

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

MARCOS FRANCISCO IETKA

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG NO
SELAMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA
REFRIGERAÇÃO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Florianópolis – 2010

MARCOS FRANCISCO IETKA

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG NO
SELAMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA
REFRIGERAÇÃO

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

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

Florianópolis – 2010.

IETKA, Marcos Francisco.
Avaliação da soldagem TIG no selamento de compressores
herméticos para refrigeração/
IETKA, Marcos Francisco – 2010. 139 p.
Orientador: Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng.
Dissertação (Mestrado – Universidade Federal de Santa
Catarina), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Estado da técnica / processo de soldagem TIG. Equipamentos,
materiais e procedimentos. Resultados e discussões. Conclusões.

AVALIAÇÃO DA SOLDAGEM TIG NO
SELAMENTO DE COMPRESSORES HERMÉTICOS PARA
REFRIGERAÇÃO

MARCOS FRANCISCO IETKA

Esta dissertação foi julgada e aprovada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc., – Coordenador do Curso

APROVADO PELA COMISSÃO EXAMINADORA EM .../.../2010.

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr. Eng. - Orientador

Prof. Berend Snoeijer , Dr. Ing. – Presidente

Prof. Carlos Eduardo Iconomos Baixo, Eng. Ph.D – Membro

Prof. Américo Scotti, - Eng. Ph.D – Membro

Prof. Ana Sofia Climaco M. d'Oliveira, Dr. Eng. - Membro

Florianópolis – 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo que sou e que tenho, pelas oportunidades que tem me concedido como esta, de realizar este trabalho.

Aos grandes mestres prof. Jair Carlos Dutra e Eng. Raul Gohr Júnior, pela orientação, ensinamentos e profissionalismo demonstrado em todas as situações.

Ao Eng. Mateus Baranceli, ao Tecnólogo Renon S. Carvalho e ao Designer Marcelo P. Okuyama, pela colaboração nos variados aspectos desta proposta.

A toda equipe do LABSOLDA e, em especial, ao Ricardo Campagnin, ao Hebert G. Militão, a Márcia Paula Thiel e ao Cleber H. da Cunha.

Ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC pela minha aceitação.

À EMBRACO – Empresa Brasileira de Compressores, por todo o apoio financeiro, que possibilitou a realização dos vários ensaios, análises técnicas, etc.

Agradecimento especial a minha esposa, Haide, e aos meus filhos Lincoln, Heitor, Priscila e Isabelle pelo incentivo, carinho e ajuda, em todos estes anos juntos.

RESUMO

IETKA, Marcos Francisco. 2010. Avaliação da soldagem TIG no selamento de compressores herméticos para refrigeração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Florianópolis.

O cenário mundial, sempre preocupante em termos de competição acirrada, exige das empresas, muita capacidade em termos de desenvolvimento tecnológico para se manterem vivas nos mercados em que atuam. Em especial, aquelas empresas nacionais que têm suas receitas baseadas na exportação de seus produtos, estão sendo gravemente afetadas. Frequentemente, especialistas estão procurando por novas tecnologias que permitam reduzir o custo destes produtos. Exemplo desta realidade é o fabricante de compressores para refrigeração. Neste segmento é usado o processo de soldagem MIG, com adição de material para o fechamento das carcaças, que devem ser herméticas. Neste contexto, o presente trabalho buscou pesquisar uma aplicação do processo de soldagem TIG, sem adição de material, visando a redução de custo da operação sem perda da produtividade. A meta foi definir um conjunto de soluções para eliminar a maior barreira que é a baixa velocidade de solda do processo TIG, para evitar o aparecimento de irregularidades no cordão. Este trabalho avaliou diferentes parâmetros de soldagem, misturas de gases de proteção,

controle da tensão do arco, distâncias eletrodo-peça, entre outras características para garantir um processo de soldagem adequado a baixos custos e alta produtividade. Testes foram realizados usando como peças de testes as carcaças de compressores. Após a realização de uma série de ensaios, verificou-se a possibilidade de aumentar a velocidade de solda a valores compatíveis ao processo MIG atualmente usado, sem que ocorram irregularidades ou defeitos no cordão de solda.

Palavras chaves: Soldagem TIG para compressores herméticos Autógena, Alta velocidade.

ABSTRACT

IETKA, M. F., 2009, TIG Welding Process Analysis to Seal Hermetic Compressors to Refrigeration, M.Sc. Dissertation, Federal University of Santa Catarina, SC.

The world scenario showing up a huge competition, is requiring a strong technological development of the companies which want to be alive in the market. Mainly, those based in their product's exportation to get better revenues. In such a way, it has been important to get cheaper products, and processes, as well. Day by day specialists are looking for new technologies to allow cost reductions in their factories. An example of this, has been the refrigeration hermetic compressor manufacturers. They are welding the compressor housings with MIG welding process using filler metal. In this background, the present work aimed at researching a new TIG welding process in an autogenous weld version, what means, without filler metal, aiming to get a cost reduction in this operation without loses into the productivity. The main goal was to define important weld solutions to eliminate the biggest barrier which has been the low weld speed of TIG process. This approach made an evaluation of: different welding

parameters, shielding gas blends, arc voltage control, best electrode-to-work distance and other features to get a high production rate weld process. Trials were done using compressor housings as welding samples. After the tests, it was verified that there is a way to increase the welding speed in order to get the same values of the present MIG weld process speed, without bead irregularities.

Keyword: TIG welding for hermetic compressors, Autogenous weld, High speed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Sistema doméstico de refrigeração.....	27
Figura 2 Compressor hermético para refrigeração.....	28
Figura 3 Processo de soldagem MIG/MAG.....	29
Figura 4 Carcaça com selamento pelo processo MIG.....	31
Fig. 5 Representação esquemática do processo TIG.....	36
Fig. 6 Imagem do arco elétrico no processo TIG.....	38
Figura 7 Característica estática do arco TIG em diferentes comprimentos de arco.....	41
Figura 8 Forma de onda da corrente pulsada.....	43
Figura 9 Efeito do gás de proteção no limite da velocidade de solda.....	44
Figura 10 Efeito do gás de proteção na pressão do arco na solda.....	47
Figura 11 Condutibilidade elétrica dos gases em função da temperatura.....	51
Figura 12 Condutibilidade térmica dos gases em função da temperatura.....	51
Figura 13 Entalpia dos gases em função da temperatura.....	52
Figura 14 Característica estática do arco TIG em diferentes atmosferas.....	53

Figura 15 Macrografias de soldas feitas com a mesma corrente, mas com diferentes gases de proteção e diferentes tensões do arco (eletrodo negativo).....	54
Figura 16 Aspecto de um cordão com <i>humping</i> com o processo TIG.....	56
Figura 17 Detalhe da cratera que se forma durante a Soldagem.....	56
Figura 18 Detalhe das regiões onde o cordão foi cortado.....	56
Figura 19 Seção transversal A da figura 18.....	57
Figura 20 Seção transversal B da figura 18.....	57
Figura 21 Representação da poça de fusão TIG em elevadas correntes.....	58
Figura 22 Esquema da formação de corcundas <i>humping</i> em soldagem TIG.....	60
Figura 23 Frente da fusão e solidificação em poça na forma de gota elíptica.....	61
Figura. 24 Frente de solidificação na poça em forma de gota elíptica.....	61
Figura 25 Frente de fusão e solidificação na poça em forma de gota elíptica alongada.....	62
Figura 26 Frente de solidificação na poça em forma de gota elíptica alongada.....	63
Figura 27 Efeito da corrente da velocidade de solda.....	65

Figura. 28 Efeito da corrente da velocidade da solda.....	67
Figura 29 Efeito da distância eletrodo-peça na velocidade de solda limite.....	68
Figura 30 Efeito da corrente de soldagem na força do arco....	70
Figura 31 Efeito do gás de proteção na força do arco.....	71
Figura 32 Efeito da distância eletrodo-peça na força do arco.	73
Figura 33 Bancada de testes.....	74
Figura 34 AVC (<i>Arc Voltage Control</i>).....	76
Figura 35 Sistema portátil de aquisição de dados AS.....	77
Figura 36 Dimensões da carcaça do compressor EM EMBRACO.....	79
Figura 37 Medição da variação da altura da borda da Carcaça.....	80
Figura 38 Posicionamento da tocha TIG em relação à Carcaça.....	84
Figura 39 Corpo de prova do ensaio 6 e oscilogramas de corrente e tensão média.....	86
Figura 40 Corpo de prova do ensaio 11 e oscilograma de corrente e tensão média.....	87
Figura 41 Macrografias do ensaio A1:1:450 A, vs:1,00m/min, gás Ar + 5%H ₂	88
Figura 42 Macrografias do ensaio A3, 1:450 A, vs:1,00 m/min, gás: Ar + 10%H ₂	88

Figura 43 Macrografias do ensaio A11, l:500 A, vs:1,60 m/min, gás: Ar + 10%H ₂	89
Figura 44 Posicionamento da tocha de soldagem com ângulo de 43°59.....	91
Figura 45 Geometria do eletrodo de Tungstênio.....	92
Figura 46 Aspecto geral dos compressores soldados.....	92
Figura 47 Teste de vazamento de 30 carcaças soldados com gás Ar +5% H ₂	94
Figura 48 Teste de vazamento de 30 compressores soldados com Ar + 10%H ₂	94
Figura 49 Aspecto do eletrodo após 30 carcaças soldadas com Ar + 10%H ₂	96
Figura 50 Oscilograma instantâneo de corrente.....	99
Figura 51 Oscilograma instantâneo de tensão.....	99
Figura 52 Oscilograma da corrente.....	100
Figura 53 Oscilograma mostrando a média da tensa.....	101
Figura 54 Variação da tensão média ao longo da soldagem...	102
Figura 55 Amostra 9 - descontinuidade no órgão de solda....	104
Figura 56 Amostras 21, 25, 28 e 36, variação da tensão de soldagem.....	105
Figura 57 Amostras 38, 46, 52 e 47, oscilogramas de tensão de soldagem.....	106

Figura 58 Amostras 64, 66 e 69, oscilograma de tensão de soldagem.....	107
Figura 59 Amostra 69 soldada com tempo ciclo de 24s.....	108
Figura 60 Amostras 62, 87 e 92, oscilogramas de tensão de soldagem.....	109
Figura 61 Eletrodo após 63 ciclos de soldagem.....	110
Figura 62 Efeito da adição H ₂ no Ar na quantidade de metal base fundido na soldagem TIG	111
Figura 63 Macrografias das soldagens com Ar + 5%H ₂	112
Figura 64 Macrografias das soldagens com AR + 10H ₂	113
Figura 65 Trinca longitudinal na zona fundida.....	115
Figura 66 Efeito da taxa de Mn – S e teor de C na susceptibilidade a trincas.....	117
Figura 67 a) Bancada de teste da fadiga. b) Registro dos Dados.....	120
Figura 68 Gráfico de pressão cíclica.....	120
Figura 69 Gráfico de pressão no teste hidrostático.....	121
Figura 70 Esquema das seções transversais analisadas.....	122
Figura 71 Estrutura metalográfica secção 1.....	123
Figura 72 Estrutura metalográfica secção 2.....	123
Figura 73 Estrutura metalográfica secção 3.....	124
Figura 74 Estruturas metalográficas secções 4 e 5.....	125

Figura 75 Estrutura metalográfica secção 6.....	126
Figura 76 Estrutura metalográfica secção 7.....	126
Figura 77 Estrutura metalográfica secção 8.....	127
Figura 78 Estrutura metalográfica secção 9.....	127
Figura 79 Estrutura metalográfica secção 10.....	128
Figura 80 Estrutura metalográfica secção 11.....	128
Figura 81 Estrutura metalográfica secção 2 aumento 50X...	129
Figura 82 Estrutura metalográfica secção 4.....	130
Figura 83 Microestrutura do cordão de solda TIG.....	132
Figura 84 Dureza HVM no cordão de solda TIG.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição química material (aço) das carcaças	78
Tabela 2 Síntese dos ensaios realizados	81
Tabela 3 Parâmetros dos ensaios realizados	85
Tabela 4 Dados utilizados no teste com robô	92
Tabela 5 Parâmetros experimentais de soldagem	98
Tabela 6 Medições das áreas fundidas.....	113

SIMBOLOGIA

AVC Arco)	Arc Length Control (Controle do Comprimento do Arco)
Ar	Argônio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CE	Carbono equivalente
I	Corrente de soldagem
Ia	Corrente de abertura
Ip	Corrente de pulso
Im	Corrente média
Ib	Corrente de base
If	Corrente de finalização
He	Hélio
H	Hidrogênio
MIG	Metal inert gas
MAG	Metal active gas
TIG	Tungstênio inert gas
ta	Tempo de abertura
ts	Tempo de subida
tp	Tempo de pulso
tb	Tempo de base
td	Tempo de descida

t_f	Tempo de finalização
U	Tensão de soldagem
V_s	Velocidade de solda
R	Velocidade de resfriamento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	25
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS.....	33
3 ESTADO DA TÉCNICA.....	35
3.1. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG21.....	35
3.1.1 Gases de proteção.....	43
3.1.2 Características dos gases argônio e hidrogênio.....	48
3.2 DEFEITOS DE SOLDA NO PROCESSO TIG.....	55
3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DO DEFEITO DE SOLDA.....	63
3.3.1 Efeito da corrente de soldagem.....	64
3.3.2 Efeito da condição da superfície do eletrodo.....	66
3.3.3 Efeito da distância eletrodo-peça.....	67
3.3.4 Efeito dos parâmetros de soldagem na força do arco.....	69
4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS.....	74
4.1 EQUIPAMENTOS.....	74
4.2 MATERIAIS.....	77
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	81
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	82
5.1 TESTES EM CARCAÇAS E COMPRESSORES.....	82

5.2 INFLUÊNCIA DO TEOR DE HIDROGÊNIO NO GÁS DE PROTEÇÃO.....	90
5.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ELETRODO-PEÇA NA VARIAÇÃO DE TENSÃO.....	97
5.4 ANÁLISE DA ÁREA FUNDIDA.....	111
5.5 ANÁLISE DAS TRINCAS.....	114
5.6 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À FADIGA.....	119
6 CONCLUSÕES.....	135
7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	139
REFERÊNCIAS.....	141

1 INTRODUÇÃO

A cada ano, as matérias primas consideradas “*commodites*” têm influenciado fortemente o custo dos produtos. O aço, elemento fundamental para a indústria mundial, é uma das principais preocupações devido aos sucessivos aumentos de preços.

Com o significativo desenvolvimento-crescimento de países como China e Índia, no contexto mundial, o problema do consumo do aço agravou-se. Tornou-se fundamental desenvolver tecnologias para reduzir ou otimizar o emprego desta matéria prima. Neste contexto, os processos de soldagem podem contribuir, de forma relevante: com destaque para o a soldagem sem o uso do material de adição.

Considerando o mercado mundial de compressores herméticos para refrigeração, são comercializados, anualmente, em torno de 120.000.000 unidades, apenas para refrigeração doméstica. Um dos requisitos na fabricação de compressores herméticos é garantir que a selagem final ofereça propriedades mecânicas e de estanqueidade, adequadas. As primeiras devem garantir que esta selagem suporte a variação de pressão interna, ao longo da vida do produto, sem riscos de rompimento catastrófico. Ao mesmo tempo, a vedação deve garantir a permanência do fluído refrigerante, ao longo de toda a vida útil

do compressor, sob pena de este sofrer queda de eficiência ou, deixar de funcionar.

Em aplicações tradicionais de compressores herméticos para refrigeração doméstica, considerando os gases mais usados atualmente que são o *isobutano* (R600) e o *hidro-fluor-carbono* (R134a), se atinge pressões internas de 14 a 17 bar. As normas de fabricação estabelecem que a perda de gás: deve ser inferior a três gramas anuais. Desta forma, o compressor precisa ser hermético durante toda sua vida útil, prevista para dez a quinze anos. Portanto, a união soldada na carcaça precisa atender a estes padrões de qualidade.

No sentido de manter a competitividade no mercado mundial as empresas procuram reduzir o custo em seus processos produtivos. Assim, as atividades de redução de custo exercem grande importância atualmente e, são tratadas como prioridade em suas execuções.

Uma das operações de produção é a soldagem de compressores herméticos para refrigeração onde é possível buscar uma redução de custo sem perda de qualidade.

A figura 1 mostra um sistema doméstico de refrigeração, atualmente usado na maioria das habitações existentes. A parcela, em termos de consumo de energia e impacto ambiental destes eletrodomésticos, é grande. Os gases usados como fluido refrigerante, já foram considerados prejudiciais ao meio

ambiente, como o *CFC* (*cloro-flúor-carbono*) e estão sendo substituídos por outros fluidos menos agressivos à natureza, como o *isobutano* conhecido como gás *R600*.

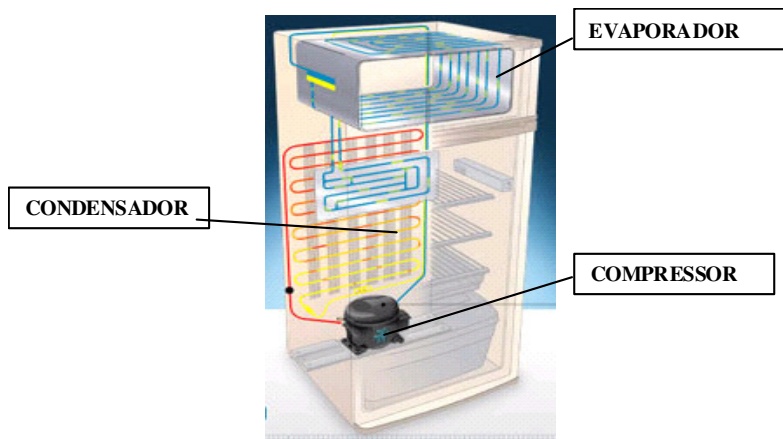


Figura 1: Sistema doméstico de refrigeração
Fonte: Embraco

O coração do sistema de refrigeração é o compressor hermético, conforme a figura 2. Cada sistema de refrigeração doméstica utiliza no mínimo, um compressor que, na sua essência, é um motor elétrico, com potência em torno de 1/3 de HP, acoplado a um mecanismo biela-manivela, que gira a 3.500 rotações por minuto, responsável pela compressão do fluido refrigerante em um sistema como ilustra a figura 1.

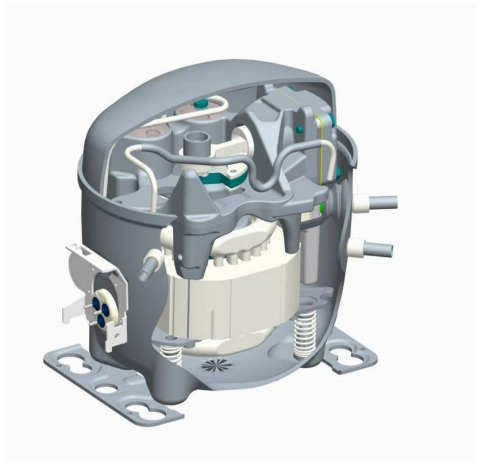


Figura. 2: Compressor hermético para refrigeração.
Fonte: Embraco

Basicamente, um compressor hermético para refrigeração é composto de carcaça fabricada em processo de estampagem profunda. Componentes como, tubos passadores do gás de refrigeração, suportes da suspensão e conector elétrico, são unidos à carcaça pelo processo de soldagem, por resistência ou brasagem.

Uma das operações mais importantes é o fechamento do corpo e a tampa, por soldagem a arco. A operação ocorre após a montagem de todos os componentes: se houver falha, além de danificar a carcaça definitivamente, perde-se o valor das operações anteriores como a mão de obra da montagem mecânica, que deverá ser remontada em outra carcaça.

O processo de soldagem, utilizado para selar as partes inferiores e superiores da carcaça, da figura 3, é o MIG/MAG que, conforme a AWS (1991) utiliza como material de adição, o arame acobreado (ER70S-6) de diâmetro 1,20 mm. O processo é adotado por todos os atuais fabricantes de compressores para refrigeração.

O processo MIG/MAG citado por Marques, Modenesi e Brancarense (2007) utiliza como ferramenta um arco elétrico, suprido por uma fonte de energia, que arde entre a peça a ser trabalhada e um eletrodo consumível. Se o arame for maciço sempre haverá suprimento de gás de proteção, se for tubular, o gás pode ser, simplesmente, da fusão do fundente.

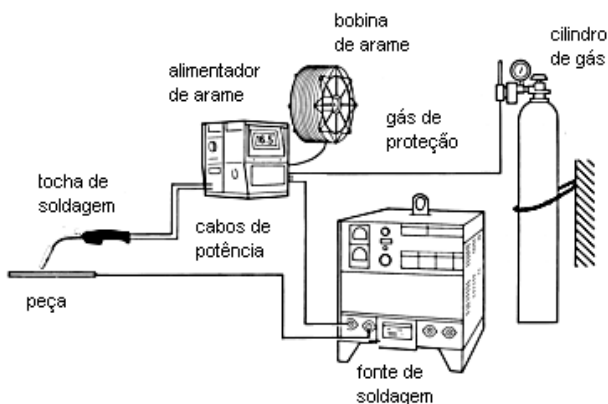


Figura 3: Processo de soldagem MIG/MAG.
Fonte: MARQUES, MODENESI E BRANCARENSE, 2007.

O processo dispõe de mecanismo motorizado que direciona o arame, continuamente até a peça, estabelecendo o circuito de soldagem como ilustrado na figura 4. Usualmente, o arame eletrodo é o pólo positivo e a peça é o pólo negativo, alcançando densidades de corrente de até 300 A/mm^2 , resultando em elevadas velocidades de fusão do eletrodo.

Na selagem de compressores como ilustra a figura 4, normalmente, o processo MIG/MAG apresenta-se com boas características de produtividade, como velocidade de soldagem em torno de $1,2 \text{ m/min}$. Os equipamentos utilizados são: fonte de energia com controle de tensão ou imposição de corrente (uso na maioria das aplicações), fontes convencionais, corrente contínua ou pulsada (eletrodo positivo) de 260 a 340 A. A composição do gás é CO_2 puro ou, até misturas com 94% de Ar. Como material de adição, normalmente o arame acobreado ER70 S6 com diâmetro de 1,2 mm (o sistema duplo arame Tandem, também é usado por algumas empresas).

Este processo tem apresentado bom desempenho em juntas não uniformes, com folgas de até 1,0 mm com índice de reprocesso entre 0,5% a 1,0%. Alguns pontos ainda, podem ser melhorados, como a redução do material de adição, que exige limpeza constante de bocais e tochas, o ambiente de trabalho, que é prejudicado pela sujeira o que afeta os equipamentos

eletrônicos, a presença de respingos no produto final e a grande emissão de fumos.

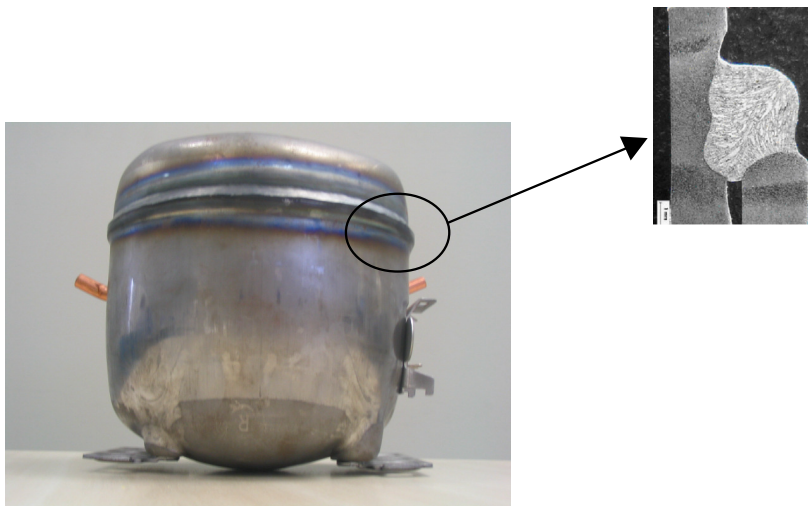


Figura 4: Carçaça com selamento pelo processo MIG.

Na realidade, o processo MIG/MAG é, ainda, a solução encontrada em termos de produtividade e qualidade da junta soldada. Entretanto, seria prudente desenvolver outras alternativas, focadas no desenvolvimento sustentável. Como já foi abordado, comercializam-se, aproximadamente, 120.000.000 compressores/ano e, cada unidade utilizada em torno de 50 gramas de material de adição, resulta em consumo de 6.000 toneladas de aço trefilado, em forma de arame. O desenvolvimento de um processo alternativo sem o uso do material de adição, proposta do presente trabalho, certamente

vai colaborar em termos ambientais como, também, vai reduzir o custo de fabricação dos compressores herméticos.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

A alternativa real para o selamento de compressores herméticos sem a utilização de material de adição, seria o processo TIG, que apresenta boa qualidade, com emissão de fumos bem inferior ao MIG/MAG. Este processo, entretanto, é conhecido por operar em baixas velocidades de soldagem e se fosse aplicado em soldagem de compressores na forma como é conhecido atualmente, resultaria em baixa produtividade.

A literatura técnica atual mostra que para esta aplicação em velocidades de soldagens acima de 0,8 m/min, ocorrem defeitos no cordão de solda como, descontinuidades (corcundas) ou trincas de solidificação, entre outros. Savage, Nippes e Agusa, 1979 atribuem a ocorrência de defeitos à pressão que o arco exerce sobre a junta. Esta pressão ocorre também, no processo MIG/MAG, mas, no caso, o problema aparece somente em correntes mais elevadas que no processo TIG devido à adição de material e à configuração da poça metálica. Assim, a busca por um conhecimento mais aprofundado a respeito do TIG com velocidades mais elevadas e de suas características como, a formação da geometria da poça de fusão, quando comparado ao processo MIG/MAG, torna-se importante motivação para a realização deste trabalho.

No contexto global, este trabalho pretende viabilizar a introdução do processo TIG em aplicações industriais de alta produtividade, considerando velocidades de solda acima de 1,00 m/min, mantendo a garantia da boa qualidade do cordão de solda. Isto poderá ser viável com o uso de equipamentos com tecnologia, assim como, procedimentos dedicados resultantes da assimilação e geração de conhecimentos acerca do processo TIG, em aplicações como o selamento de compressores herméticos para refrigeração.

Contudo, na busca do resultado final, certos objetivos, como a avaliação da influência de variáveis e parâmetros de processo, tendo como base o processo MIG/MAG, devem ser cumpridos no decorrer da reavaliação deste trabalho. A aquisição de conhecimento tecnológico e científico em relação a esta aplicação torna-se o principal objetivo a ser perseguido. Aspectos relativos aos defeitos de soldagem como, descontinuidade do cordão e trincas de solidificação, bem como a influência dos gases de proteção na qualidade da solda e distância eletrodo-peça que, por influírem na pressão do arco e na geometria da poça de fusão, deverão ser cuidadosamente avaliados para possibilitar uma solução eficiente da nova aplicação.

3 ESTADO DA TÉCNICA

3.1 PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O processo de soldagem TIG é um processo de *alta qualidade* e foi desenvolvido no início dos anos quarenta para atender à aeronáutica, uma indústria bastante exigente. Segundo a AWS (1991), trata-se de processo em que a união de peças metálicas é produzida pelo aquecimento e fusão destas, por meio de arco elétrico, estabelecido entre um eletrodo de tungstênio, não consumível e as peças a serem unidas.

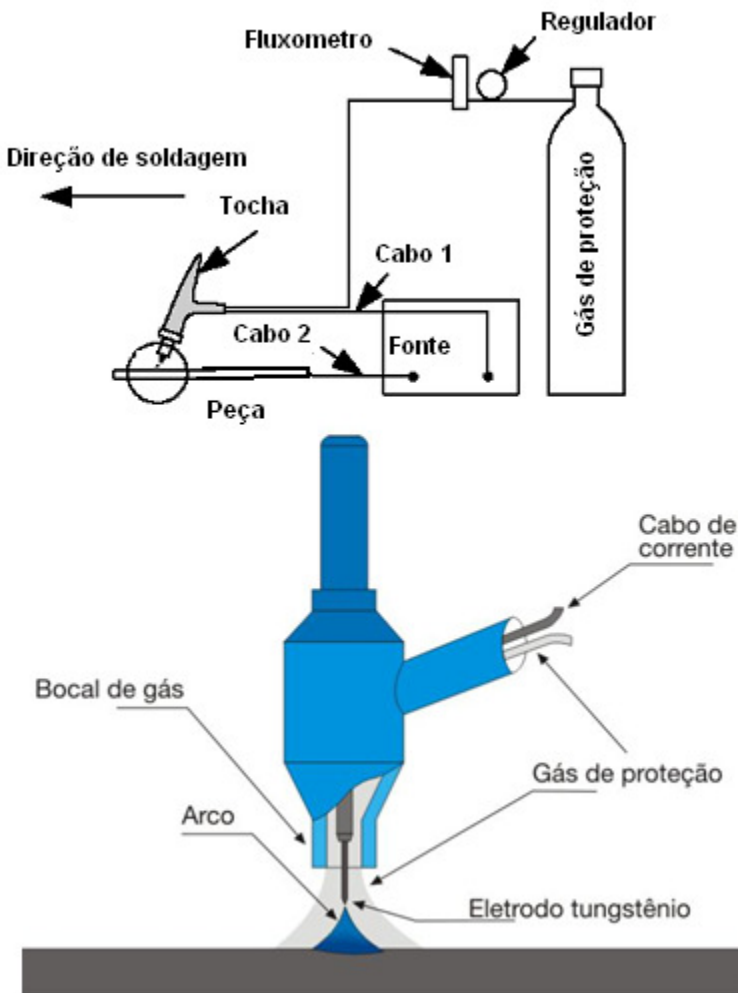


Figura 5: Representação esquemática do processo TIG.

Fonte: AWS (1991)

O arco elétrico é bastante estável, suave e produz, em geral, soldas com boa aparência e acabamento. A proteção da poça de fusão e do arco, contra a contaminação pela atmosfera, é

realizada por um gás inerte ou, pela mistura de gases inertes. Este processo é aplicável à maioria dos metais e suas ligas, em uma ampla faixa de espessuras. Em virtude, porém, de seu custo elevado, o método é usado principalmente, na soldagem de metais não ferrosos e aços inoxidáveis, na soldagem de peças de pequenas espessuras (entre 1 e 2 mm) e no passe de raiz na soldagem de tubulações.

A forma do arco elétrico da figura 5, conforme Modenesi, 2002 depende da geometria dos eletrodos e da existência de restrições à sua expansão. Geralmente, em soldagem, o arco é não restringido e opera entre um eletrodo plano, ou quase plano (a peça) e outro, localizado na extremidade de um cilindro (o eletrodo), cuja área é muito menor do que a do primeiro. Desta forma, a maioria dos arcos em soldagem, possui formato aproximadamente cônico ou formato de *sino*.

No processo TIG, o formato do arco foi mais intensivamente estudado, tendo sido observados diferentes modos de operação, associados com as características do eletrodo de tungstênio e as condições de soldagem. De fato, inexistente um ponto catódico, bem definido no eletrodo: o arco parece cobrir toda a superfície da ponta do eletrodo e a sua coluna tem o formato de cone truncado, como demonstra a figura 6.

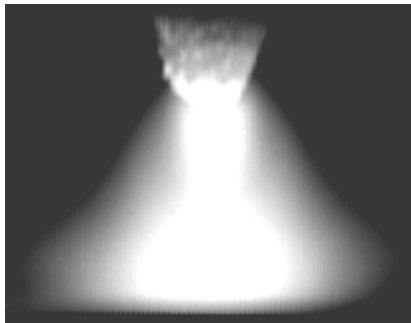


Figura 6: Imagem do arco elétrico no processo TIG.
Fonte: MODENESI, 2002.

Nos processos mecanizados ou automatizados não há a necessidade de soldador, mas, apenas de um operador, que no entanto, deve conhecer o arco elétrico para identificar possíveis problemas. Não há formação de escória e portanto não existe o trabalho de remoção da escória entre os passes. É uma solda que se apresenta *limpa* e pode ser utilizada em grande gama e tipos de metais, a exemplo da maioria dos aços, incluindo os inoxidáveis, como ligas de níquel (monel e inconel), titânio, alumínio, magnésio, cobre, bronze e até ouro. Também é aplicável na soldagem de metais dissimilares.

O processo TIG evoluiu significativamente nos últimos anos, sendo que o arco pulsado foi um dos principais registros. As tochas utilizadas no processo podem ser refrigeradas com água (para trabalhos com maiores correntes) e o eletrodo de tungstênio, normalmente, é ligado com pequenas quantidades

de elementos ativos para aumentar sua emissividade melhorando a abertura e a estabilidade do arco, bem como o aumento de vida do eletrodo.

Os eletrodos mais comumente usados são varetas sinterizadas de tungstênio puro ou, com adição de óxido de cério, lantânio, tório ou zircônio. O eletrodo têm como função conduzir a corrente elétrica até o arco. A capacidade de condução varia de acordo com a composição química, com o diâmetro do eletrodo e com o tipo de corrente de soldagem a ser usada. Deveriam ser evitados eletrodos contendo tório pela radioatividade do elemento, podendo ser inalado durante a afiação do eletrodo. Eletrodos de tungstênio puro têm menor custo e geralmente são utilizados, em aplicações para corrente alternada. Eletrodos com adição de óxidos podem apresentar melhor desempenho que os de tungstênio puro em termos de estabilidade de arco e de durabilidade. Normalmente, os eletrodos de tungstênio são apontados por meios mecânicos, antes de se iniciar a operação de soldagem. Em situações de soldagem automatizada a configuração da ponta do eletrodo pode ser variável importante para se garantir boa repetibilidade de resultados.

Os dispositivos de mecanização de soldagem são definidos pelos movimentos que executam, podendo ser: a) dispositivos movimentadores de peças, que fixam e posicionam as peças a

serem soldadas com as juntas, dispostas nas condições ideais e, permitem ajuste do movimento das peças, em velocidades variadas, em compatibilidade com os parâmetros requeridos; b) mecanismos posicionadores de tocha que, em associação com os dispositivos movimentadores, completam o conjunto que permite a execução da soldagem, com segurança.

A tensão do arco é a medida, em *volts*, entre o eletrodo de tungstênio e a peça, é proporcional ao comprimento do arco e depende da distância entre o eletrodo e a chapa, da corrente de soldagem, do tipo de gás de proteção, da forma da ponta do eletrodo e também, da pressão do ambiente.

Os sistemas mecanizados oferecem bom controle da tensão do arco, porém no sistema manual é de difícil controle. O comprimento do arco é variável importante e afeta a largura da poça de fusão e, com menor intensidade, a penetração. Na maioria das aplicações é preferível que se mantenha um comprimento mínimo de arco.

A tensão pode ser afetada por contaminantes, seja da peça, seja do material de adição. Assim, ajustar a tensão é a forma de controle do comprimento do arco, desde que, outras variáveis tenham sido pré-determinadas. Este ajuste pode ser feito através de dispositivo instalado junto com a tocha que regula a distância eletrodo-peça, conhecido no mercado como AVC (*Arc voltage control*). A corrente de soldagem é selecionada,

diretamente, na fonte de energia: quanto maior a corrente, maior a penetração e a largura do cordão de solda.

O processo TIG permite utilização de corrente contínua ou alternada e a escolha dependerá do metal a receber a solda. O processo, também, possibilita o uso de correntes baixas, conforme demonstra a figura 7, que retrata a característica estática do arco.

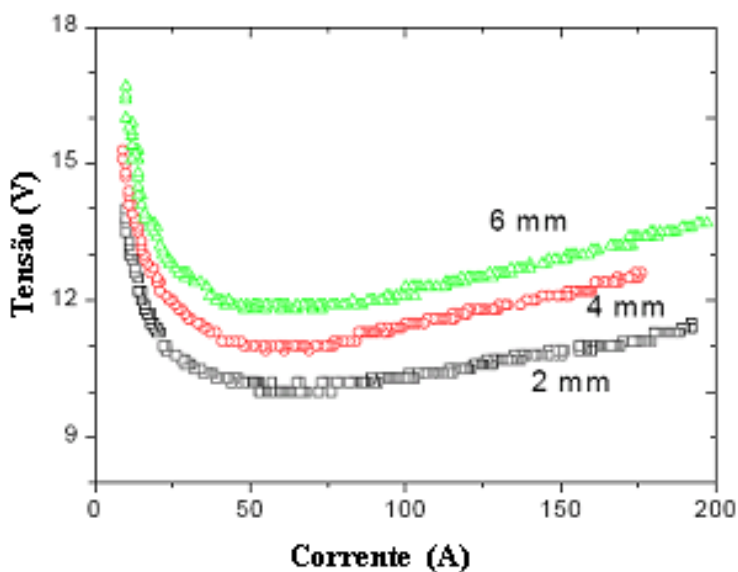


Figura 7: Característica estática do arco TIG em diferentes comprimento de arco.

Fonte: MODENESI, 2002.

Na corrente contínua pulsada, o valor da corrente varia entre dois níveis: corrente de pulso e de base, ilustrada na

figura 8. A mudança na amplitude da corrente implica em benefícios, como redução do efeito térmico sobre a peça em consequência de melhor aproveitamento da energia da fase de pulso para a fusão em profundidade. Durante a fase de base, praticamente não há ação térmica sobre a peça, propiciando certo efeito de resfriamento da peça metálica, evitando escorrimientos da mesma: apesar da literatura afirmar que este fato tem se verificado na prática, somente em casos particulares. Pela boa combinação das duas fases, pode-se obter aumento da velocidade de soldagem para uma mesma energia total.

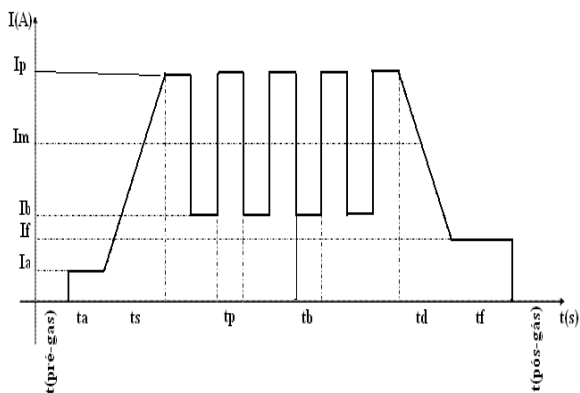


Fig. 8: Forma de onda da corrente pulsada.
Fonte: MODENESI, 2002.

3.1.1 Gases de proteção

Os gases de proteção utilizados na soldagem TIG são inertes, principalmente o argônio, o hélio e a mistura deles. Em alguns casos utilizam-se misturas especiais como as que contêm hidrogênio, na soldagem de aços inoxidáveis, ou nitrogênio, opcionais na soldagem de cobre e suas ligas. A pureza dos gases é de grande importância para a qualidade da solda, exigindo-se teores mínimos de 99,99% do gás ou gases considerados.

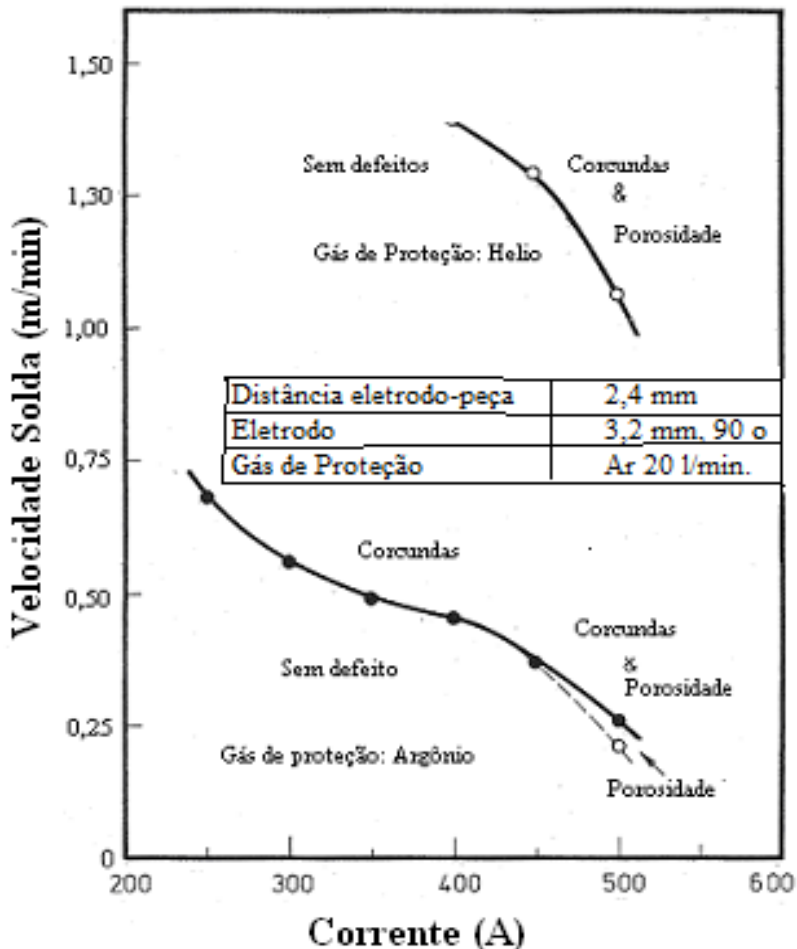


Figura 9: Efeito do gás de proteção no limite da velocidade de solda.
 Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

Segundo Modenesi (2002), quando o gás é aquecido, suas moléculas adquirem mais energia. Em temperaturas relativamente baixas, esta energia é, principalmente, de translação (ligada à velocidade de deslocamento das

moléculas). Em temperaturas mais elevadas, a energia vibracional de moléculas poliatômicas aumenta e pode tornar-se suficiente para causar a sua ruptura ou dissociação. Em temperaturas ainda mais elevadas, um elétron nas camadas mais externas dos átomos, pode ser expulso por ocorrência de ionização. Observa-se, contudo, que a ionização começa logo, em temperaturas iniciais, com a abertura do arco. Quando ocorre por contato, pelo aquecimento do curto-circuito, o cátodo se aquece e cria condições de emissão de elétrons, sob tensão relativamente baixa. Estes elétrons colidem com átomos neutros arrancando elétrons das camadas exteriores. Quando a abertura do arco ocorre por alta frequência, sem contato, a alta tensão estabelecida cria um campo elétrico que reúne condições para arrancar elétrons das camadas exteriores dos átomos do gás.

Conforme observa Savage, Nippes e Agusa (1979), em um arco, onde o gás de proteção é Argônio, pode-se observar uma coluna, no centro do arco, que é brilhante e mais cilíndrica: porém, com a proteção feita com o gás de He observa-se uma mancha anódica, relativamente larga, na superfície da poça de fusão.

Na figura 9, Savage, Nippes e Agusa (1979) demonstram, a comparação entre o He e o Ar, como gás de proteção. A curva do He demonstra o limite de velocidade muito maior do que

para o Ar. Como exemplo, a velocidade limite com a proteção de He para 400 A, excede a por Ar por um fator de três. O fato sugere que, a pressão do arco com a proteção de He, deve ser muito menor do que, com a proteção de Ar.

Para uma determinada corrente, a velocidade de soldagem para o aparecimento de defeitos como *corcundas* quase triplica ao se utilizar He, ao invés de argônio, comprovando que o He atrasa o início da corcunda. Soderstrom e Mendez, 2006 mostram que a distribuição de pressão no arco TIG muda, significativamente, com o tipo de gás usado como demonstra a figura 10.

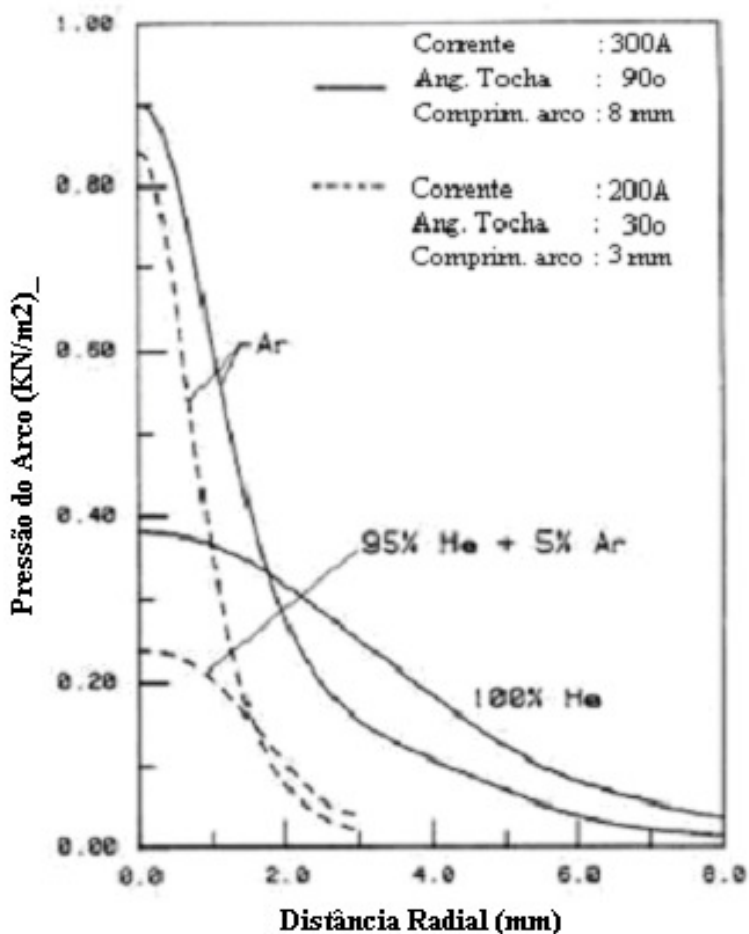


Figura 10: Efeito do gás de proteção na pressão do arco na solda.

Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

A área em que a pressão atua tem relação direta com a área de concentração do calor. A pressão total agindo na poça de fusão a uma determinada corrente, é significativamente menor na proteção de He. Como a força dominante que governa o

mecanismo do aparecimento de *corcundas* é a pressão do arco, a corrente precisa ser muito maior com o He, para produção de força suficiente, para o aparecimento deste defeito de soldagem.

As atuais necessidades industriais exigem maior produtividade dos processos e a soldagem TIG não pode margear este fato. Desta forma é fundamental o desenvolvimento de novos meios para atuar com o TIG em alta velocidade de soldagem. Solução interessante seria o uso de um gás que possibilitasse o aumento da velocidade de soldagem e neste contexto, vem o uso do gás de proteção, com argônio misturado ao hidrogênio, assunto que será analisado com mais detalhes, nos próximos itens.

3.1.2 Características dos gases argônio e hidrogênio

Em soldagem a arco elétrico com gás de proteção, o argônio, seguramente, é elemento essencial e pode ser usado como gás básico de proteção, com adições de O₂, CO₂, He ou H₂.

O argônio é obtido na atmosfera apesar de ser, apenas, 0,934% da mesma. Sendo 1,38 vezes mais pesado que o ar, o argônio proporciona eficiente e estável proteção do arco e da

poça de fusão. Devido à sua baixa energia de ionização, a abertura do arco voltaico é facilmente atingida no início do ciclo de soldagem. A condutibilidade térmica do argônio, como ilustra a figura 12, afeta o formato do arco, bem como, a geometria do cordão de solda.

O hidrogênio é inflamável com ponto de ignição em 560° C. É mais leve que o ar e se torna explosivo quando em combinação em larga escala com o ar e O₂. Entre todos os gases, o possuidor da mais alta condutibilidade térmica, da maior entalpia é o hidrogênio. Como ilustram as figuras 12 e 13, o hidrogênio, que é também um gás redutor, pode reagir com oxigênio e impedir a formação de óxidos. É usado como gás de proteção como adição a outros gases, principalmente o argônio, mas também, o hélio, em pequenas quantidades.

O hidrogênio, em combinação com o argônio, aumenta a tensão do arco voltaico e, conseqüentemente, a sua potência. Sendo o hidrogênio um redutor, evita a formação de óxido na superfície da solda, o que torna o aspecto do cordão de solda bem melhor.

Testes realizados com a soldagem de aços inoxidáveis, usando como gás de proteção a mistura de hidrogênio de 0,5% a 20% em argônio, conforme Tusek e Suban (2000) demonstraram, a mistura afeta a dependência entre tensão e

intensidade de corrente do arco, também é conhecida como característica estática do arco, da figura 7.

Quanto maior o teor de H_2 no Ar, maior a variação da tensão para dada intensidade de corrente sem que se alterem os parâmetros da fonte de solda, como ilustra a figura 14.

As propriedades mostradas nas figuras 11 e 12, dos gases H_2 e Ar, são bastante diferentes, o que contribui para obtenção da boa qualidade da mistura do produto e, portanto para usá-lo como gás de proteção na soldagem TIG.

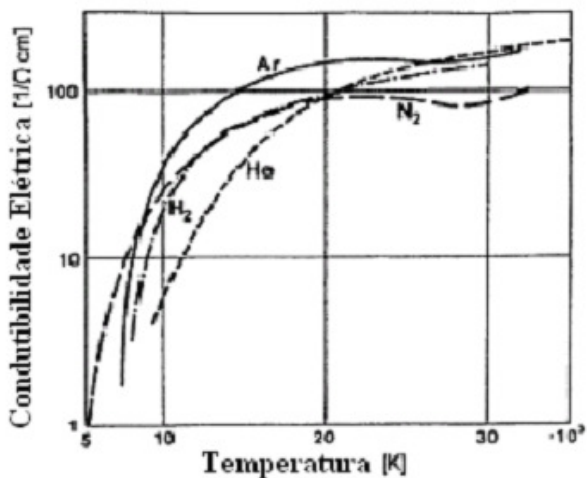


Figura 11: Condutibilidade elétrica dos gases em função da temperatura.

Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

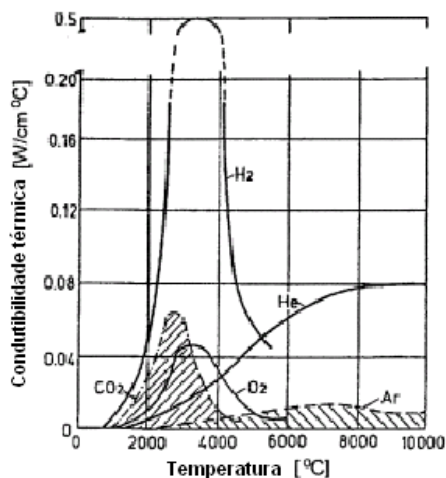


Figura 12: Condutibilidade térmica dos gases em função da temperatura.

Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

A condutibilidade térmica do hidrogênio, ilustrada na figura 12, na faixa de temperatura entre 3.000 e 4.500° C é quase dez

vezes maior que o argônio. Normalmente, esta é a faixa de temperatura que prevalece no arco voltaico da soldagem TIG.

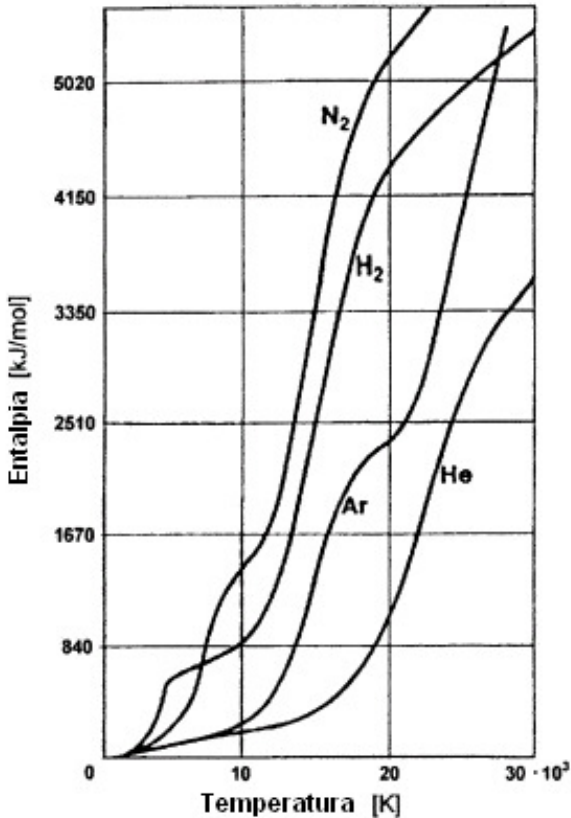


Figura 13: Entalpia dos gases em função da temperatura
Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

A figura 13 ilustra a entalpia de alguns gases. Segundo TUSEK E SUBAN, 2000, páginas 369 a 376, a entalpia do hidrogênio é maior que a do argônio, na quase totalidade da

faixa de temperatura. A entalpia do gás de proteção afeta na formação do arco voltaico na sua forma geométrica como, também, na distribuição de temperatura internamente arco.

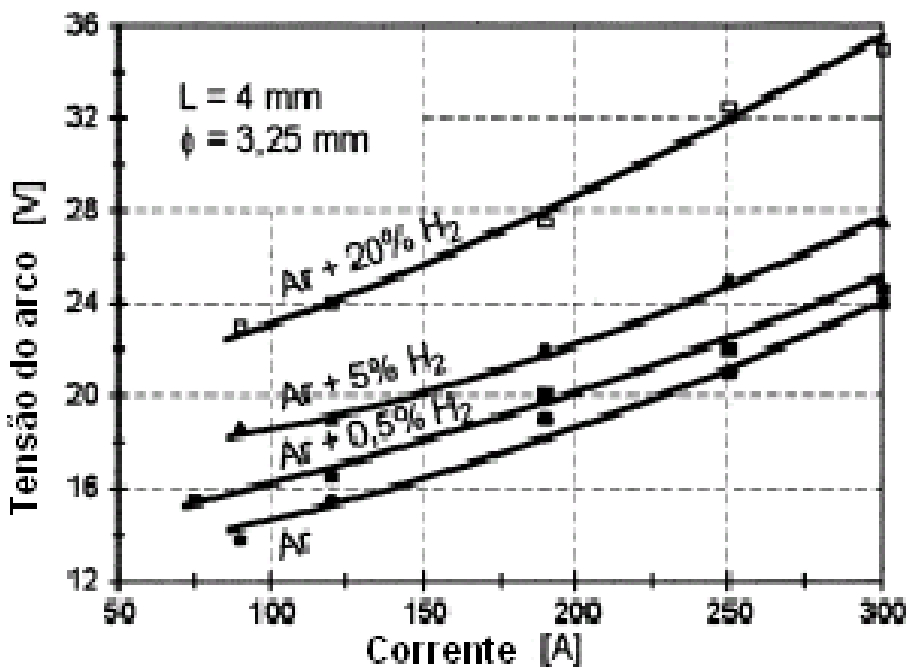


Figura 14: Característica estática do arco TIG em diferentes atmosferas.

Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

Duas macrografias da zona de fusão, obtidas em soldagem TIG, com diferentes gases de proteção, a uma intensidade de corrente constante, são observadas na figura 15. A tensão do arco variou devido à atmosfera do gás de proteção ser diferente. Segundo TUSEK E SUBAN, 2000 o aumento de

tensão é devido a maior energia de ionização e maior condutividade térmica do H₂ se comparado com o Ar. A figura 15 (a) revela uma solda feita com Ar puro e $I = 200$ A, $U = 14$ V, $V_s = 0,3$ m/min e a figura 15(b), indica uma solda realizada Ar + 10 H₂ e $I = 200$ A, $U = 21$ V, $V_s = 0,3$ m/min. Com gás de proteção composto de Ar + 10% H₂ ocorreu uma maior penetração.

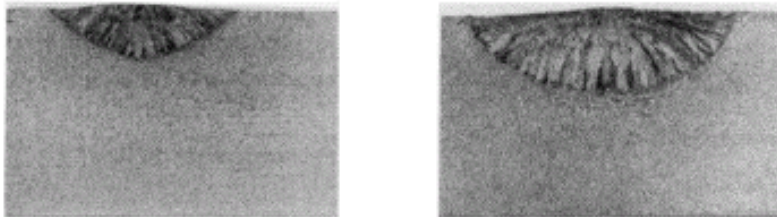


Figura 15: (a) Ar puro

(b) Ar + 10% H₂

Macrografias de soldas feitas com a mesma corrente, mas com diferentes gases de proteção e Diferentes Tensões do Arco (Eletrodo Negativo).

Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

Algumas questões têm sido levantadas por autores como Lowke (1997), sobre a qualidade do metal-base fundido e, sobre a difusão do hidrogênio na poça fundida. Estes tópicos são temas de futuros estudos a serem desenvolvidos em outras pesquisas.

3.2 DEFEITOS DE SOLDA NO PROCESSO TIG

Para Savage, Nippes e Agusa (1979), o aparecimento de defeitos na solda TIG em elevadas correntes, maiores que 300A e altas velocidades de soldagem acima de 0,60 m/min, é o principal problema que limita o aumento de produtividade.

Só é possível aumentar a velocidade de soldagem, à medida que se aumenta a corrente. Em correntes baixas, a poça de soldagem apresenta comportamento estável, já que o arco não tem força para expulsar o metal líquido. Porém, quando se deseja soldar componentes mais espessos, que necessitam de área fundida e de penetração maiores, torna-se necessário aumentar a corrente de soldagem. À medida que vai se elevando a corrente, a poça de soldagem adquire configuração em que se inicia a expulsão do metal fundido para a região posterior, formando uma cratera na região localizada imediatamente abaixo do eletrodo.

Para correntes maiores que 300A este efeito se torna bastante pronunciado. Nesta condição, conforme a velocidade de soldagem é aumentada, ocorre formação de defeitos no cordão de solda.

As figuras que seguem, indicam o aspecto típico de um cordão TIG com as corcundas:

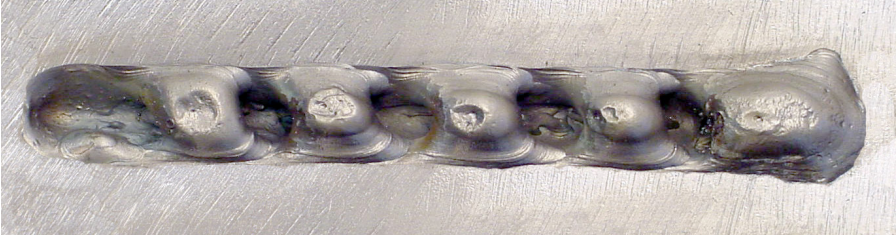


Figura 16: Aspecto de um cordão com *humping* com o processo TIG.
Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

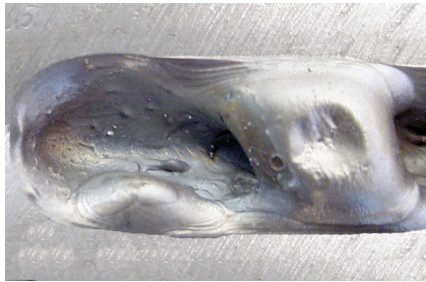


Figura 17: Detalhe da cratera que se forma durante a soldagem.
Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

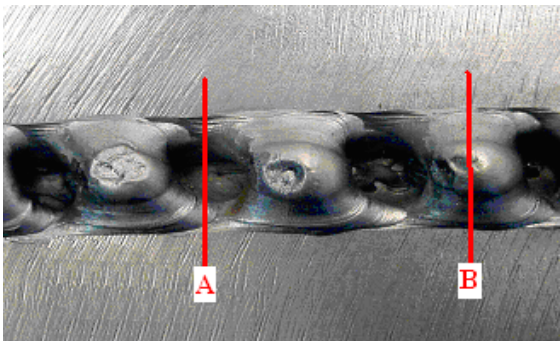


Figura 18: Detalhe das regiões onde o cordão foi cortado.
Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

As seções transversais estão mostradas nas figuras 19 e 20.

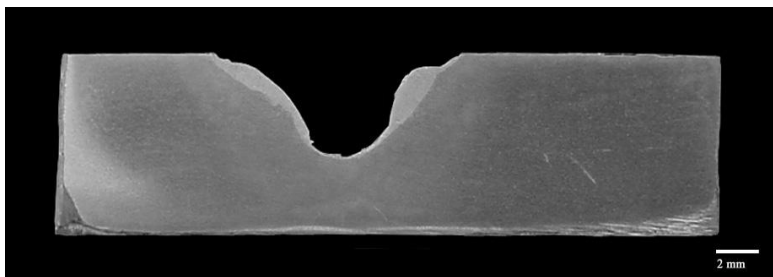


Figura 19: Seção transversal A da figura 18.
Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

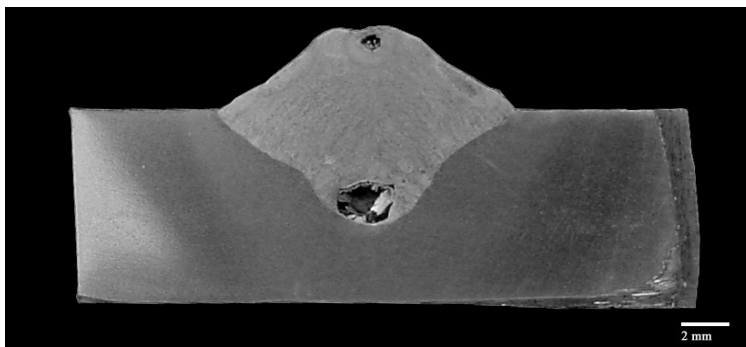


Figura 20: Seção transversal B da figura 18.
Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

O comportamento pode ser esquematizado pela configuração apresentada na figura 21. Em correntes acima de 300 A ocorre formação de uma cratera, ao invés de formar uma poça metálica líquida sob o arco, como ocorre na soldagem TIG em baixas correntes. Para Savage, Nippes e Agusa (1979), a formação dessa cratera ocorre, principalmente, devido à

elevada pressão do arco, que empurra o metal líquido para a região posterior da poça de fusão.

À medida que a tocha de soldagem se movimenta na direção de soldagem, vai fundindo o metal que se encontra na frente do arco. Esse metal é transportado para a região posterior da poça por uma camada de metal fundido, que permanece nas laterais da cratera e se acumula em uma bolsa de material fundido na região posterior do cordão, onde então, se solidifica.

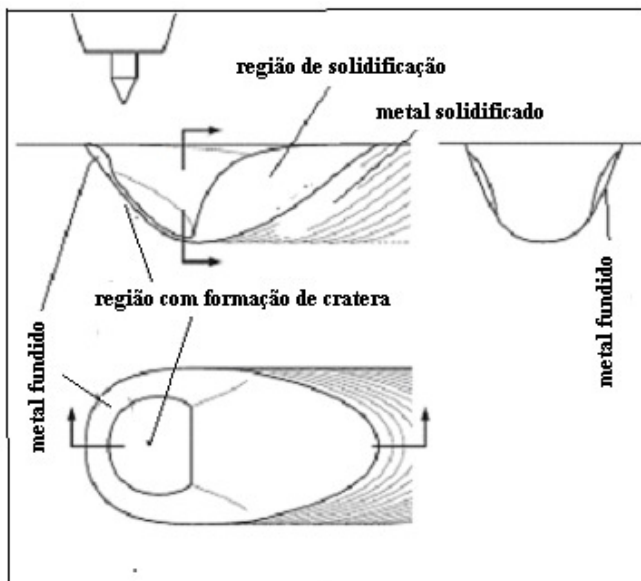


Figura 21: Representação da poça de fusão TIG em elevadas correntes.

Fonte: SODERSTROM E MENDEZ, 2006.

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, que se solidifica, continuamente, e o defeito de soldagem não ocorre: neste caso, a poça de fusão tem formato de gota elíptica conforme figura 22-A. À medida que a velocidade de soldagem aumenta, a poça de fusão se alonga, de maneira que o calor do arco passa a ser insuficiente na região posterior da poça de fusão. Como os canais de metal fundido que transportam o material que se funde na região anterior para a região posterior da poça de fusão são delgados, solidificam-se, facilmente, assim que o arco não consegue mais fornecer a quantidade de calor suficiente para mantê-los na fase líquida e a poça adquire formato elíptico mais alongado (figura 22-B). Ocorrendo a solidificação desses canais, o metal que continua a ser fundido na região anterior, passa a se acumular em um novo trecho de cordão, deixando uma região de cratera sem preenchimento de material. Como a antiga região de solidificação, que acumulava uma bolsa de metal líquido, passa a não receber mais material, acaba se solidificando também e, assim, a poça passa demonstrar formato de gota alongada (figura 22-C). Ao longo da soldagem, o cordão acaba resultando, então, em seqüência alternada de regiões de cratera

e regiões de cordão, com protuberâncias. Esse fenômeno é conhecido como *corcundas* ou, no inglês, como *humping*.

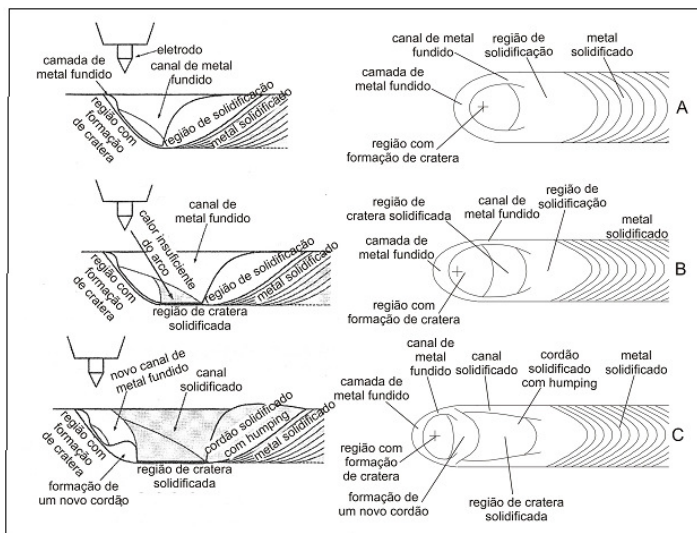


Figura 22: Esquema da formação de corcundas *humping* em soldagem TIG.
Fonte: MENDEZ E EAGAR, 2003.

Boniardi (2004) reafirma que a poça de material fundido durante a transição líquido-sólido, é comparável, no seu conjunto, a um sistema que, deslocando-se de uma condição de equilíbrio pela variação de um ou mais parâmetros, tende a assumir uma nova condição de estabilidade como demonstra a figura 23. Os grãos tendem a curvar-se para a direção da solda, como se observa na figura 24, com orientação cristalográfica diferente, o que origina uma anisotropia estrutural, com

benéficos efeitos sobre as características mecânicas do cordão de solda.

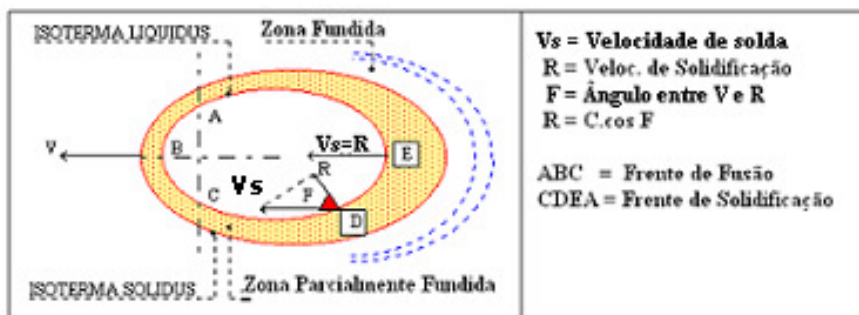


Figura 23: Frente da fusão e solidificação em poça na forma de gota elíptica.

Fonte: BONIARDI, 2004.

A velocidade de solda V_s é igual à velocidade de solidificação R . Esta condição ocorre quando a velocidade de solda é, no máximo, igual à velocidade de resfriamento ou solidificação.

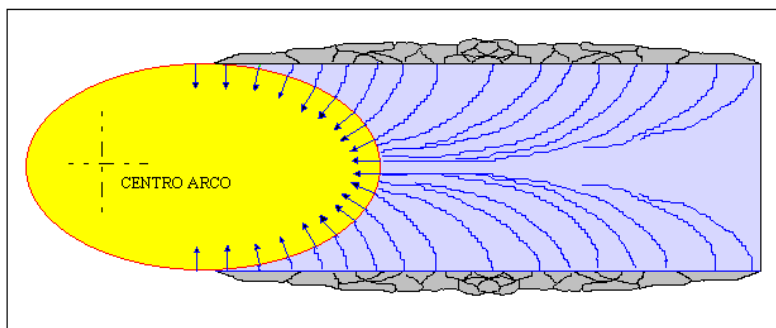


Figura 24: rente de solidificação na poça em forma de gota elíptica.

Fonte: BONIARDI, 2004.

À medida que aumenta a velocidade de solidificação da poça de fusão durante a transição líquido-sólido, se atinge o valor crítico (V_{crit}), caracterizado pela solidificação que não pode mais ser mantida paralela à direção de soldagem (frente de fusão), da figura 25.

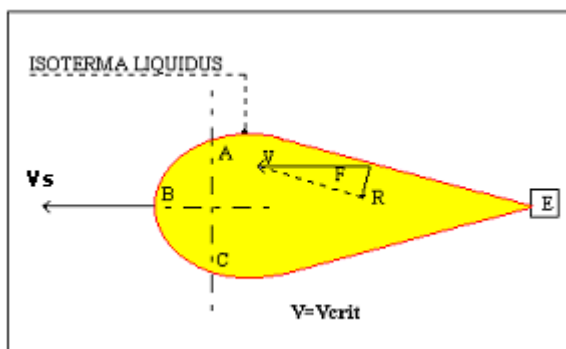


Figura 25: Frente de fusão e solidificação na poça em forma de gota elíptica alongada.

Fonte: BONIARDI, 2004.

Agora, os grãos são orientados segundo o eixo da solda (isotropia estrutural), com efeitos negativos, em termos de características mecânicas do cordão. A solidificação da poça de fusão ocorre com alterações locais de composição química, ou seja: a segregação. Conhecida como segregação central, demonstrada na figura 26, esta ocorre no centro do cordão e, pode ser intensa, quando resulta do encontro de duas frentes de solda.

Este fato pode causar variações de propriedades mecânicas ao longo do material e, em casos mais graves, problemas de

fissuração como ilustrado, mais adiante na figura 65: quase sempre longitudinais, segundo o eixo principal de movimento no cordão de solda.

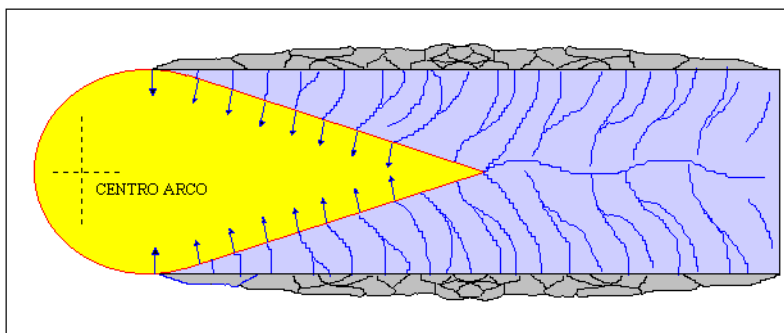


Figura 26: Frente de solidificação na poça em forma de gota elíptica alongada.

Fonte: BONIARDI, 2004.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM NA FORMAÇÃO DO DEFEITO DE SOLDA

Na soldagem TIG, como esclarecem Savage, Nippes e Agusa (1979), o aumento da velocidade de soldagem, além de certo limite crítico, resulta na deterioração do cordão devido à formação de porosidade e/ou corcundas. A prevenção, ou minimização, desses defeitos é um objetivo muito importante,

pois, permitiria um aumento do limite máximo da velocidade de soldagem e, portanto, da eficiência de fusão.

As propriedades físicas e metalúrgicas da região onde se processa a depressão, são fatores importantes e afetam a formação de defeitos. Entretanto, a literatura corrente não aborda os efeitos dessas propriedades.

Dois fatores têm sido considerados como responsáveis pelo movimento do metal fundido e pelo aparecimento da superfície com depressão. Primeiramente, a diferença de temperatura entre a parte frontal e posterior da poça altera a tensão superficial de tal maneira que faz com que o metal líquido flua para a traseira da poça: Entretanto, não se conhecem estudos quantitativos. A outra razão para o surgimento da região com depressão é a pressão do arco, que atua no metal fundido, na frente da poça.

3.3.1 Efeito da corrente de soldagem

Para Savage, Nippes e Agusa (1979), a relação entre a corrente de soldagem TIG e o limite de velocidade consta da figura 27. Três faixas de correntes podem ser identificadas, a saber: a) Correntes <250 A: a porosidade em velocidades de soldagem e, depois ocorre a corcunda; b) Correntes de 250 A a

430 A: o limite de velocidade é determinado pelo aparecimento de corcunda; c) Correntes > 430 A: porosidade em velocidades de soldagem menores, seguida de corcunda e, a inclinação da curva do limite de velocidade se torna mais negativa.

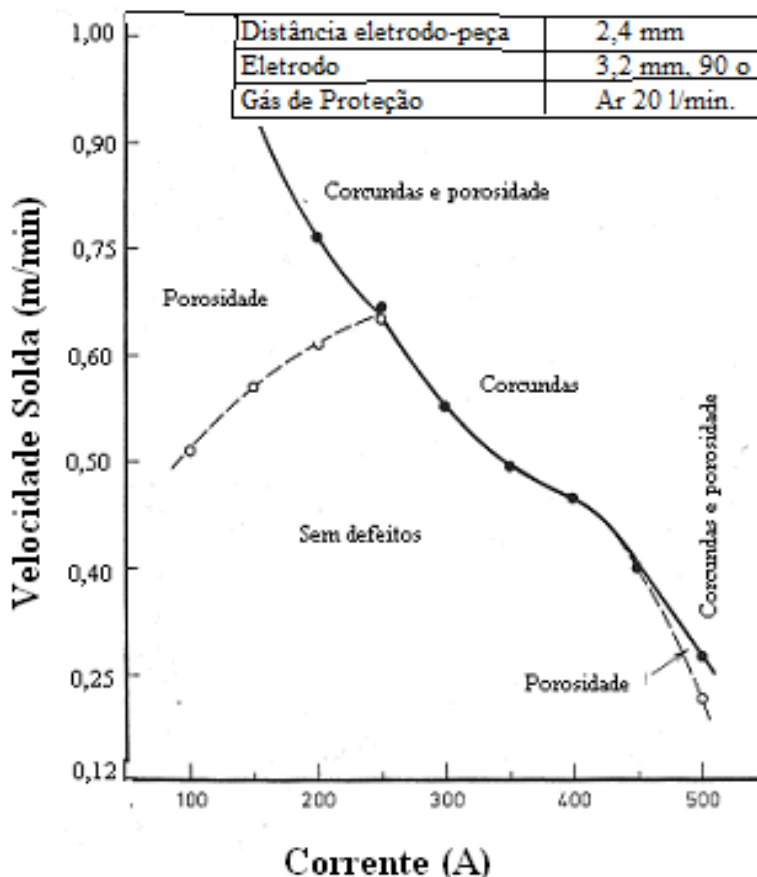


Figura 27: Efeito da corrente na velocidade de solda.

Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

3.3.2 Efeito da condição da superfície do eletrodo

O efeito da condição da superfície do eletrodo é mostrado na figura 28. Usando um eletrodo pré-condicionado com uma corrente maior do que a utilizada para determinar a velocidade limite, os limites são elevados em relação aos obtidos com eletrodos pré-condicionados, com a mesma corrente. Este evento enfatiza a importância da condição da superfície do eletrodo. Contudo, a literatura não esclarece se este fato é, realmente, inerente à forma do eletrodo ou por que isto resultou em uma tensão mais elevada.

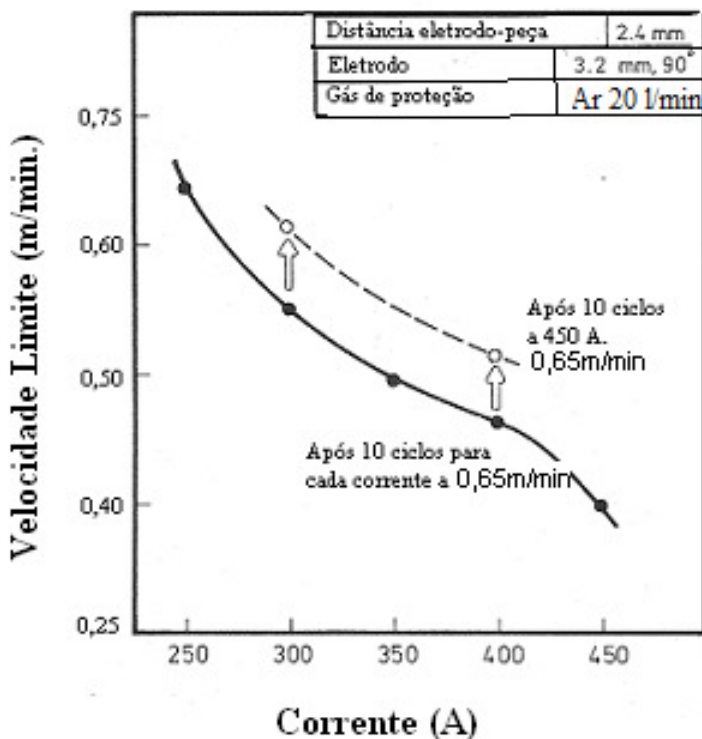


Figura 28: Efeito da condição do eletrodo na velocidade de solda.
Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

3.3.3 Efeito da distância eletrodo-peça

A distância eletrodo-peça é um dos fatores mais importantes que afeta o limite da velocidade de soldagem. A figura 29 demonstra o efeito da distância eletrodo-peça para a velocidade limite, tanto para Ar, como para He. As curvas

indicam que o limite de velocidade, para um arco menor excede àquelas de um arco maior.

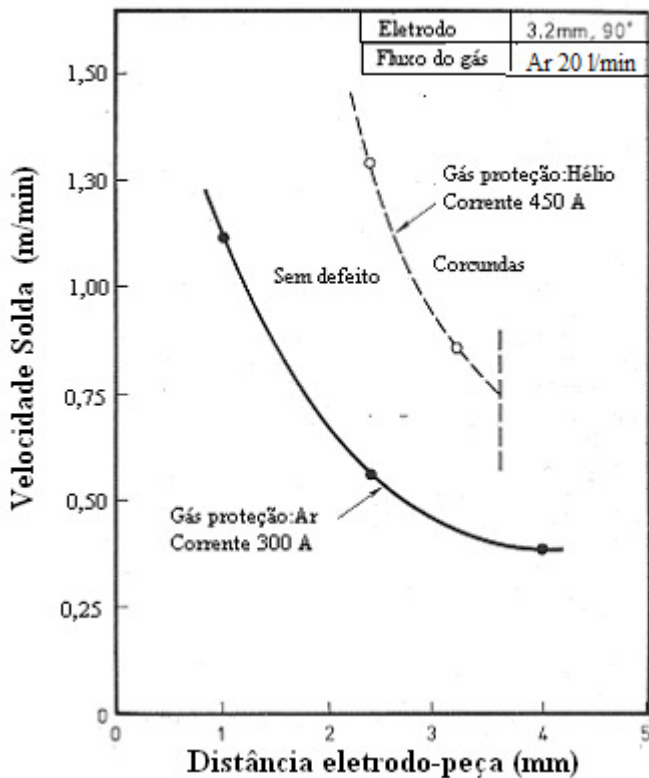


Figura 29: Efeito da distância eletrodo-peça na velocidade de solda limite.
Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

3.3.4 Efeito dos parâmetros de soldagem na força do arco

Conforme Savage, Nippes e Agusa (1979), a força do arco foi medida em gramas por meio de um dispositivo especialmente construído para este fim. Foi então analisado os dois parâmetros que mostrara ter influência na força do arco, a saber:

a) *Velocidade de soldagem*: a influência da velocidade de soldagem, na força do arco, foi investigada usando corrente constante com 300A. Na faixa de velocidade testada, de 0,20 a 0,90 m/min, a força do arco se manteve constante, independente, da ocorrência, ou não, de corcundas;

b) *Corrente de soldagem*: como se constata na figura 30, a força do arco acresce, linearmente, com o aumento da corrente de soldagem. Independente da ocorrência, ou não, de corcundas, a linha permanece com inclinação constante.

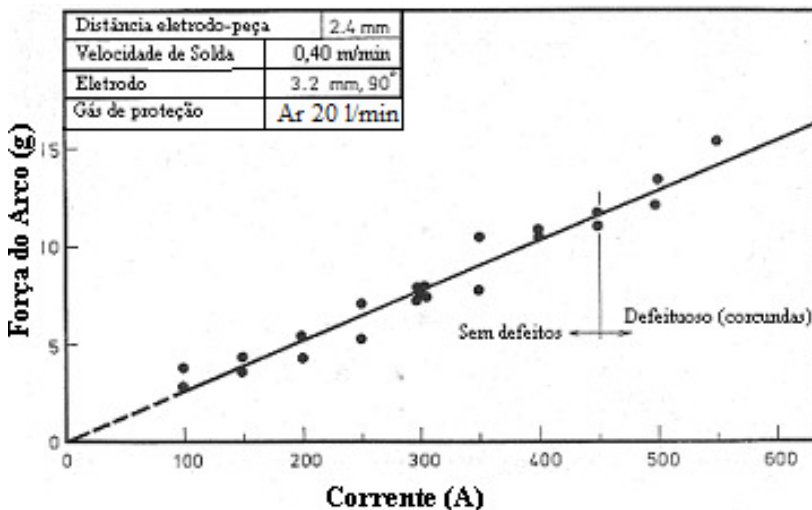


Figura 30: Efeito da corrente de soldagem na força do arco.

Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA 1979.

A figura 27 mostra que, o limite de velocidade de soldagem é reduzido com o aumento da corrente de soldagem. Apesar de a curva limite da velocidade de soldagem, pela corrente de soldagem, apresentar mudanças abruptas na inclinação a 250 A e 430 A, não se observou variações correspondentes na relação entre a força do arco e a corrente de soldagem. Por não serem observadas variações na relação linear entre a corrente de soldagem e a força do arco, ver figura 30, enquanto ocorreram mudanças abruptas na inclinação das curvas da corrente de soldagem e velocidade de soldagem, tudo indica que a distribuição de pressão, ao invés da força total do arco, deve ser o fator dominante na formação dos defeitos de soldagem.

O limite de velocidade de soldagem encontrado, foi muito maior para o He do que para o Ar, como comprova a figura 9. Com base na geometria da penetração foi especulado que a força do arco com a proteção de He deveria ser menor do que a força do arco com a proteção de Ar.

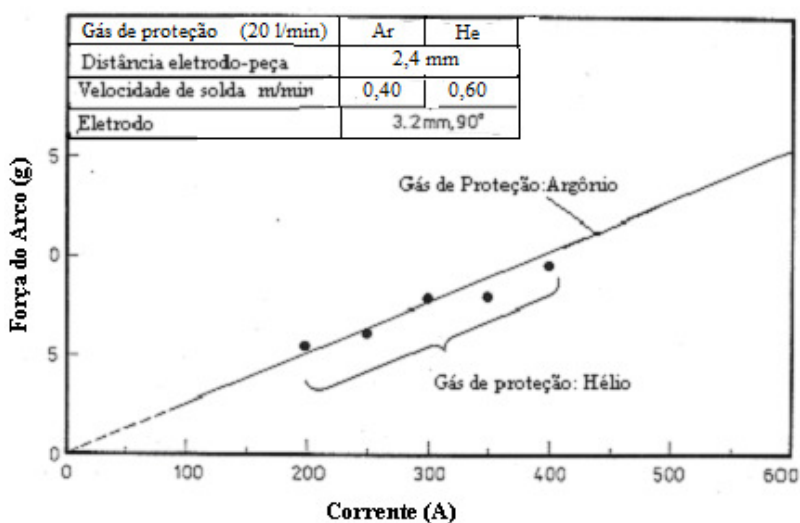


Figura 31: Efeito do gás de proteção na força do arco.

Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

Na figura 31 se constata os resultados das medições da força do arco feitas para verificar essa especulação. A linha sólida representa os dados mostrados, anteriormente, na figura 30 para a proteção com Ar e os círculos representam a força do arco em função da corrente de soldagem com proteção de He.

Como demonstra a figura 31, ao contrário da especulação inicial a força do arco é diretamente proporcional à corrente de soldagem e independente do gás de proteção. Deste modo, a fim de explicar a diferença no limite de velocidade de soldagem é necessário considerar a pressão efetiva do arco. Se, por exemplo, a pressão do arco for, mais uniformemente distribuída sobre a superfície da poça de fusão com a proteção de He do que com a proteção de Ar, a pressão concentrada no metal fundido deve ser reduzida. Essa situação permitiria usar maiores velocidades de soldagem. Possivelmente, filmagens de alta velocidade da superfície da poça de fusão poderiam fornecer informações adicionais sobre a distribuição de pressão.

Os dados dispostos na figura 29 indicam que, com o aumento na distância eletrodo-peça, o limite da velocidade de soldagem é diminuído. Com relação à força do arco, seria esperado diminuir com o aumento do tamanho do arco. A figura 32 estampa a relação real entre a força do arco e a distância eletrodo-peça. Como esperado, com o aumento da distância, a força do arco diminui. Então, novamente, não há possibilidade de explicação quanto à variação na velocidade de soldagem, com base na força do arco. Isso suporta o postulado anterior: a pressão efetiva, ao invés da pressão total, deve governar o limite da velocidade de soldagem.

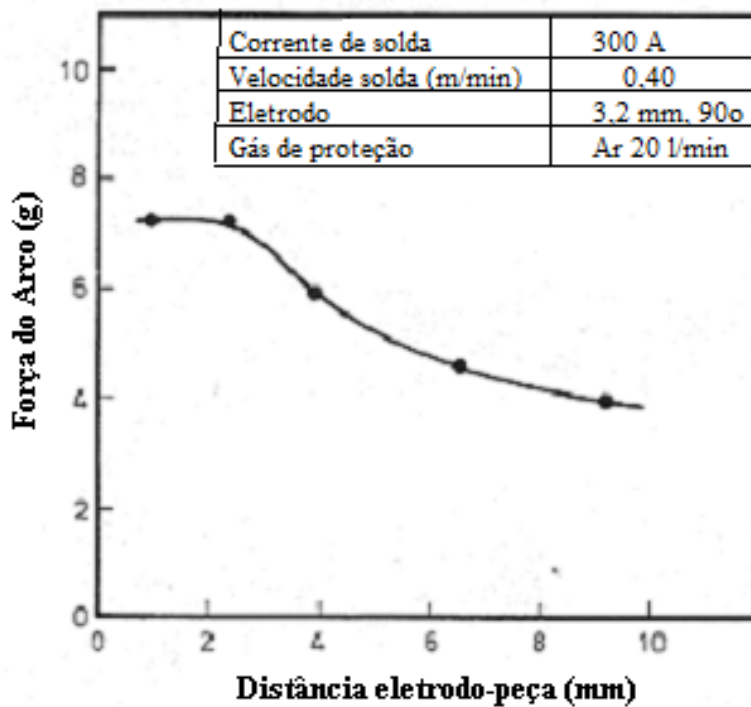


Figura 32: Efeito da distância eletrodo-peça na força do arco.
Fonte: SAVAGE, NIPPES E AGUSA, 1979.

4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

4.1 EQUIPAMENTOS

A figura 33 mostra uma bancada idealizada para testes com a carcaça de compressores, por meio de soldagem automática.



Figura 33: Bancada de testes.

A bancada da figura 33 é composta de:

1) Robô Motoman UP6 com tocha TIG refrigerada e eletrodo \varnothing 6,35 mm feito de Tungstênio com 2% de tória, (ThO₂,) classificação da AWS EWTh-2;

- 2) Fonte IMC Digitec 800;
- 3) AVC – *Arc Voltage Control* (controle de tensão do arco);
- 4) Tocha Binzel TIG Automática 27 reta;
- 5) Pallet com compressor.

A fonte de soldagem é multi-processo, com tecnologia de chaveamento no secundário, modelo Digitec 800, fabricada pela IMC Ltda, com as seguintes características: Potência 10 kW; Capacidade: 500 A – 25 V a 100% de ciclo de trabalho; Tocha Binzel TIG reta para 500 amperes, refrigerada à água; Software de controle para rampas de corrente no início e final do ciclo de soldagem; Sistema automático de abertura de arco e controle de comprimento do arco (AVC) ver figura 34; Pulsção com regulagem direta do tempo de pulso e base da corrente.



Figura 34: AVC – *Arc Voltage Control* (controle de tensão do arco).

Durante a execução dos experimentos, a corrente de soldagem e a tensão do arco voltaico foram monitoradas. Tais parâmetros foram registrados por oscilogramas, com auxílio do sistema de aquisição portátil SAP-, ilustrado na figura 35.

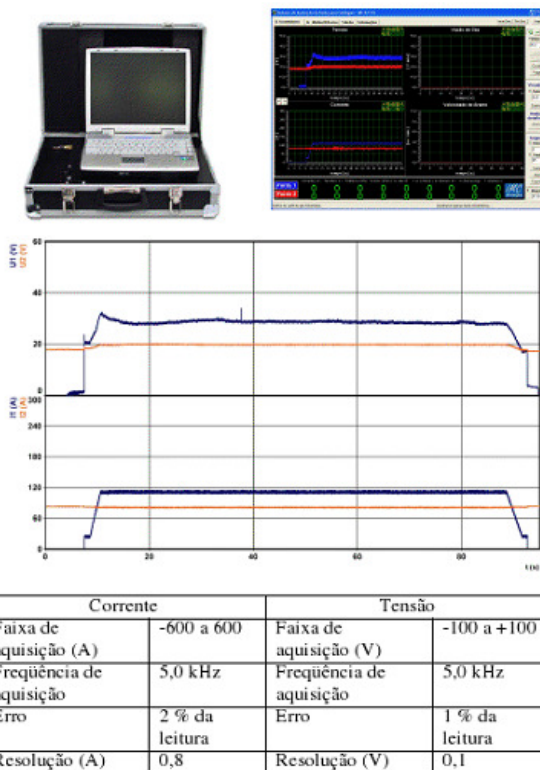


Figura 35: Sistema portátil de aquisição de dados AS.

4.2 MATERIAIS

A tabela 1 que é usada por um fabricante de compressores herméticos de refrigeração descreve os materiais com o qual foram estampadas as carcaças usadas nos testes de soldagem TIG. Os termos apresentados na coluna Especificado se

referem aos códigos dos fornecedores. O código mais usado é o CSN QC.

TABELA 1: COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MATERIAL DAS CARÇAÇAS.

Código	Especificação	Espessura (mm)	Tolerância (mm)							
11.211.1301	SAE1006/QC/EPA/CCT/EM	3,0	0/-0,21							
11.211.1302	SAE1006/QC/EPA/CCT/CCT	3,5	0/-0,23							
Composição Química (% peso)										
<i>Especificação</i>	C	Mn	P	S	Si	Al	N	B		
CSN EPA – EMBRACO	0,05	0,30	0,02	0,015	0,025	0,09	0,007	-		
CSN EM – EMBRACO	0,05	0,35	0,02	0,025	0,020	0,06	0,006	-		
CSN CCT 250	0,05	0,25	0,02	0,015	0,030	0,05	0,005	0,0025		
CSN QC	0,15	0,60	0,04	0,05	-	-	-	-		
CSN QC (Encontrado)	0,06	0,36	0,01	0,004	0,000	0,05	-	-		
CST 1006	0,06	0,45	0,03	0,025	-	0,06	-	-		
CST 1006 (Encontrado)	0,04	0,26	0,01	0,009	0,000	0,03	-	-		

A figura 36 exibe as dimensões típicas de uma carcaça para compressor hermético, aplicadas em sistemas domésticos de refrigeração.

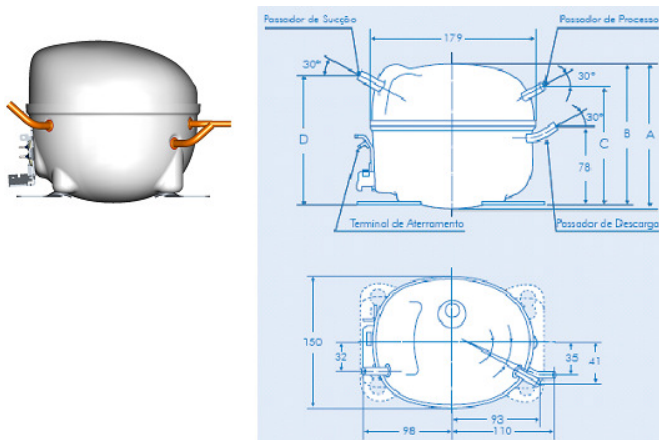


Figura 36: Dimensões da carcaça do compressor para refrigeração doméstica.

A borda da carcaça constitui a união das partes inferior e superior e caracteriza uma junta sobreposta com um perímetro de 540 mm, que deverá ser soldado em um tempo ciclo de 28 s.



Figura 37: Ilustração da medição da variação da altura da borda da carcaça.

É importante observar que a borda da carcaça pode variar em até 1,00 mm na sua altura ao longo do perímetro. Isto resulta da fabricação desta carcaça em ferramentas de estamparia, com profundidade de embutimento, em média, de 135 mm. Medições realizadas, conforme a figura 37 comprovaram o fato.

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A síntese dos ensaios realizados é mostrada na tabela 2:

TABELA 2: SÍNTESE DOS ENSAIOS REALIZADOS.

ENSAIO	TIPO	OBJETIVO
Soldagem TIG em carcaças de compressores herméticos com uso de gás: Ar + 5% H ₂ e Ar + 10% H ₂ Ar + 15% H ₂ Variação distância eletrodo-peça.	Automática com robô.	Avaliar repetibilidade e qualidade dos resultados obtidos.
Análise da área fundida	Macrografia da solda	Avaliar poça fundida, ZAC e penetração.
Análise de trincas.	Líquidos penetrantes, radiografia, fotografias.	Avaliar a influência dos parâmetros na ocorrência de trincas.
Ensaio de resistência mecânica.	Norma UL 1995/984 Fonte: BOSCO JR, 2007.	Avaliar resistência à fadiga da junta soldada para selamento de compressor hermético para refrigeração.

Com relação a parâmetros tais como corrente e tensão de soldagem, estes foram definidos por meio de testes considerando como critério de aceitação o aparecimento de defeitos de solda como descontinuidades no cordão. Os melhores parâmetros são mostrados mais adiante na figuras 52.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 TESTES EM CARÇAÇAS E COMPRESSORES

Desde o início dos testes constatou-se que o uso de um robô seria fundamental para flexibilidade do processo no posicionamento da tocha durante a solda. A carcaça tem sua forma geométrica, com raios diferentes e imperfeições oriundas do processo de estamparia, que dificulta obtenção de cordão de solda sem defeitos, se a tocha estiver fixa.

Para fixação dos compressores na bancada de soldagem, produziu-se uma base de utilização dos pontos de apoio na superfície inferior do compressor, de maneira que os compressores permanecessem na mesma posição, em todos os ensaios.

Buscou-se definir a melhor maneira de posicionar a tocha de soldagem no robô, de forma a conseguir soldar toda a circunferência do compressor, sem ocorrência de qualquer anomalia, ou que o robô travasse seus eixos. Como o único eixo que possibilitava rotação maior que 360° era o T, que é o último do braço do robô, a tocha foi posicionada de forma a ficar perpendicular a este eixo, possibilitando o movimento necessário para que toda a circunferência do compressor

pudesse ser soldada. O posicionamento da tocha é mostrado na figura 38.

Para programar a trajetória do robô foram marcados doze pontos ao longo da carcaça. Em cada ponto a tocha foi posicionada a 43 graus em relação à tangente do raio da carcaça do compressor. Utilizou-se a movimentação em trajetória circular no deslocamento entre os pontos. A posição da tocha, em cada ponto, foi definida encostando-se a ponta do eletrodo e a superfície externa do bocal na parede do compressor, conforme a figura 38(a). Desta maneira, o ângulo de ataque permanece constante ao longo de toda a soldagem do compressor. Variando-se a distância que o eletrodo mantém fora do bocal é possível modificar o ângulo de ataque. Esta metodologia de posicionamento da tocha de soldagem funcionou muito bem, e permitiu a realização de ensaios para avaliação da influência dos diferentes ângulos, inclusive, possibilitando a utilização de ângulos diferentes durante a mesma soldagem. Após realizar a programação do robô, o eletrodo e o bocal foram recuados em 2 mm, para que não tocassem a carcaça, durante a soldagem. A tocha foi posicionada perpendicularmente à parede da carcaça, e a ponta do eletrodo foi alinhada com a borda do compressor, conforme mostra figura 38.

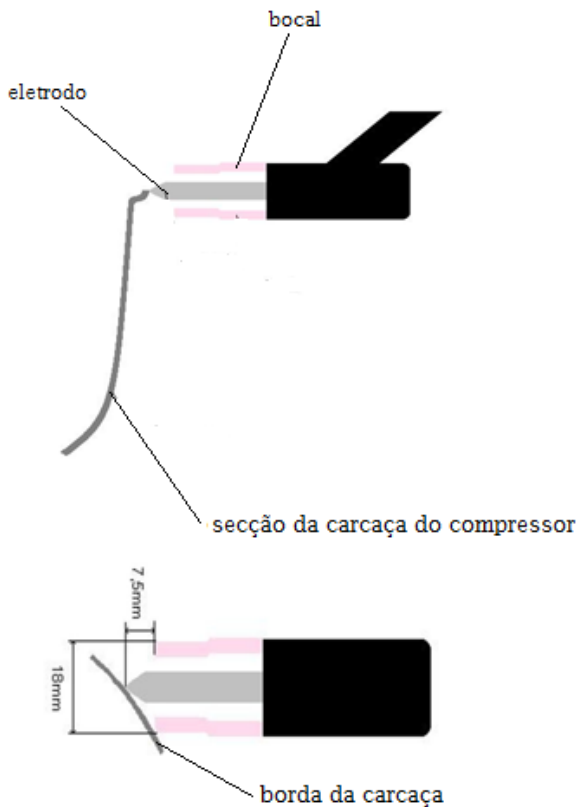


Figura 38: Posicionamento da tocha TIG em relação à carcaça.

Os ensaios de soldagem foram realizados utilizando-se a tocha TIG refrigerada, com eletrodo de diâmetro 6,35 mm e a fonte IMC Digitec 800. A abertura do arco foi realizada por meio de curto-circuito utilizando um pedaço de eletrodo de tungstênio. O eletrodo utilizado nos ensaios possuía um ângulo de afiação de aproximadamente 50°. Os ensaios foram

realizados em corrente constante, inicialmente com 450 A e velocidade de soldagem configurada no robô de 1,00 m/min. A vazão do gás de proteção foi de 12 l/ min. A tabela 3 mostra os parâmetros utilizados em todos os ensaios.

TABELA 3: PARÂMETROS DOS ENSAIOS REALIZADOS.

Ensaio	Vs (m/min)	I (A)	Gás de Proteção	Tempo de solda(s)
1	1,00	450	Ar +5%H ₂	29
2	1,00	450	Ar +5%H ₂	29
3	1,00	450	Ar +10%H ₂	29
4	1,00	460	Ar +10%H ₂	29
5	1,20	460	Ar +10%H ₂	25
6	1,20	460	Ar +10%H ₂	25
7	1,20	450	Ar +10%H ₂	25
8	1,40	450	Ar +10%H ₂	21
9	1,40	450	Ar +10%H ₂	21
10	1,60	450	Ar +10%H ₂	18
11	1,60	470	Ar +10%H ₂	18
12	1,60	490	Ar +10%H ₂	18

Para verificar a qualidade da solda realizou-se inspeção por líquidos penetrantes. As figuras 39 e 40 ilustram algumas amostras, soldadas com a configuração descrita. Contudo, não se mostrou ainda como ideal, pois, neste lote, houve peças com porosidade e trincas, o que resulta em vazamentos.

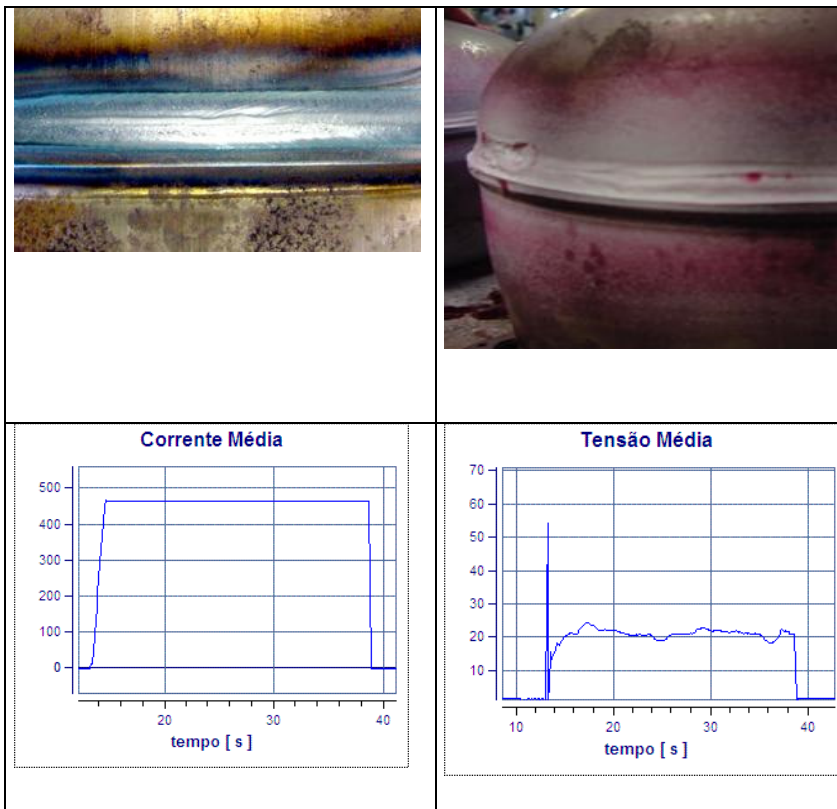


Figura 39: Corpo de prova do ensaio 6 e oscilogramas de corrente e tensão média.

Devido à falta de continuidade na condição de 460 A e 1,60 m/min, no ensaio onze, a corrente foi aumentada para 470 A, porém a solda, ainda, não apresentou continuidade em todo o cordão.

Para realizar uma comparação entre a quantidade de material fundido na velocidade de 1,00 m/min e na velocidade

de 1,60 m/min, algumas carcaças soldadas foram cortadas em três pontos diferentes.

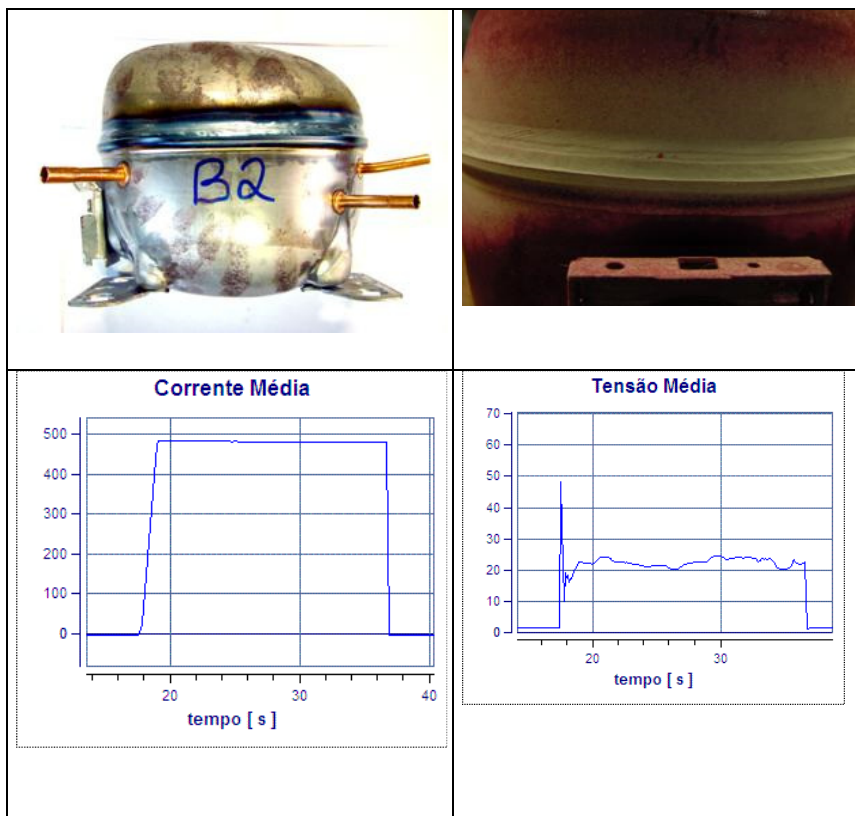


Figura 40: Corpo de prova do ensaio 11 e oscilograma de corrente e tensão média.

As figuras 41, 42 e 43, que seguem, mostram as macrografias obtidas:

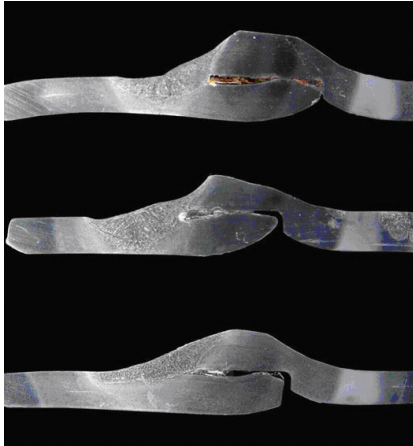


Figura 41: Macrografias do ensaio 1: I:450 A, vs:1,00 m/min, gás Ar +5% H_2 .

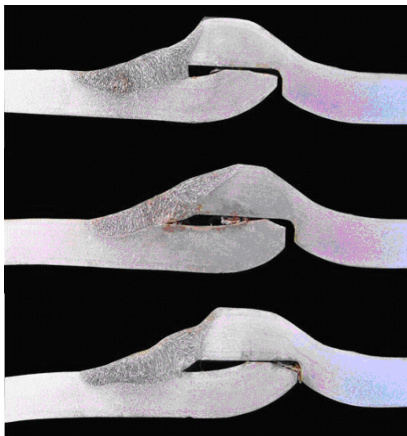


Figura 42: Macrografias do ensaio 3, I:450 A, vs:1,00 m/min, gás: Ar +10% H_2 .

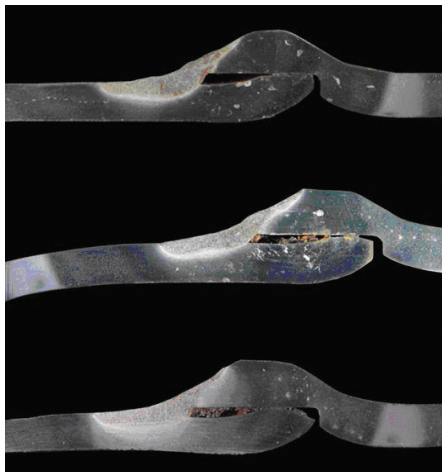


Figura 43: Macrografias do ensaio 11, I:500 A,vs: 1,60 m/min, gás: Ar +10% H₂.

Nesta fase de testes percebe-se que foi possível realizar soldagens em todo o perímetro da carcaça do compressor utilizando um robô. Como já se comentou, a utilização desta automação é importante, por permitir a manutenção do ângulo de ataque da tocha, em relação à borda do compressor, virtualmente constante, pois, o robô, corrige o ângulo de acordo com o raio da carcaça. As variações na altura da borda, também, são praticamente anuladas pelo robô: fato não possível de ser realizado em estações de solda, com dispositivo copiador, onde a tocha permanece fixa.

Os resultados da realização dos ensaios mostraram que, mantidas a corrente e a velocidade de solda, apenas alterando a mistura do gás de proteção de Ar + 5% H₂ para Ar + 10% H₂,

nas figuras 42 e 43, não se observou alterações significativas em termos de geometria da seção transversal das soldas. Se mantida, contudo, a mistura de Ar + 10% H₂ e aumentar a corrente de 450 A para 500 A e, a velocidade de 1,00 m/min para 1,60 m/min, percebe-se pequena diminuição na penetração, como esperado. Contudo, é possível soldar com velocidades de até 1,6 m/min, ou seja, um tempo de soldagem de 18 s, utilizando a mistura de gás Ar +10%H₂ sem a formação de corcundas e outros defeitos de soldagem.

A aquisição dos sinais de corrente e tensão, durante os ensaios de soldagem, mostraram que a fonte de soldagem conseguiu apresentar correspondência entre os parâmetros regulados na máquina e os medidos pelo sistema de aquisição.

5.2 INFLUÊNCIA DO TEOR DE HIDROGÊNIO NO GÁS DE PROTEÇÃO

Alguns ensaios de solda TIG também foram realizados em carcaças de compressores herméticos, com o objetivo de verificar a influência da mistura do hidrogênio no argônio, em termos de estanqueidade das soldas. Sessenta peças foram soldadas sendo trinta com gás Ar + 5% H₂ e trinta com Ar + 10% H₂. Foram mantidos os parâmetros do processo, tentando

simular em pequena escala, o comportamento do processo em produção industrial.

Para avaliar o desgaste, o eletrodo foi afiado antes do início dos ensaios, e foi utilizado durante as trinta soldagens, sem receber nova afiação.

O posicionamento da tocha, utilizado nos ensaios, é mostrado na figura 44 e, a geometria do eletrodo, é ilustrada na figura 45.

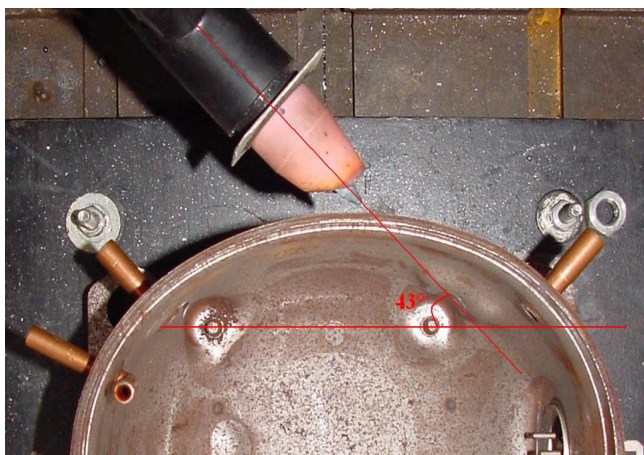


Figura 44: Posicionamento da tocha de soldagem com ângulo de 43°.

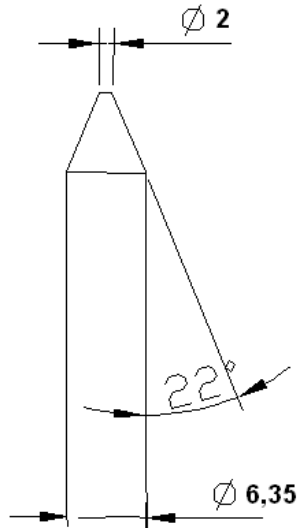


Figura 45: Geometria do eletrodo de Tungstênio.

Os parâmetros utilizados estão descritos na tabela 4:

TABELA 4:DADOS UTILIZADOS NO TESTE COM ROBÔ.

I_p	530 A
I_b	330 A
Frequência de pulsação	16,6 Hz
$t_p/(t_p+t_b)$	50%
Distância eletrodo-peça	1,5 - 2,0 mm
Tempo de soldagem	28 s
Velocidade de soldagem	1,2 m/min
Vazão gás de proteção	12,5 l/min



Figura 46: Aspecto geral dos compressores soldados.

Para facilitar a análise do desempenho do processo de soldagem, realizou-se ensaio de líquido penetrante nas amostras soldadas. Após o ensaio, as amostras foram classificadas em: A) Sem defeito; B) Com falta de continuidade em algum ponto do cordão; C) Apresentando trinca na região de finalização; D) Apresentando trinca ao longo do cordão (em regiões fora da zona de finalização). Os resultados constam das figuras 47 e 48.

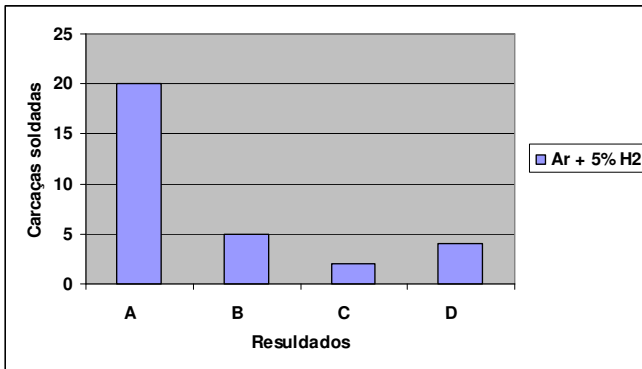


Figura 47: Teste de vazamento de 30 carcaças soldados com gás Ar +5% H₂.

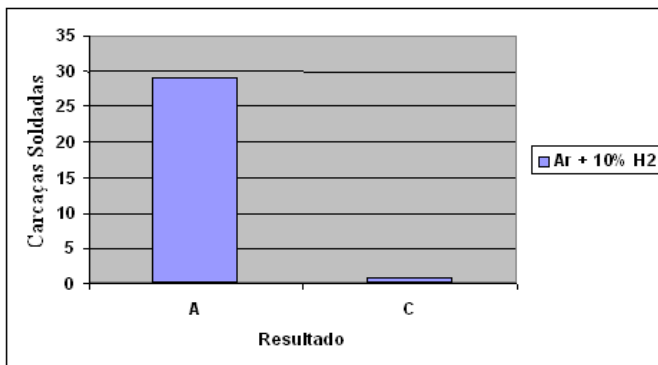


Figura 48: Teste de vazamento de 30 compressores soldados com Ar + 10% H₂.

A realização deste lote, contendo sessenta peças, possibilitou a observação de grande percentual de defeitos, nos cordões soldados. Para a mesma condição, o índice de refugo foi de 30% para o gás (Ar + 5% H₂), enquanto que, o teste

utilizando o gás Ar + 10% H_2 , revelou o índice de defeitos de 3%. Apenas uma das trinta peças soldadas apresentou defeito.

A trinca se formou na região de finalização do cordão. Esse tipo de defeito resulta de tendência do material líquido da poça de fusão, ser empurrado, de maneira excessiva para a frente da poça de fusão, deixando o cordão na região de finalização, com pequena espessura, que o torna mais suscetível às trincas.

Foram realizados testes, variando-se os parâmetros de soldagem como corrente de pico e corrente de base no trecho de finalização, como mostra a figura 52, com o objetivo de solucionar o problema. Estes ajustes possibilitaram a redução considerável da ocorrência de trincas nesta região, desta forma, o lote de 30 amostras realizado apresentou somente uma amostra com falha.

Entretanto, a ocorrência de defeito em uma das peças, ratificou a necessidade de continuar aprimorando os parâmetros de soldagem na região de finalização. Quanto ao fato de nenhuma das peças ter apresentado defeitos em regiões ao longo do cordão, demonstra que as variáveis de soldagem e o gás de proteção Ar + 10% H_2 podem estar bem próximos da otimização.



Figura 49: Aspecto do eletrodo após 30 carcaças soldadas com Ar + 10% H_2 .

Quanto ao desgaste do eletrodo durante as soldagens, foi possível observar após trinta ciclos de abertura e soldagem, que o eletrodo apresentou desgaste, quase insignificante, na região que toca a peça durante a abertura (cerca de 1 mm de comprimento e 0,5 mm de profundidade). Além disto, os parâmetros utilizados na abertura do arco não estão completamente otimizados: ainda se poderia trabalhar, no sentido de reduzir o desgaste do eletrodo.

A figura 49 ilustra a condição geral do eletrodo após os trinta ciclos de soldagem que foi considerada satisfatória, já que o formato do eletrodo permaneceu inalterado. Apesar de a superfície do eletrodo apresentar maior rugosidade no decorrer das soldagens, este fato ainda não se mostrou causador de

problemas. Vale lembrar que, ainda, é possível trabalhar em variáveis como tempo de pós-gás, se necessário.

5.3 INFLUÊNCIA DA DISTÂNCIA ELETRODO-PEÇA NA VARIAÇÃO DE TENSÃO

Realizou-se outro teste em carcaças de compressores, onde um lote de cem peças foi soldado em seqüência, tentando simular, em pequena escala, o comportamento do processo em produção industrial. O principal objetivo foi avaliar a influência da distância eletrodo-peça, na variação de tensão. Todas as peças foram soldadas utilizando o posicionamento de 43° e a mistura gasosa $\text{Ar} + 10\%\text{H}_2$. As peças foram numeradas de acordo com a seqüência de soldagem. A Tabela 5 mostra os parâmetros de soldagem utilizados:

TABELA 5: PARÂMETROS EXPERIMENTAIS DE SOLDAGEM TIG.

Ip	530 A
Ib	330 A
Frequência de pulsação	16,6 Hz
tp/(tp+tb)	50%
Vazão gás de proteção	12,5 l/min

Durante os ensaios foram realizadas aquisições dos sinais de corrente e tensão por meio do sistema de aquisição SAPV4-LABSOLDA/UFSC. As figuras 50 e 51 registram os oscilogramas de corrente e tensão. Podem-se observar os patamares de corrente de pulso e corrente de base.

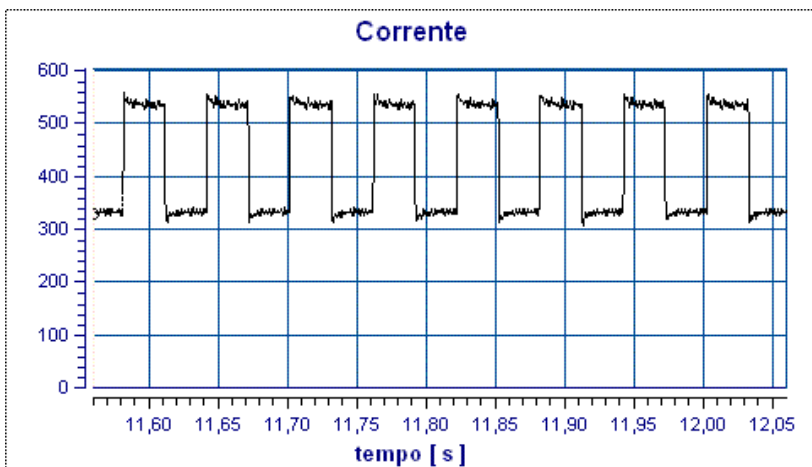


Figura 50: Oscilograma instantâneo de corrente.

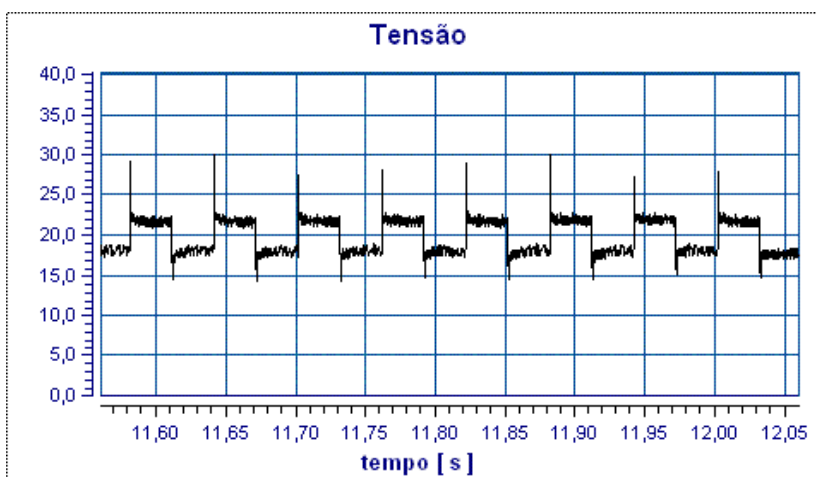


Figura 51: Oscilograma instantâneo de tensão.

Tão importante quanto as aquisições instantâneas, são as aquisições médias, durante toda a soldagem, compondo os gráficos mostrados nas figuras 52 e 53.

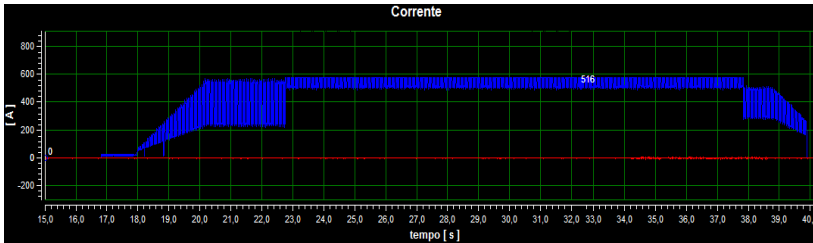


Figura 52: Oscilograma da corrente.

O ciclo demonstrado na figura 52 foi, na realidade, o conjunto de parâmetros, incluindo os patamares e rampas de corrente, o que melhor resultado apresentou, em termos de qualidade do cordão de solda. A mistura do gás de proteção também foi alterada e aumentou-se o percentual de H₂ de 10 para 15% que mostrou melhor resultado em termos de evitar trincas de solidificação. Os parâmetros registrados foram:

<u>Correntes:</u>	<u>Tempos:</u>	
Patamar inicial	$I_p=600A, I_b=200^a$	Patamar inicial 2,5 s
Fase de soldagem	$p=670A, I_b=520^a$	Patamar final 1,0 s
Patamar final	$I_p=500A, I_b=300^a$	Rampa de subida 2,3 s
Gás de proteção:	Ar + 15%H ₂	Rampa descida 1,0 s
Total de arco aberto	22s	
Frequência de pulsação em todas as fases: 16,6Hz (30ms tp e 30ms tb).		

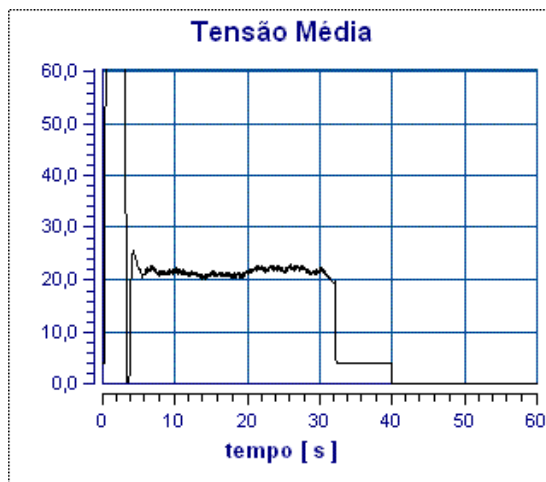


Figura 53: Oscilograma mostrando a média da tensão.

O oscilograma que mostra a variação da tensão é particularmente importante, pois, serve como indicativo da distância entre o eletrodo e a peça. Como a tensão é a variável dependente do processo, ela fornece também, informações que podem ser importantes para explicar ocorrências durante a soldagem. Os valores da corrente e tensão das figuras 50 e 51 representam médias obtidas, a determinados intervalos de tempo, já que se trata de soldagem em corrente pulsada.

Os respectivos oscilogramas retratam o referido valor médio, desde a abertura do arco até a finalização de cada solda, incluindo os tempos de *rampa* de subida e descida. A tensão foi medida nos terminais da fonte de soldagem.

A soldagem das cem amostras foi realizada em condições diferentes, conforme descrito:

Condição 1:

distância eletrodo – peça = 1,00mm (ensaio 1 ao 25);

Condição 2:

distância eletrodo – peça = 2,00mm (ensaio 26 ao 100).

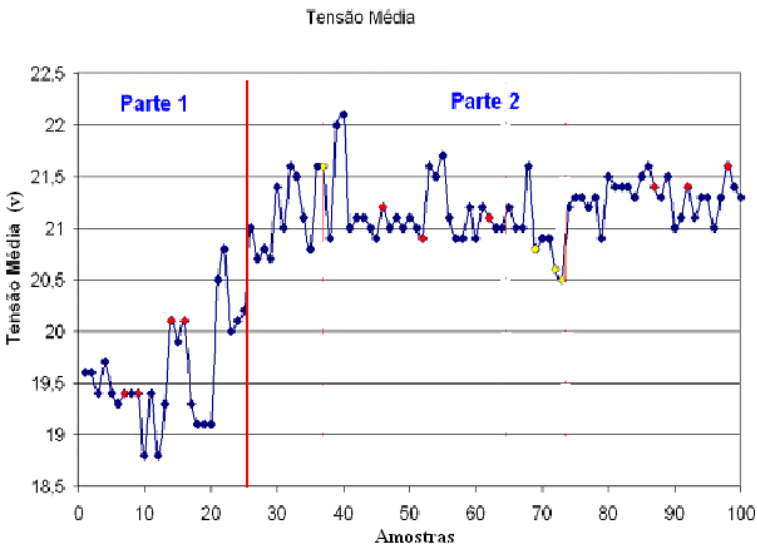


Figura 54: Variação da tensão média ao longo da soldagem.

Para todos os ensaios realizados, calculou-se a tensão média durante todo o período de arco aberto. O resultado da tensão média, para cada uma das cem peças, está demonstrado na figura 54: parte 1, distância eletrodo-peça = 1,00; parte 2, distância eletrodo-peça = 2,00. O ponto que indica o valor da

tensão média, em azul, significa soldagem considerada bem sucedida, os pontos vermelhos e amarelos demonstram ocorrência de algum defeito de soldagem.

Condição 1: distância eletrodo-peça = 1,00 mm.

Ao iniciar a soldagem das primeiras peças deste lote, notou-se que as amostras de carcaças apresentavam alturas diferentes daquelas que estavam sendo utilizadas anteriormente, apesar de o compressor ser do mesmo modelo. A diferença de altura precisou ser corrigida modificando a programação de trajetória do robô. As primeiras peças foram soldadas com afastamento de aproximadamente 1,00 mm, entre o eletrodo e a peça. Essa distância foi arbitrada tendo como base, os últimos ensaios realizados, que tinham por objetivo determinar os parâmetros para realização das rampas de abertura e fechamento da soldagem e solucionar o problema da ocorrência de trincas que ocorriam na região final da soldagem. Na referida condição, a distância de 1,00 mm apresentou bons resultados, diminuindo o aparecimento de trincas. Contudo, logo nas primeiras peças, ocorreram pontos de falta de continuidade do cordão de solda, como mostra a figura 55.



Figura 55: Amostra 9, descontinuidade no órgão de solda.

Nas vinte e cinco primeiras amostras soldadas, ocorreu o defeito de falta de continuidade nas peças 7, 9, 14 e 15 (pontos vermelhos da figura 54). Com o aparecimento deste tipo de defeito e após a análise da tensão média, optou-se por aumentar a distância eletrodo-peça e, assim, criou-se a condição 2.

Condição 2: distância eletrodo-peça = 2,00 mm.

Com o aumento da distância eletrodo-peça para 2 mm, a tensão média das soldagens foi de aproximadamente 21 V: condição que apresentou os melhores resultados. Porém, realizando-se análise mais detalhada do comportamento da tensão ao longo da soldagem, pode-se verificar que a trajetória programada no robô não é perfeita. Como o movimento é programado por meio de uma quantidade finita de pontos e como esses pontos são marcados visualmente, é impossível garantir a distância constante entre eletrodo-peça. A figura 60 ilustra, por meio de oscilogramas de tensão, que há trechos com tendência a apresentar tensões maiores ou menores do que outros.

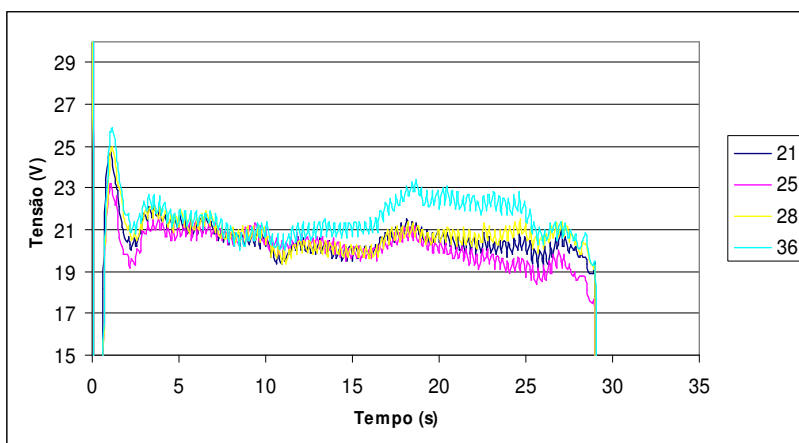


Figura 56: Amostras 21, 25, 28 e 36, variação da tensão de soldagem.

Como revela a figura 56, além da variação de tensão devido à programação de trajetória do robô, também existe uma variação de tensão entre peças, mesmo sendo soldadas em iguais condições. Esta variação ocorre, em parte, pela diferença oriunda do processo de estampagem, mas, principalmente, pela folga entre a base do compressor e o dispositivo de fixação.

Realizando análise dos oscilogramas de tensão das soldagens, a partir da amostra 38, pode-se observar que a região em que apareceram os defeitos nesses dois compressores, equivale, no oscilograma, à região correspondente ao tempo de 10 s a que apresenta a menor tensão, como se pode verificar na figura 57.

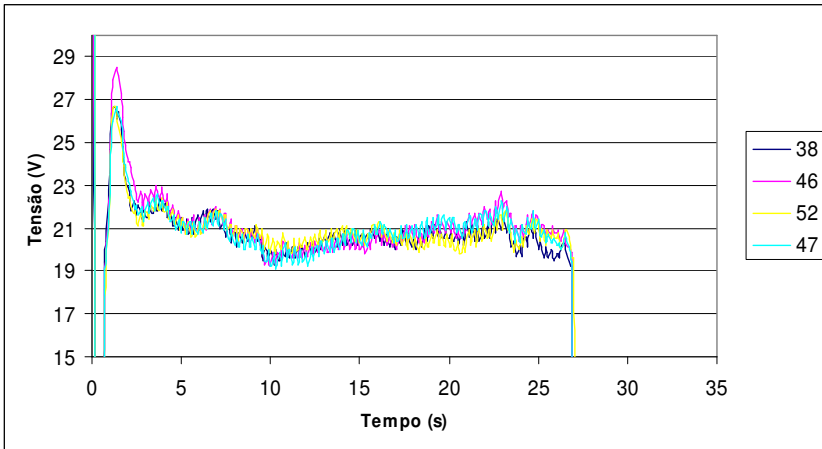


Figura 57: Amostras 38, 46, 52 e 47, oscilograma de tensão de soldagem.

Diante destas observações, verificou-se a trajetória de movimentação do robô. Na região que apresentou tensão mais baixa, o eletrodo estava posicionado um pouco mais abaixo, agindo mais próximo da borda do compressor do que da tampa. Isto diminui a distância eletrodo-peça naquela região. A altura do ponto foi aumentada e as peças continuaram a ser soldadas. Após o ajuste não mais foram observados problemas de falta de continuidade nessa região.

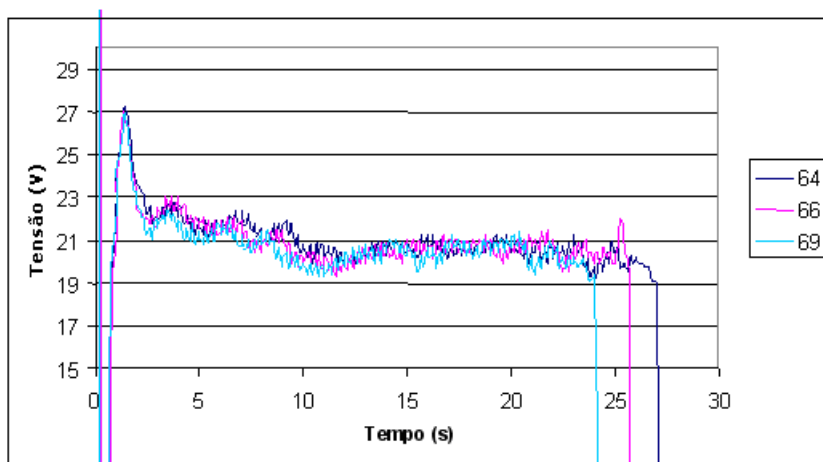


Figura 58: Amostras 64, 66 e 69, oscilograma de tensão de soldagem.

A amostra 69, que foi soldada com menor ciclo de soldagem, apresentou defeito de falta de continuidade como demonstra a figura 59.



Figura 59: Amostra 69 soldada com tempo ciclo de 24 s.

Outros fatores podem ter contribuído para o aparecimento deste tipo de defeito. Primeiramente, deve-se ressaltar que o eletrodo foi afiado e posicionado a 2 mm da peça na soldagem da peça número 38. Depois disso, não mais foi modificada a posição do eletrodo e, o mesmo, não mais foi afiado. Com isso, ao final da soldagem da centésima peça, o eletrodo passou por sessenta e dois ciclos de soldagens. Nos últimos ensaios, foi possível perceber que a distância eletrodo-peça estava maior do que 2 mm. Isso provavelmente deve ter sido causado pelo desgaste do eletrodo. Pode-se notar que nos oscilogramas das soldagens destas peças a tensão fica bastante alta na abertura do arco de soldagem.

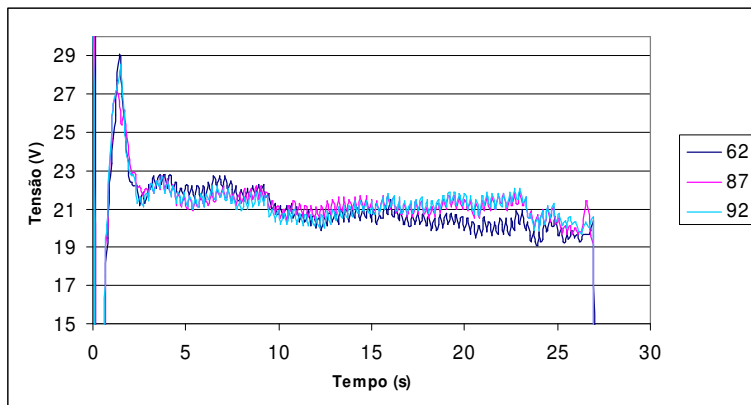


Figura 60: Amostras 62, 87 e 92, oscilograma de tensão de soldagem.

Um dos objetivos da realização deste lote-piloto era, entre outras coisas, testar o desgaste do eletrodo devido à soldagem e abertura por toque. Inicialmente, a idéia era começar a soldagem com um eletrodo recém afiado e soldar quantas peças fosse possível ou, até quando alguma soldagem apresentasse problema que pudesse ser atribuído à condição do eletrodo.

Com a colisão entre a tocha e a peça no ensaio trinta e sete, foi necessário realizar nova afiação do eletrodo, que foi utilizado até o final da soldagem. A figura 65 mostra o estado do eletrodo após a soldagem de sessenta e três peças.

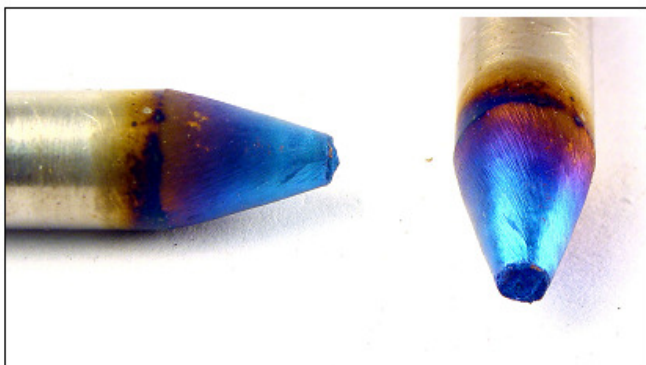


Figura 61: Eletrodo após 63 ciclos de soldagem.

Apesar de soldar uma quantidade elevada de peças, o desgaste que pode ser observado no eletrodo não foi tão elevado. Além disso, não existem indícios de que o desgaste na ponta do eletrodo tenha relação com a ocorrência de defeitos. Acredita-se que, com a utilização do dispositivo corretor da distância eletrodo-peça, por meio do monitoramento da tensão de soldagem, ou seja o AVC (Arc Voltage Control), seja possível soldar até mais de cem peças sem a necessidade de afiar o eletrodo.

5.4 ANÁLISE DA ÁREA FUNDIDA

Para Lowke (1997) experimentos mostraram que a adição do hidrogênio no argônio afeta a quantidade de material-base fundido na soldagem TIG. A figura 62 mostra a quantidade de material-base, fundido por unidade de tempo, como uma função da corrente de solda e o teor de hidrogênio contido no argônio. A quantidade de metal-base fundido aumenta, consideravelmente, com a adição do hidrogênio.

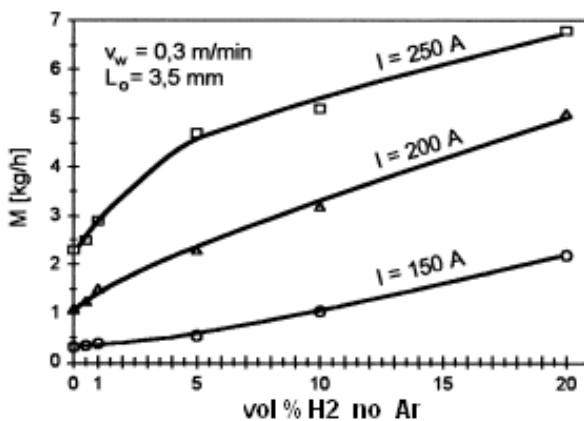


Figura 62: Efeito da adição H2 no Ar na quantidade de metal base fundido na soldagem TIG.

Fonte: TUSEK E SUBAN, 2000.

A análise das peças soldadas nos ensaios no LABSOLDA com gases Ar + 10%H₂ e Ar + 5%H₂ ilustra uma comparação das áreas fundidas utilizando as diferentes misturas, e verifica se, realmente, há diferenças significativas nessas áreas.

A metodologia adotada para o ensaio foi a seguinte: foram selecionadas três peças de cada um dos lotes. As peças escolhidas foram as de número 9, 19 e 29 de cada um dos lotes. De cada peça foram retiradas três amostras de diferentes regiões do compressor. As amostras foram preparadas metalograficamente, fotografadas, e a área fundida foi medida. As secções transversais estão mostradas nas figuras 63 e 64.

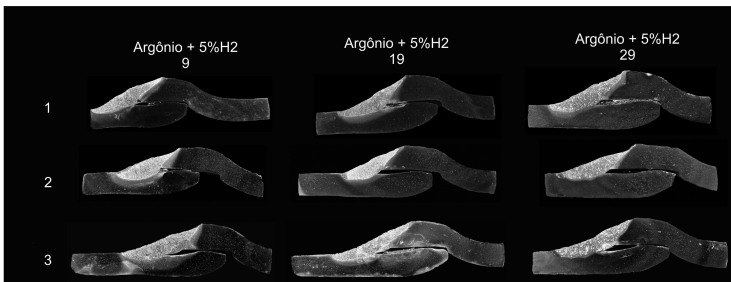


Figura 63: Macrografias das soldagens com Ar + 5%H₂.

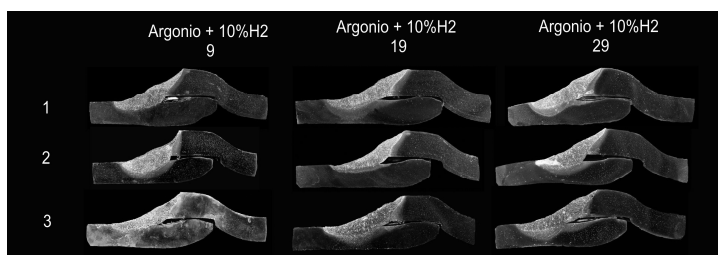


Figura 64: Macrografias das soldagens com AR + 10H2.

O resultado das medições da área fundida de cada medição está apontado na tabela 6:

TABELA 6: MEDIÇÕES DAS ÁREAS FUNDIDAS.

Amostra 10% H2	Área(mm²)	Amostra 5% H2	Área(mm²)
9 - 1	7,15	9 - 1	5,96
9 - 2	8,01	9 - 2	6,09
9 - 3	7,39	9 - 3	8,8
19 - 1	9	19 - 1	5,95
19 - 2	6,3	19 - 2	5,69
19 - 3	8,41	19 - 3	6,45
29 - 1	7,03	29 - 1	7,4
29 - 2	6,35	29 - 2	6,12
29 - 3	8,13	29 - 3	6,83
Média:	7,53	Média:	6,5877778
Desvpad:	0,925	Devpad:	0,9813738

Pode-se notar que as amostras soldadas com 10% de H₂ apresentaram área fundida maior do que as amostras soldadas com 5% de H₂, conforme já esperado. Porém, a diferença entre

o valor médio da área fundida para os diferentes gases foi pequena, em comparação com o desvio padrão das amostras para cada caso.

5.5 ANÁLISE DAS TRINCAS

Marques, Modenesi e Brancarense (2007) afirmam que as trincas são consideradas as descontinuidades mais graves em soldagem. São fortes concentradores de tensões, podendo favorecer o início de fratura frágil na estrutura soldada. De modo mais simples, uma trinca pode ser considerada como o resultado da incapacidade do material em responder às solicitações impostas, localmente, pelas tensões decorrentes do processo de soldagem.

As trincas podem ser externas, isto é, podem atingir a superfície, ou totalmente internas, não sendo, neste caso, detectáveis por inspeção superficial da região da solda. Podem se localizar na zona fundida, na zona afetada pelo calor ou, mesmo, no metal de base. No caso específico desta aplicação da solda TIG, em carcaças de compressores, notou-se a formação de trinca longitudinal na zona fundida, como ilustra a figura 65.

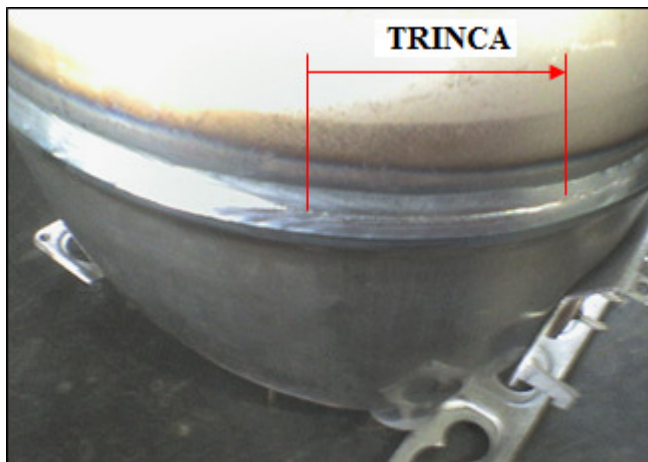


Figura 65: Trinca longitudinal na zona fundida.

Este tipo de trinca é característico de fissuração na solidificação e trata-se de mecanismo muito comum em soldagem. Está associado com a formação de filmes de material líquido, segregado entre contornos de grão da poça de fusão nos estágios finais de solidificação e, com a incapacidade desta estrutura em resistir aos esforços decorrentes da contração do material. A formação destes filmes pode ser conseqüente de certos elementos químicos capazes de sofrer forte segregação, como o enxofre e o fósforo.

Kou (2003) demonstra que o teor de manganês no metal fundido pode, também, afetar significativamente, na ocorrência de trincas de solidificação. Este teor é, normalmente, mantido

suficientemente alto para assegurar a formação de MnS mais do que FeS. Isto devido ao alto ponto de fusão e a morfologia globular do MnS, que tende a deixar o enxofre menos danoso à estrutura. A figura 66 mostra o efeito da taxa de Mn e S na ocorrência de trincas de solidificação em aço ao carbono. Em níveis relativamente baixos de teor de carbono, a tendência de trincas pode ser reduzida aumentando a taxa Mn e S. Contudo, em níveis elevados de carbono 0,2 – 0,3% C, aumentar a taxa de Mn e S pode ser não mais tão efetivo. Contudo, um elevado percentual de C é indesejado por promover, não apenas trincas de solidificação, como também, a formação de martensita frágil e, por conseqüência, trincas de pós-solidificação no metal de solda.

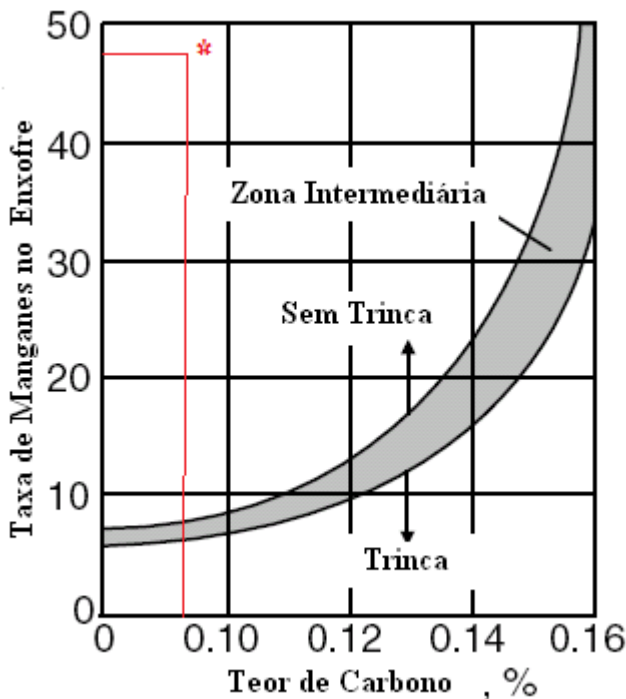


Figura 66: Efeito da taxa de Mn – S e teor de C na susceptibilidade a trincas.

Fonte: KOU, 2003.

Considerando novamente o aço das carcaças de compressores, conforme a tabela 1 obtém-se a taxa Mn e S igual a 90 (0,36/0,004) e um teor de carbono de 0,06% (ver * na figura 66) o que indica baixíssima susceptibilidade às trincas de solitação. Contudo, a trinca que ocorre nas carcaças, acontece antes do térmico da soldagem TIG, ou seja: o cordão ainda está bem aquecido, caracterizando uma fissuração a quente. Isto ocorre devido a tensões residuais

atuando no filme líquido que forma a frente de solidificação localizado no meio do cordão. No decorrer dos testes, em bancada, também se observou que em velocidades mais altas, em torno de 1,3 m/min, a frequência da ocorrência de trincas a quente é alta. Já, em velocidades um pouco menores 1,2 m/min, o problema não ocorre o que leva a crer que, em velocidades entre 1,00 e 1,20 m/min, a estrutura possui melhor capacidade de resistência aos esforços decorrentes da contração do material, por este sofrer resfriamento mais uniforme do cordão e zonas adjacentes.

Contudo, visando o aumento de produtividade para a solda TIG, decidiu-se efetuar algumas soldas usando como gás de proteção uma mistura Ar + 15% H₂. O objetivo seria aumentar a energia transmitida, evitar a solidificação muito rápida e assim evitar o aparecimento das trincas. Foram executadas mais de duzentas peças com esta configuração e os resultados foram bastante animadores. Não houve problemas de descontinuidade e de trincas.

5.6 ANÁLISE DE RESISTÊNCIA À FADIGA

A estanqueidade dos compressores para refrigeração se constitui em uma das principais características deste produto. O seu ciclo de vida útil é, normalmente, definido entre dez a quinze anos, portanto, as juntas soldadas devem ser de boa qualidade. Normalmente a pressão de trabalho no interior da carcaça, ou seja, no lado da sucção do gás refrigerante, está na faixa de 1 a 3 bar, enquanto que no lado da descarga pode chegar até 17 bar. Porém, esta pressão está confinada no cabeçote do compressor e, portanto, não afeta a junta soldada da borda da carcaça. A resistência mecânica pode ser avaliada por meio de teste hidrodinâmico, conforme Bosco Júnior (2007). Neste trabalho foi utilizada a norma UL 1995/984. Esta norma foi criada pela entidade americana “*Underwrite Laboratories*” e é recomendada para fazer análises de resistência a fadiga de materiais .

A figura 67 ilustra uma bancada do teste da fadiga hidrodinâmica. Quatro carcaças de compressores, soldadas com o processo TIG com Ar +15% H₂, foram submetidas aos ciclos de pressão de 2 a 20 bar, por mais de 270 mil ciclos.



Figura 67: a) Bancada de teste da fadiga. b) Registro dos dados.

No teste de fadiga as amostras suportaram 277 mil ciclos e não apresentaram falhas. A figura 68 demonstra a pressão cíclica a que se submeteram as amostras.

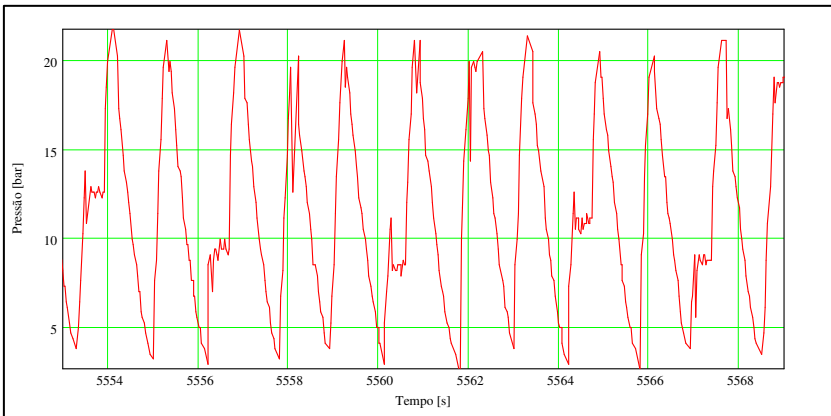


Figura 68: Gráfico de pressão cíclica.

Após o teste de fadiga, as amostras foram submetidas a uma pressão de 35 bar, conforme Norma UL (1995/984), por sessenta segundos, e nenhuma apresentou falhas. Na figura 69 pode-se visualizar a pressão a que as amostras foram submetidas.

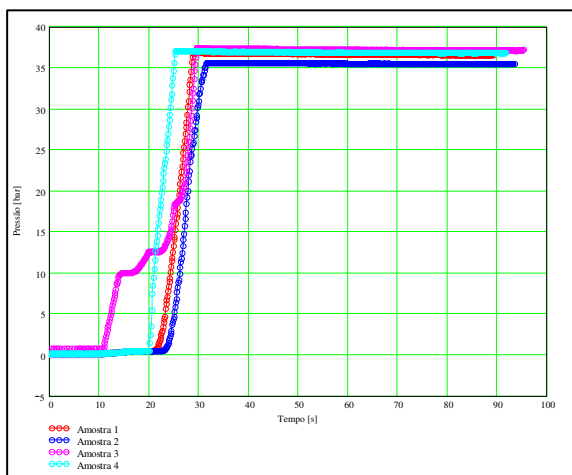


Figura 69: Gráfico de pressão no teste hidrostático.

Para analisar a estrutura da junta soldada após teste de fadiga hidrostática, uma das carcaças foi seccionada em onze partes ao longo do cordão, as quais foram divididas em lado 1 e lado 2, ou seja, seção transversal da direita e da esquerda respectivamente, conforme ilustra a figura 70.

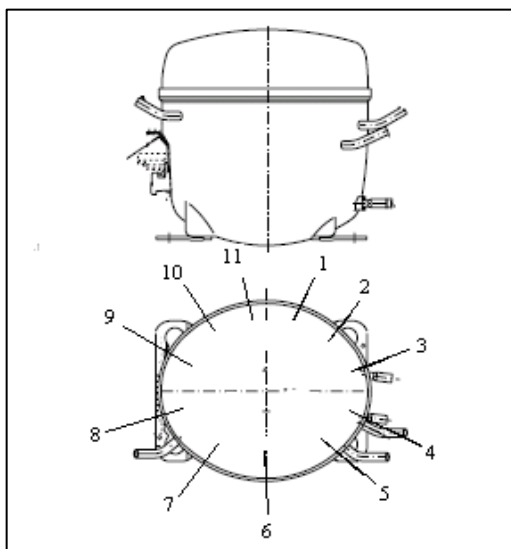
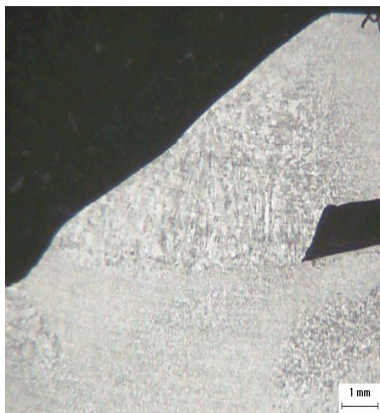


Figura 70: Esquema das seções transversais analisadas.

As amostras foram analisadas com o auxílio de estereoscópio, utilizando ampliação 6.7 X. As figuras que seguem, evidenciam o cordão de solda das seções analisadas.



Lado 1

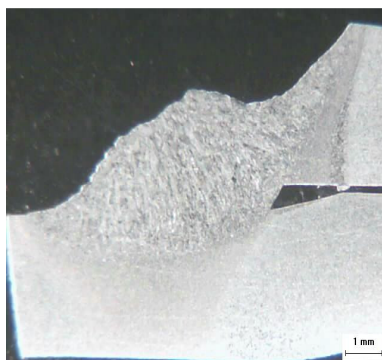
Aumento – 6.7 X



Lado 2

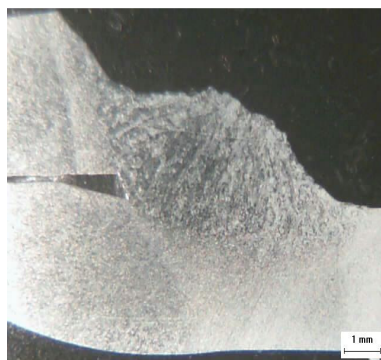
Aumento – 6.7 X

Fig. 71: Seção transversal 1.



Lado 1

Aumento – 6.7 X



Lado 2

Aumento – 6.7 X

Fig. 72: Seção 2.

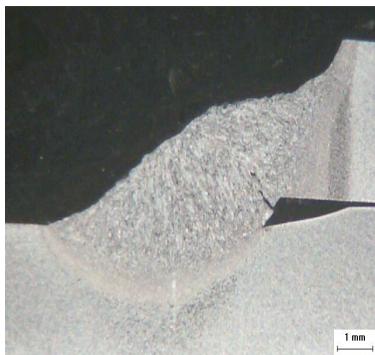


Lado 1
Aumento - 6.7 X

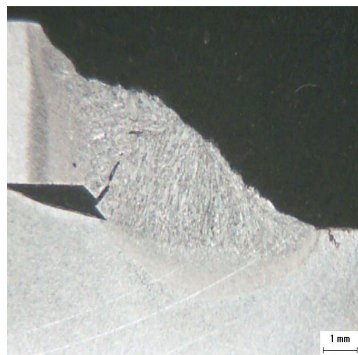


Lado 2
Aumento - 6.7 X

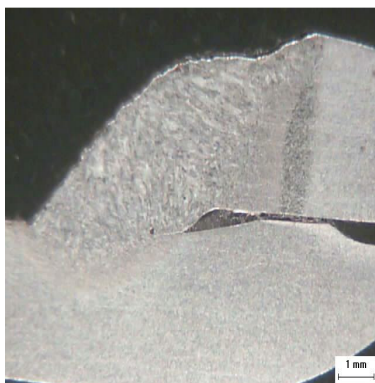
Fig. 73: Seção 3.



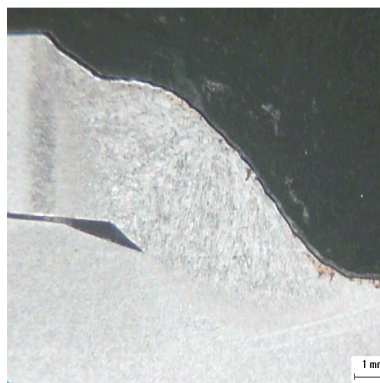
Seção 4 (lado 1)
Aumento – 6.7 X



Seção 4 (lado 2)
Aumento – 6.7 X

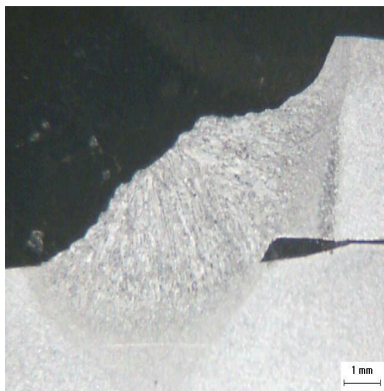


Seção 5 (lado 1)
Aumento – 6.7 X

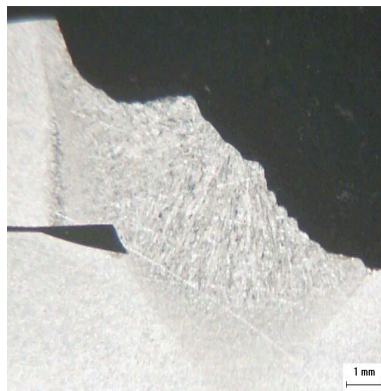


Seção 5 (lado 2)
Aumento – 6.7 X

Fig. 74: Seções 4 e 5.

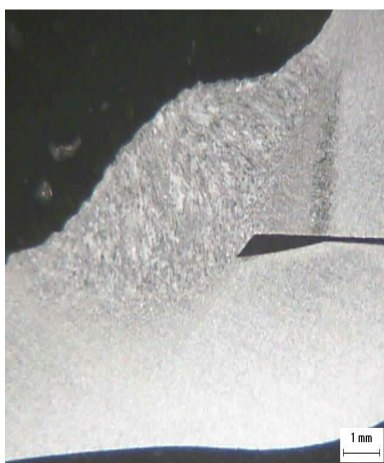


Lado 1
Aumento - 6.7 X



Lado 2
Aumento - 6.7 X

Fig. 75: Seção 6.
Fonte: IETKA, adaptação, 2010.

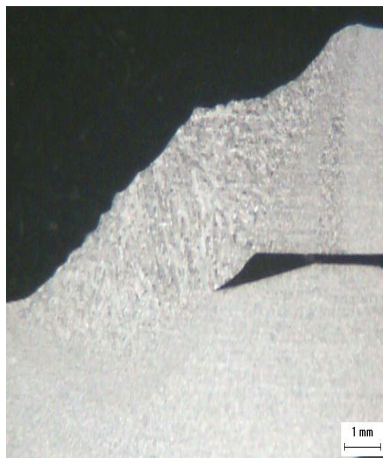


Lado 1
Aumento - 6.7 X



Lado 2
Aumento - 6.7 X

Fig. 76: Seção 7.



Lado 1
Aumento – 6.7 X



Lado 2
Aumento – 6.7 X

Fig. 77 Seção 8.

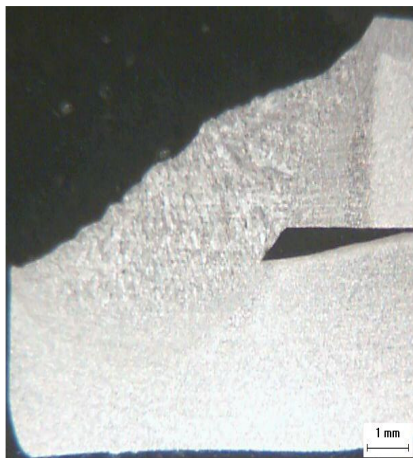


Lado 1
Aumento – 6.7 X



Lado 2
Aumento – 6.7 X

Fig. 78: Seção 9.



Lado 1
Aumento - 6.7 X



Lado 2
Aumento - 6.7 X

Fig. 79: Seção 10.



Lado 1
Aumento - 6.7 X



Lado 2
Aumento - 6.7 X

Fig. 80 Seção 11.

Após as análises feitas no estereoscópio, realizou-se, também, análise mais detalhada utilizando o microscópio óptico ZEISS Axioskop 2, com um aumento de 50X, no intuito de melhorar a análise dos defeitos nas amostras. Com isso, verificou-se que a seção 2 continha defeito na região da solda, conforme ilustra a figura 81 que segue:

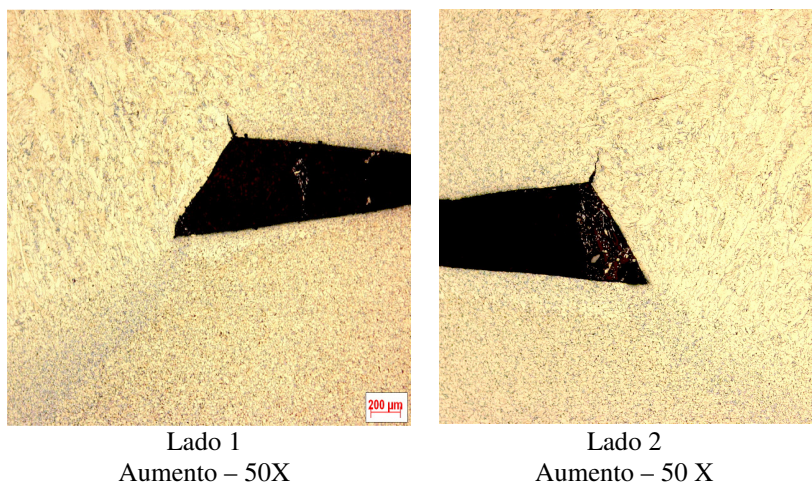
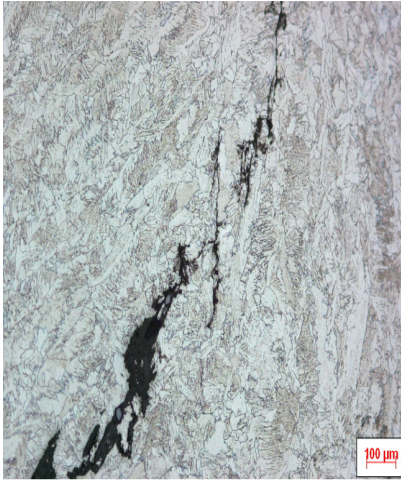


Fig. 81: Seção 2 aumento 50X.

As figuras que seguem evidenciam falhas nas seções 1 e 4. A figura 82a demonstra possível trinca de solidificação na seção 04, ver figura 74 lado 1. A figura 82b ilustra possível falha de inclusão ou rechupe na seção 1, ver figura 71 lado 2.



Aumento – 100X



Aumento – 100 X

Figura 82: a) Estrutura metalográfica Seção 4 Nucleação de trinca de solidificação b) Estrutura metalográfica seção 1 - Recheu.

Mediante as análises realizadas, pode se observar que as seções 1, 2 e 4 apresentaram defeitos na região da solda. A seção 1 apresenta inclusão (recheu). A seção 2 apresenta trinca que pode ter sido gerada por material que sofre fadiga. A seção 4 apresenta trinca característica a quente ou, trinca de solidificação. Contudo, todas as seções resistiram bem ao ensaio de fadiga a que foram submetidas, demonstrando que a soldagem TIG, conforme a norma UL 1995/984 e Bosco Júnior (2007) seria aprovada para a aplicação em selamento de compressores herméticos, para refrigeração.

Realizou-se análise do cordão de solda TIG no sentido longitudinal buscando a morfologia dos grãos como objetivo de

caracterizar o cordão de solda, quanto à presença de grãos colunares. Para isso, a amostra foi preparada, metalograficamente e, realizou-se análise em microscópio óptico. Também se traçou o perfil de dureza deste cordão. A figura 83 evidencia as microestruturas do cordão de solda. A amostra foi dividida em zona 1 a região base-ZAC-, zona 2 a zona de fusão e zona 3 compreendida entre a ZAC e a tampa da carcaça do compressor.

A zona 2 ou zona de fusão encontra-se com uma estrutura homogênea, sem indícios de formação de grãos colunares e outras fases fragilizantes em sua estrutura. A zac, zona afetada pelo calor, encontra-se com uma estrutura de grão refinada, com crescimento de grão no sentido da zona 1, metal de base→zona de fusão. Há formação de carbonetos na zona 3 zac→tampa.

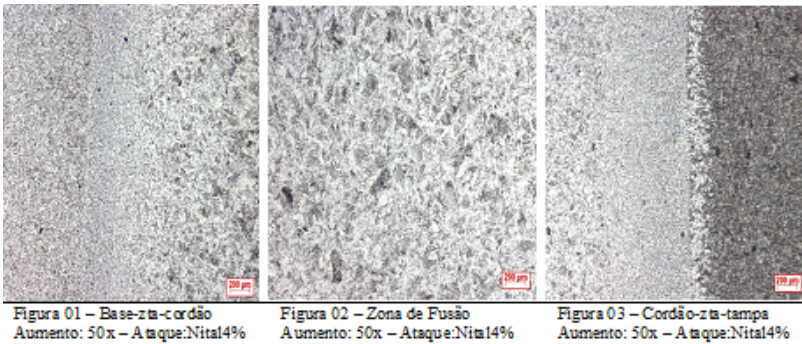
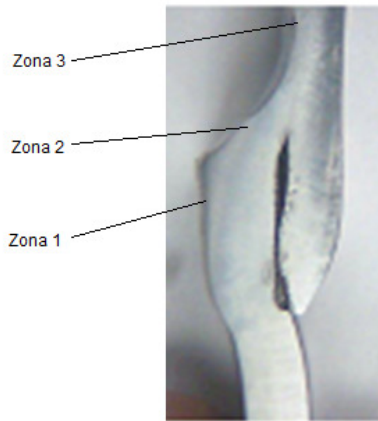
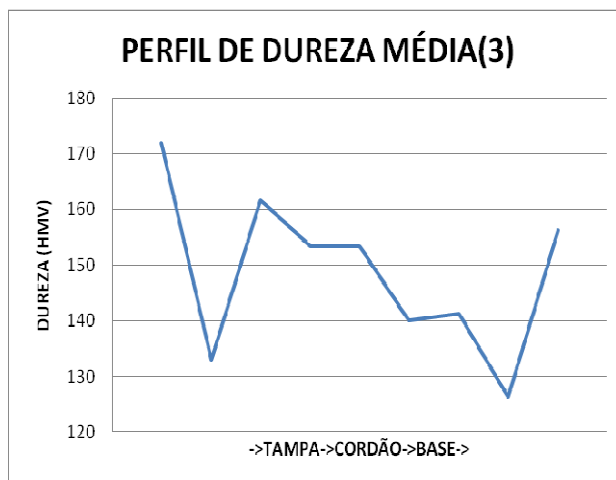


Figura 83: Microestrutura do cordão de solda TIG.

Traçou-se o perfil de dureza com objetivo de verificar o comportamento da estrutura do cordão de solda. A figura 84 mostra o comportamento da dureza na junta soldada e zac.



Ensaio	Dureza
1	172
2	133
3	161.6
4	153.3
5	153.3
6	140
7	141.3
8	126.3
9	156.3

Fig. 84: Dureza HMV no cordão de solda TIG.

Para traçar o perfil de dureza foram realizadas vinte e oito medidas, partindo da zona 3 tampa para a zona 1, base do compresso. Elaborou-se a média e, traçou-se o gráfico da figura 84. A zona 3,tampa e a zona 1 base, apresentaram as maiores medidas de dureza, seguidas pela zona 2, zona fundida e, a região que apresentou a menor dureza foi a zac - zona afetada pelo calor.

A amostra apresentou uma microestrutura na zona 2 ou zona fundida bem homogênea, sem evidências de grãos colunares. O perfil de dureza apresentou comportamento dentro do esperado, ou seja, semelhante aos atuais cordões em solda MIG.

6 CONCLUSÕES

De fato se pode concluir que nas aplicações tradicionais da soldagem TIG, a velocidade máxima de soldagem é limitada pelo aparecimento de descontinuidades no cordão de solda conhecidas como corcundas, dentes de serra ou, ainda, como costa de dragão. Foi constatado que a principal razão para formação destes defeitos é o intervalo de tempo entre a região de depressão do canal da homogenia, superfície da chapa criada pelo arco e o preenchimento deste canal com o metal fundido. Nas condições de soldagem que apresentam cordões com defeito, o metal fundido sob o arco é forçado a se mover em direção à traseira da poça e uma depressão na superfície sólida aparece abaixo do arco. Conforme o arco avança, não ocorre defeito se o metal fundido na traseira da poça metálica flui para frente e preenche, inteiramente, a região da depressão formada. Em velocidades acima de 0,60 m/min é praticamente inviável, pois, a solidificação rápida do metal fundido na traseira da poça metálica ou preenchimento incompleto do metal, resulta na formação dos defeitos de soldagem. Tanto as propriedades físicas, como metalúrgicas da região onde se forma a depressão, são fatores importantes e que afetam a formação de defeitos.

Contudo, considerando os resultados experimentais deste trabalho, onde se aplicou a soldagem TIG em condições inovadoras, é possível concluir que a aplicação específica deste processo de soldagem autógeno, com velocidades acima de 1,00 m/min, para o fechamento de compressores herméticos para refrigeração é viável. A soldagem de aço ao carbono se aplicada com sistema automático, onde a peça permanece fixa em uma base, a tocha é conduzida ao seu redor, por um mecanismo ou por um robô se mostrou adequada em termos de absorver imperfeições de estamparia na borda da carcaça.

A posição da tocha com ângulo de ataque em 43° empurrando, em relação à tangente da borda da carcaça e na condição empurrando de modo a que a pressão do arco não atue integralmente na junta, mas sim, de forma parcial, foi também, condição determinante para a eliminação das discontinuidades no cordão de solda.

A distância eletrodo-peça é 2,00 mm foi a que apresentou melhor qualidade do cordão.

O diâmetro do eletrodo de 6,35 mm apresentou melhor distribuição da pressão do arco sobre a junta e diminuiu o aparecimento de defeitos no cordão de solda.

O uso do AVC (*arc voltage control*) é fundamental para se soldar a 2,00 mm da junta.

A atuação do gás de proteção se confirmou como um dos fatores que influenciam o fenômeno causador de defeitos de soldagem. Comprovou-se, neste trabalho, que uma mistura de Ar +15% de H₂ provocou melhora na geometria da poça de fusão impedindo a solidificação precoce da mesma e, assim, distribuindo o metal fundido com fluxo mais equilibrado. Esta mistura foi fator decisivo para elevar a velocidade de soldagem a valores acima de 1,0 m/min. Este fato, em conjunto com os demais parâmetros e procedimentos de soldagem descritos neste trabalho, viabilizarão a soldagem TIG na selagem de compressores herméticos para refrigeração nos atuais níveis de produtividade deste produto.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar os estudos efetuados neste trabalho, que teve seu foco principal na aplicação do processo de soldagem TIG autógeno para a selagem de compressores para refrigeração, utilizando estação robotizada, pode-se sugerir que se analise a possibilidade de aplicação em máquinas movimentadas por sistemas mecânicos não-robotizados onde a tocha se movimenta no eixo horizontal e a carcaça do compressor permanece fixa. Neste caso, já se sabe que as imperfeições da borda da carcaça do compressor geram soldas com imperfeições, pois a tocha, não podendo se movimentar no eixo vertical, não absorve tais variações. Neste contexto seria interessante desenvolver algumas soluções tais como:

a) *oscilação do arco*: fazer o arco oscilar no sentido ortogonal ao movimento da tocha, por intermédio de aplicação de osciladores magnéticos. Esta alternativa pode ser uma solução prática, com custos reduzidos e poderá possibilitar soldar em velocidades de solda a níveis de 1,2 m/ min.

b) *duplo cátodo*: sistema de soldagem TIG com dois eletrodos. Esta alternativa, da mesma forma, poderia posicionar os eletrodos levemente desalinhados no sentido vertical a junta para absorver as imperfeições de estamparia da borda. Acredita-se que a velocidade de soldagem possa ultrapassar

3,00 m/min nesta aplicação específica. Se confirmados estes dados de altas velocidades de soldagem, surge também uma grande vantagem, em termos de redução de investimentos em equipamentos para novas fábricas, pois, se necessitaria de menor número de estações de solda, para atender as metas de produtividade.

REFERÊNCIAS

AWS, Welding Handbook: **Welding Process (vol II)**, AWS, USA, 8th Edition, cap. 4. 1991.

BONIARDI, F: Aspetti Metallurgici del Processo di Saldatura, **Politécnico di Milano**, 2004.

BOSCO JUNIOR, R.: Análise numérico-experimental de componentes sujeitos a fadiga por solicitações aleatórias – Avaliação de Modelos, **UFSC**, 2007.

CUNHA, T. V. : Desenvolvimento do equipamento e de metodologia de Parametrização para soldagem orbital TIG, **UFSC**, 2008.

KOU, S. Welding Metallurgy, 2nd edition, John **Wiley and Sons**. New York, NY (2003).

LIN, M. L. & Eagar, T.W. Metall. Transf.B. 1986, 17B, 601 - 607.

LOWKE, J. J; MORROW, R.; HAIDER, J. & Murphy, A. B. Prediction of gas tungsten arc welding properties in mixtures of argon and hydrogen. **IEEE Transaction on Plasma Science**, 1997; 25(5):925-30.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. & BRANCARENSE, A. Q. Soldagem – fundamentos e tecnologia, **UFMG**. 2007.

MENDES, P.F., & EAGAR, T. W. Penetration and defect formation in high-current arc Welding, MIT. Oct. 2003, **Weld Journal**, 82 (10), 296 –306, 2003.

MODENESI, P.J.: Física da soldagem, UFMG 1 .Introdução a Física do Arco Elétrico e suas aplicações na Soldagem dos Metais, **UFMG**, 2002.

NORMA UL (**Underwrite Laboratories - USA**), 1995/984 - Strength Test Approval.

SAVAGE, W.F., NIPPES, E.F. & AGUSA, K., Effect of arc force on defect formation in GTA Welding. **Weld J.** 58, (7), 212s-224s, 1979.

SODERSTROM, E., & MENDEZ P. Science and technology of welding and joining. Vol. 11, n 5, **Colorado School of Mines**. p. 572-579. Maney. 2006.

SODERSTROM, E. MENDEZ P. Humping mechanisms present in high speed welding. **Colorado School of Mines**. Maney. 2006.

TUSEK, J. & SUBAN, M. Experimental Research of the effect of hydrogen in argon the shielding gas in arc welding of high-alloy stainless steel. **International Journal of Hydrogen Energy**. V. 25. N. 4. Apr. 2000, pg. 369 - 376.