

ESTUDO COMPARATIVO DE SOLDAGEM ENTRE OS PROCESSOS TIG ORBITAL AUTOMATIZADO E O PROCESSO TIG MANUAL EM TUBOS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 316L

SILVA, Matuzalém Godoi

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA.matuzalemgodoi@gmail.com

Jesus, Robson Pires

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA.contato.robsonp@gmail.com

SILVA, Wilson de Paula

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA.wilpasil@gmail.com

RESUMO

O processo automatizado de solda TIG orbital se dá pela utilização de um equipamento que realiza soldagem em tubos por meio de comando numérico computadorizado, enquanto o processo manual acontece de forma não automatizada, sendo realizado o manuseio da tocha totalmente por parte do operador. O presente trabalho é voltado para o método comparativo entre os processos de soldagem TIG manual com o processo de soldagem TIG orbital automatizado, onde tem por objetivo comparar a aparência, estruturas e resistência de cada uma das soldas a partir de ensaios visuais, metalográficos e também ensaios de dureza, tudo isso utilizando amostras retiradas de corpos de prova de tubulações de aço inoxidável AISI 316L soldadas. Os principais pontos levados em consideração no desenvolvimento deste trabalho, envolvem aspectos de qualidade, econômicos e eficiência. Esse estudo demonstra através de revisões bibliográficas e ensaios laboratoriais a viabilidade econômica de se adotar algum dos dois processos de soldagem e quais vantagens cada processo pode oferecer.

Palavras-Chave: Soldagem Orbital; Processo TIG; Soldagem Manual; Aço Inoxidável.

1. Introdução

Ao abordar o tema relacionado ao processo de soldagem TIG, também conhecido como processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é necessário elevar a importância desse procedimento para a sociedade e sua evolução. É um processo bem antigo que tem sido aprimorado no decorrer dos anos, onde tem-se hoje processos completamente automatizados. Ao realizar esse estudo, onde são comparados dois processos de soldagem TIG, sendo eles o manual e o orbital automatizado, é possível analisar cada um dos processos, cada uma das soldas e suas particularidades, já que ambos são extremamente importantes e bastante utilizados principalmente no setor industrial.

Ao longo dos tempos a soldagem, a fim de atender as mais variadas demandas, desenvolveu vários processos diferentes, podendo atualmente ser aplicada em numa vasta gama de materiais utilizados pelas empresas e para diferentes tipos de aplicações, desde micro soldas em pequenas placas de circuito eletrônico, com o intuito de apenas fixar pequenas fiações, até enormes estruturas metálicas que necessitam de grande rigidez e ótimas propriedades mecânicas, como resistência à tração, por exemplo. No que tange à união de materiais, a soldagem em si foi, e ainda é, uma das maiores responsáveis pelo desenvolvimento industrial em todos os segmentos, a partir dos diversos processos existentes a solda consegue atender vários segmentos, como indústrias metalúrgicas, automobilística, ferroviária, aeronáutica, construção civil, tanto em forma de manufatura como na manutenção e recuperação de peças.

Possibilitando a união dos mais variados produtos e materiais, dentre os quais cita-se a tubulação de aço inoxidável, que a partir do domínio da soldagem pelo processo TIG passam a ser utilizados com segurança em projetos que exigem materiais duráveis e sanitários, tornando estes materiais muito utilizáveis às indústrias químicas, farmacêuticas, de alimentos, dentre outras. Como alternativa à soldagem manual os equipamentos de soldagem orbital mecanizada, conhecido como cabeçotes orbitais, estão sendo utilizados

cada vez mais por todo o mundo. A soldagem orbital foi ser aplicada pela primeira vez na indústria na década de 60. (PIGOZZO, 2015)

Porém tem-se notícia de que a soldagem de tubulações se iniciou em 1929, assumindo, características produtivas somente a partir de 1933 (WIDGERY, 1999). Em relação ao processo computadorizado TIG Orbital, não há dúvidas sobre a qualidade da solda imposta pela máquina, e ainda, com menor possibilidade de falhas em relação a qualquer processo manual, podendo realizar grandes números de ciclos de serviço, porém é um processo caro e que depende de uma boa competência do profissional que irá programar e preparar o setup do equipamento de soldagem.

O real objetivo imposto no decorrer desse artigo é realizar um estudo comparativo para analisar as soldas realizadas por meio dos processos de soldagem TIG manual com o processo orbital automatizado. Para isso, alguns corpos de prova foram confeccionados e amostras retiradas, para assim realizar os ensaios visuais, metalográficos e logo após os ensaios de dureza. A intenção é verificar primeiramente alguma alteração superficial que possa ser vista a olho nu, logo após as diferenças na estrutura da solda de cada amostra, e comparar as medidas de dureza encontradas nos ensaios.

2. Revisão da literatura

2.1. Aço inoxidável AISI 316L

Os aços são ligas compostas por uma variedade de elementos químicos, que possuem alta resistência, ductilidade e tenacidade, características vantajosas para o setor industrial. Os aços inoxidáveis são resultado de uma mistura de ferro e cromo em uma concentração superior a 10%. Devido a suas características físico-químicas, esse tipo de material é amplamente utilizado pela indústria, apresentando grande resistência a corrosão e ótima soldabilidade, que o torna superior aos aços comuns. A adição de outros elementos de liga como silício, níquel e carbono modificam várias de suas características metalúrgicas, criando uma variedade de aços distintos. (SILVA, 2017 apud MOURA,2018)

Plantas industriais, sobretudo as que exigem maior sanitização, utilizam comumente a liga AISI 316L em seus equipamentos e tubulações, em função de sua composição química e estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), fatores que proporcionam excelentes propriedades relacionadas à ductilidade, resistência à corrosão e soldabilidade. Assim, a liga AISI 316L, muitas vezes, é a melhor opção para aplicações industriais desde temperaturas criogênicas até altas temperaturas (GUILHERME et al., 2014). Os aços inoxidáveis podem ser classificados de acordo com sua microestrutura em:

- Aços inoxidáveis ferríticos;
- Aços inoxidáveis martensíticos;
- Aços inoxidáveis austeníticos;
- Aços inoxidáveis duplex;
- Aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação.

O aço inoxidável austenítico é uma liga composta principalmente por cromo e níquel, elementos que tornam este tipo de material resistente à corrosão devido à formação de uma fina camada composta por óxido de cromo (Cr₂O₃). Quanto maior a adição de cromo, mais estável é a película passiva. Contudo o excesso deste elemento pode afetar as propriedades mecânicas e de soldagem, sendo necessária a adição de elementos de liga para melhorar a resistência à corrosão. (SANTOS et al.,2019)

Tabela 1 – Composição química do AISI 316L (% em peso).

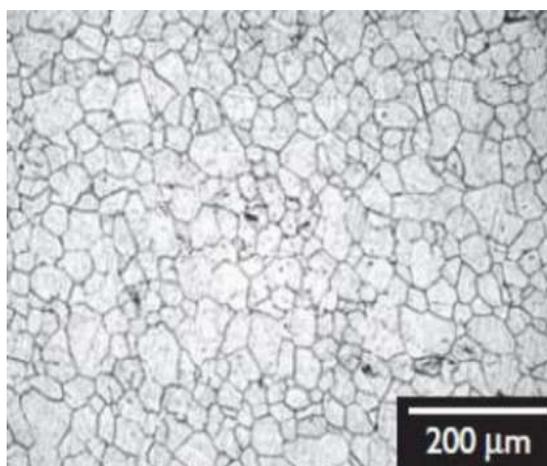
AISI	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Co	Cu
316L	0,023	1,53	0,42	0,039	0,025	16,54	10,02	2,05	0,15	0,6

Fonte – SANTOS, 2019.

Aços inoxidáveis austeníticos do tipo 316L consistem de uma matriz de ferro-cromo-níquel, isto é, uma matriz de átomos de ferro cúbicos de faces centradas (CFC), com átomos em solução de inserção sólida (como carbono ou nitrogênio) e átomos em solução sólida de substituição (molibdênio, silício, manganês). Impurezas (enxofre, fósforo) também estão presentes em pequenas quantidades. (MODENESI, 2001 apud MOURA, 2018)

Os aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar na sua composição até 12% de níquel, como exemplo os austeníticos da série 316L, esses altos teores de níquel e cromo elevam o custo desses aços, mas em contrapartida a relação entre custo e benefício o mesmo se torna favorável, isso se deve a excelente ductilidade, soldabilidade, conformabilidade e resistência a corrosão. Dentre as vantagens dos aços inoxidáveis austeníticos, pode-se destacar que o mesmo pode ser trabalhado a frio, através do processo de encruamento, sendo este processo mais intenso nos aços austeníticos do que nos ferríticos, tendo como resultado o aumento da resistência mecânica do material (SILVA, 2017). Pode-se observar na Figura 1, um exemplo de microestrutura do aço inoxidável austenítico.

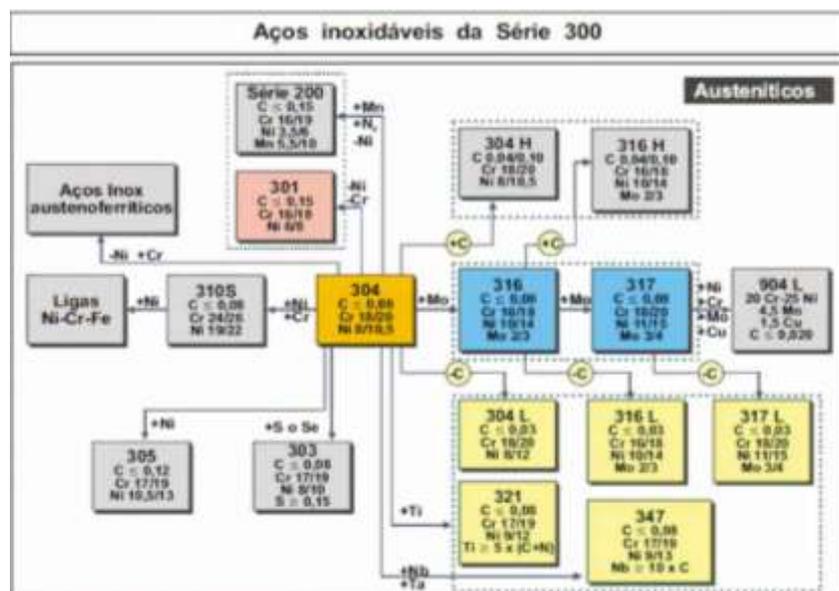
Figura 1 – Microestrutura de um aço inoxidável austenítico



Fonte – CAMPOS et al. (2009) apud SILVA, (2017).

Para uma melhor compreensão da composição dos aços inoxidáveis austeníticos, apresenta-se na Figura 2 todos os aços austeníticos e suas devidas composições.

Figura 2 – Composição típica dos aços inoxidáveis austeníticos



Fonte – GONÇALVES, 2013 apud SILVA, 2017.

De todas as ligas de aço inoxidável os austeníticos representam o maior grupo, cerca de 65% a 70% do total produzido, e também o mais importante dos aços inoxidáveis por apresentarem elevado nível de soldadura, a qual a capacidade de soldabilidade do aço austenítico vai estar diretamente relacionada aos elementos de ligas estabilizadores de austenita, ou seja, aqueles elementos que liga que reduzem a velocidade de transformação da austenita, aumentando a sua temperabilidade e a mantendo estável em altas temperaturas geradas pelo o fluxo de calor na soldagem e também na dissipação desse calor. (SILVA, 2017)

A soldabilidade do 316L, como a dos aços inoxidáveis austeníticos em geral, é excelente e garante soldas dúcteis de boa qualidade que, aliada à sua estrutura composta por ferrita e austenita elimina o risco de formação de martensita, evitando o aparecimento de trincas a frio. Durante o processo de soldagem, a microestrutura do material pode sofrer diversos tipos de alterações. Os aços inoxidáveis austeníticos, dado a sua natureza microestrutural, não sofrem rápido crescimento de grão a temperaturas elevadas. Assim, pré aquecimentos e tratamentos térmicos tornam-se dispensáveis. (BITTENCOURT, 1985 apud MOURA, 2018)

2.2. Processo de soldagem TIG manual

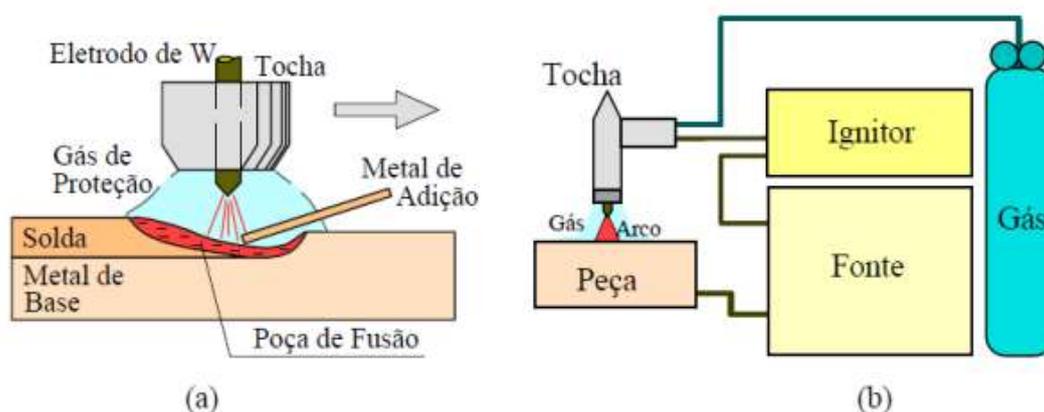
Em GTAW, quando se define soldagem manual isso significa que uma pessoa irá controlar todas as funções do processo de soldagem, como aplicação do metal de adição e o gás, a soldagem manual utiliza a tocha, cabos e condutores elétricos, pedal de pé (para controle de nível de corrente de soldagem) e controles de fluxo de gás. (BRACARENSE, 2000)

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) é a união que se dá pelo aquecimento de metais com uso de um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça a ser soldada. A soldagem TIG utiliza um eletrodo puro ou de liga de tungstênio e pode ser feita com ou sem a adição de material, quando aplica metal de adição, este não é transferido pelo arco, mas sim fundido por ele (CUNHA, 2013 apud SPERB et al., 2018).

Mais especificamente o processo TIG, também conhecido como processo GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) onde utiliza-se eletrodo não-consumível, mas pode, quando desejar, utilizar um material externo para preencher a junta a ser soldada, surgiu a partir de uma ideia de C.L. Coffin, que a patenteou em 1890 (BRACARENSE et. al., 2004). Coffin buscava soldar onde não existisse um gás oxidante, logo deveria criar um tipo de atmosfera única para a solda, este processo teve inúmeras melhorias até chegar ao que conhecemos e usamos hoje em dia. A invenção e o desenvolvimento do processo de soldagem GTAW foi essencial para a soldagem de magnésio, aço inoxidável, dentre outros materiais. (PIGOZZO, 2015).

Muitos fatores são observados no arco TIG, os quais se podem destacar: o comportamento com a tensão, com o comprimento de arco, com a variação da tensão com o gás empregado, o comportamento da tensão com a corrente pulsada, a influência da variação da tensão na potência do arco, a influência da corrente na variação das isotermais do arco, a variação da pressão de arco com a intensidade de corrente, a perturbação da tensão com a alimentação do arame no arco, entre outros. (RIBEIRO,2012)

Figura 3 – Soldagem GTAW: (a) Detalhe da região do arco, (b) montagem usual



Fonte – Modenesi e Marques (2006) apud SILVA, 2017.

Analisando a Figura 3, pode-se observar que o processo de soldagem TIG, constitui-se de uma fonte de energia com corrente contínua (CC) e/ou corrente alternada (CA), tocha com eletrodo de tungstênio, gases de proteção (Ar ou He) e um ignitor de alta frequência, para o envio de um sinal de alta tensão e frequência, utilizado para ionização do meio gasoso entre o eletrodo e a peça, de modo a evitar o contato do eletrodo e a peça para abertura do arco elétrico, diminuindo a contaminação do cordão de solda. Por esses e outros motivos, caracteriza-se o processo TIG como caro e complicado em relação aos outros processos de soldagem. (SILVA,2017)

A característica mais importante do processo TIG, é o seu excelente controle da energia transferida para peça, controle independente da fonte de calor e da adição de metal de enchimento quando for preciso, isso torna o processo adequado para a soldagem de chapas de pequena espessura, eliminação de agentes contaminante e soldagem de difícil soldabilidade. (MARQUES, MODENESI E BRACARENSE, 2009 apud SILVA,2017)

Como todo e qualquer processo de soldagem, o GTAW possui vantagens que devem ser citadas, como excelente controle da poça de fusão, permite soldagem sem uso de metal de adição, permite mecanização e automação do processo, utilizado para soldar a maioria dos metais, produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento, gera pouco ou nenhum respingo, exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem, permite a soldagem em qualquer posição, produtividade relativamente baixa e custo de consumíveis é relativamente elevado. (MODENESI E MARQUES,2006 apud SILVA, 2017)

Também é importante citar as aplicações, como soldagem de precisão ou de elevada qualidade, soldagem de peças de pequena espessura e tubulações de pequeno diâmetro, execução do passe de raiz em tubulações, soldagem de ligas especiais, não ferrosas e materiais exóticos. (MODENESI E MARQUES,2006 apud SILVA, 2017)

Entre as principais aplicações industriais do processo de soldagem TIG estão na indústria petrolífera, química e alimentícia, costura e união de topo de tubos de aço inoxidável, soldagem de alumínio, titânio e ligas de níquel, peças leves e de precisão utilizadas na indústria aeroespacial e também na soldagem de 1º passo de raiz nas tubulações de aços liga.

2.3. Processo de soldagem TIG orbital automatizado

No início da década de sessenta a soldagem orbital foi desenvolvida a fim de prover a indústria aeroespacial de condições básicas de fabricação de componentes de alta integridade. A comprovação de falhas em juntas de sistemas hidráulicos expostos a vibrações e a esforços mecânicos durante o voo de aeronaves, sob velocidades próximas à do som, induziu o aperfeiçoamento de técnicas de união. Deste modo, foi criado o sistema orbital a partir do já existente processo de soldagem TIG. (HENON, 2001 Apud GARCIA, 2007)

A capacidade inerente do ser humano de perceber erros e mudanças e atuar para corrigi-los o qualifica para a execução da soldagem. Apesar de o produto final ser aprovado na etapa de inspeção, os procedimentos manuais demandam muito tempo, o que reduz a quantidade e contribui no sentido contrário ao cumprimento dos prazos. Além disso, um resultado repetitivo ocorre em função da habilidade do soldador e depende das condições em que o trabalho é realizado. Estas limitam o conforto em virtude da exposição a ambientes pouco ergonômicos, com presença de fumos. (PAES, 2016)

A pressão para reduzir custos e aumentar a produtividade da mão de obra acaba levando muitas empresas a investirem em automação, inclusive de soldagem. Isso reduz a demanda por soldadores já que muitos trabalhos repetitivos estão sendo automatizados, porém também surge no mercado a necessidade de contratação de soldadores que montam, operam e programam estas máquinas, proporcionando uma oportunidade profissional. (GEARY; MILLER, 2013 apud SPERB et al., 2018)

A soldagem orbital TIG consiste em fazer com que o eletrodo de tungstênio execute uma trajetória coerente em torno de uma superfície geralmente circunferencial e com acesso pela periferia externa. Soldas de alta qualidade e repetitividade podem ser alcançadas no limite da velocidade máxima de soldagem (RATCLIFFE, 2002 apud RIBEIRO, 2012). A figura 4 representa um modelo de equipamento responsável por realizar esse tipo de soldagem de forma automatizada.

Figura 4 – Equipamento de soldagem TIG orbital automatizado



Fonte – Autores, 2020.

É um processo para soldagem de tubos que proporciona qualidade, reprodutibilidade e produtividade. Nesse processo, a tocha de soldagem é posicionada de maneira a acompanhar o perfil geométrico dos tubos a serem soldados, permanecendo estes estacionários. Essa configuração gera uma

peculiaridade que é característica da soldagem orbital: a posição de soldagem é alterada constantemente durante o processo, fazendo com que estudos sobre o efeito da posição sejam importantes para o sucesso da aplicação. A soldagem orbital permite velocidades de soldagem relativamente altas e pode ser executada em ambientes cujo espaço é limitado, além de, por se tratar de um processo automatizado, garantir baixos níveis de defeitos. (FIGUEIRÔA et al., 2015)

Principalmente para a mecanização, na qual há menor margem para não conformidades na montagem dos tubos e na regulagem das variáveis, o principal desafio na soldagem orbital é constituído pela necessidade de sustentar a poça de fusão em posições que desafiam a gravidade e, por isso, há a necessidade de estratégias muito bem concebidas a fim de que a poça metálica se sustente no espaço. Portanto, a energia de soldagem tem de se situar em uma determinada faixa de valores específicos. (SARTORI et al., 2017)

O sistema de soldagem TIG orbital é utilizado na automatização da união de tubos e dutos de diversos diâmetros e espessuras em circunstâncias onde a qualidade está associada à produtividade. O nível de energia de soldagem presente é consideravelmente baixo, favorecendo o controle da distorção e a manutenção da precisão dimensional. (GARCIA, 2007)

Figura 5 – Processo de união de tubos pelo método de soldagem TIG orbital automatizado



Fonte – Autores, 2020.

A união de tubos de pequeno diâmetro e de espessura reduzida utiliza junta de topo e passe único. Os tubos são mantidos estacionários, ao passo que o eletrodo se desloca ao longo da junta formando um cordão de solda homogêneo e com propriedades próximas às do metal base. A operação em si é concebida sob uma atmosfera de gás inerte, responsável pela proteção das extremidades do eletrodo, da poça fundida e das regiões aquecidas da peça contra a contaminação atmosférica. (GARCIA, 2007)

Figura 6 – Representação do passe único



Fonte – SANTOS, 2019

A automação de soldagem é muito ampla e promissora, sendo tópico de vários trabalhos de pesquisa e projetos. No entanto já existem algumas áreas onde a automação é consagrada e apresenta resultados satisfatórios, com por exemplo a soldagem de peças automobilísticas, navais e de caldeiraria pesada além de soldagem estrutural pesada, fabricação de perfis e pontes. (MARQUES; MODENESI; QUEIRÓZ, 2009 apud SPERB et al., 2018)

2.4. Concepção do equipamento de solda orbital automatizado

Soldagem orbital encontrada pela primeira vez na década de 1960, quando a indústria aeroespacial reconheceu a necessidade de uma união superior para as linhas hidráulica das aeronaves. Todavia, este sistema passou a ser empregado de fato pela indústria somente em meados dos anos 80, com o advento de sistemas de soldagem dedicados. Estes sistemas são compostos basicamente por três partes principais – fonte de soldagem, unidade de controle e cabeçote orbital. (MANNION, 1999)

Em virtude dos requisitos de portabilidade, o sistema de soldagem orbital requer o uso de uma fonte de soldagem compacta e portátil, cuja sequência de soldagem é definida pela unidade de controle. Para atender às características físicas do processo TIG, a fonte de soldagem deve ser do tipo fonte de corrente, podendo operar no modo corrente contínua constante, corrente contínua pulsada ou corrente alternada. (CUNHA et al, 2007)

Sistemas de soldagem orbital modernos possuem o seu controle baseado em sistemas computadorizados que permitem o armazenamento dos parâmetros de soldagem em sua memória, simplificando o desenvolvimento de novos procedimentos de soldagem. A unidade de controle é responsável por controlar o valor das variáveis de soldagem, como corrente e velocidade de deslocamento do eletrodo, de acordo com a posição de eletrodo em relação ao tubo. Desta forma, a habilidade de um soldador certificado é produzida por um sistema, que garante a repetitividade das soldas com um pequeno número de erros ou defeitos (BROERING, 2005). Normalmente, a unidade de controle encontra-se embutida na fonte de soldagem, constituindo-se num único bloco do sistema.

Constituindo-se como o principal componente do sistema, identificamos o cabeçote orbital. Existem três tipos de cabeçotes orbitais, os cabeçotes de câmara fechada, os de câmara aberta e os cabeçotes orbitais de superfície. O mais comum é o cabeçote do tipo câmara fechada. Neste, cria-se um ambiente formado por um sistema que pressiona o tubo ao redor da área a ser soldada. Este ambiente, onde ocorre a soldagem, é totalmente preenchido com gás inerte de modo a proteger a poça de fusão e o eletrodo, além de que o gás que flui pela junta formada entre os tubos, atua de forma a evitar a entrada de oxigênio, atenuando os riscos de imperfeições na solda. Este tipo de cabeçote orbital é utilizado em tubos com diâmetro externo de 1,6 mm a 162 mm e espessura de parede de até 3,9 mm. (MANNION, B. et al, 1999)

Os cabeçotes de câmara aberta são indicados para os casos onde a espessura da parede do tudo é superior a 3,5 mm e se faz necessária a adição de material. Nesta modalidade a tocha de soldagem, assim como o material de adição, é posicionada a 45° em relação à junta a ser soldada. Neste tipo de cabeçote a

distância entre o eletrodo e a peça pode ser controlada por um AVC (automatic voltage control), permitindo assim a consistência do cordão de solda em tubos que apresentam excentricidade. (CUNHA et al, 2007)

Já os cabeçotes orbitais de superfície são empregados na produção e reparos de trocadores de calor. Por apresentar um número considerável de tubos a serem soldados, esta tarefa se mostra extremamente repetitiva e fatigante para o soldador. Com o emprego deste tipo de equipamento, elimina-se o fator fadiga do soldador, que passa a assumir uma posição de supervisor do processo. (CUNHA et al, 2007)

2.4.1. Cabeçote Orbital

Este desenvolvimento contempla um sistema de soldagem orbital equipado com um cabeçote do tipo câmara fechada. Este cabeçote deve ser capaz de garantir o correto posicionamento entre os tubos durante a soldagem, promover o deslocamento do eletrodo de tungstênio em torno dos tubos a serem soldados, e criar um ambiente a ser preenchido por gás inerte, de forma a proteger o eletrodo de tungstênio e a poça de fusão contra a contaminação por oxigênio proveniente do ar. Na soldagem orbital, o correto posicionamento e alinhamento entre os tubos a serem soldados, incide diretamente na qualidade final da solda. Desta forma, para atender a esta exigência, o cabeçote de soldagem orbital é provido de um conjunto posicionador. (CUNHA et al, 2007)

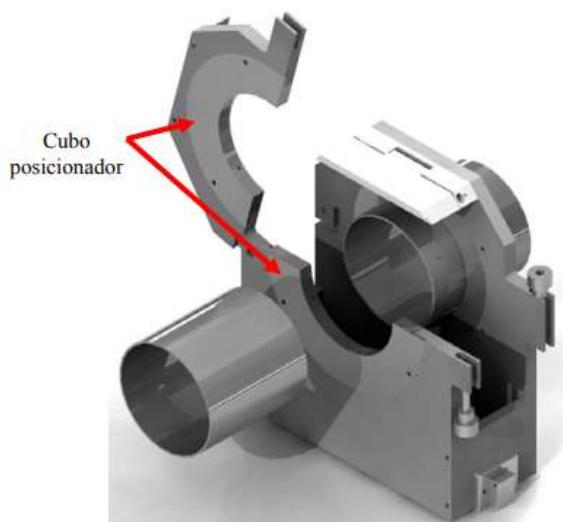
Figura 7 – Cabeçote fechado de solda orbital



Fonte – Autores, 2020.

Este dispositivo é articulado e acopla um subsistema denominado de cubo posicionador, tendo a possibilidade ser substituído de acordo com o diâmetro externo dos tubos a serem utilizados.

Figura 8 – Conjunto posicionador



Fonte – CUNHA et al, 2007.

Devido às tolerâncias no diâmetro dos tubos, o cubo posicionador é equipado com um sistema do tipo pistão-mola, sendo estes distribuídos ao longo de quatro quadrantes com a finalidade de manter rígido o posicionamento dos tubos. O conjunto cinemático, responsável pelo deslocamento do eletrodo, é composto por um conjunto de engrenagens que permite a continuidade do movimento da engrenagem que transporta o eletrodo de tungstênio (engrenagem 1). (CUNHA et al, 2007)

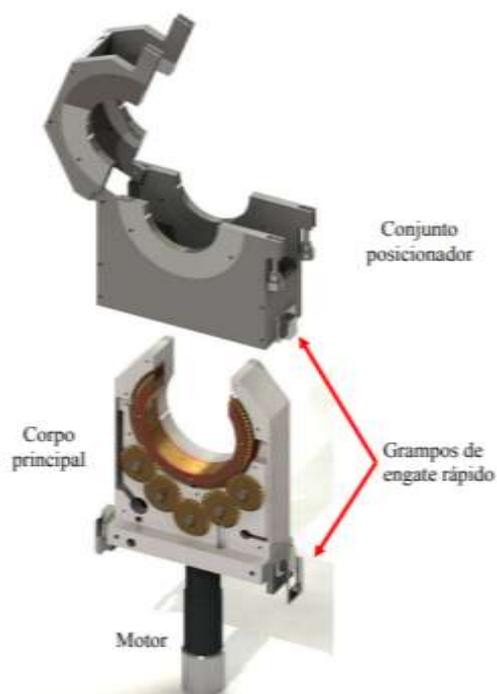
Figura 9 – Conjunto cinemático



Fonte – CUNHA et al, 2007.

O acionamento do conjunto cinemático é feito por um servo motor DC acoplado a um redutor planetário. A ligação elétrica entre o polo negativo da fonte de soldagem e o eletrodo de tungstênio é feita através da engrenagem 1. Desta forma, as engrenagens 2 a 6 ficam sujeitas ao mesmo potencial do eletrodo, sendo necessário um isolamento elétrico entre o conjunto cinemático e o eixo do motor. (CUNHA et al, 2007)

Figura 10 – Corpo principal do cabeçote orbital montado e acoplamento do conjunto posicionador



Fonte – CUNHA et al, 2007.

Esse conjunto cinemático é montado no corpo principal do cabeçote orbital e este acoplado ao conjunto posicionador por meio de grampos de engate rápido, tornando o acoplamento simples e rápido.

2.4.2. Fonte de soldagem

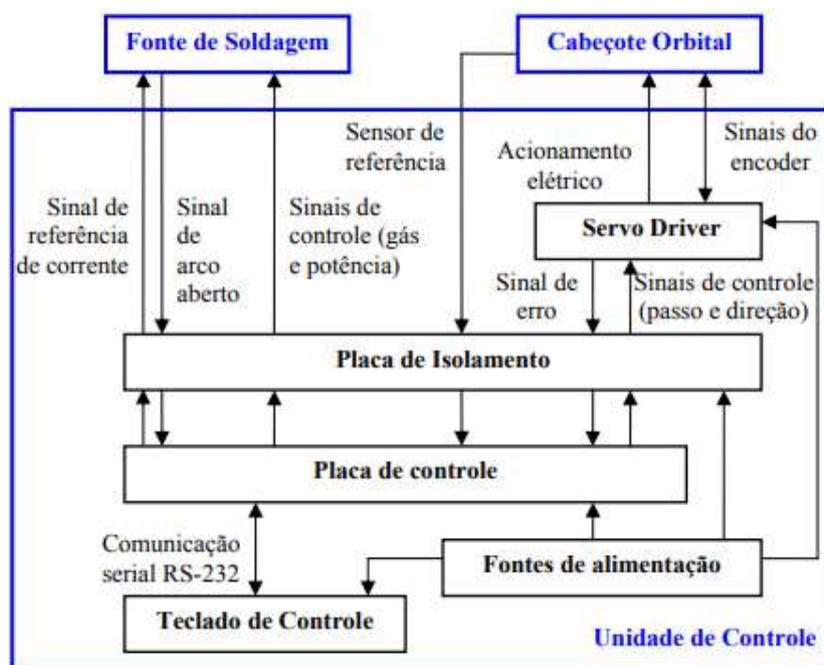
A fonte de soldagem utilizada neste sistema emprega tecnologia inversora, nome devido à estrutura eletrônica de potência utilizada neste tipo de equipamento, que permite a conversão de energia em elevados valores de frequência, reduzindo a massa e o volume dos elementos passivos que a compõe, tornando à mesma compacta e portátil, atendendo aos requisitos de portabilidade do sistema. (CUNHA et al, 2007)

No sistema de soldagem orbital o deslocamento do eletrodo de tungstênio deve ocorrer de forma sincronizada com a corrente, este sincronismo se faz necessário em virtude de nesta soldagem termos todas as posições possíveis de soldagem (plana, vertical descendente, sobre cabeça e vertical ascendente). Assim, teoricamente para cada posição de soldagem é necessária uma corrente de soldagem e uma velocidade de deslocamento do eletrodo diferente, para conseguir isto, a unidade de controle deve comandar o deslocamento do eletrodo e o valor da corrente simultaneamente. De modo a permitir o controle da corrente, a fonte de soldagem é equipada com uma interface analógica para a entrada do sinal de referência de corrente e outros sinais de comando como disparo da solda, controle de abertura do gás e sinal que indica arco aberto. A mesma deve possuir capacidade de fornecimento de corrente da ordem de 150A, além de um sistema de ignição do arco. (CUNHA et al, 2007)

2.4.3. Unidade de controle

A unidade de controle é composta por uma placa de controle, placa de isolamento, servo driver, teclado de comando remoto e as fontes necessárias para alimentar o sistema. Segue diagrama demonstrando componentes da unidade de controle.

Diagrama 1 – Detalhamento da unidade de controle



Fonte – CUNHA et al, 2007.

A placa de controle, baseada num sistema microcontrolado, é responsável pelo controle do cabeçote orbital e da fonte de soldagem, além da interface com o usuário. Esta também é responsável por gerar as formas de onda do processo, sendo necessária uma saída de sinais analógicos para o sinal de referência de corrente da fonte de soldagem. No teclado de comando remoto é feita a seleção de todas as variáveis do processo, além do armazenamento e recuperação de programas de soldagem. A comunicação entre o teclado de comando remoto e a placa de controle é feita através de um canal serial. (CUNHA et al, 2007)

O acionamento do servo motor, encontrado no cabeçote orbital, é realizado por intermédio de um servo driver, este dispositivo realiza o acionamento de motores DC a partir de sinais de controle para motor de passo. Para conseguir isso, os sinais do encoder são conectados diretamente ao servo driver e este se encarrega de fechar a malha de controle de posição do motor. Desta forma, a implementação do software de controle torna-se mais simples e exige menos capacidade de processamento do sistema. (CUNHA et al, 2007)

Caso ocorra algum problema no posicionamento, o servo driver envia para a placa de controle um sinal de erro indicando tal anormalidade. Em virtude deste sistema orbital utilizar o processo TIG com abertura de arco por meio de um sistema de ignição que emite elevados níveis de ruídos eletromagnéticos extremamente nocivos para os circuitos eletrônicos digitais, se faz necessário a utilização de uma placa de isolamento de todos os sinais, tanto de entrada como de saída, da placa de controle. (CUNHA et al, 2007)

2.5. Principais Consumíveis

2.5.1. Gás de Proteção

De acordo com Bracarense (2000.), os tipos mais comuns de gases são o argônio e o hélio e as misturas entre estes, utilizadas em aplicações especiais, além de misturas com hidrogênio e nitrogênio. O argônio utilizado em processos de soldagem normalmente possui uma pureza de 99,95 %, sendo aceitável para a maioria dos metais, excetuando-se aqueles reativos ou refratários. O argônio é mais utilizado que o hélio no processo devido às seguintes características:

- Possibilita arco mais suave
- Penetração reduzida
- Ação de limpeza quando da soldagem de alumínio ou magnésio
- Baixo custo e alta disponibilidade
- Boa proteção com baixos fluxos
- Maior resistência a ventos cruzados
- Melhor partida do arco

O gás hélio transmite maior calor para uma mesma corrente e tensão 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. (BRACARENSE, 2000)

2.5.2. Eletrodo de Tungstênio

O eletrodo não consumível utilizado para soldagem TIG é constituído de tungstênio puro ou ligado a diversos elementos químicos, pois a presença desses elementos de liga aumenta a capacidade de emissão de elétrons, além de permitir uma maior vida útil ao eletrodo. A classificação AWS A 5.12-92 apresenta os valores máximos de cada elemento químico:

Tabela 2 – Composição química do AISI 316L (% em peso).

Classe AWS	W %	CeO ₂ %	La ₂ O ₃ %	ThO ₂ %	ZrO ₂ %	Outros % max	Cor da ponta
EWP	99,5			1960	5,18	0,5	Verde
EWCe-2	97,5	1,8-2,2		1970	5,02	0,5	Laranja
EWL _a -1	98,3		0,9-1,2	1980	4,44	0,5	Preta
EWTh-1	98,5			0,8-1,2	3,92	0,5	Amarela
EWTh-2	97,5			1,7-2,2		0,5	Vermelha
EWZr-1	99,1				0,15-0,4	0,5	Marrom
EWG	94,5			2000	3,52	0,5	Cinza

Fonte – Fonseca, 2004.

O eletrodo de tungstênio toriado é um dos mais utilizados no processo de soldagem Tig, tendo duas variedades sendo com 1% de tório e outro com 2% de tório. Esses eletrodos possuem um valor mais elevado possuem algumas vantagens. A adição de tório aumenta a emissão de elétrons o que resulta em uma maior facilidade em abertura do arco, faixas de corrente mais elevadas e menor tendência de grudar o eletrodo na peça ao abrir o arco. (MANUAL DE TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO E SOLDAGEM, 2002)

2.5.3 Varetas de Soldagem

Material de adição cuja função principal é unir peças metálicas mantendo as mesmas características do metal base. O processo TIG manual possui um caráter artesanal, a adição da vareta é feita manualmente, a quantidade de material depende do soldador, apesar de mais lenta, a qualidade de acabamento é insuperável. A escolha é feita de acordo com o metal a ser soldado, são aplicadas varetas de ligas semelhantes ao metal

base, porém há diversas situações onde a aplicação de materiais de maior resistência à impacto, atrito ou abrasão, como em revestimento de aços ferramenta. Já o processo de soldagem orbital automatizado não necessita de adição de material, a fusão acontece diretamente no metal base (SANTOS et al, 2019). Segue relação das principais ligas comercializadas:

- Aço inox (308L, 309L, 310, 312, 316L);
- Aço carbono (ER70S3);
- Alumínio (4043, 5356);
- Aços não ligados ER70S-3;
- Ferro Fundido (NiFe, NiCi, NiCu Monel);
- Latão;
- Cobre;
- Prata;
- Phoscooper;
- Stellite 6 (CoCr A);
- Titânio.

2.6. Viabilidade Econômica

As empresas devem estar preparadas para enfrentar a competição global, devendo então investir em inovação, novos equipamentos, processos e tecnologias. Os projetos de investimentos podem ser classificados da seguinte forma. (BORDEAUX-REGO, 2015 apud SPERB et al., 2018, p. 213)

- Expansão: aquisição de ativos para aumentar a produção ou participação no mercado por meio de novas unidades, instalações fabris, máquinas, equipamentos ou veículos;
- Substituição: substituir ou renovar ativos que estejam obsoletos, reposição ou atualização tecnológica; Modernização: adaptação ou recondicionamento de máquina ou instalação para maior eficiência.
- Intangíveis: gasto com propaganda, pesquisa, treinamentos e serviços de consultoria.

Os investimentos iniciais para a implantação do processo de soldagem orbital totalizam R\$ 650.000,00, sendo que somente o equipamento propriamente dito representa o maior valor (R\$350.000,00). Estes dados foram retirados do software de gestão da empresa petroquímica do Rio Grande do Sul, cada equipamento possui uma ordem de manutenção na qual todos os custos e investimentos são inseridos, estes valores foram retirados da ordem de manutenção do forno que foi feito com soldagem orbital, os próximos fornos que forem realizados com esta tecnologia não apresentarão estes números. A Tabela 3 apresenta o investimento para aquisição da soldagem orbital. (SPERB et al., 2018)

Tabela 3 – Investimentos iniciais da soldagem orbital

Descrição	Investimento
Equipamento de solda orbital	R\$ 350.000,00
Mão-de-obra (consultoria)	R\$ 50.000,00
Aluguel de acessórios	R\$ 50.000,00
Equipamentos de apoio	R\$ 60.000,00
Ferramentas	R\$ 20.000,00
Sobressalentes dos equipamentos	R\$ 120.000,00
Total	R\$ 650.000,00

Fonte – SPERB et al., 2018.

Os dados apresentados abaixo foram obtidos na realização da manutenção em dois fornos de pirólise na unidade de insumos básicos realizados pelo setor de caldeiraria em uma empresa petroquímica situada no Rio Grande do Sul. A diferença de custos entre os processos é apresentada na Tabela abaixo. (SPERB et al., 2018)

Tabela 4 – Diferença entre o custo total de soldagem manual e orbital

Descrição	Soldagem manual (R\$)	Soldagem Orbital (R\$)	Diferença (R\$)
Mão-de-obra	177.920,00	81.360,00	96.560,00
Gás de proteção	51.040,00	11.880,00	39.160,00
Material de adição	27.621,00	5.385,00	22.236,00
Retrabalhos	16.540,00	6.665,00	9.875,00
Gamagrafia	152.879,00	64.210,00	88.669,00
Total	426.000,00	169.500,00	256.500,00

Fonte – SPERB et al., 2018.

Cada um deles foi feito com um método de soldagem diferente. O custo total para troca da serpentina pelo processo manual foi de R\$ 426.000,00 já o custo para troca de serpentina utilizando soldagem automatizada é de R\$ 169.500,00. (SPERB et al., 2018)

3. METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos para esse estudo, que é comparar dois processos de soldagem TIG, sendo um manual e o outro orbital automatizado, foram realizados ensaios visuais, metalográficos e ensaios de dureza nas amostras retiradas dos corpos de prova confeccionados a partir desses processos de soldagem.

Foram confeccionados corpos de prova de Ø 1.1/2” com espessura da parede de 1,65 mm de aço inoxidável AISI 316L. O processo de confecção desses corpos de prova ocorreu a partir da união de tubos de 50mm cada (figura 11), utilizando o processo de soldagem TIG manual e orbital automatizado. Para realizar os ensaios designados, foram fabricados dois corpos de prova, sendo o corpo de prova 01 pelo processo manual e o corpo de prova 02 pelo processo orbital.

Figura 11 – Modelo de corpo de prova fabricado



Fonte – Autores, 2020.

Com os corpos de prova 01 e 02, foi realizado o ensaio visual conforme norma técnica NBR NM 315:2017, esse que é um importante recurso na verificação de alterações dimensionais, padrão de acabamento superficial e observação de descontinuidades superficiais em produtos fundidos, forjados, laminados e soldados. (MOTA, 2019)

Logo após, com o auxílio da cortadeira metalográfica, foram retiradas seis amostras, sendo três amostras do corpo de prova 01 manual e três do corpo de prova 02 orbital.

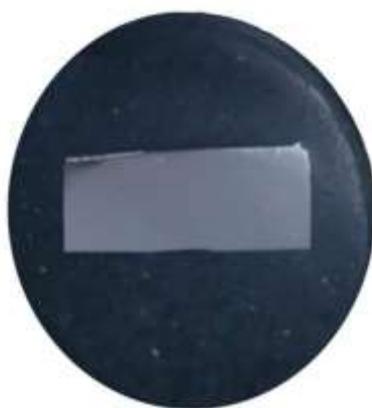
Figura 12 – Corte de amostras ainda não embutidas



Fonte – Autores, 2020.

O passo seguinte foi levar todas as seis amostras para o equipamento cuja função é embutir peças. De forma individual, cada uma das amostras foi embutida, conforme figura 13. Esse procedimento é importante pois facilita no processo de preparação das amostras, isso inclui lixamento e polimento, para posteriormente passarem pela metalografia, finalizando com os ensaios de dureza.

Figura 13 – Amostra já em processo de polimento



Fonte – Autores, 2020.

Essas amostras, após embutimento, foram levadas à uma politriz semiautomática e passaram pelo processo de lixamento onde foram utilizadas as lixas de grão 240, 320, 400, 600, 800, 1200 e 2500. Após lixamento foi realizado o polimento utilizando as aluminas de $1\mu\text{m}$, $0,5\mu\text{m}$ e $0,3\mu\text{m}$.

Depois de polidas todas as seis amostras, as mesmas passaram pelo processo de ataque químico utilizando o ácido Kalling ($5\text{gr CuCl}_2 + 100\text{ml HCl} + 100\text{ml Álcool Etilico}$) indicado para aços inoxidáveis. A duração desse processo é de dez minutos, cuja função é revelar a estrutura do material para que seja possível fazer a leitura microscópica.

Após finalizar as análises microscópicas, as amostras foram levadas para realização dos testes de dureza. O equipamento utilizado neste ensaio é o durômetro, cujo os resultados são fornecidos em dureza rockwell (HRC). Utilizando uma ponta de diamante, cada uma das amostras foi testada conforme figura 14. Nesse processo, a amostra é posicionada na bancada do equipamento, a ponta de diamante é guiada até o ponto escolhido da peça mediante regulagem, finalizando com a liberação da carga. Nesse caso, para cada amostra, foram realizados três testes na solda e três no material ao redor da solda, também conhecido como ZTA (zona termicamente afetada).

Figura 14 – Amostras do processo orbital após execução dos testes de dureza



Fonte – Autores, 2020.

Esse procedimento foi realizado a fim de comparar se o material ao redor da solda sofre alguma alteração no decorrer do processo de soldagem. Todos os resultados estão tabulados e são fornecidos no tópico abaixo.

4. RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES

Fazendo análise visual de acordo com a norma NBR NM 315, foi possível observar primeiramente que houve maior alteração nas dimensões da solda do CP01 manual, apresentando descontinuidades e falhas identificadas como porosidade, ou pequenos furos na solda, isso porque é um processo onde não se tem tanto controle sobre as variáveis e parâmetros utilizados. Também foi possível observar que o CP02 orbital apresenta um melhor acabamento superficial, justamente por ser um processo automatizado onde tem-se um maior controle sobre os parâmetros utilizados. A coloração das soldas também deve ser levada em consideração, já que o CP01 apresenta uma coloração mais forte que o CP02. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2017).

Após realizar a análise metalográfica pode-se perceber perfeitamente a divisão entre a área soldada e a região que não recebeu solda. Nas imagens a seguir a ZTA (Zona termicamente afetada) se encontra à esquerda, a fronteira entre solda e material na região central, e a região soldada à direita conforme figura 15.

Figura 15 - Amostras TIG Manual



Fonte - Autores, 2020

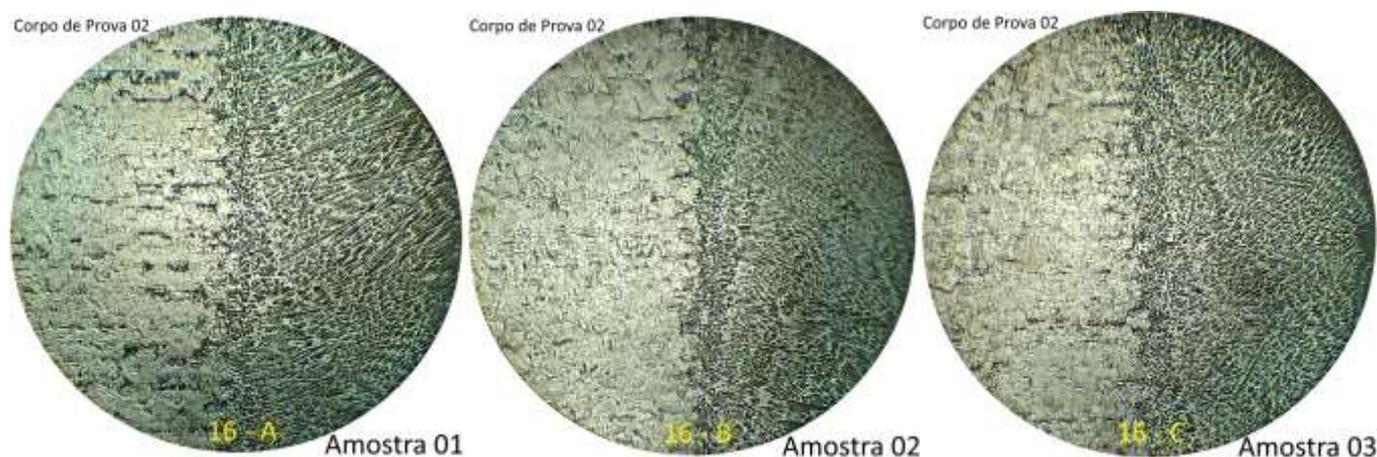
Logo na amostra 01 (Figura 15 - A), podemos notar uma grande alteração na estrutura do material, ou seja, esse processo de soldagem tem como característica afetar de modo menos consistente a ZTA. Afetando assim as propriedades mecânicas do metal.

Na amostra 02, exibida na figura 15 - B obteve-se um melhor resultado na análise visual e macroscópica em relação a amostra 01 (Figura 15 - A), ou seja, a temperatura incidente sobre o local não soldado não afetou em grande escala a estrutura do material naquela região, é possível notar esse fenômeno, quando se tem uma região que de certa forma apresenta menores diferenças de superfície, como mostra a extremidade esquerda da imagem.

Levando estes pontos em consideração pode-se afirmar que ao analisar visualmente a amostra 03 (Figura 15 - C), tem-se um tipo de meio termo entre as amostras analisadas anteriormente, pois nota-se que o material apresenta uma certa rugosidade, da mesma forma que também apresenta uma boa parte da superfície mais uniforme.

Já na análise das amostras soldadas pelo processo Tig orbital, alcança-se as seguintes conclusões:

Figura 16 - Amostras TIG Orbital



Fonte - Autores, 2020

A soldagem orbital se mostrou mais uniforme e constante, podemos observar que na amostra 02 e 03 (Figura 15 - B e Figura 15 - C, respectivamente) tem-se uma fronteira entre solda e material bem melhor demarcada, isso se dá ao fato de que a solda não afetou significativamente a estrutura da ZTA.

Vale salientar que na amostra 01 (Figura 16 - A), tem-se uma anomalia em relação às outras amostras do corpo de prova 02, onde percebe-se uma alteração significativa na estrutura do material localizada na ZTA, conclui-se que esta região em particular pode ter sido afetada duas vezes pela temperatura da soldagem, ou seja, ter sido obtida do local onde foi iniciado e finalizado o cordão de solda.

De maneira geral, e de acordo com as análises visuais, macroscópicas e microscópicas, expõe-se um padrão de qualidade muito melhor referente às amostras retiradas do corpo de prova 02 (soldagem orbital) em relação às amostras que foram retiradas do corpo de prova 01 (soldagem manual).

Realizados os testes de dureza no material nas amostras da Tig manual chega-se aos seguintes números:

Tabela 5 - Relação de dureza por amostra TIG Manual

	CP01 - AMOSTRA 01			CP01 - AMOSTRA 02			CP01 - AMOSTRA 03		
	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 01	Teste 02	Teste 03
SOLDA	48 HRC	52 HRC	77 HRC	64 HRC	66 HRC	45 HRC	41 HRC	76 HRC	79 HRC
MATERIAL	45 HRC	55 HRC	61 HRC	30 HRC	57 HRC	71 HRC	40 HRC	37 HRC	50 HRC

Fonte - Autores, 2020

Os resultados são mostrados em escala HRC de dureza, e na tabela acima nota-se que há uma grande variação entre eles, isso se dá pelo fato da solda Tig manual alterar com mais facilidade as propriedades mecânicas do metal estudado. Uma vez que não se tem um controle total e absoluto sobre as variáveis de solda, como a distância e velocidade da tocha em relação ao metal de base, temperatura da poça de soldagem, quantidade de material adicionado e pressão de gás constante.

O aumento da dureza ocasionado pelo processo de soldagem à princípio pode parecer algo satisfatório, porém levando em conta os princípios mecânicos dos materiais, onde tem-se que quanto mais duro o material, com mais facilidade ele poderá se romper quando aplicado tensões à peça. Logo dependendo da aplicação que se dará para a peça, a mesma pode não atender a necessidade solicitada, após passar por um processo de emenda por exemplo, utilizando a soldagem manual TIG.

Tabela 6 - Relação de dureza por amostra TIG Orbital

	CP02 - AMOSTRA 01			CP02 - AMOSTRA 02			CP 03 - AMOSTRA 03		
	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 01	Teste 02	Teste 03	Teste 01	Teste 02	Teste 03
SOLDA	52 HRC	40 HRC	44 HRC	59 HRC	59 HRC	62 HRC	51 HRC	53 HRC	47 HRC
MATERIAL	45 HRC	41 HRC	40 HRC	65 HRC	63 HRC	69 HRC	62 HRC	58 HRC	56 HRC

Fonte - Autores, 2020

Analisando a tabela de resultados do corpo de prova 02 (CP02), identifica-se em alguns testes uma dureza menor para a solda em relação ao material, como esta diferença não apresenta estabilidade, pode-se concluir que dado o processo de soldagem, o material após aquecido, consegue manter as propriedades físicas, nesse caso analisado pelo teste de dureza.

Nas amostras soldadas por Tig orbital, tem-se uma maior consistência de valores, sem muitas diferenças, o que nos leva a conclusão de que esse processo de soldagem por ser mais controlado, não afeta de tanto o comportamento mecânico do material.

Onde remetendo ao resultado das amostras da soldagem manual, é uma grande vantagem, já que se tem a possibilidade de poder unir uma peça à outra sem que na região soldada sofra uma ruptura precoce por conta de ter afetado a estrutura do material significativamente.

5. CONCLUSÃO

A partir das análises propostas neste artigo e os resultados obtidos a partir delas, obtém-se a idéia de que a soldagem Tig orbital é um tipo de processo quase perfeito e que deveria ser usado a qualquer custo, porém os resultados apesar de trazer este pensamento, também nos traz a noção de que o processo Tig manual apesar de não ser muito preciso e nem veloz, pode ser usado na maioria dos casos sem problema algum, desde que aplicado por um profissional experiente e qualificado para tal atividade.

Baseando-se na norma NBR NM 315 foi realizada a análise visual dos corpos de prova, onde foi possível identificar a superioridade da solda orbital. O CP01 manual apresentou maiores falhas, solda mais espessa, coloração mais escura. Enquanto o CP02 orbital apresentou uma solda mais homogênea e melhor acabamento superficial.

Diante das análises realizadas é possível observar que o processo manual apresenta maiores falhas estruturais já que é um processo que não possibilita ter um total controle das variáveis de solda, ficando assim mais suscetível ao erro ou falha quando comparado com um processo automatizado que possui parâmetros mais controlados. A partir das análises dos ensaios de dureza, podemos observar que a solda manual apresenta dureza maior que o processo orbital, porém ao analisar a ZTA (zona termicamente afetada), o orbital apresenta maior dureza. Isso se dá pelo fato de os processos de soldagem alterar a resistência do material no entorno da solda.

6. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 315: Ensaios não destrutivos - Ensaio Visual - Requisitos e práticas recomendadas.** 2017.
- BRACARENSE, Alexandre Q.; FELIZARDO, Ivanilza; LIMA II, Eduardo José; TORRES, Guilherme F.; RAMALHO, Frederico; ZANON, Gislaine P; Sistema **robotizado para soldagem orbital de dutos.** 2004.
- BRACARENSE, Alexandre Q., **Processo de Soldagem TIG – GTAW.** Belo Horizonte, MG. UFMG, 2000.
- BROERING, C. E. **Desenvolvimento de Sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico.** Fev. 2005. 96p. Dissertação de mestrado. Dept. de Eng. Mecânica, UFSC, Florianópolis, 2005.
- CASTRO, Nara L. B. et al.; **Ensaios para determinação de resistência em juntas soldadas.** Revista Construindo, p. 57-67. Belo Horizonte, MG. UFMG, 2017.
- CUNHA, Tiago V., et al. **Desenvolvimento de um sistema de soldagem orbital de tubos concepção do equipamento.** Florianópolis, SC. UFSC, 2007.
- FIGUEIRÔA, D.W. et al. **Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono.** p, 446. Recife, PE. UFPE, 2015.
- FONSECA, Ademir S. **Soldagem TIG.** SENAI – Centro de Formação Profissional “Aloysio Ribeiro de Almeida”. Varginha -Minas Gerais. 2004.
- GARCIA, José A. O. et al. **Desenvolvimento da Tecnologia de Soldagem do Titânio pelo Processo TIG Orbital no Segmento Aeroespacial Brasileiro - Parte 2: Caracterização das Juntas Soldadas.** p, 107-108. Campos dos Goytacazes, RJ. UENF, CCT, LAMAV, 2007.
- GUILHERME, L. H. et al. **Resistência à corrosão de junta dissimilar soldada pelo processo TIG composta pelos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 444.** p, 42-50. São Carlos, SP. UFSCar, 2014.
- MANNION, B. The fundamentals of orbital welding. **Welding Design and Fabrication.** USA, v. 72, pp. 22-24, 26-27. Feb.1999.
- MANNION, B. et al. **Setting up and determining parameters for orbital tube welding.** The Fabricator. USA, v. 29. May. 1999.
- Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem.** Núcleo Tecnológico de Soldagem & Qualidade. São Paulo, SP – 2004.
- MOTA, Ana Cristina et al. **Guia Abendi de END & Inspeção.** São Paulo, SP. 2019.

- MOURA, Antônio R. S., **simulação numérica do campo de temperatura na soldagem TIG do aço AISI 316L**. p, 13-51. Mossoró, RN. UFERSA, 2018.
- PAES, Luiz E. S. **Soldagem Tig orbital – técnica de alimentação dinâmica do arame visando aumento na produtividade**. p, 45. Florianópolis, SC. UFSC, 2016.
- PIGOZZO; Ivan O.; **Soldagem TIG Orbital: Otimização de equipamentos e prospecções tecnológicas para procedimentos de passe raiz**. 2015.
- RIBEIRO, Júlio C. B. **Análise de técnicas para a soldagem Tig automatizada**. p, 29. Florianópolis, SC. UFSC, 2012.
- SANTORI, Francisco. et al. **Uma Análise Comparativa entre Diferentes Versões de Variantes Modernas do Processo MIG/MAG para o Passe de Raiz em Soldagem Orbital**. p, 443. Florianópolis, SC. UFSC, 2017.
- SANTOS, A. S. et al. **Avaliação da susceptibilidade à corrosão de um aço inoxidável AISI 316L submetido à simulação térmica com o uso da Gleeble**. Revista Matéria. São Luís, MA. IFMA, 2019.
- SANTOS, Daniel et al. **Consumíveis de solda: Processo TIG**. Curitiba, PR. OPET, 2019.
- SILVA, Daniel F. **Influência do aporte térmico na soldagem de chapas de aço inoxidável austenítico aisi 316I soldadas pelo processo GTAW**. p, 15-79. Ilha Solteira, SP. UNESP, 2017.
- SPERB, I.M. et al. **Análise da viabilidade financeira da utilização de soldagem orbital em manutenção: um estudo de caso**. p, 203-230. Taubaté, SP. LAJBM, 2018.