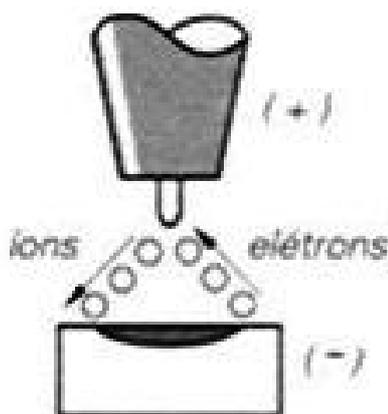


Fonte: SENAI-SP, 2013

### - Corrente contínua com polaridade positiva (CC<sup>+</sup>)

De acordo com a Figura 3, quando ligado ao polo positivo, CC<sup>+</sup>, o eletrodo é positivo e o metal é negativo; os elétrons fluem do metal de base para o eletrodo, o qual se aquece e tende a fundir a extremidade. A concentração de calor é de aproximadamente 30% na peça e 70% no eletrodo. Por esta razão, a soldagem com CC<sup>+</sup> requer um eletrodo com diâmetro maior ou uma corrente mais baixa para evitar o superaquecimento e conseqüente fusão do eletrodo, que contamina a poça de fusão. Esse inconveniente torna a soldagem com CC<sup>+</sup> pouco utilizada, uma vez que não é viável para correntes elevadas. O cordão de solda obtido é largo, com pequena penetração.

**Figura 3** - Fluxo da corrente com polaridade positiva



Fonte: SENAI-SP, 2013

### - Efeito de limpeza

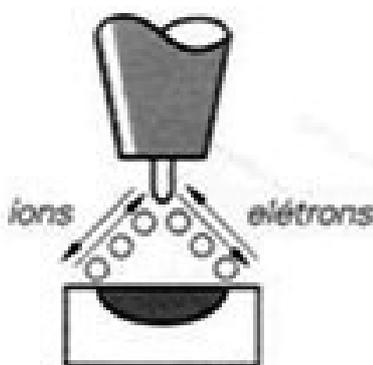
A corrente contínua com polaridade positiva, CC<sup>+</sup>, produz um efeito chamado efeito de limpeza, que é a remoção de camadas superficiais de óxido refratários normalmente presentes nos metais, tais como alumínio e magnésio.

O efeito de limpeza acontece pela ação do arco elétrico: os elétrons que deixam o metal de base ou os íons do gás bombardeiam a película de óxido, causando seu rompimento. No entanto, como a polaridade positiva é pouco utilizada, costuma-se usar a corrente alternada para provocar esse efeito, uma vez que o rompimento do oxido acontece na metade positiva do ciclo.

## - Corrente alternada (CA)

Teoricamente, uma soldagem com CA é uma combinação das soldagens com  $CC^+$  e  $CC^-$ . A corrente assemelha-se a uma onda, cuja parte superior representa a polaridade positiva, ou  $CC^+$ , e a inferior a negativa ou  $CC^-$ . Conforme a Figura 4 os elétrons e os íons partem da peça para o eletrodo e vice-versa, causando uma concentração equilibrada de calor de 50% para cada um e um cordão com penetração média.

**Figura 4** - Fluxo da corrente alternada



Fonte: SENAI-SP, 2013

A CA é aplicada na soldagem de alumínio, magnésio e suas ligas. Na soldagem com CA, o arco tende a extinguir quando a corrente é muito baixa ou nula, uma vez que a corrente cai a zero a cada inversão de polaridade; neste caso, o ignitor deve permanecer ligado para estabilizar a descarga elétrica.

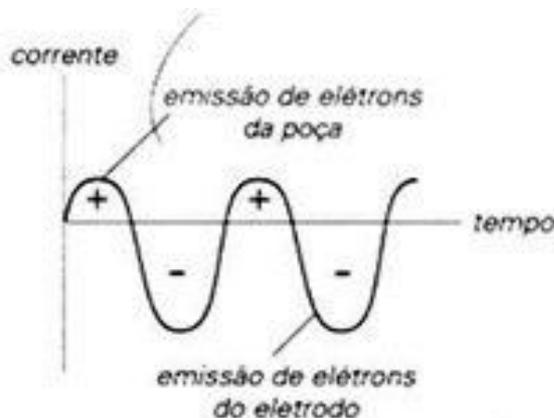
## - Efeito de retificação

Quando se utiliza CA com eletrodo de tungstênio puro, acontece o efeito de retificação, que é a diferença de emissividade eletrônica existente entre o eletrodo de tungstênio e o material que está sendo soldado.

Podemos observar na Figura 5 que na CA existe uma mudança cíclica do fluxo de elétrons, que ora se deslocam do eletrodo de tungstênio para a poça de fusão, ora saem da poça de fusão em direção ao eletrodo. Devido ao efeito de retificação, há um desbalanceamento nesse movimento, tornando a emissão de

elétrons vindos da poça de fusão menor que a emissão de elétrons provenientes do eletrodo; isto provoca o aparecimento de duas senóides de intensidades diferentes.

**Figura 5** - Ciclo da corrente alternada



Fonte: MARQUES 2009

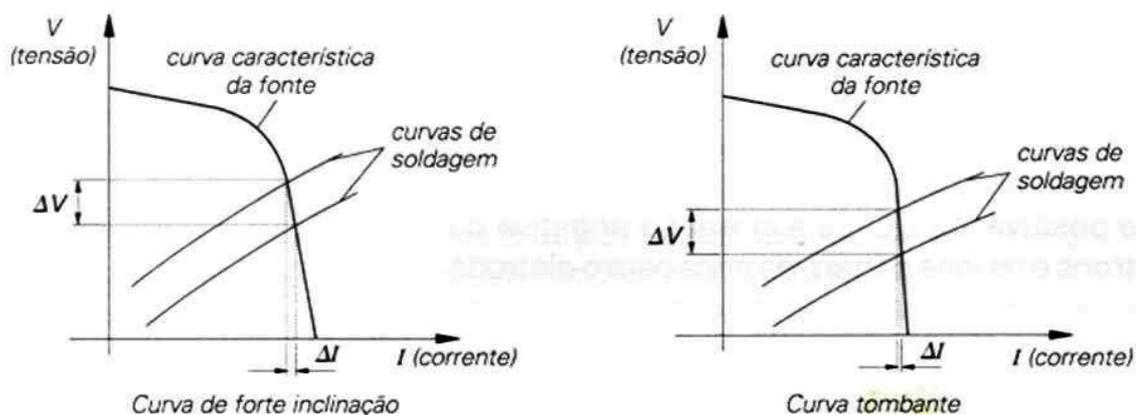
O efeito de retificação é mais prejudicial no caso da soldagem de alumínio e de magnésio, que apresentam óxido refratário, porque o fluxo de elétrons emitido pela poça de fusão não é suficiente para romper completamente a camada de óxido existente durante a soldagem. A fim de atenuar o efeito de retificação, utiliza-se um transformador com condensador-filtro, que equilibra as senóides representantes do fluxo de elétrons.

### 2.1.3 Corrente de alta frequência

De acordo com MARQUES, 2009, quando se trabalha com CA, existe em algumas máquinas um circuito aberto que fornece alta tensão ou alta frequência por meio de um gerador, com as finalidades de permitir a abertura do arco elétrico sem que o eletrodo toque a peça e também promover a reignição do arco, nas situações em que a corrente alternada tende a zero.

Como podem ser observadas na Figura 6, as correntes de soldagem utilizadas no processo TIG apresentam curvas características de forte inclinação ou curvas características tombantes que mostram o comportamento dos parâmetros de tensão e corrente durante a soldagem.

**Figura 6** - Curvas características do processo de soldagem TIG.



Fonte: MARQUES 2009

Segundo MODENESI, 2006, a vantagem da fonte apresentar essas curvas está em que nos arcos voltaicos curtos ou longos, comuns na soldagem manual e que dependem do soldador, a variação de intensidade da corrente de soldagem é reduzida. Isto significa que durante a soldagem, mesmo com grandes variações do comprimento de arco, que provocam variações também grandes de tensão, a intensidade de corrente permanece aproximadamente a mesma.

De acordo com os objetivos de soldagem, selecionam-se as correntes adequadas a cada material, de acordo com a tabela 1.

**Tabela 1.** Tipos de corrente elétrica para cada objetivo

| Corrente        | Objetivo   | Material  |
|-----------------|------------|---|
| CA              | Limpeza    | Al, Mg e suas ligas   |
| CC <sup>-</sup> | Penetração | Aço, Cu, Ni, Ag, aços austeníticos ao Cr-Ni e ligas resistentes ao calor  |
| CC <sup>+</sup> | Limpeza    | Requer eletrodos com diâmetro maior ou correntes baixas (pouco utilizada) |

Fonte: MODENESI, 2006

## 2.2 DIFERENÇAS ENTRE A SOLDAGEM EM OPERAÇÃO E A CONVENCIONAL

A soldagem em operação diferencia-se da soldagem convencional, pois, utiliza processos de soldagem de baixa energia e está associada a um escoamento acelerado de fluidos no interior do tubo. Como consequência, o ciclo térmico de

soldagem é alterado, particularmente, a velocidade de resfriamento tende a ser significativamente maior, trazendo riscos inerentes à fragilização da microestrutura, elevação da dureza. Desta forma pode-se dizer que neste tipo de soldagem há dois riscos a serem considerados. O primeiro deles é a formação de trincas a frio (TF). O segundo é a possibilidade de excessiva penetração do metal de solda na parede do duto, que está sendo soldado, podendo causar a perfuração do tubo. Na sequência são apresentados de forma mais detalhada destes problemas (PAES, 2000).

A TF se forma devido à alta concentração de hidrogênio na solda (que pode estar presente no metal de base, no ambiente e até mesmo no revestimento dos eletrodos, se estes não recebem um tratamento adequado), à uma microestrutura susceptível (martensita ou bainita), à presença de tensões residuais e baixa temperatura (COE, 1973). A coexistência de todos estes fatores implica, conseqüentemente, na ocorrência das TF, que são as descontinuidades mais significativas com respeito à integridade da tubulação e somente ocorrem sob as condições citadas. A ocorrência deste tipo de trincas se dá, particularmente em processos de soldagem de baixa energia, ocorrendo, normalmente, na Zona Termicamente Afetada (ZTA) e na Zona Fundida (ZF) (MODENESI, 2006). O fenômeno da perfuração da tubulação poderá ocorrer caso a área não fundida adjacente à poça de fusão não tenha resistência suficiente para suportar as tensões provenientes da pressão interna da tubulação (BRUCE, 2000). O risco de perfuração é devido à sobre penetração do arco, e depende não somente da espessura da parede, mas também dos parâmetros de soldagem (tensão, corrente, velocidade de soldagem) e das condições de operação do duto (vazão, pressão, temperatura e propriedades térmicas do fluido). A penetração aumenta com o aumento do aporte térmico e com o aumento do potencial de hidrogênio do processo de soldagem (Bruce, 2000). Este risco diminui à medida que se reduz a penetração da solda e se aumenta a espessura da parede da tubulação. A perfuração da tubulação durante a soldagem normalmente não leva a rupturas catastróficas, porém, uma parada total do sistema de escoamento se torna necessária (BRUCE, 2000a). No entanto, resulta no vazamento do fluido e problemas para a segurança do soldador e operadores do sistema. Além do perigo físico do vazamento em si, o produto pode ainda ser tóxico ou inflamável. Processos de soldagem de baixo hidrogênio, tais como TIG e Eletrodo Revestido com revestimento tipo básico, associados a um aporte térmico baixo, resultam numa condição de menor penetração (BRUCE, 2000b). Mas, na soldagem

de tubos de espessura mais elevada, acima de 6mm, onde o risco de perfuração é mínimo, a adoção de aportes térmicos altos, para minimizar o risco do aparecimento de trincas a frio, é um procedimento frequentemente utilizado.

### 2.3 CONSUMÍVEIS E GASES UTILIZÁVEIS

Os consumíveis principais na soldagem TIG são os gases de proteção e as varetas de metal de adição. Os eletrodos de tungstênio, apesar de serem ditos não consumíveis, se desgastam durante o processo, devendo ser reconicionados e substituídos com certa frequência, assim como os bocais de gás (CORSINI, 2005).

O metal de adição para a soldagem manual é fornecido na forma de varetas com comprimento em torno de 1,0 m. Para a soldagem mecanizada, o metal é fornecido na forma de um fio enrolado em bobinas com diferentes capacidades, dependendo do equipamento usado. Os diâmetros dos fios e varetas são padronizados e variam entre 0,5 e 5 mm aproximadamente. Metais de adição estão disponíveis numa ampla faixa de materiais e ligas. Geralmente a composição química de metais de adição tem limites de tolerância muito inferiores aos de metal de base do mesmo tipo e custo bem mais elevado. Eles são classificados de acordo com sua composição química e com as propriedades mecânicas do metal depositado. A escolha do metal de adição para uma determinada aplicação é feita em função da composição química e das propriedades mecânicas desejadas para a solda. Em geral se usa metal de adição similar ao metal de base, mas não necessariamente idêntico (MARQUES, 2009).

O diâmetro do fio ou vareta é escolhido em função da espessura das peças a unir, da quantidade de material a ser depositado e dos parâmetros de soldagem. Os catálogos dos fabricantes geralmente apresentam informações úteis na escolha de metal de adição e aplicações típicas dos produtos.

Os eletrodos mais comumente usados são varetas sinterizadas de tungstênio puro ou com adição de elementos de liga, tória (óxido de tório) ou zircônia (óxido de zircônio) e sua função é conduzir a corrente elétrica até o arco. A capacidade de condução varia com a composição química, com o diâmetro do eletrodo e com o tipo de corrente de soldagem a ser usada.

Eletrodos de tungstênio puro têm menor custo e são usados com corrente alternada. São apontados por meios químicos ou mecânicos, antes de se iniciar a

operação de soldagem e, no caso de soldagem mecanizada, a configuração da ponta do eletrodo pode ser uma variável importante para se garantir uma boa repetitividade de resultados. Eletrodos com adição de zircônia apresentam melhor desempenho que eletrodos de tungstênio puro e também são usados com corrente alternada. Eletrodos com adição de tório são normalmente usados com corrente contínua.

A escolha do eletrodo de tungstênio para sua solda TIG está relacionado com o material que será soldado.

O eletrodo puro é considerado o "comum" e também é o mais barato deles. Contém 99,50% de tungstênio. Estes eletrodos, formam uma pequena bola em sua ponta após ser utilizado, e fornecem uma excelente estabilidade no arco em soldagem TIG AC. Utilizado para soldagens de alumínio e magnésio, não deve ser utilizado em soldagens TIG DC (eletrodos com Tório ou Cério, oferecem melhor estabilidade de arco nesta situação) ([www.dbceducacional.com.br](http://www.dbceducacional.com.br)).

O eletrodo com tório contém no mínimo 97,30% de tungstênio e entre 1,7 e 2,2% de Tório. São os eletrodos mais utilizados atualmente, preferidos por causa da excelente vida útil e facilidade de uso. O tório aumenta a qualidade de emissão de eletrodos no arco, o que proporciona facilidade para iniciar o arco e soldagens com alta corrente. Este tipo de eletrodo opera muito abaixo de sua temperatura de fusão, o que significa baixo desgaste e baixo risco de contaminação. É o eletrodo ideal para soldagem de aço carbono, aço inoxidável, níquel e titânio.

O eletrodo com cério contém no mínimo 97,30% de tungstênio e entre 1,80 e 2,20% de Cério. Estes eletrodos tem sua melhor performance em soldagem TIG DC em baixa amperagem, e também pode ser utilizado, com eficiência, em soldagem TIG AC. Este eletrodo tem uma abertura de arco excelente em baixa amperagem e é popular para quem solda tubos, pequenas peças, materiais finos e delicados, etc. É uma escolha que substitui os eletrodos com tório e pode ser usado em aço carbono, aço inoxidável e titânio. Não é recomendável soldagens em altas amperagens com este eletrodo. Nestas situações, o óxido de cério emigra rapidamente para a ponta quente do eletrodo, removendo o óxido e anulando seus benefícios. Curiosamente, um soldador dificilmente distinguirá se está soldando um eletrodo com cério ou tório.

O eletrodo com lantânio contém no mínimo 97,8% de tungstênio e entre 1,30 e 1,70% de lantânio. Estes eletrodos tem uma excelente abertura de arco, estabilidade e re-ignição do arco. Ele pode substituir eletrodos com tório, sendo usados em

processos de soldagem tanto AC como DC, mas mostra suas vantagens em soldagem de aços inoxidáveis, usando fontes pulsadas. Este eletrodo é uma excelente escolha para evitar ter estoque de diversos tipos de eletrodos. A cor da ponta, muda de acordo com o percentual de Lantânio no eletrodo.

O eletrodo com zircônio contém no mínimo 99,1% de tungstênio e entre 0,15 e 0,40% de Zircônio. Este eletrodo produz um arco extremamente estável e resistente a “tungstens pitting”. É perfeito para soldagens TIG AC, e mantém a ponta com muita resistência a contaminação. Em nenhuma circunstância, ele é recomendado para soldagens TIG DC. A cor da ponta muda conforme o percentual de zircônio no eletrodo. Recomendado para soldagem de ferro, aço carbono e aço inoxidáveis.

De acordo com MACHADO 2005, se aumentar o diâmetro do eletrodo, pode-se soldar com maiores correntes, mas também será mais difícil iniciar o arco, do que quando usando um eletrodo mais fino. Eletrodos com diâmetros maiores, também são mais resistentes a eletro-erosão, portanto mais duráveis, mas se aumentar excessivamente o diâmetro, pode-se ter problemas de instabilidade no arco de soldagem. Comumente os valores dos diâmetros variam entre 1,2mm a 8mm.

A preparação/afiação de um eletrodo de tungstênio para utilização é uma variável muito importante na qualidade final da solda, tão importante como a escolha do tipo a ser utilizado. Se o eletrodo utilizado não estiver preparado/afiado de acordo, não conseguirá soldar com eficiência e qualidade. A afiação do eletrodo é diretamente responsável por: facilidade de início do arco, estabilidade do arco, menor deterioração da ponta do eletrodo, regularidade e geometria da solda e prevenção contra contaminação. A afiação deve ser preferencialmente no sentido longitudinal e concêntrico (também conhecida como afiação axial), assim as linhas na superfície do eletrodo se moverão no mesmo sentido dos elétrons. Afiação lateral pode, em alguns casos, não permitir a abertura do arco com precisão necessária. Os discos diamantados são os recomendáveis, já que o tungstênio é um dos metais mais duros que existem. O comprimento da ponta afiada deve ficar em duas vezes o diâmetro do eletrodo. Quanto menor os comprimentos da ponta, maior será o ângulo e esse formato da afiação do eletrodo de tungstênio influencia diretamente o formato do arco de soldagem, influenciando inclusive na penetração da solda, vida útil do eletrodo, velocidade com que se consegue soldar e corrente necessária.

## 2.4 INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA TOCHA DE SOLDAGEM

A posição da tocha influencia diretamente na qualidade da solda e também na durabilidade do eletrodo de tungstênio. De acordo com MODENESI 1998, na soldagem com ângulo positivo, o arco elétrico é direcionado para a parte fria do material, onde ainda não foi soldado, dissipando o calor e proporcionando um cordão largo, de reforço discreto e pequena penetração. Na soldagem com ângulo negativo, o arco é direcionado para a parte quente do material, onde já foi soldado, concentrando o calor e proporcionando um cordão estreito, de considerável reforço e grande penetração.

## 2.5 INFLUÊNCIA DOS GASES

Os gases de proteção usados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio, o hélio e misturas destes. Em alguns casos são usadas misturas especiais que contêm hidrogênio para soldagem de aços inoxidáveis, e as que contêm nitrogênio, opcionais na soldagem de cobre e suas ligas. Na soldagem pelo processo TIG deve-se tomar alguns cuidados em relação aos gases envolvidos no processo. Estes devem ter elevada pureza e o teor de umidade também deve ser bem controlado. O argônio utilizado neste processo de soldagem normalmente possui uma pureza de 99,95 %, sendo aceitável para a maioria dos metais, excetuando-se aqueles reativos ou refratários. Os gases utilizados no processo de soldagem TIG apresentam diferentes características. Na escolha de um gás deve-se levar em conta as suas características, as quais devem cumprir as necessidades da solda (BRANDI, 2011).

Através das características dos gases argônio e hélio, percebe-se que o uso do argônio possui certas vantagens em relação ao hélio, por isso o argônio é mais utilizado que o hélio neste processo de soldagem. O Hélio transmite maior calor para uma mesma corrente que o argônio e, portanto, é particularmente importante na soldagem de peças espessas ou materiais com alta condutividade térmica, como o cobre. Características intermediárias podem ser obtidas através da mistura dos dois gases. A principal característica envolvida no processo de proteção é a densidade dos gases. Neste aspecto, o argônio, por ter uma densidade aproximadamente dez vezes maior que a do hélio, forma uma camada sobre a área de solda após deixar o

bocal, ao contrário do hélio que, por ser extremamente leve, tende a subir em torno do bocal ao deixá-lo. Assim, para prover a mesma eficiência de proteção, a vazão de hélio deverá ser de 2 a 3 vezes maior que a vazão de argônio (BRANDI,2011).

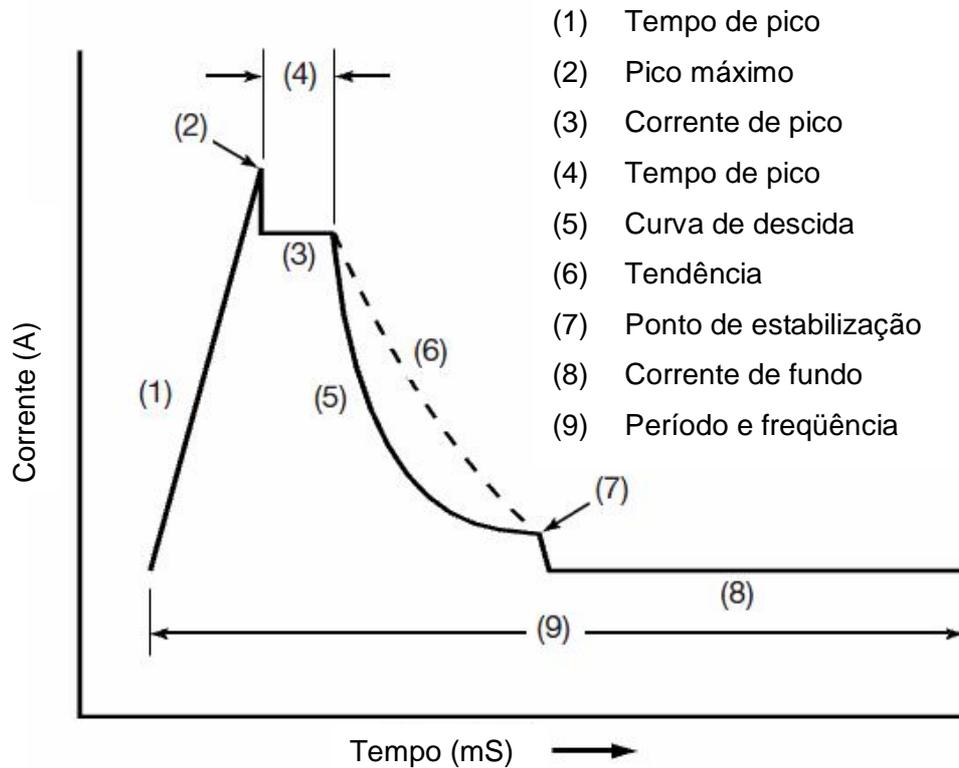
Em relação ao arco, as características dos gases são definidas pela sua curva tensão-corrente. Como se pode avaliar pelas curvas, a tensão do arco obtido com hélio é significativamente maior que com o argônio. Assim sendo, o hélio fornece mais calor ao processo, permitindo as vantagens discutidas acima (BRANDI 2011).

Misturas de argônio e hidrogênio também podem ser utilizadas, especialmente em casos de soldas mecanizadas de tubos finos de aço inoxidável. Aumento na velocidade pode ser obtido de forma diretamente proporcional à quantidade de hidrogênio adicionada à mistura, limitado, entretanto, para não permitir a porosidade.

As misturas mais comuns deste tipo contém cerca de 15 % de Hidrogênio. A vazão de gás é baseada no movimento do ar, no tamanho do bocal e na dimensão da poça. O ponto mínimo é determinado pela necessidade de manutenção de uma corrente firme do gás, enquanto vazões excessivas causam turbulência que pode aspirar contaminantes da atmosfera. Quando o ambiente for sujeito a ventos cruzados, devem-se introduzir telas de proteção, ao invés de aumentar a vazão do gás, o que além de mais oneroso pode levar ao problema da turbulência (MARQUES, 2009).

A soldagem TIG por fonte pulsante é relativamente nova e envolve a variação repetitiva da corrente do arco entre um valor mínimo ("background") e um valor máximo ("high peak"), conforme mostrado no gráfico da Figura 04. A deposição do metal ocorre durante o pico de corrente, formando uma pequena deposição a cada pulso. O pico do pulso produz a penetração desejada rapidamente e a corrente base mantém o arco aberto entre os pulsos. A fonte pulsante permite um ganho na penetração sem que haja excessivo fornecimento de calor a região ao redor da solda (o pico é longo o suficiente para fundir o metal de adição ao metal base na penetração necessária - caso haja metal de adição). Durante a fase de baixa corrente a região fundida tem tempo suficiente para se estabilizar (em alguns casos ele esfria e solidifica).

**Figura 7.** Comportamento da corrente elétrica fornecida pela fonte.



Fonte: SENAI-SP, 2013

Na Tabela 2 pode ser notado uma comparação entre os processos de soldagem. Observa-se claramente por que o processo de soldagem TIG por corrente pulsada é pouco difundido. Nela pode ser observada que o custo do processo por gerador pulsado chega a ser 5 a 6 vezes mais caro que os processos TIG convencionais.

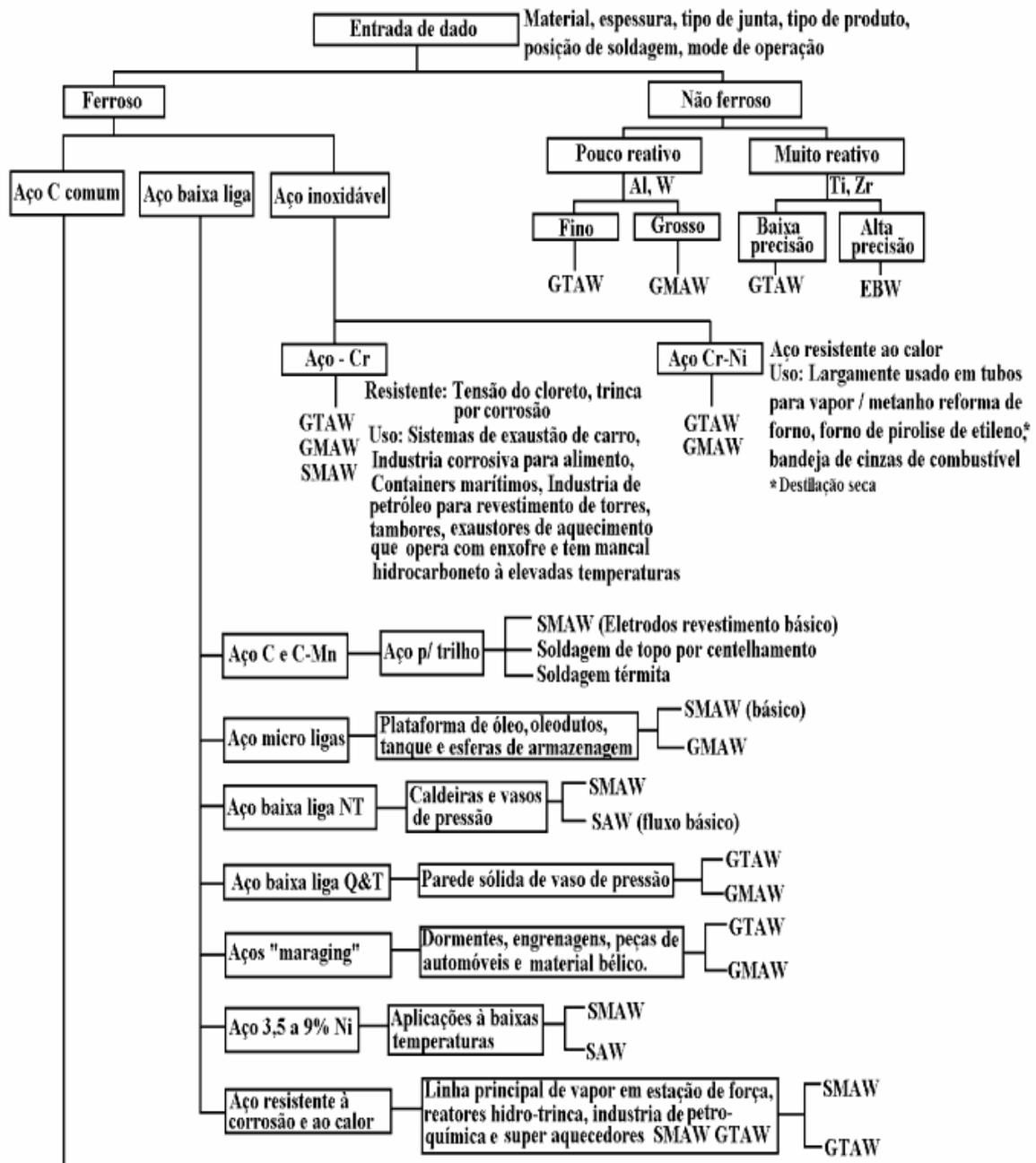
**Tabela 2.** Comparativo entre os processos de soldagem.

| <b>Processo</b>                  | <b>Unidade de custo</b> | <b>Consumíveis usados</b> | <b>Modo de operação</b> |
|----------------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Eletrodo revestido (SMAW)        | 1                       | Eletrodos                 | Manual                  |
| SMAW portátil, montagem em geral | 3                       | Eletrodos                 | Manual                  |
| Eletrodo revestido longo         | 4                       | Eletrodos                 | Automático              |
| Soldagem à arco submerso         | 10                      | Fluxo, arame              | Automático              |
| Eletroescória (com eletrodo)     | 20,5                    | Fluxo, arame              | Automático              |
| Eletroescória guia consumível    | 4                       | Fluxo, arame              | Automático              |
| TIG (d.c.)                       | 1,5                     | Gás, arame (+/-)          | Manual, automático      |
| TIG (a.c.)                       | 2,5                     | Gás, arame (+/-)          | Manual, automático      |
| TIG (pulsado)                    | 6-10                    | Gás                       | Automático              |
| Micro plasma                     | 2,5                     | Gás                       | Manual, automático      |
| MIG/MAG                          | 1,5-5                   | Gás, arame                | Manual, automático      |

Fonte: AWS, 1998

## 2.6 SELEÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM

Para selecionar o processo de soldagem deve-se inicialmente levar em consideração os materiais, posição de soldagem, tipo de produto e tipo de junta. Dai deve-se ter cuidados especiais de acordo com o que mostra na tabela 3 a seguir.

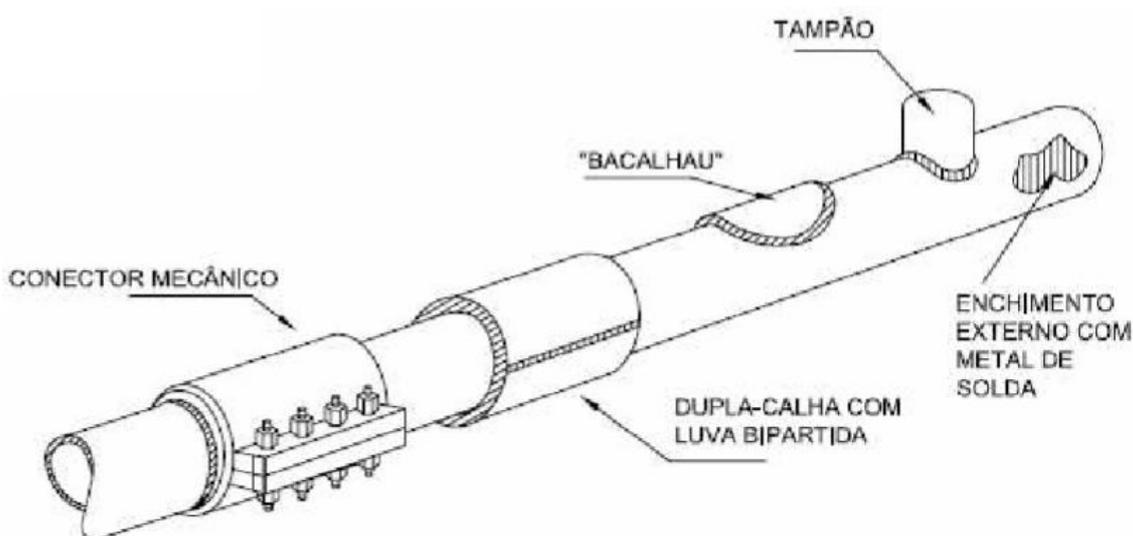
**Tabela 3.** Fluxograma para selecionar o processo de soldagem

Fonte: AWS, 1998

A API 570, no item 8.2, especifica que a soldagem em operação deve ser conduzida com procedimentos e soldadores qualificados com os critérios de publicação API 2201. As normas API 570 e 2201 especificam, para esses casos, que os procedimentos de soldagem e soldadores devem ser qualificados pela norma ASME IX em conjunto com a de construção ASME B31.3. Devido a presença de fluxo deve-se usar os critérios de soldagem em operação da norma ASME PCC-2.

A intervenção do reparo pode ser conforme mostra a Figura 8: um conector mecânico, dupla calha, bacalhau, tampão ou enchimento externo com metal de solda. Para qualquer reparo é recomendado uma análise técnica, e para tal sugere-se uma avaliação teórica envolvendo a rotina de trabalho para manutenção de dutos em operação, e outra prática em bancada de testes usada como simulador. Deve-se, entretanto gerar um relatório com resultados que deverão ser coletados para posterior treinamento teórico e prático com objetivos bem definidos.

**Figura 8.** Tipos de reparos em dutos.



Fonte: PETROBRÁS - API 570, 2008

Todo trabalho de soldagem em duto de gás natural em operação somente poderá ser executado após a verificação e a execução de todas as hipóteses de isolamento, purga, esvaziamento ou outra ação que venha a minimizar os riscos decorrentes da atividade. Além do que determina esta Especificação, devem ser obedecidas todas as condições estabelecidas nos procedimentos específicos de permissão de trabalho(PT).

A efetiva realização da soldagem e furo em duto de Gás Natural em operação somente poderá ser executada após análise detalhada, feita em reunião da qual devem participar os seguintes órgãos ou responsáveis pelas atividades de:

- a) operação;
- b) execução;
- c) segurança;
- d) projeto.

Para execução dos serviços devem ser considerados os seguintes itens:

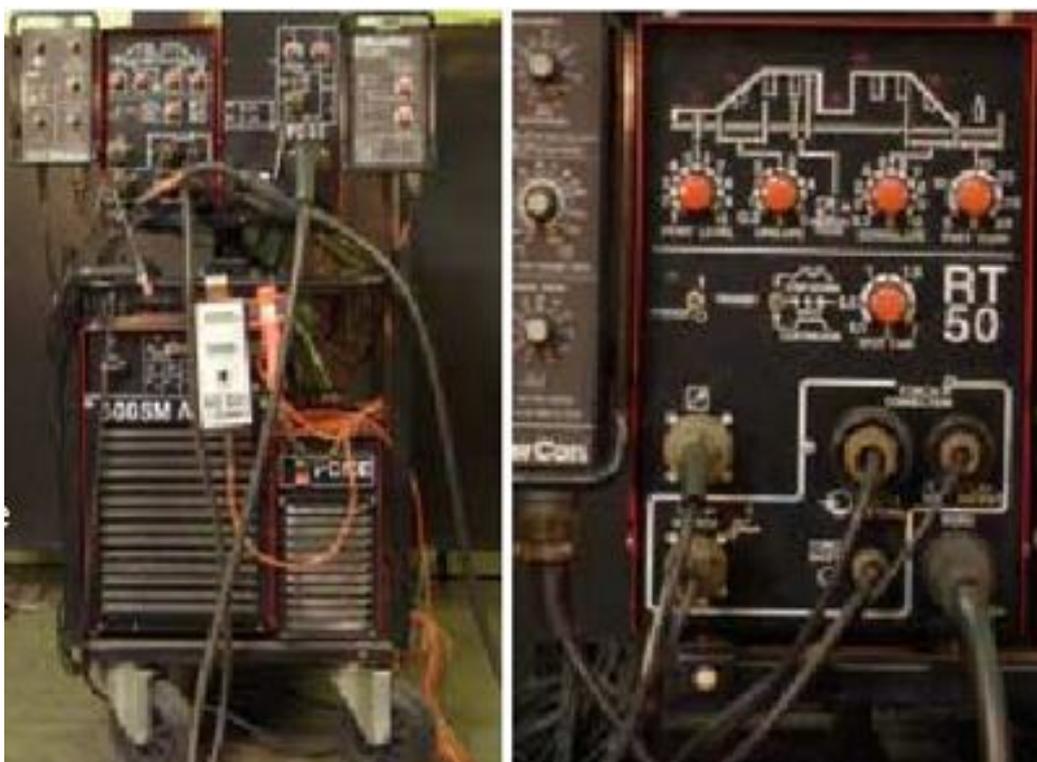
- a) pressão e temperatura do gás natural contido ou em fluxo no interior do duto;
- b) vestuário e equipamentos de proteção individual (EPI) para os soldadores e todo o pessoal envolvido no local dos trabalhos;
- c) acompanhamento pelo pessoal de operação durante todo o decorrer dos trabalhos, os quais devem ter alguma ação em caso de emergência, dispondo de meios rápidos e eficazes de comunicação;
- d) conhecimento por parte de todo o pessoal envolvido dos serviços normais que possam vir a ser afetados pelos trabalhos ou por situações de emergência geradas por eles, quando da realização dos trabalhos;
- e) perigos potenciais, no local dos trabalhos (vazamento, fogo, etc.);
- f) vias de escape desobstruídas e dotadas de iluminação com o respectivo conhecimento de todos os envolvidos, direta ou indiretamente, com os trabalhos;
- g) condições do duto, bem como seu histórico de inspeção, se houver, antes do início dos trabalhos, tais como: material de construção, espessura da parede no local dos trabalhos, soldas pré-existentes, falhas, trincas ou descontinuidades, corrosão;
- h) tipo de acessório ou derivação a ser instalada e forma de fixação da mesma ao duto;
- i) condições do acessório ou derivação a instalar: material de construção, vedação, falhas, etc.;
- j) procedimento de soldagem a ser adotado: processo e técnica de soldagem, tipo de eletrodo a empregar, qualificação do soldador, etc.;
- k) condições da(s) máquina(s) de soldagem;
- l) condições da máquina de furação em operação (“hot tapping machine”),
- m) verificando o seu manual, conhecimento e domínio da operação por parte do pessoal envolvido;
- n) lista de todos os equipamentos, materiais e acessórios necessários aos trabalhos de soldagem e de furação;
- o) planejamento das ações de controle de emergência, incluindo pessoal equipamentos, abrangendo no mínimo combate ao fogo, primeiros socorros, resgate, evacuação de área e interdição;
- p) determinação da pressão de teste nos acessórios, com base nos dados de

- projeto da instalação;
- q) consequências do resíduo gerado pela furação em equipamentos desprovidos de filtros, instalados no sistema.

## 2.7 EQUIPAMENTOS PARA SOLDAGEM TIG

A soldagem TIG é realizada através de um equipamento para soldagem constituído por fonte de corrente elétrica do tipo corrente contínua, com valor de saída ajustável para cada operação e pode ser contínua, alternada ou pulsada. Pode ser convencional ou eletrônica. Algumas fontes convencionais podem fornecer tanto corrente contínua como corrente alternada e as fontes eletrônicas também permitem operação com corrente pulsada. O controle é baseado no uso de transistores. Capacidade: corrente mínima em torno de 5 a 10A e máxima na faixa de 200 a 500A podem ser usadas também para soldagem com eletrodos revestidos. A Figura 05 mostra o painel do equipamento para soldagem TIG com zoom lateral (MARQUES, 2000).

**Figura 9.** Painel frontal do equipamento TIG com zoom lateral



Fonte: MODENESI, 2007

### 2.7.1 A Tocha

A tocha tem como função suportar o eletrodo de tungstênio e fornecer o gás de proteção de forma apropriada. Podem ser refrigeradas pelo próprio gás de proteção (capacidade até 150 A) ou a água (em geral com capacidade entre 150 e 500 A). Neste caso é comum a fonte ter um circuito fechado de refrigeração composto por reservatório, motor elétrico, bomba e radiador. Internamente elas têm uma pinça, que serve para segurar o eletrodo de tungstênio e fazer o contato elétrico. Elas possuem ainda bocal cerâmico para direcionamento do fluxo de gás), fornecidos em diversos diâmetros. O diâmetro do eletrodo e do bocal devem ser escolhidos em função da espessura da peça a ser soldada e da corrente a ser usada. A Figura 6 mostra a tocha da máquina TIG. Chamada também de caneta devido à semelhança quando desmontada.

**Figura 10.** Foto da tocha de máquina TIG



Fonte: SENAI-SP, 2013

### 2.7.2 Dispositivos especiais

Dispositivos especiais podem ser usados para melhorar a eficiência da proteção gasosa, como os “gás lens” e os “trailing Shields”. A fonte de gás protetor consiste de um cilindro ou cilindros de gás inerte e reguladores de pressão e vazão de gases. Quando diferentes misturas de gás devem ser usadas com certa frequência, misturadores podem ser uma opção interessante. Misturadores para

vários gases estão disponíveis comercialmente mas podem também ser construídos para situações específicas. Economizadores de gás e válvulas elétricas (solenoide) podem também ser usadas para otimizar o consumo e a operação (MARQUES, 2009).

Na soldagem com eletrodos consumíveis a abertura do arco é feita tocando o eletrodo na peça, mas na soldagem TIG isto não é recomendado pois favorece a transferência de tungstênio para a peça, além de danificar o eletrodo (MACHADO 1996).

“Vários dispositivos podem ser usados para iniciar o arco piloto, ignitor de alta frequência” e controle da corrente inicial:

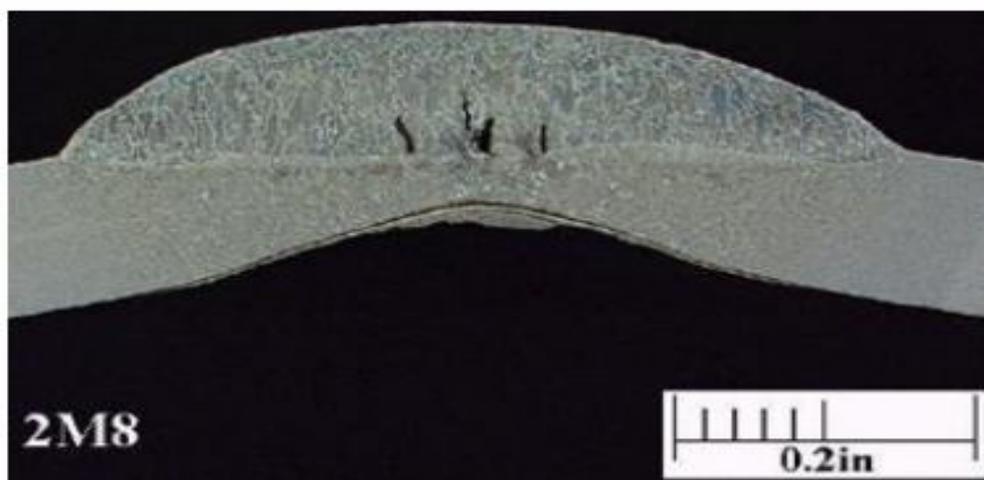
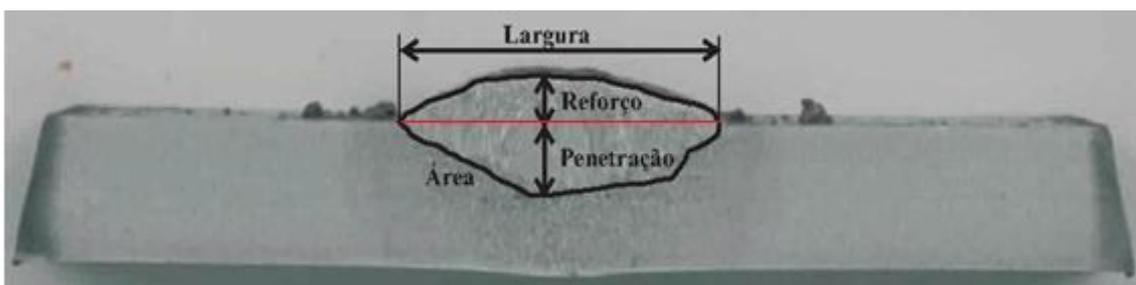
- Arco piloto: necessita de eletrodo e fonte decorrente secundários, pouco usado.
- Rampa de corrente: usada apenas em fontes eletrônicas.
- Ignitor de alta frequência: um aparelho que gera um sinal de alta tensão e de alta frequência (3k, 5kHz) superposto à corrente de soldagem e produz a ionização da coluna de gás entre eletrodo e peça.

## 2.8 ENSAIOS MACROGRÁFICOS

O objetivo do ensaio de macrografia é obter dados sobre um corpo de prova, tais como as suas características e homogeneidade, através do ataque de sua superfície por um reagente químico, pelo método de impressão de Baumann. Sua função consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma secção plana devidamente polida e em regra atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macro-estrutura. O exame é feito à olho nu ou como auxílio de uma lupa. A palavra macrografia é também empregada para designar os documentos que reproduzem a macro-estrutura em tamanho natural ou com ampliação máxima de 10 vezes. A macrografia possibilita a observação da heterogeneidade química existente, resultante da estrutura de solidificação, assim como as alterações sofridas por esta e devidas a tratamentos posteriores. Pode evidenciar a distribuição das impurezas metálicas, não metálicas e gasosas contidas na estrutura. A análise macrografia permite igualmente detectar a presença de fissuras, bolhas, porosidades, gotas frias e a ZTA (Zona Termicamente Afetada) (TEXEIRA, 2011).

A Figura 07 mostra macrografia dos cordões de solda onde estão indicadas as características da soldagem quanto à largura, reforço e penetração da área soldada. Nela podem ser mensuradas com maior exatidão as áreas referentes as larguras do cordão de solda, reforço do cordão de solda, penetração do cordão de solda e o dimensionamento da ZTA (Zona Termicamente Afetada) (TEXEIRA, 2011).

**Figura 11.** Macrografia em cordões de solda.



Fonte: TEXEIRA, 2011

Podemos observar na Figura 11 a existência de discontinuidades inerentes ao próprio metal, como porosidades e segregações. O ensaio permite ainda determinar a existência de soldas no material, além de revelar as várias zonas existentes na solda e suas características, tais como número de passes, existência de goivagem e forma do chanfro. As heterogeneidades podem ser cristalinas, químicas e mecânicas; as cristalinas compreendem granulação grosseira, profundidade de têmpera e zona afetada pelo calor (ZAC); as químicas abrangem profundidade da carbonetação, zonas descarbonetadas, segregação e inclusões não metálicas, principalmente sulfetos; as mecânicas dizem respeito a regiões

encruadas, em que se destacam a dissolução e coloração seletivas, provocadas pelo ataque, além de trincas e poros imperceptíveis a olho nu que podem ser evidenciados por corrosão (COLPAERT, 2008).

## 2.9 MACROESTRUTURA

De acordo com COLPAERT 2008, a macroestrutura, que é o resultado do ensaio, pode-se apresentar sob diversos aspectos, devido às heterogeneidades do material, as quais podem reagir de maneiras diferentes ao serem atacadas.

É possível obter uma boa textura com ataques rápidos e superficiais, embora muitas vezes seja necessário utilizar ataques lentos e mais profundos, como no caso de texturas fibrosas.

Existem texturas que são mais facilmente visualizadas quando se faz um segundo lixamento seguido ou não de um novo ataque rápido, como no caso de texturas fibrosas dendríticas, união por caldeamento, segregação e poros.

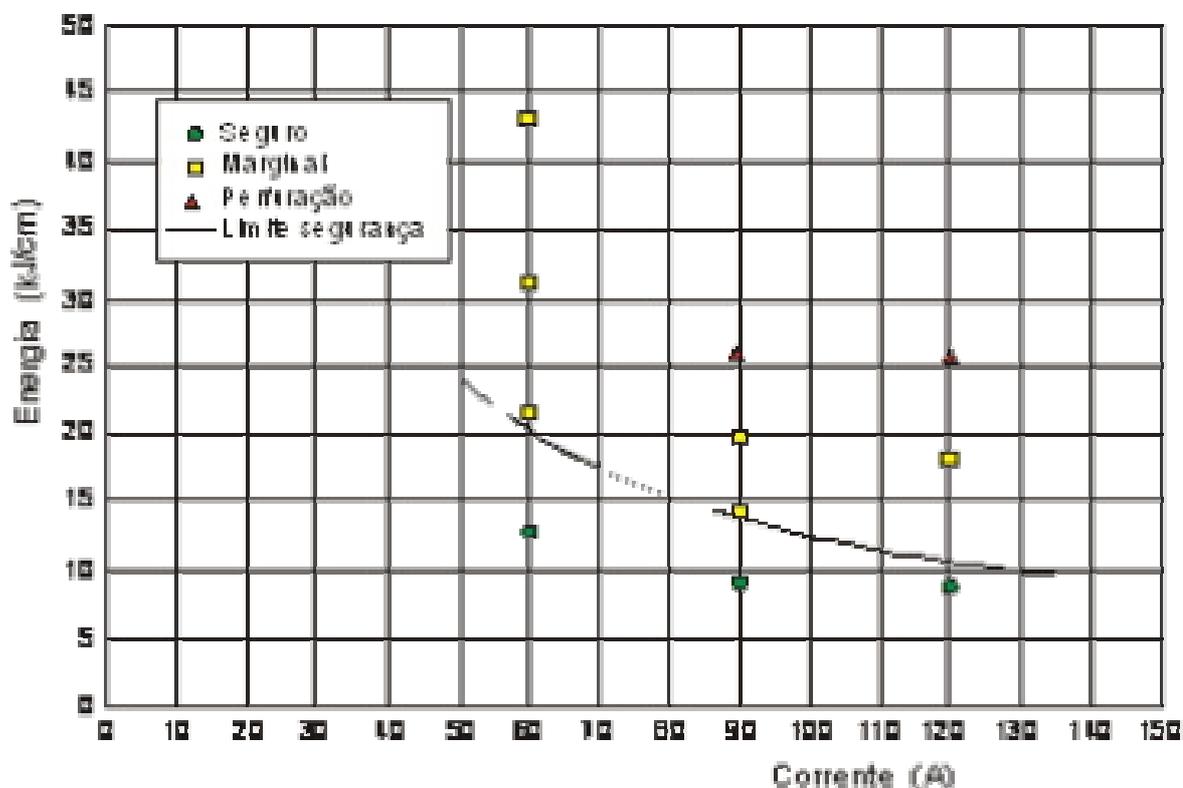
O mesmo, porém, não pode se dizer para caso de texturas encruadas, brutas de fusão, profundidade de carbonetação, granulação grosseira, profundidade de têmpera, regiões ricas em carbono ou fósforo e zonas afetadas pelo calor, em que um novo lixamento faz a textura desaparecer parcial ou totalmente.

A reflexão da luz causa imagens diferentes no olho do observador: nas zonas brilhantes as imagens são claras; nas zonas corroídas e nas zonas de descontinuidades as imagens são escuras; nas regiões recobertas por produtos das reações as imagens são foscas.

## 2.10 LIMITES PARA EVITAR PERFURAÇÃO

A Figura 12 mostra como foi definido o limite de aporte térmico para evitar perfuração, observando-se que a curva foi ajustada de forma relativamente arbitrária entre pontos experimentais classificados qualitativamente. Fonte: BRUCE 2000.

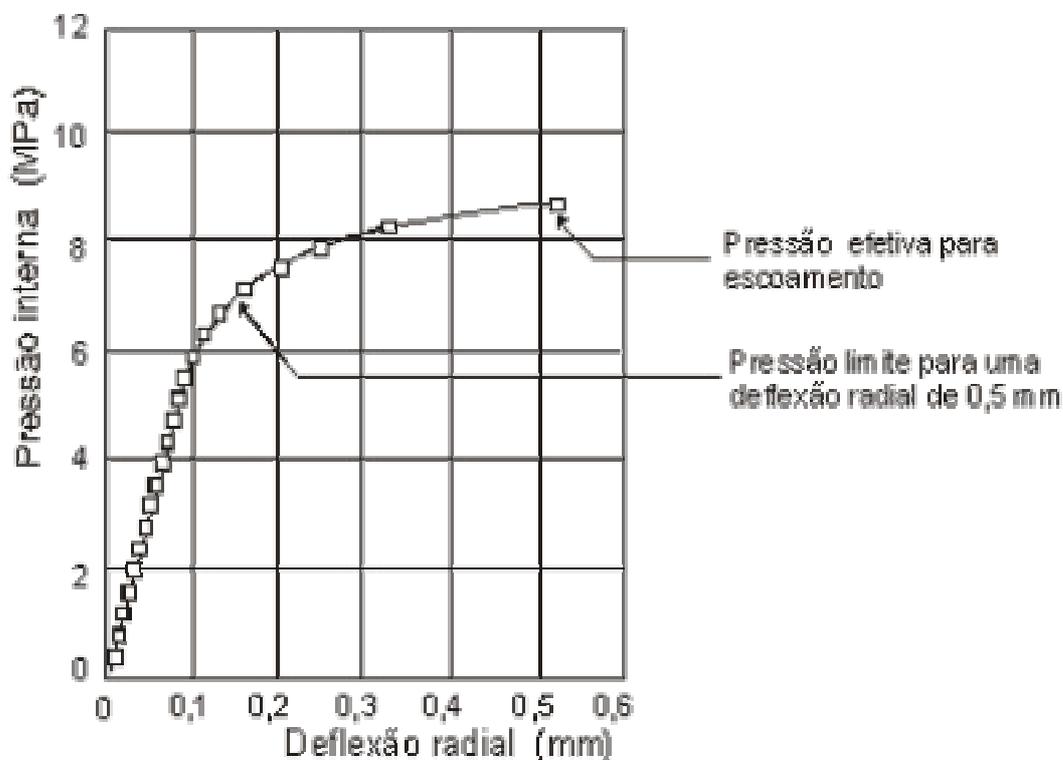
**Figura 12.** Ilustração do critério utilizado para definir o limite de aporte térmico em função da aparência macrográfica das soldas



Fonte: (BRUCE, 2000).

Sabapathy *et al.* aplicaram o método de elementos finitos tri-dimensional para determinar o campo de temperaturas em regime estável (isto é, quando já foram atingidas as temperaturas máximas e é mais provável que ocorra perfuração). Mediante uma análise termo-elasto-plástica, determinaram a deflexão do material no sentido radial em função da pressão do fluido, como mostra o gráfico na Figura 13. Segundo os autores, o ponto onde a curva se desvia do comportamento linear pode ser considerado um limite de escoamento efetivo local, que representaria o limiar para ocorrer perfuração.

**Figura 13.** Deflexão radial calculada em função da pressão do fluido, para a soldagem de um tubo de 3 mm de espessura utilizando aporte térmico de 7,5 kJ/cm



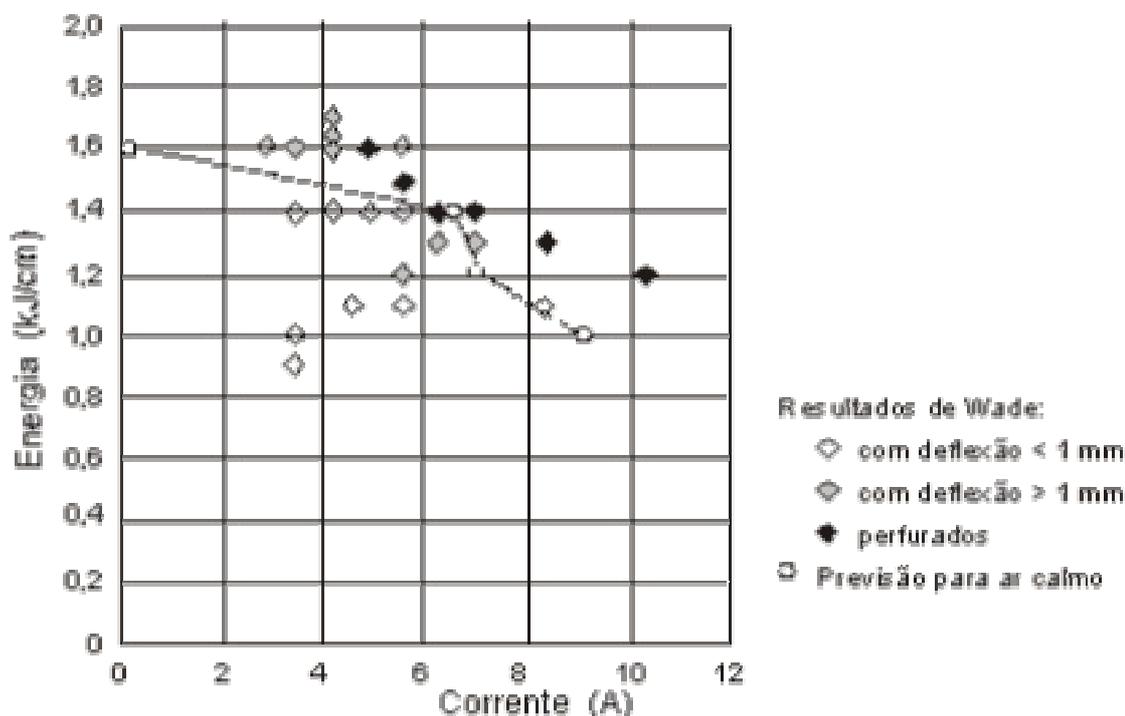
Fonte: (SOARES, 2013)

Embora esse método possa fornecer resultados confiáveis e considerar a influência da pressão sobre a perfuração, é bastante demorado. Portanto, os autores propõem outro método mais simples e rápido, que consiste em calcular as dimensões de uma cavidade equivalente, com base no campo de temperaturas e a relação entre a tensão de escoamento do material e a temperatura. A partir daí, a pressão máxima que pode suportar o tubo tendo essa cavidade pode ser determinada utilizando métodos teórico-experimentais confirmados em ensaios de arrebentamento, como aqueles incorporados nas normas ASME B31G-1991 e API 579-2000. Para demonstrar a precisão do seu modelo, Sabapathy *et al.* comparam os valores previstos com aqueles obtidos experimentalmente por Wade, conforme apresentado no gráfico da Figura 13.

Num trabalho mais recente Bang *et al.* apresentam um método para a previsão da perfuração na soldagem circunferencial de calhas. Utilizaram um modelo de elementos finitos bi-dimensional axi-simétrico (isto é, considerando que o cordão de solda é depositado ao mesmo tempo em toda a circunferência do tubo).

Estimaram as tensões desenvolvidas e, conseqüentemente, a deformação em cada local da região da solda. Segundo os autores, quando a deformação ultrapassa a capacidade do material para deformar (valor que está relacionado com o alongamento percentual do material obtido no ensaio de tração), ocorreria a perfuração.

**Figura 14.** Comparação das condições previstas para ocorrer a perfuração com aquelas observadas por Wade



Fonte: (SOARES, 2013)

## 2.11 PARÂMETROS DE SOLDAGEM PARA DUTOS COM GÁS

De acordo com a Petrobrás, durante os trabalhos de soldagem em dutos de Gás Natural, as condições de pressão e temperatura no interior do duto devem ser mantidas dentro dos seguintes limites;

$$P = \frac{2.e.t.c}{D}$$

Onde:  $P$  = pressão máxima no interior do duto  
 $e$  = limite mínimo de escoamento especificado  
 $t$  = espessura da parede do duto  
 $c$  = fator de correção, arbitrado pela ASME Gas Pipeline Standards Comitee, em 2,4mm, atribuído para compensar a perda de resistência devido ao aquecimento do metal.  
 $D$  = Diâmetro nominal do duto.

Demais condições operacionais:            pressão mínima = 0 Kgf/cm<sup>2</sup>  
   temperatura mínima = 7 ° C  
   temperatura máxima = 100 ° C

A velocidade de escoamento do Gás Natural, durante os trabalhos de soldagem, deve ser mantida no mínimo em 0,40 m/s.

A espessura mínima admissível de parede do duto deve ser de 4,0 mm para todos os tipos de solda. A medição de espessura por ultra-som é obrigatória e deve ser realizada na totalidade da superfície sobre a qual será executada a solda. Não é permitida soldagem quando constatada presença de dupla laminação, redução local de espessura a um valor inferior à mínima definida em 3.8 ou defeitos no material.

Os trabalhos de soldagem ou furo para fixar acessórios ou derivação em duto, sobre curvaturas, pontos de mudança de diâmetro ou de transição de forma, ou locais onde existam cordões de solda, somente podem ser realizados quando permitidos pela norma de projeto de duto. No caso da proximidade entre cordões de solda já existentes e os pontos onde se pretende realizar os trabalhos, é recomendável manter um espaçamento mínimo de 100 mm. É recomendável que o ponto de instalação de um acessório ou derivação a ser fixado por soldagem e furo em duto, tenha um afastamento mínimo de 460 mm a qualquer outro acessório já instalado, visando permitir a perfeita movimentação do equipamento de furação.

Os locais abaixo do nível do solo (escavações, caixas de válvulas, caixas de ERP/EMRP's, etc.) onde se realizarem trabalhos de soldagem e furação, devem ser providos de ventilação mecânica eficiente e de vias de escape permanentemente desobstruídas. Nos casos de soldagem e furação em locais elevados, a área deve ser provida de meios de escape através de andaimes, plataformas e/ou escadas.

Um supervisor responsável pela execução dos serviços deve estar presente

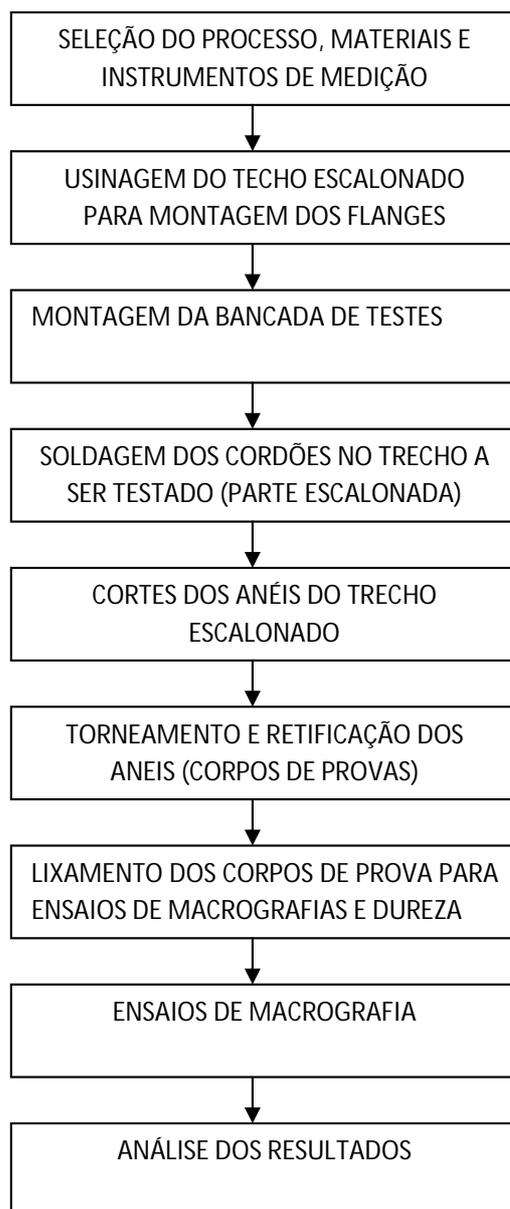
no local durante todo o decorrer dos trabalhos, podendo ordenar a imediata paralisação dos mesmos, caso venha a ocorrer qualquer desvio nas condições pré-estabelecidas. É de sua responsabilidade a correção técnica dos procedimentos de soldagem e de furação, em todos os seus aspectos. Todos os profissionais envolvidos nos trabalhos e seus supervisores devem ter conhecimento dos riscos envolvidos e dos procedimentos a seguir.

Os trabalhos devem ser preferencialmente, realizados durante o período diurno. O término dos trabalhos e o retorno à normalização devem ser notificados a todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente com os mesmos.

### 3 EXPERIMENTAL

Os materiais e a metodologia utilizada nesta pesquisa encontram-se descritos de acordo com fluxograma da Figura 15a.

**Figura 15a.** Fluxograma da parte experimental



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA

### 3.1 MATERIAIS

- Tubo em aço SAE 1045 com costura de  $\phi 114,30\text{mm}$  x 300mm, SCH 40.
- Vareta para soldagem, consumível, TIG AWS A528 com diâmetro de 3,2mm
- Gás de proteção argônio EN439 .
- Bit em aço rápido VKM42 com 8% de cobalto de 100mm X 12mm, usados nas usinagens.
- Eletrodo de tungstênio com diâmetro de 1,6mm, não consumível, com tório (ponta vermelha) apropriado para corrente que varia de 70 a 150 A.
- Eletrodo OK 46 E 6013, usado na soldagem durante a montagem da bancada de testes.

Os instrumentos de medição direta foram: paquímetro tridimensional mitutoyo com capacidade de medição de 250mm; micrômetros para medições de diâmetros externos Mitutoyo com capacidade de 100-125mm e 125-150mm; uma trena Starret de 1500mm; um fluxímetro variável com capacidade de medição de vazão de ar até 25l/min e um alicate amperímetro clamp meter com capacidade de 1000 A para medição das correntes durante os procedimentos de soldagens.

#### 3.1.1 Preparação das amostras

A bancada de testes foi desenvolvida sobre suportes que permitissem acesso e controle das variáveis de alimentação; de maneira que o técnico pudesse visualizar de forma acessível e rápida, tornando possível a análise do tipo de intervenção necessária para a manutenção temporária. Neste caso específico, o uso do processo de soldagem TIG.

O trecho principal da bancada foi torneado numa metalúrgica com espessuras especificadas para posterior análise. Este trecho é o tubo escalonado em 8 diâmetros de forma a permitir a obtenção das 8 espessuras de paredes. Essas espessuras foram longitudinalmente soldadas com 12 cordões em passe único através do processo de soldagem TIG.

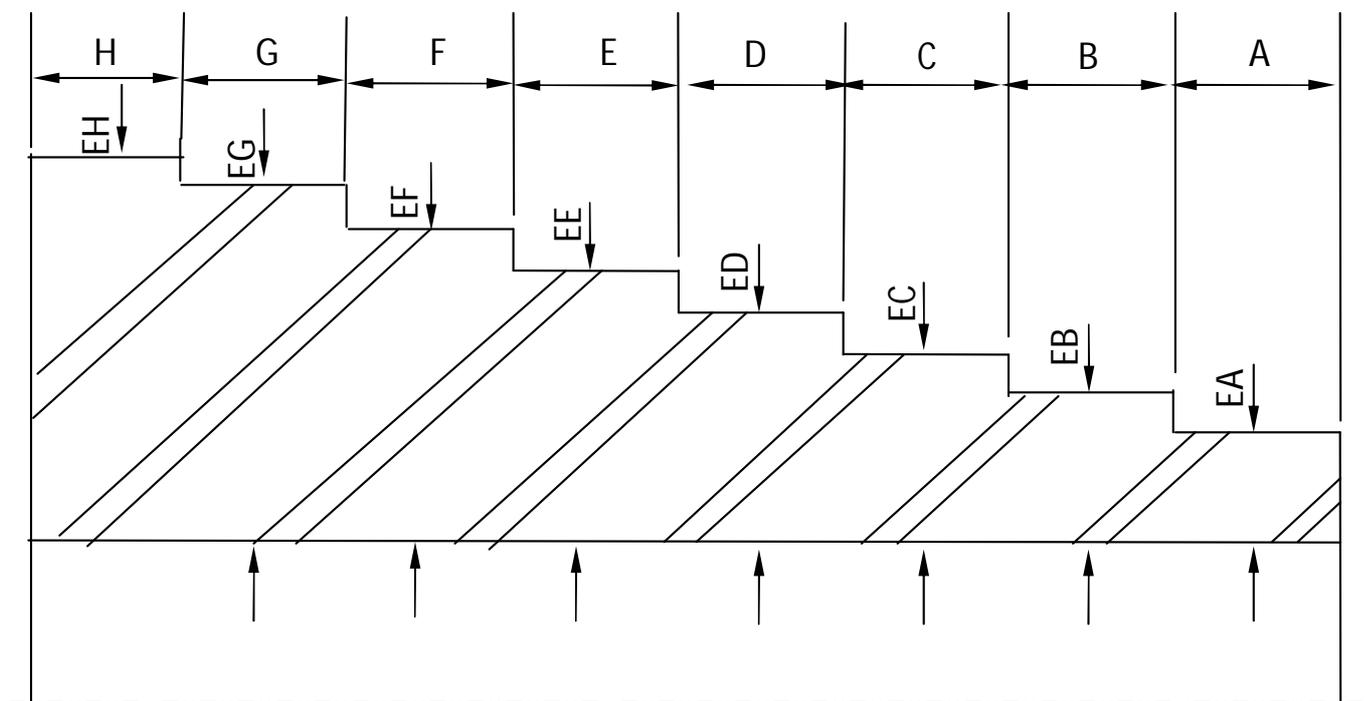
### 3.1.2 Modelo proposto

O modelo trata-se de uma representação física ou simbólica de informações produzidas de testes observáveis, que possa favorecer ao soldador condições ou descrições testáveis para obtenção de resultados confiáveis de acordo com a norma N-2163. Os procedimentos de soldagem descritos nesta norma se aplicam a tubulações, dutos e equipamentos fabricados em aços ferríticos (tipo aço-C, C-Mn e C-Mo) e austeníticos (tipo AISI 304, 316, 321 e 347) (Petrobrás).

### 3.1.3 Dados construtivos

Inicialmente, a bancada foi construída sobre suportes em aço com um trecho de um tubo de diâmetro igual a 4", comprimento de 400mm, paredes com espessuras escalonadas que variam de 6,5mm até 3mm, conexões tamponadas e soldadas com um sistema de monitoração, que controla as variáveis durante os testes de soldagem, ajustados de acordo com a espessura da parede do tubo que sofrerá os testes de soldagem. A figura abaixo mostra a vista em corte do tubo escalonado com espessura de parede que varia de mm até 6,5mm, compreendido entre as letras A até H. Nessas regiões passaram os cordões de solda em passe único num total de 12 cordões em volta da circunferência no sentido longitudinal ao tubo com soldagens autógenas (sem metal de adição) e com metal de adição.

Na Figura 15B pode-se observar como foram usinados a parte escalonada dos corpos de prova. As dimensões A=B=C=D=E=F=G=H=10mm. As espessuras de paredes EA=3,0mm; EB=3,5mm; EC=4,0mm; ED=4,5mm; EE=5,0mm; EF=5,5mm; EG=6,0mm e GH=6,5mm. A tolerância foi de +/- 0,1mm.

**Figura 15b.** Desenho em meio corte do tubo escalonado

Fonte: Autoria própria

A palavra “escalonado” significa que o tubo tem formato de degrau, isto é, as paredes diminuem a espessura entre “EH” e “EA”.

Na Figura 16 pode-se observar como ficou o tubo após torneamento e flangeamento soldado para que posteriormente sejam feitos os cordões de soldas.

**Figura 16.** Tubo usinado com flange soldado.



Fonte: Autoria própria

Durante os testes foram selecionadas duas correntes elétricas de 100A e 120A. para facilitar a comparação com os livros pesquisados que trariam em suas literaturas essas duas correntes de testes. Conforme a Figura 17 pode ser observado que tubo foi tamponado nas duas extremidades e usinado um furo em uma das extremidades para abertura de uma rosca de  $\frac{1}{4}$  NPT (rosca para pressão a gás), a qual acoplou uma manômetro com capacidade de medição de 0 PSI até 100 PSI (0Kgf/cm<sup>2</sup> até 7Kgf/cm<sup>2</sup>). Por essa rosca também foi injetado água para preenchimento em até  $\frac{3}{4}$  da capacidade interna do tubo e depois vedado com a rosca do próprio manômetro. O preenchimento de  $\frac{3}{4}$  foi definido aleatoriamente para que se tenha um espaço de deslocamento interno do volume líquido devido ao aumento da pressão interna derivada do aquecimento durante os testes de soldagens.

**Figura 17.** Tubo de testes com manômetro acoplado



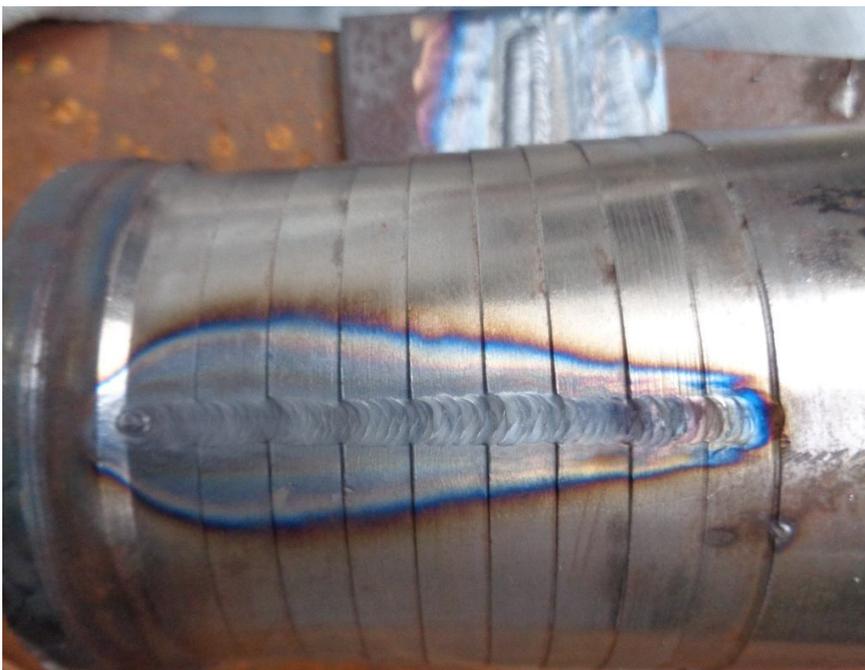
Fonte: Autoria própria

### 3.2 DADOS DOS TESTES

Os cordões de solda foram executados em passes passando por todos os anéis, sempre de cima para baixo (posição vertical descendente) na pressão atmosférica (sem o manômetro), sem água no interior e posteriormente com água. Após esta etapa, o tubo foi fechado com o manômetro iniciaram-se os passes com cordões autógenos e com deposição de material de adição.

Na figura 18 pode ser observado o primeiro cordão de solda e a expansão perpendicular da zona termicamente afetada (ZTA) no aço que obedeceu a uma proporcionalidade de acordo com a espessura da parede de cada anel. O primeiro cordão de solda foi realizado com corrente de 120 A em passe único com metal de adição de 3,2mm de diâmetro, a pressão interna era a atmosférica e o tubo estava vazio.

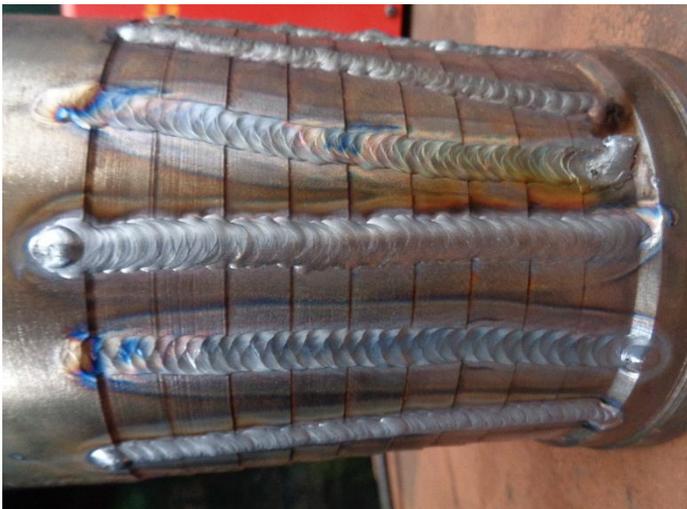
**Figura 18.** Primeiro cordão de solda



Fonte: Autoria própria

Na figura 19 é possível visualizar a disposição dos cordões de solda em cada anel. Após realizado os 12 cordões, com soldas autôneas e com material de adição, percebeu-se uma variação das pressões de 0 a  $0,7\text{Kgf/cm}^2$ , com temperaturas proporcionais durante o posicionamento (plano e vertical). Após as soldagens o corpo escalonado foi usinado (cortados com serra hidráulica e torneados) como passo de preparação para as macrografias. As soldagens foram realizadas no laboratório de soldagem do senai-cimatec com soldador experiente e capacitado para realização do processo, pois isso foi fator determinante para o bom desempenho dos testes assim como o controle do tempo médio de 1 minuto para cada cordão de solda numa distância de 100mm. Com isso pode ser determinado a velocidade de soldagem de  $1 \times 10^{-1}\text{m/min}$ . Esses dados são relevantes para as análises das macrografias, nas dimensões de soldagem, penetração e ZTA.

**Figura 19.** Anéis soldados em passes únicos.



Fonte: Autoria própria

### 3.3 MACROGRAFIAS DOS ANÉIS

#### **ETAPAS DO ENSAIO MACROGRÁFICO USADAS NOS ANEIS, COMO CORPOS DE PROVAS.**

##### **Escolha da secção**

Antes da retirada do corpo de prova para a realização do ensaio macrográfico, é interessante que se tenha em mente qual o objetivo principal do ensaio, ou seja a estrutura procurada, as descontinuidades esperadas. Assim, realizou-se um exame visual na peça antes do corte para definir locais, vestígios de solda, azulamento por aquecimento, mossas, descontinuidades.

Após o exame visual, foram definidos local, posição e processo de corte a ser utilizado; além disso, foi feita fotografia da peça antes do corte, a fim de que se possa visualizar o local analisado da peça.

Após a escolha do local a ser cortado, foi necessário definir se o corte seria transversal ou longitudinal ao eixo do tubo. O transversal foi escolhido para verificar detalhes transversais da solda: número de passes, linha de fusão, zona afetada termicamente, descontinuidades, quando é preciso determinar se a secção é

inteiramente homogênea ou não; qual a forma e a intensidade da segregação; qual a profundidade de tratamentos térmicos superficiais e a natureza do material.

### **Preparação da superfície**

A preparação da superfície compreendeu duas etapas, a do corte ou desbaste e a do lixamento.

O corpo de prova foi cortado com serra, e depois torneado para obter paralelismo adequado para atingir a superfície desejada, completando a operação com uma lima fina ou uma lixadeira mecânica. Em todos esses processos evitou-se o encruamento local, bem como aquecimento acima de 100°C, para evitar a distorção na interpretação do ensaio.

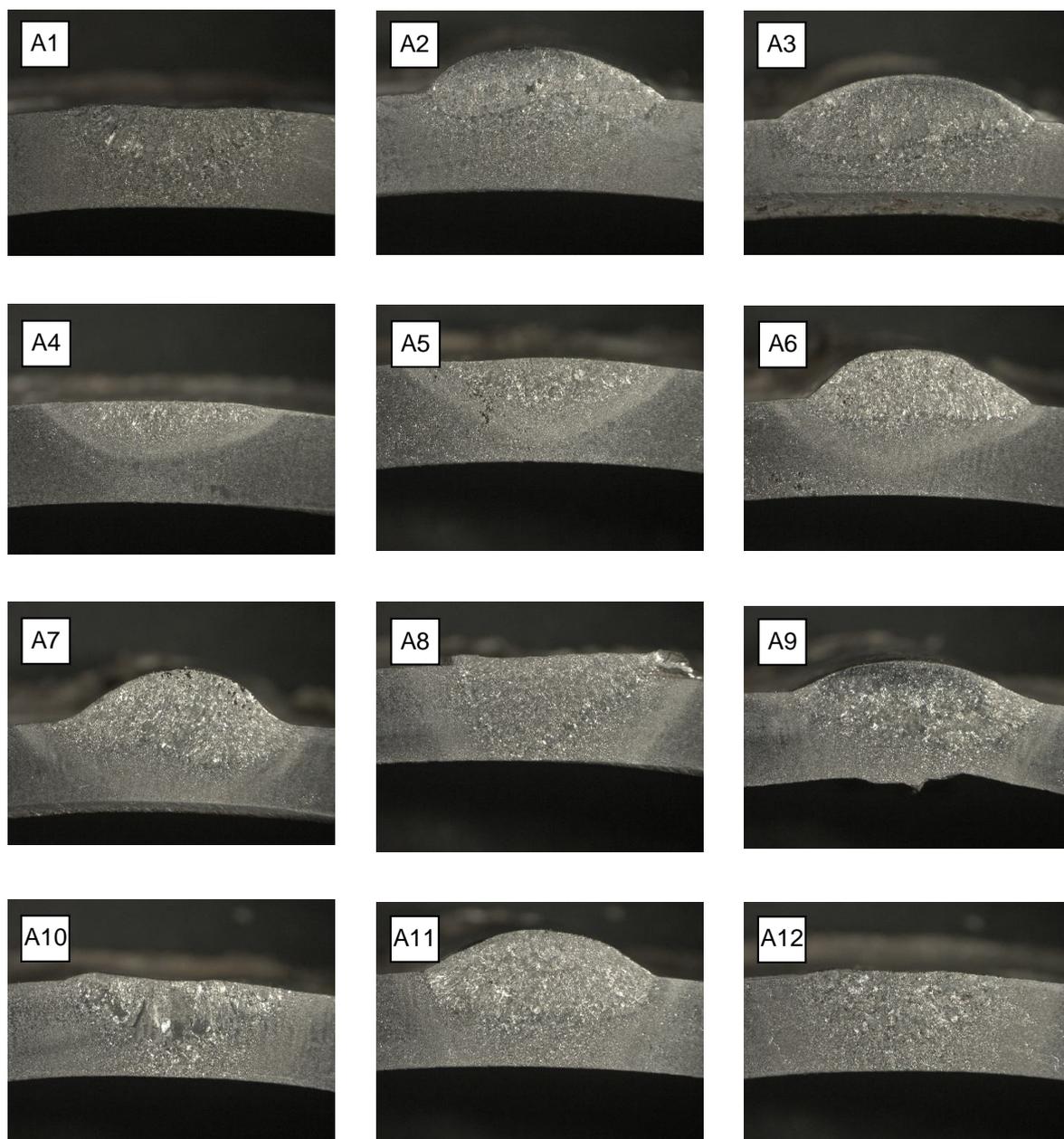
Antes de iniciar o lixamento, deve-se fazer uma lavagem com água corrente e enxugar a superfície para evitar que partículas abrasivas mais grossas sejam levadas a essa etapa; além disso, é fazendo sempre uma limpeza água, álcool e algodão, com a finalidade de retirada de óleo ou graxa da superfície preparada.

Toda preparação e análises foram feitos no laboratório de metalografia do SENAI-CIMATEC. O lixamento foi executado por meio da lixadora arotec com velocidades de 150 e 300rpm. Foram usadas as lixas 200, 300, 600, 800 e 1200 (número de grãos de areia por centímetro quadrado) respectivamente, tomando-se o cuidado de, ao passar de uma lixa mais grossa para outra mais fina, certificando-se que os riscos da lixa anterior tenham sido totalmente eliminados e que a direção do lixamento seja sempre perpendicular aos riscos deixados pela lixa da operação anterior. Posteriormente foi feito o polimento com alumina, água e a polidora poliplan pantec com duas velocidades, foi selecionada a velocidade de 300rpm. O Depois foram feitos os ataques químicos usando reagente para ataque químico Nital (4 ml HNO<sub>3</sub>; 96 ml etanol). O tempo de exposição do ataque químico foi de 10 segundos. Após procedeu-se a secagem foi com ar quente usando um secador de cabelo.

Na figura 20 pode ser observada as macrografias das 12 secções referente a cada passe do anel de aço SAE 1045 de um tubo de 4", que foi usinado escalonadamente até a espessuras de parede requerida de 3mm. A pressão interna de  $7 \times 10^{-1} \text{kgf/cm}^2$  se deve ao aquecimento do tubo pelo próprio cordão de solda que atingiu o ponto máximo no segundo passe. Nesta fase, denominada fase A, a corrente elétrica selecionada foi de 120A e espessura de parede de 3mm, ocorreu a

perfuração do tubo durante a soldagem e logo em seguida o local foi fechado com o próprio material de fusão. Estes dados implicaram na variação de dureza da solda e da ZTA descrita nos resultados obtidos.

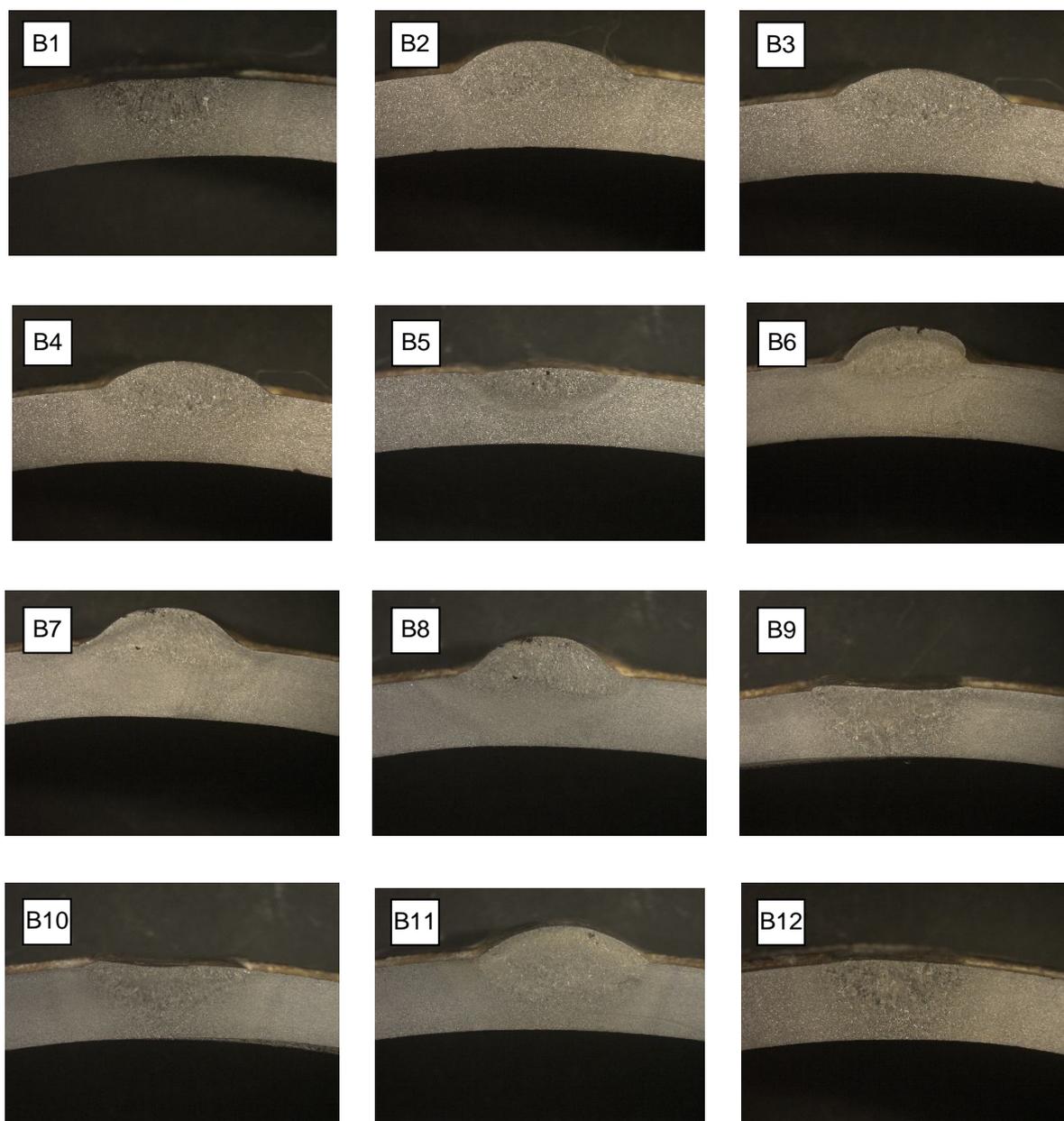
**Figura 20** - Sequência de soldas no primeiro anel (A) com espessura de 3mm.



Fonte: Autoria própria

Na figura 21 pode ser observada a sequência das 12 macrografias referente a cada passe no anel B, que serviu de comparação com o anel A. O anel B foi usinado com espessura de parede de 3,5mm. As tolerâncias nas espessuras de parede foi de  $\pm 0,2\text{mm}$ . Esta tolerância é consequência do acabamento interno no tubo que se manteve com dado construtivo inicial para tubo com costura.

**Figura 21.** Sequência de soldas no segundo anel (B) com espessura de 3,5mm



Fonte: Autoria própria

### 3.4 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES

Após análise, verificou-se que a bancada de testes, dependendo o que se queira analisar, pode ter vários formatos construtivos e operacionais.

A API 570, no item 8.2, especifica que a soldagem em operação deve ser conduzida com procedimentos e soldadores qualificados com os critérios de publicação API 2201. As normas API 570 e 2201 especificam, para esses casos, que os procedimentos de soldagem e soldadores devem ser qualificados pela norma ASME IX em conjunto com a de construção ASME B31.3. Devido à presença de fluxo devem-se usar os critérios de soldagem em operação da norma ASME PCC-2.

A intervenção do reparo pode ser conforme mostra a Figura 8 da página 35: um conector mecânico, dupla calha, bacalhau, tampão ou enchimento externo com metal de solda. Para desenvolver estes procedimentos, o soldador pode se submetido a dois testes: a) um teórico envolvendo sua rotina de trabalho para manutenção de dutos em operação; b) outro prático na bancada de testes simulada. Nesse item b ele deve apresentar um relatório com resultados que deverão ser coletados para posterior treinamento teórico e prático com objetivos bem definidos.

O modelo proposto deve apresentar os dados necessários à avaliação do soldador, preferencialmente o objetivo para qual se destina a manutenção. Trata-se de situações cotidianas reais apresentadas no que se refere a soldagem de dutos em operação. Pode-se, no entanto simular várias situações práticas observadas anteriormente e registradas através de filmagens, fotos, depoimentos, consultas a manuais, pessoas envolvidas e normas técnicas (PETROBRÁS, 2008)

Além da análise prática do modelo, o soldador e ou inspetor de solda deve ter conhecimentos necessários adquiridos para o desenvolvimento de sua função e será paralelamente submetido a avaliações teóricas elaboradas criteriosamente pelo pessoal da engenharia de soldagem e que possui procedimentos sobre os processos de soldagem, assim como as normas da Petrobrás, API, ASTM e ASME. Estas avaliações teóricas podem ser tabuladas para posterior treinamento. É importante constar nas orientações que o avaliando só responda o que realmente souber, pois estas informações servirão de diagnóstico para treinamento teórico e prático relacionado com sua função na qual é necessário o conhecimento específico ao seu trabalho e sua responsabilidade. Treinamentos podem ser preferencialmente

ponto-a-ponto, mostrando inclusive a maneira correta e errada com fotos ou filmagens de como, onde, quando, quem e porque executar o reparo.

## **4 VANTAGEM DO MODELO**

### **4.1 VANTAGEM DO MODELO PARA INDÚSTRIA**

- Maior produtividade, segurança e economia no transporte de produtos petroquímicos através da malha duto viária.
- No treinamento dos soldadores, dos quais destacamos o aumento na autoestima, a confiança no desenvolvimento do processo de soldagem TIG e segurança no desempenho dos trabalhos por participarem de treinamentos promovidos pela empresa sobre o que realmente precisam para execução das suas atividades cotidianas.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES FINAIS

- Neste trabalho foram descritos situações teóricas e práticas relacionadas à execução de reparos em dutos em operação por soldadores e pessoas envolvidas na intervenção desse tipo de operação. As análises macrografias comprovaram o quanto é importante o conhecimento, pelo executante (soldador), aqui em particular, do processo de soldagem TIG.
- Ficou evidenciado que o modelo pode ser adotado para outras situações que necessitem de maior precisão na coleta de informações para posterior treinamento teórico e prático focados no tipo específico de intervenção para reparo de dutos em operação que ajudarão a produtividade e manutenção numa indústria, seja qual for o seu seguimento. A tecnologia da simulação e análise prática dos resultados dos testes de soldagem servem de parâmetro para o planejamento e programação da manutenção.

## REFERÊNCIAS

ASME B31G-1991. **Method for determining the remaining strength of corroded pipelines.**

BANG, I.W., SON, Y.P., OH, K.H., KIM, W.S. **Numerical simulation of sleeve repair welding of in-service gas pipelines.** *Welding Journal*, december 2002,

BRANDI. Sergio Duarte, **Soldagem: Processos e Metalurgia**, Blucher, 2011.

BRUCE, W. A. **Overview of In-service Welding Research at EWI.** First International Conference on Welding Onto In-Service Petroleum Gas and Liquid Pipelines. Wollongong- Australia. 2000

BRUCE; NOLAN. **Effect of factors related to hydrogen cracking for in-service welds.** Gas Research Institute, 2005.

CAMPANA, G.; Fortunato, A.; Ascari, A.; Tani, G.; Tomesani, L.; **The influence of arc transfer mode in hybrid laser-mig welding.** *Journal of Materials Processing Technology* 191, p. 111-113, 2007.

COE, F.R. **Weldability Steels without Hydrogen Cracking.** London: The Welding Institute, 1973.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns.** Edgard Blucher. 2008.

DYKHNO, I.; Davis, R. **Joining GMAW and GTAW - Hybrid welding takes on a whole new meaning with new technology developments.** *The Fabricator*, 2006.

LIMA, I. A. O. Lino - **Modelagem computacional para avaliação da soldagem na trepanação de tubulações em aço carbono.** Tese de doutorado em modelagem computacional e tecnologia industrial do SENAI-CIMATEC, 2015.

JARVIS, Willians. **Pipeline Hot Tapping and Stoppling and In-service welding.** International Pipeline Conference, 2002.

KOU, Sindo. **Welding Metallurgy.** Editora Inter Science, 2002. 2a ed.

PAES, M.T.P., POPE, A.M., SOUZA FILHO, B.G., TEIXEIRA, J.C.G. **Procedimento para a soldagem de dutos e tubulações industriais em operação. Relatório Técnico Petrobrás.** Rio de Janeiro, 2000.

MACHADO, I.G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre: editado pelo autor, 1996.

MARQUES, Paulo Villani, **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**, 2d, Belo Horizonte, 2007.

MARQUES, P.V. **Soldagem: fundamentos e tecnologia** / Paulo Villani Marques, Paulo José Modenesi, Alexandre Queiroz - 3ª edição atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MASCARENHAS, L. A. Brêda; **Estudo da aplicação do processo TIG alimentado para a soldagem em operação, Tese de mestrado do programa de pós-graduação em engenharia mecânica.** UFSC, 2005

MESSLER, Robert Jr. **Principles of welding - Process, Physics, Chemistry and Metallurgy.** Wiley, VCH, 2004.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade dos Aços Transformáveis.** Departamento de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 2006.

PETROBRAS N-2163. **Soldagem e Trepanação em Equipamentos, Tubulações Industriais e Dutos em Operação.** Brasil, 2008.

REUTZEL, E.W.; SULLIVAN, M.J.; MIKESIC, D.A. **Joining Pipe with the Hybrid Laser-GMAW Process: Weld Test Results and Cost Analysis.** *Welding Journal* 85, no. 6, 2006.

SOARES, Elisângela. **Metalurgia e soldagem**, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Editora: SENAI-SP, 2013.

TEIXEIRA, G.S. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem sobre a geometria do cordão de solda depositado pelo processo de soldagem TIG - MAG em tandem.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

YAN, J.; Zeng, X.; Gao, M. **Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding.** *Optics and Lasers in Engineering*, doi:10.1016/j.optlaseng.2009.08.009, 2009.

[http://www.bohlersoldabrasil.com.br/abril\\_2011/artigo1.html](http://www.bohlersoldabrasil.com.br/abril_2011/artigo1.html), Acesso em 20/02/2016

<http://www.dbcoxigenio.com> Acesso em 20/02/2016

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAvgEAL/apostila-soldagem> Acesso em 23/02/2016

<http://pt.scribd.com/doc/36736922/Catalogo-Normas-Tecnicas-Petrobras> Acesso em 25/02/2016

<http://www.infosolda.com.br> Acesso em 14/09/2016

<http://www.esab.com.br> Acesso em 14/09/2016

<http://www.aws.org/> Acesso em 14/09/2016

**ANEXO**

### DADOS REGISTRADOS DOS PASSES DURANTE OS TESTES DE SOLDAGEM

| PASSE | TIPO                                | CORRENTE SELECIONADA (A) | VAZÃO (l/min) | CORRENTE MEDIDA (A) | TENSÃO (V) | TEMPO (min:seg) | PRESSÃO (PSIG) |
|-------|-------------------------------------|--------------------------|---------------|---------------------|------------|-----------------|----------------|
| 1º    | Autógena horizontal                 | 100                      | 10            | 86,2 - 88           | 54         | 01:08           | -----          |
| 2º    | Horizontal com consumível de 3,23mm | 120                      | 10            | 106 -108            | 54         | 00:43           | -----          |
| 3º    | Vertical desc. com cons. de 3,23mm  | 100                      | 10            | 86,2 - 88           | 54         | 01:10           | -----          |
| 4º    | Autógena vert. desc.                | 120                      | 10            | 103,7 - 109,4       | 54         | 00:55           | -----          |
| 5º    | Autógena vertical desc.             | 100                      | 10            | 87 - 89             | 54         | 01:02           | -----          |
| 6º    | Vertical desc. com cons. de 3,23mm  | 120                      | 10            | 130,1 - 131,4       | 54         | 00:52           | -----          |
| 7º    | Vertical desc. com cons. de 3,23mm  | 120                      | 10            | 126,7 - 128         | 54         | 00:42           | 1              |
| 8º    | Autógena vertical desc.             | 100                      | 10            | 106,4 - 109         | 54         | 01:01           | 3              |
| 9º    | Vertical desc. com cons. de 3,23mm  | 100                      | 10            | 107 - 120           | 54         | 01:07           | 5              |
| 10º   | Autógena vertical desc.             | 100                      | 10            | 48 - 57             | 54         | 01:08           | 7              |
| 11º   | Vertical desc. com cons. de 3,23mm  | 100                      | 10            | 95,4 - 101,6        | 54         | 01:07           | 10             |
| 12º   | Autógena vertical desc.             | 100                      | 10            | 63,2 - 67,4         | 54         | 01:12           | 10             |

#### Observações:

A partir do 3º passe, o tubo foi colocado na posição vertical e preenchido com água até  $\frac{3}{4}$  da capacidade; a partir do 7º passe o tubo foi fechado com a montagem do manômetro; no final do 9º passe, ocorreu a perfuração do anel do corpo com espessura de parede de 3mm no momento em que a pressão já estava em 7 PSI.