

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

**UM ESTUDO DA EFICIÊNCIA E PRODUTIVIDADE DOS
PRINCIPAIS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

MATEUS BARANCELLI SCHWEDERSKY

Florianópolis, Agosto de 2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

S412e Schwedersky, Mateus Barancelli
Um estudo da eficiência e produtividade dos principais
processos de soldagem a arco [dissertação] / Mateus
Barancelli Schwedersky ; orientador, Jair Carlos Dutra. -
Florianópolis, SC, 2011.

97 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem. 3. Soldagem MIG/MAG.
4. Produtividade industrial. 5. Eficiência industrial.
I. Dutra, Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica. III. Título.

CDU 621

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

MATEUS BARANCELLI SCHWEDERSKY

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título
de

MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng.
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Orestes Estevam Alarcon, Dr. Eng.
Presidente

Prof. Américo Scotti, Ph. D.
Membro

Carlos Eduardo Inconomus Baixo, Dr. Eng.
Membro

Dedico este trabalho aos meus pais, Werner e Rosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram para a realização deste trabalho, principalmente:

- Ao Prof. Jair Carlos Dutra pela orientação, convivência profissional, conhecimentos transmitidos, e principalmente pela determinação e esforço em manter a estrutura do LABSOLDA.
- Ao pessoal da equipe do LABSOLDA pela amizade e colaboração: Régis Silva, Márcia Thiel, Fernando Costenaro, Jonathas Alves, Eduardo Bidese, Reinaldo Fayal, Júlio Ribeiro, Rafael Polezi, Felipe Kalil, Diego dos Santos, Erwin Teichmann, Renon Carvalho, Miguel Guayasamin, Marcelo Okuyama, Fábio Michelin, Leonardo Brügemann, Ezequiel Gonçalves, Hellington Direne, João Facco, Marcus Barnetche, Paulo Roberto Pereira, Evandro Martins, Cleber Guedes, Gilmar Ribeiro, Cleber Marques, Alexandre Weingartner, Ramon Meller e todos que passaram pelo laboratório e contribuíram de alguma forma.
- Ao Eng. Raul Gohr Jr., pelo apoio fundamental no desenvolvimento dos equipamentos.
- A todos os Professores do Dep. de Eng. Mecânica.
- Ao CNPq e CAPES, pela bolsa de estudo.
- À empresa Embraco, que também forneceu apoio no projeto de pesquisa.
- A toda minha família, que me apoiou em todos os momentos, principalmente meus pais Werner e Rosa, e meus irmãos Maurício e Bernardo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Gráfico da eficiência do arco segundo DuPont e Marder [2], publicado também no Welding Handbook da AWS [1].....	6
Figura 2 - Velocidade de soldagem máxima dos processos de soldagem a arco, segundo DuPont e Marder [2]	8
Figura 3 – Variação da eficiência do arco de acordo com o material e velocidade de soldagem para os processos Plasma e TIG [3]	10
Figura 4 – Eficiência da soldagem TIG em função da corrente (resultados compilados de vários autores) [6].....	11
Figura 5 – Eficiência do arco para o processo MIG/MAG para diferentes modos de transferência (Arame de aço carbono 1,2 mm de diâmetro) [5].....	13
Figura 6 - Comparação didática do perfil de penetração de diferentes processos de soldagem	16
Figura 7 – Aspecto superficial dos cordões soldados com o processo TIG em diferentes distâncias eletrodo-peça (Corrente de soldagem 250 A; gás de proteção argônio; Vs: 5 mm/s)	19
Figura 8 – Macro-seções mostrando a influência da distância eletrodo peça na penetração do cordão de solda utilizando o processo TIG (I: 250 A. gás de proteção: argônio puro). As imagens estão na mesma escala, sendo que a espessura da chapa é de 3/8” (9,6 mm).....	20
Figura 9 - Variação da tensão para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça.....	21
Figura 10 - Quantidade de metal fundido para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça	21
Figura 11 - Eficiência de fusão em função da distância eletrodo-peça	22

Figura 12 – Distribuição do fluxo de calor para 100 A com diferentes distâncias eletrodo-peça [10]	24
Figura 13 - Cordão soldado pelo processo TIG. A e B são secções transversais dos locais indicados na figura do cordão	30
Figura 14 - Esquema mostrando a formação de cratera na poça de fusão para o processo TIG com elevada corrente de soldagem: Corte transversal no centro do cordão (Superior); Vista superior do cordão (Inferior) (Adaptado de [17]).....	31
Figura 15 – Esquema didático representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes e com formação de defeitos do tipo humping. (Adaptado de [16])	33
Figura 16 - Efeito da corrente de soldagem na velocidade limite para aparecimento de defeitos [18].....	35
Figura 17 - Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos [18].....	36
Figura 18 - Efeito da distância eletrodo-peça na velocidade limite para o aparecimento de defeitos [18].....	37
Figura 19 - Efeito do gás de proteção na distribuição de pressão do arco durante a soldagem TIG [20]	39
Figura 20 - Representação didática do aparato usado para medição da pressão de estagnação do arco para o processo TIG. 1- Base de cobre refrigerada; 2- Furo passante; 3- Duto ou sistema de comunicação entre o furo e o sensor; 4- Sensor medidor de pressão e sistema de aquisição dos dados. (Adaptado de [25]).....	41
Figura 21 - Efeito da corrente de soldagem na pressão do arco. (DEP 6,3mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°) [25].....	42

Figura 22 - Efeito da ponta do eletrodo na pressão do arco (I: 200 A; DEP 6,3 mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm) [25].....	43
Figura 23 - Efeito da distância eletrodo-peça na pressão do arco (Ang. I: 200 A; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°) [25]	44
Figura 24 - Comparação da pressão de estagnação para diferentes misturas de Argônio e Hélio (Resultados experimentais) esquerda; Resultados simulação, direita (I: 200 A; Diâmetro do eletrodo: 3,2 mm; Ang. ponta do eletrodo 60°; DEP: 5 mm) [27]	45
Figura 25 – Valores da pressão do arco medidos e obtidos por simulação numérica para diferentes misturas [23]	46
Figura 26 - Porosidade em solda de aço inoxidável austenítico realizada com mistura Ar+20% H_2 no gás de proteção [28]	47
Figura 27 – Esquerda: Condutividade dos gases em função da temperatura) [7]; Direita: Condutividade térmica de algumas misturas argônio hidrogênio em função da temperatura (H. Li, 1990) [28]	51
Figura 28 - Característica estática na soldagem TIG com diferentes percentuais de hidrogênio no gás de proteção (DEP = 4mm, eletrodo negativo) [7]	52
Figura 29 - Tensão do arco em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção na soldagem de ferro puro, aço carbono e aço inoxidável com arco de 100 A [28].....	53
Figura 30 – Área da secção transversal no ferro puro em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção (I: 100 A, DEP 3 mm, Velocidade de Soldagem 3 mm/s) [28]	55
Figura 31 - Efeito da adição de Hidrogênio no Argônio (% em vol) e da corrente de soldagem na quantidade de metal de base fundido pelo	

processo TIG (aço inox 18/8, DEP: 3,5mm, vs: 0,3m/min, eletrodo negativo) [7].....	55
Figura 32 - Efeito da adição de Hidrogênio ao Argônio no gás de proteção, e da intensidade da corrente de soldagem sobre a eficiência de fusão na soldagem TIG [7].....	56
Figura 33 – Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 200 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm).....	59
Figura 34 - Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 300 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm).....	60
Figura 35 - Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 400 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm).....	61
Figura 36 - Secção transversal cortada à 100 mm do início do cordão (Soldagem realizada com o processo TIG com distância eletrodo-peça de 3 mm e misturas gasosas).....	62
Figura 37 - Secção transversal cortada à 150 mm do início do cordão (Soldagem realizada com o processo TIG com distância eletrodo-peça de 3 mm e misturas gasosas).....	63
Figura 38 - Quantidade de metal fundido utilizando o processo TIG para os diferentes gases (Distância eletrodo-peça 3 mm)	64
Figura 39 - Tensão do arco utilizando o processo TIG com diferentes gases de proteção (Distância eletrodo-peça 3 mm).....	65
Figura 40 - Média da eficiência de fusão para cada mistura gasosa ..	66
Figura 41 – Perfil de penetração desenhado com base no perfil de penetração obtido na soldagem real em cada caso.....	66
Figura 42 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 40 cm/min; Gás de proteção: Argônio puro)	68

Figura 43 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 45 cm/min; Gás de proteção: Argônio puro).....	69
Figura 44 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 80 cm/min; Gás de proteção: Ar + 8% H_2)	69
Figura 45 - Compressores soldados nos testes realizados	70
Figura 46 - Evolução do sistema mecânico do AVC: (1) Primeiro protótipo desenvolvido para testes; (2) Segundo protótipo desenvolvido; (3) Terceiro protótipo desenvolvido; (4) AVC preso ao robô de soldagem de seis eixos para soldagem do compressor.	71
Figura 47 - Aspecto do cordão obtido utilizando o processo TIG autógeno usado para soldagem de união de compressores herméticos para refrigeração (Velocidade de soldagem 1,5 m/min).....	72
Figura 48 - Secção transversal soldagem utilizando o processo TIG autógeno usado para soldagem de união de compressores herméticos para refrigeração (Velocidade de soldagem 1,5 m/min).....	73
Figura 49 - Componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG (Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15% H_2)	74
Figura 50 - Detalhe do aspecto da solda de componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG. (Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15% H_2).....	75
Figura 51 - Macrografia da seção transversal do componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG	

(Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15%H ₂)	76
Figura 52 - Tocha de soldagem utilizada nos ensaios (superior). Eletrodo de 3,2 mm de diâmetro com afiação em 90° utilizados nos ensaios. (inferior).....	92
Figura 53 - Sistema de aquisição e tratamento de dados SAP (esquerda), tela da interface gráfica do Software OSCILOS.....	94
Figura 54 - Esquema mostrando a medição da área fundida utilizando o software "UTHSCSA Image Tool v3.0"	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS

Al: elemento alumínio
A_m: área fundida medida na seção transversal
Ar: gás argônio
AVC: Arc Voltage Control
AWS: American Welding Society
C: element carbon
Co: elemento cobalto
Cu: elemento cobre
CO: gás monóxido de carbono
CO₂: gás dióxido de carbono
Cr: elemento cromo
DEP: Distância eletrodo-peça
E_{cal}: quantidade de energia medida com um calorímetro
Fe: elemento ferro
GMAW: processo de soldagem Gas Metal Arc Welding
GTAW: processo de soldagem Gas Tungsten Arc Welding
H₂: gás hidrogênio
He: gás hélio
I: corrente de soldagem
LABSOLDA: Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina
MIG/MAG: processo de soldagem Metal Inert Gas/ Metal Activ Gas
Mn: elemento manganês
Mo: elemento molibdênio
Nb: elemento nióbio
Ni: elemento níquel
O₂: gás oxigênio
P: elemento fósforo
P_a: pressão do arco
P_h: pressão hidrostática
PAW: processo de soldagem Plasma Arc Welding
S: elemento enxofre
SAP: Sistema de Aquisição de Dados de soldagem
SAW: processo de soldagem Submerged Arc Welding
Si: elemento silício
t: tempo de soldagem
Ti: elemento titânio

TIG: processo de soldagem Tungstens Inert Gas

Th: elemento tório

U: tensão de soldagem

UFSC: Universidade Federal de Santa Catarina

v : velocidade de soldagem

V: elemento vanádio

V_s : velocidade de soldagem

W: elemento tungstênio

Q : entalpia de fusão do aço

η_a : eficiência do arco

η_m : eficiência de fusão

RESUMO

A busca por processos de soldagem a arco de elevada produtividade, que proporcionem maior velocidade de operação e menor custo é o caminho lógico que vem sendo seguido em todo o mundo. Apesar disso, observa-se que no Brasil o setor industrial é extremamente conservador. Nesse contexto, o presente trabalho trata de diferentes questões ligadas à análise da produtividade dos principais processos de soldagem a arco. Primeiramente, foi realizada uma análise da literatura no tocante ao significado de termos inerentes à eficiência de transferência de calor. Os índices denominados eficiência do arco e eficiência de fusão, muitas vezes, não são interpretados de maneira adequada. O principal problema relacionado à esse tipo de análise é que não existe um valor único dos coeficientes para cada processo, fato que nem sempre é considerado por muitos profissionais da área de soldagem. Para os processos com eletrodos não consumíveis, a eficiência térmica varia de forma acentuada conforme os parâmetros usados, podendo apresentar valores baixos, ou tão elevados quanto o processo MIG/MAG. Com relação ao TIG, que geralmente é considerado de baixa produtividade, foi realizado um estudo dos fatores que limitam a velocidade de soldagem do processo. A principal conclusão mostra que o desempenho do processo quando se busca elevada produção está ligado ao gás de proteção que está sendo usado, pois este influi de forma acentuada sobre a eficiência ao gerar fusão. A adição de pequenos percentuais de hidrogênio ao argônio proporciona aumento de rendimento do processo possibilitando a soldagem TIG em maiores velocidades. Usando esses fundamentos são apresentados desenvolvimentos de procedimentos de soldagem TIG autógeno com elevada velocidade de soldagem. Os exemplos mostram que os processos considerados tradicionalmente de baixa produtividade podem atingir níveis de desempenho idênticos aos considerados mais produtivos se aplicados de maneira mais bem estudada.

Palavras-chave: *Soldagem de elevada velocidade, TIG, MIG/MAG, produtividade, eficiência de fusão.*

ABSTRACT

The search for high productivity arc welding processes, providing higher travel speed and lower cost is the logical path that has been followed worldwide. Nevertheless, it is observed that the industrial sector in Brazil is extremely conservative. In this context, this work deals with different issues related to productivity analysis of the main arc welding processes. An analysis of the literature regarding the meaning of terms related to heat transfer efficiency was performed. Often, arc efficiency and melting efficiency index are not properly interpreted. The main problem with this type of analysis is that there is not a unique value for the coefficients for each process, a fact that is not considered by many professionals in the welding area. For processes with non-consumable electrodes, the thermal efficiency varies dramatically according to the used parameters, and may present really low values, or values as high as processes such as MIG/MAG. A study was conducted about the factors that limit the speed of TIG welding, which is generally considered a low productivity process. The main conclusion shows that the performance of this process aiming high production capacity is linked to the shielding gas that was used, because it dramatically affects the melting efficiency. The addition of small percentages of hydrogen to argon provides increased efficiency of the process allowing TIG welding at higher speeds. Using these fundamentals, this work presents developments for autogenous TIG welding procedures with high productivity. The examples show that the processes traditionally considered of low productivity can reach performance levels similar to those considered to be more productive if applied with a more refined technique.

Keywords: *High speed welding, TIG, MIG/MAG, productivity, melting efficiency.*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO.....	3
2.1. INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS BÁSICOS DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS.....	3
2.1.1. Eficiência do arco	3
2.1.2. Eficiência de fusão	4
2.2. DISCUSSÃO SOBRE OS ASPECTOS ENCONTRADOS NA LITERATURA SOBRE EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO.....	5
2.3. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO MIG/MAG.....	11
2.4. COMPARAÇÃO ENTRE MIG/MAG E TIG	14
2.5. FATORES INFLUENTES SOBRE A EFICIÊNCIA DE FUSÃO NO PROCESSO TIG.....	17
2.5.1. Ensaios para determinar a influência da distância eletrodo-peça na eficiência de fusão para o processo TIG .	17
2.5.2. Análise e discussão dos resultados da eficiência de fusão para o processo TIG	22
2.6. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO	27
3. LIMITAÇÕES DO PROCESSO TIG PARA SOLDAGEM DE ELEVADA PRODUTIVIDADE.....	29
3.1. MECANISMO DE FORMAÇÃO DE DEFEITOS	30
3.2. APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO NA SOLDAGEM TIG ..	47
3.2.1. Formação de poros devido à presença de hidrogênio.....	47
3.2.2. Formação de trincas induzidas por hidrogênio	49
3.2.3. Propriedades físicas de misturas gasosas que contenham hidrogênio.....	50
3.2.4. Influência da adição de hidrogênio no gás de proteção no comportamento do arco	51

3.2.5. Influência da adição de hidrogênio ao gás de proteção na geometria da poça de fusão	54
3.2.6. Influência da adição de Hidrogênio ao gás de proteção na eficiência de fusão para o processo TIG.....	56
4. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO TIG EM ALTA VELOCIDADE	57
4.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SOLDAGEM TIG COM DIFERENTES GASES.....	57
4.2. EXEMPLOS DE SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE	67
4.2.1. Soldagem de compressores herméticos para refrigeração	67
4.2.2. Soldagem de componentes da indústria automobilística	73
4.3. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....	76
5. CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS CITADAS.....	87
Anexo A: EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA.....	91
Anexo B: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS DO PRESENTE TRABALHO.	97

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Não há dúvida que os processos de soldagem a arco possuem papel significativo como etapa do processo produtivo de grande parte dos setores industriais. A busca por processos de maior produtividade, ou seja, maior capacidade de produção e menor custo é a principal motivação para o desenvolvimento científico e tecnológico que ocorre incessantemente. Considerando os processos de soldagem, centenas de trabalhos são publicados anualmente mostrando diferentes aspectos do estado da arte de determinado processo ou técnica. Considerando o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA), nos últimos anos também foram realizados muitos desenvolvimentos com os diferentes processos de soldagem a arco. Na maior parte desses trabalhos, o desenvolvimento estava totalmente ligado a casos reais da indústria brasileira, os quais buscavam soluções de aumento de produtividade.

Apesar das publicações brasileiras e internacionais possuírem uma quantidade apreciável de informações específicas para cada processo, quando se trata de proporcionar dados comparativos entre os diferentes processos, essas informações são escassas, ou feitas sob pontos de vista limitados a determinadas condições experimentais de laboratório. Dessa forma, as informações que são encontradas muitas vezes não possuem grande valor prático para o setor industrial, ou até em alguns casos podem fazer um desserviço, por não serem corretamente interpretadas pelos profissionais da área.

Tendo em vista essa falta de informação, o presente trabalho se propõe a esclarecer alguns pontos considerados importantes sobre a produtividade de diferentes processos de soldagem a arco por meio dos resultados práticos de desenvolvimentos realizados nos últimos anos dentro do LABSOLDA-UFSC, relacionando-os com as informações da literatura.

Dessa forma, esse trabalho não apresenta a estrutura clássica que normalmente é utilizada na maioria dos trabalhos acadêmicos, onde primeiramente e de maneira isolada é apresentada toda a revisão bibliográfica, seguido de materiais e métodos, resultados dos ensaios, e por fim conclusões. Essa estrutura é mais adequada para trabalhos que tratam de um tema específico e estanque. Ao invés disso foi utilizada uma estrutura onde os resultados experimentais e discussões estão dispostos em conjunto com as informações encontradas em outros trabalhos da literatura, tentando realizar assim uma análise crítica geral de todas as informações.

O trabalho está dividido em duas partes principais:

A primeira parte trata principalmente da eficiência do arco e eficiência de fusão dos diferentes processos, buscando mostrar a real significância prática dessas variáveis nos resultados das soldagens. Essas informações, algumas vezes, não são utilizadas da maneira mais adequada em alguns trabalhos, principalmente na área de metalurgia da soldagem, que consideram que cada processo apresenta o mesmo valor de eficiência (rendimento).

A segunda parte trata mais especificamente do processo TIG de elevada produtividade. Primeiramente, são mostrados os principais problemas que limitam a utilização do processo em elevada velocidade. Em seqüência são apresentados técnicas e desenvolvimentos para o aumento da mesma, incluindo a utilização de misturas gasosas de hidrogênio e argônio. Por fim, estão mostrados os principais pontos do desenvolvimento da soldagem de componentes industriais utilizando o processo TIG autógeno, de maneira vantajosa ao processo MIG/MAG que tradicionalmente é o processo aplicado.

Dessa forma, o presente trabalho pretende expor alguns pontos fundamentais para o debate da produtividade dos principais processos de soldagem a arco, considerando principalmente os aspectos do ponto de vista prático.

2. EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO

2.1. INTRODUÇÃO AOS CONCEITOS BÁSICOS DE EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS

Antes de começar qualquer discussão de resultados de eficiência dos diferentes processos, é importante definir claramente o significado dos termos relativos à eficiência térmica que serão usados ao longo do texto, pois existe variação na denominação adotada por cada autor. Os dois principais termos que serão usados para análise de eficiência térmica dos processos de soldagem são: Eficiência do Arco (que muitas vezes também é conhecido como Rendimento Térmico) e Eficiência de Fusão.

2.1.1. Eficiência do arco

O valor da eficiência do arco, representado pelo símbolo η_a pode ser obtido pela Equação 1:

$$\eta_a = \frac{E_{cal}}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n} t} \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

E_{cal} , a quantidade de energia obtida da medição com um calorímetro;

$\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}$, a média da potência elétrica calculada por meio do produto da corrente e da tensão do arco nos diferentes instantes;

t , o tempo de soldagem.

O resultado da medição com calorímetro representa a soma de toda a energia que foi transferida para a peça, incluindo a energia térmica que foi usada para produzir a área fundida, bem como a energia que não resultou em fusão e foi transferida por condução térmica e convecção ao longo do corpo de prova.

Quanto menor o valor de η_a , maior é a perda energética total do processo, sendo que as principais fontes de perda são evaporação de material metálico, radiação luminosa, condução e convecção para o ambiente e partes da tocha de soldagem.

2.1.2. Eficiência de fusão

O valor da eficiência de fusão, representado pelo símbolo η_m , pode ser obtido com a Equação 2:

$$\eta_m = \frac{QA_m v}{\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

Q , a entalpia de fusão, em J/mm³ (Quantidade de energia requerida para elevar a temperatura do metal sólido até a temperatura de fusão e para converter esse volume do estado sólido para o estado líquido);

A_m , a área fundida medida na seção transversal em mm²;

v , a velocidade de soldagem em mm/s;

$\frac{\sum_{i=1}^n I_i \times U_i}{n}$, a média da potência elétrica calculada por meio do produto da corrente e da tensão do arco nos diferentes instantes.

No presente trabalho foram realizados cálculos de η_m com os dados de diferentes situações de cordões soldados. Em todos os casos, a entalpia de fusão do aço carbono foi considerada 10,5 J/mm³, valor retirado da referência [1].

É possível encontrar nos trabalhos científicos e publicações equações aparentemente diferentes para calcular o valor da η_m , sendo que cada autor usa diferentes denominações, mas o significado prático na maioria das vezes é o mesmo. A principal diferença encontrada é que alguns autores incluem o η_a (valor da eficiência do arco) no cálculo da η_m . Como foi mostrado na Equação 2, o presente trabalho usará método de cálculo da eficiência de fusão, o qual não considera o valor de η_a . Para os processos que utilizam material de adição, existem ainda casos onde os autores calculam a eficiência de fusão de maneira separada para o eletrodo e para a peça, sendo o valor de η_m calculado usando as respectivas áreas.

Tão importante quanto o valor obtido no cálculo do valor de η_m , é a correta interpretação do resultado obtido. É importante ressaltar que esse valor pode variar consideravelmente para o mesmo processo de soldagem, simplesmente com a variação de parâmetros como velocidade de soldagem, espessura da chapa e gás do arco.

2.2. DISCUSSÃO SOBRE OS ASPECTOS ENCONTRADOS NA LITERATURA SOBRE EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO

Analisando as publicações e trabalhos científicos da área de soldagem, é possível afirmar que existe muito material didático e técnico sobre cada processo de soldagem de maneira isolada. Porém, quando se trata de comparações entre os diferentes processos (e também variantes tecnológicas de cada processo), esse material é superficial e extremamente acadêmico. Ou seja, do ponto de vista prático, esse tipo de material não contribui efetivamente para o setor industrial. Nota-se também que grande parte das publicações, como livros, artigos científicos, dissertações e teses, transcrevem sempre as mesmas informações que são mostradas na literatura sobre esse assunto. O *Welding Handbook* da AWS [1], talvez seja o melhor exemplo de referência bibliográfica tradicional, e, provavelmente o livro-texto de soldagem mais consultado no mundo, o qual é usado como referência para integrar o conteúdo dos livros e apostilas que são usados no Brasil para formação dos técnicos e engenheiros. Apesar disso, o livro citado não apresenta uma seção que forneça comparações entre os processos TIG, MIG/MAG e Plasma com relação à produtividade e respectivas capacidades de aplicação. A única comparação que o livro da AWS faz sobre esses processos diz respeito a eficiência do arco dos processos, mostrando os resultados da Figura 1, os quais foram retirados do trabalho de DuPont e Marder [2].

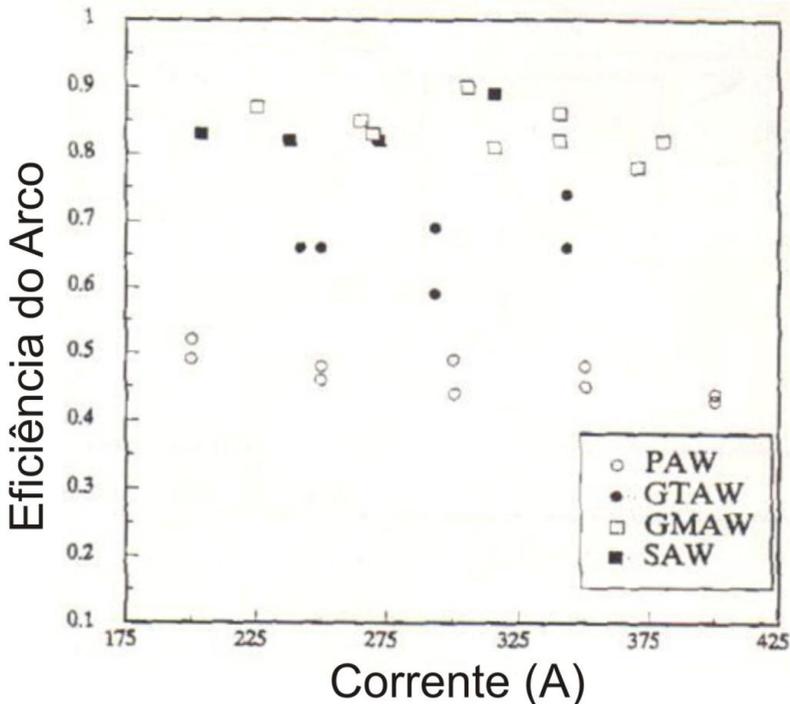


Figura 1- Gráfico da eficiência do arco segundo DuPont e Marder [2], publicado também no Welding Handbook da AWS [1]

Com base nesses resultados, os autores afirmam que cada processo apresenta valores de η_a sem variação significativa dos valores, independente da corrente de soldagem. O processo PAW apresentou o menor valor $0,47 \pm 0,03$, o processo TIG apresentou $0,67 \pm 0,05$ e os processos MIG/MAG e SAW apresentaram cerca de $0,84 \pm 0,04$. É possível notar que os processos com eletrodo consumível apresentaram eficiência maior do que os processos com eletrodos não consumíveis. A justificativa dada por DuPont e Marder [2] para a diferença nos valores de η_a seria que nos processos MIG/MAG e SAW o calor gerado pelo aquecimento resistivo do arame eletrodo é transferido para a peça, enquanto nos processos TIG e Plasma essa energia é perdida para o eletrodo e tocha de soldagem. Para apoiar essa afirmação, os autores mostram cálculos com equações teóricas nas quais o aquecimento resistivo do arame eletrodo representa cerca de 14-18% da potência total da soldagem nos processos MIG/MAG e SAW, e destacam que esse

percentual calculado é equivalente à diferença entre os valores de η_a dos processos MIG/MAG e TIG que foram obtidos nas medições com resultados mostradas na figura 1. O pior desempenho do PAW em relação ao TIG seria devido ao fato de que, além da perda com o eletrodo, parte da energia é também transferida para o bocal de restrição ao invés de ir para a peça.

Segundo DuPont e Marder [2], a eficiência de fusão está ligada diretamente à eficiência do arco, de modo que um valor baixo de η_a seria o fator limitante para o valor de η_m por dois motivos. Primeiramente, quando a eficiência do arco é baixa, a energia não pode ser transferida ao substrato com taxas elevadas, e isso dificulta a obtenção de elevada η_m . Em segundo lugar, a baixa eficiência do arco também afeta a eficiência de fusão devido à limitação da máxima velocidade de soldagem que pode ser obtida. A realização de soldagens em elevadas velocidades (da ordem de 1 m/min, por exemplo) requer um arco com grande capacidade de transferir calor para a peça, para compensar a diminuição do tempo disponível para a energia se transferir da fonte calorífica para o substrato. O valor da η_m para cada processo tende a ser maior com aumento da velocidade de soldagem, acompanhada também pelo aumento da capacidade de fusão devido ao aumento da corrente. Se a capacidade de fusão é limitada pela baixa eficiência de arco, então a velocidade máxima também será limitada, e sem possibilidade de obter velocidades mais elevadas, resulta em redução ainda maior na eficiência de fusão. Ou seja, segundo esses autores, a velocidade de soldagem do processo se torna limitada devido a baixa eficiência do arco. Com base nessas afirmações, e considerando também que cada processo supostamente possui uma faixa de valores de η_a bem definida, DuPont e Marder [2] classificam os processos TIG e Plasma como processos de soldagem obrigatoriamente lentos, conforme está mostrado no gráfico da Figura 2.

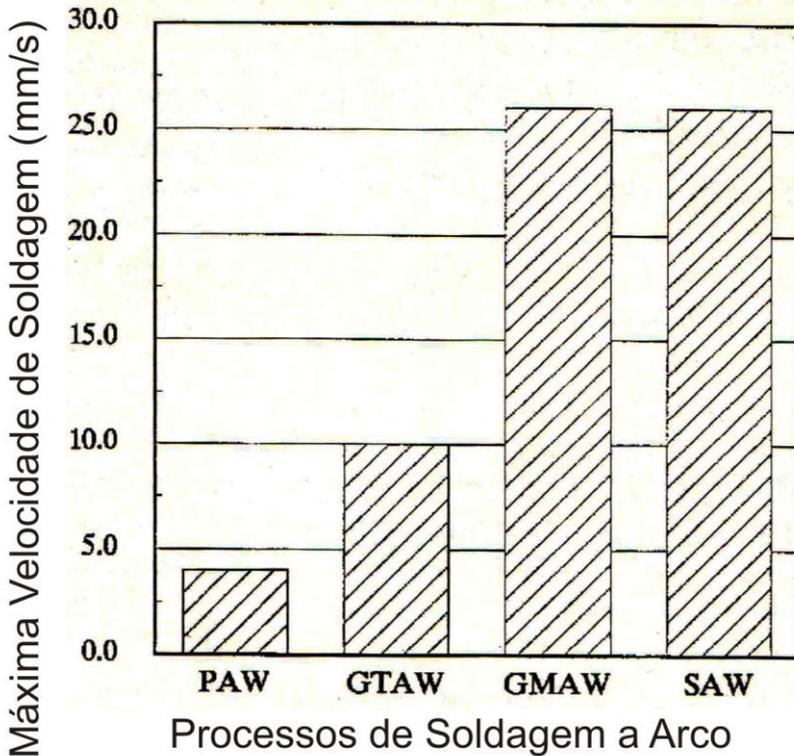


Figura 2 - Velocidade de soldagem máxima dos processos de soldagem a arco, segundo DuPont e Marder [2]

De maneira geral, os resultados e conclusões de DuPont e Marder, que também estão mostrados no Welding Handbook da AWS, estão bastante difundidos nos livros e apostilas usadas no ensino de processos de soldagem no Brasil, assim como nos trabalhos acadêmicos. O presente trabalho expressa críticas para alguns pontos principais que são informações amplamente propagadas, como por exemplo as concepções de que: Cada processo de soldagem possui valores de eficiência do arco bem definidos; A diferença entre os valores do rendimento do arco de processos como MIG/MAG e TIG é decorrente simplesmente da energia perdida por aquecimento do eletrodo não consumível; Os processos possuem faixas de valores de velocidade de soldagem, sendo que o TIG e Plasma apresentam obrigatoriamente pior desempenho.

Logicamente, não se coloca dúvida sobre os resultados das medições de DuPont e Marder [2]. O problema está na interpretação dos resultados, principalmente com relação aos processos com eletrodo não consumível. Ao longo dos próximos itens, são mostradas comprovações de que a eficiência do arco varia de maneira acentuada nos processos TIG e Plasma e também pode variar para os processos MIG/MAG ou SAW. Ou seja, não existem faixas fixas e definidas. O trabalho de DuPont e Marder [2] e o livro da AWS [1] (e por consequência todo o material técnico e didático que é elaborado com base nessas referências) não mencionam as variações e diferenças entre os processos e acaba induzindo o leitor a conclusões erradas.

Um dos fatores que afeta decisivamente nos valores de η_a e η_m para o processo TIG é a distância eletrodo-peça (DEP). Essa influência fica clara analisando os resultados de diferentes trabalhos científicos, que estão citados e comentados na sequência deste texto, assim como os ensaios que foram realizados especialmente para avaliar essa questão e estão mostrados no item 2.5.1.

No caso dos experimentos de DuPont e Marder [2], os autores usaram distância eletrodo-peça de 6 mm e Argônio puro no gás de proteção em todos os testes para o processo TIG, ou seja, uma condição onde o processo TIG não apresenta o melhor desempenho. No trabalho de Fuerschbach e Knorovsky [3], foram realizadas medições da eficiência do arco para o processo TIG e Plasma e os resultados estão mostrados na Figura 3. Esses ensaios no caso do TIG foram realizados com DEP de 1,0 mm e Argônio puro no gás de proteção. Comparando-se os resultados de eficiência do arco obtidos pelos diferentes autores, os resultados de Fuerschbach e Knorovsky [3] mostram valores muito mais elevados do que DuPont e Marder [2], sendo o valor de η_a aproximadamente 0,8 para o TIG e aproximadamente 0,6 para o Plasma. Outro exemplo de resultados de eficiência de arco para o processo TIG pode ser encontrado no trabalho de Collings et al [4], o qual relata valores medidos de η_a entre 0,77-0,90 para o processo TIG com testes tipo cordão em chapa usando elevadas velocidades, na faixa entre 100-400 mm/s. No trabalho de Kusch et al [5] os autores encontraram η_a de 0,76 para o processo TIG usando Argônio e DEP de 4 mm e η_a 0,75 para o processo Plasma. No trabalho de Tusek [6], o autor realizou uma pesquisa bibliográfica da eficiência do processo TIG segundo dados de vários autores, cujos dados estão mostrados no gráfico da Figura 4, onde é possível notar grande dispersão dos valores, que variam de 0,35 até 0,9.

Dessa forma fica evidente que para os processos com eletrodo não consumível não existe um valor de eficiência do arco determinado para cada processo. Ou seja, o desempenho do processo depende essencialmente das variáveis do processo e dos parâmetros de soldagem utilizados. Para o processo Plasma, seria aceitável esperar variações dos valores de η_a ainda maiores do que o processo TIG, já que existem outros fatores, como a própria concepção da tocha de soldagem combinada com vazão do gás de plasma que certamente podem influenciar nos resultados.

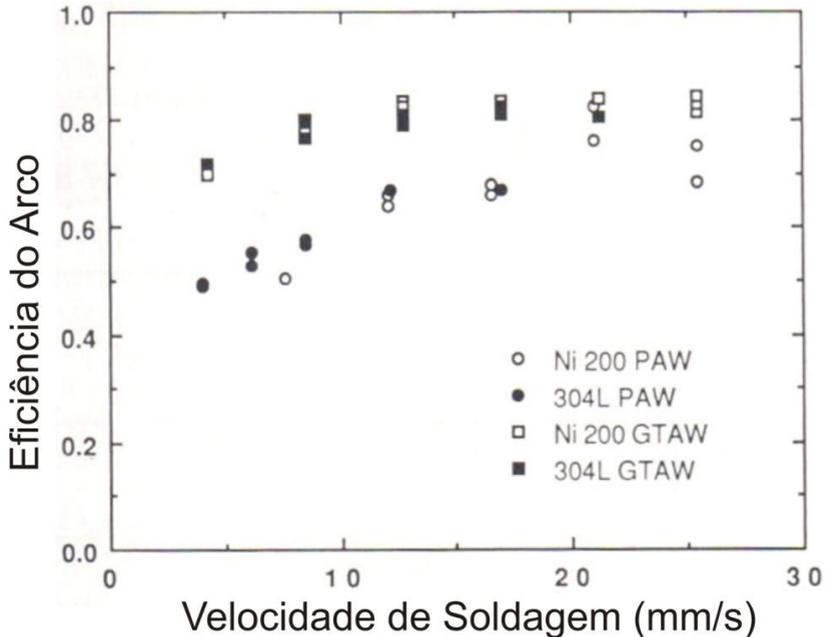


Figura 3 – Variação da eficiência do arco de acordo com o material e velocidade de soldagem para os processos Plasma e TIG [3]

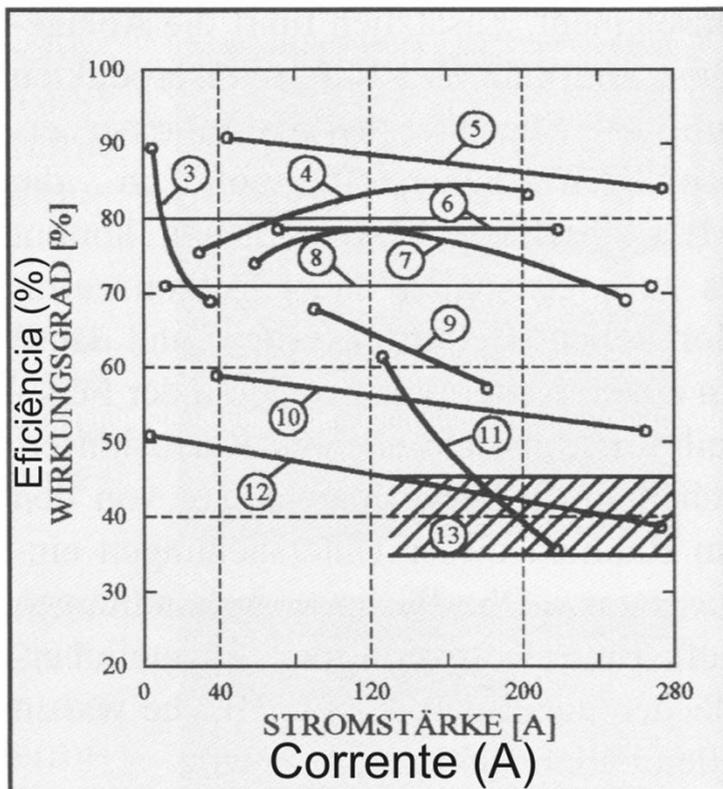


Figura 4 – Eficiência da soldagem TIG em função da corrente (resultados compilados de vários autores) [6]

2.3. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO MIG/MAG

Essa seção do texto pretende mostrar uma análise dos dados da eficiência do arco e eficiência de fusão para o processo MIG/MAG, possibilitando também comparação com os processos que utilizam eletrodo não consumível.

Primeiramente, quando se considera a eficiência do arco, os dados de DuPont e Marder [2] apresentaram valor médio de 0,84, sendo que os valores experimentais variaram entre 0,8 - 0,9, na faixa entre 225-375 A, a princípio sem apresentar uma tendência definida, de maneira que não era possível associar a variação nos valores de η_a com

a variação dos parâmetros. Porém, em estudos mais recentes e criteriosos, Kusch et al [5] mostram que a eficiência do arco apresenta variação de acordo com o modo de transferência. A Figura 5 mostra os resultados dos autores, onde se pode observar que os maiores valores de η_a ocorrem para a transferência por curto-circuito com média de 0,85, e para a transferência por spray a eficiência do arco diminui consideravelmente apresentando média de 0,69. Para o MIG/MAG pulsado, o valor de η_a foi de 0,77, de maneira intermediária entre o curto-circuito e o spray. Os autores sugerem que o maior valor de eficiência do arco no modo curto-circuito em relação ao spray poderia ser explicado principalmente por dois motivos: No modo curto-circuito onde o arco é mais curto, as perdas por radiação são proporcionalmente menores do que no spray onde o arco ocupa uma área maior. Além disso, no curto-circuito, devido ao maior *stickout* ocorre proporcionalmente maior aquecimento ao longo do arme-eletrodo por efeito joule, de modo que esse calor gerado também é transferido para a peça. É possível afirmar também que o aumento no comprimento do arco causa um considerável incremento no valor da tensão, aumentando também o valor da potência. Porém, esse aumento da potência não resulta efetivamente em aumento da quantidade de material fundido, fazendo com que a eficiência calculada para o processo diminua. Ou seja, a maior tensão necessária para alimentar a coluna do arco representa somente energia que foi perdida.

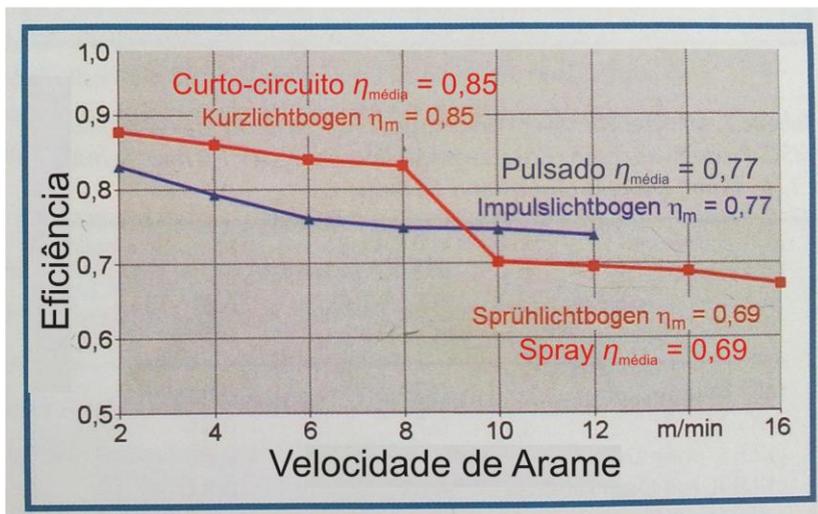


Figura 5 – Eficiência do arco para o processo MIG/MAG para diferentes modos de transferência (Arame de aço carbono 1,2 mm de diâmetro) [5]

Partindo para análise da eficiência de fusão do processo MIG/MAG, os resultados de Dupont e Marder [2] mostram que na maior parte dos casos η_m ficou entre 0,4 e 0,5, sendo que os ensaios foram realizados com argônio puro como gás de proteção e correntes de soldagem entre 230-400 A. Tusek [6] realizou ensaios usando corrente de 400 A, para mistura Argônio-CO₂ no gás de proteção, obtendo η_m de aproximadamente 0,45 e quando usando Hélio puro, cerca de 0,48. No trabalho de Tusek e Suban [7], os autores realizaram ensaios e calcularam o valor de η_m para o processo MIG/MAG usando misturas Argônio-Hidrogênio no gás de proteção com percentual de hidrogênio variando entre 0 e 20% e três níveis diferentes de correntes. Os resultados mostraram pouca variação na quantidade de metal fundido e na eficiência de fusão para a situação com 250 A, por exemplo. Mudando de Ar puro para a mistura Ar+20%H₂, a variação foi respectivamente de 8 para 9 kg/h e η_m de 0,35 para 0,5. Em experimentos conduzidos no LABSOLDA-UFSC, que estão registrados no trabalho de Schwedersky [8], foram realizados ensaios de soldagem com corrente de 250 A, velocidade de soldagem 5 mm/s e misturas Ar+2%O₂, Ar+8%CO₂ e Ar+18%CO₂, sendo que a eficiência de fusão medida ficou entre 0,34-0,36 para os ensaios com eletrodo no positivo e,

para os ensaios com eletrodo no negativo, a eficiência de fusão ficou entre 0,33-0,37.

Os resultados de eficiência de fusão citados no parágrafo anterior são exemplos de condições de soldagem muito diferentes dentro do processo MIG/MAG convencional que certamente proporcionaram para cada situação grande variação no aspecto e formato de cordão, no modo de transferência, estabilidade do arco, taxa de alimentação em relação a corrente, etc. Mesmo com essa variação extrema, a eficiência de fusão do processo praticamente não apresentou grande variação, sendo que os valores de η_m ficaram sempre entre 0,3 e 0,5. Com esses resultados, fica claro que para o processo MIG/MAG a capacidade total de gerar fusão é praticamente constante e não depende essencialmente das características do arco.

Essa afirmação parece inaceitável a primeira vista, sendo lógico que no processo de soldagem a arco, seja o arco o elemento fundamental que proporciona praticamente toda a fusão de metal que ocorre. Porém, considera-se que no processo MIG/MAG boa parte da energia térmica transferida para peça é transportada pelas gotas do metal de adição que é fundido. E esse assunto vem sendo abordado por diversos trabalhos ao longo das últimas décadas. Essers e Walter [9] mostram estimativas que a quantidade de energia térmica contida nas gotas de material de adição teoricamente já seria suficiente para suprir cerca de 99% da energia necessária para causar a fusão do material de base que ocorre normalmente em um cordão soldado. Outros trabalhos citam valores diferentes para a parcela de contribuição das gotas. Não é objetivo se aprofundar nessa discussão, mas fica claro que parcela significativa da energia é transportada pelas gotas. Dessa forma, o que se pretende evidenciar é que no processo MIG/MAG (contrariamente aos processos TIG e Plasma) a maior parte da fusão causada na peça é proporcionada pelas gotas de material fundido e o papel fundamental do arco é fundir o material de adição que é constantemente alimentado. Por isso, em qualquer condição de utilização estável, o processo MIG/MAG aparentemente irá apresentar valores de eficiência de fusão bastante elevados, na faixa de 0,3-0,5.

2.4. COMPARAÇÃO ENTRE MIG/MAG E TIG

Ao longo do texto está mostrado que a literatura tradicional tende a considerar os processos TIG e Plasma como de baixo rendimento térmico e baixa produtividade, com desempenho muito inferior ao MIG/MAG e SAW. Porém, já foi possível mostrar que essa

classificação muitas vezes é baseada na má interpretação de alguns resultados obtidos em condições específicas, de maneira que os processos com eletrodo não consumível acabam sendo mostrados de maneira pior do que realmente são. Outra questão que merece atenção é que as comparações entre os processos geralmente são realizadas com base na mesma corrente média, sendo que essa metodologia não é obrigatoriamente a mais adequada para todos os casos. Para alimentar essa discussão, na Figura 6 estão mostrados as imagens dos cordões de solda com processo MIG/MAG e TIG e também as informações referentes ao procedimento realizado, como corrente e tensão médias, potência calculada, resultados de medições da área fundida, profundidade de penetração e eficiência de fusão. Esses exemplos foram retirados dos experimentos realizados no LABSOLDA. Estão mostrados os dados de um cordão obtido com o processo MIG/MAG usando arame de aço ER70-S6 de 1,2 mm de espessura e corrente de 250 A. Para o processo TIG estão mostrados um cordão realizado com 250 A e argônio puro no gás de proteção e mais três cordões soldados com 200, 300 e 400 A usando a mistura Ar+10% H_2 . Nas macrografias desse quadro, a região fundida foi ressaltada para facilitar a visualização do tamanho e formato do cordão. Todas as soldas foram realizadas em chapas de aço de 3/8" de espessura e com velocidade de soldagem de 300 mm/min.

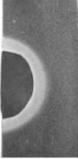
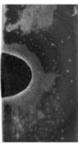
					
Tipo de soldagem	MIG Ar+2%O2 Vs: 5 mm/s	TIG Ar DEP 1mm Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H2 Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H2 Vs: 5 mm/s	TIG Ar+10%H2 Vs: 5 mm/s
Corrente de soldagem	250 A	250 A	400 A	300 A	200 A
Tensão média do arco	30 V	10,2 V	19,2 V	16,5 V	14,8 V
Potência média calculada	7500 W	2550 W	7680 W	4950 W	2960 W
Eficiência de fusão total	0,31	0,17	0,27	0,28	0,25
Área fundida total	45 mm ²	8 mm ²	40 mm ²	26 mm ²	14 mm ²
Área fundida Material de Adição	26 mm ²	-	-	-	-
Área fundida peça	19 mm ²	8 mm ²	40 mm ²	26 mm ²	14 mm ²
Penetração	4,0 mm	2,0 mm	4,3 mm	3,7 mm	3,4 mm

Figura 6 - Comparação didática do perfil de penetração de diferentes processos de soldagem

A primeira consideração que pode ser feita é relativa à comparação para a mesma corrente média do desempenho do processo

MIG/MAG e do processo TIG convencional, que é o utilizado com argônio puro no gás de proteção. Nessa situação é possível verificar que no MIG/MAG a quantidade total de metal fundido é cerca de 5 vezes maior e a profundidade da penetração obtida é o dobro do que o processo TIG convencional. Apesar da corrente média para esse primeiro caso ser a mesma, a potência total calculada para o processo TIG é de apenas aproximadamente um terço da potência calculada para o processo MIG/MAG.

Se for considerado agora uma comparação dos dois processos com a mesma potência média, usando como exemplo o processo TIG com a mistura Ar+10%H₂ e 400 A, é possível notar que a comparação fica bem mais justa. Nesse caso, a quantidade total de metal fundido e profundidade de penetração obtida para os dois processos são semelhantes. Dessa forma, em situações onde a soldagem pode ser realizada de maneira autógena, o processo TIG soldando com corrente mais elevada também teria condições de produzir resultado semelhante ao MIG/MAG em termos de produtividade. Além disso, nessas situações, o TIG apresentaria vantagem pelo fato de não necessitar de material de adição. Com base nos valores da área fundida dos ensaios com 200 e com 300 A, pode-se afirmar a quantidade de metal de base fundido considerando uma mesma corrente média de 250 A do processo TIG usando a mistura Ar+10%H₂ seria equivalente à quantidade de metal de base fundido pelo processo MIG/MAG com 250 A.

2.5. FATORES INFLUENTES SOBRE A EFICIÊNCIA DE FUSÃO NO PROCESSO TIG

Com o objetivo de melhorar o entendimento do processo, e fornecer explicação para a variação dos resultados encontrados, foram realizados ensaios de soldagem, avaliando a influência da distância eletrodo-peça (DEP) na eficiência de fusão para o processo TIG. Apesar de se tratar de ensaios relativamente simples, nos trabalhos científicos pesquisados não foram encontrados resultados que mostrassem esse tipo de informação.

2.5.1. Ensaios para determinar a influência da distância eletrodo-peça na eficiência de fusão para o processo TIG

Foram realizados ensaios de cordão sobre chapa variando progressivamente a distância eletrodo-peça entre 1 e 5 mm e, adicionalmente 10 mm. Todos os ensaios foram realizados na forma de

cordão sobre chapa com o eletrodo no negativo e corrente constante de 250 A. As chapas foram de aço carbono de 9,5 mm de espessura, com velocidade de arco de 5 mm/s, gás de proteção argônio, eletrodo EWTh-2 3,2 mm, afiação 90° e ângulo da tocha em relação à peça em 90°. Durante os ensaios, foram realizadas aquisições dos sinais de corrente e tensão. Após, os corpos de prova foram cortados para se retirar duas seções transversais diferentes. As amostras foram preparadas metalograficamente e a área fundida da secção transversal foi medida para calcular a quantidade de metal fundido. As informações detalhadas relativas aos materiais, métodos e equipamentos usados nessa seqüência de ensaios estão disponíveis no Anexo A.

A Figura 7 mostra o aspecto da superfície resultante para cada condição. Para as distâncias eletrodo-peça entre 1 e 5 mm, o cordão ficou contínuo, mas na situação de distância 10 mm ocorreu a formação de *humping* ao longo de todo o cordão.

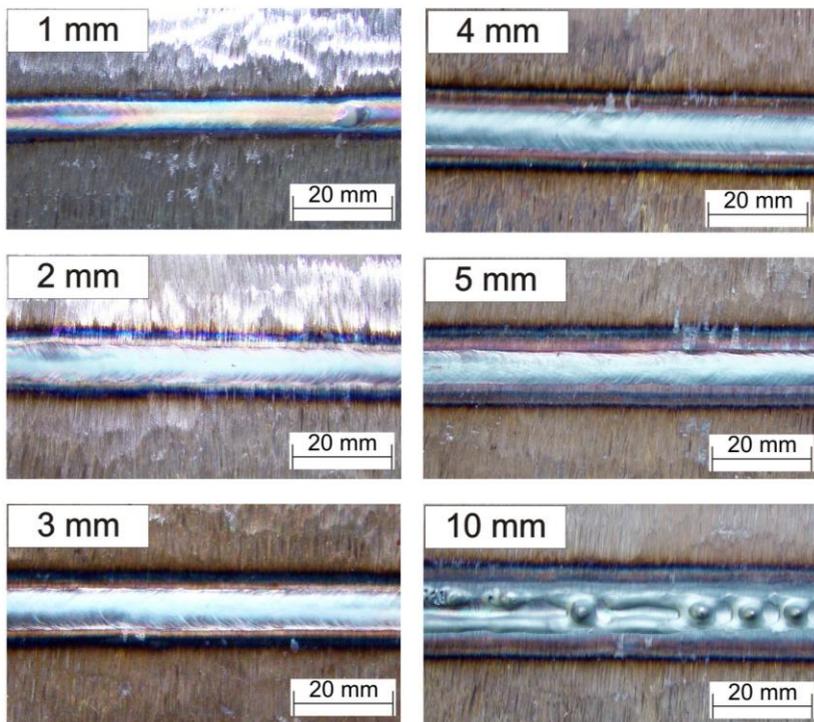


Figura 7 – Aspecto superficial dos cordões soldados com o processo TIG em diferentes distâncias eletrodo-peça (Corrente de soldagem 250 A; gás de proteção argônio; Vs: 5 mm/s)

A Figura 8 mostra as duas seções transversais para cada cordão. Pode-se observar que a situação de soldagem com 1 mm de DEP apresentou maior relação penetração/largura do cordão, e essa relação foi diminuindo com o aumento da distância eletrodo-peça. Para a condição de DEP 10 mm, o fato de ter ocorrido *Humping* no cordão de solda faz com que o valor da medição da área fundida apresente variação de acordo com o local que a amostra foi cortada, ou seja, o valor obtido na medição da área fundida, e conseqüentemente o valor de η_m obtidos para essa condição não são quantitativamente adequados.

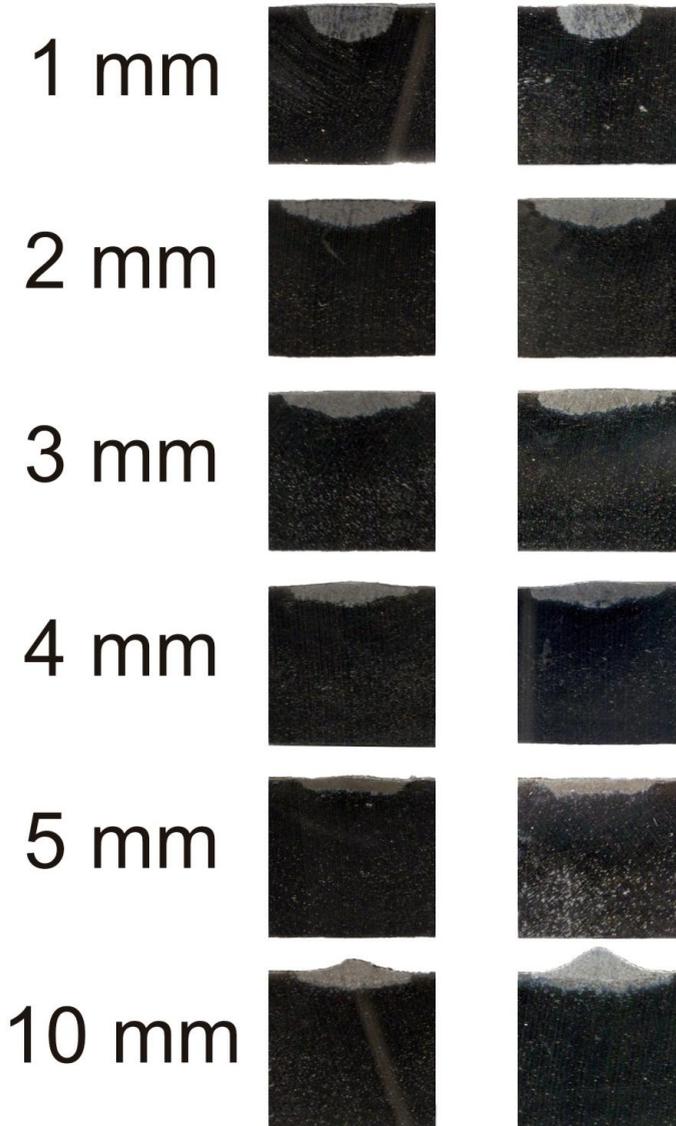


Figura 8 – Macro-seções mostrando a influência da distância eletrodo peça na penetração do cordão de solda utilizando o processo TIG (I: 250 A. gás de proteção: argônio puro). As imagens estão na mesma escala, sendo que a espessura da chapa é de 3/8" (9,6 mm)

Os gráficos das Figura 9, 10 e 11 mostram, respectivamente para cada condição de DEP, o resultado da potência e tensão média medida durante a soldagem, a quantidade de material fundido calculado com base na área fundida medida nas macro-seções e a eficiência de fusão calculada (η_m).

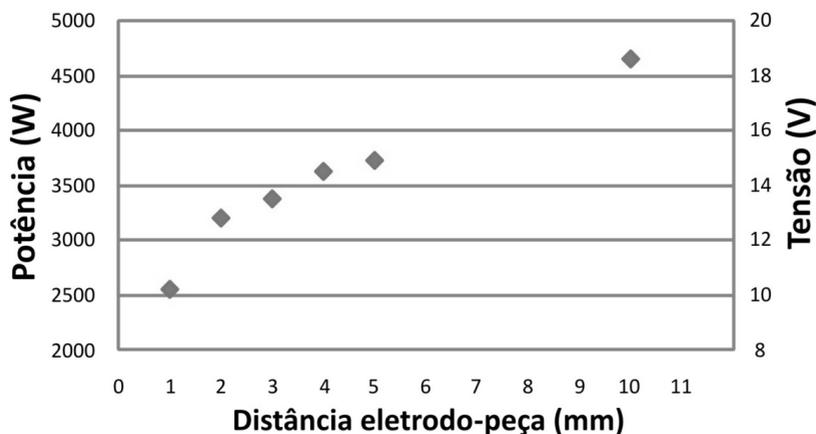


Figura 9 - Variação da tensão para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça

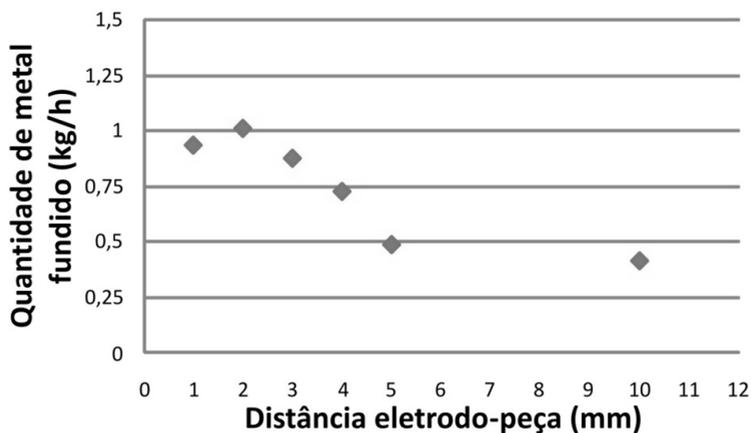


Figura 10 - Quantidade de metal fundido para o processo TIG em função da distância eletrodo-peça

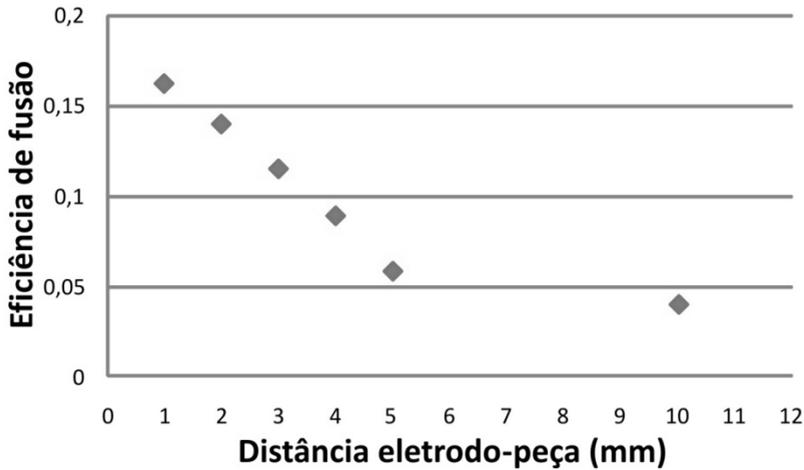


Figura 11 - Eficiência de fusão em função da distância eletrodo-peça

2.5.2. Análise e discussão dos resultados da eficiência de fusão para o processo TIG

Os resultados dos ensaios mostraram que com o aumento da DEP logicamente ocorreu o aumento da tensão do arco e da potência elétrica consumida para cada condição, conforme mostrado na Figura 9. A DEP de 2 mm apresentou quantidade de material fundido levemente superior em comparação com a DEP de 1 mm. Para as DEP maiores que 2 mm ocorreu forte diminuição da quantidade de metal fundido medido. Considerando a eficiência de fusão, o valor calculado diminuiu de forma pronunciada com o aumento da distância eletrodo-peça. Ocorreu diminuição de cerca de 200% do valor de η_m se comparado com a condição de DEP de 1 e 5 mm.

Para explicar os resultados desses ensaios é possível usar conclusões de outros trabalhos científicos conhecidos: Tsai e Eagar [10] mostram que a distância eletrodo-peça é o principal parâmetro que determina a distribuição do fluxo de calor na superfície do ânodo considerando a mesma intensidade de corrente. Esses autores realizaram medições e calcularam a distribuição e intensidade do fluxo de calor com o processo TIG em ânodo de cobre e seus resultados mostram que o aumento da distância eletrodo-peça causa aumento da área onde o calor estaria distribuído, mas também causa forte diminuição da taxa de transferência de calor. A Figura 12 mostra os dados dos autores, onde se

pode notar que a intensidade medida do calor diminui cerca de 3 vezes quando a distância eletrodo-peça aumenta de 2 para 9 mm. Essas informações vão ao encontro dos resultados dos ensaios realizados no presente trabalho, analisando o perfil de penetração mostrado na Figura 8, fica clara a tendência de aumento da largura do cordão com o aumento da DEP, principalmente considerando o resultado da soldagem com distância de 1 mm, que apresentou perfil com menor largura e maior penetração. As medições mostraram que a quantidade de metal fundido diminuiu com o aumento da DEP, ou seja, a capacidade do processo em gerar fusão na chapa para a mesma corrente média foi diminuída apesar da potência média do processo ter aumentado. A exceção foi o resultado com a distância de 1 mm que apresentou área fundida um pouco menor do que a área para 2 mm. Uma explicação proposta para esse fato seria que para a distância de 1 mm, a área de atuação do arco ficou muito pequena, diminuindo a capacidade de absorção de calor para essa situação, resultando na menor capacidade de gerar fusão, ou seja, o arco aqueceu preferencialmente a poça que funcionou como isolante, diminuindo a eficiência de fusão de mais material.

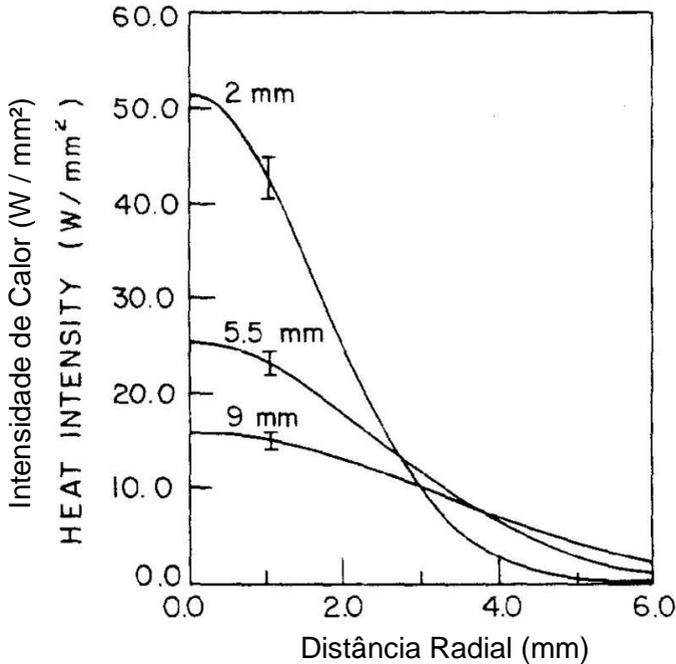


Figura 12 – Distribuição do fluxo de calor para 100 A com diferentes distâncias eletrodo-peça [10]

Se for considerado a potência média para cada condição nos ensaios realizados, cujos resultados estão mostrados na Figura 9, pode-se concluir que a potência elétrica consumida não possui obrigatoriamente correlação com a capacidade de produzir fusão no caso do processo TIG. Existe uma tendência por grande parte dos pesquisadores e profissionais da área de soldagem em considerar que a potência elétrica calculada possui correspondência direta com a quantidade de calor transferido para peça e quantidade de material fundido. Muitos trabalhos de metalurgia da soldagem usam a potência elétrica calculada, e um coeficiente de rendimento extraído de outros trabalhos, para calcular a “energia imposta” e fazer comparações relativas a transformações metalúrgicas, como se não existissem variações de acordo com a condição que o processo é utilizado. Os resultados aqui apresentados mostram que a eficiência de fusão do processo varia de maneira considerável com a variação dos parâmetros de soldagem. Ou seja, existem grandes chances de se cometer erros se essa variação não for corretamente considerada.

Pode-se afirmar que no processo Plasma a potência elétrica calculada possui correlação ainda menor com a capacidade de produzir fusão na peça, já que o processo possui um número maior de variáveis que modificam a tensão do arco e também a capacidade de fusão, em comparação com o processo TIG.

Existem alguns motivos, ou melhor, fatos mal explicados, mas que são bastante difundidos, para justificar que boa parte dos profissionais erre ao considerar que a potência esteja obrigatoriamente associada com a quantidade de calor transferida, ou quantidade de metal fundido. Estão aqui citados três deles:

-Comparação entre argônio e hélio: Esses dois gases inertes são os mais utilizados para comparações quando se trata de soldagem TIG. Em comparações com a mesma corrente média, o arco com He acaba fundindo uma quantidade de material muito maior do que o com o Ar. Ao mesmo tempo o arco com He também apresenta maior tensão de arco, resultando em maior potência elétrica consumida. Dessa forma, os profissionais e pesquisadores fazem uma associação incorreta que a maior potência do arco causou maior aquecimento da peça, como se o arco elétrico fosse uma resistência de aquecedor. No Item 3.3 estão mostradas comparações com o processo TIG usando Ar e He, e também estão propostas justificativas para o desempenho diferente com cada gás.

-Comparação entre MIG/MAG e TIG: Conforme foi mostrado no item 2.3, o processo MIG/MAG sofre menor variação nos valores de eficiência de fusão e, de forma diferente do que no processo TIG, de modo que a associação entre a potência e quantidade de metal fundido quando realizada apresenta alguma correspondência (considerando o processo MIG/MAG convencional). Como a associação funciona de maneira superficialmente aceitável em boa parte da faixa operacional do MIG/MAG, acaba sendo também erroneamente generalizada para o TIG.

-Tendência natural de aumento de corrente e aumento de potência: Com o aumento da corrente de soldagem no processo TIG, com as mesmas condições (gás de proteção, DEP, material do ânodo, afiação do eletrodo, etc) ocorre também o aumento da tensão do arco (considerando é claro correntes de soldagem maiores do que o ponto de transição, que no caso da soldagem com Argônio é cerca de 60 A). Um cordão TIG realizado com 200 A, resulta em tensão de arco de 12 V e uma potência elétrica medida de 2400 W. Nas mesmas condições, o cordão realizado com 300 A apresenta 14 V e 4200 W. O cordão feito com 300 A funde quase o dobro da quantidade de metal de base e

também usou aproximadamente o dobro da potência elétrica. Dessa forma, existe uma tendência natural de associar a potência com a capacidade de fusão. Em várias situações a associação até funciona, mas fisicamente não está correto, mais uma vez não foi a potência que causou a fusão, o arco não é um aquecedor da chapa por resistência.

Nos processos com eletrodo não consumível, a corrente de soldagem é o principal fator que modifica as características do plasma (temperatura, distribuição de temperatura, viscosidade, velocidade das partículas, etc.) e determina a capacidade de produzir fusão. Porém, parâmetros como a DEP também possuem papel fundamental, pois, como foi mostrado nos ensaios, variações na distância eletrodo-peça podem causar variação de 100% na quantidade de material fundido para a mesma corrente. O gás utilizado também possui papel fundamental no processo TIG, sendo que a mudança de um gás para outro é capaz de dobrar a quantidade de material fundido considerando a mesma corrente média. Isso será mostrado de maneira detalhada no Item 4.1.

Pode-se dizer que o valor de eficiência de fusão realmente possui correspondência com a produtividade e com a velocidade de soldagem, apesar de não ser o único fator determinante. Concorde-se com o que foi exposto por DuPont e Marder [2], que a realização de soldagens em elevadas velocidades (que considera-se aqui 1 m/min, por exemplo) requer um arco com grande capacidade de transferir calor para a peça já que é necessário compensar a diminuição do tempo disponível para a energia se transferir da fonte calorífica ao substrato, ou seja, um arco que possua grande capacidade de gerar fusão. Sendo assim, quando se trata de obter velocidade de soldagem elevada, o processo que apresenta maior η_m possui antecipadamente um aspecto vantajoso em relação aos processos com menor η_m . Apesar disso, mesmo processos de soldagem com baixa eficiência de fusão, se conseguirem proporcionar a quantidade de material fundido necessário para determinada aplicação, podem apresentar velocidades de soldagem tão ou mais elevadas do que os processos com maior eficiência. O problema ocorre quando a soldagem em questão é de componentes mais espessos, onde se necessita fundir uma grande quantidade de metal e essa taxa com que o calor tem que ser entregue se torna muito elevada. Para suprir essa necessidade os processos com menor η_m necessitam de correntes de soldagem mais elevadas e isso nem sempre é possível na maioria das situações devido a outros problemas. Essas questões serão debatidas ao longo da seção 3.

2.6. DISCUSSÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS SOBRE A EFICIÊNCIA TÉRMICA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM A ARCO

Levando em consideração as informações expostas nos itens anteriores, fica claro que existe a necessidade de melhorar as informações do material técnico usado no ensino e pesquisa de soldagem sobre o assunto. Com as informações dos diferentes trabalhos foi possível realizar uma análise dos principais pontos relacionados com a eficiência térmica dos processos:

Com relação à eficiência do arco não é correto afirmar que cada processo possui um valor de η_a fixo. Os dados das medições dos diferentes autores mostram que o valor de η_a pode variar com grande intensidade principalmente para os processos TIG e Plasma, mas também apresentam variação não desprezível no caso do processo MIG/MAG. Nesse ponto fica a crítica aos pesquisadores que usam em seus trabalhos valores de eficiência do arco retirados de outros autores, muitas vezes considerando erroneamente que cada processo possui um η_a fixo, fato que ocorre tradicionalmente nos trabalhos de metalurgia de soldagem.

Quanto aos valores de eficiência do arco, foi possível verificar que a afirmação proposta por DuPont e Marder [2], na qual os processos com eletrodo consumível (MIG/MAG e SAW) sempre apresentam η_a maior do que os processos com eletrodo não consumível (TIG e Plasma) não está correta. Essa afirmação foi baseada nos resultados de medições de η_a em condições específicas para cada processo, condições essas que foram erroneamente consideradas como comportamento padrão dos processos. Porém, conforme já foi afirmado anteriormente, não existe um valor de η_a fixo para cada processo. Em trabalhos como o de Kusch et AL [5], são apresentados valores de η_a que são maiores para o TIG e Plasma do que para o MIG/MAG dependendo da situação em que a comparação é feita.

Considerando as informações dos parágrafos anteriores, fica claro que as afirmações de que a energia perdida para o eletrodo de tungstênio é a principal causa da pior eficiência do arco dos processos com eletrodos não consumíveis em relação aos processos com eletrodos consumíveis também não são verdadeiras. Logicamente que para o caso dos processos MIG/MAG e SAW, a energia térmica contida no arame/eletrodo é absorvida de alguma forma na poça de fusão. Já no caso do TIG, parte da energia é perdida para as partes da tocha de

soldagem que estão em contato com o eletrodo. Porém, não se considera correto afirmar que o pior desempenho dos processos com eletrodo não consumível se deve à energia perdida pelo eletrodo. Existem muitas outras diferenças na própria física do arco dos diferentes processos de soldagem que envolve fenômenos de elevada complexidade, que não estão totalmente compreendidos, que certamente possuem importância muito maior no desempenho do que essa energia perdida pelo eletrodo.

Quando se trata da eficiência de fusão, também é importante afirmar que não existe um determinado valor de η_m fixo para cada processo de soldagem, até porque a própria variação da condição experimental modifica o valor. Por isso, o valor de η_m deve ser determinado em cada condição, pois os dados de outros autores dificilmente irão representar a mesma situação que se pretende analisar.

A principal questão relativa aos valores de eficiência de fusão é que existe uma grande diferença entre os processos com eletrodo não consumível e processos com eletrodo consumível. Analisando os resultados dos diversos autores, é possível concluir que o processo MIG/MAG apresenta valores de η_m entre 0,3 e 0,5, independentemente das condições que o processo está sendo utilizado. Já para processos como TIG e Plasma, a eficiência de fusão depende totalmente dos parâmetros de soldagem, podendo apresentar valores muito baixos, bem próximos a zero, até valores relativamente elevados entre 0,3-0,4, de maneira semelhante os obtidos com o processo MIG/MAG.

Analisando os resultados de eficiência do arco de diferentes autores é possível inferir que esse indicador não é parâmetro a partir do qual se possa associar com a produtividade ou velocidade de soldagem do processo, ao contrário do que DuPont e Marder [2] sugerem em seu trabalho. Pode-se considerar que os valores de eficiência do arco servem somente para determinar o desperdício de eletricidade de cada processo. Por exemplo, o valor de η_a 0,85 do MIG/MAG com curto-circuito não faz com que o processo obtenha maior velocidade de soldagem do que no modo spray que tem η_a de 0,69. Da mesma forma o valor de η_a 0,76 medido por Kusch et AL [5] para o TIG usando Argônio puro não significa que esse processo tem alguma vantagem em relação ao MIG/MAG spray somente por conta do valor. Além disso, o valor da eficiência do arco não considera a concentração da fonte calorífica. Situações com fonte mais difusa poderiam apresentar maior eficiência térmica, porém com baixa eficiência de fusão bastante reduzida.

3. LIMITAÇÕES DO PROCESSO TIG PARA SOLDAGEM DE ELEVADA PRODUTIVIDADE

O processo TIG é considerado tradicionalmente de baixa produtividade, conforme já foi citado anteriormente. Afirmções como essas referentes ao processo TIG são encontradas em diferentes livros de soldagem, como por exemplo: “Trata-se de processo muito lento” segundo Qites [11], “é relativamente caro e lento. Com baixa produtividade” segundo Marques [12]; “a produtividade ou rendimento do processo é baixo, quando comparados à soldagem com eletrodos revestidos” segundo Marques et al [13]; “A maior limitação da soldagem TIG é a sua baixa produtividade” segundo Cary [14].

Tradicionalmente o TIG é pouco utilizado de maneira automatizada. O que se observa nas indústrias, é que a maior parte da aplicação desse processo é feita de forma manual, sendo principalmente soldagem de raiz, soldagem de componentes com menor espessura ou soldagem para realização de reparos. A aplicação manual por natureza tende a apresentar baixa velocidade, coerentemente com as correntes de soldagem de baixa intensidade. Para esse tipo de aplicação não ocorrem problemas, sendo que o processo apresenta um arco com grande estabilidade e características que proporcionam soldagem de elevada qualidade, sendo empregado para união de aço inoxidável e outras ligas mais nobres e soldagem de metais especiais, como titânio, por exemplo.

No caso de uma soldagem automatizada, visando aplicação com elevada velocidade, existem duas situações distintas. Inicialmente, em uma faixa de correntes de soldagem mais baixas, que na prática pode-se considerar até cerca de 250 A, não ocorrem problemas de descontinuidade do cordão. Porém, nessa faixa de corrente, a capacidade de gerar fusão também é baixa, então, não é possível obter velocidades elevadas, exceto na soldagem de componentes com pequena espessura, por exemplo, 1 ou 2 mm. Dessa forma, torna-se necessário a soldagem com correntes maiores para possibilitar a fusão da quantidade de material necessária a medida que se aumenta a velocidade de soldagem. O problema é que quando se utiliza correntes de soldagem maiores do que 250 A para realizar a soldagem sem adição de arame, o comportamento da poça de fusão apresenta mudanças e, conforme se aumenta a velocidade e a corrente de soldagem, o cordão de solda pode solidificar de maneira descontínua. Essa descontinuidade comumente é composta de regiões de crateras e regiões de protuberâncias, que aparecem de maneira alternada ao longo de todo o cordão, com

morfologia semelhante ao mostrado na Figura 13, e que é denominado “*humping*” em muitos trabalhos científicos.

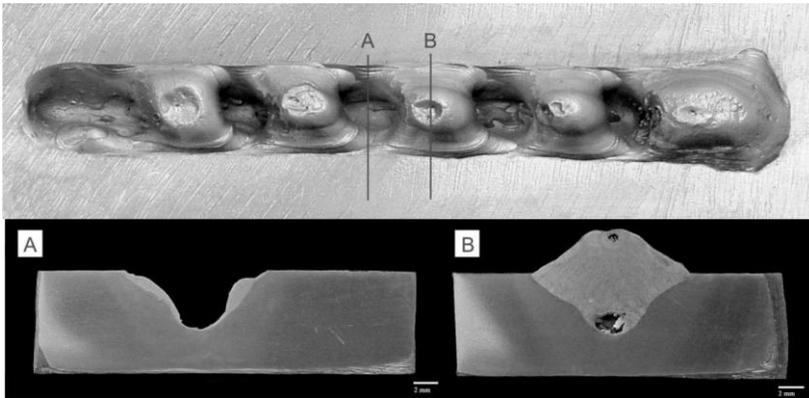


Figura 13 - Cordão soldado pelo processo TIG. A e B são seções transversais dos locais indicados na figura do cordão

Esse tipo de descontinuidade limita drasticamente a aplicação do processo em situações de elevada produtividade. Esses problemas encontrados quando se busca utilizar o processo TIG convencional com velocidade de soldagem elevada contribuem para o processo ser classificado como lento.

3.1. MECANISMO DE FORMAÇÃO DE DEFEITOS

A explicação que segue sobre o mecanismo de formação dos defeitos na soldagem de elevada produtividade, foi baseada nos trabalhos de Mendez et al [15-17]. Em síntese, na soldagem TIG com elevadas correntes, existe a tendência de formação de uma cratera na região sob o arco, sendo que o metal líquido da poça de fusão dessa região é expulso para a região posterior da poça de fusão, conforme está mostrado no esquema didático da Figura 14.

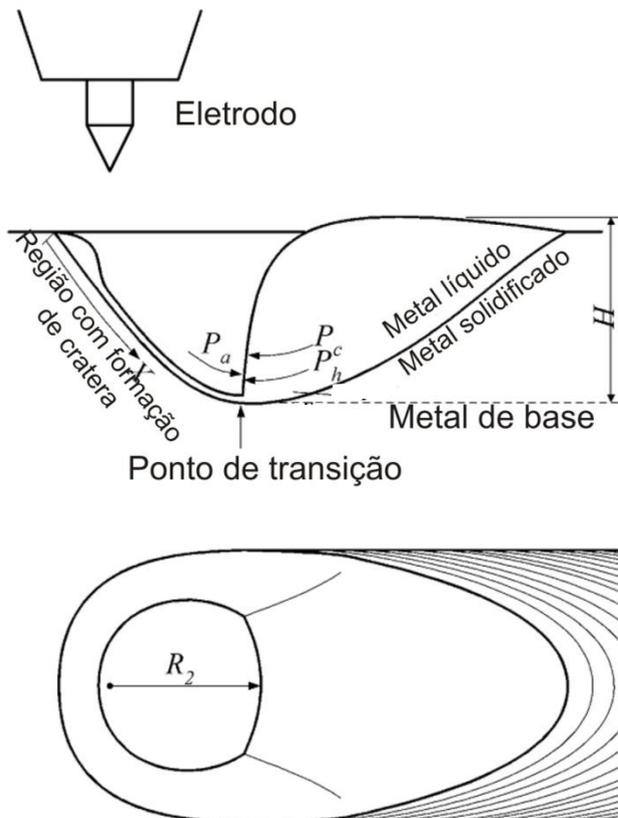


Figura 14 - Esquema mostrando a formação de cratera na poça de fusão para o processo TIG com elevada corrente de soldagem: Corte transversal no centro do cordão (Superior); Vista superior do cordão (Inferior) (Adaptado de [17])

Segundo os citados autores, o que determina o aparecimento da cratera é o resultado de um complexo balanço entre as forças que agem na base da poça de fusão. A força proveniente da pressão do arco (P_a) seria produzida pela ação do plasma contra a superfície da poça metálica; Contra esta estariam atuando as forças hidrostáticas, originadas pela pressão devido à coluna de metal líquido (P_h), e as forças capilares (P_c) originadas devido ao ângulo de curvatura do metal líquido. A força do arco tende a aumentar o tamanho da cratera, enquanto as forças hidrostáticas e capilares tendem a diminuir o tamanho da cratera formada [15].

De acordo com a combinação entre os parâmetros de soldagem, principalmente corrente e velocidade de soldagem, irão existir diferentes condições. Para situações de correntes mais baixas (na prática até cerca de 250 A), existe a tendência de que as forças P_h e P_c sejam maiores do que P_a e não ocorra o aparecimento da cratera. Ao passo que a corrente vai aumentando, P_a começa a se tornar maior do que as outras forças e começa a existir a formação de cratera.

A Figura 15 mostra um esquema didático encontrado no trabalho de Mendez [16], explicando a evolução da poça de fusão para o processo TIG com elevadas correntes que resulta na formação do *humping*.

A formação da cratera na poça de fusão não significa necessariamente ocorrência de falta de continuidade no cordão de solda. Conforme a tocha se movimenta na direção de soldagem, vai fundindo o metal que se encontra na frente do arco, o qual é transportado para a região posterior da poça por uma fina camada de metal que permanece em estado líquido no fundo e nas laterais da cratera. O metal fundido se acumula formando uma poça na região posterior do cordão, onde então se solidifica gradativamente, conforme a tocha de soldagem se afasta. Quando a velocidade de soldagem é baixa o suficiente para que essa região onde se formou a cratera permaneça aquecida pelo arco, a parte posterior da poça de fusão continua recebendo o metal fundido alimentado pelos canais na lateral do cordão. O cordão se solidifica de maneira contínua e o *humping* não ocorre (Figura 15(A)).

Para o caso de uma maior velocidade de soldagem, a poça de fusão se alonga e, acima de uma velocidade limite, o calor do arco passa a ser insuficiente na região posterior da poça. Como os canais de metal líquido, que transportam o material que se funde na região anterior para a região posterior da poça de fusão, são delgados, solidificam-se facilmente a partir do momento que o arco não consegue mais fornecer a quantidade de calor suficiente para mantê-los na fase líquida (Figura 15(B)). Ocorrendo a solidificação desses canais, o metal que continua a ser fundido na região anterior passa a se acumular em um novo trecho, deixando no cordão uma região de cratera sem preenchimento de material. Como a antiga região de solidificação que acumulava uma poça de metal líquido passa a não receber mais material, acaba se solidificando também. (Figura 15(C)). Ao longo da soldagem, esse comportamento ocorre ciclicamente e o cordão acaba resultando então em uma seqüência alternada de regiões de cratera e regiões de cordão com protuberâncias, conforme mostrado na Figura 13, que é conhecido como *humping*.

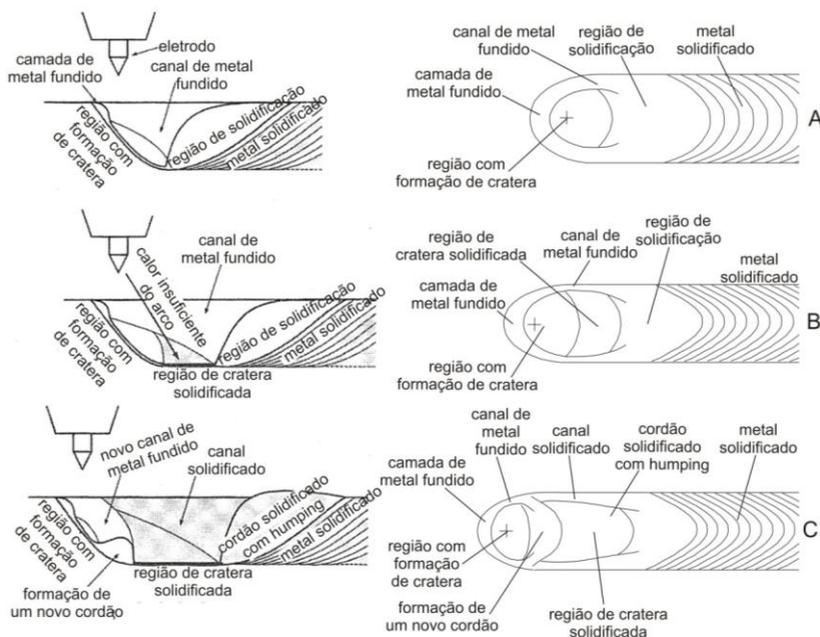


Figura 15 – Esquema didático representação da poça de fusão do processo TIG em elevadas correntes e com formação de defeitos do tipo humping. (Adaptado de [16])

Considerando o que foi exposto, Mendez sugere em seus trabalhos que a pressão do arco seria o principal fator responsável pelo aparecimento dos defeitos de soldagem. Observando na prática as soldas nas quais ocorre a formação do *humping*, principalmente quando se utiliza argônio puro, realmente ocorre formação da cratera sob o arco e, aparentemente, a pressão do arco é o que causa o defeito. Porém, como será mostrado na seqüência, estas conclusões são dotadas de problemática idêntica das que foram tratadas para a eficiência térmica e eficiência de fusão. O presente trabalho não considera correto afirmar que a pressão do arco seja o fator mais importante dentro da problemática dos defeitos da soldagem TIG em elevada velocidade. Existem outros fatores que irão afetar a morfologia da poça de fusão, e que na prática serão determinantes para o aparecimento dos defeitos.

Apesar de ter sido realizado há mais de três décadas, o trabalho de Savage et al [18] foi o único encontrado onde de fato se realizou um

trabalho experimental extenso mostrando a influência dos parâmetros de soldagem do processo TIG no aparecimento de defeitos. Os ensaios desse trabalho serviram de base para as explicações propostas por Mendez [15-17] para o mecanismo de formação desses defeitos, e que foram expostas anteriormente, e os resultados desses ensaios têm sido utilizados até hoje como referência em vários trabalhos que se seguiram sobre o assunto. Nos próximos itens estão mostrados a influência dos principais parâmetros de soldagem na formação dos defeitos.

- Corrente de Soldagem

A velocidade limite para o aparecimento de defeitos diminui drasticamente com o aumento da corrente de soldagem, sendo que a Figura 16 mostra os dados experimentais da velocidade limite em função da corrente obtidos por Savage et al [18] com o processo TIG, em ensaios tipo cordão sobre chapa utilizando argônio puro no gás de proteção.

Esses resultados caracterizam muito bem a dificuldade de obtenção de soldas com elevada produtividade utilizando o TIG, pois, supondo aplicações nas quais se desejam aumentar a velocidade de soldagem, é necessário também uma corrente de soldagem mais elevada para que seja possível fundir a quantidade de material suficiente para formar a junta. Porém, como mostra a Figura 16, esse aumento da corrente irá diminuir a velocidade que é possível de se soldar sem ocorrência de defeitos, inviabilizando a melhoria de desempenho.

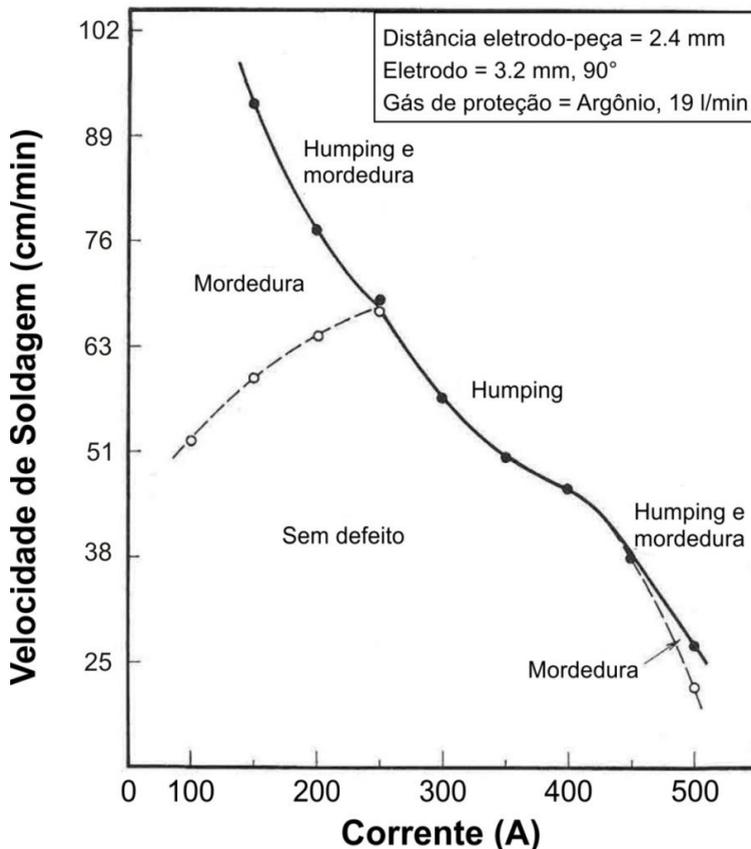


Figura 16 - Efeito da corrente de soldagem na velocidade limite para aparecimento de defeitos [18]

- Gás de proteção

O gás de proteção utilizado no processo modifica de maneira acentuada as características do arco, influenciando também a velocidade limite para o aparecimento dos defeitos na soldagem TIG. A Figura 17 mostra os resultados experimentais da velocidade limite para aparecimentos de defeitos no caso do argônio puro e do hélio puro obtidos por Savage et al [18]. Pode-se observar que para as correntes testadas, usando hélio é possível soldar sem ocorrência de defeitos em velocidades cerca de três vezes mais elevadas do que com argônio para a mesma corrente média.

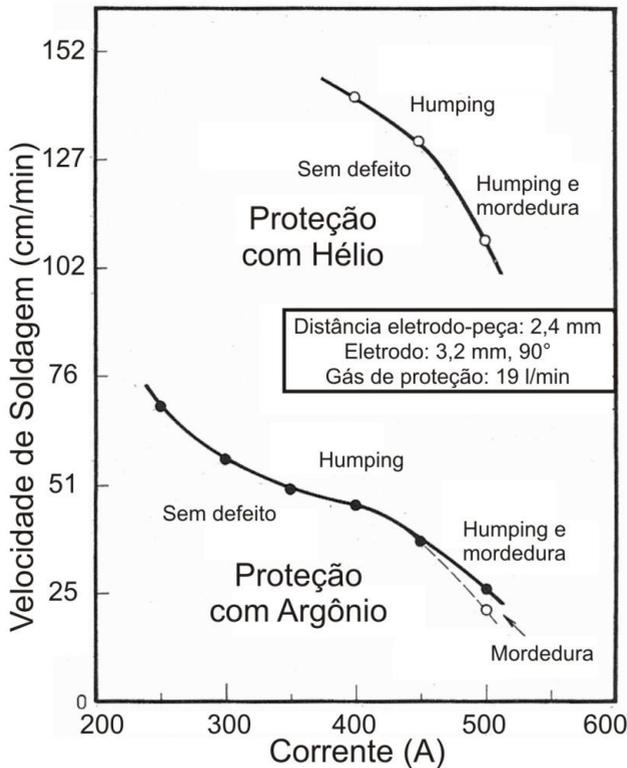


Figura 17 - Efeito do gás de proteção na velocidade limite para aparecimento de defeitos [18]

- Distância eletrodo-peça

A distância eletrodo-peça é um importante fator que afeta o surgimento de defeitos no processo TIG. O aumento da DEP causa diminuição da velocidade limite para o aparecimento de defeitos conforme mostra a Figura 18, que apresenta resultados obtidos em ensaios tipo cordão sobre chapa usando os gases de proteção argônio e hélio. Esses resultados que mostram que o aumento da DEP causa diminuição da velocidade limite para formação dos defeitos indicam que a explicação de que a pressão do arco é o fator chave para formação dos defeitos não está correta.

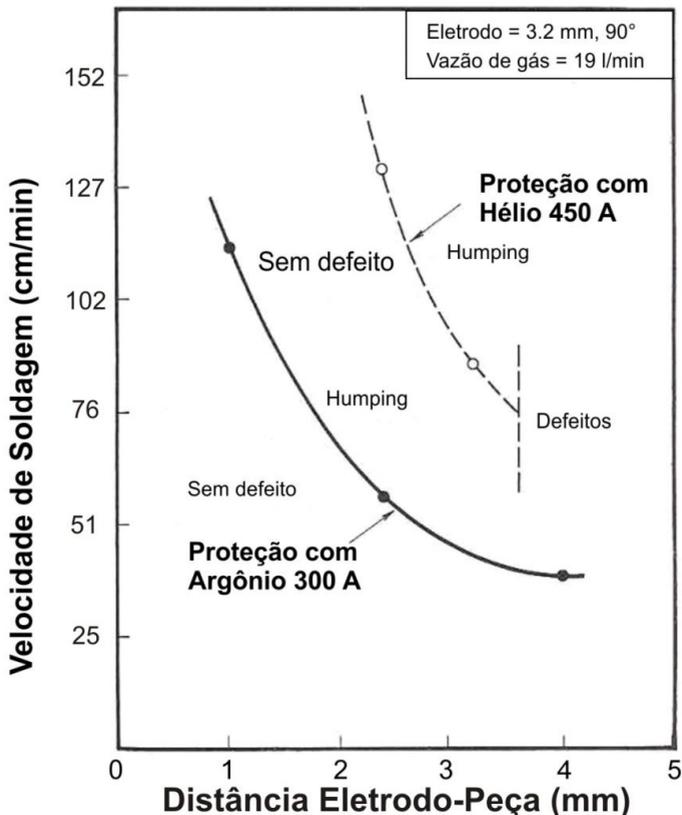


Figura 18 - Efeito da distância eletrodo-peça na velocidade limite para o aparecimento de defeitos [18]

- Pressão do arco

A formação de pressão sobre a poça de fusão na soldagem TIG (e também nos outros processos de soldagem a arco) muitas vezes é um fato que não é considerado por muitos profissionais da área de soldagem. Os motivos que causam o surgimento da pressão do arco não são facilmente assimilados devido à elevada complexidade dos fenômenos envolvidos na física do arco.

O surgimento da pressão sobre a poça de fusão tem como principal causa a ação do jato de plasma sobre a mesma. Uma boa explicação didática descrevendo a formação do jato de plasma pode ser encontrada no trabalho de Modenesi [19], é dada no seguinte parágrafo:

A observação experimental indica que, em um arco de soldagem TIG, gases são absorvidos junto ao eletrodo de tungstênio, aquecidos e impulsionados com alta velocidade (da ordem de 10^2 m/s) em direção à peça independentemente da polaridade usada, formando um jato de plasma. Este efeito tem sido associado à existência de gradientes de pressão no arco elétrico resultante de forças de origem magnética. O arco é um condutor no qual a corrente de soldagem passa através, assim como passa pelos cabos que ligam o arco à máquina de soldagem. Diferentemente destes, contudo, o arco é um condutor gasoso, sendo, portanto, muito mais sensível a forças geradas, por exemplo, por campos magnéticos. Quanto maior for a densidade de corrente em determinada seção do arco, maior será o campo magnético e maior será a pressão atuando localmente sobre as partículas carregadas naquela seção do arco. Devido ao formato característico do arco TIG, o qual a área na região catódica (eletrodo) é bem menor do que na região anódica (peça), existe também uma diferença de densidade de corrente, que é muito maior na região catódica. Essa maior densidade de corrente, gera um campo magnético mais intenso que atua sobre as partículas carregadas do plasma e gera localmente uma maior pressão radial sobre a coluna de gás ionizado. Dessa forma, a pressão é localmente muito maior na região catódica do que na região anódica e esse gradiente de pressão causa a aceleração das partículas do plasma, partindo do eletrodo em direção à peça e forma o chamado jato de plasma que resulta uma pressão de agindo sobre a poça que é capaz de deslocar o metal líquido.

Os resultados experimentais do trabalho de Savage et al [18] serviram de base para outros trabalhos que foram encontrados [15, 16, 17, 20 e 21] sobre a problemática da soldagem TIG de elevada produtividade. Os trabalhos [15, 16, 17 e 21] compartilham da mesma explicação mostrada no item 3.1.1, onde formação da cratera devido à pressão do arco tem papel fundamental. Em [21] os autores mostram um gráfico da diferença de pressão dos arcos com argônio e com hélio, o qual está mostrado na Figura 19.

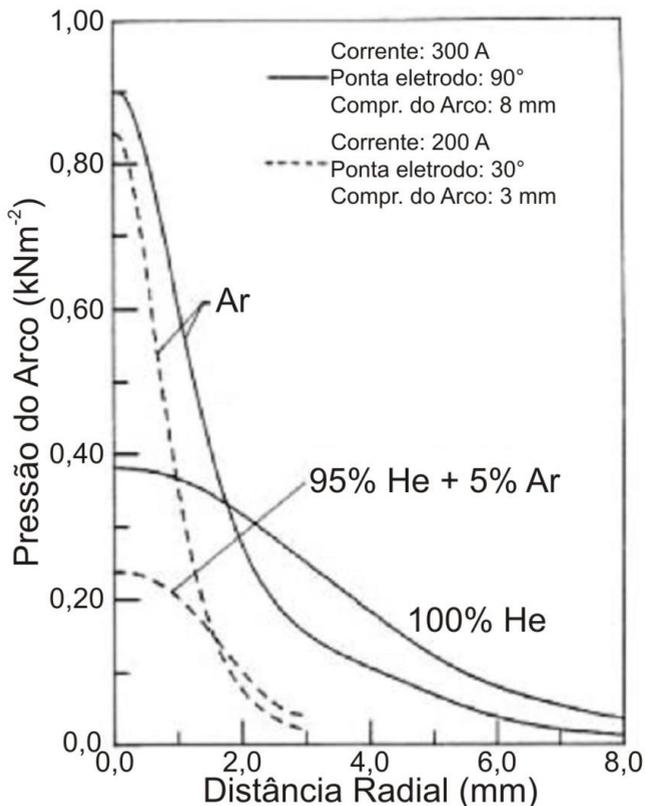


Figura 19 - Efeito do gás de proteção na distribuição de pressão do arco durante a soldagem TIG [20]

Pode-se verificar que a intensidade da pressão no centro do arco para o caso do argônio é muito maior em comparação com o hélio, sendo que esses autores atribuem essa distribuição de pressão mais aberta no caso do hélio à menor densidade e maior viscosidade do hélio à elevadas temperaturas. Dessa forma, os autores em [20] e [21] afirmam que essa menor pressão efetiva para o caso do hélio é o motivo para a grande diferença na velocidade limite para o aparecimento de defeitos entre He e Ar mostrado nos experimentos de Savage et al [18]. Considerando a pressão do arco como a força dominante para o aparecimento de *humping*, seria necessária uma corrente muito maior com o hélio para força e pressão suficientes para formação dos defeitos. Esses trabalhos, que tratam da soldagem TIG de elevada produtividade, se utilizam dessa comparação de pressão do arco entre os

gases Ar e He para justificar os resultados, porém não abordam o assunto de maneira aprofundada.

O presente autor não concorda com as explicações que a pressão do arco é o fator determinante para a diferença do desempenho entre o Ar e He. Por isso na seqüência do texto está apresentada uma pesquisa de mais referências bibliográficas aprofundada sobre a pressão do arco no processo TIG.

Por meio de aparato experimental adequado é possível medir localmente a pressão que o fluxo de partículas carregadas gera em uma determinada região da peça sob o arco, sendo essa pressão medida denominada pressão de estagnação. A pressão de estagnação normalmente é medida experimentalmente usando uma base de cobre refrigerada à água, onde é possível manter o arco aberto sem causar fusão do substrato. Para possibilitar uma medição aproximada da pressão em diferentes regiões do arco, é feito um pequeno furo passante nessa base de cobre, em cuja parte posterior é conectado, por meio de um canal comunicante, à um sensor para medir a pressão do sistema. O arco é movimentado sobre o furo e a pressão medida é registrada para cada posição. Esse método de medição é citado nos trabalhos [22-25]. A Figura 20 mostra um esquema didático do aparato experimental utilizado na medição da pressão de estagnação.

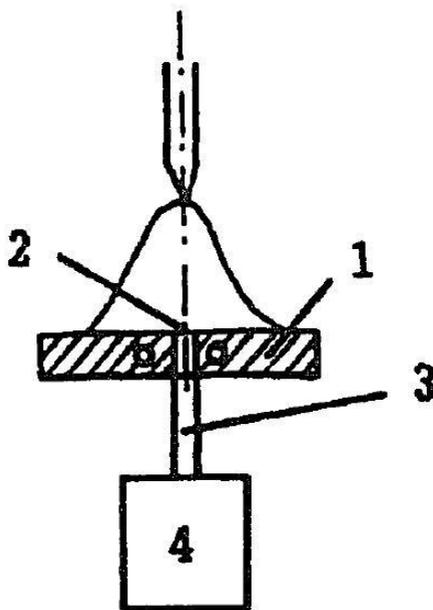


Figura 20 - Representação didática do aparato usado para medição da pressão de estagnação do arco para o processo TIG. 1- Base de cobre refrigerada; 2- Furo passante; 3- Duto ou sistema de comunicação entre o furo e o sensor; 4- Sensor medidor de pressão e sistema de aquisição dos dados. (Adaptado de [25])

No trabalho de Fan e Shi [25], no qual o objetivo principal era comparar propriedades do arco com os resultados de simulação numérica por equações magneto-hidrodinâmicas, foram realizados experimentos de medição da pressão do arco para o processo TIG, os quais fornecem informações importantes sobre a influência das variáveis de soldagem sobre a pressão do arco. A Figura 21 mostra os resultados das medições da pressão do arco realizadas pelos autores para correntes de 100, 150 e 200 A. É possível notar o forte aumento da pressão do arco com o aumento da corrente de soldagem. Isso pode ser explicado pelo fato de que, devido ao aumento da corrente de soldagem, a densidade de corrente da coluna do arco e a seção transversal condutiva também aumentam. Devido ao aumento dessa densidade de corrente, a força eletromagnética aumenta o gradiente de pressão que gera o fluxo do plasma em direção à peça, resultando também no aumento da pressão máxima.

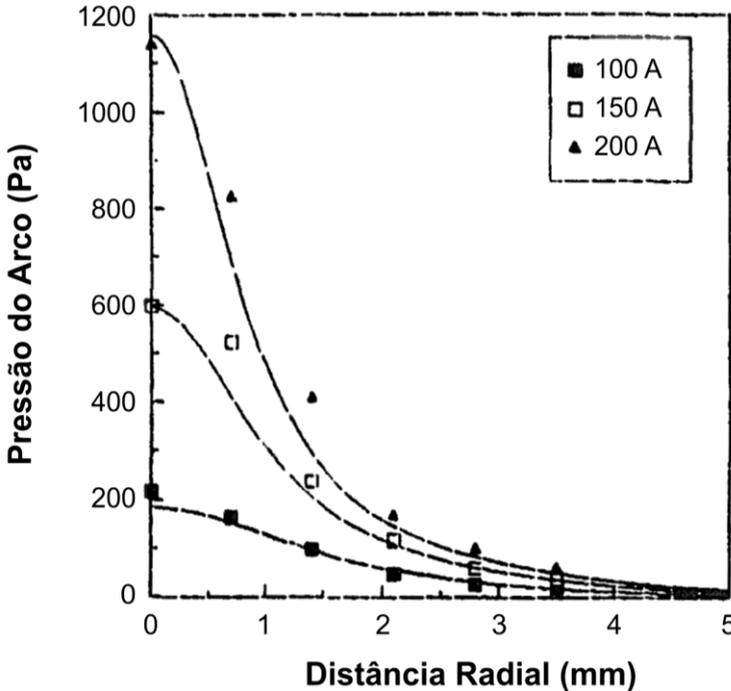


Figura 21 - Efeito da corrente de soldagem na pressão do arco. (DEP 6,3mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°) [25]

A Figura 22 mostra os resultados dos ensaios realizados para verificar a influência da geometria de afiação do eletrodo na pressão do arco. As medições foram realizadas com a ponta do eletrodo afiada em 60°, 90° e 120°. Os resultados mostram que o cátodo com menor ângulo apresentou maior pico de pressão. A explicação para esse comportamento, segundo o autor de [25], seria que um menor ângulo da ponta do eletrodo resulta em uma diminuição da seção condutiva da ponta do eletrodo, a qual causa um aumento na força eletromagnética com aumento da densidade de corrente. Por outro lado, é importante ressaltar que são encontrados nos livros da AWS [1] e do Kou [26], por exemplo, resultados de trabalhos avaliando a influência do ângulo da ponta do eletrodo na geometria do cordão, os quais mostram que a tendência ao aumentar o ângulo seria obter um cordão com menor largura e maior penetração. Ou seja, os resultados das soldas não podem ser explicados por meio dos resultados da medição de pressão apresentados, mostrando que existem outros fatores preponderantes. Com relação aos efeitos da afiação do eletrodo na soldagem TIG de

elevada velocidade Savage et al [18] mostra resultados onde a velocidade de soldagem sem aparecimento de defeitos foi muito menor para um eletrodo com afiação em um ângulo de 18° do que com o eletrodo afiado com ângulo de 90° . Essa idéia de que o eletrodo com ângulo mais agudo produz maior pressão na poça de fusão e teria consequentemente, maior tendência à formação de *humping*, também é apoiado por [16, 17, 20 e 21]. Essa tendência também foi verificada na experiência prática no LABSOLDA.

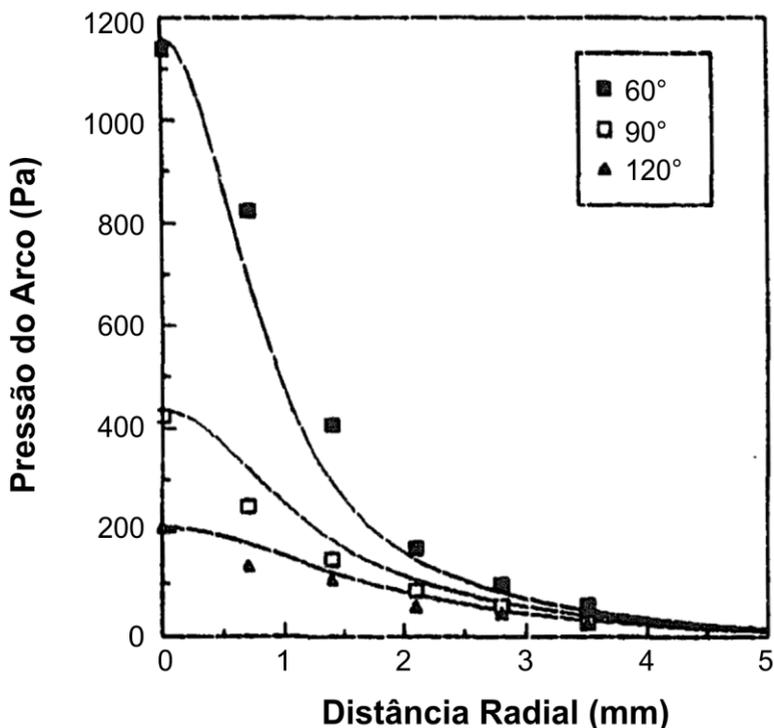


Figura 22 - Efeito da ponta do eletrodo na pressão do arco (I: 200 A; DEP 6,3 mm; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm) [25]

A Figura 23 mostra o resultado das medições da pressão de estagnação do arco com diferentes distâncias eletrodo-peça, onde o maior pico de pressão ocorre com o menor comprimento de arco. Segundo os próprios autores, esse resultado não mostrou concordância com os resultados da pressão do arco obtido pela simulação numérica. Segundo Fan e Shi [25], com a diminuição do comprimento do arco, o

aumento da densidade de corrente aumentaria a força eletromagnética do arco, o que faria o plasma do arco ter a tendência de ser acelerado. Por outro lado, a diminuição do comprimento do arco reduziria a distância da aceleração do plasma do arco, então a velocidade máxima teria a tendência de diminuir com a diminuição da DEP de acordo com a lei de Newton do movimento. Combinando esses dois fatores, e considerando essa teoria, a velocidade máxima seria independente do comprimento do arco. Porém, o resultado da medição da pressão de estagnação do arco não mostrou isso, e sim que a pressão de estagnação aumenta com a diminuição da distância eletrodo-peça.

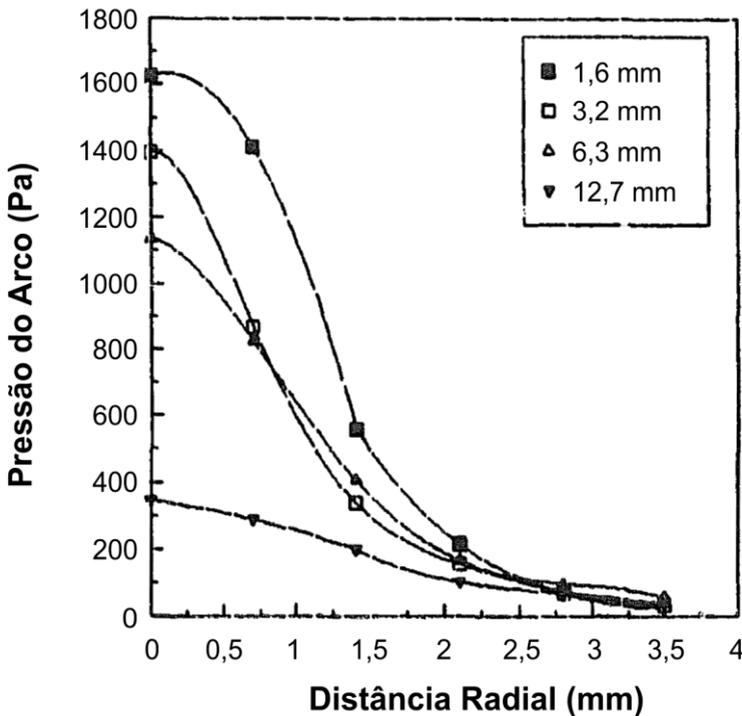


Figura 23 - Efeito da distância eletrodo-peça na pressão do arco (Ang. I: 200 A; Diâmetro do eletrodo 3,2 mm; Ang. de afiação eletrodo 60°)
[25]

O resultado da medição da pressão do arco para as diferentes DEP mostrando que a pressão aumenta com a diminuição da DEP, e os resultados da velocidade limite para o aparecimento de defeitos mostrados por Savage et al, nos quais a velocidade limite aumenta com

a diminuição da DEP, tornam claro que a pressão do arco não é o fator chave para a formação dos defeitos.

A Figura 19 mostrou um exemplo de medição da pressão do arco no processo TIG com gases de proteção argônio e hélio. A Figura 24 mostra outro resultado de medição experimental da pressão de estagnação desses dois gases e misturas, que foi encontrado no trabalho de Zähr et AL [27], onde também foram realizadas simulações numérica-computacional com equações magneto-hidrodinâmicas das propriedades do arco e, para comparação foram realizados ensaios de medição da pressão de estagnação. Pode-se perceber que para a mesma corrente média, a pressão é maior para o Ar em comparação com o He, concordando com os resultados de outros autores.

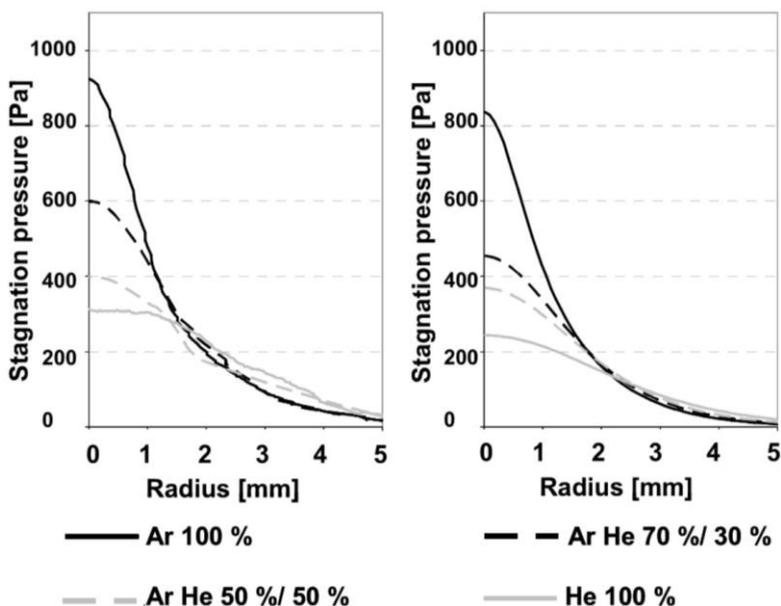


Figura 24 - Comparação da pressão de estagnação para diferentes misturas de Argônio e Hélio (Resultados experimentais) esquerda; Resultados simulação, direita (I: 200 A; Diâmetro do eletrodo: 3,2 mm; Ang. ponta do eletrodo 60°; DEP: 5 mm) [27]

A Figura 25 mostra os resultados de Schnick et al [23], que realizou comparações da pressão do arco para o processo Plasma. Essas comparações foram realizadas para Ar puro, mistura Ar-50%He e mistura Ar+5% H_2 , sendo que foram realizados ensaios experimentais

com medição da pressão de estagnação e também simulações da pressão por modelamento numérico. No caso do processo Plasma, é possível verificar que não existe diferença significativa entre a pressão do arco no caso do Ar puro e da mistura Ar + 5% H_2 . Já a mistura Ar+50%He apresentou pressão consideravelmente menor.

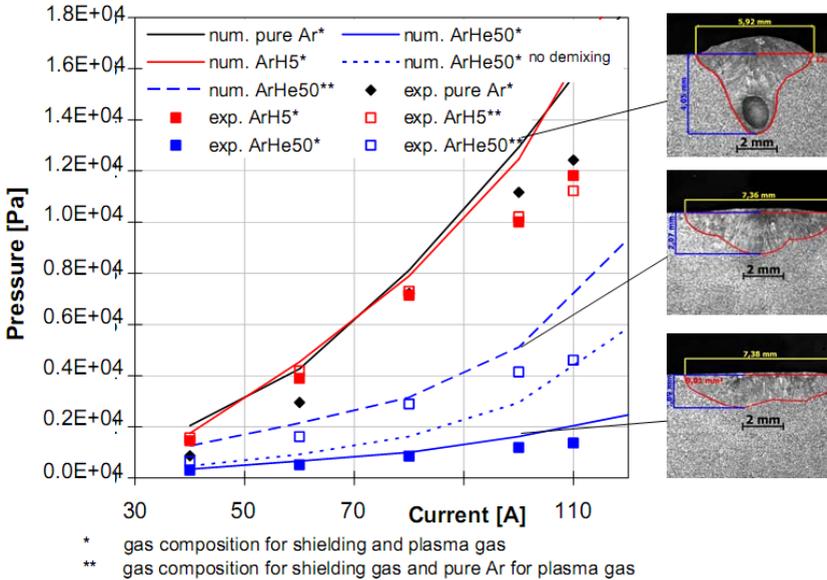


Figura 25 – Valores da pressão do arco medidos e obtidos por simulação numérica para diferentes misturas [23]

Seria de grande interesse para o presente trabalho medições da pressão de estagnação do arco para o processo TIG utilizando misturas Argônio-Hidrogênio, mas não foram encontrados trabalhos publicados que mostrassem dados reais de medições. Porém, no trabalho de Zähr et AL [24], os autores afirmam que a adição de pequenas quantidades de H_2 ao Ar no gás de proteção causa aumento da velocidade do fluido dentro do arco resultando também em um aumento da pressão de estagnação do arco. Dessa forma, não foram encontrados indícios de que a adição de pequenas quantidades de hidrogênio ao argônio possa causar diminuição da pressão do arco.

3.2. APLICAÇÃO DO HIDROGÊNIO NA SOLDAGEM TIG

A aplicação do hidrogênio, na forma de misturas gasosas que contenham frações de hidrogênio, nos processos de soldagem a arco geralmente tem sido bastante restrita, sendo na maioria das vezes utilizado na soldagem de aço inoxidável austenítico, por meio de misturas argônio-hidrogênio com teores de H_2 até 5%.

A história da soldagem a arco mostra que o hidrogênio é um elemento que facilmente promove a formação de defeitos, especialmente no caso da soldagem de aços. O mais famoso defeito de soldagem relacionado ao hidrogênio são as trincas induzidas por hidrogênio. Outra fonte de preocupação é a formação de poros na solda durante o processo de soldagem.

3.2.1. Formação de poros devido à presença de hidrogênio

A utilização de hidrogênio no gás de proteção no processo TIG aumenta a tendência de formação de porosidade. A Figura 26 mostra um exemplo de porosidade resultante na soldagem com a mistura $Ar + 20\%H_2$ no aço inoxidável austenítico.

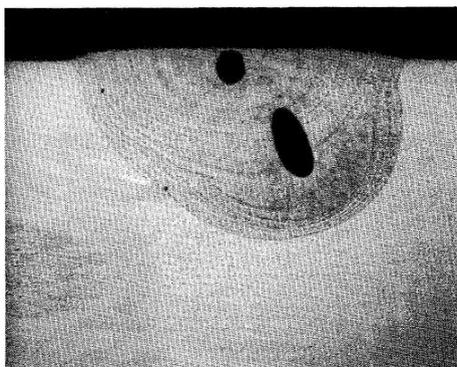


Figura 26 - Porosidade em solda de aço inoxidável austenítico realizada com mistura $Ar+20\%H_2$ no gás de proteção [28]

Conforme explicação encontrada no trabalho de Hooijmans [28], quando a concentração de gás dissolvido no metal fundido excede a solubilidade, pode ocorrer a formação de bolhas. Esse é um fenômeno que facilmente pode ocorrer durante a soldagem. Ele pode se manifestar em duas situações diferentes: No primeiro caso, a quantidade de gás

absorvido durante a soldagem a arco excede a solubilidade no metal líquido aquecido, resultando na nucleação e crescimento de bolhas. No segundo caso, as bolhas são produzidas na frente de solidificação, devido ao fato que a solubilidade do gás no metal sólido, é muito menor do que no metal fundido. Essa diferença de solubilidade na temperatura de solidificação resulta em um excesso de gás na região próxima da frente de solidificação. A concentração de gás nessa região adjacente à frente de solidificação aumenta e eventualmente excede a solubilidade do gás nessa temperatura, resultando em nucleação e crescimento de bolhas. Essas bolhas irão tender a subir para a superfície devido às forças gravitacionais. Entretanto, parte das bolhas pode ser retida pelo processo da frente de solidificação, o que irá resultar em poros solidificados no metal de solda. [28]

No caso da soldagem a arco dos aços, a formação de poros devido ao hidrogênio tem sido observada em diferentes situações. Nos experimentos com ferro puro realizados por Hooijmans [28], não foi encontrada formação de poros, mesmo em situações com hidrogênio no gás de proteção de cerca de 30%. Entretanto, em experimentos com aço carbono e aço inoxidável austenítico, a formação de poros foi observada em certas condições. No caso do aço carbono, porosidade foi encontrada com 7,5% de H_2 , enquanto a formação de porosidade para o aço inoxidável começou a ocorrer em cerca de 15% de H_2 . O Anexo B do presente trabalho mostra uma tabela com a composição química de cada aço.

Segundo o mesmo autor, essa observação pode ser explicada pelo fato que no caso dos aços os sítios de nucleação estão disponíveis na forma dos elementos de liga, óxidos e inclusões, enquanto no caso do ferro puro, esses sítios estão ausentes. Além disso, a presença de oxigênio no aço estrutural e no inox facilita a formação de poros, já que o oxigênio diminui a tensão superficial do metal líquido e portanto, diminui a energia superficial necessária para nucleação das bolhas. A menor tendência de formação de poros do aço inox em comparação com o aço carbono é atribuída a maior solubilidade do hidrogênio no aço inox austenítico, devido a presença de elementos de liga. [28]

Dessa forma, a tendência de formação de porosidade é dependente do material e da quantidade de hidrogênio presente durante a soldagem, porém, também é dependente das condições experimentais, em particular a taxa de solidificação. É esperado que um aumento na taxa de solidificação (como um aumento na velocidade de soldagem para a mesma corrente média por exemplo) pode facilitar a formação dos poros retidos dentro do cordão.

3.2.2. Formação de trincas induzidas por hidrogênio

A formação de trincas induzidas por hidrogênio é certamente o defeito mais famoso relacionado à presença de hidrogênio na soldagem a arco. Diversos estudos sobre esse tipo de defeito foram realizados em vários trabalhos durante as últimas décadas.

De maneira geral, os trabalhos encontrados sobre o assunto concordam que as trincas de hidrogênio ocorrem quando quatro fatores estão presentes simultaneamente:

- Hidrogênio no metal de solda: O hidrogênio pode ser fornecido por diferentes fontes (revestimento orgânico dos eletrodos, umidade do revestimento do eletrodo, compostos hidratados na superfície da peça como ferrugem, óleo ou outros contaminantes superficiais, e do próprio gás de proteção utilizado no processo).

- Elevadas tensões na região soldada: Elevadas tensões podem ser induzidas durante o resfriamento pela deformação de solidificação e contração térmica sob restrições. Logicamente o nível de tensão vai depender de diversos fatores, principalmente do grau de restrição e do desenho da junta.

- Microestrutura susceptível: As trincas induzidas por hidrogênio se formam em microestruturas martensíticas, especialmente martensita de alto carbono que é dura e frágil.

- Temperaturas relativamente baixas: Sendo que a temperatura de formação de martensita M_s é relativamente baixa, as trincas de hidrogênio tendem a ocorrer em temperaturas relativamente baixas, durante o resfriamento posterior a soldagem. Por essa razão, freqüentemente são chamadas de “trincas a frio”.

Conforme foi citado anteriormente, são necessárias simultaneamente quatro condições para formação das trincas de hidrogênio. Dessa forma, os aços baixo carbono que não formam microestrutura frágil não seriam susceptíveis à trincas induzidas por hidrogênio. Apesar disso, o uso de frações de hidrogênio no gás de proteção, mesmo para a soldagem de aços baixo carbono, ainda causa certo temor em parte dos profissionais da área de soldagem. Nos últimos anos, em trabalhos desenvolvidos no LABSOLDA foram soldadas grande quantidade de peças de aço baixo carbono utilizando misturas Ar-H₂ e não foi observado problemas de formação de trincas induzidas por hidrogênio. Essas peças soldadas foram testadas com pressões elevadas conforme os padrões do fabricante, sem nenhum indício de formação de trincas ao longo de todo o desenvolvimento. No trabalho de Reis [29], o autor também realizou ensaios de soldagem de chapas finas

de aço baixo carbono utilizando misturas Ar-H₂ e submeteu os corpos de prova soldados à ensaios de tração e ensaios de estampabilidade, sendo que também não foram encontrados problemas com trincas associadas ao hidrogênio.

3.2.3. Propriedades físicas de misturas gasosas que contenham hidrogênio

As propriedades físicas do gás influenciam decisivamente nas características do arco elétrico. A energia de ionização dos elementos presentes no arco é um importante parâmetro. Uma menor energia de ionização primária resulta em um maior grau de ionização a uma dada temperatura. Plasmas contendo elementos de baixa energia de ionização, como por exemplo vapores metálicos, podem, em princípio, manter um grau de ionização suficiente para manter a corrente de soldagem a temperaturas mais baixas. Isto se traduz, em geral, em uma melhor estabilidade, maior facilidade de abertura do arco e em menores tensões de operação para um dado comprimento do arco. Deve-se enfatizar, contudo, que o comportamento global do arco depende de diversos outros fatores além do potencial de ionização [19].

Os valores da energia de ionização dos principais elementos presentes na soldagem a arco estão mostrados na tabela abaixo:

Tabela 1: Energia de ionização de alguns átomos e moléculas: [28]

element	E _i (eV)	element	E _i (eV)
He	24.59	O ₂	12.06
Ar	15.76	C	11.26
H	13.60	P	10.49
H ₂	15.43	S	10.36
N	14.53	Fe	7.87
N ₂	15.58	Ti	6.82
O	13.62	W	7.98

Durante a soldagem, uma importante parcela da energia é transferida para peça por condução térmica do gás ionizado [30] [28]. A condutividade térmica total é a soma do número de diferentes

contribuições, como colisões com partículas pesadas, colisão entre elétrons e partículas pesadas e difusão de moléculas dissociadas [28]. A Figura 27 mostra a condutividade térmica dos gases em diferentes temperaturas. No gráfico da esquerda estão dados dos principais gases utilizados nos processos de soldagem a arco e no gráfico da direita, medições com diferentes misturas Argônio-Hidrogênio. É possível observar que a condutividade térmica do hidrogênio é muito maior do que o argônio. Segundo os autores de [28], o pico proeminente em aproximadamente 4000 K é devido a dissociação do H_2 e o pico menos pronunciado em aproximadamente 14000 K é devido a ionização do hidrogênio. É natural esperar que a elevada condutividade térmica do hidrogênio devido a dissociação apresente influência no processo, sendo que a faixa de temperatura entre 3000 e 4500 K é a que prevalece na soldagem a arco [7].

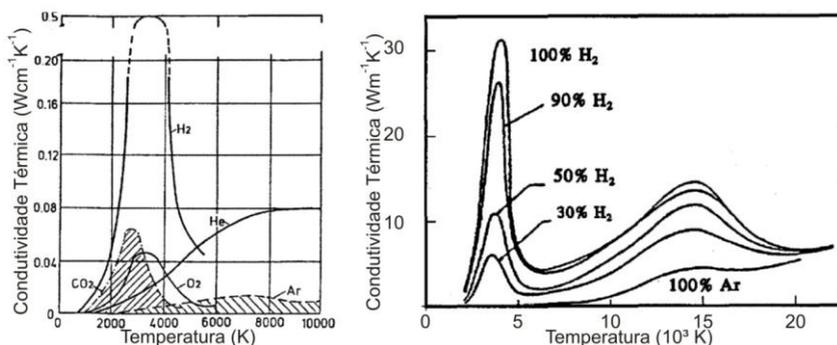


Figura 27 – Esquerda: Condutividade dos gases em função da temperatura [7]; Direita: Condutividade térmica de algumas misturas argônio hidrogênio em função da temperatura (H. Li, 1990) [28]

3.2.4. Influência da adição de hidrogênio no gás de proteção no comportamento do arco

A adição de percentuais de hidrogênio ao argônio no gás de proteção para o processo TIG resulta em aumento da tensão do arco. Essa tendência é mostrada em diferentes trabalhos, [7, 28, 31] e também é bastante conhecido na prática. A Figura 28 mostra características estáticas do arco na soldagem TIG com Ar puro e misturas Ar- H_2 com 0,5, 5 e 20% de hidrogênio, obtidas por Tusek e Suban [7], de modo que conforme maior adição de hidrogênio ao argônio, a tensão do arco se torna mais elevada.

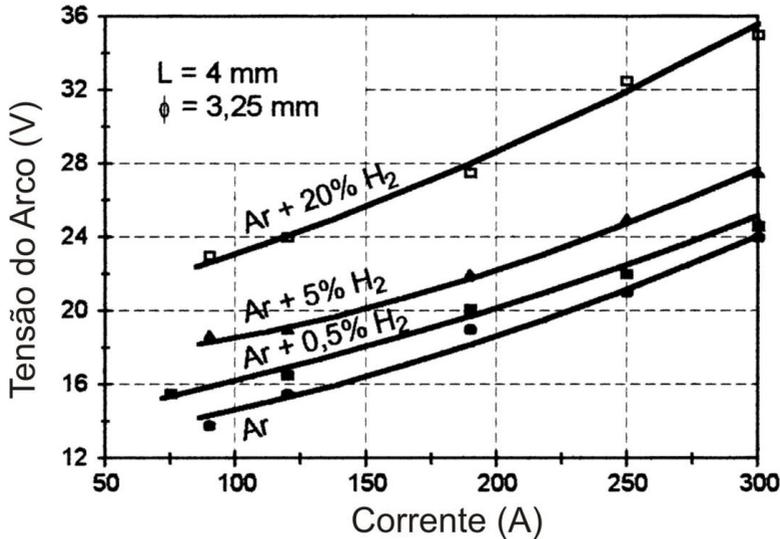


Figura 28 - Característica estática na soldagem TIG com diferentes percentuais de hidrogênio no gás de proteção (DEP = 4mm, eletrodo negativo) [7]

Diferenças na tensão do arco devido a mudanças na composição do gás de proteção podem ser atribuídas a diferenças no potencial de ionização do gás. Entretanto, conforme está mostrado na Tabela 1, não existe diferença significativa entre o potencial de ionização do argônio e o potencial de ionização do hidrogênio [28]. A explicação para a maior tensão no caso das misturas Ar+H₂ se deve ao fato da maior condutividade térmica, que é bastante elevada principalmente por conta da recombinação do hidrogênio dissociado [28, 30]. Desde que mais energia é dispensada por unidade de tempo por condução térmica no caso do arco de Ar-H₂ do que no caso do arco de Ar puro, mais energia é requerida para manter uma determinada corrente no arco. Segundo Hooijmans [28], a força do campo elétrico da coluna do arco aumenta com o aumento da percentagem de hidrogênio no gás de proteção. Aparentemente, um maior campo elétrico é necessário para compensar as perdas de energia devido à maior condutividade térmica da coluna do arco e essa energia extra só pode ser fornecida pelo aumento da tensão do arco.

A Figura 29 mostra o gráfico da tensão do arco pela quantidade de hidrogênio presente no gás de proteção para soldagem em três diferentes materiais do trabalho de Hooijmans [28]: ferro-puro, aço

estrutural, e aço inoxidável. Para o ferro puro, a tensão do arco medida foi cerca de 11 V, enquanto com 25% de hidrogênio no gás resultou numa tensão de 21 V. Para aço carbono, a mudança na tensão foi virtualmente a mesma do que no caso do ferro puro, porém o autor não realizou testes com aço carbono com mais de 10% de H_2 , devido a formação de porosidade com cerca de 7,5% de H_2 . No caso do aço inoxidável, a tensão do arco no argônio puro foi cerca de 10,5 V. Com 25% de hidrogênio no gás de proteção, a tensão medida foi cerca de 18 V. O gráfico mostra que no caso da soldagem do aço inox, a tensão aumenta mais devagar do que no caso de ferro puro e aço estrutural. O autor explica que aparentemente, os elementos de liga presentes no arco para o caso da soldagem de aço inox devido à vaporização do metal de solda, reduzem a força do campo elétrico da coluna do arco. Especialmente o cromo, que tem energia de ionização relativamente baixa, pode ter um papel importante nesse efeito.

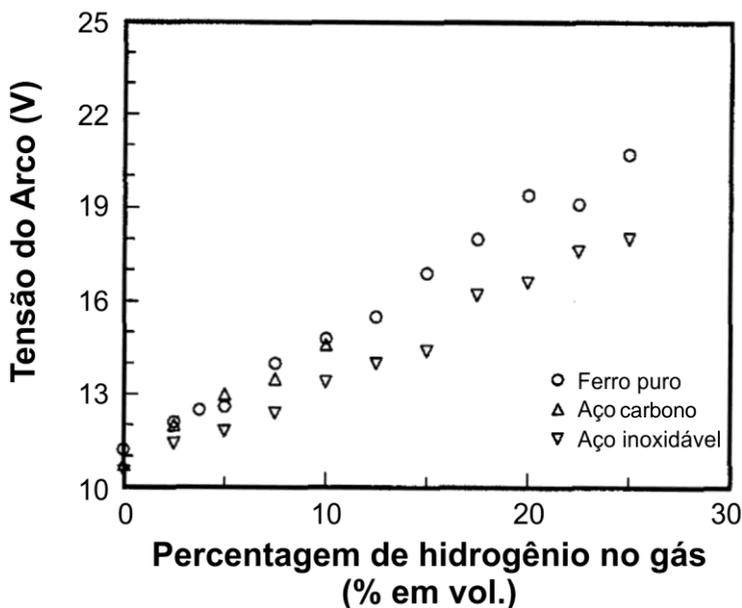


Figura 29 - Tensão do arco em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção na soldagem de ferro puro, aço carbono e aço inoxidável com arco de 100 A [28]

Segundo Hooijmans [28], a condição superficial do ânodo e do cátodo também possui um papel significante na física do arco, mudanças

no estado termodinâmico dessas superfícies podem substancialmente afetar a tensão do arco. Esse pode ser o caso da soldagem TIG, que teria as características superficiais do eletrodo modificadas devido à atmosfera de hidrogênio. A presença do hidrogênio resultaria em uma diminuição do oxigênio na camada superficial do eletrodo. Esse oxigênio, majoritariamente ligado ao tório ou zircônio, é adicionado ao eletrodo de tungstênio favorecendo a emissão de elétrons. De acordo com Modenesi [19], estes óxidos reduzem a função de trabalho efetiva do eletrodo, facilitando a emissão termiônica de elétrons no eletrodo. Assim, eletrodos dopados com óxidos de tório operam a uma menor temperatura que eletrodos de tungstênio puro, não sofrendo nenhuma fusão em sua extremidade, a qual tende a manter a sua forma original durante a soldagem (eletrodos de tungstênio puro tendem a ter a sua ponta fundida, a qual assume um formato hemisférico durante a soldagem). Adicionalmente, a queda de tensão catódica tende a ser 1 a 2 volts menor em eletrodos dopados com esses óxidos. Não foram encontrados trabalhos que mostrassem estudos sobre a influência do hidrogênio em uma possível diminuição dos óxidos da superfície do eletrodo, porém, considerando a atividade redutora do hidrogênio, poderia se esperar alguma influência.

3.2.5. Influência da adição de hidrogênio ao gás de proteção na geometria da poça de fusão

A adição de hidrogênio ao argônio no gás de proteção no processo TIG resulta em um aumento da área fundida para a mesma corrente média. A Figura 30 mostra a área de secção transversal em função da percentagem de hidrogênio no gás de proteção, retirado do trabalho de Hooijmans [27]. Pode-se verificar que a área da secção transversal aumenta de cerca de 6 para 20 mm² quando a quantidade de hidrogênio é aumentada de 0 a 10%, enquanto um maior aumento nessa percentagem de hidrogênio tem somente um pequeno efeito na área da secção transversal. Os resultados de Tusek e Suban [7] estão expostos na Figura 31, que mostra a quantidade de metal de base fundido por unidade de tempo em função do teor de hidrogênio no argônio. Três diferentes intensidades de correntes foram utilizadas, 150 A, 200 A e 250 A. Os resultados obtidos pelos dois autores mostram que a quantidade de metal fundido para a mesma corrente média aumenta fortemente com a adição de hidrogênio ao argônio na soldagem TIG.

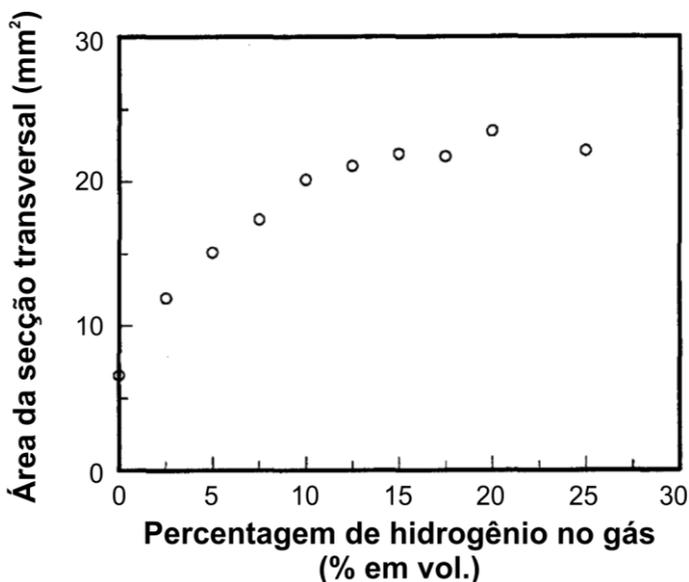


Figura 30 – Área da seção transversal no ferro puro em função da porcentagem de hidrogênio no gás de proteção (I: 100 A, DEP 3 mm, Velocidade de Soldagem 3 mm/s) [28]

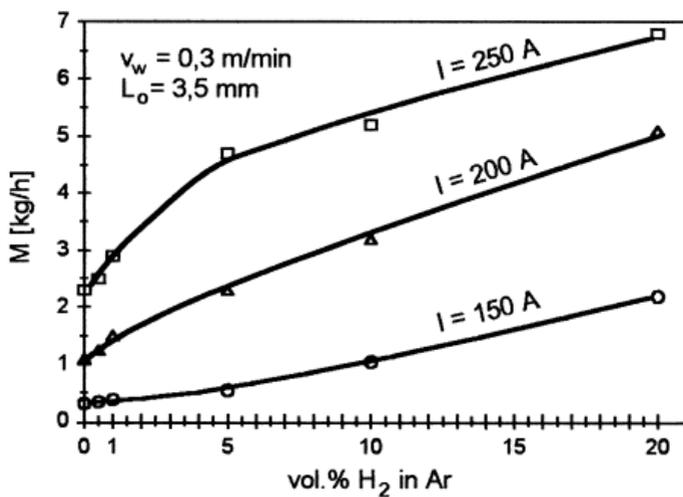


Figura 31 - Efeito da adição de Hidrogênio no Argônio (% em vol) e da corrente de soldagem na quantidade de metal de base fundido pelo processo TIG (aço inox 18/8, DEP: 3,5mm, vs: 0,3m/min, eletrodo negativo)

[7]

3.2.6. Influência da adição de Hidrogênio ao gás de proteção na eficiência de fusão para o processo TIG

A adição de hidrogênio ao argônio do gás de proteção no processo TIG resulta em aumento da eficiência de fusão do arco para a mesma corrente média. No trabalho de Hooijmans [28] é possível verificar que a eficiência de fusão aumenta com o aumento da quantidade de hidrogênio, passando de cerca de 0,1 para o argônio puro para cerca de 0,3 quando se adiciona 7,5% H₂ ao Ar. O autor sugere também que o aumento observado na eficiência de fusão é consequência direta da contração da coluna do arco e do aumento da condutividade térmica do gás de proteção com a adição de hidrogênio. Os resultados obtidos no trabalho de Tusek e Suban [7] relativos à eficiência de fusão na soldagem TIG em função do conteúdo em hidrogênio no argônio são mostrados na Figura 32. Com o aumento do teor de hidrogênio a eficiência fusão aumenta também. A eficiência de fusão também é maior no caso de uma corrente mais alta intensidade.

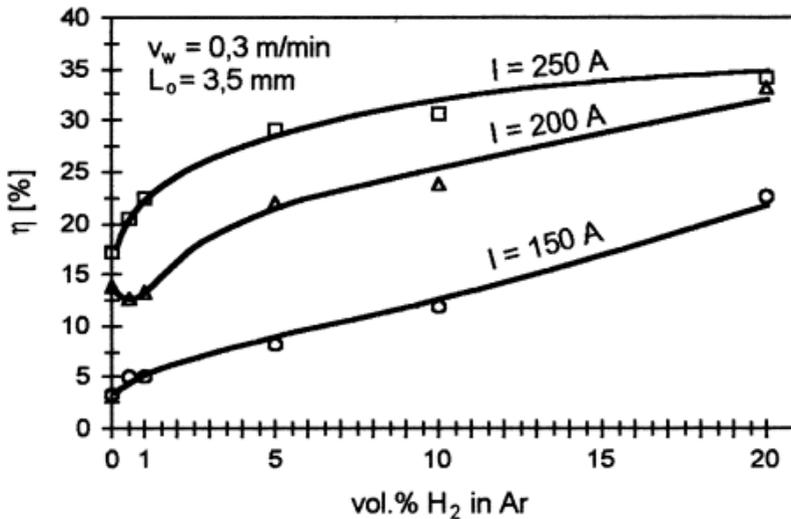


Figura 32 - Efeito da adição de Hidrogênio ao Argônio no gás de proteção, e da intensidade da corrente de soldagem sobre a eficiência de fusão na soldagem TIG [7]

4. DESENVOLVIMENTO DE SOLUÇÕES PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO TIG EM ALTA VELOCIDADE

De acordo com as considerações sobre eficiência de fusão e a possibilidade de contornar os problemas de aparecimento de “humping” foi vislumbrada a possibilidade de aplicação do processo TIG em situações não pensadas anteriormente. A concepção dos experimentos foi direcionada pelas propriedades obtidas com cada uma das situações apresentadas anteriormente. O hélio que poderia ser uma solução é caro, portanto o uso de misturas de argônio com hidrogênio aparece como alternativa.

4.1. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA SOLDAGEM TIG COM DIFERENTES GASES

Ao longo da seção 4 foram mostrados diferentes aspectos relativos a soldagem TIG com elevada velocidade e formação de defeitos nessa situação. Também estão mostrados dados de autores com resultados de ensaios de soldagem com os gases Ar, He e misturas Ar-H₂, porém não foi encontrado nenhum trabalho que mostrasse comparações em condições experimentais equivalentes. Dessa forma foi necessária a realização de ensaios para comparar o desempenho desses três gases nas mesmas condições experimentais, facilitando assim a interpretação e correlação dos resultados mostrados pelos diferentes trabalhos encontrados.

Esses ensaios de soldagem foram do tipo cordão sobre chapa, realizados em chapas de aço carbono de 3/8” de espessura. Foram usadas três correntes médias diferentes: 200, 300 e 400 A. As correntes foram escolhidas pois representam uma faixa de corrente que já permitiriam soldagem em elevada velocidade. Todos os ensaios foram realizados com 5 mm/s, sendo que essa velocidade relativamente baixa foi escolhida com objetivo de proporcionar cordões de solda contínuos, sem formação de defeitos tipo *humping*. Dessa forma, seria possível uma melhor análise da influência de cada gás. Durante a soldagem, os sinais de corrente e tensão foram aquiritados usando sistema de medição apropriado e, após a soldagem, os corpos de prova foram cortados em duas seções transversais diferentes, preparados metalograficamente, para que a área de cada seção transversal fosse medida. A distância eletrodo-peça utilizada em todos os ensaios foi 3 mm. As outras informações referentes aos equipamentos, materiais e métodos utilizados nesses ensaios estão detalhadas no anexo A.

As Figura 33, 34 e 35 mostram o aspecto da superfície dos cordões obtidos com cada gás utilizado com corrente média de 200 A, 300 A e 400 A respectivamente. Os cordões foram soldados da direita para a esquerda da imagem.

Os ensaios com argônio puro no gás de proteção mostraram a forte tendência de formação de *humping*, mesmo com velocidade de soldagem relativamente baixa. Obteve-se o cordão contínuo somente com corrente de 200 A. Com a corrente de 300 A já ocorreu formação de defeitos em cerca de metade do cordão e, usando 400 A, ocorreu formação de defeitos em todo o cordão. É natural esperar que a morfologia do cordão e até o resultado da área fundida para as amostras onde ocorreu *humping* será diferente da área fundida de uma amostra sem problemas, pois a atuação do arco na poça de fusão em cada caso também é diferente. Nos ensaios utilizando hélio como gás de proteção não ocorreu o aparecimento de defeitos de soldagem. Esses resultados concordam com os resultados dos ensaios com Ar e He encontrados nos ensaios de Savage et al [18], considerando que nos resultados no caso do Ar ficou claro a tendência de diminuição da velocidade limite para aparecimento de defeitos com o aumento da corrente de soldagem e que no caso da utilização do hélio resultou em maior velocidade limite para aparecimento de defeitos em comparação com o Argônio puro.

Os ensaios realizados com as mistura Ar-H₂ mostraram que a adição de pequenos percentuais de hidrogênio ao argônio resultou em um melhor desempenho em relação ao aparecimento de *humping* em comparação com o Ar puro. Para o caso da mistura Ar+5%H₂, no cordão soldado com 300 A não ocorreu a formação de *humping*. No ensaio com 400 A ficou nítido uma grande instabilidade durante a soldagem, sendo que a poça de fusão formava uma cratera que quase resultava em *humping*, porém o metal líquido ainda conseguiu preencher as crateras e formar o cordão contínuo antes da solidificação completa. Pode-se observar que o cordão ficou com aspecto escamado devido a essas instabilidades. Os ensaios realizados com as misturas com as mistura Ar+10%H₂ e Ar+15%H₂ apresentaram cordões sem aparecimento de defeitos em todas as correntes testadas, porém foi possível notar que para mistura Ar+15%H₂ ocorreu um forte aparecimento de porosidade aberta na superfície.

I: 200 A Vs: 30 cm/min

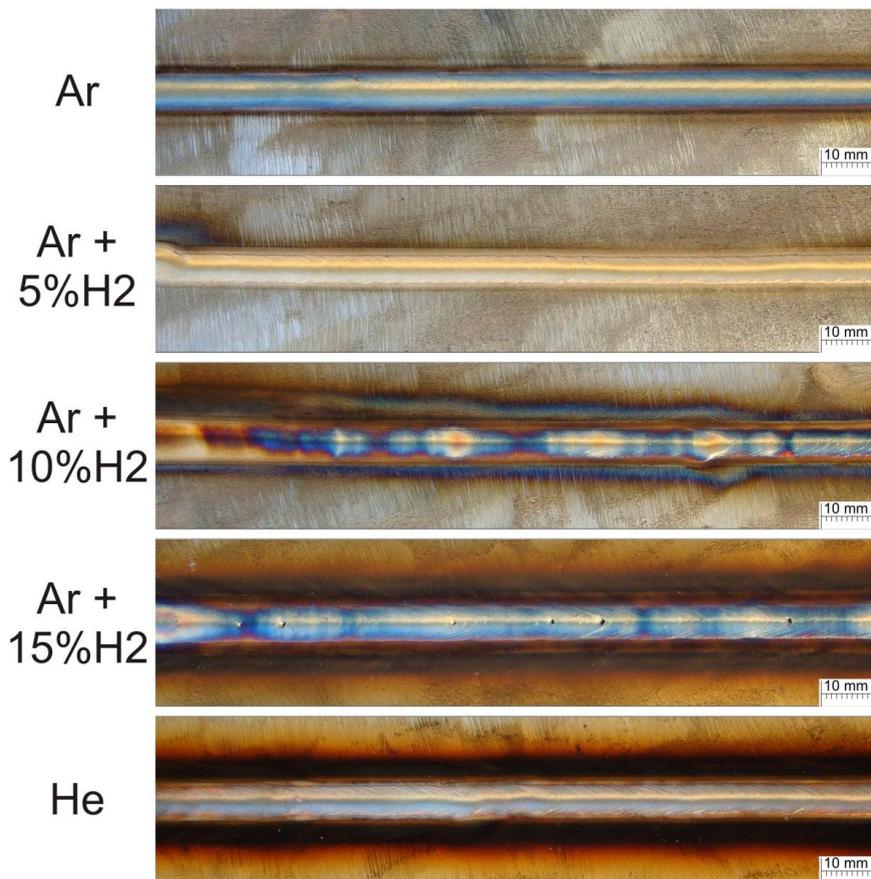


Figura 33 - Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 200 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm)

I: 300 A Vs: 30 cm/min

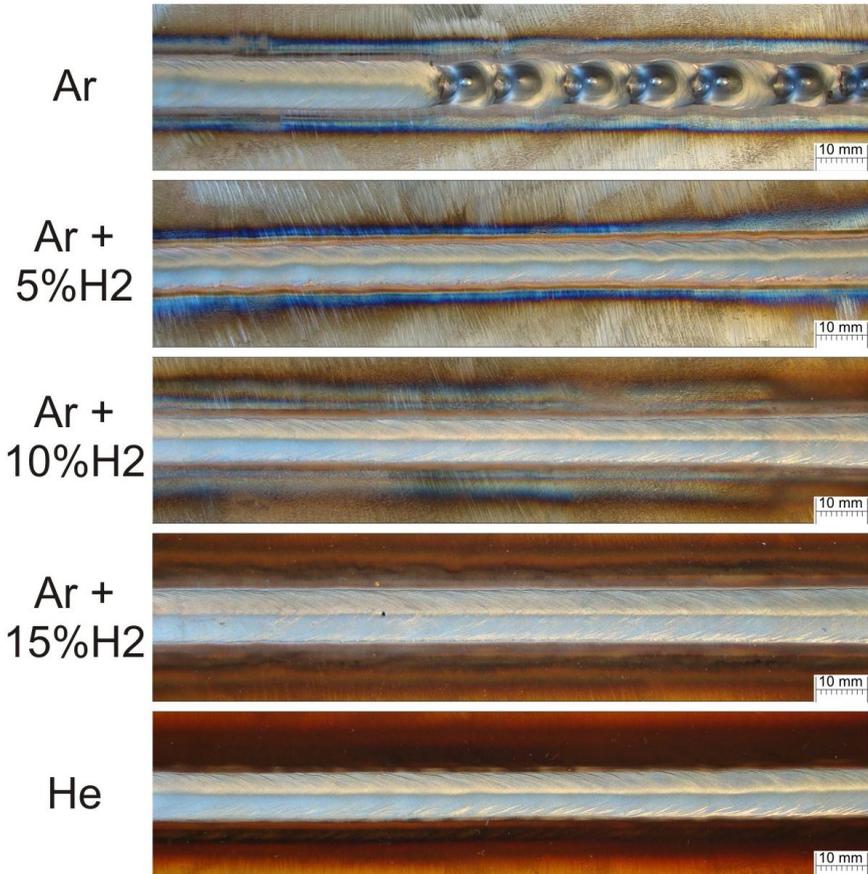


Figura 34 - Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 300 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm)

I: 400 A Vs: 30 cm/min

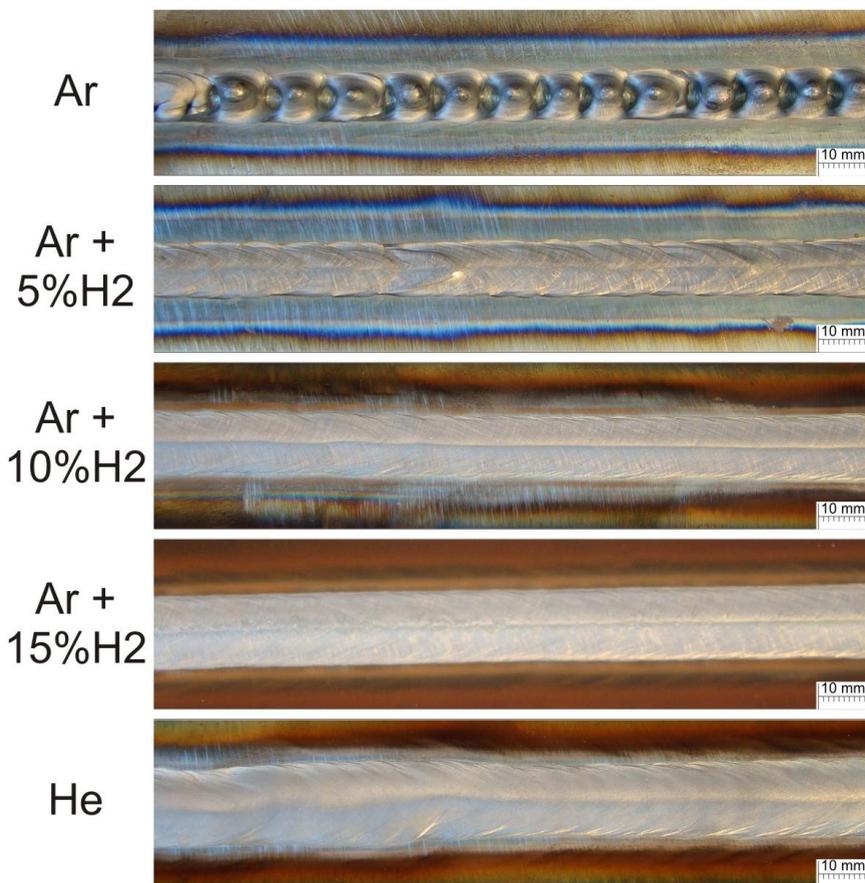


Figura 35 - Aspecto superficial dos cordões com diferentes gases (I: 400 A; Vs: 30 cm/min; Distância eletrodo peça: 3,0mm)

As Figura 36 e 37 mostram as seções transversais dos cordões soldados cortados na distância de 100 e 150 mm do início da soldagem respectivamente. Primeiramente é possível destacar a elevada formação de porosidade quando utilizada a mistura Ar+15%H₂, sendo essa porosidade já havia sido observada na superfície do cordão de solda. Isso vai ao encontro do que foi citado no item 3.2.1, que o uso de maiores teores de hidrogênio causa aumento do surgimento de porosidade.

Conforme citado anteriormente, ocorreu diferença no perfil de penetração no caso do cordão realizado com Ar puro e 300 A, considerando a região que ocorreu o *humping* (início do cordão) a qual resultou em um ponto com maior penetração, e a região onde não ocorreu o defeito de soldagem (final do cordão) que resultou em cordão com maior largura e menor penetração. Uma explicação para isso seria que no caso da situação sem *humping* o arco tende a agir sobre a poça de fusão, resultando em menor penetração.

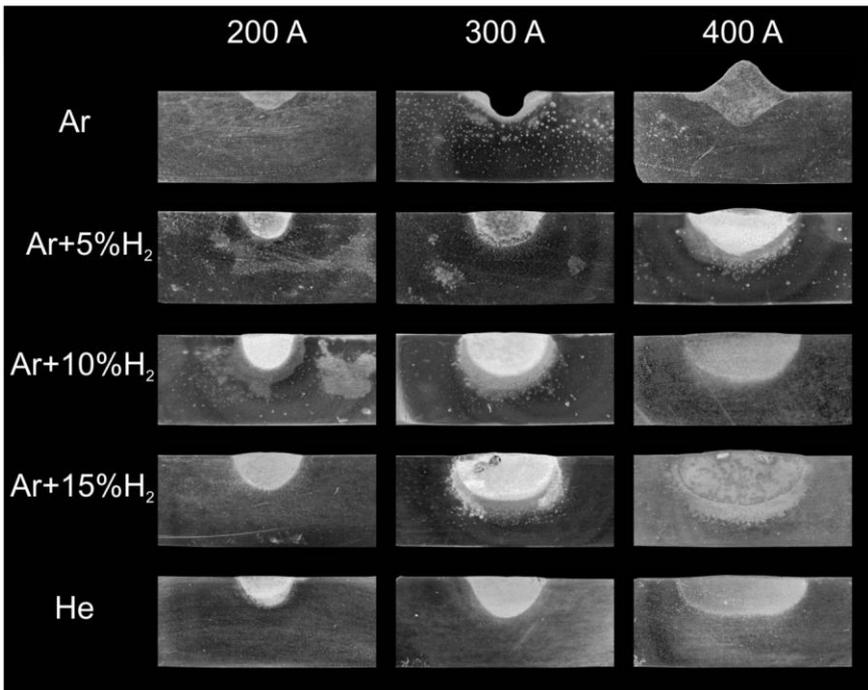


Figura 36 - Seção transversal cortada à 100 mm do início do cordão (Soldagem realizada com o processo TIG com distância eletrodo-peça de 3 mm e misturas gasosas)

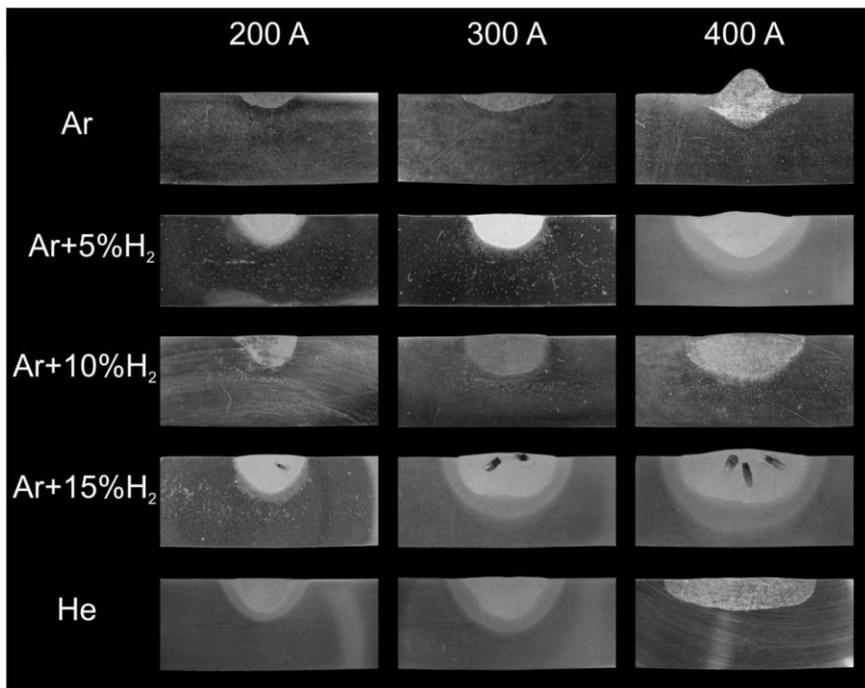


Figura 37 - Secção transversal cortada à 150 mm do início do cordão (Soldagem realizada com o processo TIG com distância eletrodo-peça de 3 mm e misturas gasosas)

A Figura 38 mostra a quantidade de metal fundido em kg/h calculado a partir da medição da secção transversal. É possível verificar que para a mesma corrente média o hélio funde uma quantidade maior de material em comparação com o argônio puro. Nas misturas Ar-H₂, conforme o teor de hidrogênio foi aumentado, aumentou-se fortemente a quantidade de metal fundido para a mesma corrente média, sendo que para a mistura com maior teor de hidrogênio a quantidade de metal fundido foi consideravelmente maior do que utilizando hélio puro e cerca de 2,5 vezes maior do que utilizando argônio puro.

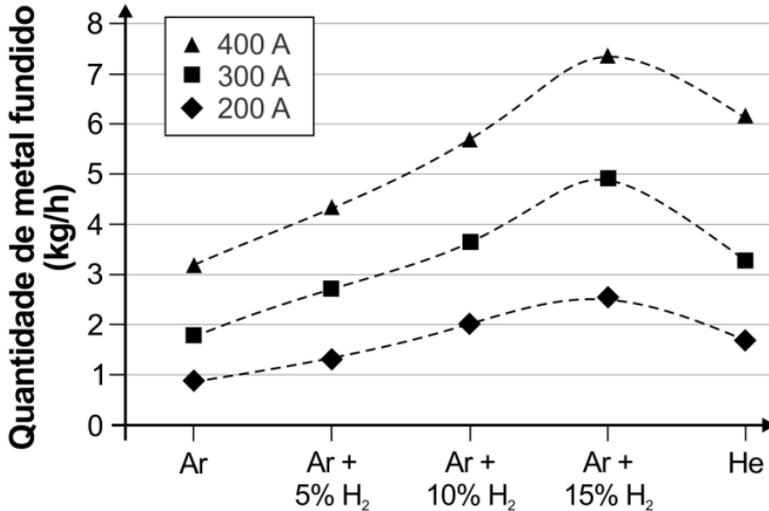


Figura 38 - Quantidade de metal fundido utilizando o processo TIG para os diferentes gases (Distância eletrodo-peça 3 mm)

A Figura 39 mostra a tensão média para os diferentes gases testados com corrente de 200, 300 e 400 A. Pode-se notar que ocorrem grandes diferenças no valor da tensão do arco conforme se modificam dos diferentes gases com a mesma distância eletrodo-peça e mesma corrente média. Já é conhecido que o arco com Hélio resulta em uma tensão muito maior do que o arco com Ar puro. E esse fato também se confirmou nos ensaios realizados, onde o arco com He apresentou na média cerca de 5 V a mais de tensão do que o arco com Ar puro. Foi possível confirmar também o que a adição de hidrogênio ao argônio causa aumento da tensão do arco, sendo que a mistura Ar-15%H₂ apresentou tensão equivalente ao arco com Hélio puro.

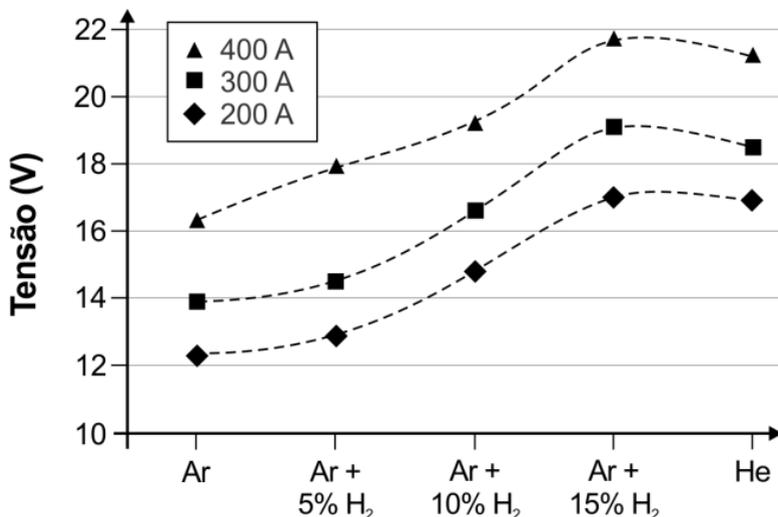


Figura 39 - Tensão do arco utilizando o processo TIG com diferentes gases de proteção (Distância eletrodo-peça 3 mm)

A Figura 40 mostra a eficiência de fusão média em relação à potência elétrica total de soldagem para cada gás de proteção calculada com a Equação 2 mostrada no item 2.1.2. Pode-se verificar que a adição de hidrogênio ao argônio no gás de proteção resultou em um forte aumento da eficiência de fusão, sendo que o aumento foi proporcional à quantidade de hidrogênio presente no gás. Nota-se também que as misturas Ar-H₂ com teores de 10 e 15% de H₂ resultaram em maior eficiência de fusão do que o He.

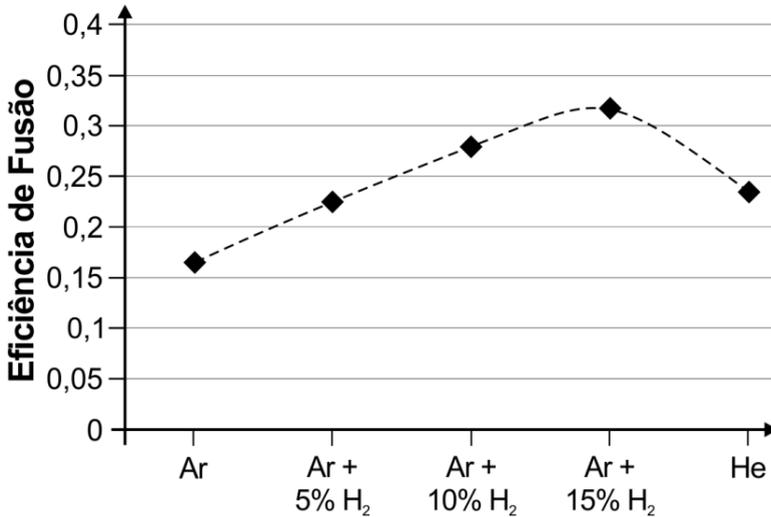


Figura 40 - Média da eficiência de fusão para cada mistura gasosa

Para facilitar a análise das diferenças da penetração entre as misturas gasosas testadas, a Figura 41 mostra o perfil de penetração simétrico médio obtido em cada caso. Esse perfil foi obtido pela média dos perfis obtidos em cada uma das duas posições dos corpos de prova.

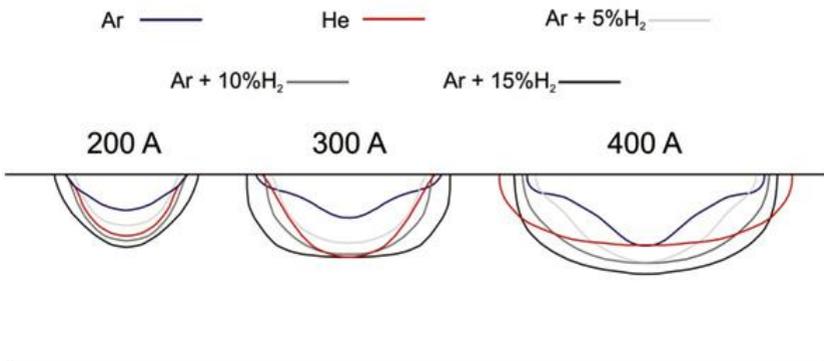


Figura 41 – Perfil de penetração desenhado com base no perfil de penetração obtido na soldagem real em cada caso.

Considerando essa comparação entre os perfis de cada cor, pode-se notar que a penetração no caso do He é sempre muito maior do

que para o caso do Ar puro. Além disso, para as três correntes testadas, o cordão com a mistura Ar-5% H_2 apresentou menor largura do que o cordão com Ar puro. Esse efeito de constrição do arco com a adição de H_2 também foi observado por outros autores [7, 28].

4.2. EXEMPLOS DE SOLDAGEM TIG DE ELEVADA PRODUTIVIDADE

Ao longo do presente trabalho estão apontados diferentes aspectos referentes à produtividade dos principais processos de soldagem a arco, os quais buscam apresentar uma visão mais dinâmica e realista sobre o assunto em comparação com o que está mostrado tradicionalmente na literatura. No conteúdo apresentado ficou claro que alguns dos paradigmas apresentados não estão baseados em premissas corretas, principalmente com relação ao TIG que é apontado como processo que apresenta obrigatoriamente baixo rendimento térmico e baixa produtividade. Na seqüência do texto serão mostrados exemplos práticos de soldagem de peças reais, as quais são soldadas na indústria tradicionalmente com o processo MIG/MAG. Porém, podem apresentar maior produtividade com o processo TIG, mantendo velocidade de soldagem semelhante.

4.2.1. Soldagem de compressores herméticos para refrigeração

A carcaça dos compressores herméticos usados para refrigeração é fabricada a partir de chapas de aço baixo carbono com cerca de 3 mm de espessura. As chapas são estampadas formando duas peças, o corpo, dentro do qual os componentes mecânicos do compressor são montados, e a tampa, que é encaixada em cima do corpo formando uma junta sobreposta.

Nas fábricas de compressores, tradicionalmente o processo MIG/MAG é empregado com velocidade de soldagem de aproximadamente 1,2 m/min. O desafio era realizar essa soldagem utilizando o processo TIG de maneira autógena, sem utilizar material de adição, para obter uma junta soldada com qualidade que garantisse a estanquidade do componente ao longo de toda vida útil do compressor. Além disso, o tempo de ciclo de soldagem de cada peça não deveria ser aumentado, ou seja, a soldagem com o TIG deveria ser realizada com velocidade equivalente ao que estava sendo obtido com o MIG/MAG.

Inicialmente, esse desafio parecia distante. Nos primeiros ensaios de soldagem, que foram realizados em chapas de aço posicionadas em juntas sobrepostas, ao utilizar o processo TIG com corrente de soldagem elevada na tentativa de obter maior velocidade ocorria o aparecimento de descontinuidades no cordão de solda mesmo em velocidades de soldagem baixas. Apesar de vários ensaios realizados, a maior velocidade de soldagem que foi possível obter uma junta soldada formando um cordão contínuo utilizando o argônio puro no gás de proteção foi 40 cm/min, cujo resultado da soldagem está mostrado na Figura 42. Nos ensaios com velocidades maiores usando o TIG convencional, como por exemplo o teste realizado com 45 cm/min mostrado na Figura 43, já ocorreu grande quantidade de falhas no cordão de solda.

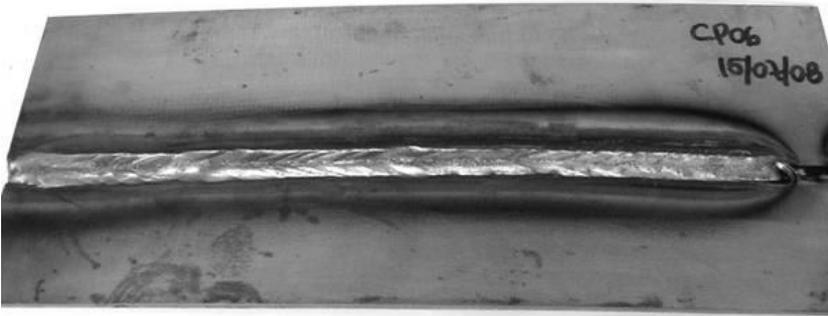


Figura 42 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 40 cm/min; Gás de proteção: Argônio puro)



Figura 43 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 45 cm/min; Gás de proteção: Argônio puro)

Com o uso de misturas contendo hidrogênio foi possível a obtenção de resultados muito melhores do que com o argônio puro. Usando as mesmas condições de soldagem anteriores, e também a mesma corrente média, foi possível obter juntas soldadas com boa qualidade com o dobro da velocidade que havia sido obtido com argônio puro. A Figura 44 mostra o resultado da soldagem com 80 cm/min usando a mistura Ar+8% H_2 .

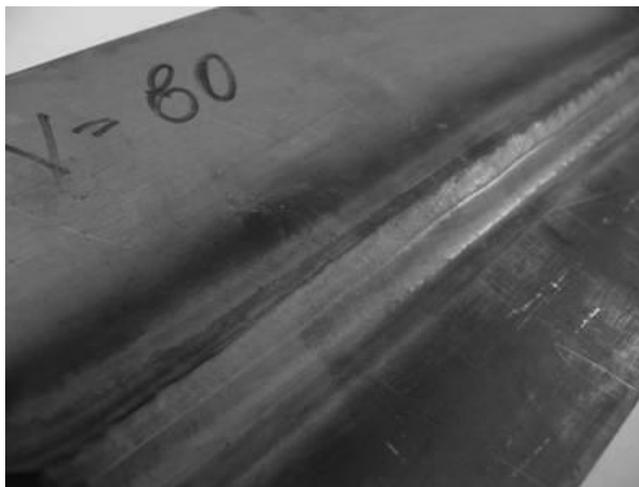


Figura 44 - Resultado de soldagem usando o processo TIG em chapas de aço de 3 mm de espessura (Junta sobreposta; Velocidade de soldagem 80 cm/min; Gás de proteção: Ar + 8% H_2)

Depois que os ensaios realizados em chapas usando misturas contendo hidrogênio mostraram resultados indicando que o processo TIG poderia funcionar com velocidades de soldagem próximas a 1 m/min, os ensaios começaram a ser realizados em carcaças de compressores. Ao longo de cerca de dois anos de desenvolvimento foram realizados vários testes para melhorar o desempenho do processo. Os principais parâmetros que foram modificados para obter melhores resultados foram ângulo de ataque da tocha de soldagem, a posição do eletrodo em relação à junta, a distância eletrodo-peça e o diâmetro e afiação do eletrodo. O gás de proteção também teve grande influência no resultado, sendo que o melhor desempenho foi obtido com a mistura Ar+15% H_2 , que foi a mistura com maior teor de hidrogênio testada. Anteriormente haviam sido testadas misturas com 5, 8 e com 10% de H_2 . A Figura 45 mostra uma imagem de compressores soldados durante o desenvolvimento.



Figura 45 - Compressores soldados nos testes realizados

Além dos testes mudando os parâmetros de soldagem para melhorar o desempenho do processo, ao longo do desenvolvimento foi surgindo necessidade de adaptação e desenvolvimento nos equipamentos que estavam sendo utilizados. O processo TIG apresenta maior dificuldade de automatização do que o processo MIG,

principalmente por conta das dificuldades de abertura do arco, e pela necessidade de maior controle da distância eletrodo-peça. Essas questões ficam mais críticas quando se pretende realizar a soldagem em elevada velocidade. Para viabilizar a operação com o processo TIG automático, foi necessário desenvolver um equipamento, chamado de AVC (*arc voltage control*), o qual tem como objetivos principais realizar a abertura do arco e controlar a distância eletrodo-peça durante a soldagem. Esse equipamento é formado basicamente por um sistema mecânico ligado a um motor elétrico usado para deslocar a tocha de soldagem com um grau de liberdade, afastando ou aproximando a tocha da peça, e um sistema eletrônico microcontrolado que realiza a leitura da tensão do arco e modifica o posicionamento da tocha de soldagem. Além disso, o dispositivo também realiza comunicação com a fonte de soldagem e com o robô utilizado para soldagem. A Figura 46 mostra a evolução das versões do equipamento que foi desenvolvido e melhorado para atender as necessidades do processo de soldagem.

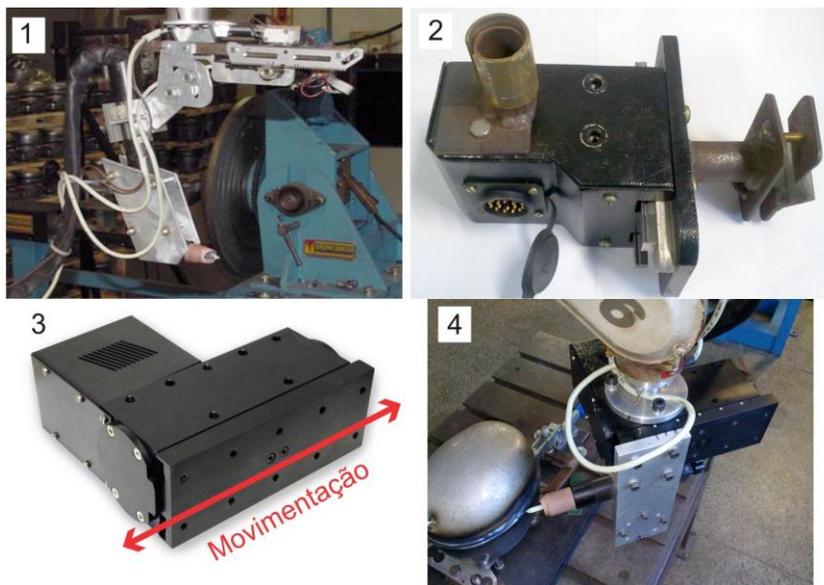


Figura 46 - Evolução do sistema mecânico do AVC: (1) Primeiro protótipo desenvolvido para testes; (2) Segundo protótipo desenvolvido; (3) Terceiro protótipo desenvolvido; (4) AVC preso ao robô de soldagem de seis eixos para soldagem do compressor.

A fonte de soldagem também sofreu modificações no software de controle, sendo que foram incorporados patamares e rampas na corrente de soldagem, usados principalmente nas regiões de início e fim do cordão, as quais são as mais complicadas.

Ao final do período de desenvolvimento foi possível obter a soldagem da junta do corpo do compressor com boa qualidade e atingindo velocidade de até 1,5 m/min. A Figura 47 mostra o aspecto superficial e a Figura 48 mostra a seção transversal do cordão de solda obtido. Os compressores soldados pelo processo TIG foram aprovados segundo os critérios do fabricante, o qual realizou testes de fadiga e de vazamento. Esse desenvolvimento da soldagem dos compressores com o processo TIG foi o tema principal do trabalho de mestrado de Ietka [32].

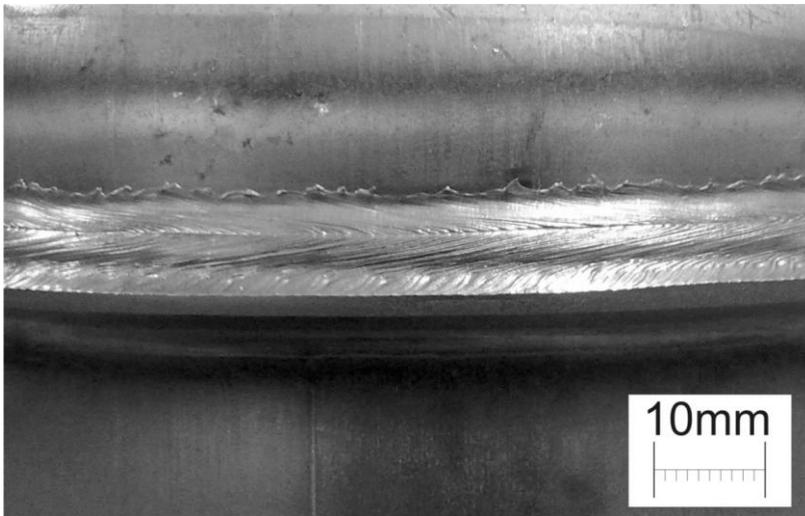


Figura 47 - Aspecto do cordão obtido utilizando o processo TIG autógeno usado para soldagem de união de compressores herméticos para refrigeração (Velocidade de soldagem 1,5 m/min)

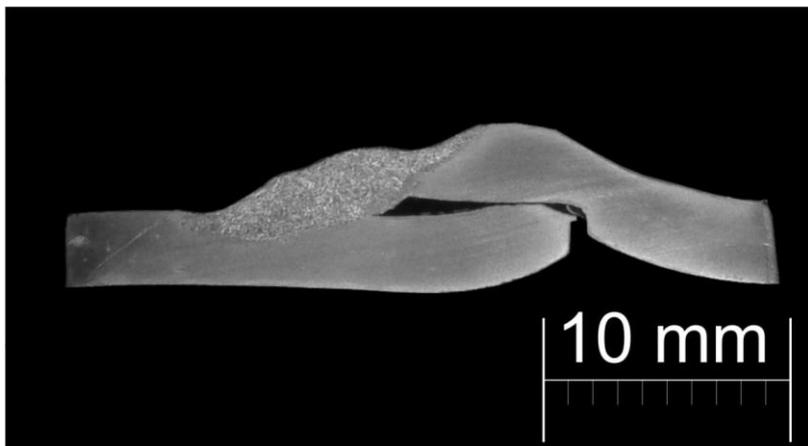


Figura 48 - Secção transversal soldagem utilizando o processo TIG autógeno usado para soldagem de união de compressores herméticos para refrigeração (Velocidade de soldagem 1,5 m/min)

Após esse desenvolvimento, ficou claro que utilizar o processo TIG em elevada produtividade depende de um maior nível de automatização do processo e de equipamentos de maior tecnologia, os quais normalmente não estão disponíveis no Brasil. Além disso, o fato do processo ser realizado de maneira autógena exige melhores condições dimensionais da junta para que não ocorram defeitos. Nessa questão, o processo MIG/MAG é mais robusto à variações da junta pois a adição do material fundido do arame contribui para absorver possíveis variações.

Apesar disso, ficou claro que o processo TIG pode ser utilizado com elevada produtividade e com velocidades de soldagem tão elevadas quanto o processo MIG/MAG. O fato de realizar a soldagem de maneira autógena eliminando o uso de arame do processo e representa uma vantagem econômica importante, diminuindo os custos do produto.

4.2.2. Soldagem de componentes da indústria automobilística

Outro exemplo onde o processo TIG pode ser aplicado para soldagem de elevada produtividade em substituição ao processo MIG/MAG é a soldagem de peças da indústria automobilísticas que fazem parte de componentes estruturais do conjunto de chassi de automóveis. Essas estruturas são construídas a partir de chapas de aço estampadas que depois são soldadas, normalmente utilizando o processo

MIG/MAG. De maneira semelhante ao que foi feito no caso dos compressores e utilizando a tecnologia desenvolvida no LABSOLDA, foram realizados alguns testes de soldagem dessas peças utilizando o processo TIG automatizado sem usar material de adição. As Figura 49 e 50 mostram a peça soldada e a Figura 51 mostra uma macrografia da junta soldada, com as dimensões em milímetros. Os parâmetros de soldagem usados nessas peças foram: Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15%H₂.



Figura 49 - Componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG (Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15%H₂)



Figura 50 - Detalhe do aspecto da solda de componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG. (Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15% H_2)

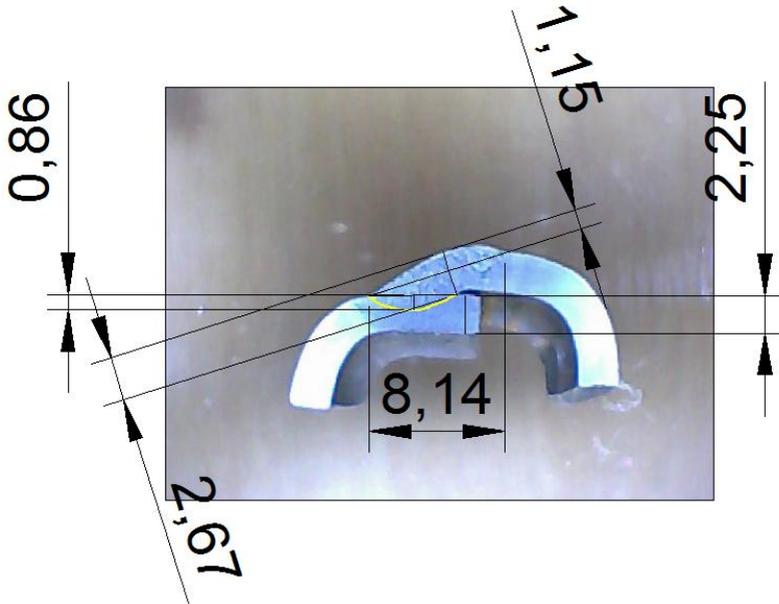


Figura 51 - Macrografia da seção transversal do componente do conjunto de suspensão de automóvel soldado com o processo TIG (Velocidade de soldagem 90 cm/min; Corrente: 340 A; Tensão do arco: 19 V; Gás de proteção: Ar+15% H_2)

No caso da peça mostrada acima, foram realizados poucos testes, pois não havia uma maior quantidade de peças disponíveis. Com um número maior de peças, certamente poderia ser alcançado maior velocidade de soldagem a medida que os parâmetros de soldagem fossem melhorados. Apesar dos poucos testes, o processo TIG apresenta um bom potencial de utilização. Já foram identificadas outras peças semelhantes usadas na indústria automobilística na qual o processo poderia ser aplicado.

4.3. ANÁLISES E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Ao longo da Seção 3 do presente trabalho, foram mostrados diferentes aspectos relacionados com a soldagem TIG de elevada velocidade. Inicialmente foram analisadas as informações encontradas nos trabalhos científicos sobre a formação dos defeitos em soldagem TIG de elevada velocidade. Mostrou-se também a influência das variáveis de soldagem na ocorrência dos defeitos. Além disso, foram

expostas informações sobre a influência da adição de misturas Ar-H₂ na soldagem TIG e foi realizada uma série de ensaios em condições semelhantes com os gases Ar, He e misturas Ar-H₂, com objetivo de fornecer informações adicionais para comparação dos diferentes gases.

É possível realizar uma análise das informações que foram obtidas de maneira conjunta sobre a soldagem TIG com elevada velocidade e sobre o principal problema que ocorre nessa condição que é a formação de defeitos no cordão de solda.

Primeiramente, pode-se afirmar que os trabalhos encontrados sobre a formação de defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade [15-20] analisam o assunto de maneira incompleta. Especialmente, os trabalhos de Mendez et al [15-17; 20] consideram que o fator chave para o surgimento de defeitos seria a pressão do arco que age sobre a poça de fusão. Essa afirmação é sustentada usando como exemplo a maior velocidade de soldagem sem ocorrência de defeitos para a mesma corrente média no caso da soldagem com hélio em comparação com o argônio puro e também as medições de pressão do arco para cada gás. Conforme foi mostrado nos resultados dos diversos autores [21, 23, 24, 25 e 27], realmente o arco com hélio apresenta pressão consideravelmente menor do que o arco com argônio para a mesma corrente média. Além disso, certamente é possível obter velocidades de soldagem sem ocorrência de defeitos muito maiores usando o gás hélio do que usando o argônio, sendo que isso já estava mostrado nos resultados de Savage et al [18]. Os ensaios do presente trabalho que estão no Item 4.1, também mostraram claramente essa tendência. O problema é que o presente trabalho não considera correto atribuir que a diferença de pressão do arco dos dois gases seja o principal fator responsável pela diferença de velocidade. Foi mostrado nos ensaios do Item 4.1, e de certa forma é de conhecimento geral, que para a mesma corrente média, a quantidade de material fundido para o processo TIG é muito maior usando o hélio no gás de proteção do que usando o argônio puro. No Item 3.1, onde está mostrado o esquema didático que explica a formação do *humping*, encontrado nos trabalhos de Mendez et al [15-17], a formação do cordão solidificado de maneira descontínua é resultado da deformação da poça de fusão devido a elevada pressão do arco, fazendo com que o calor do arco não seja suficiente para manter toda a poça de fusão aquecida, causando a solidificação prematura de regiões da poça de fusão. Dessa forma, mesmo que os arcos com argônio e hélio resultassem em uma mesma pressão sobre a poça, considerando a mesma corrente média, a quantidade de material fundido pelo hélio seria muito maior do que pelo argônio, e certamente, iria

manter a poça aquecida e postergar a solidificação prematura e o aparecimento do *humping*. Considera-se uma falha os autores [15-20] não considerarem isso em suas avaliações, principalmente no caso de Savage et al [18], que realizou uma grande quantidade de ensaios experimentais avaliando diversos aspectos. Porém, em todo trabalho simplesmente não cita a maior capacidade de fusão do hélio para a mesma corrente média, que seria logicamente um fator importante que deveria ser ressaltada. Ao invés disso, esses autores procuram explicar a formações dos defeitos somente pelo ponto de vista da diferença de pressão entre os dois gases.

Com isso, o presente trabalho questiona o papel da pressão do arco como agente fundamental na formação dos defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade e os resultados do desempenho do processo usando as misturas argônio-hidrogênio também fornecem informações nesse sentido. Nos exemplos práticos de soldagem de compressores e peças do setor automotivo usando o processo TIG que foram mostrados no Item 4.2, e também nos ensaios tipo cordão sobre chapa do Item 4.1, ficou claro a utilização de hidrogênio no gás de proteção aumenta a velocidade limite para a formação de defeitos, postergando o aparecimento de *humping*, em comparação com a situação usando argônio puro. Não foram encontrados trabalhos que mostrassem resultados de medições de pressão do arco para o processo TIG com misturas Ar-H₂. Porém, o trabalho de Schinick et al [23] que mostrou medições de pressão do arco para o processo Plasma onde as situações com Ar puro e mistura Ar+5%H₂ tiveram pressão de arco equivalente, enquanto para a situação usando o He resultou forte diminuição da pressão de arco. No trabalho de Zähr et al [24], apesar do trabalho não mostrar resultados, os autores afirmam que a adição de hidrogênio ao argônio causa aumento na velocidade das partículas do plasma e que isso também resultaria em um aumento na pressão do arco. Dessa forma, não foram encontrados indícios de que a adição de pequenos teores de hidrogênio ao argônio possa causar diminuição da pressão do arco, pelo contrário, as informações disponíveis que foram citadas indicam que a pressão do arco para as misturas Ar-H₂ seria igual ou até maior do que a pressão do arco do Ar puro.

Quanto à quantidade de material fundido, os resultados dos autores [4, 7 e 28] mostram que a adição de pequenos percentuais de H₂ ao Ar causa forte aumento da quantidade de material fundido para a mesma corrente média, sendo que essa tendência também ficou clara nos ensaios do Item 4.1. A partir disso, novamente é possível afirmar que a maior quantidade de material fundido, resultado da adição de

hidrogênio ao argônio, foi o fator responsável por aumentar a velocidade limite para o aparecimento de defeitos na soldagem TIG, já que supostamente a pressão do arco para a mistura Ar-H₂ não diminuiu.

Dessa forma, propõe-se uma abordagem mais completa do ponto de vista prático do que aquelas encontradas nos trabalhos referenciados de [15-20] que tratam da formação dos defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade. Logicamente, a pressão do arco resultante do uso dos diferentes gases de proteção possui um papel importante e seu efeito não pode ser ignorado (considerando que o aumento da corrente de soldagem causa um forte aumento da pressão de estagnação agindo sobre a poça, capaz de deslocar o metal líquido sob o arco causando o surgimento de uma cratera que tende a induzir a formação dos defeitos tipo *humping* dependendo da velocidade de soldagem utilizada). Porém, a capacidade de gerar metal fundido proporcionada pelas características de cada gás de proteção utilizado no processo TIG aparentemente possui importância ainda maior do que a pressão do arco e, ao que tudo indica, é o que realmente determina o desempenho do processo em relação à formação dos defeitos. No caso da soldagem com argônio puro, a pressão do arco em correntes maiores que 250 A induz a formação de defeitos, já que a capacidade de gerar material fundido é baixa para esse gás. Mesmo com velocidade de soldagem relativamente baixas, como 5 mm/s por exemplo, facilmente ocorre a solidificação prematura da poça de fusão, resultando em formação de *humping*, já que o balanço entre pressão do arco e quantidade de material fundido é desfavorável. Quando se adiciona percentuais de H₂ ao Ar, a capacidade de gerar material fundido aumenta consideravelmente para a mesma corrente média, de modo que mesmo com a pressão do arco tendendo a induzir formação do *humping*, a quantidade de material fundido presente na poça é muito maior. Com a maior quantidade de material fundido, a formação da cratera e solidificação prematura de parte da poça de fusão ocorre em velocidade de soldagem mais elevada, fazendo com que a velocidade possível de se soldar sem defeitos de continuidade do cordão seja gradativamente maior conforme se aumenta o teor de H₂ na mistura (considerando, é claro, a faixa que foi testada de zero a 15% de hidrogênio). Para o caso do hélio, a menor pressão do arco certamente diminui de alguma forma a tendência de aparecimento de *humping*, porém, a quantidade de material fundido que é quase o dobro em comparação com o Ar puro para a mesma corrente média, o que certamente possui papel fundamental para formação do cordão sem defeitos em velocidades mais elevadas.

A capacidade de gerar material fundido para determinada corrente média parece ser o fator fundamental para a obtenção de soldagem TIG autógena com elevada velocidade. Por esse motivo, em comparação com os outros gases, o argônio puro não possibilita a obtenção de velocidades elevadas sem ocorrência de defeitos. O hélio também seria uma alternativa para a soldagem de elevada velocidade, proporcionando a soldagem em velocidades muito maiores do que o argônio, porém, o alto custo do gás hélio na maior parte dos casos irá tornar proibitiva sua utilização como gás de proteção em aplicações de produção de equipamentos em série. Nesse ponto, misturas de argônio contendo pequenos percentuais de hidrogênio aparecem como solução para possibilitar a aplicação de soldagem TIG de elevada velocidade, pois o custo das misturas com hidrogênio não é maior do que o argônio puro. Os resultados dos ensaios do presente trabalho mostram que uma mistura Ar+10% H_2 tem capacidade de fundir praticamente a mesma quantidade de material do que o hélio. Além disso, os testes de soldagem com a mistura Ar+15% H_2 proporcionaram quantidade de metal fundido consideravelmente maior do que usando o He, para a mesma corrente média. Nos exemplos práticos de soldagem de compressores e peças da indústria automobilística que foram mostrados, ficou claro que a maior capacidade de fusão das misturas com hidrogênio é o que possibilita aumentar o desempenho do processo.

Apesar das misturas Ar- H_2 aparecerem como uma importante ferramenta tecnológica para aumentar o desempenho no processo TIG, vale ressaltar algumas restrições a sua aplicação:

Primeiramente, o gás H_2 é potencialmente perigoso por conta do risco de incêndio e explosão, de modo que quanto maior for o percentual desse gás adicionado à mistura, maiores são os riscos envolvidos. Nos ensaios realizados foi possível verificar que misturas a partir de 10% H_2 já são inflamáveis, sendo que foi notada inclusive uma tendência de formação de chama saindo do bocal cerâmico da tocha TIG durante o tempo de pós-gás, que normalmente é utilizado para proteger da oxidação o eletrodo e o material solidificado após a finalização da soldagem.

Além disso, conforme foi citado no Item 3.2.2, existe o risco de formação de trincas induzidas por hidrogênio. Por isso, a aplicação das misturas somente é recomendada para soldagem de aços que não apresentem formação de microestrutura frágil, como por exemplo os aços austeníticos e aços baixo carbono. No presente trabalho foram realizadas diversas soldas com aços de baixo carbono e não ocorreram problemas com trincas.

Também existe o risco de formação de porosidade na soldagem dos aços devido à presença de hidrogênio, conforme foi mostrado no Item 3.2.1. O teor de hidrogênio que pode ser adicionado na mistura usada como gás de proteção sem formação de porosidade depende de diferentes fatores, como a composição química do aço, e, principalmente, os parâmetros de soldagem utilizados que irão determinar a morfologia do cordão resultante. Foi possível notar nos ensaios tipo cordão sobre chapa do Item 4.1 que ao usar a mistura Ar+15% H_2 ocorreu grande formação de porosidade retida no cordão de solda solidificado. Apesar disso, na soldagem de fechamento dos compressores herméticos para refrigeração, que está mostrada no Item 4.2.1, a mistura Ar+15% H_2 foi utilizada na soldagem de centenas de peças, não foram encontrados problemas de formação de porosidade ao longo do cordão. Esses dois exemplos deixam claro que a formação de porosidade depende da situação específica de cada soldagem e não somente do teor de H_2 presente na mistura. Na comparação citada, pode-se notar que o cordão resultante na soldagem de fechamento do compressor, cuja macrografia está mostrada na Figura 48, apresenta relação penetração/largura muito menor do que os cordões resultantes dos ensaios do Item 4.1. Dessa forma é possível aceitar que o hidrogênio retido na poça de fusão tenha maior facilidade de sair do metal líquido antes da solidificação para o caso da junta soldada no compressor. Além disso, ao que tudo indica, a velocidade de solidificação nessa soldagem aparentemente é menor do que nos ensaios do Item 4.1, já que a chapa do compressor tem espessura muito menor do que o material utilizado nos ensaios tipo cordão sob chapa. Isso também possibilita que o hidrogênio tenha maior possibilidade de sair do metal líquido antes de ser capturado pela frente de solidificação. A composição química dos aços (disponível na tabela do anexo B) é diferente, e também pode ter ocasionado diferenças quanto à tendência de formação de porosidades.

5. CONCLUSÕES

As principais conclusões sobre as questões de eficiência térmica dos processos de soldagem a arco que foram apontadas ao longo do presente trabalho são:

- Com base na análise dos resultados de diferentes trabalhos encontrados sobre o assunto é possível concluir, primeiramente, que não é correto afirmar que cada processo possui um valor fixo de eficiência do arco. Os dados das medições dos diferentes autores mostram que o valor de η_a pode variar com grande intensidade principalmente para os processos TIG e Plasma, mas também apresentam variação não desprezível no caso do processo MIG/MAG. Além disso, considerando esses resultados, é possível verificar que a afirmação de que os processos com eletrodo consumível (MIG/MAG) sempre apresentam valores de η_a maiores do que os processos com eletrodo não consumível (TIG) não está correta em todas as condições. Da mesma forma, comparando resultados de diferentes trabalhos também é possível contestar as proposições encontradas na literatura de que a energia perdida para o eletrodo de tungstênio seria a principal causa da pior eficiência do arco dos processos com eletrodos não consumíveis em relação aos processos com eletrodos consumíveis.

- Analisando os resultados das referências encontradas sobre a eficiência do arco dos diferentes processos, chega-se a conclusão que esse indicador não é um parâmetro que está diretamente associado com a produtividade ou velocidade de soldagem do processo, ao contrário do que alguns autores sugerem. Além disso, o valor da eficiência do arco não considera a concentração da fonte calorífica. Situações com fonte mais difusa poderiam apresentar elevada eficiência térmica, porém com baixa eficiência de fusão.

- Quando se trata da eficiência de fusão, usando como base as informações encontradas nos diferentes trabalhos, é possível afirmar que não existem valores de η_m fixos para cada processo de soldagem. Por isso, o valor de η_m deve ser determinado em cada condição, pois os dados de outros autores dificilmente irão representar a mesma situação que se pretende analisar, podendo induzir a erros.

- A distância eletrodo-peça apresenta grande influência no resultado da eficiência de fusão no processo TIG, sendo que o aumento da distância causa forte diminuição do valor obtido.

- A principal questão relativa aos valores de eficiência de fusão é que existe uma grande diferença entre os processos com eletrodo não consumível e processos com eletrodo consumível. Analisando os

resultados dos diversos autores, é possível concluir que o processo MIG/MAG apresenta valores de η_m elevados, entre 0,3 e 0,5, independentemente das condições que o processo está sendo utilizado. Já para processos como TIG e Plasma, a eficiência de fusão depende totalmente dos parâmetros de soldagem, podendo apresentar valores muito baixos, bem próximos a zero, e até valores relativamente elevados entre 0,3-0,4, de maneira semelhante aos obtidos com o processo MIG/MAG.

- É importante destacar que apesar de os processos com eletrodos não consumíveis (TIG e Plasma) apresentarem na maior parte das vezes valores de η_m menores do que os dos processos com eletrodos consumíveis, quando se considera somente a parcela do metal de base fundido, os processos com eletrodo não consumíveis tendem a apresentar maior eficiência. Isso pode representar vantagem em situações onde o uso de metal de adição não é obrigatório.

Com relação à soldagem TIG de elevada velocidade:

- O gás de proteção utilizado na soldagem TIG apresenta grande influência na capacidade do processo gerar fusão. O uso de hélio e misturas argônio-hidrogênio possibilitam grande aumento da eficiência de fusão. Para os gases Ar+10%H₂ e hélio puro, a quantidade de metal fundido na média foi aproximadamente o dobro do que com argônio puro considerando a mesma corrente média. Nas mesmas condições, a mistura Ar + 15%H₂ apresentou quantidade de metal fundido ainda maior do que usando proteção de hélio. Dessa forma, as misturas argônio-hidrogênio aparecem como solução eficiente e de baixo custo para a melhoria do desempenho na soldagem TIG.

- Foi possível verificar que os problemas de formação de discontinuidades tipo *humping* na soldagem TIG de elevada velocidade estão ligados principalmente a eficiência de fusão obtida de acordo com as variáveis utilizadas no processo. Ao contrário do que a maioria dos trabalhos encontrados sobre o assunto sugere, foi possível mostrar que a pressão do arco não deve ser considerada como o fator principal na problemática da formação dos defeitos na soldagem TIG de elevada velocidade. Aparentemente, os outros fatores como a quantidade de metal fundido e a morfologia da poça de fusão possuem efeito predominante.

- Com a adição de pequenos teores de hidrogênio ao argônio é possível aumentar a velocidade limite para a formação de defeitos, e realizar a soldagem com maior velocidade. Essa melhoria no desempenho foi atribuída justamente ao aumento da capacidade de fusão

proporcionada à medida que o teor de hidrogênio foi aumentado na mistura.

- Com o estudo e desenvolvimento de técnica e equipamentos adequados foi possível utilizar o processo TIG para soldagem de peças de aço baixo carbono com elevada velocidade. No presente trabalho foram mostrados resultados onde a soldagem de componentes industriais foi realizada usando até 1500 mm/min. Isso indica que a maioria dos livros erra ao considerar o processo TIG como obrigatoriamente lento. Os resultados obtidos comprovam que o TIG quando desenvolvido de maneira adequada pode apresentar maior produtividade do que o MIG/MAG, que é o processo utilizado tradicionalmente, pois, para os exemplos de aplicações mostrados, foi possível obter velocidade de soldagem semelhante à do MIG/MAG, mas com a vantagem de que o processo TIG não necessita do metal de adição.

REFERÊNCIAS CITADAS

- [1] AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook - Welding Science and Technology**. 9ª Edição. ed. [S.l.]: AWS, v. 1, 2001.
- [2] DUPONT, J. N.; MARDER, A. R. **Thermal Efficiency of Arc Welding Processes**. Welding Journal, p. 406-416-s, December 1995.
- [3] FUERSCHBACH, P. W.; KNOROVSKY, G. A. **A Study of Melting Efficiency in Plasma Arc and Gas Tungsten Arc Welding**. Welding Journal, p. 287-297-s, November 1991.
- [4] COLLINGS, N.; WONG, K. Y.; GUILLE, A. E. **Efficiency of tungsten-inert-gas arcs in very-high-speed welding**. Proc. Inst. Electr. Engr., vol. 126; , 1979. 276-280.
- [5] KUSCH, M.; HÄLSIG, A.; THURNER, S. **Bestimmung von Wirkungsgraden an Schutzgas-schweißverfahren**. Schweißen und Schneiden, p. 30-33, fev 2011.
- [6] TUSEK, J. **Wirkungsgrad des Lichtbogenschweißens**. Schweißen und Schneiden, v. 7, p. 406-411, Juli 1999.
- [7] TUSEK, J.; SUBAN, M. **Experimental research of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel**. International Journal of Hydrogen Energy, n. 25, p. 369-376, 2000.
- [8] SCHWEDERSKY, M. B. **Relatório de Estágio Supervisionado IV, Curso de Graduação em Engenharia de Materiais**. LABSOLDA - UFSC. Florianópolis, p. 17-26. 2007.
- [9] ESSERS, W. G.; WALTER, R. **Some Aspects of the Penetration Mechanisms in Metal Inert Gas (MIG) Welding**. Arc Physics and Weld Pool Behaviour - International Conference, London, p. 289-300, 8-10 May, 1979.
- [10] TSAI, N. S.; EAGAR, T. W. **Distribution of the Heat and Current Fluxes in Gas Tungsten Arcs**. Metallurgical Transactions B, v. 16B, p. 841-846, December 1985.
- [11] QUITES, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. 2ª edição. ed. Florianópolis: Soldasoft, 2002.
- [12] MARQUES, P. V. **Tecnologia da Soldagem**. 1ª ed. ed. Belo Horizonte: [s.n.], 1991.
- [13] MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.
- [14] CARY, H. B. **Modern Welding Technology**. 6a. ed. [S.l.]: [s.n.], 2005.

- [15] MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems, and its Application to High Productivity Arc Welding.** Massachusetts Institute of Technology. [S.l.]. 1999.
- [16] MENDEZ, P. F.; EAGAR, T. W. **Penetration and defect formation in high-current arc welding.** Welding Journal, p. 296-306, october 2003.
- [17] MENDEZ, P. F.; NIECE, K. L.; EAGAR, T. W. **Humping Formation in High Current GTA Welding.** International Conference on Joining of Advanced and Speciality Materials II. Cincinnati, OH: [s.n.]. 1999.
- [18] SAVAGE, W. F.; NIPPES, E. F.; AGUSA, K. **Effect of Arc Force on Defect Formation in GTA Welding.** Welding Journal, jul. 1979. 212s-224s.
- [19] MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico, E sua Aplicação na Soldagem dos Metais.** Belo Horizonte: UFMG, 2002.
- [20] KUMAR, A.; DEBROY, T. **Toward a Unified Model to Prevent Humping Defects in Gas Tungsten Arc Welding.** Welding Journal, p. 292-304, December 2006.
- [21] SODERSTROM, E.; MENDEZ, P. F. **Humping mechanisms present in high speed welding.** Science and Technology of Welding and Joining, p. 572-579, 11(5) 2006.
- [22] FÜSSEL, U.; SCHNICK, M.; MUNOZ, J. E. F. **Experimental Possibilities of Gas Tungsten Arc Analysis.** Welding and Cutting, v. 5, p. 282-287, 2007.
- [23] SCHNICK, M.; FÜSSEL, U.; SPILLE-KOHOFF, A. **Numerical Investigations of the Influence of Design Parameters, Gas Composition and Electric Current in Plasma Arc Welding (PAW).** IIW-1997-09 SG-212-1127-08. in Welding in the World, Volume 54 (2010) Issue 3-4.
- [24] ZÄHR, J. et al. **Numerical and experimental studies of the influence of process gases in TIG welding.** 63^o Annual Assembly and International Conference of the International Institute of Welding, Istanbul, Turkey, p. 6, July 2010.
- [25] FAN, H. G.; SHI, Y. W. **Numerical Simulation of the Arc Pressure in Gas Tungsten Arc Welding.** Journal of Materials Processing Technology, v. 61, p. 302-308, 1996.
- [26] KOU, S. **Welding Metallurgy.** [S.l.]: Wiley-Interscience, 2002.
- [27] ZÄHR, J. et al. **Numerical Investigations of Process Gases and Their Influence on TIG Welding.** 9^o International Seminar, Numerical Analysis of Weldability, Austria September 2009.

- [28] HOOIJMANS, J. **Hydrogen Absorption in Iron and Steel During Gas Tungsten Arc Welding**. thesis. ed. the Netherlands: Delft Univ. Technology., 1994.
- [29] REIS, R. P. **Soldagem Plasma "Melt-in" de Aço Comum ao Carbono**. Dissertação de Maestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós Graduação em Eng. Mecânica, p. 179p, 2005.
- [30] EAGAR, T. W. **The Physics of Arc Welding Processes**. Advanced Joining Technologies, London, U.K., p. 61-68, 1990.
- [31] LOWKE, J. J. et al. **Prediction of Gas Tungsten Arc Welding Properties in Mixtures of Argon and Hydrogen**. IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, v. 25, n. 5, p. 925-930, OCTOBER 1997.
- [32] IETKA, M. F. **APLICAÇÃO DE SOLDAGEM TIG COM ALTA PRODUTIVIDADE NO SELAMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA REFRIGERAÇÃO**. Dissertação de Mestrado em Eng. Mecânica- POSMEC - UFSC. Florianópolis. 2010.

Anexo A: EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E METODOLOGIA.

1. Equipamentos utilizados nos ensaios de soldagem

Os ensaios de soldagem tipo cordão sobre chapa utilizando o processo TIG que foram realizados no presente trabalho, mostrados nos Itens 2.5 e 4.1, utilizaram os seguintes equipamentos:

A fonte de soldagem utilizada foi a “IMC Digitec 800”, fonte multi-processo, transistorizada, chaveada no secundário, com 16 kVA de potência e capacidade de corrente de até 800 A.

Em todas as soldagens foi utilizada uma tocha TIG comercial refrigerada à água com capacidade nominal de 500 A. Foi utilizado porta-pinça tipo gás lens, bocal cerâmico com abertura de 16 mm, eletrodos de tungstênio EWTh-2 de 3,2 mm de diâmetro. Os ensaios foram realizados com a ponta do eletrodo cerca de 8 mm fora do bocal e afiação do eletrodo com ângulo de aproximadamente 90°. A Figura 52 mostra a tocha de soldagem utilizada e o ângulo de afiação utilizado nos ensaios.

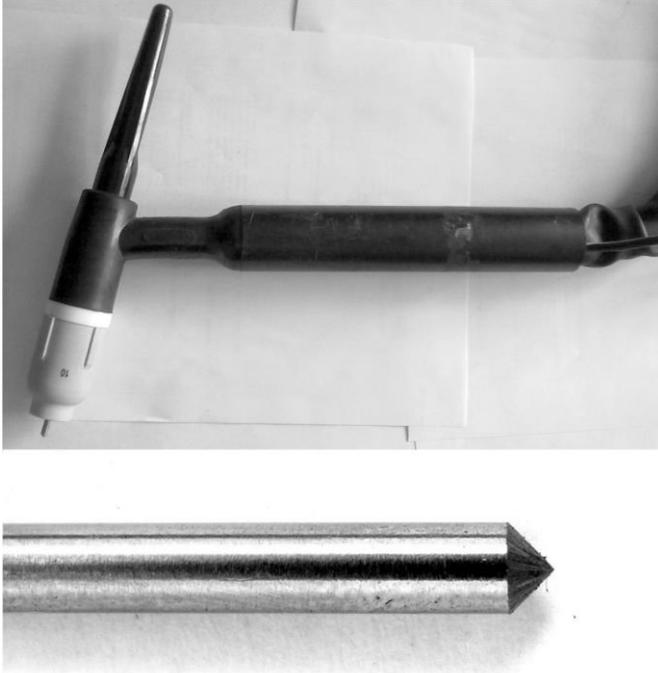


Figura 52 - Tocha de soldagem utilizada nos ensaios (superior). Eletrodo de 3,2 mm de diâmetro com afiação em 90° utilizados nos ensaios. (inferior)

As vazões de gás foram reguladas com 15 l/min medidos na ponta da tocha de soldagem com um fluxímetro de esfera. Os corpos de prova eram chapas de aço carbono ABNT 1020 com dimensões 200 mm x 73 mm x 9,6 mm. A análise química do aço está mostrada na tabela do Anexo B. A movimentação da tocha de soldagem foi realizada utilizando um robô de soldagem de seis graus de liberdade.

Como um dos objetivos do ensaio é comparar a área fundida e a eficiência de fusão, é fundamental que cada ensaio seja realizado em condições idênticas. Para garantir que todos os corpos de prova estivessem na mesma temperatura inicial de soldagem, sem sofrer influência do aquecimento causado na mesa de soldagem devido aos ensaios anteriores, foram utilizadas chapas de aço em baixo e nas laterais dos corpos de prova. Após cada soldagem, essas chapas eram retiradas da mesa de soldagem e resfriadas até temperatura ambiente. A abertura do arco, e o término da soldagem foram realizados em chapas

de sacrifício, do mesmo material, posicionadas no início e fim dos corpos de prova.

Em todos os ensaios, a abertura do arco foi realizada utilizando outro eletrodo de tungstênio que era encostado no eletrodo da tocha e na peça para abrir o arco. Para não danificar o eletrodo, a fonte estava programada com sistema *lift-arc*, ou seja, sendo que no momento do curto-circuito, a fonte aplicava uma corrente baixa (10A). No início da soldagem foi utilizada também com uma rampa de subida de corrente com tempo igual a 3 segundos para o início do processo fosse suave. No momento em que se abria o arco, a movimentação do robô era acionada.

Os ensaios foram realizados com corrente constante e eletrodo ligado ao negativo da máquina. Os gases testados foram Argônio puro, Hélio puro, e misturas Argônio-Hidrogênio com 5, 10 e 15% em volume molar de hidrogênio. Os gases puros foram utilizados garrafas de padrão comercial. Os cilindros das misturas Argônio-Hidrogênio foram encomendados como misturas para padrão de calibração, fornecidos com certificado de análise.

2 - Aquisição dos sinais de corrente e tensão

Os sinais de corrente e tensão foram medidos e aquisitados utilizando o sistema de aquisição de sinais “IMC SAP v4.0”, o qual permite realizar aquisição dos sinais de corrente e tensão. A Tabela 2 mostra as especificações técnicas e a Figura 53 mostra o equipamento e a interface gráfica do software do sistema de aquisição. Entre outras opções, o software permite calcular as médias de corrente e tensão selecionando intervalos do tempo de aquisição. Depois de ter feito as aquisições, a tensão média para cada ensaio foi calculada, sendo que o intervalo selecionado para medição excluiu os primeiros 5 segundos após a abertura do arco, e os últimos 5 segundos antes de finalizar a soldagem.

Tabela 2:

Corrente		Tensão	
Faixa de aquisição (A)	-600 a 600	Faixa de aquisição (V)	-100 a +100
Frequência de aquisição	5,0 kHz	Frequência de aquisição	5,0 kHz
Erro	2 % da leitura	Erro	1 % da leitura
Resolução (A)	0,8	Resolução (V)	0,1

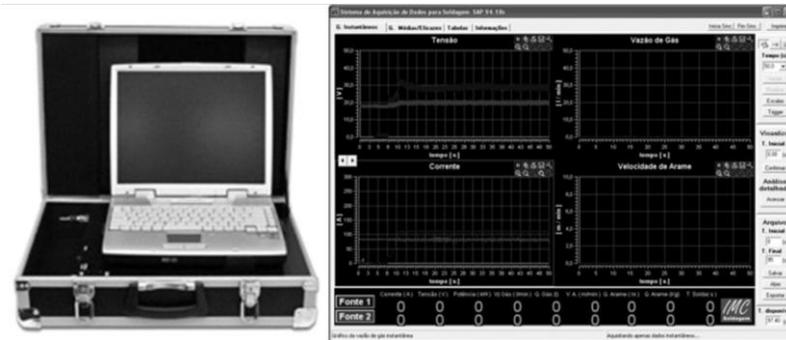


Figura 53 - Sistema de aquisição e tratamento de dados SAP (esquerda), tela da interface gráfica do Software OSCIOS.

3. Medição da área fundida

Para medição da área fundida, cada corpo de prova soldado foi cortado transversalmente, em duas secções diferentes, à 100 mm, e à 150 mm de distância do início da soldagem. Cada uma das secções retiradas, foi embutida em resina, e preparada metalograficamente, utilizando lixas grão 100-1200, e polimento com suspensão de alumina 1 μm . As amostras foram atacadas quimicamente para revelar a área fundida utilizando reagente composto por: 20 g Iodo sublimado, 40 g Iodeto de Potássio e 200 g de água destilada para que fosse possível identificar a linha de fusão. Esse reagente foi preferido em relação ao “Nital” pois na hora de fazer fotografia da amostra o ataque ficou mais nítido e foi mais fácil de identificar a linha de fusão na imagem.

Após ataque, as amostras foram fotografadas, e a área do cordão foi medida utilizando o software de análise de imagens “UTHSCSA Image Tool v3.0”. Este software permite realizar a medição de áreas selecionadas em imagens, sendo necessário realizar para cada imagem uma calibração de uma distância conhecida. Para todas as medições realizadas, a calibração foi feita utilizando como base a espessura da chapa.

A Figura 54 mostra um esquema do ambiente do software utilizado na medição. Como a maioria dos cordões apresentou uma convexidade na superfície do cordão, devido à porosidade ou ao movimento do metal líquido, as imagens foram marcadas na linha da

superfície, e foi considerado para medição somente a área fundida abaixo dessa linha (área azul mostrada na Figura 54).

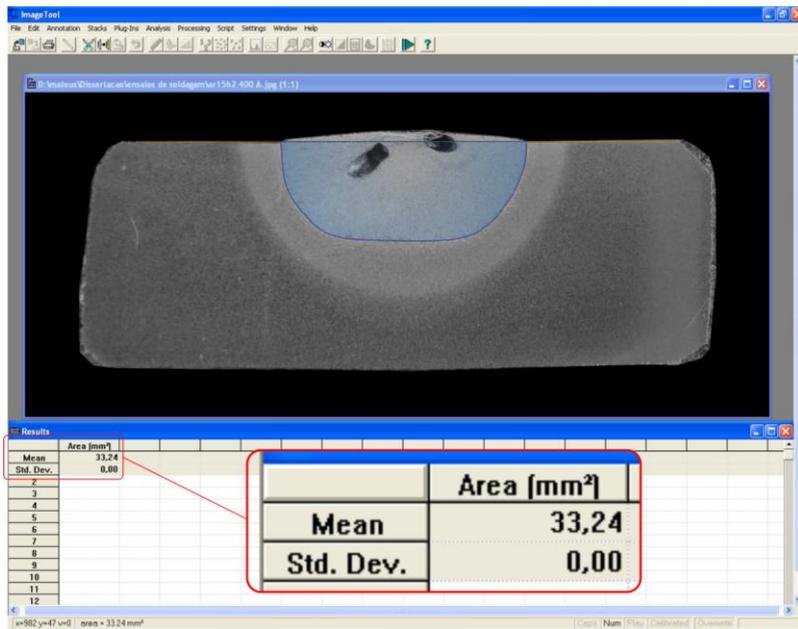


Figura 54 - Esquema mostrando a medição da área fundida utilizando o software "UTHSCSA Image Tool v3.0"

Anexo B: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS AÇOS DO PRESENTE TRABALHO.

 Materiais usados no presente trabalho	 Materiais usados por Hooijmans (Ref. [28])
---	--

	Aço 3/8"	Aço Compressor	Ferro Puro	Aço Carbono	Aço Inox 321
Fe	Rest.	Rest.	Rest.	Rest.	Rest.
C	0,14	0,023	0,026	0,025	0,029
Si	0,16	0,006	0,00379	0,4	0,923
Mn	0,73	0,242	0,031	1	1,6
P	0,022	0,01	<0,04	-	<0,04
S	0,017	0,005	0,005	-	0,013
Cr	0,07	0,017	0,0179	0,07	21,1
Mo	0,012	0,0026	<0,015	<0,015	2,31
Ni	0,054	0,015	<0,015	<0,015	14,3
Al	0,0029	0,05	0,0398	-	0,0855
Co	0,003	0,001	-	-	-
Cu	0,11	0,02	-	-	-
Nb	0,0018	<0,001	-	-	-
Ti	0,001	0,0004	0,00107	-	0,00071
V	0,0023	0,0007	-	-	-