UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CURSO DE GRADUAÇÃOM EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MICHEL BEZ BIROLO

ANÁLISE DE PROCESSO EM SOLDAGEM TIG AUTÓGENA DUPLO CÁTODO *TANDEM* OBJETIVANDO ALTA PRODUTIVIDADE

> FLORIANÓPOLIS 2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA CURSO DE GRADUAÇÃOM EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

MICHEL BEZ BIROLO

ANÁLISE DE PROCESSO EM SOLDAGEM TIG AUTÓGENA DUPLO CÁTODO *TANDEM* OBJETIVANDO ALTA PRODUTIVIDADE

Trabalho de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais.

Orientador: Jair Carlos Dutra

FLORIANÓPOLIS 2010

MICHEL BEZ BIROLO

ANÁLISE DE PROCESSO EM SOLDAGEM TIG AUTÓGENA DUPLO CÁTODO *TANDEM* OBJETIVANDO ALTA PRODUTIVIDADE

Este Trabalho de Graduação foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Fernando Cabral, Ph. D (EMC/UFSC)
Coordenador do Curso

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc. (EMC/UFSC).
Prof. Responsável

Banca Examinadora:

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Ing. - (EMC/UFSC).
Orientador

Mateus Baranceli Schwedersk, Eng. (EMC/UFSC).
Co-Orientador

Prof. Dylton do Vale Pereira Filho, M. Sc. (EMC/UFSC).
Membro

Ficha Catalográfica

Birolo, Michel Bez, 1983 –

Análise de processo em soldagem TIG autógena duplo cátodo *tandem* objetivando alta produtividade. Michel Bez Birolo – 2010

57 f.: il. color.; 30cm

Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Ing.

Co-Orientador: Mateus Baranceli Schwedersk, Eng.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais, 2010.

- 1. Duplo Cátodo 2. Soldagem TIG 3. Produtividade 4. Soldagem Autógena 5. Tochas *Tandem* 4. Influencia Magnética
- I. Dutra, Prof. Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia de Materiais. III. Análise de processo em soldagem TIG duplo cátodo *tandem* objetivando alta produtividade.

Dedico este trabalho aos meus pais Marcos Elias Bez Birolo e Lizete Fornasa Bez Birolo, que dedicaram toda a vida aos filhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

...em primeiro lugar, ao orientador, Prof. Dr. Jair Carlos Dutra pela oportunidade oferecida, pela paciência e orientações deste trabalho.

...aqui deixo também meus agradecimentos ao meu co-orientador e amigo, mestrando Mateus Baranceli Schwedersk, pela confiança, orientação e apoio que contribuíram muito para o meu aprendizado.

...aos colegas do LABSOLDA, pela disponibilidade e por todo auxilio realizado durante o período, inclusive amizade e companheirismo.

...aos professores do Curso de Graduação em Engenharia de Materiais que contribuíram e para minha formação.

...aos meus tios Joelma e Ciro pela carinhosa hospitalidade e companheirismo.

...aos meus pais por me darem todas as oportunidades para chegar onde estou.

...a minha namorada pelo amor e carinho, sempre presente nas horas mais difíceis.

...a todos aqueles que de maneira direta ou indireta contribuíram para a realização desse trabalho.

A todos meu muito obrigado.

Vá até onde puder ver. Quando lá chegar poderá ver ainda mais longe. (Goethe)

RESUMO

O processo de soldagem TIG tem a fama justificada de ser um processo de alta qualidade, pois foi desenvolvido no início dos anos 40 para atender a uma indústria bem exigente, o segmento aeroespacial. Hoje por ser um processo já bastante difundido e que proporciona uma poça de fusão bem controlada, o torna adequado para soldar materiais especiais, ou juntas que precisem de bom acabamento na raiz. Sempre buscando qualidade e produtividade, características exigidas em indústrias do primeiro e segundo setor. O processo TIG de uma forma geral é considerado de baixa produtividade, uma vez que produz cordões de solda de altíssimo nível de qualidade, sendo que o processo autógeno (sem a utilização de material de adição) de soldagem é um processo muito mais crítico em termos de velocidade de avanço. E é nesse contexto que o uso da soldagem TIG multi-cátodo aparece como alternativa para obter maiores velocidades de soldagem, técnica já difundida em indústrias que utilizam a soldagem longitudinal em aço Inox. Mas segundo trabalhos científicos de Mendes (2003) e Savage (1979), o problema em utilizar soldagem duplo ou triplo-catodo é a influencia da deflexão magnética dos arcos voltaicos devido à interação entre si de campos magnéticos. Neste trabalho foram realizados ensaios com soldagem simples-catodo, variando ângulos de soldagem e testes com gases de proteção para se avaliar a influencia de cada parâmetro e até onde poderíamos chegar em termos de produtividade. Após, deu início aos testes com dupla tocha TIG, dois eletrodos trabalhando um atrás do outro (tandem), onde também exploramos ângulos distintos de soldagem em chapas de aço sob junta sobreposta, na tentativa de obter melhores desempenhos em qualidade e produtividade. Também com relação ao duplo catodo, a aproximação dos eletrodos motivou o estudo e a utilização de campos magnéticos externos para tentar diminuir a deflexão magnética dos arcos voltaicos. Ao tentar trabalhar com os eletrodos muito afastados (caso duplo-catodo com distâncias próximas a 0,023 m) não conseguimos resultados satisfatórios para melhorar a produtividade, e quando se tentou trabalhar com eletrodos mais próximos o desvio dos arcos aumenta exponencialmente impossibilitando a soldagem sem a adição de um campo magnético externo. Com isso, obteve-se vantagem na velocidade de soldagem em relação a um eletrodo, mas não foi possível a obtenção de uma situação que fosse plausível a estabilização os dois arcos voltaicos de maneira satisfatória, uma vez que a interação dos campos magnéticos é muito complexa. Identificando que, o sucesso desse sistema se deve ao trabalho dos eletrodos tão próximos de maneira que não ocorra a deflexão dos arcos.

ABSTRACT

The TIG welding process has the justified reputation of being a process high quality as it was developed in the early '40s to attend a high demanding industry the aerospace segment. Today the process is already widespread and it provides a pool of fusion well controlled makes it appropriate for special welding materials or need a good finish join root. Always looking for quality and productivity features required by the industries in first and second sector. The TIG process in general is considered low productivity since it produces weld join of high quality level with autogenously process (without use of addition material) this is a most critical process in speed rate terms. In this context use TIG multi-cathode welding appears as an alternative to achieve higher speeds of welding, a technique already widespread in industries that use longitudinal stainless steel welding. But according with Mendes and Savage academics works, the problem welding in double or triple-cathode is the influence of the magnetic deflection of the due arcs to interact with each other magnetic fields. We carried out experiments with single-cathode welding, welding with varying angles, tests with shielding gas to evaluate the influence of each parameter and how far we could go in terms of productivity. After, egan testing with dual TIG torch with two electrodes working behind the other (tandem), which also explored different welding angles in a steel plates on a lap joint in an attempt to obtain the best of quality and productivity performance. Also the double cathode respect the approach electrodes led the study and use external magnetic fields to decrease the magnetic deflection arcs. When we work with the electrodes far apart (If dual-cathode with distances close to 0.023 m) cannot registry satisfactory results to improve productivity and when tried working with electrodes next with other the magnetic diversion increases exponentially preventing welding without the addition of a external magnetic field. Thus, we obtained a speed welding advantage in relation to one single electrode, but wasn't possible to obtain a situation that plausible stabilize arcs is satisfactory. The interaction of magnetic fields is very complex. So the success of this system should work with the electrodes close enough to deflection arc don't show up.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 -	Ilustração do funcionamento de uma coluna de gás ionizado durante o processo de soldagem TIG com polaridade direta. (Fonseca, 2004).	04
Figura 02 -	Representação geral do sistema de soldagem TIG (SENAI, 2009).	04
Figura 03 -	Ilustração de recomendações para afiação do eletrodo de Tungstênio. (Timings, 2008).	06
Figura 04 -	Ilustração sobre a influência do ângulo da ponta do eletrodo na penetração do cordão no processo TIG. (SENAI, 2009).	06
Figura 05 -	Condutividade térmica e elétrica em função da temperatura para os respectivos gases. (Cunha, 1984).	08
Figura 06 -	Características da soldagem TIG sob a influência da polaridade de corrente. (Quites e Dutra, 1979).	09
Figura 07 -	Demonstração da influência da tensão x corrente do arco elétrico para comprimento de arco distinto. (Cunha, 1984).	11
Figura 08 -	Ilustração adaptada das regiões do arco elétrico relacionada com a tensão. (Timings, 2008).	12
Figura 09 -	Representação das isotermas para um arco elétrico no processo TIG. (Messler, 1999).	13
Figura 10 -	Representação da escala de potências específicas. (Mondenesi, 2004).	14
Figura 11 -	Representação da influência da velocidade de soldagem na penetração de solda. (SENAI, 2009).	15
Figura 12 -	Relação da velocidade de avanço, com a corrente de soldagem e o surgimento de defeitos. (SAVAGE, 1979).	16
Figura 13 -	Imagem de uma tocha comercial tri-cátodo TIG (três bocais térmicos e dois indutores de campos magnéticos externos). (fonte: <i>Ledica.it</i>).	19
Figura 14 -	Representação do funcionamento de um jato de plasma. (Martins, 1997).	21
Figura 15 -	Representação da deflexão entre os campos magnéticos na soldagem multi-cátodo.	22
Figura 16 -	Eletrodos das tochas de soldagem com 6,4mm (0,0064 m) de diâmetro.	24
Figura 17 -	Imagem de um dos indutores magnéticos testados com duplo embubinamento.	25
Figura 18 -	Imagem de um dos indutores magnéticos testados	25
Figura 19 -	Imagem das ponteiras do indutor magnético.	26
Figura 20 -	Esquemático do corpo de prova utilizado.	26
Figura 21 -	Imagem das tochas de soldagem sob a placa refrigerada de cobre.	27
Figura 22 -	Imagem da bancada experimental construída para este estudo.	28

Figura 23 -	Detalhe da imagem da bancada de teste com a distância mínima dos eletrodos a 90 graus. Tocha 1 TBI e tocha 2 Labsolda.	28
Figura 24 -	Esquemático das posições da tocha de soldagem.	29
Figura 25 -	Esquemático de posicionamento relativo de uma tocha com relação à peça.	30
Figura 26 -	Imagem para comparação do aspecto visual do cordão de solda para as duas tochas.	31
Figura 27 -	Tocha tandem TIG de duplo catodo (fonte: Ledica).	33
Figura 28 -	Detalhe da imagem da bancada de testes como as tochas de soldagem TIG e o indutor magnético posicionado na 1ª tocha.	37
Figura 29 -	Figura representativa da direção do campo magnético sob um condutor linear de corrente (fonte: figura Wikipédia).	38
Figura 30 -	Figura representativa da regra da mão direita criada por Maxwell: orientação do campo magnético "B", sentido da corrente elétrica "I" e "F" a força de Lorentz (fonte: figura Wikipédia).	38
Figura 31 -	Figura demonstrativa das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo.	39
Figura 32 -	Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o experimento de nº 06.	50
Figura 33 -	Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o experimento de nº 07.	51
Figura 34 -	Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo.	51
Figura 35 -	Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o ensaio nº 08.	52
Figura 36 -	Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem com relação à interação dos arcos voltaicos para o ensaio nº 08. (figura adaptada REIS, 2009).	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 -	Representação das principais morfologias dos cordões de solda em alta velocidade.	17
Quadro 02 -	Demonstração da relação da pressão do arco voltaico em função do uso de simples ou duplo-cátodo.(adaptado de Leng, 2006).	20
Quadro 03 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 01.	40
Quadro 04 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 02.	40
Quadro 05 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 03.	41
Quadro 06 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 04 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 45 mm (0,045 m).	42
Quadro 07 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 05 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 28 mm (0,028 m).	42
Quadro 08 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 06 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).	43
Quadro 09 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 07 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).	44
Quadro 10 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 08 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).	45
Quadro 11 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 09 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).	46
Quadro 12 -	Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 10 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 -	Composição química e identificação dos eletrodos no process TIG. (Cunha, 1984).	05
Tabela 02 -	Gases de Proteção Sugeridos para o processo TIG (Modenesi, 2004).	07
Tabela 03 -	Composição química do aço SAE 1020.	26
Tabela 04 -	Relação dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem com 100% de Argônio como gás de proteção.	31
Tabela 05 -	Relação dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem com 90% de Argônio e 10% de Hidrogênio como gás de proteção.	32
Tabela 06 -	dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem duplo catodo com 100% de Argônio como gás de proteção e tochas posicionadas a 90 graus.	34
Tabela 07 -	Relação dos principais cordões de solda com seus respectivos parâmetros.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	01
2. OBJETIVOS	02
2.1. OBJETIVO GERAL	02
2.1. OBJETIVO ESPECÍFICO	02
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	03
3.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM TIG	03
3.1.1 ELETRODOS TIG	04
3.1.2 COMPORTAMENTO DO GÁS DE PROTEÇÃO TIG	06
3.1.3 CORRENTES DE SOLDAGEM TIG	09
3.1.4 ABERTURA DO ARCO ELÉTRICO	10
3.1.5 TENSÃO DO ARCO ELÉTRICO	11
3.1.6 CARACTERISTICAS TÉRMICAS DO ARCO ELÉTRICO	13
3.1.7 VELOCIDADE DE SOLDAGEM	15
3.1.8 SOLDAGEM MULTI-CÁTODO	18
3.1.9 CARACTERISTICAS MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1. MATERIAIS	23
4.1.1 TOCHA DE SOLDAGEM	23
4.1.2 FONTES DE SOLDAGEM	23
4.1.3 GÁS DE PROTEÇÃO	23
4.1.4 ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO	23
4.1.5 INDUTORES MAGNÉTICOS	24
4.1.6 MATERIAL BASE	26
4 1 7 DASE EIVA DEEDICEDADA	26

4.1.8 BANCADA DE EXPERIMENTOS	27
4.2 METODOLOGIA	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 AVALIAÇÕES IDEPENDENTE DAS TOCHAS DE SOLDAGEM	30
5.2 AVALIAÇÕES DAS TOCHAS DE SOLDAGEM EM LINHA COM ÂNGULOS A 90°	33
5.3 AVALIAÇÕES DAS TOCHAS DE SOLDAGEM EM LINHA COM ÂNGULOS VARIADOS	36
5.4 AVALIAÇÕES DA INFLUENCIA DO INDUTOR DE CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO SOB AS TOCHAS DE SOLDAGEM TIG	38
5.5 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS	47
6. CONCLUSÃO	54
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

A globalização ao abrir as fronteiras ao comércio mundial desenvolveu a competição entre empresas e trabalhadores de todo o mundo. Nesta competição global, maiores níveis de produtividade, ou seja, maior produção por unidade de trabalho é o fator crucial para sobrevivências das mesmas.

Buscando acompanhar esse cenário, as empresas procuram cada vez mais investir em equipamentos, melhoria e controle dos processos de fabricação e acima de tudo, qualificação da mão de obra. Assegurando assim a qualidade de seus produtos e serviços com preços realmente competitivos.

Na indústria metal-mecânica esse cenário não é diferente, no segmento de soldagem cada vez mais é exigidas formas de redução de custo com o mantimento da qualidade, assim o fomento a pesquisas para o surgimento de novas ideias, tecnologia tem-se tornado crucial para a competitividade das empresas no setor.

Foi buscando o desenvolvimento e aperfeiçoamento do processo de soldagem TIG de fusão autógena, no laboratório de soldagem na UFSC – LABSOLDA, que motivou a realização deste trabalho de conclusão de curso.

O trabalho foi iniciado com testes de soldabilidade com diferentes composições químicas de gases de proteção na soldagem em diferentes tensões de corrente. Serviu como um entendimento na prática das influencias dos gases no processo de soldagem assim como uma comparação entres resultando práticos com teóricos.

Na sequencia, foram desenvolvidas e testadas novas formas de posicionamentos das tochas de soldagem, uma vez que no LABSOLDA ainda não existiam estudos e trabalhos realizados com esse tema de soldagem TIG multi-cátodo.

A parte final do trabalho corresponde a um estudo para tentar alcançar as melhores práticas de soldagem autógena TIG duplo cátodo, além de realizar experimentos para tentar entender melhor o efeito de se trabalhar com campos magnéticos muito próximos de arco voltaicos durante o processo de soldagem. Todos os resultados encontrados foram analisados e comparados com fundamentações teóricas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver as melhores práticas no processo de soldagem TIG autógena duplocátodo em juntas sobrepostas (*lap*).

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Servir como fonte de dados para trabalhos posteriores na área de soldagem TIG multicátodo no laboratório de soldagem do departamento de engenharia mecânica – UFSC.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 FUNDAMENTOS DA SOLDAGEM TIG

A soldagem é o mais importante processo de união de metais usado industrialmente. Apresentando aplicações muito variadas que abrangem desde a fabricação de itens simples, de baixa sofisticação, muitas vezes usados em aplicações de pouca responsabilidade, até estruturas e componentes sofisticados que, caso falhem, podem colocar em risco a vida humana, causar danos ao meio ambiente e gerar enormes prejuízos.

A união dos materiais neste caso é realizada, ou através da fusão dos mesmos em íntimo contato ou pela fusão de ambos e adição de outro material fundido. Em geral, a soldagem propicia maior distorção do material base, maior aquecimento do mesmo e normalmente não é utilizada sobre materiais cerâmicos. Desta forma é importante salientar que a união de materiais é dinâmica, dependente muito de fenômenos correlatos, tais como calor; magnetismo; eletricidade; luz; som, além de desenvolvimentos nas áreas de materiais; física; mecânica; química e outras.

Durante o processo de soldagem a arco sob proteção de um gás, que é o processo que se integra esse trabalho, basicamente é um aquecimento localizado na região de união atingido o ponto de fusão. O calor gerado é suficiente para formar uma poça de metal líquido onde receberá ou não metal de adição fundindo-o. A energia provida é fornecida pelo arco elétrico, definido como um feixe de descargas elétricas formadas entre dois eletrodos e mantidas pela formação de um meio condutor gasoso chamado plasma.

Por sua vez o processo de soldagem TIG ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), é um processo de soldagem a arco elétrico que utiliza um arco entre um eletrodo não consumível de Tungstênio (W) e/ou suas ligas e a poça de soldagem. A proteção do eletrodo e da poça de fusão contra a oxidação pelo ar é feita geralmente por gás inerte injetado que passa pelo bocal da tocha, geralmente argônio, hélio ou misturas destes com pequenas adições de Hidrogênio (H₂) e Nitrogênio (N₂).

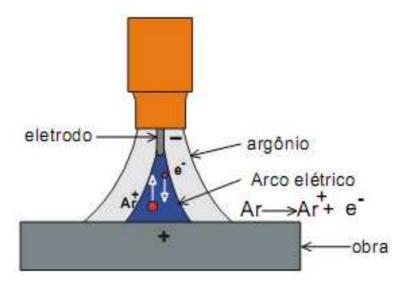


Figura 01: Ilustração do funcionamento de uma coluna de gás ionizado durante o processo de soldagem TIG com polaridade direta. (Fonseca, 2004).

O esquema geral deste processo pode ser visto na figura 02, sendo composta de uma tocha de soldagem, uma fonte de energia de corrente constante, uma unidade de alta frequência e um cilindro de gás de proteção.

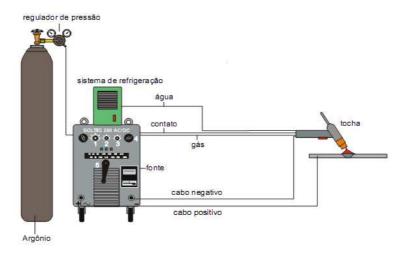


Figura 02: Representação geral do sistema de soldagem TIG (SENAI, 2009).

3.1.1 ELETRODOS TIG

A soldagem TIG pode ser feita com ou sem material de adição, caso seja realizada sem material de adição, denomina-se soldagem autógena. Assim como na soldagem TIG observa-se que o eletrodo serve apenas como ponto focal para direcionamento do arco elétrico, sendo não consumível feito de materiais refratários como Tungstênio (W - ponto de fusão 3.643,15K) e óxidos refratários (CeO₂, La₂O₃, ThO₂, ZrO₂), onde a aplicação destes eletrodos depende do material a ser soldado segundo Savage, 1979. Por ser um ponto focal, o eletrodo

influencia fortemente na penetração do cordão, ângulos agudos concentram mais o arco resultando em maiores penetrações e menores larguras (cordão mais estreito e profundo).

Uma parte importante do processo TIG são os eletrodos não consumíveis (ocorre pequeno consumo). Estes eletrodos são materais refratários (W e óxidos refratários), para suportar a elevada temperatura do arco elétrico. A composição química e demais informações dos eletrodos são mostrados na tabela 01.

Tabela 01 : Comp	posição (auímica e	identificação	dos eletrodos no	process TIG.	(Cunha, 1984).
						(

Classif.	Composiç	Cor de				
AWS	W (min.)	CeO ₂	La ₂ O ₃	ThO ₂	ZrO ₂	identificação
EWP	99,5					Verde
EWCe-2		1,8-2,2				Laranja
EWLa-1			0,9-1,2			Preto
EWTh-1				0,8-1,2		Amarelo
EWTh-2				1,7-2,2		Vermelho
EWZr-1					0,15-0,40	Marrom
EWG	94,5	Não especificado				Cinza

A aplicação destes eletrodos depende do material a ser soldado, conforme comentaremos a seguir. Para de ligas de Al e Mg recomenda-se o uso de eletrodo EWP (W puro) — ponta verde ou o EWZr-1 — ponta marrom, pois estes apresentam excelente estabilidade de arco em corrente alternada. Ao sofrerem aquecimento, a ponta do eletrodo EWP se torna arredondada. Não devem afiados com ponta muito aguda, pois a ponta irá se fundir e cair dentro da poça de fusão, contaminando-a.

Para a soldagem de aços, recomenda-se os eletrodos com Tória, EWTh-1 e EwTh-2. Entre estes o mais utilizado é o EWTh-2 – ponta vermelha. A vantagem destes eletrodos é sua maior emissividade, o que favorece a passagem de maior corrente pelo arco elétrico. Possui melhor resistência que os eletrodos de W puro, e a ponta não tende a ficar arredondada com o aquecimento. O tório é um elemento radioativo, mas sua baixa concentração no eletrodo não causa maiores problemas. Em ambientes confinados recomenda-se uma adequada ventilação.

A afiação do eletrodo é muito importante pois pode influenciar na estabilidade do arco e também no formato do cordão de solda. Na figura 03 é mostrado como se deve proceder para efetuar a afiação utilizando-se um esmeril. As principais recomendações são:

- Uso exclusivo do esmeril para este fim;

- Não afiar utilizando-se o lado do rebolo e sim a parte frontal;
- Afiar até uma profundidade 2,4 vezes o diâmetro do eletrodo.

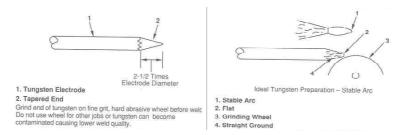


Figura 03: Ilustração de recomendações para afiação do eletrodo de Tungstênio. (Timings, 2008).

A afiação pode ainda afetar a penetração do cordão de solda. Quanto menor o ângulo da ponta do eletrodo, maior será a penetração obtida, conforme mostrado na figura 04. A medida que variamos o ângulo da ponta do eletrodo, o arco elétrico muda de formato, ocasionado esta variação.

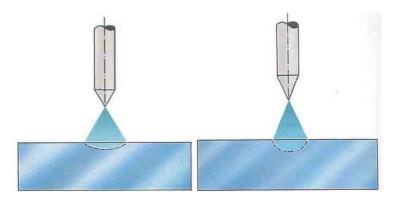


Figura 04: Ilustração sobre a influência do ângulo da ponta do eletrodo na penetração do cordão no processo TIG. (SENAI, 2009).

3.1.2 COMPORTAMENTO DO GÁS DE PROTEÇÃO TIG

O propósito do gás de proteção no processo TIG é impedir a oxidação do eletrodo e proteger a poça de fusão. Apesar de o Tungstênio fundir em alta temperatura, sua oxidação ocorre muito mais abaixo. Portanto, recomenda-se que após a estricção do arco o fluxo de gás permaneça na razão de 1 s para cada 10 A de corrente de soldagem utilizada.

A escolha do gás de proteção é fundamental no processo de soldagem TIG, sendo que ele muitas vezes é o responsável pela qualidade da solda e também do seu custo de operação. Segue logo abaixo na tabela 02, algumas sugestões da escolha do gás de proteção para o metal base utilizado.

Tabela 02: Gases de Proteção Sugeridos para o processo TIG (Modenesi, 2004).

Material Base	Gás Preferido	Alternativa	Material Base	Gás Preferido	Alternativa
Alumínio e ligas	Ar – Ar+He	Не	Cipro-Níquel	Ar	Ar+H2
Aço Baixo Carbono	Ar	He	Inconel	Ar	He
Aço Inoxidável	Ar	Ar+H2	Latão	Ar	-
Aço Inoxidável PH	Ar	Ar+He	Magnésio e ligas	Ar(CA)	-
Aços Maraging	Ar	-	Molibdênio e ligas	Ar ou He	Ar+H2
Bronze de Alumínio	Ar	-	Monel	Ar	Ar+H2
Bronze de Silício	Ar	-	Níquel e ligas	Ar	He
Cobre Desoxidado	Ar	N2	Titânio e ligas	Ar	He

Um fator importante a se considerar, é que o Argônio é 1,3 vezes mais denso que o ar atmosférico, misturando-se com o mesmo em ambiente confinado. Também é 10 vezes mais denso que o Hélio, sendo mais bem indicado para soldagens em posições específicas, uma vez que o Hélio tende a rapidamente deixar o bocal da tocha de soldagem. Por isso o Argônio é um dos gases mais utilizados, além de possuir um preço inferior em comparação a outros gases inertes, tende também por proporcionar um arco estável, suave e de boa limpeza dos óxidos.

Segundo Modenesi, a existência do arco e sua estabilidade estão intimamente relacionadas com a condutividade elétrica, quando há baixa energia de ionização dos átomos envolvidos e alta temperatura do mesmo. Assim, em processo como o TIG, o gás de proteção deve ser de fácil ionização e é essencial que seja alta a emissão termiônica do eletrodo não consumível, podendo ser controlado pela adição ao Tungstênio elementos como: Zircônio; Cério; Lantânio ou Tório.

Durante a dissociação e ionização do gás, no processo de soldagem TIG, o arco elétrico para se mantiver é preciso de estejam disponíveis partículas carregadas eletricamente. Havendo moléculas de qualquer gás no dielétrico, essas deverão ser dissociadas e, devido à alta energia de vibração obtida pelo aquecimento dos elétrons, as mesmas são levadas ao estado monoatômico. Este é o caso de gases tais como o Oxigênio, Dióxido de Carbono, cuja dissociação da molécula é realizada em função de parâmetros como: pressão do gás; energia de formação; fração dissociada do gás e temperatura.

De uma forma geral, podemos ressaltar que quanto maior a condutividade elétrica (k), maior será a estabilidade do arco. Entretanto o decréscimo dessa propriedade física é acompanhado pela diminuição da densidade de corrente. Logo abaixo, figura 05, demonstra a

relação entre temperatura e condutividade térmica e elétrica para o Argônio, Hélio e o ar atmosférico.

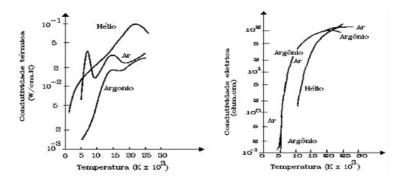


Figura 05: Condutividade térmica e elétrica em função da temperatura para os respectivos gases. (Cunha, 1984).

Diante disso, podemos observar que na figura 05 e figura 07, permite-nos entender porque o Hélio produz um arco elétrico com uma temperatura mais elevada do que o Argônio para as mesmas condições de soldagem. Teoricamente, em função da condutividade térmica total, quando estiver sendo empregado o Argônio (potencial de ionização = 11,548 eV), a corrente de soldagem deve ser aumentada em aproximadamente 50%, quando comparada com aquela que se utilizaria com o Hélio (potencial de ionização = 24,587 eV), para se obter a mesma potência elétrica. Uma vez que Hélio produz uma poça de fusão muito mais quente e fluída, requerendo juntas bem posicionadas e maior penetração que a soldagem com Argônio. Smith comenta que de uma forma geral uma maior vazão de Hélio do que Argônio é necessário para efeito igual de penetração, mas é possível se obter aumento na velocidade de soldagem de 30 a 40%. Também misturas de Argônio e Hélio, são largamente utilizados nos Estados Unidos, principalmente em soldagens automatizadas, por possuir a alta penetração (gás Hélio) e a estabilidade (gás Argônio). Por sua vez, segundo Smith, a adição de Hidrogênio (potencial de ionização = 13,598 eV) ao Argônio produz um arco com uma maior energia, uma vez que com 20% de H² a tensão do arco tende ser a mesma que comparada com a do gás He. Adições de 2 a 35% de H² com o Ar têm sido muito utilizadas, sendo que quanto maior a porcentagem de H² na mistura, maiores as chances de porosidades vermiformes (poros alongados) e difusão intersticial por Hidrogênio retido, agente fragilizador por concentrar tensões.

3.1.3 CORRENTES DE SOLDAGEM TIG

Uma fonte de potencia para a soldagem ao arco elétrico, deve ser projetada para satisfazer a demanda requerida pelos parâmetros estabelecidos. Possuir conveniente velocidade de resposta aos transientes e atender particularidades especificas de cada processo, mantendo o arco estável. Portando são de extrema importância a relação que a fonte fornece entre a tensão e a corrente de soldagem, ou seja, sua curva característica. Além disso, a estabilidade do arco e outros fatores dependem da interação dessa curva com aquela produzida pelo arco elétrico (a qual não é ôhmica).

Assim como também o material a ser soldado influencia na polaridade e tipo de corrente utilizada. De uma forma geral, quando utilizamos a polaridade negativa, os elétrons são emitidos pelo eletrodo de W, e acelerados em direção ao material base, desta forma conseguimos um bom aquecimento do material base, o que ocasiona uma boa penetração. Caso utilizássemos a polaridade positiva, além da baixa penetração, o eletrodo sofreria grande aquecimento, o que aceleraria seu desgaste. Abaixo, figura 06 representando algumas características de soldagem em função da polaridade de corrente de soldagem utilizada.

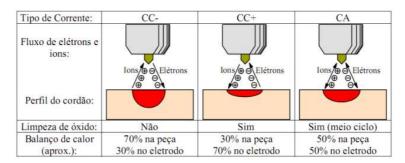


Figura 06: Características da soldagem TIG sob a influência da polaridade de corrente. (Quites e Dutra, 1979).

A escolha da fonte para soldagem TIG dependerá fortemente do tipo de corrente que será utilizada no processo, incluindo-se aí correntes senoidais, correntes de onda quadrada, corrente contínua e corrente contínua pulsada. Segundo Mondenesi, em corrente contínua, na maioria dos casos utiliza-se corrente contínua com eletrodo no polo negativo com os eletrodos fluindo do eletrodo para a peça e os íons no sentido contrário. Assim sendo, 70 % do calor estarão na peça e somente 30 % no eletrodo. Desta forma, além de preservar o eletrodo a corrente contínua com eletrodo no polo negativo também provê maior penetração. Quando, entretanto, for importante o efeito de limpeza catódica, propiciada pela saída de elétrons da peça, a corrente contínua com eletrodo no polo positivo pode ser utilizada. Esta limpeza catódica é particularmente importante na soldagem de materiais que tem óxidos refratários,

como alumínio e magnésio, que são retirados desta maneira. Esta forma de operação, entretanto, por manter o eletrodo extremamente aquecido, necessita de eletrodos de diâmetro sensivelmente maiores, ficando a capacidade do eletrodo neste processo em cerca de um décimo do que quando operando em corrente contínua com eletrodo no polo negativo.

Mondenesi diz que a corrente contínua pulsada envolve a variação repetitiva da corrente do arco entre um valor mínimo, *background* e um valor máximo, controlando-se o tempo do pulso, o tempo no valor mínimo, nível de corrente máximo e nível de corrente mínimo. A principal vantagem da corrente pulsada é permitir uma combinação da força, boa penetração e fusão do pulso, enquanto mantém a aérea de soldagem relativamente fria. Assim, é possível obter maiores penetrações do que em corrente contínua constante e trabalhar com materiais mais sensíveis à aposição de calor com minimização das distorções. Por esses motivos, o processo também é particularmente útil na soldagem de materiais muito finos. Apesar de muito utilizada nos processos automatizados, a corrente pulsada oferece vantagens também para a soldagem manual.

Nos artigos publicados por Bracarense, a corrente alternada é de grande utilidade em soldagem TIG, pois combina a limpeza catódica do processo com o eletrodo no polo positivo, com a penetração mais profunda do eletrodo negativo. Entretanto, quando em operação, diversos fenômenos podem ocorrer e devem ser analisados. Ao tornar-se negativo, o eletrodo termoiônico de tungstênio provê elétrons para a reignição do arco, imediatamente após ter passado pelo ponto de corrente zero. Entretanto, ao tornar-se positivo o mesmo não ocorrerá, pois a poça não poderá suprir elétrons até que um determinado nível de tensão seja atingido. Isto deriva de diferentes aspectos como área mais extensa da poça, material menos termoiônico e inércia na mudança de direção dos elétrons.

3.1.4 ABERTURA DO ARCO ELÉTRICO

Para abertura e funcionamento do arco elétrico, aumenta-se a resistência ao fluxo de corrente que faz com que as extremidades dos eletrodos sejam levadas a altas temperaturas, assim como o pequeno espaço de ar entre eles. Com isso, elétrons vindos do eletrodo negativo (cátodo), colidem com as moléculas e átomos do ar formando íons e elétrons livres, fazendo com que esse pequeno espaço de ar entre a peça e o eletrodo seja um condutor de corrente devido à ionização segundo Messler, 1999. Nas práticas gerais, no instante de acender o arco o soldador põe em contato a extremidade do eletrodo na peça a ser soldada e depois afasta ligeiramente. Esse contato é essencial, porque ocorre a passagem da corrente no circuito que continua quando o eletrodo é afastado devido à ionização do arco.

3.1.5 TENSÃO DO ARCO ELÉTRICO

O arco voltaico acontece quando a tensão entre dois pontos é maior que a rigidez dielétrica ou isolação do meio que os separa, onde aí forma-se um arco que é a corrente passando por este meio. Por existir uma relação direta entre a tensão e o comprimento do arco, a tensão é usada para controlar o processo, pois uma vez fixados diversos outros parâmetros, a tensão do arco possibilita o controle do comprimento do arco, onde o mesmo se comporta como uma resistência não ôhmica, observar figura 07. Em processos automatizados, o controle da tensão do arco (AVC) é requerido. Este mecanismo controla o comprimento do arco comparando a tensão real do processo com a tensão desejada, adequando assim à posição perfeita do eletrodo com a tensão do arco constante.

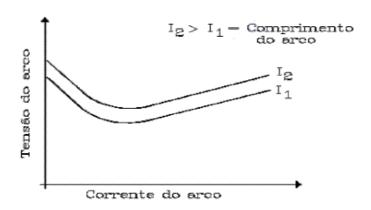


Figura 07: Demonstração da influência da tensão x corrente do arco elétrico para comprimento de arco distinto. (Cunha, 1984).

Para a manutenção do arco em processos de soldagem TIG, o gás de proteção deve ser de fácil ionização e é imprescindível que seja de alta emissão termiônica o eletrodo não consumível, como comentado anteriormente. Assim como para a manutenção do arco é importante o controle da oscilação, deflexão do mesmo. Porque podemos aumentar a largura dos cordões de solda por oscilação magnética, através da montagem da tocha sobre um oscilador, com isso as oscilações provocadas magneticamente são úteis para melhorar a fusão das extremidades das peças e reduzir os efeitos de "mordedura". Estes osciladores podem defletir o arco tanto longitudinalmente quanto perpendicularmente, sem mover o eletrodo.

Segundo Roger Timings, o arco elétrico apresenta três regiões bem definidas, como mostradas na figura 08. Na região 1, região de queda de tensão catódica, área mais problemática sendo responsável por manter o arco elétrico. Assim a densidade de corrente depende criticamente da temperatura da superfície do cátodo (densidade de corrente calculada

pela equação de Richardson-Dushman e a queda de tensão no cátodo pode ser calculada em função do efeito Joule no eletrodo). Na região 2, região da coluna do arco, região que fica em torno do declínio catódico e anódico. Por possuir partículas neutras e carregadas seu gradiente de potencial é muito pequeno, sendo importante sua neutralidade elétrica porque em cada unidade de volume o número de cargas positivas e negativas é praticamente o mesmo. Como também a alta temperatura existente na coluna mantém o gás suficientemente ionizado para que seja condutor, existindo um fluxo de alta velocidade sempre do eletrodo para peça. Por sua vez, na região 3, região de queda de tensão anódica, pode ressaltar que o anodo possui menor influencia sobre a manutenção do arco que o cátodo, pois o mesmo não emite íons positivos, assim a principal energia gerada no ânodo é devida aos elétrons.

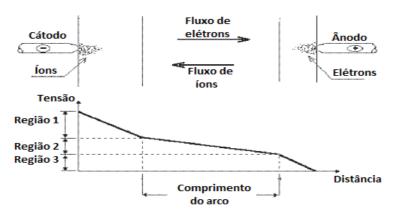


Figura 08: Ilustração adaptada das regiões do arco elétrico relacionada com a tensão. (Timings, 2008).

Na verdade não existe uma transição bem definida entre estas regiões e, em alguns trabalhos mais aprofundados sobre este assunto, as zonas de queda são frequentemente subdivididas em várias sub-regiões (por exemplo, região de contração, região luminosa, etc.). Em termos de volume, o arco é constituído quase que exclusivamente pela coluna de plasma. Esta pode ter vários milímetros de comprimento, enquanto que as zonas de queda, ou zonas dos eletrodos, correspondem apenas a diminutas regiões junto aos eletrodos, com espessuras da ordem de 10^6 (W/m²). No arco de soldagem, a queda de tensão na região anódica vale entre 1 a 10 V e a queda catódica, entre 1 e 15 V (os valores menores correspondem ao cátodo no arco TIG com eletrodo negativo; processos com eletrodo consumível, MIG/MAG por exemplo, têm, em geral, uma queda de tensão no cátodo maior). Em uma descarga luminescente, a queda catódica é muito maior, valendo algumas centenas de volts. As quedas de tensão nos eletrodos são aproximadamente independentes do comprimento do arco e

variam pouco com a corrente. Por isso alguns trabalhos demonstram que o valor da queda de tensão na coluna de plasma é aproximadamente proporcional ao comprimento do arco.

3.1.6 CARACTERISTICAS TÉRMICAS DO ARCO ELÉTRICO

No quesito de eficiência térmica do arco elétrico, pode-se afirmar que a eficiência é alta, próxima a 100% de transformação em energia elétrica em térmica. Entretanto, para cada processo e condição de soldagem há um determinado rendimento térmico (r), resultante da razão entre as quantidades de calor realmente transferido para peça e o total gerado pelo arco (TIG: corrente contínua, r = 0.65 e corrente alternada, r = 0.35). (Savage, 1979). Uma maneira de medir essa eficiência energética é utilizar os parâmetros elétricos da equação:

$$Q = V \times I \times t$$

Onde:

Q = é a energia térmica gerada, em jaule (J);

 $V = \acute{e}$ a queda de potencial do arco, em Volt (V);

 $I = \acute{e}$ a corrente elétrica do arco, em ampère (A);

 $t = \acute{e}$ o tempo de trabalho, em segundos (s).

Na figura 09, são mostradas as isotérmicas de um arco de soldagem no processo TIG em uma chapa de Cobre refrigerada em água. Com uma distância peça – eletrodo de 0,005 m em atmosfera inerte de gás, operando com uma corrente de 200 A e tensão de 12 V. Uma vez que a distribuição da temperatura é importante porque inferindo-a e assumindo conhecimento do campo elétrico é possível calcular a densidade de corrente, assim como podemos afirmar que quanto maior o k (condutividade térmica), mais elevada é a dissociação e a ionização do gás envolvido.

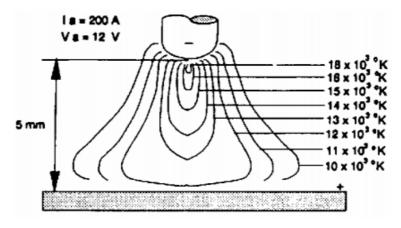


Figura 09: Representação das isotermas para um arco elétrico no processo TIG. (Messler, 1999).

De uma forma geral, para ser útil na soldagem por fusão, uma fonte precisa ter uma potência específica entre cerca de 10^6 e 10^13 W/m², observar figura 10. No limite inferior desta faixa, a densidade de energia é insuficiente para aquecer a região próxima da área de contato até a sua fusão antes que o calor se difunda para o restante da peça. Neste caso, a fonte permite apenas o aquecimento de toda a peça sem ser capaz de promover a sua fusão localizada (este é o caso, por exemplo, de um maçarico de aquecimento ou uma manta térmica que, embora possam gerar uma quantidade apreciável de calor, este é transferido para a peça através de uma área de contato relativamente grande).

No limite superior, o calor é fornecido de forma tão concentrada que causa uma vaporização do material na região de contato em poucos microssegundos, antes mesmo da fusão ou de um aquecimento apreciável de outras partes da peça. Têm-se, neste caso, condições mais favoráveis ao corte do que à soldagem.

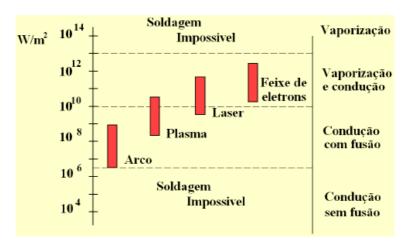


Figura 10: Representação da escala de potências específicas. (Mondenesi, 2004).

De uma forma simplificada podemos dizer que esse método de soldagem TIG é um processo onde um arco é formado entre um eletrodo não consumível sob uma atmosfera inerte e a peça a ser soldada. O arco provido pelo eletrodo é ideal para soldagens de alta qualidade e precisão, muito utilizado em juntas finas. Assim como a soldagem TIG tem desempenhado um papel importante na aceitação de alumínio em soldagens de alta qualidade e aplicações estruturais. Portanto, o processo é adequado para soldar metais não ferrosos, incluindo alumínio, magnésio, materiais refratários e metais especiais, além de ser eficaz em unir metais de seção muito fina. Um alto grau de habilidade é necessário, mas soldas de alta qualidade podem ser facilmente produzidas.

3.1.7 VELOCIDADE DE SOLDAGEM

Além da corrente elétrica e da distancia entre eletrodo e peça, a velocidade de soldagem, de avanço, também influencia expressivamente na penetração do cordão de solda. Para uma velocidade muito alta de soldagem, o arco não permanece tempo suficiente na região de solda para proporcionar uma boa fusão e penetração do cordão. Já para uma velocidade baixa, a penetração aumenta, mas para uma velocidade excessivamente baixa de soldagem, o próprio metal fundido na poça funciona como isolante térmico para a transferência de calor do arco para o metal base, prejudicando também a penetração de solda.



Figura 11: Representação da influência da velocidade de soldagem na penetração de solda. (SENAI, 2009).

Essa maior penetração do cordão de solda no material, executando soldas com maior qualidade, repercute em um processo lento, um dos processos mais lentos processos de soldagem manual. Mas em todo o mundo nas últimas décadas, um aumento significativo no uso de máquinas de soldagem automática tem acontecido. No processo, muitas aplicações destas máquinas têm uma melhor eficiência, repetibilidade superiores e taxas de aumento da produção em comparação a soldagem manual.

Esse aumento de mecanização causou um crescimento também do calor imposto à poça de fusão no cordão de solda, em função de aumentos da corrente de soldagem e das velocidades de avanço exigida. Mas o aumento da energia imposta não é proporcional ao aumento da velocidade de soldagem, por isso surge um dos problemas mais problemáticos em soldagens de alta produtividade, o defeito *Humping*. Abaixo segue figura 12, onde mostra que a velocidade limite para o aparecimento de defeitos diminui com o aumento da corrente de soldagem. E é isso um dos principais problemas que limitam a velocidade de soldagem, a não proporcionalidade da velocidade de avanço com o aumento da corrente.

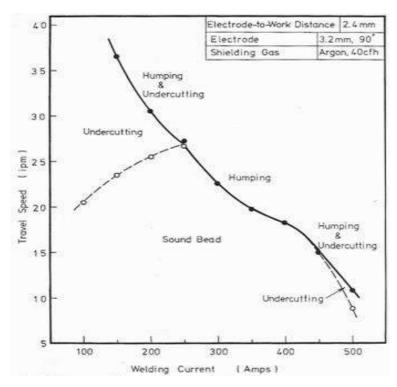


Figura 12: Relação da velocidade de avanço, com a corrente de soldagem e o surgimento de defeitos. (SAVAGE, 1979).

O fenômeno *Humping* tem sido o foco de muitos trabalhos de pesquisa publicados no mundo acadêmico e ao longo destes estudos, diferentes variáveis de controle foram identificadas, incluindo:

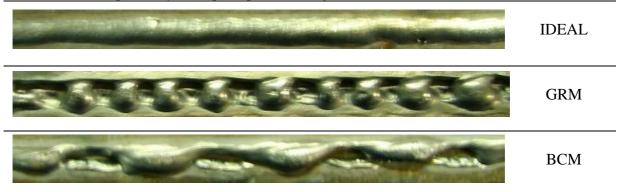
- Atmosfera de soldagem;
- Composição química do metal;
- Condições de superfície;
- Quantidade de calor imposta;
- Fluxo de metal líquido na poça de fusão.

Mas como foi dito anteriormente, as variáveis relacionadas ao arco voltaico inclui: comprimento, a corrente de arco, gás de proteção, ângulo do eletrodo e geometria do eletrodo.

Undercutting (Cova), um defeito de solda comum que não se limita na soldagem de alta velocidade, mas que tem sido observadas ocorrências em associação ao *Humping* e as diferentes variáveis de influência do fenômeno foram fortemente discutidas por alguns pesquisadores. Um dos estudos mais recentes, realizado por Mendez, propôs a teoria da pressão do arco que é responsável por induzir o surgimento do *Humping*. Com base na pressão e o aquecimento que varia em um arco voltaico.

Basicamente há duas morfologias distintas dos defeitos causados pela altas velocidades de soldagem, uma é a GRM (gouging region morphology) e a outra é a BCM (beaded cylinder morphology).

Quadro 01: Representação das principais morfologias dos cordões de solda em alta velocidade.



Segundo Mendez, a morfologia do tipo GRM é caracterizada por abrir covas e em seguida criar regiões com excesso de material. Além de desse casso associa-se também o defeito de porosidade túnel, onde toda a região do defeito existe canais, vazios ao longo das regiões de acumulo de material (longitudinalmente). Agora para o caso de BCM, fica evidente que é um tipo diferente de *Humping*, não apenas pela falta das regiões de covas, mas também porque neste caso, neste tipo de defeito não é característica a presença de porosidades túnel ou depressões abaixo da superfície da peça.

Para explicar esses comportamentos, vamos utilizar a teoria da pressão do arco, onde aumentando-se a pressão, um ponto de desequilíbrio de forças com as correntes de soldagem crescentes começa a se formar. Esse desequilíbrio ocorre geralmente em correntes maiores que 300 A, onde as forças de arraste do plasma são grandes o suficiente para deslocar a maioria do metal líquido contido na poça de fusão diretamente abaixo do arco (formando regiões de excesso de material). Restando apenas uma camada fina de metal líquido que se refere o como a região da cova.

Em seus estudos, Mendez comprovou através de fórmulas matemáticas o valor crítico que determina o início do *Humping* nessa relação ocorre quando a pressão do arco torna-se maior do que a pressão de metal na poça de fusão. E é nessa situação que o arco exerce força o suficiente para deslocar o metal fundido para longe do alcance da energia do arco. Formando por exemplo regiões de covas abertas que ao solidificar forma o *Humping*.

Existem muitas medidas que pode ser feitas para reduzir ou eliminar defeito de *Humping*, segundo Mendez. Entre elas:

- Uso de feixes de elétrons duplos (duplo cátodo), com a mesma energia total fornecida a poça de fusão em comparação ao feixe simples de elétrons (simples cátodo);
- Mudança no ângulo da ponta do eletrodo (ângulos agudos maiores, maior também será a tendência em aparecer defeitos devido à pressão do arco);
- Formato da ponta do eletrodo (indicado utilizar eletrodos com a ponta "truncada", com a ponta plana);
- Uso de eletrodos ocos, diminuindo a densidade de elétrons na região central do arco plasma;
- Mudança do gás de proteção, uso por exemplo, do gás Hélio (potencial elétrico muito superior a outros gases de proteção TIG inerte), proporcionando um arco plasma com densidade uniforme e de maior área (cordão de solda mais largo).

Em geral, essas mudanças envolvem acréscimos aos custos de produção e acabam influenciando na penetração, reforço, ângulo de contato, diluição, modos de transferência, metalurgia da solda. E compreender essas vantagens no processo de soldagem é um caso crítico, porque em muitas aplicações a velocidade de soldagem pode ser otimizada sem alterar drasticamente os procedimentos de soldagem. Por exemplo: o posicionamento da tocha de soldagem pode impedir a formação de defeitos em altas velocidades por manipulação do fluxo de metal líquido na poça de fusão com a ação da gravidade, sem utilizar incremento nos custos do processo. Ângulos agudos, no sentido da tocha empurrar a poça de fusão tem demonstrado que, há possibilidades de aumento na velocidade de avanço na ordem de 25% no incremento por alterar o fluxo de metal líquido na poça e reduzir a duração da formação dos canais de solidificação que formam o *Humping*.

3.1.8 SOLDAGEM MULTI-CÁTODO

A soldagem multi-cátodo aparece como alternativa para obter uma soldagem TIG de maior produtividade, como demonstrado nos trabalhos de Mendez. Promovendo ganhos melhores em produtividade com a mesma energia imposta a poça de fusão.

Não existem disponíveis muitos trabalhos científicos sobre soldagem multi-cátodo, principalmente nos parâmetros e requisitos desse trabalho de conclusão de curso. Uma das únicas informações sobre duplo-cátodo que nos foi disponível, é uma empresa italiana LE.DI.CA (*Automatic Welding Systems*), que fornece soluções e produtos de soldagem para tochas multi-cátodo. Tochas indicadas para soldagens longitudinais, podendo chegar a velocidades de 300 cm/min (0,05 m/s) em aço inox.



Figura 13: Imagem de uma tocha comercial tri-cátodo TIG (três bocais térmicos e dois indutores de campos magnéticos externos). (fonte: *Ledica.it*).

Condizendo com as proposições de Mendez, o trabalho desenvolvido por Leng em 2006, mostra a utilização de um eletrodo duplo no mesmo equipamento (uma tocha de soldagem e dois eletrodos). Mostraram resultados superiores, em comparação ao processo de simples cátodo, porque como vimos à pressão do arco TIG neste caso de duplo-catodo é muito menor, resultando em maiores eficiência e produtividade.

Haja vista que durante o processo de soldagem, a poça de fusão está sob o domínio da força gravitacional do metal líquido, da força eletromagnética de campos, da tensão interfacial, assim como da pressão do arco. E o efeito dessa força do aço, dessa pressão é um dos fatores mais importantes e que mais influenciam nas propriedades e forma da poça de fusão. O arco em alta pressão está muito mais propenso a induzir regiões de grandes cavernas (depressões), que faz o processo de soldagem a altas velocidades e altas correntes de soldagem muito mais instável.

No quadro 02, pode-se notar claramente que o pico de pressão no arco de soldagem é muito maior para a simples-cátodo que em comparação ao duplo-cátodo. Visualizado também com a diferença da área de estricção do arco voltaico formada logo abaixo do eletrodo.

Simples-Cátodo Duplo-Cátodo 1400 50A+50A 100A 500 100A+100A 200A 1200 150A+150A 300A 400 1000 Arc Pressure(Pa) Arc Pressure(Pa) 800 300 600 200 400 200 Radius(mm) Radius(mm)

Quadro 02: Demonstração da relação da pressão do arco voltaico em função do uso de simples ou duplo-cátodo.(adaptado de Leng, 2006).

Assim, em processos com alta velocidade de avanço deve-se ser aumentada a velocidade proporcionalmente a sua forma de penetração. Porque uma pressão excessiva do arco é normalmente produzida nestas situações, segundo Leng. Essa pressão empurra aceleradamente pelos canais o metal derretido para a parte traseira da poça de fusão, assim com a velocidade excessiva de soldagem o metal fundido se solidifica rapidamente antes que possa se reorganizar uniformemente. Por isso que em soldagem com duplo-cátodo por exemplo, tende a melhorar o desempenho e diminuir as chances do aparecimento de defeitos (*Humping*) por apresentar pressões de arco mais baixas.

3.1.9 CARACTERISTICAS MAGNÉTICA DO ARCO ELÉTRICO

Das características magnéticas do arco elétrico, podemos dizer que o gás ionizado por ser um condutor de corrente elétrica pode sofrer efeitos magnéticos que favorecem ou prejudicam o processo de soldagem.

Força de Lorentz é denominada a força que age numa partícula carregada eletricamente quando viaja em um campo eletromagnético. Esse efeito magnético é de suma importância no arco elétrico, chamado de jato plasma, responsável pela penetração do cordão

de solda como dito por Messler, 1999. Na figura 14, podemos observar a esquematização do jato de plasma, que pode ser equiparado a um condutor elétrico gasoso com uma forma cônica em que ao atravessar corrente elétrica por ele, induzirá um campo eletromagnético de forma circular, concêntrico em seu eixo.

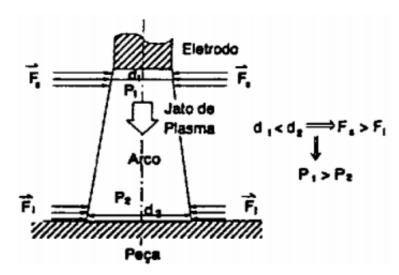


Figura 14: Representação do funcionamento de um jato de plasma. (Martins, 1997).

As forças de Lorentz podem também promover efeitos indesejáveis, como o sopro magnético, fenômeno influenciado pela dessimetria na distribuição das forças eletromagnéticas devido às alterações na direção da corrente elétrica, resultando geralmente no desvio do arco (Savage, 1979). Sendo que os campos magnéticos gerados, podem ser: paralelo, transversal ou longitudinal em relação ao eixo do arco. Dentre suas principais causas, se encontram: magnetismo residual da peça; distorção do campo magnético provocado pela corrente do arco; posicionamento do cabo terra; uso de mais de um eletrodo soldando continuamente e relativamente próximos um do outro. Uma atenção especial é dada a esse ultimo caso, haja vista que é um procedimento utilizado neste trabalho de conclusão de curso.

Na figura 15, podemos demonstrar que o emprego de mais de um eletrodo durante o processo de soldagem pode excitar três diferentes casos: caso 1 - usando diferentes polaridades (corrente contínua), os campos têm sentidos opostos ao centro; caso 2 - usando a mesma polaridade (corrente contínua), deflexão no sentido ao centro; caso 3 - usando um eletrodo de corrente contínua (positivo ou negativo) e o outro com corrente alternada, esperase que a deflexão magnética diminua.

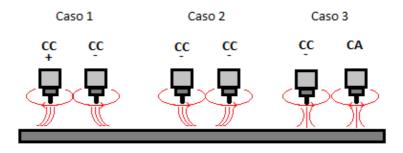


Figura 15: Representação da deflexão entre os campos magnéticos na soldagem multi-cátodo.

Portanto é importante estudar o comportamento do arco elétrico na soldagem porque entre outros motivos: forma a poça de fusão; a temperatura e as forças eletromagnéticas associadas ao arco, além da grande velocidade do fluxo de plasma, levam a intensas reações químicas e provocam homogeneização da poça de fusão; as forças geradas no arco são as principais responsáveis pela transferência de metal desde o eletrodo a peça; na maioria dos casos, o projeto da fonte de potência é determinado pela necessidade de estabilizar o arco.

Ainda, é importante salientar que há uma maior deflexão entre os arcos quando trabalha-se com distância entre os eletrodos elevadas, ou seja, quanto mais próximos estiverem os eletrodos menores serão as interferências magnética, além da deflexão do arco aumentar conforme aumenta-se a distância eletrodo-peça.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

4.1.1 TOCHA DE SOLDAGEM

As duas tochas de soldagem TIG adaptadas para soldagem mecanizada/automatizada, apropriadas para soldagem com alta corrente (500 A), são refrigeradas a água e admitem eletrodos com 6,4mm (0,0064 m) de diâmetro, eletrodos utilizados neste trabalho.

Uma das tochas TIG é comercial da TBI com o cabo prolongado e rígido, forma construtiva para a operação automatizada. E a outra tocha TIG foi desenvolvida e confeccionada pelo laboratório de soldagem Labsolda com as mesmas características da tocha comercial TBI, mas por possuir um cabo rígido mais curto, facilitando sua fixação no dispositivo automático utilizado neste trabalho.

4.1.2 FONTES DE SOLDAGEM

Nos ensaios realizados foram utilizadas duas fontes de soldagem:

- Fonte de soldagem universal da marca IMC Soldagem, modelo Digitec 600;
- Fonte de soldagem da marca ELMA Technik, modelo A400.

As duas tochas foram trabalhadas nos ensaios com uma corrente máxima nominal de 500 A.

4.1.3 GÁS DE PROTEÇÃO

Nos testes foram utilizadas atmosferas composta por gás Argônio (100%) e uma mistura de Argônio (90%) e Hidrogênio (10%). A mistura de Argônio e Hidrogênio utilizada era adquirida pronta, com a mistura calibrada em fábrica. A vazão padrão utilizada nos testes foi de 12 l/min (0,0002 m³/s), mas realizamos outros ensaios com vazões distintas que vão de 18 l/min (0,0003 a 0,0001 m³/s).

4.1.4 ELETRODOS DE TUNGSTÊNIO

Eletrodos utilizados foram o de material AWS EW-Th2 com 6,4mm (0,0064 m) de diâmetro. Os eletrodos foram desbastados formando uma forma cônica com angulação de aproximadamente 50 graus de afiação para os dois eletrodos. Assim como as pontas dos eletrodos também foram desbastadas, para o eletrodo que trabalha com uma corrente de soldagem mais baixa o diâmetro da ponta do eletrodo utilizada foi de 1,5mm (0,0015 m) e

para o eletrodo que trabalha com uma corrente de soldagem mais alta o diâmetro da ponta do eletrodo utilizado foi de 2,5mm (0,0025 m). Com isso diminuímos o desgaste excessivo do eletrodo em altas correntes de soldagem, assim como diminuímos também a estricção do arco voltaico.

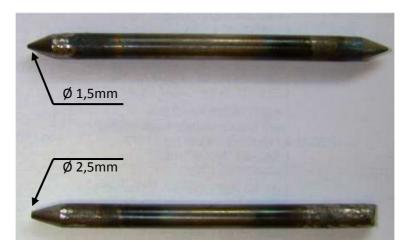


Figura 16: Eletrodos das tochas de soldagem com 6,4mm (0,0064 m) de diâmetro.

4.1.5 INDUTORES MAGNÉTICOS

Indutor magnético construído no Labsolda, são duas bobinas de material condutor, fio de cobre conectada a uma fonte que pode fornecer tensões na ordem de: 12 V; 5 V e 3,3 V. Sabendo que a capacidade do indutor é controlada por quatro fatores:

- Número de espiras (mais espiras significam maior indutância);
- Material em que as bobinas são enroladas (o núcleo);
- Área da seção transversal da bobina (mais área significa maior indutância);
- Comprimento da bobina (uma bobina curta significa espiras mais estreitas ou sobreposição que significa maior indutância).

Calculou-se assim a indutância das bobinas utilizadas nestes experimentos, unidade em Henry (H). Assim como foi utilizando três formas distintas de "ponteira" de indutores magnéticos:

- Forma A (figura 17), foi o modelo mais utilizado nos ensaios;
- Forma B (figura 19 à direita na foto), com base retangular;
- Forma C (figura 18), com forma dupla com uma única bobina.



Figura 17: Imagem de um dos indutores magnéticos testados com duplo embubinamento.



Figura 18: Imagem de um dos indutores magnéticos testados.



Figura 19: Imagem das ponteiras do indutor magnético.

4.1.6 MATERIAL BASE

Chapas de aço ABNT 1020/NBR 6006 ou SAE 1020, de 36 mm (0,036 m) de espessura foram utilizadas como substrato na forma de juntas sobre postas, visando à otimização e determinação da faixa de tolerância de ajustes dos parâmetros.

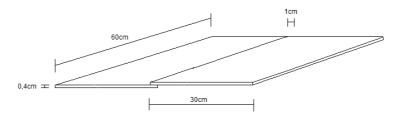


Figura 20: Esquemático do corpo de prova utilizado.

Tabela 03: Composição química do aço SAE 1020.

Tipo de aço\Elemento	C	Mn	P máx.	S máx.
SAE 1020	0,20	0,40	0,02	0,02

4.1.7 BASE FIXA REFRIGERADA

A fim de estudar os efeitos magnéticos de duas tochas de soldagem TIG próximas o suficiente para o campo magnético influenciar fortemente no arco plasma formado, utilizou-se de uma chapa de cobre refrigerada a água de 32 mm (0,032 m) de espessura.

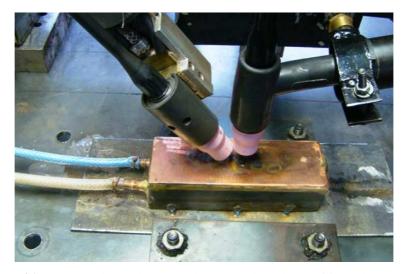


Figura 21: Imagem das tochas de soldagem sob a placa refrigerada de cobre.

4.1.8 BANCADA DE EXPERIMENTOS

Para realização desses ensaios, houve a montagem de uma bancada para soldagem automatizada na forma que permitisse precisão de movimentos. Melhor para estabilidade da poça de fusão e melhor para a liberdade para posicionamento, variando a tocha de soldagem.

As Figuras 22 mostram a bancada experimental que foi utilizada neste trabalho de conclusão de curso. Segue descrição:

- •Fontes de soldagem. Par esse ensaio foi utilizado duas fontes universais de soldagem, uma fonte da IMC com controles digitais (este equipamento permite ajustar a tensão com resolução de 1 A, assim como ajustar uma rampa de subida/descida para corrente na abertura/finalização do arco) e uma fonte alemã ELMA Technik com controles analógicos;
- •Duas tochas de soldagem: uma da tocha TIG comercial (TBI) e uma tocha TIG desenvolvida no Labsolda;
 - •Um medidor e controlador de vazão do gás de soldagem das tochas TIG;
- •Um controlador de duplas coordenadas (X, Y) de fabricação americana BUGO. (permitindo limites de avanço constantes em uma das direções).



Figura 22: Imagem da bancada experimental construída para este estudo.



Figura 23: Detalhe da imagem da bancada de teste com a distância mínima dos eletrodos a 90 graus. Tocha 1 TBI e tocha 2 Labsolda.

Como vimos na foto acima o equipamento de movimento da tocha de soldagem BUGO que nos permite a soldagem com o avanço de velocidade constante, assim como o controle da frequência e amplitude de tecimento, mas que não foram utilizadas nestes experimentos.

4.2 METODOLOGIA

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma bancada de ensaios composta por um carro de coordenadas lineares (BULGO) para soldagem, duas fontes de soldagem com capacidade máxima para 600 A (marca IMC, modelo DIGITEC 600 e ELMA Technik, modelo A400) e duas tochas de soldagem TIG refrigerada a água (marca TBI, modelo 600S e modelo Labsolda). Todos os ensaios foram conduzidos com eletrodo de Tungstênio com 2 %

ThO, diâmetro de 6,4mm (0,0064 m). A vazão utilizada nos ensaios foi de 12 l/min (0,0002 m³/s). Todas as soldas foram conduzidas com junta na posição sobreposta sem afastamento utilizando corrente nominais variadas, máxima de 500 A.

Foi utilizado 35 mm (0,035 m) de distância entre o bocal de constrição da tocha e a chapa superior da junta (d). Verificou-se que a utilização de distâncias menores pode causar aquecimento excessivo do bocal da tocha, podendo ocasionar o derretimento do mesmo quando utilizando em conjunto (dupla – tocha).

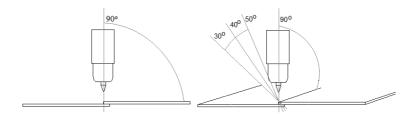


Figura 24: Esquemático das posições da tocha de soldagem.

Para tornar a realização dos ensaios mais ágil, e devido ao caráter exploratório dos comportamentos dos mesmos, todos os ensaios foram realizados na posição sobreposta. Ensaios foram realizados variando o ângulo de inclinação da tocha também, assim como foi utilizado uma chapa refrigerada a água para testes de estudos do comportamento magnético.

A avaliação adotada na qualificação do cordão de solda, foi o aspecto visual. Buscando cordões de solda livre de imperfeições, livre de descontinuidades, livre de contaminantes. Assim, buscou-se a formação de uma junta contínua e limpa de imperfeições.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÕES IDEPENDENTE DAS TOCHAS DE SOLDAGEM

Como ponto de partida para esse trabalho e também para o trabalho com soldagem duplo cátodo, foi analisado o comportamento dos cordões de solda gerados pelas tochas a serem utilizadas nos ensaios. Haja vista que utilizamos dois tipos de tocha, uma tocha comercial, fabricada pela empresa TBI e outra fabricada pelo próprio laboratório de soldagem, com isso antecipamos a prevenção de defeitos e analisamos o seu comportamento independentemente antes da utilização das duas tochas em conjunto.

A fim de comparar o desempenho da soldagem duplo cátodo, deu inicio aos testes com apenas uma tocha, variando angulações de ataque, correntes, e outros a fim de adquirir a melhor situação em termos de produtividade. Segue abaixo o esquemático dos ensaios realizados, figura 25, onde a seta vermelha significa a direção de soldagem, os ângulos da tocha de soldagem utilizados no ensaio e as letras "e" e "d" para distância eletrodo peça e bocal peça, respectivamente.

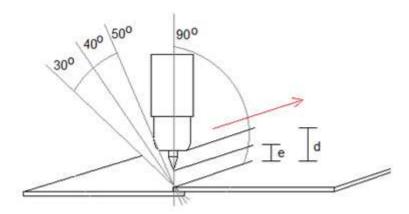


Figura 25: Esquemático de posicionamento relativo de uma tocha com relação à peça.

Para obtenção de cordões satisfatórios, ou seja, sem a existência do *Humping* ou de outras irregularidades, em determinadas situações foi preciso alterar o posicionamento relativo da tocha, por isso foi utilizado três angulações distintas (limite mínimo, médio e máximo nas angulações). Tentou-se também chegar ao limite da operacionalidade com gás de proteção utilizado.

Todos os ensaios foram realisados com junta sobreposta, como visto na figura 25, com a ponta do eletrodo alinhada na borda superior entre a chapa inferior e superior. O gás de

proteção utilizado foi: Ar puro (100% de Argônio) e Ar+10%H2 (10% de Hidrogênio com 90% de Argônio), a corrente utilizada nos cordões de solda variaram entre 50 a 500 Ampére (A). Por sua vez, a vazão utilizada de 12 l/mim (0,0002 m³/s) foi à vazão padrão, mas foram feitos testes com vazão de 18; 15; 9 e 6 l/min (0,0003; 0,00025; 0,00015; 0,0001 m³/s) na tentativa de eliminar a influencia do gás redutor que estava atuando no processo.

Com relação à comparação dos cordões de solda provenientes das diferentes tochas de soldagem, vimos que as mesmas produzem um cordão com aspectos muito parecido. Sendo que foram soldados há uma velocidade de 20 cm/min (0,0033 m/s), distancia eletrodo peça de 3 mm (0,003 m), bocal peça de 20 mm (0,02 m) e vazão com 12 l/min (0,0002 m³/s), produziram cordões de solda com os mesmos aspectos visuais tanto na poça fundida como ao longo do cordão para as duas tochas. Segue abaixo imagem comparativa dos aspectos nos dois cordões de solda gerados, figura 26.



Figura 26: Imagem para comparação do aspecto visual do cordão de solda para as duas tochas.

Nos testes feitos com tocha simples, foi utilizada a tocha Labsolda pela facilidade em variação da angulação de soldagem da mesma. Apresenta-se logo abaixo, na tabela 04, a comparação dos principais cordões de solda obtidos para tocha única com ângulos de ataque em: 90; 50; 40; 30 graus com o gás Argônio puro. Sendo que o relatório completo com todos os testes realizados já foi documentado no laboratório de soldagem, Labsolda.

Tabela 04: Relação dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem com 100% de Argônio como gás de proteção.

No	Ângulo	Corrente	Velocidade	Cordão
01	90°	200A	25cm/min	The state of the s
02	90°	300A	25cm/min	
03	90°	300A	45cm/min	SANGER OF THE PROPERTY OF THE
04	90°	400A	45cm/min	
05	90°	400A	60cm/min	

06	50°	300A	25cm/min	The same of the sa
07	50°	300A	45cm/min	ALL THE THE PARTY OF THE PARTY
08	40°	300A	25cm/min	(Contract of the Contract of t
09	40°	300A	45cm/min	De les de les de les les les les les les les les les le
10	30°	300A	25cm/min	
11	30°	300A	45cm/min	TO A STATE OF THE PARTY OF THE

Abaixo, tabela 05, representando os principais cordões de solda feitos com soldagem TIG utilizando uma mistura de gás de proteção, 90% de Argônio com os 10% restantes de Hidrogênio.

Tabela 05: Relação dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem com 90% de Argônio e 10% de Hidrogênio como gás de proteção.

No	Ângulo	Corrente	Velocidade	Cordão
01	90°	300A	50cm/min	
02	90°	300A	60cm/min	
03	90°	400A	60cm/min	WATER OF PRINCES
04	90°	400A	80cm/min	PRODUCE CAR DE A A ALCONOMI
05	45°	400A	70cm/min	The same of the sa
06	45°	400A	80cm/min	TES COUNTY OF

Observa-se que, para os resultados da soldagem com tocha simples, uma tocha, os resultados obtidos foram muito parecidos com os experimentos preliminares feitos anteriormente no laboratório de soldagem Labsolda. Foi variado o ângulo de ataque, a fim de analisar um possível ganho em rendimento, assim como o aspecto do cordão de solda. Mas vimos que não obtivemos ganhos expressivos tanto no aspecto visual do cordão de solda, quanto à produtividade.

Com relação ao uso da mistura de Argônio e Hidrogênio, observa-se que a mistura gasosa promoveu soldas de melhor molhabilidade, maior largura do cordão de solda por possuir maior condutividade térmica, sendo que para a mesma corrente a tensão do arco é muito maior que no caso do Argônio puro, indo ao encontro com as observações primárias obtidas durante os ensaios e referencias bibliográficas, que afirmavam que a poça metálica nesta mistura, era significativamente maior quando comparada aos outros gases de proteção.

Com essa mistura de Argônio e Hidrogênio, conseguiu-se aumentar a velocidade de soldagem de forma contundente. Atingiu-se com a mistura gasosa envolvendo hidrogênio, um cordão contínuo o dobro da velocidade (para 90°: 300A-50 cm/min (0,0083 m/s) / 400A-60cm/min (0,01 m/s)) que se obtinha com o argônio puro (para 90°: 300A-25 cm/min (0,0041 m/s) / 400A-45cm/min (0,0075 m/s)).

5.2 AVALIAÇÕES DAS TOCHAS DE SOLDAGEM EM LINHA COM ÂNGULOS A 90°

Objetivando melhores resultados com relação à produtividade em soldagem TIG, aliado com o pioneirismo neste processo no laboratório de soldagem Labsolda, assim como a dificuldade de encontrar material e explicações técnicas do processo de soldagem duplo cátodo, iniciaram-se os primeiros testes de soldagem TIG duplo cátodo em linha (*tandem*).



Figura 27: Tocha tandem TIG de duplo catodo (fonte: Ledica).

Atualmente o processo de soldagem TIG multi-catodo é utilizado, sobretudo em linhas de fabricação de tubulações (associando vários eletrodos, cujas funções são diferentes: préaquecimento, penetração e uniformização para tochas tri-catodos e pré-aquecimento e penetração/uniformização para tochas bi-catodos), a soldagem atinge velocidades de até três vezes superior, com maior produtividade que obtidas com tocha única.

Assim como nos ensaios com uma tocha única, todos os ensaios foram realisados com junta sobreposta, com a ponta dos eletrodos alinhada na borda superior entre a chapa inferior e superior. O gás de proteção utilizado foi: Ar (puro) - 100% de Argônio, diferentes corrente foram utilizadas nos cordões de solda: 50 A/300 A; 100 A/300 A; 300 A/150 A; 300 A/200 A; 400 A/200 A; 500 A/200 A. Por sua vez, a vazão utilizada de 12 l/mim foi à vazão padrão. Em seguida tabela 06 com a comparação dos cordões de solda obtidos com dupla tocha e uma distância entre as pontas dos eletrodos de 28,5 mm (0,0285 m) com somente Argônio como gás de proteção e as tochas de soldagem a 90 graus com relação à peça. Observar figura 27.

Tabela 06: Relação dos principais parâmetros de soldagem com seu respectivo cordão de solda, soldagem duplo catodo com 100% de Argônio como gás de proteção e tochas posicionadas a 90 graus.

No	<u>Tocha 1</u> Ângulo	<u>Tocha 2</u> Ângulo	Velocidade	Cordão
	Corrente	Corrente		
01	90°	90°	25cm/min	
01	50A	300A	25011/111111	
02	90°	90°	45cm/min	The state of the s
02	50A	300A	43011/111111	
03	90°	90°	45cm/min	
100A	300A	43011/111111	Participation and the second s	
0.4	90°	90°	60 / : -	
04	100A	300A	60cm/min	
0.5	90°	90°	45 / :	
05	300A	150A	45cm/min	
	90°	90°		
06	300A	200A	45cm/min	The state of the s
	90°	90°		
07	400A	200A	90cm/min	

08 90° 90° 500A 200A 100cm/min



Com relação aos ensaios feitos com duplo cátodo ocorreu forte influencia de uma atmosfera oxidante, ar atmosférico decorrente da falta de proteção do gás de soldagem. Foi variado à vazão de gás de proteção, distancia bocal peça, mas não obtiveram-se ganhos muito expressivos. O que ajudou um pouco foi à troca de um dos bocais, com diâmetro um pouco maior (de 8 mm (0,008 m) para 10 mm (0,01 m)). Mas durante o processo observamos que a poça de fusão formada após a passagem do arco ainda não se encontrava totalmente solidificada, com isso tornava-se bem suscetível ao ataque do oxigênio e outros gases atmosféricos, devido à proteção de gás do bocal não ser mais participativa. Mesmo com a adição de um prolongador para aumentar a área de proteção com o gás de soldagem, não foi possível conseguir resultados favoráveis, sem oxidação da poça de fusão. Sabe-se que com o aumento da quantidade de óxidos, espera-se o aumento viscosidade do banho metálico, diminuindo o espalhamento e consequentemente a largura e homogeneidade do cordão de solda.

Também foi identificada uma forte influência magnética nos arcos de soldagem, principalmente na tocha que operava com uma corrente de soldagem um pouco mais baixa. Mas devido a distancia relativamente grande entre os dois eletrodos a 90 graus conseguiu estabilizar o arco sem precisar induzir um campo magnético externo, pois os mesmo se encontravam longe o suficiente para seus respectivos campos magnético não influenciarem fortemente no arco voltaico do "vizinho".

Um fator importante, é que devido a "grande" distancia entre os eletrodos da tocha 1 (primeira tocha a fundir o material base) e tocha 2 (segunda tocha a fundir o material base) ser expressiva (28,5 mm (0,0285 m)), ao passar a segunda tocha de soldagem, a poça fundida já começou seu processo de solidificação. Assim, necessitando novamente ser refundida pela segunda tocha, e com altas velocidades e baixa corrente, vimos que não há energia suficiente para novamente fundir e reorganizar a área fundida. Mesmo aumentando a corrente de soldagem, não conseguíamos bons resultados.

Acrescenta-se ainda, que no processo utilizando a primeira tocha como aquecimento (corrente mais baixa), não se conseguiu eliminar o defeito de *Humping*, limitando em muito a produtividade e o aspecto do cordão de solda. Já, quando utilizávamos a soldagem com a primeira tocha com corrente mais alta, fundindo realmente o material e a segunda tocha com

uma corrente menor tentando corrigir o cordão, obtivemos resultados muito mais expressivos. Haja vista o início da homogeneização do aspecto do cordão devido à segunda tocha estar corrigindo o efeito de *Humping* causado pela primeira tocha. Mas como foi dito acima, distancia entre os eletrodos não é suficientemente pequena para garantir a permanência da molhabilidade da poça fundida.

5.3 AVALIAÇÕES DAS TOCHAS DE SOLDAGEM EM LINHA COM ÂNGULOS VARIADOS

Existem vários problemas que dificultam o aumento da produtividade nos processos de soldagem. No processo TIG quando se tenta elevar a velocidade de soldagem por intermédio do aumento da corrente de soldagem, aparecem defeitos de continuidade do cordão, a partir de uma determinada velocidade. Entre os principais defeitos citados na literatura, e observados na prática destaca-se o defeito denominado por *Humping*, costa de dragão.

É comum falar que com um aumento da quantidade de óxidos temos uma diminuição da viscosidade e da tensão superficial do metal líquido. Pode-se pensar que uma diminuição da tensão superficial e da viscosidade do banho líquido atuaria no sentido de diminuir o *Humping*, sendo que um líquido menos viscoso (ou mais fluido) ajudaria a manter um cordão contínuo. Porém, poderia-se pensar também que uma poça de fusão com menor viscosidade seria mais fortemente afetada pela pressão do arco, de maneira que o metal líquido poderia mais facilmente ser jogado para a região posterior, fora da ação do arco, de maneira que esfriaria precocemente. Isto favoreceria o *Humping*.

Observou-se que durante o processo de soldagem duplo cátodo, a distancia elevada de 28,5 mm (0,0285 m) obtida com as tochas a 90 graus é muito grande, fazendo com que a poça solidifique após a passagem da primeira tocha e antes da passagem da segunda tocha, desperdiçando muita energia, energia essa necessária para a formação de uma poça contínua. Testes foram feitos angulando a segunda e a primeira tocha (53 graus), para diminuirmos a distancia entre os eletrodos, mas não obtivemos bons resultados devido a forte deflexão magnética sofrida pelo arco, principalmente da segunda tocha. Será que com um campo magnético induzido a fim de amenizar essa deflexão conseguiríamos melhores resultados com a segunda tocha angulada e uma distancia menor (13 mm (0,013 m)) entre os dois eletrodos? Respondendo a esse pergunta, sim. Com a ajuda de um indutor magnético externo, permitiunos segurar a não deflexão do arco durante o processo de soldagem pela influencia dos campos magnéticos gerados pelas duas tochas de soldagem, mas muitas dificuldades foram

sendo encontradas, uma vez que o desvio do arco não varia linearmente com a corrente imposta.

Neste trabalho de conclusão foi utilizada também uma angulação na primeira ou segunda tocha de 53 graus, ângulo determinado nos experimentos com apenas uma tocha, como sendo uma das melhores posições de soldagem com relação à produtividade, além de ser o ângulo onde se obteve a menor distância entre os eletrodos das respectivas tochas. (observar figura 28). Permanecendo a primeira tocha com 90 graus. Sendo que a tocha 1 é a responsável por criar a poça de fusão do cordão e a tocha 2 pela homogeneização e largura da forma. Como conseguimos reduzir a distancia para 13 mm (0,013 m) entre os eletrodos das duas tochas, tornou-se possível criar uma poça de fusão "ovalizada", dois arcos elétricos atuando na mesma poça de fusão, não mais sofrendo a solidificação precoce da poça de fusão após a passagem da primeira tocha e antes da chegada da segunda tocha TIG. Com isso, melhorando o aspecto do cordão de solda juntamente com a menor influencia do *Humping* em altas velocidades, por melhorar a molhabilidade e a forma da poça de metal fundido.

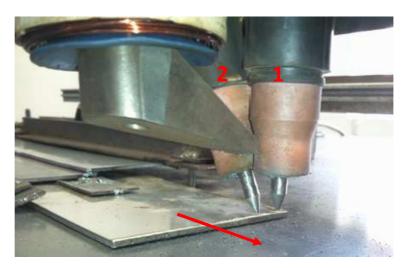


Figura 28: Detalhe da imagem da bancada de testes como as tochas de soldagem TIG e o indutor magnético posicionado na 1ª tocha.

5.4 AVALIAÇÕES DA INFLUENCIA DO INDUTOR DE CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO SOB AS TOCHAS DE SOLDAGEM TIG

Durante a soldagem com dois cátodos TIG, houve muita dificuldade em aproximar os dois eletrodos das tochas TIG, convergindo-os. Isso se decorre porque com a passagem de uma corrente elétrica, que são cargas elétricas em movimento caracterizado como um campo elétrico variável, um campo magnético é gerado sendo detectados somente pelas forças que

exercem sobre outros materiais ou outros campos magnéticos segundo as leis do eletromagnetismo.

Condutores com corrente, como os eletrodos das tochas de soldagem, geram campos magnéticos que formam círculos concêntricos ao seu redor (observar a figura 29). A direção do campo magnético nestas linhas é determinada pela regra da mão direita criado por Maxwell (veja a figura 30). Quando as cargas se movem com a corrente para a esquerda, o campo magnético aponta para cima enquanto que à direita, aponta para baixo. Sendo que a intensidade do campo magnético diminui com a distância do condutor, quanto mais afatado um eletrodo estivar do outro menor será a influencia magnética no arco voltaico.

Neste trabalho, utilizamos uma chapa de cobre refrierada a água como material base na soldagem sem utilizar a movimentação linear do carro de soldagem BULGO. Facilitando assim os procedimentos de soldagem, maior tempo de ensaio por ciclo além de economizar em não utilizar corpos de prova. A tocha de soldagem TIG e as fontes de tensão utilizada para os testes foram dois modelos, as mesmas utilizadas anteriormente: tocha de soldagem TBI, tocha de soldagem Labsolda, fonte de soldagem IMC e fonte alemã de solagem ELMA.

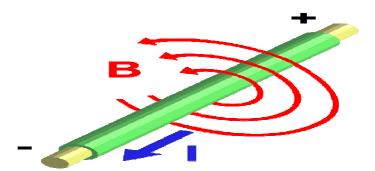


Figura 29: Figura representativa da direção do campo magnético sob um condutor linear de corrente (fonte: figura Wikipédia).

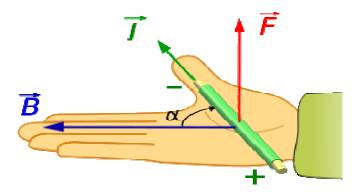


Figura 30: Figura representativa da regra da mão direita criada por Maxwell: orientação do campo magnético "B", sentido da corrente elétrica "I" e "F" a força de Lorentz (fonte: figura Wikipédia).

Estes ensaios foram realizados com simples e com dupla tocha de soldagem TIG. Na soldagem simples tocha, posicionamos o indutor de campo magnético em regiões distintas para observar sua influencia no arco voltaico durante a soldagem. Já, durante a soldagem com duplo cátodo, utilizamos o indutor magnético para investigar a influencia e a estabilidade do arco voltaico gerado pelas duas tochas e identificar uma alternativa para controlarmos os dois arcos voltaicos criados pelas duas tochas de soldagem. Com relação ao formato do indutor magnético utilizado, foi utilizados nestes ensaios o modelo A, por apresentar bons resultados de direcionamento do campo magnético do arco voltaico da tocha de soldagem. Figura 31 demonstrativa logo abaixo.

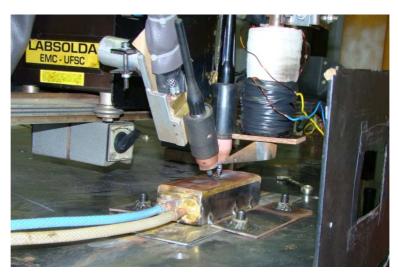


Figura 31: Figura demonstrativa das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo.

Como dito anteriormente, a dificuldade encontrada é com relação ao desvio magnético do arco e com relação à indução de um campo magnético "contrário" a fim de segurar essa deflexão. E devido ao diferentes comportamentos dessa deflexão com as variações de corrente de soldagem ensaiadas, além também da dificuldade em isolar a deflexão em apenas um dos arcos, iniciou-se a verificação comportamental dos arcos de soldagem. Segue abaixo representações dos seguintes casos:

- Caso 01: Tocha única de soldagem a 90 graus em relação a chapa base, representando um comportamento esperado: sem interação magnética ou conturbação no arco voltaico assim como podemos observar no quadro 03 um arco muito mais intenso, com o corpo de cone de maior área.

Quadro 03: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 01.

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
100	90	400	90
Sem intera	ação magnética	Sem intera	ação magnética

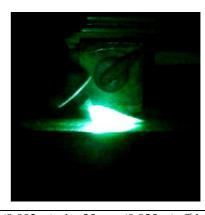
Parâmetros utilizados: Vazão = 12 l/min $(0,0002 \text{ m}^3/\text{s})$; e = 2 mm (0,002 m); d = 35 mm (0,035 m); Ø bocal = 20 mm (0,002 m); eletrodo = 6,4 mm (0,0064 m).

- Caso 02: Tocha única de soldagem a 53 graus de inclinação, representando um comportamento com forte sobro magnético. Sabemos que quando uma corrente elétrica flui, gera-se um campo eletromagnético, uma das razões desse sopro magnético estar ocorrendo segundo Messler, 1999, é que os elétrons tem a tendência de percorrer a menor distancia entre a ponta do eletrodo (polo negativo) e a base (polo positivo). Assim esses elétrons que fluem nesta direção criam campos magnéticos segundo esta orientação perpendicular, menor distancia, mas com a orientação inclinada da tocha de soldagem o arco voltaico tende a se inclinar. Levando ao sopro magnético devido tendência dos elétrons escolherem o caminho mais curto e outros elétrons sendo defletidos devido aos campos magnéticos por si gerados. Também observa-se que com o aumento da corrente de soldagem, tende-se diminuir a intensidade com sobro magnético devido também a maior densidade de cargas.

Quadro 04: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 02.

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
100	53	400	53
Sob influência	de sopro magnético	Sob influência	de sopro magnético





Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); \emptyset \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); eletrodo = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 03: Tocha única de soldagem a 127 graus de inclinação. Mesmas observações encontradas no caso 02. Foi utilizando a mesma inclinação para o caso 02 para verificar também a influencia da bancada de testes sob o sopro magnético.

Quadro 05: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 03.

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
100	127	400	127

Sob influência de sopro magnético







Sob influência de sopro magnético

Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); Ø \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); \text{ eletrodo} = 6.4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 04: Tocha duplo catodo *tandem* com as duas tochas a 90 graus em relação plano base. Manteve-se uma distancia de 45 mm (0,045 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, tocha da esquerda na imagem do quadro 06.

Quadro 06: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 04 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 45 mm (0,045 m).

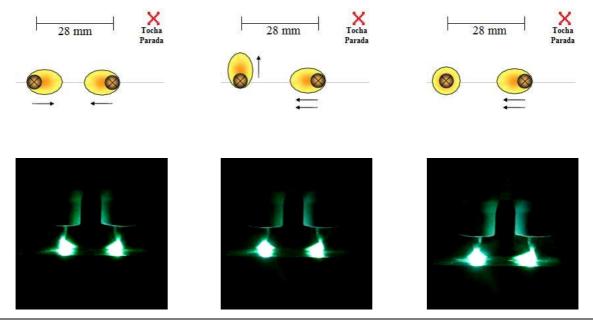
Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
1ª 100	1ª 90	1ª 100	1ª 90	1ª 200	1ª 90
2ª 100	2ª 90	2ª 200	2ª 90	2ª 100	2ª 90
45 mm	Tocha Parada	45 mm	Tocha Parada	45 mm	1 Tocha Parada
↑			⊗ ——		

Parâmetros utilizados: Vazão = 12 l/min (0,0002 m³/s); e = 2 mm (0,002 m); d = 35 mm (0,035 m); Ø bocal = 20 mm (0,02 m); eletrodo = 6,4 mm (0,0064 m).

- Caso 05: Tocha duplo catodo *tandem* com as duas tochas a 90 graus em relação plano base. Manteve-se uma distancia de 28 mm (0,028 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, tocha da esquerda na imagem do quadro 07.

Quadro 07: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 05 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 28 mm (0,028 m).

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
1ª 100	1ª 90	1ª 200	1ª 90	1ª 300	1ª 90
2ª 100	2ª 90	2ª 100	2ª 90	2ª 200	2ª 90



Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); Ø \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); \text{ eletrodo} = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 06: Tocha duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha a 90 graus e a 2ª tocha a 53 graus em relação plano base. Manteve-se uma distancia de 13 mm (0,013 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, tocha da esquerda na imagem do quadro 08.

Quadro 08: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 06 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).

distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).						
Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	
1ª 100	1ª 90	1ª 200	1ª 90	1ª 200	1ª 90	
2ª 100	2ª 53	2ª 100	2ª 53	2ª 200	2ª 53	
2ª 100 2ª 53 Forte interação magnética		Forte interaç	ão magnética	Forte interaç	ão magnética	

Parâmetros utilizados: Vazão = 12 l/min $(0,0002 \text{ m}^3/\text{s})$; e = 2 mm (0,002 m); d = 35 mm (0,035 m); Ø bocal = 20 mm (0,002 m); eletrodo = 6,4 mm (0,0064 m).

- Caso 07: Tocha duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha a 90 graus e a 2ª tocha a 53 graus em relação plano base. Manteve-se também a distancia de 13 mm (0,013 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, mas agora com a ação de um indutor magnético externo. Indutor posicionado ao lado da 1ª tocha a uma distancia de 5 mm (0,005 m). Mesmo indutor utilizado nos ensaios anteriores, indutor de forma A, com uma a utilização de um resistor do modelo comercial 1R2 10 W conectado em série com o indutor de campo magnético, com a função de diminuir a intensidade do campo magnético gerado pela bobina. Distancia ente o indutor magnético e o plano a ser soldado é de 30 mm (0,03 m).

Quadro 09: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 07 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (º)
1ª 100	1ª 90	1ª 200	1ª 90	1ª 200	1ª 90
2ª 100	2ª 53	2ª 200	2ª 53	2ª 400	2ª 53
13 mm	Tocha Parada	13 mm	Tocha Parada	13 mm	Tocha Parada
	5 mm		5 mm		5 mm

Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); Ø \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); \text{ eletrodo} = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 08: Tocha duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha a 90 graus e a 2ª tocha a 53 graus em relação plano base. Manteve-se também a distancia de 13 mm (0,013 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, mas agora com a ação de um indutor magnético externo. Indutor posicionado ao lado da 1ª tocha a uma distancia de 11 mm (0,011 m). Mesmo indutor utilizado nos ensaios anteriores, indutor de forma A, com uma a utilização de um resistor do modelo comercial 1R2 10 W conectado em série com o indutor de campo magnético, com a

função de diminuir a intensidade do campo magnético gerado pela bobina. Distancia ente o indutor magnético e o plano a ser soldado é de 30 mm (0,03 m).

Quadro 10: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 08 — distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (º)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
1ª 100	1ª 90	1ª 200	1ª 90	1ª 200	1ª 90
2ª 100	2ª 53	2ª 200	2ª 53	2ª 400	2ª 53
13 mm	Tocha Parada	13 mm	Tocha Parada	13 mm	Tocha Parada
	11 mm		11 mm		11 mm

Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); \emptyset \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); eletrodo = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 09: Tocha duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha a 90 graus e a 2ª tocha a 53 graus em relação plano base. Manteve-se também a distancia de 13 mm (0,013 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, mas agora com a ação de um indutor magnético externo. Indutor posicionado ao lado da 1ª tocha a uma distancia de 11 mm (0,011 m). Mesmo indutor utilizados nos ensaios anteriores, indutor de forma A, com uma a utilização de um resistor do modelo comercial 3R3 5 W conectado em série com o indutor de campo magnético, com a função de diminuir a intensidade do campo magnético gerado pela bobina. Distancia ente o indutor magnético e o plano a ser soldado é de 30 mm (0,03 m).

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
1ª 200	1ª 90	1ª 300	1ª 90
2ª 200	2ª 53	2ª 200	2ª 53
13 n	nm Tocha Parada	13 n	nm Tocha Parada
	11 mm		11 mm

Quadro 11: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 09 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).

Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); Ø \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); \text{ eletrodo} = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

- Caso 10: Tocha duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha a 90 graus e a 2ª tocha a 53 graus em relação plano base. Manteve-se também a distancia de 13 mm (0,013 m) entre a 1ª tocha, tocha na direita e a 2ª tocha, mas agora com a ação de um indutor magnético externo. Indutor posicionado ao lado da 2ª tocha a uma distancia de 5 mm (0,005 m). Mesmo indutor utilizados nos ensaios anteriores, indutor de forma A, com uma a utilização de um resistor do modelo comercial 1R2 10 W conectado em série com o indutor de campo magnético, com a função de diminuir a intensidade do campo magnético gerado pela bobina. Distancia ente o indutor magnético e o plano a ser soldado é de 30 mm (0,03 m).

Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)	Corrente (A)	Grau de Inclinação (°)
1ª 200	1ª 90	1ª 300	1ª 90
2ª 200	2ª 53	2ª 200	2ª 53
13 r	nm Tocha Parada	13 n	nm Tocha Parada
indutor		indutor	
		1	
	MIN		

Quadro 12: Demonstração do arco voltaico em função das características do processo do caso 10 – distancia entre os eletrodos das tochas de soldagem 13 mm (0,013 m).

Parâmetros utilizados: Vazão = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s}); e = 2 \text{ mm } (0,002 \text{ m}); d = 35 \text{ mm } (0,035 \text{ m}); \emptyset \text{ bocal} = 20 \text{ mm } (0,02 \text{ m}); eletrodo = 6,4 \text{ mm } (0,0064 \text{ m}).$

5.5 ANÁLISE INTEGRADA DOS RESULTADOS

Muitos experimentos foram realizados, combinações diferentes de correntes de soldagem, combinações distintas da posição do indutor de campo magnético, diferentes potencias e formatos desses indutores de campo, mas a dificuldade de repetibilidade e estabilização do arco voltaico foi um fator observado de grande expressão nestes ensaios.

Abaixo, tabela 07, representando os principais cordões de solda feitos com soldagem TIG duplo cátodo utilizando uma mistura de gás de proteção, 90% de Argônio com os 10% restantes de Hidrogênio e gás com somente Hidrogênio. Comparando resultados apresentados em testes com apenas uma tocha e também duas tochas, utilizando ângulos retos e agudos no sentido de empurrar a poça de fusão.

Tocha 1 Tocha 2 Velocidade Cordão No Ângulo Ângulo Corrente Corrente 90° 01 25cm/min 300A 90° 02 45cm/min 400A 30° 03 25cm/min 300A 90° 04 50cm/min 300A 90° 90° 05 45cm/min 300A 200A 90° 53° 60cm/min 06 200A 300A 90° 53° 07 90cm/min 400A 200A 90° 53° 08 115cm/min 200A 300A

Tabela 07: Relação dos principais cordões de solda com seus respectivos parâmetros.

Analisando a tabela 07, demonstrando as melhores práticas na soldagem TIG autógena sob junta sobre postas de aço SAE 1020 desenvolvidas neste trabalho, vimos que:

- Para o experimento nº 01: Soldagem com simples tocha com ângulo a 90 graus em relação ao corpo de prova conseguiu no máximo 25cm/min (0,0041 m/s) na velocidade de avanço do cordão de solda utilizando somente Argônio como gás de proteção e com uma corrente de soldagem a 300 Ampère. Observa-se uma forte oxidação do cordão de solda, mesmo aumentando a vazão do gás de proteção não conseguimos evitar a falta de proteção da poça de fusão. Outros dados: Vazão = 12 l/min (0,0002 m³/s); e = 3 mm (0,003 m); d = 25 mm (0,025 m); Ø bocal = 20 mm (0,02 m); eletrodo = 6,4 mm (0,0064 m).
- Para o experimento nº 02: Soldagem com simples tocha com ângulo a 90 graus em relação ao corpo de prova conseguiu no máximo 45 cm/min (0,0075 m/s) como velocidade de avanço do cordão de solda utilizando somente Argônio como gás de proteção e com uma corrente de soldagem agora de 400 A. Com o aumento de 100 A na corrente de soldagem,

nota-se um aumento de próximo 90% na velocidade de avanço mantendo-se as mesmas condições de ensaio, mas ainda observamos com maior intensidade a oxidação da área soldada devido à presença de gás redutos na solidificação da poça de fusão ocasionada pela falta de proteção com gás inerte (Argônio);

- Para o experimento nº 03: Soldagem com simples tocha com ângulo a 30 graus em relação ao corpo de prova, no sentido de empurrar a poça de fusão, conseguimos por sua vez somente 25 cm/min (0,0041 m/s) na velocidade de soldagem. Mesmo aumentando a quantidade de calor imposta na poça de fusão com o uso da angulação da tocha de soldagem não se conseguiu estabilizar a poça em velocidades maiores. O gás de proteção utilizado novamente foi 100% de Argônio e com uma corrente de soldagem na ordem de 300 A. Mantiveram-se as mesmas condições de ensaio dos casos anteriores;
- Para o experimento nº 04: Soldagem com simples tocha com ângulo a 90 graus em relação ao corpo de prova conseguiu no máximo 50 cm/min (0,0083 m/s) na velocidade de avanço do cordão de solda utilizando agora uma mistura de 10% de Hidrogênio e 90% Argônio como gás de proteção e com uma corrente de soldagem a 300 A. Somente com a adição de 10% de Hidrogênio, mantendo as mesmas condições de ensaios anteriores, observamos nitidamente que o aumento da velocidade e do aspecto do cordão de solda foi muito significativo: cordão sem oxidação e aumento de 100% na velocidade de avanço. Também foram observados nos ensaios que, utilizando uma angulação aguda na tocha de soldagem, conseguíamos ganhos expressivos em velocidade, mas não houve maneira de estabilizarmos a poça de fusão devido à alta velocidade de avanço.
- Para o experimento nº 05: Soldagem com duplo catodo *tandem* com as tochas posicionadas a 90 graus, utilizando somente Argônio como gás de proteção. A distancia entre os dois eletrodos registrado foi de 28,5 mm (0,0285 m), assim como os parâmetros: Vazões = 12 l/min (0,0002 m³/s); e = 3 mm (0,003 m); d = 25 mm (0,025 m); Ø bocais = 20 mm (0,02 m); eletrodos = 6,4 mm (0,0064 m). Por sua vez não conseguimos ganhos com este método de soldagem, uma vez duas tochas de soldagem infligindo ao todo 500 A não teve melhor desempenho que apenas uma tocha a 400 A nas mesmas condições. Velocidade de avanço máxima encontrada de 45 cm/min (0,0071 m/s). Uma das causas desse baixo desempenho é, além da interação magnética no arco voltaico das tochas é a distancia ser muito elevada entre a primeira tocha a fundir o material base e da segunda tocha a atingir a zona de fusão.
- Para o experimento nº 06: Soldagem também com duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha posicionada a 90 graus e com 200 A de corrente, a 2ª tocha com 53 graus e 300 A, utilizando uma mistura de 10% de Hidrogênio e 90% Argônio como gás de proteção.

Conseguimos uma velocidade de 50 cm/min (0,0083 m/s) com uma soma de 500 A de corrente. Onde a primeira tocha tinha a função de aquecimento e uma pequena fusão, já a segunda tocha com uma corrente de soldagem maior e a angulação aguda tinha a função de impor mais calor à poça de fusão impondo uma maior área fundida, com isso maior a largura do cordão de solda. Este procedimento foi possível porque impomos um campo magnético externo com o auxilio de uma bobina e também realizamos uma série de procedimentos determinados experimentalmente, como:

- Distancia entre o indutor de forma A e a 1ª tocha de 11 mm (0,011 m);
- Desalinhamento de 3 mm (0,003 m) entre os dois eletrodos e a borda da região a ser soldada;
 - Distancia entre as duas tochas de 13 mm (0,013 m);
- Parâmetros padrões: Vazões = $12 \text{ l/min } (0,0002 \text{ m}^3/\text{s})$; e = 3 mm (0,003 m); d = 25 mm (0,025 m); Ø bocais = 20 mm (0,020 m); eletrodos = 6,4 mm (0,0064 m).

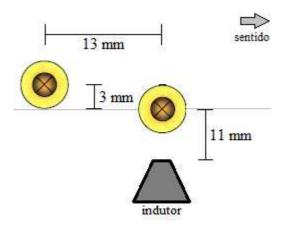


Figura 32: Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o experimento de nº 06.

Somente com este desalinhamento de 5 mm (0,005 m) dos eletrodos nós conseguimos focar o arco voltaico para a região desejada, mas com este leve deslocamento do arco nós perdemos em rendimento térmico da segunda tocha, que por sua vez era a tocha de soldagem que operava com uma corrente mais elevada.

- Para o experimento nº 07: Soldagem também com duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha posicionada a 90 graus e 400 A de corrente, a 2ª tocha com 53 graus e 200 A, utilizando uma mistura de 10% de Hidrogênio e 90% Argônio como gás de proteção. Temos uma situação contrária à encontrada no experimento nº 06, haja vista que aqui nós trabalhamos a

segunda tocha com uma menor corrente na função de homogeneizar, estabilizar o cordão de solda, porque o trabalho de fusão e penetração estaria sendo feito pela primeira tocha de soldagem. Seguindo os mesmos parâmetros de soldagem dos testes anteriores, com essas modificações chegamos a uma velocidade de 90 cm/min (0,015 m/s) para esse ensaio.

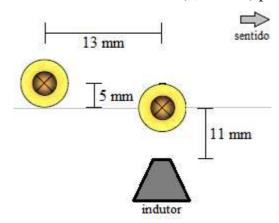


Figura 33: Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o experimento de nº 07.

Novamente a utilização do desalinhamento nos eletrodos foi necessária, onde diferentemente do caso nº 06, neste experimento a primeira tocha apresentava uma maior corrente por isso da necessidade de ter essa descentralização um pouco maior para focar o arco voltaico da segunda tocha. Testes foram feitos colocando o indutor magnético na posição da segunda tocha com estes mesmos parâmetros utilizando no ensaio nº 07, como podem observar na figura 34, mas não obtivemos um cordão contínuo ou um controle da estabilização do arco.

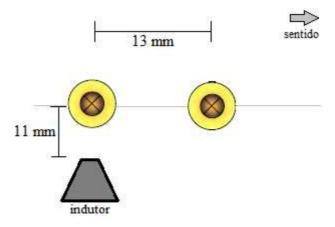


Figura 34: Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo.

- Para o experimento nº 08: Soldagem também com duplo catodo *tandem* com a 1ª tocha posicionada a 90 graus e com 200 A de corrente, a 2ª tocha com 53 graus e 300 A, utilizando uma mistura de 10% de Hidrogênio e 90% Argônio como gás de proteção. Conseguimos uma velocidade de 115 cm/min (0,019 m/s) com uma soma de 500 A de corrente como no caso nº 06. Seguindo os mesmos parâmetros de soldagem dos testes anteriores, com a diferença na distancia entre o indutor magnético e a tocha 1 de 7 mm (0,007 m), conseguimos uma velocidade de avanço próxima de 200% em relação ao ensaio 06, isso porque para este ensaio tentou-se controlar o arco voltaico sem ter a necessidade de desalinhar os eletrodos para atingir o mesmo ponto focal, observar figura 35.

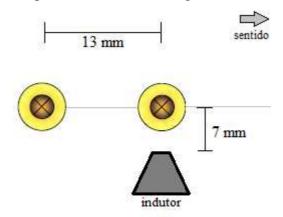


Figura 35: Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem e indutor de campo magnético externo para o ensaio nº 08.

Com esse comportamento a energia imposta na poça de fusão é muito mais expressiva que nos casos anteriores, tendo a poça de fusão com uma área contínua submetida ao mesmo tempo pelo poder energético das duas tochas. Figura representativa 36.

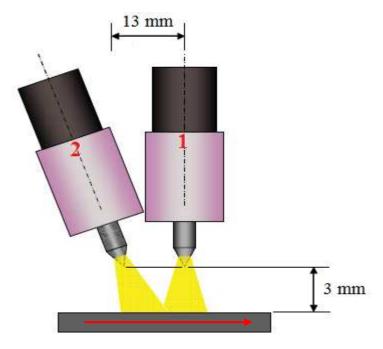


Figura 36: Figura demonstrativa das posições das tochas de soldagem com relação à interação dos arcos voltaicos para o ensaio nº 08. (figura adaptada REIS, 2009).

Devido ao grande problema já identificado nos testes anteriores, o poder de estabilizar a grande instabilidade dos arcos voltaicos em função das interações magnéticas que ocorrem durante a soldagem, não se conseguiu uma repetibilidade nos ensaios.

6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso era de apresentar as melhores práticas no processo de soldagem TIG com dois cátodos em linha. Uma vez que, o propósito de utilizar duas tochas nos garante uma melhor soldagem, uma soldagem mais homogênea, controlada em altas velocidades. Esse controle vem, como mostra em algumas publicações da *Welding Journal* da menor pressão no arco TIG imposta contra a poça de fusão, evitando com isso o defeito mais comum em soldagens com altas velocidades de avanço e altas correntes elétricas, o *Humping*.

Com base nisso, conseguimos melhores resultados soldando com duplo catodo TIG em linha que em comparação a soldagem com simples catodo. Mas não se obteve êxito com o fato de determinar as melhores práticas no processo, porque não conseguimos garantir uma repetibilidade nos ensaios demonstrados.

Uma das grandes razões de não conseguirmos garantir uma repetibilidade nos testes decorridos foi à ação da influencia magnética nos arco voltaicos das tochas TIG. Para se conseguir o efeito desejado na poça de fusão, necessita-se que os eletrodos trabalhem juntos, trabalhem numa mesma poça de metal líquido, mas ao aproximarmos os eletrodos entre si o campo magnético gerado em cada tocha de soldagem influencia catastroficamente a região do arco voltaico de ambas. Tentando contornar essa situação, induzimos um campo magnético externo através de um dispositivo posicionado próximo as tochas TIG, com o intuito de orientar eletromagneticamente os arcos voltaicos.

Como já era esperado, não se conseguiu orientar o arco voltaico quando as duas tochas TIG trabalhavam muito próximas uma das outras. Trabalhou-se com três formatos distintos de indutor, potencias distinta, variando posições e distâncias sem chegar a um resultado expressivo. Mas com estes ensaios, nos permitiu definir que: para se conseguir um ganho em produtividade contornando o defeito mais comum na soldagem de alto desempenho, o *Humping*, deve-se trabalhar com os dois eletrodos próximos o suficiente para que atuem na mesma poça de fusão. Testes mostraram que a energia térmica gerada pelas duas tochas quando trabalhadas em conjunto na poça de fusão emanam energia suficiente próxima ao trabalho exercido de uma única tocha de corrente elevada equivalente. E que esse ganho se reflete em trabalho com pressões de arco mais amenas, podendo assim ganhar em estabilidade da poça de fusão, melhorando a qualidade do cordão de solda e a possibilidade de velocidades em avanço maiores.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Trabalhar com os eletrodos mais próximos um dos outros, fazendo com que o arco voltaico seja único para os dois catodos, necessita de distancias menores que 4 mm (0,004 m). Contornado o efeito da deflexão magnética.
- ii. Estudar mais afundo o comportamento da influencia magnética quando trabalhado em conjunto com mais de um catodo TIG. Modelando isoladamente as linhas de campo de cada componente, assim determinar mais facilmente a posição e intensidade necessária para estabilizar o arco voltaico.
- iii. Trabalhar com um AVC, controle da tensão do arco. Equipamento que nos permite trabalhar com uma tensão real no arco voltaico pré-definida, possibilitando distancias eletrodo/peça (e) muito pequenas, melhorando a pressão do jato plasma.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MESSLER R. W., **Principles of Welding**, Nova Iorque, NY, 1999.

MENDEZ, P. F; EAGAR, T. W. 2003. **Penetration and defect formation in high-current arc welding.** *Welding Journal*, outubro 2003: 296-s to 306-s.

SAVAGE, W. F; NIPPES, E. F; AGUSA, K. 1979. Effect of the arc force on defect formation on GTA welding. *Welding Journal* 58(7): 212-s to 224-s.

TIMINGS R., Fabrication and Welding Engineering, Nova Iorque, NY, 2008.

SMITH, D., Welding Skills and Technology, McGraw Hill Book Company, Nova Iorque, NY, 1984.

AWS, Welding Handbook: Welding Process, volume 2, 8^a edição, 1991.

QUITES, A.M; DUTRA, J.C. **Tecnologia da Soldagem a Arco Voltaico**, Florianópolis, SC, 1979.

CUNHA S. L., Manual de soldagem ao arco elétrico. SENAI São Paulo, SP, 1984.

MARTINS W., Introdução ao Processo de Soldagem, São Luiz, MA, 2006.

MODENESI, P.J. **Técnica Operatória da Soldagem GTAW**, Belo Horizonte, MG, 2004.

BARRA S. R., Fundamentos da Transferência de Calor Aplicados à Soldagem, SENAI São Paulo, SP, 2009.

ALMEIDA A. R., Soldagem TIG, SENAI Varginha, MG, 2004.

LANCASTER, J.F. **Metallurgy of Welding**, 6 Ed. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 1999.

DUTRA, J. C; LOCATELLI, G. 2008. Soldagem Autógena de Chapas Finas Sobrepostas como Simulação da Soldagem de Recipientes de Compressores Herméticos, *Projeto LabSolda*, Florianópolis, SC, 2008.

BRACARENSE A. Q., Processo de Soldagem TIG – GTAW, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

DUTRA, J.C. Princípios dos Processos de Soldagem, Florianópolis, SC, 2002.

MARQUESE, C. M; QUITES, A. M. **Descontinuidades em Soldas**, 1 Ed. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 1999.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos; Ed. Estúdio JI de artes gráficas S/C Ltda. São Paulo, SP, 1996.

CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: Uma Introdução, Quinta Edição. Rio de Janeiro, RJ, 2002.

REIS, R. P. Assessment of low current tandem GMAW process with waveform control and with aid of Laser beam, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2009.

LENG, X. S; ZHANG, G. J; WU, L. Experimental study on improving welding efficiency of twin electrode TIG welding method, Science and Technology of Welding and Joining, 2006.

Wikipédia: Ficheiro Eletromagnetismo . Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Electromagnetism.svg. Acesso em: 19 maio 2010.

Wikipédia: Ficheiro Regra da mão direita . Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Regla_mano_derecha_Laplace.svg. Acesso em: 19 maio 2010.