**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E
ENGENHARIAS DE MATERIAIS**

DIEGO RODRIGO DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ARAMES NA SOLDAGEM DE
MANCAIS DE FERRO FUNDIDO DE COMPRESSORES
HERMÉTICOS PARA REFRIGERAÇÃO**

SÃO CARLOS

2014

DIEGO RODRIGO DA SILVA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE ARAMES NA SOLDAGEM DE
MANCAIS DE FERRO FUNDIDO DE COMPRESSORES
HERMÉTICOS PARA REFRIGERAÇÃO**

**Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade
De São Paulo, para obtenção do título de Mestre
Em Ciências e Engenharia de materiais**

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização
E Aplicação de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Haroldo Cavalcanti Pinto

Versão corrigida
Original na Unidade

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

S586e	<p>Silva, Diego Rodrigo da</p> <p>Estudo comparativo entre arames na soldagem de ferro fundido de compressores herméticos para refrigeração / Diego Rodrigo da Silva; orientador Haroldo Cavalcanti Pinto. São Carlos, 2014.</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais e Área de Concentração em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.</p> <p>1. Soldagem GMAW. 2. Soldagem FCAW. 3. Ferro fundido. 4. Aço carbono. 5. ER70S-6. 6. E70C-6M. 7. ERNiFeMn-Cl. I. Título.</p>
-------	--

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **DIEGO RODRIGO DA SILVA**.

Título da dissertação: "Estudo comparativo entre arames na soldagem de mancais de ferro fundido em compressores herméticos para refrigeração".

Data da defesa: 14/08/2014

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Dr. **Haroldo Cavalcanti Pinto (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Associada **Lauralice de Campos Franceschini Canale**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Dr. **Marcos Roberto Fortulan**
(Tecumseh do Brasil – São Carlos)

Aprovado

Coordenador em Exercício do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais:

Prof. Associado **Antonio José Felix de Carvalho**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*Aos meus filhos,
Enzo e Julia,
E a minha esposa,
Fabiana,
Todo o meu amor.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Haroldo Cavalcanti Pinto, que durante esses anos de convívio, muito me ensinou, contribuindo para o meu crescimento científico e cultural.

Ao Eng. Ivan C. Dias, Gerente da Engenharia Industrial da Tecumseh do Brasil, por acreditar e incentivar o trabalho desde o seu início.

Ao Eng. Alcides Zanon, Coordenador da Engenharia Industrial da Tecumseh do Brasil, e ao Eng. Silvio Pepato, Engenheiro de Processos, que compartilharam toda a sua experiência do processo de Montagem dos compressores e contribuíram para o sucesso do trabalho.

Aos amigos Wellington Cardoso, Fabio Lionel, Ricardo Buzolin e Bruno Spirandelli, pelo auxílio e discussões ao longo deste período que contribuíram para a elaboração do trabalho.

Ao Dr. Marcos Fortulan, Gerente da fabrica de Motores, pela energia desprendida ao presente trabalho, contribuindo para o seu enriquecimento.

Ao Eng. Marcos Perez, Gerente da linha de Montagem de compressores rotativos, ao Eng. Orlando Carneiro, Supervisor da linha de Montagem, e ao Eng. Oscar Caceres, Coordenador da linha de Montagem, pelas horas e horas desprendidas nas discussões dos resultados obtidos.

A Tecumseh do Brasil, minha grande escola profissional, pela concessão de amostras e laboratório para a realização dos ensaios.

A bibliotecária Elena Gonçalves pelo auxílio e tempo despendido para a correção deste trabalho

A fé na vitória tem que ser inabalável.

Dexter

RESUMO

SILVA, D. R. **Estudo comparativo entre arames na soldagem de mancais de ferro fundido em compressores herméticos para refrigeração**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Nos dias atuais, com o mercado altamente seletivo, com vários fabricantes e fornecedores de diversos tipos de produtos e serviços, a qualidade se tornou uma necessidade premente, na qual uma empresa que forneça bens e/ou serviços com baixa qualidade corre sérios riscos de ser descartada pelos mercados consumidores. Assim, a importância da qualidade é que se converteu em um requisito básico para uma empresa competir e se manter no mercado. As empresas veem a qualidade como uma ferramenta para a redução de custos e para a melhoria de sua imagem junto ao mercado consumidor. Neste contexto, de melhora da imagem junto ao mercado consumidor e de redução de custos, o presente trabalho foi realizado em uma importante e tradicional multinacional de grande porte que produz compressores herméticos para refrigeração, com o intuito de estudar a soldagem do mancal de ferro fundido à carcaça de aço de baixo carbono em compressores rotativos (rolete excêntrico), utilizados em aparelhos de ar condicionado. A solda realizada de maneira falha pode permitir a perda do entreferro do motor, resultando em um ruído característico, chamado *stall*. Este trabalho avaliou diferentes tipos de arames, buscando garantir um processo com qualidade e baixo custo. Testes foram realizados utilizando como peças teste carcaças e mancais dos compressores. Verificou-se que o arame sólido ANSI/AWS A5.18 ER70S-6, atualmente utilizado, não é o mais indicado para a respectiva soldagem, em virtude da microestrutura e da resistência da soldagem obtida. A solução técnica apropriada é a utilização do arame ERNiFeMn-CI que elimina a fragilização das zonas parcialmente fundidas e diluídas próximos ao metal de solda, enquanto o arame metal cored E70C-6M representa um compromisso entre as propriedades da junta soldada e custo do processo.

Palavras chaves: Soldagem GMAW, Soldagem FCAW, Ferro fundido, aço carbono, ER70S-6, E70C-6M, ERNiFeMn-CI.

ABSTRACT

SILVA, D. R. **Comparative study between alloys applied in cast iron main bearings weld in hermetic compressors to refrigeration**. 2014. Dissertation (Master in Science and Engineering of Materials) – São Carlos School of Engineering, São Paulo University, São Carlos, 2014.

Nowadays, with the highly selective market, with several manufacturers and suppliers of various types of products and services, quality has become a pressing need, in which a company that provides services with a low quality at serious risk of being discarded by the consumer markets. Thus, the importance of quality is that it has become a basic requirement for a company to compete and stay in the market. Companies see the Quality as a tool to reduce costs and to improve its image with the consumer market. In this context, the improvement of the image with the consumer market and costs reduction, this study was conducted in a major traditional large multinational that produces hermetic compressors to refrigeration, in order to study the welding of cast iron bearings with low carbon steel houses in rotary compressors (eccentric roller) used in air conditioners. The welding performed in a failure may allow loss of the air gap of the motor, resulting in a characteristic noise, called stall. This study evaluated different types of alloys, aiming to ensure process quality and low cost. Trials were done using low carbon steel houses and cast iron bearings of the compressors. After innumerable tests, it was found that the ANSI / AWS A5.18 ER70S-6 solid wire, currently used, is not the most suitable for their welding, in view of microstructure and resistance of the weld obtained. The appropriate technical solution is to use the wire ERNiFeMn-CI eliminating the weakening of partially melted and diluted zones near the weld metal, while metal cored wire E70C-6M represents a compromise between the properties of welded joint and the cost of the process.

Keywords: GMAW welding, FCAW welding, cast iron, carbon steel, ER70S-6, E70C-6M, ERNiFeMn-CI.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1-	CORRESPONDÊNCIA DE DECIBÉIS.....	28
TABELA 2-	ESPECIFICAÇÃO E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CHAPA DA CARCAÇA.....	62
TABELA 3-	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO MANCAL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	64
TABELA 4-	COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ARAMES CONSUMÍVEIS.....	66
TABELA 5-	PARÂMETROS DE SOLDAGEM ARAME ERNIFEMN-CI.....	66
TABELA 6-	PARÂMETROS DE SOLDAGEM ARAME E70C-6M.....	66
TABELA 7-	PARÂMETROS DE SOLDAGEM ARAME ER70S-6.....	67
TABELA 8-	SÍNTESE DOS ENSAIOS.....	68
TABELA 9-	RESULTADO DA ANÁLISE DE ENTREFERRO.....	97
TABELA 10-	RESULTADO DA ANÁLISE DE HERMETICIDADE DOS COMPRESSORES.....	99
TABELA 11-	TAXA DE VAZAMENTO IDENTIFICADA NOS COMPRESSORES.....	100
TABELA 12-	RESULTADO DO RUÍDO STALL.....	102
TABELA 13-	RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE COMPARATIVO ENTRE OS ARAMES E70C-6M E ER70S-6.....	105

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	ILUSTRAÇÃO DO CICLO BÁSICO DE REFRIGERAÇÃO.....	28
FIGURA 2 -	COMPRESSOR HERMÉTICO PARA UTILIZAÇÃO EM APARELHOS DE AR CONDICIONADO.....	29
FIGURA 3 -	DESENHO ESQUEMATICO DO EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM MIG/MAG.....	30
FIGURA 4 -	SOLDA DO MANCAL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO REALIZADA COM O PROCESSO MIG/MAG UTILIZANDO O ARAME ANSI / AWS A5.18 ER70S-6 COM Ø1.6MM.....	31
FIGURA 5 -	MICRO ESTRUTURA DE UM FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	36
FIGURA 6 -	MICRO ESTRUTURA DE UM FERRO FUNDIDO MALEAVEL.....	36
FIGURA 7 -	MICRO ESTRUTURA DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR.....	37
FIGURA 8 -	FASES E MICRO ESTRUTURAS NA SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO.....	38
FIGURA 9 -	MICRO ESTRUTURA DA MARTENSITA NO FERRO FUNDIDO.	39
FIGURA 10 -	GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA. A) PROCESSO GMAW B) PROCESSO FCAW.....	43
FIGURA 11 -	ILUSTRAÇÃO DO PRINCIPIO DO PROCESSO GMAW.....	44
FIGURA 12 -	PROCESSO BÁSICO DE SOLDAGEM FCAW.....	46
FIGURA 13 -	MODOS DE TRANSFERÊNCIA METÁLICA.....	48
FIGURA 14 -	TERMINOLOGIAS.....	50
FIGURA 15 -	STICK-OUT.....	51
FIGURA 16 -	INFLUÊNCIA DO STICK OUT NA GEOMETRIA DO CORDÃO DE SOLDA.....	52
FIGURA 17 -	EFEITO DA ORIENTAÇÃO DO ELETRODO NA MORFOLOGIA DO CORDÃO DE SOLDA.....	53

FIGURA 18 - CÉLULA DE SOLDAGEM DO MANCAL.....	61
FIGURA 19 - DIMENSÕES TÍPICAS DE UM COMPRESSOR PARA UTILIZAÇÃO EM APARELHOS DE AR CONDICIONADO. EM AMARELO OBSERVA-SE O MANCAL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	63
FIGURA 20 - DESIGN DO MANCAL DE FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	64
FIGURA 21 - CORPO DE PROVA EMBUTIDO A QUENTE PARA ANÁLISES METALOGRAFICAS.....	69
FIGURA 22 - DESENHO ESQUEMÁTICO DAS LINHAS PERCORRIDAS PARA ELABORAÇÃO DOS PERFIS DE MICRO DUREZA.....	70
FIGURA 23 - MICRO DURÔMETRO LEICA VMHT MOT UTILIZADA PARA MEDIÇÃO DOS PERFIS DE MICRO DUREZA.....	71
FIGURA 24 - PRENSA HIDRÁULICA DE ENSAIO QUANTO À RESISTÊNCIA DA SOLDAGEM. I) VISTA GERAL DO EQUIPAMENTO; II) E III) CONJUNTO CENTRALIZADO NO EQUIPAMENTO DE TAL FORMA QUE A FORÇA SEJA REALIZADA SOBRE OS PONTOS DE SOLDAGEM.....	72
FIGURA 25 - MANCAL COM PENETRAÇÃO ACEITÁVEL.....	73
FIGURA 26 - MANCAL SEM PENETRAÇÃO.....	73
FIGURA 27 - CARGA DE 05 BAR DE HÉLIO APLICADA MANUALMENTE NO COMPRESSOR. COMPRESSOR NO INTERIOR DA CÂMARA DE ENSAIO SENDO TESTADO QUANTO A SUA HERMETICIDADE.....	74
FIGURA 28 - “CANECA” QUE É INSERIDA ENTRE O SUBCONJUNTO ROTOR E ESTATOR PARA A REALIZAÇÃO DA SOLDAGEM DO MANCAL A CARÇA.....	75
FIGURA 29 - CALIBRADOR DE LÂMINA UTILIZADO PARA VERIFICAR O ENTREFERRO ENTRE O ROTOR E O ESTATOR.....	75
FIGURA 30 - COMPRESSOR SENDO TESTADO QUANTO AO RUÍDO STALL.....	76
FIGURA 31 - PENETRAÇÃO TIPO DEDIFORME NO MANCAL NA AMOSTRA SOLDADA UTILIZANDO O ARAME ER70S-6.....	77

FIGURA 32 - PENETRAÇÃO PARCIAL E AS DIVERSAS REGIÕES NA CARÇAÇA E MANCAL UTILIZANDO O ARAME E70C-6M.....	78
FIGURA 33 - PENETRAÇÃO PARCIAL E AS DIVERSAS ZONAS NA CARÇAÇA E MANCAL UTILIZANDO O ARAME ERNIFEMN-CI..	79
FIGURA 34 - ARAME ERNIFEMN-CI – MICROESTRUTURA DA INTERFACE MANCAL E SOLDA.....	81
FIGURA 35 - METAL DE SOLDA PRODUZIDO COM O ARAME ERNIFEMN-CI.....	82
FIGURA 36 - ARAME ERNIFEMN-CI – MICROESTRUTURA DA INTERFACE DA CARÇAÇA E SOLDA.....	83
FIGURA 37 - ARAME E70C-6M – MICROESTRUTURA DA INTERFACE DO MANCAL E SOLDA.....	85
FIGURA 38 - ARAME E70C-6M – MICROESTRUTURA DA INTERFACE DA CARÇAÇA E SOLDA.....	86
FIGURA 39 - ARAME ER70S-6 – MICROESTRUTURA DA INTERFACE DO MANCAL E SOLDA.....	88
FIGURA 40 - ARAME ER70S-6 – MICROESTRUTURA DA INTERFACE CARÇAÇA E SOLDA.....	89
FIGURA 41 - PERFIS DE MICRO DUREZA DA AMOSTRA SOLDADA COM O ARAME ERNIFEMN-CI.....	90
FIGURA 42 - PERFIS DE MICRO DUREZA DA AMOSTRA SOLDADA COM O ARAME E70C-6M.....	91
FIGURA 43 - PERFIS DE MICRO DUREZA DA AMOSTRA SOLDADA COM O ARAME ER70S-6.....	92
FIGURA 44 - PRESSÃO DE ARRANCAMENTO DOS DIFERENTES ARAMES	93
FIGURA 45 - RESISTÊNCIA DA SOLDAGEM – ARAME ERNIFEMN-CI.....	94
FIGURA 46 - RESISTÊNCIA DA SOLDAGEM – ARAME E70C-6M.....	95
FIGURA 47 - RESISTÊNCIA DA SOLDAGEM – ARAME ER70S-6.....	96
FIGURA 48 - MANCAL INDICANDO A POSIÇÃO E O NÚMERO DA SOLDAGEM REALIZADA.....	98

FIGURA 49 - VAZAMENTO IDENTIFICADO NO CENTRO DA SOLDA REALIZADA.....	100
FIGURA 50 - TRINCA AO LONGO DA INTERFACE DO MANCAL COM O PONTO DE SOLDA: I) REGIÃO DA INTERFACE; II) REGIÃO DA TRINCA PASSANTE.....	101
FIGURA 51 - ACOMPANHAMENTO DO ENTREFERRO.....	105
FIGURA 52 - ACOMPANHAMENTO DE VAZAMENTO NA SOLDAGEM DO MANCAL.....	111
FIGURA 53 - ACOMPANHAMENTO DO DEFEITO STALL.....	106
FIGURA 54 - ACOMPANHAMENTO DO DEFEITO ROLLER PRESO POR RESÍDUO METÁLICO.....	107
FIGURA 55 - ASPECTO VISUAL DA SOLDAGEM REALIZADA COM O ARAME E70C-6M.....	107

LISTA DE SIGLAS

dB	DECIBÉIS
HP	HORSE POWER
GMAW	GAS METAL ARC WELDING
FCAW	FLUX CORED ARC WELDING
MIG	METAL INERT GAS
MAG	METAL ACTIVE GAS
TIG	TUNGSTEN INERT GAS
ANSI	AMERICAN NACIONAL STANDARDS INSTITUTE
AWS	AMERICAN WELDING SOCIETY
AWS A5.15	CLASSIFICAÇÃO AWS PARA ARAMES SÓLIDOS
AWS A5.18	CLASSIFICAÇÃO AWS PARA ARAMES TUBULARES
ZAC	ZONA AFETADA PELO CALOR
ZTA	ZONA TERMICAMENTE AFETADA
ZPD	ZONA PARCIALMENTE DILUIDA
ZPF	ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA
DCEP	DIREÇÃO CORRENTE ELETRODO POSITIVO
ECI	ELECTRODE CAST IRON
SAE	SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
ECI	ELECTRODE CAST IRON
Est	ELETRODO ALMA AÇO COM GRAFITE
Exxxx	ELETRODOS REVESTIDOS
HSLA	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA
Nital	SOLUÇÃO ÁCIDO NITRICO COM ALCOOL ETILICO
PPM	PARTES POR MILHÃO

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	GRAUS CELSIUS
A	AMPERES
C8	MISTURA GASOSA CONTENDO 8%CO ₂ E 92% ARGÔNIO
mm	MILÍMETRO
mm ²	MILÍMETRO QUADRADO
Ar	ARGÔNIO
CO ₂	DIÓXIDO DE CARBONO
Si	SILICIO
C	CARBONO
O	OXIGÊNIO
cm ²	CENTÍMETRO QUADRADO
Kgf	QUILOGRAMA FORÇA
ms	MILISEGUNDOS
V	VOLTS
Hz	HERTZ
s	SEGUNDOS
L	LITROS
Cu	COBRE
P	FOSFORO
HB	HARDNESS BRINELL
HV	HARDNESS VICKERS

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	33
3 ESTADO DA TÉCNICA	35
3.1 FERRO FUNDIDO	35
3.2 A SOLDAGEM DOS FERROS FUNDIDOS	37
3.2.1 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC) OU ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)	39
3.2.2 ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (ZPF) OU ZONA PARCIALMENTE DILUIDA (ZPD)	40
3.2.3 ZONA FUNDIDA	41
3.2.4 POROSIDADES NA SOLDA	41
3.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW	41
3.3.1 PROCESSO GMAW	44
3.3.2 PROCESSO FCAW	46
3.3.3 TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS	48
3.3.4 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM	48
4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS	61
4.1 EQUIPAMENTOS	61
4.2 MATERIAIS	62
4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	68
4.3.1 METALOGRAFIA E MICRO DUREZA	69
4.3.2 MACROGRAFIA	69
4.3.3 MICROGRAFIA	70
4.3.4 PERFIL DE MICRO DUREZA	70
4.3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA SOLDA	71
4.3.6 ENSAIO DE HERMETICIDADE	73

4.3.7 ENSAIO QUANTO AO ENTREFERRO DO MOTOR	75
4.3.8 ENSAIO QUANTO AO RUÍDO STALL	75
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
5.1 MACROGRAFIA	77
5.2 MICROGRAFIA.....	79
5.2.1 ARAME ERNiFeMn-Cl	80
5.2.2 ARAME E70C-6M	84
5.2.3 ARAME ER70S-6	86
5.3 PERFIS DE MICRO DUREZA	90
5.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA SOLDA.....	93
5.5 ENSAIO QUANTO AO ENTREFERRO DO MOTOR.....	97
5.6 ENSAIO QUANTO A HERMETICIDADE	99
5.7 ENSAIO QUANTO AO RUÍDO STALL.....	102
5.8 DISCUSSÕES	104
6 CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS.....	1111

1 INTRODUÇÃO

Com a abertura econômica e o processo de globalização em curso, o mercado brasileiro se tornou ainda mais seletivo, exigindo reduções de custos e melhores níveis de qualidade, entre outras necessidades.

Para sobreviver em um mercado altamente seletivo, as empresas só conseguem determinar o preço se forem pioneiras ou apresentarem inovações revolucionárias ou disruptivas. A sua qualidade e seu preço o tornará competitiva, buscando assim, o fator “preferência” do consumidor.

Atualmente é perceptível que as novidades tecnológicas surgem a cada dia em todos os ramos da atividade humana. O que hoje é considerado moderno, rapidamente se torna ultrapassado devido às inovações tecnológicas, que vão desde o projeto, desenvolvimento até o lançamento de novos produtos com velocidade nunca antes vista. Esse fenômeno atinge todos os mercados e para os compressores de refrigeração não é diferente.

O mercado de compressores herméticos para refrigeração, por se tratar de um mercado extremamente seletivo, faz as empresas fabricantes buscarem a sua diferenciação através de constantes lançamentos de novos produtos com características que atualmente os clientes desejam ou possam vir a desejar.

Dentre as principais características, pode-se citar o aumento da eficiência energética e a minimização do ruído dos aparelhos.

Para compressores de aparelhos de ar condicionados, a característica ruído é extremamente importante, em virtude de sua utilização em ambientes comerciais e residenciais que requerem um baixo nível de ruído ambiente.

As montadoras aceitam compressores com qualquer ruído até 40 decibéis (dB), porém, os desenvolvimentos são baseados buscando níveis menores. A tabela 1 apresenta a correspondência dos níveis de ruído em dB.

Tabela 1 – Correspondência de decibéis

Intensidade	Decibéis	Tipo de ruído
Muito baixo	0-20	Silencioso a ruído de folhas.
Baixo	20-40	Conversação silenciosa.
Moderado	40-60	Conversação normal.
Alto	60-80	Ruído médio em fábrica ou no trânsito.
Muito alto	80-100	Apito e ruído de caminhão.
Ensurdecedor	100-120	Ruído de discoteca e avião decolando.

Fonte: Página consultada em 05 de Janeiro de 2014 <<http://www.multisplit.net/artigos/tabela-de-ruído-em-db-ar-condicionado>>

O ponto que será abordado neste trabalho é justamente a busca na redução do defeito *stall* em compressores destinados a aparelhos de ar condicionados, que é um ruído alto e rápido, ocasionado quando é dado à partida do compressor e o rotor toca no estator. Um dos possíveis motivos para o defeito é a presença de uma solda frágil na união da bomba mecânica a carcaça, permitindo a perda do entreferro do motor.

A figura 1 ilustra um sistema básico de refrigeração de ar condicionado.

Figura 1: Ilustração do ciclo básico de refrigeração.

Fonte: Página consultada em 12 de Dezembro de 2013, <<http://www.arcondicionado.com.br/faq-arcondicionado>>.

O coração do sistema de refrigeração é o compressor hermético. Cada sistema de refrigeração de ar condicionado utiliza, no mínimo, 01 compressor hermético que, na sua essência é um motor elétrico, com potência em torno de 0.5 - 3 HP, acoplado a um mecanismo de compressão por palheta, que gira de 3.000 a 3.500 rotações por minuto, responsável pela compressão do fluido refrigerante.

Basicamente, externamente o compressor hermético de ar condicionado é composto de carcaça calandrada soldada longitudinalmente e tampas superiores e inferiores fabricadas em processo de estampagem. Componentes como o tubo passador do gás de refrigeração, acumulador, parafuso de ligação e conector elétrico, são unidos à carcaça pelo processo de soldagem, por resistência ou brasagem. A figura 2 exemplifica um compressor rotativo.

Figura 2: Compressor hermético para utilização em aparelhos de ar condicionados.

Fonte: Tecumseh do Brasil LTDA.

Uma importante operação no processo de montagem do compressor rotativo é a soldagem do mancal à carcaça através do processo de soldagem GMAW ou GAS METAL ARC WELDING. A soldagem é realizada em três pontos e consiste em dois disparos distintos com um breve intervalo entre os mesmos. A solda deve ser livre de vazamentos e a penetração deve ser tal que o compressor resista a todos os testes de transporte e de vida, sem falhas ou qualquer perda de entreferro do motor. A solda realizada de maneira falha pode permitir a perda do entreferro e até o toque do rotor no estator, gerando durante a partida do compressor um ruído, chamado internamente de *stall*.

O processo de soldagem não é simples, em virtude de o mancal ser constituído de ferro fundido cinzento e a carcaça um aço de baixo carbono.

Dentre as boas qualidades do ferro fundido cinzento pode-se destacar o baixo custo de obtenção, a capacidade de absorção de vibração e a fácil usinabilidade, porém a falta de ductilidade plástica contribui para a dificuldade da soldagem deste material.

O processo de soldagem atualmente utilizado é o GMAW e utiliza como material de adição o arame ANSI / AWS A5.18 ER70S-6 de diâmetro 1.60mm.

No processo de soldagem GMAW ou MIG (*Metal inert gas*) / MAG (*Metal active gas*), um arco de soldagem é formado entre um arame-eletrodo maciço continuamente alimentado e o material de base, formando uma poça que é protegida por um gás de proteção. Se o arame for tubular, o gás de proteção pode ser, simplesmente, da fusão do fundente. A figura 3 exemplifica o sistema.

Figura 3: Desenho esquemático do equipamento de soldagem MIG/MAG.

Fonte: Modenesi e Marques (2009).

O processo dispõe de mecanismo motorizado que direciona o arame, continuamente até a peça, estabelecendo o circuito de soldagem. 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 soldagem do mancal à carcaça, o processo MIG/MAG apresenta características aceitáveis quanto ao aspecto visual e velocidade. Utiliza-se fontes de soldagem convencionais de corrente contínua ou pulsada (eletrodo positivo) de 200 a 400A e a composição do gás de proteção é a mistura C8 (92%Ar + 8% CO_2).

Este processo tem apresentado bom desempenho, porém 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 do processo (respingos) que afetam os equipamentos eletrônicos, a presença de respingos que colam no produto final, a grande emissão de fumos e a questão microestrutural da soldagem, onde se observa a formação de defeitos e microestruturas indesejadas (martensita), que tornam frágil a região da interface. A figura 4 mostra o aspecto visual da soldagem do mancal utilizando o arame ER70S-6.

Figura 4: Solda do mancal a carcaça realizada com o processo MIG/MAG utilizando o arame ANSI / AWS A5.18 ER70S-6 com Ø1. 6 mm.

Fonte: Tecumseh do Brasil LTDA.

2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

Em face dos tópicos mencionados anteriormente e tendo-se em vista as condições de trabalho disponíveis, a presente dissertação tem, como objetivo principal, a realização de um estudo de viabilidade técnica da soldagem de mancais de ferro fundido cinzento em carcaças de aço de baixo carbono, utilizando o arame ANSI/AWS A5.15 ERNiFeMn-CI, além dos arames ANSI/AWS A5.18 ER70S-6 (atualmente utilizado na unidade brasileira) e ANSI/AWS A5.18 E70C-6M (atualmente utilizado na unidade francesa).

O estudo de viabilidade técnica foi realizado através da comparação das propriedades mecânicas e índices qualitativos obtidos nas soldagens (microestrutura formada, dureza, resistência, penetração e índices de vazamentos, entreferro e stall) em relação aos aspectos econômicos (custo benefício).

Não há registros ou estudos, sobre a influência do arame atualmente utilizado na soldagem com o defeito *stall*. A literatura existente sobre soldagem em ferro fundido cinzento não cita que o arame atualmente utilizado ANSI/AWS A5.18 ER70S-6 é indicado para a sua soldagem. A aquisição de conhecimento científico em relação a esta aplicação torna-se um objetivo a ser perseguido.

Aspectos relativos aos defeitos de soldagem como, vazamentos e trincas de solidificação, foram cuidadosamente avaliados para possibilitar uma solução eficiente da nova aplicação.

3 ESTADO DA TÉCNICA

3.1 FERRO FUNDIDO

Genericamente, os ferros fundidos são uma classe de ligas ferrosas com teores de carbono acima de 2,14%. Na prática, no entanto, os ferros fundidos contêm entre 3 a 4,5%, além de outros elementos de liga, como silício de 0,5 a 3%, e até 1% de manganês (CALLISTER, 2003). As principais características que tornam os ferros fundidos bastante empregados industrialmente são o baixo ponto de fusão, alta fluidez e menor contração com relação aos aços. Essas propriedades aliadas ao seu menor custo são fatores que levam a preferência sobre os aços fundidos, apesar das qualidades inferiores.

As categorias gerais dos ferros fundidos são ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido maleável e ferro fundido nodular (dúctil), (AMERICAN WELDING SOCIETY - AWS, 1998).

O ferro fundido cinzento é a liga mais utilizada em virtude de suas características como, fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica e usinabilidade, boa resistência ao desgaste e a boa capacidade de amortecimento (CHIAVERINI, 2008).

As propriedades mecânicas dependem do tipo da microestrutura e da forma e distribuição dos microconstituintes, principalmente a grafite livre.

O carbono está presente no ferro fundido de duas formas: (1) como carbono combinado (cementita, perlita, martensita, etc.) e (2) como carbono livre (grafita). No ferro fundido cinzento a grafita tem a aparência de lamelas, figura 5, enquanto que no ferro fundido maleável, uma aparência quase esferoidal, figura 6.

As fendas afiadas e descontinuidades produzidas pelas lamelas de grafita no ferro fundido cinzento são as responsáveis por sua característica frágil. O ferro fundido maleável e o nodular não apresentam essa fragilidade pois a grafita é basicamente no formato esferoidal ou globular (AWS, 1998).

Em resumo, o ferro fundido contém mais carbono do que um aço de alto carbono e apreciável quantidade de silício (Si), e ambos os materiais influenciam

a forma estrutural que o carbono exibe no ferro fundido, como pode ser visto nas figuras 5, 6 e 7.

Figura 5: Micro estrutura de um ferro fundido cinzento.

Fonte: AWS (1998).

Figura 6: Micro estrutura de um ferro fundido maleável.

Fonte: AWS (1998).

Figura 7: Micro estrutura de um ferro fundido nodular.

Fonte: AWS (1998).

O sistema metaestável carboneto ferro-ferro coexiste com o sistema estável ferro-grafita em um ferro fundido. Esses constituintes de carbono produzem uma matriz metálica que possui a microestrutura e atributos do aço. O carbono grafítico não combinado é distribuído na matriz em uma variedade de formas geométricas, incluindo partículas em miniatura, várias formas de lamelas e esferoides. O tamanho, a forma, e a distribuição da grafita influenciam as propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido (AWS, 1998).

Já o aço carbono é um aço sem adição proposital de outros elementos, contendo apenas carbono abaixo de 2,14% e os quatro elementos residuais sempre encontrados nos aços e que permanecem em sua composição durante o processo de fabricação, ou seja, manganês, silício, fósforo e enxofre (SOUZA, 1989).

3.2 A SOLDAGEM DOS FERROS FUNDIDOS

Os processos de soldagem envolvem aplicação de calor e/ou pressão, com ou sem uso de metal de adição, para produzir uma união localizada. O rápido aquecimento e resfriamento do metal de base nas proximidades da solda causam deformação plástica do material ao redor da junta e a formação de

tensões residuais, após a operação de soldagem ser completada. A solda é somente uma parte da junta. Também importante, e normalmente mais crítico no caso de ferro fundido, é o material que circunda a solda, a zona afetada pelo calor (ZAC), região que não fundiu, mas que foi de alguma forma afetada pela energia térmica aportada pelo processo. A figura 8 apresenta o diagrama de fase da liga Fe-C e as áreas correspondentes na soldagem de ferros fundidos.

Figura 8: Fases e microestruturas na soldagem do ferro fundido.

Fonte: AWS (1998).

O ferro fundido pode ser pensado como um aço acrescido de grafita. A parte do aço forma a matriz e, como o aço, pode ser endurecido ou ter sua ductilidade aumentada através de tratamentos térmicos.

Diferente do aço, contudo, o ferro fundido tem um excesso de carbono (proveniente da grafita) na sua matriz. Durante a soldagem, a matriz poderá enrijecer localmente com o carbono e, sob-rápido resfriamento, a zona afetada pelo calor, poderá tornar-se muito frágil, devido ao acúmulo de tensões residuais

na formação da martensita, figura 9, e cementita. Esses fatores metalúrgicos fazem o ferro fundido ser mais difícil de soldar do que o aço (AWS, 1998).

Figura 9: Microestrutura da martensita no ferro fundido.

Fonte: AWS (1998).

A tensão de resistência, dureza e microestrutura de um ferro fundido cinzento são influenciadas por muitos fatores, incluindo composição química, projeto, características do molde, e taxas de resfriamento durante e após a solidificação. O conteúdo de níquel no ferro fundido cinzento aumenta a sua resistência a tensão e corrosão.

O limite de elasticidade do ferro fundido cinzento não é especificado. Para propósitos práticos, o limite de elasticidade e a máxima resistência são considerados coincidentes. A resistência à compressão do ferro fundido cinzento é de 2,5 a 4 vezes maior que sua resistência à tração. Já a sua resistência ao impacto geralmente é baixa, geralmente quando o fósforo está em seu nível mais alto. Fósforo também tem um efeito indesejado na soldabilidade. Com níveis altos de fósforo, trincas no metal de solda podem aparecer.

3.2.1 ZONA AFETADA PELO CALOR (ZAC) OU ZONA TERMICAMENTE AFETADA (ZTA)

A maior dificuldade na soldagem de ferros fundidos é a sua tendência para formar microestruturas duras e frágeis na ZAC ou ZTA devido ao alto teor de carbono. A soldagem de ferro fundido é caracterizada pelo rápido resfriamento da poça de fusão comparando com o mais lento resfriamento do ferro durante a fundição. O ciclo térmico da solda assim não produz uma microestrutura desejável.

A estrutura da ZAC é complexa e normalmente consistem de uma mistura de martensita, austenita, carbonetos primários e eutéticos.

O mecanismo pelo qual estas estruturas são formadas parece bem estabelecido. Sob a influência do calor do arco e do metal fundido do cordão, uma zona estreita, adjacente ao metal da solda, é aquecida até temperaturas logo abaixo da temperatura do eutético. Atingindo esta temperatura, a matriz é primeiro austenitizada e, então, começa rapidamente a dissolver a grafita. Isto resulta em uma austenita rica em carbono e pequenas poças de líquido ricas em carbono. Então, à medida que o metal da solda e a ZAC são rapidamente resfriados, sob a influência da grande massa de metal frio logo ao lado da zona de pico de temperatura, a austenita rica em carbono transforma-se parcialmente ou totalmente em martensita, e o líquido resfria como uma mistura de eutético e carbonetos primários. Este evento acontece em segundos, ou até mesmo frações dele.

3.2.2 ZONA PARCIALMENTE FUNDIDA (ZPF) OU ZONA PARCIALMENTE DILUIDA (ZPD)

A zona parcialmente fundida (ZPF) ou diluída (ZPD) é uma extensão da ZAC, ocorrendo quando um alto pico de temperatura causa uma fusão parcial das impurezas de baixo ponto de fusão contidas no metal base, próximo da linha de fusão do cordão. Esta região é extremamente frágil, o que afeta adversamente as propriedades mecânicas, um fator que deve ser levado em consideração para produzir juntas soldadas satisfatórias.

A microestrutura da região parcialmente fundida é uma mistura complexa de martensita, austenita, carboneto primário, e ledeburita diversificada com nódulos ou flocos de grafita parcialmente dissolvidas. Redução dos picos de

temperatura e tempo a altas temperaturas são os mais eficientes métodos de reduzir qualquer tendência a trincas (AWS, 1998).

3.2.3 ZONA FUNDIDA

A microestrutura e as propriedades do metal de solda são influenciadas pela seleção dos metais de adição. A poça de fusão produzida por arco elétrico, é homogeneizada durante a soldagem, para produzir um cordão de solda relativamente uniforme na composição (AWS, 1998).

3.2.4 POROSIDADES NA SOLDADA

Com a alta temperatura da solda, a grafita, presente no ferro fundido, “queima-se”, ficando mais fluida, saindo da microestrutura, dissolvendo-se no metal e tornando-o menos fluido, de modo que o vazio deixado não é preenchido, o que deixa a peça porosa. Quando a peça fundida apresenta a grafite em veios finos e de distribuição uniforme, o problema é menos grave. Em todos os casos, sempre é uma dificuldade a mais na soldagem dos ferros fundidos cinzentos. Isto é principalmente importante em peças que exigem estanqueidade.

Um método para amenizar o inconveniente é a utilização de um pré-aquecimento que permita a massa fundida manter-se por mais tempo no estado líquido e fluida, “obturando” os espaços vazios (PARIS, 2003).

3.3 PROCESSOS DE SOLDAGEM GMAW E FCAW

Na soldagem de ferro fundido, o processo de soldagem GMAW e FCAW tem o seu uso limitado, pois suas principais vantagens são as altas taxas de deposição e a eficiência.

Segundo Modenesi (2000), a soldagem a arco gás metal (MIG/MAG ou *Gás Metal Arc Welding* - GMAW) é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pelo seu aquecimento com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a peça (metal de base) com proteção de gás.

A concepção básica do GMAW foi introduzida no mercado em 1920, entretanto, somente a partir de 1948 tornou-se comercialmente viável.

Inicialmente, o GMAW foi considerado para ser, fundamentalmente, um processo de alta densidade de corrente, utilizando eletrodos de metal nu de pequenos diâmetros e gás de proteção do tipo inerte. Sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o termo MIG – *Metal Inert Gas* – foi usado e esta denominação é ainda bastante utilizada.

Evolução subsequente do processo incluindo adições do gás oxigênio ao gás argônio (1951) e a introdução de gás ativo puro – dióxido de carbono – ou mistura deste com o gás argônio (1953), propiciou a soldagem com baixas densidades de energia e a soldagem utilizando corrente pulsada para uma vasta gama de materiais (ferrosos e não ferrosos), empregando gás inerte, ativo ou uma mistura de gases. Devido à utilização de diferentes tipos de gás de proteção, o termo GMAW – *Gas Metal Arc Welding* – foi aceito formalmente para denominação do processo.

Na década de 50, a introdução da combinação do gás de proteção CO₂ com eletrodos contendo fluxo interno (arames tubulares) propiciou significantes melhorias nas condições de operação e na qualidade da solda. A primeira apresentação pública deste processo (conhecido como FCAW ou *Flux Cored Arc Welding*) foi no ano de 1954 e, em 1957, os equipamentos utilizados já possuíam uma configuração similar à atual. Experiências deste período já demonstravam significantes melhorias nas propriedades das soldas quando o arco e o metal fundido estão protegidos da contaminação pela atmosfera.

Na soldagem FCAW os gases de proteção empregados podem ter tanto uma característica inerte, como no caso de misturas a base de Argônio ou Hélio, nas quais os elementos químicos presentes no gás de proteção não migram para o interior do metal de solda, quanto uma característica ativa, para o caso de misturas que utilizam proporções de CO₂ ou O₂, aonde os elementos presentes no gás de proteção tenderão a migrar para o interior do metal de solda, causando alterações no teor de Carbono e na quantidade de óxidos (WAINER, 1992).

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) e arame sólido (GMAW) são processos que acumulam vantagens, como: alto fator de trabalho do

soldador, alta taxa de deposição, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida. Estas vantagens fazem com que estes processos sejam adequados para alta produção e soldagem automatizada. Isto se tornou evidente com o advento da utilização de robôs na produção, onde o GMAW e FCAW têm sido os processos mais utilizados.

Os arames tubulares e os arames sólidos possuem muita similaridade quanto aos equipamentos usados na soldagem como nos tipos de aplicações recomendadas. Algumas características como alta produtividade, boa flexibilidade e facilidade de operação tornam os processos GMAW e FCAW altamente competitivos e, em muitos casos, concorrentes diretos nas aplicações de soldagem (RODRIGUES, 2005).

Em relação à geometria do cordão de solda, as diferenças são geradas, principalmente, devido ao comportamento do arco e da transferência metálica.

Soldas realizadas com arames sólidos possuem alta penetração, porém estreita, do tipo dediforme (figura 10 a).

Soldas realizadas com arames tubulares possuem o arco mais largo, com aspecto liso e penetração mais rasa (figura 10 b).

Figura 10: Geometria do cordão de solda. a) processo GMAW e b) processo FCAW.

Fonte: Araujo (2004).

Na Soldagem GMAW, a tocha deve estar alinhada, pois um pequeno desalinhamento pode causar falta de fusão lateral.

No processo FCAW, devido ao arco mais largo, há uma tolerância maior para o desalinhamento da tocha, reduzindo assim, os defeitos por falta de fusão (ARAÚJO, 2004).

3.3.1 PROCESSO GMAW

É um processo de soldagem a arco que utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal e a poça de fusão (OKUMURA, 1982). Esse processo utiliza como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo uma fonte externa de gás de proteção.

Como já citado, o processo GMAW, conhecido também como processos MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*), utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre o eletrodo no consumível, alimentando continuamente o metal base. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou ativo (MAG). A soldagem pode ser automática ou semiautomática.

A Figura 11 ilustra esquematicamente o processo.

Figura 11: Ilustração do princípio do processo GMAW.

Fonte: Fortes (2005).

O processo de soldagem GMAW apresenta varias vantagens, como, possibilidade de ser executada em todas as posições, não há necessidade de remoção de escória, possui alta taxa de deposição do metal de solda, pode ser realizada com altas velocidades de soldagem, alimentação contínua de arame, penetração de raiz mais uniforme, poucos problemas de distorção e tensão residual e soldagem de fácil execução.

As principais limitações do processo são maior velocidade de resfriamento, aumentando assim a ocorrência de trincas, a soldagem deve ser protegida de correntes de ar, não é fácil de ser realizada em locais de difícil acesso, pois o bocal precisa ficar próximo do metal base a ser soldado, grande emissão de raios ultravioleta e equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo com eletrodo revestido.

Segundo Gimenez (2005) a tocha de soldagem consiste basicamente de um bico de contato, que faz a energização do arame-eletrodo, de um bocal que orienta o fluxo de gás protetor e de um gatilho de acionamento do sistema. O bico de contato é um pequeno tubo à base de cobre, cujo diâmetro interno é ligeiramente superior ao diâmetro do arame-eletrodo, e serve de contato elétrico deslizante. O bocal é feito de Cobre ou material cerâmico e deve ter um diâmetro compatível com a corrente de soldagem e o fluxo de gás a ser utilizado numa dada aplicação. O gatilho de acionamento movimenta um contator que está ligado ao primário do transformador da máquina de solda, energizando o circuito de soldagem, além de acionar o alimentador de arame e uma válvula solenóide, que comanda o fluxo de gás protetor para a tocha. As tochas para soldagem MIG/MAG podem ser refrigeradas a água ou pelo próprio gás de proteção, dependendo de sua capacidade, dos valores de corrente utilizados e do fator de trabalho. Quanto ao formato, as tochas podem ser retas ou curvas, sendo as mais utilizadas as do tipo "pescoço de cisne" que são as que oferecem maior maneabilidade.

O conduíte suporta, protege e direciona o arame dos roletes alimentadores até o tubo de contato. Alimentação ininterrupta é necessária para assegurar uma boa estabilidade do arco. Cuidados especiais devem ser tomados com a passagem do arame pelo conduíte. O arame não deve dobrar ou torcer quando introduzido na tocha. No contato do arame com os roletes de

contato do carro de alimentação, existe uma tendência de esmagamento do arame, o que se deve evitar.

As fontes de soldagem fornecem energia elétrica para o arame e para a peça de trabalho de forma a produzir o arco elétrico. Para a maioria das aplicações com GMAW, utilizam-se fontes que fornecem corrente contínua direta com eletrodo positivo (DCEP – *direct current electrode positive*), isto é, o pólo positivo da máquina é conectado à tocha e o negativo à peça. A constituição interna destas fontes é, geralmente, do tipo transformador-retificador, ou geradores (pouco usuais).

3.3.2 PROCESSO FCAW

O processo FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) é aquele onde a união entre os metais é obtida através do arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame podendo ser, ou não, complementada por um gás de proteção. Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação (FORTES, 2004).

A Figura 12 ilustra esquematicamente o processo.

Figura 12 – Processo básico de soldagem FCAW.

Fonte: Fortes (2004).

A soldagem com arame tubular possui inúmeras semelhanças em relação ao processo GMAW no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a taxa de deposição, característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo (GOMES, 2006).

Os benefícios da soldagem com arames tubulares estão relacionados a algumas características, tais como produtividade relacionada à utilização de arames contínuos e benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame.

O processo de soldagem com arame tubular tem duas variações:

a) Eletrodo com proteção gasosa - o fluxo interno tem principalmente a função de desoxidante e de introdutor de elementos de liga. As funções de proteção do arco e ionização da atmosfera ficam mais a cargo do gás introduzido a parte. O gás de proteção usualmente é o dióxido de carbono ou uma mistura de argônio e dióxido de carbono. O processo de proteção a gás é apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de elevada penetração.

b) No processo sem proteção a gás, há uma diferenciação no interior da tocha e o arame é denominado auto protegido, ou seja, o próprio eletrodo possui um fluxo interno que se encarrega de auxiliar na proteção da poça de fusão.

Como no processo GMAW, o FCAW tem propriedades que favorecem a sua escolha em comparação com outros processos a arco, tais como a qualidade da solda depositada, a alta taxa de deposição, alta produtividade, cordões com aparências e contornos satisfatórios, a maioria dos aços podem ser soldados, apresenta bons resultados em materiais com espessuras maiores, menos susceptível a trincas e o eletrodo auto protegido é mais tolerante à variação do ambiente, ou seja, soldagem ao ar livre.

Em relação as suas limitações, as principais são a questão do arame tubular ter um custo maior em relação ao sólido e possuir escória, ou seja, necessita de uma limpeza adequada para realização de novos cordões.

3.3.3 TRANSFERÊNCIAS METÁLICAS

A transferência do metal de solda fundido através do arco pode ocorrer em qualquer dos três modos básicos: globular, curto-circuito ou spray. Uma variação de spray pulsado conduz a características desejadas da transferência por spray disponível para juntas de chapas metálicas e soldagem de metais grossos em todas as posições. O calor adicionado à junta, gás de proteção e as características da fonte de energia determinam o modo de transferência.

A escolha do tipo de transferência será determinada, pelo metal base a ser soldado, complexidade da soldagem, taxa de deposição requerida e posições de soldagem. Em geral, processos de menor calor adicionado são favoráveis devido à sua menor penetração, fusão do metal base e severidade do processo. Minimizando a diluição do metal de solda pelo metal base haverá redução na tendência à ocorrência de trincas durante a soldagem. Os menores diâmetros de arame como modos de transferência de baixo aporte de calor são usados para a maioria das soldagens em ferro fundido.

Todos os modos de transferência metálica podem ser usados na soldagem do ferro fundido (AWS, 1998).

Figura 13: Modos de transferência metálica.

Fonte: AWS (1998).

3.3.4 PRINCIPAIS VARIÁVEIS DE SOLDAGEM

Variáveis do processo afetam a penetração e a geometria da solda, e conseqüentemente as qualidades globais. Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas destacam-se a corrente de

soldagem, a tensão, a velocidade de soldagem, o comprimento (*stick-out*) e a orientação do eletrodo, o metal de adição e a proteção gasosa.

O conhecimento e o controle destas variáveis são essenciais para a obtenção de uma solda de qualidade e satisfatória. Estas variáveis não são completamente independentes e mudança em uma, geralmente exige mudanças em uma ou mais das outras variáveis para produzir os resultados desejados.

As principais variáveis dos processos de soldagem GMAW e FCAW são:

3.3.4.1 CORRENTE DE SOLDAGEM

Influencia diretamente a taxa de deposição, o modo de transferência metálica e as características geométricas do cordão. Portanto, sua escolha dependerá da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda. Além disso, uma corrente de baixa intensidade pode ocasionar pouca estabilidade ao arco elétrico. Se as variáveis do processo forem mantidas constantes e o valor da corrente de soldagem for aumentado, ocorrerá aumento na penetração e na profundidade da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição (ALVES, 2008).

No processo GMAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido (GIRALDO, 2008).

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo com arames tubulares, sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem (GOMES, 2006).

Segundo Mostafa (2006) o aumento da corrente, na soldagem FCAW, reduz o tamanho das gotas, mas aumenta o ritmo das mesmas que, ao golpear a poça de fusão, faz com que ocorra uma penetração mais profunda.

3.3.4.2 TENSÃO DO ARCO

Tensão e comprimento do arco elétrico são variáveis freqüentemente utilizadas e extremamente interligadas. Porém apesar desta interligação, estas variáveis são diferentes. O comprimento do arco é uma variável independente. Porém, a tensão depende tanto do comprimento do arco, como de outras variáveis tais como composição e diâmetro do arame, tipo do gás de proteção e técnica de soldagem. Além disto, visto que a tensão é medida na máquina de solda, o comprimento dos cabos também influencia o seu valor. A tensão do arco é uma medida aproximadamente do comprimento físico do arco em termos elétricos, Figura 14, apesar da tensão no arco incluir a queda de tensão devido à extensão do eletrodo.

Figura 14: Terminologias.

A definição do valor da tensão do arco deve ser feita levando em consideração a composição química do tipo de material de base e do gás de proteção e o modo de transferência metálica desejada.

Testes de solda são necessários para ajustar a tensão do arco para produzir características favoráveis e boa aparência do cordão de solda. Estes testes são essenciais, pois o valor ótimo para a tensão depende de uma grande variedade de fatores incluindo espessura do material, tipo de junta, posição de soldagem, diâmetro do arame, composição do gás de proteção e tipo de solda. Partindo de um valor qualquer para tensão do arco, um aumento na tensão

tende a achatar o cordão de solda e aumentar a zona de fusão. Tensões excessivamente grandes podem causar porosidade, respingos e trincas. Redução na tensão resulta em um cordão mais estreito com reforço concentrado na linha central do cordão e penetração profunda. Tensões excessivamente baixas podem causar toque do arame na poça de fusão, desestabilizando o arco.

3.3.4.3 STICK-OUT

O stick-out corresponde à distância entre o bico de contato e a peça. Incorpora o comprimento do arco e a extensão do eletrodo. Em procedimentos de soldagem é o valor do stick-out que é especificado.

Figura 15: Stick out.

Quando a distância do bico de contato à peça é muito grande, pode ocorrer uma deficiência na ação do gás de proteção. Para uma taxa de alimentação fixa do arame, qualquer aumento desta distância reduz a corrente fornecida pela fonte. Sales (2001) menciona um estudo em que o aumento da distância bico de contato peça pode provocar um aumento significativo do reforço do cordão de solda e diminuição da largura do cordão. Esta tendência é mais pronunciada para a soldagem com o CO_2 puro.

Figura 16: Influência do “stick-out” na geometria do cordão de solda.

Fonte: Wainer (1992).

3.3.4.4 VELOCIDADE DE SOLDAGEM

Velocidade de soldagem é a taxa linear na qual o arco se movimenta ao longo da junta. Mantendo todas as demais variáveis do processo constante, a penetração é máxima a uma velocidade intermediária.

A velocidade é um parâmetro que possui uma grande influência na geometria do cordão de solda. Quando excessivamente grande, torna um cordão convexo com bordas irregulares e diminui a penetração. Se a velocidade for muito pequena, há inclusão de escoria e cordão irregular. Assim, a velocidade é um importante fator na determinação da energia de soldagem, pois pode atuar num grande intervalo (Machado, 1996).

Quando a velocidade de soldagem é reduzida, a deposição de metal por unidade de comprimento aumenta. Com velocidades muito baixas, o arco elétrico incide com maior violência sobre a poça de fusão mais que sobre o metal base, reduzindo assim a penetração efetiva. Uma poça larga também é esperada como resultado.

Quando a velocidade é aumentada, a energia térmica por unidade de comprimento transmitida para o metal de base através do arco é, em princípio aumentada, devido ao arco agir diretamente no metal base. Com aumentos sucessivos na velocidade, menor energia por unidade de comprimento de solda é cedida ao metal base. Então, a fusão do metal de base primeiramente aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade. Com aumentos sucessivos da velocidade, há uma tendência à mordedura nas bordas do cordão devido à deposição insuficiente.

3.3.4.5 ORIENTAÇÃO DO ELETRODO

A orientação do eletrodo em relação à junta soldada afeta o formato e a penetração do cordão de solda quando outras variáveis são mantidas constantes. Esta influência é maior observada quando se altera a tensão e a corrente de soldagem (Felizardo, 2005). A orientação do eletrodo pode ser descrita de duas maneiras:

a) Ângulo da tocha: É a medida de inclinação entre o eixo do eletrodo e a superfície adjacente do metal de base.

b) Sentido de soldagem: Tem-se nesta situação, a técnica do arraste, onde a tocha puxa a poça de fusão e a técnica do avanço, onde a tocha empurra a poça de fusão.

A Figura 17 ilustra o efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda. Observa-se que o cordão fica mais largo e achatado quando a tocha é usada na técnica de avanço (empurrando) e a penetração é máxima quando a técnica utilizada é a de arraste (puxando), com ângulo de aproximadamente 25° com a perpendicular.

Figura 17: Efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda.

Fonte: Felizardo (2005).

3.3.4.6 MATERIAL DE ADIÇÃO

A escolha do material de adição é de essencial importância para o sucesso da soldagem. A composição química do eletrodo (arame) deve ser selecionada para alcançar as propriedades desejadas do metal de solda, em virtude do arame determinar as propriedades físicas e químicas da soldagem.

Uma grande variedade de metais de adição existe para a soldagem de ferro fundido. Eletrodos revestidos são os mais utilizados, mas barras de arame, arames tubulares e até sólidos têm encontrado grande aceitabilidade.

Embora não seja recomendado, em face da morfologia e das propriedades mecânicas obtidas na soldagem, arames não contendo Ni, Mn ou Cr também podem ser utilizados na soldagem de ferro fundido, em virtude de custos.

3.3.4.6.1 ELETRODOS REVESTIDOS

Os eletrodos revestidos para a soldagem de ferro fundido são classificados pela norma ANSI/AWS A5.15, “Varetas e Eletrodos Revestidos para a soldagem de ferro fundido”. Os Eletrodos revestidos iniciam sempre com a letra E que significa eletrodo, seguido pelo tipo de material que compõe a alma metálica. Por exemplo, eletrodos contendo alma de ferro fundido recoberta são classificados como ECI (“Electrode Cast Iron”). Este tipo de eletrodo possui baixo custo. São relativamente fáceis de soldar, mas as propriedades e resistência do depósito são um tanto inconsistentes. Estes eletrodos geralmente não são adequados para a soldagem de ferro fundido dúctil e maleável.

Eletrodos classificados como ESt têm uma alma de aço e recobrimento de grafite. É virtualmente impossível prevenir a formação de regiões endurecidas no metal de solda devido à diluição do metal base. Estes eletrodos são largamente utilizados para reparos de pequenas falhas e trincas. Os eletrodos ESt podem ser usados para reparos de fundidos que necessitam de operações de usinagem após a soldagem. A dilatação do aço é muito maior do que a dilatação do ferro fundido, resultando na formação de altas zonas tensionadas quando a solda resfria. Pré-aquecimento é usado quando é necessário prevenir tensões excessivas nas outras partes do ferro fundido. Tensões residuais internas podem ser severas o suficiente para causar trincas.

Eletrodos de aço para baixo carbono tais como E7015, E7016, E7018 e E7028, são algumas vezes usados para a soldagem ornamental de ferro fundido.

Eletrodos de aço inoxidável são raramente usados devido à formação de carbonetos de cromo e trincas na solda que surgem devido às diferentes dureza e coeficientes de expansão. Os eletrodos do tipo E308, E309, E310 e E312 possuem aplicação limitada e muitos cuidados deverão ser tomados ao utilizá-los. O eletrodo E310 produz um depósito de baixa permeabilidade e pode ser satisfatoriamente usado onde as propriedades magnéticas são especificadas (AWS, 1998).

Eletrodos à base de níquel são amplamente usados para a soldagem de ferro fundido. Isto se deve ao fato deste tipo de eletrodo auxiliar na prevenção de trincas nos ferros fundidos.

Os do tipo AWS ENiFe-CI têm uma composição química média de 55%Ni e 45%Fe e são empregados para a soldagem de ferros fundidos. Seu revestimento à base de grafite, permite que o teor de carbono do material depositado fique compreendido entre 1 e 2%, evitando trincas de solidificação a quente.

Os produtos de níquel puro (ENi-CI) raramente trincam devido à diluição excessiva, porque eles contêm um alto teor de níquel. Entretanto, os produtos níquel-ferro e níquel-ferro manganês (ENiFe-CI, ENiFeT3-CI e ERNiFeMn-CI) podem apresentar trincas na zona soldada se a diluição for muito alta. Normalmente, estas trincas aparecem como trincas transversais ao cordão de solda ou como trincas na linha de centro do cordão somente sob condições de alta restrição e quando a diluição excede 30% (por exemplo, o depósito de solda obtido é maior do que 30% do volume do ferro fundido).

Como na ferrita, a solubilidade do carbono no níquel é baixa (0,02%) no estado sólido. Assim que a poça de fusão solidifica e resfria, o carbono sólido é rejeitado da solução sólida e precipita como grafita. Esta reação aumenta o volume do depósito.

Eletrodos à base de níquel (ENi-CI e ENiFe-CI) assim como os arames para o processo TIG e arame tubular, possuem um conteúdo de carbono ligeiramente acima do limite de solubilidade no níquel. O resultante aumento no volume de solda ajuda a compensar as tensões de contração geradas durante o

resfriamento e diminui a probabilidade de trincas na zona de fusão e na ZAC (AWS, 1998).

Os eletrodos níquel-cobre classificados como ENiCu-A e ENiCu-B possuem limitado uso para a soldagem. Eles são usados para produzir uma baixa profundidade de fusão, devido à alta diluição do metal base que pode resultar em trincas (AWS, 1998).

3.3.4.6.2 ELETRODO TUBULAR

Um eletrodo tubular ENiFeT3-CI é um eletrodo contínuo contendo fluxo no seu interior. Combinando as melhores características do eletrodo protegido superficialmente e os processos de arame sólido, ele produz soldas resistentes e dúcteis a altas taxas de deposição sem gás de proteção. A composição do ENiFeT3-CI é similar ao do ENiFe-CI exceto pelo mais alto conteúdo de manganês. Contém em sua composição de 3 a 5% de manganês para resistir a trincas a quente e aumentar a resistência e ductilidade do metal de solda. Este eletrodo é usualmente utilizado para metais base de pouca espessura ou onde o processo possa ser automatizado, sendo útil para a soldagem de conjuntos feitos de ferro fundido e aço.

Junto com outras ligas apropriadamente adicionadas, o manganês no eletrodo ENiFeT3-CI produz uma grande capacidade de resistir a trincas em soldas com altas taxas de deposição. O metal de solda desenvolve propriedades mecânicas e microestrutura similar a aquelas depositadas por eletrodos ENiFe-CI, mais com um alto teor de manganês. O princípio da rejeição da grafita e o aumento do volume do metal de solda associado com o resfriamento é o mesmo para ambos os produtos. Este tipo de eletrodo é projetado para ter autoproteção através do fluxo interno, mas é aceitável proteção gasosa de CO₂.

Não é necessário pré-aquecimento para soldagem superficial de grandes seções de ferro fundido cinzento (AWS, 1998; LINCOLN, 1994).

3.3.4.6.3 ARAME TUBULAR

É um dos processos com larga aceitação na soldagem de ferro fundido devido à alta eficiência, além da obtenção de soldas de boa qualidade. Arames tubulares são contínuos e ocos, e possuem em seu interior fluxos, em forma de

pó, que permitem a soldagem dos mais diversos tipos de materiais, como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e aços inoxidáveis, além de poderem ser utilizados para depositar revestimentos duros sobre superfícies sujeitas à abrasão e ao impacto (FORTES, 2004).

A principal diferença entre o processo com arame tubular e maciço é o metal de adição que, no arame tubular, contém em seu interior um fluxo em forma de pó. Este fluxo contém elementos desoxidantes que auxiliam na proteção e estabilidade do arco, além de poder conter elementos de liga. Segundo Lucas (1999), o fluxo contido no interior dos arames tubulares podem ser rutilico básico ou metálico, dependendo da composição química do mesmo.

Os arames tubulares do tipo *metal cored*, possuem fluxo metálico em seu interior com a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo para aumentar a força do material depositado e também para desoxidá-lo (BAUNÉ, 2000).

Por apresentar elevadas taxas de deposição, mínima quantidade de escória e respingo, excelente aparência e baixo nível de fumos, o arame do tipo *metal cored* vem obtendo a preferência de muitas empresas, principalmente dos segmentos automotivos e de transporte (BARHORST, 2000).

Segundo Araujo (2004), é possível trabalhar com velocidades e correntes de soldagem maiores com o arame tubular *metal cored* que com o arame maciço, sem prejudicar a qualidade da solda.

Arames tubulares “rutilicos” contêm em seu interior fluxos não metálicos, formadores de escória e estabilizadores do arco. Esses fluxos internos também têm a função de proteger e purificar o metal de solda além de reduzir o número de respingos e controlar as características de fusão do eletrodo.

Os fluxos rutilicos possuem grande quantidade de óxido de titânio (rutila) e alguns silicatos. Os fluxos básicos possuem grande quantidade de carbonato de cálcio (calcário) e fluoreto de cálcio (fluorita).

A queima deste fluxo durante a abertura do arco resulta em benefícios para o cordão de solda, como, adição de elementos químicos desoxidantes (Mn, Si e Al), adição de elementos de liga desejada em determinadas aplicações, proteção gasosa adicional nos arredores da poça de fusão e proteção térmica e química pela formação de uma camada de escória.

3.3.4.6.4 ARAMES SÓLIDOS

São arames contínuos e maciços, podendo, em alguns casos, serem protegidos por uma fina camada de cobre com o objetivo de evitar a oxidação.

Os diâmetros de arames comumente utilizados no processo GMAW variam de 0,8 a 1,6 mm. Contudo, arames mais finos (0,5 mm) ou mais grossos (3,2 mm) podem ser utilizados.

Qualquer composto utilizado na superfície do arame ou do metal de base, lubrificante é um exemplo, pode afetar a qualidade da solda. Portanto, a limpeza superficial do arame e do metal de base é essencial para obter soldas de qualidade. Além disto, os arames devem ser manufaturados com rigoroso controle de composição e pureza, visando obter total controle das propriedades mecânicas e da seção do arame e, conseqüentemente, controle da resistência à tração, dureza e rigidez do mesmo. Estas características podem influenciar na operação de soldagem, visto que quando há variação destas propriedades de uma bobina para outra, é provável que ocorra alimentação errática do arame.

Materiais de deposição tipo ERNi-1 são usados na soldagem de ferro fundido, embora os benefícios favoráveis da grafita introduzida na poça de fusão não possam ser obtidos com um arame sólido. O alto conteúdo de titânio do ERNi-1 também promove a formação de carbetos de titânio duros.

ERNi-CI é adequado para reparos cosméticos, contudo, ausência de desoxidantes resulta na tendência para porosidade em múltiplos passes de solda.

O arame sólido ERNiFeMn-CI torna a soldagem do ferro fundido possível e econômica através da eliminação ou redução do pré-aquecimento e retenção de 100% das propriedades de resistência do metal base.

Uma das razões pelas quais o ferro fundido é mais econômico para produzir do que o aço fundido é que suas temperaturas de solidificação (*solidus* e *liquidus*) são mais baixas. Isto permite fusão a mais baixa temperatura. Contudo, temperaturas baixas de *solidus* e *liquidus* estão também entre as causas dos problemas de soldagem do ferro fundido. Isto se deve ao fato de que os arames sólidos comuns utilizados para a soldagem de ferro fundido estão muito próximos de níquel puro (ENi-CI e ENi-Ci-A) ou 55% de níquel, balanceado

com ferro (ENiFe-Cl e ENiFe-Cl-A), ambos com temperatura de solidificação mais alta do que o metal base ferro fundido. Quando o metal de solda solidifica antes da zona entre a poça de fusão e a ZAC, tensões de solidificação ocorrem enquanto algumas áreas estão ainda líquidas. Desde que um líquido não consegue manter tensões de escoamento, trincas podem ocorrer.

A composição do metal de adição ENiFeMn-Cl acrescenta a soldabilidade do ferro fundido com processos de altas taxas de deposição, primeiramente porque ele possui uma taxa de solidificação mais compatível com a do metal base. A composição do ENiFeMn-Cl apresenta uma temperatura *liquidus* de 82°C menor do que a do sistema eletrodo revestido ENiFe-Cl, e a temperatura *solidus* é correspondente menor. Como resultado do uso de ENiFeMn-Cl, menores tensões de contração são formadas enquanto a fase líquida persiste na ZAC. Isto resulta em menos trincas. Também, ENiFeMn-Cl possui a vantagem de possuir um coeficiente de expansão térmica muito parecido com a do ferro fundido. A combinação destas características resulta em soldas que solidificam sobre uma faixa de temperatura muito mais próxima da temperatura do ferro fundido e que passam por similar ciclo térmico de contração e expansão. Altas tensões de solidificação não são localizadas na ZAC parcialmente fundida do ferro fundido durante a solidificação, e subseqüentemente tensões de solidificação são reduzidas.

Quando a composição ENiFeMn-Cl é usada, a necessidade de pré-aquecimento é eliminada ou diminuída. Este é um ponto controverso entre os metalúrgicos. Por exemplo, ferro fundido dúctil não ligado (Fe-C-Si), quando soldado, é pré-aquecido a 427°C para prevenir a formação de martensita. Este pré-aquecimento aumenta a quantidade de cementita (Fe_3C) que se forma na ZAC. A fase cementita pode ser mais prejudicial do que a martensita para as propriedades mecânicas. Ferro fundido de matriz ferrítica soldado sem pré-aquecimento previne o desenvolvimento de uma banda contínua de carbonetos na ZAC do ferro fundido mais resulta na formação da martensita (AWS, 1998).

3.3.4.7 GÁS DE PROTEÇÃO

É freqüentemente considerado que a função primária do gás de proteção é evitar a contaminação da poça de fusão pelo ar atmosférico, mas ele é uma

variável importante na operação de soldagem a arco e desempenha diversas outras funções. O gás ou mistura de gases afetam, por exemplo, as características de ionização e formação do arco elétrico, o modo de transferência metálica do metal de adição, a estabilidade do arco, as propriedades do metal depositado, o volume de fumos e respingos, a geometria e o aspecto superficial do cordão, a penetração e a velocidade de soldagem (HILTON; NORRISH, 1988; TUSEK; SUBAN, 2001).

Os processos de soldagem a arco com proteção gasosa podem utilizar gases de proteção com diferentes composições químicas, em função do metal de base que será soldado, do tipo de transferência metálica desejado, do diâmetro e do tipo de eletrodo e da posição de soldagem. Porém, para diminuir o valor agregado de uma solda, é importante levar em consideração a escolha da mistura a ser utilizada, bem como a relação custo e benefício. Existe atualmente, no mercado internacional e brasileiro, uma grande variedade de gases de proteção para a soldagem de aços. Estes podem ser aplicados puros, como nos casos do argônio e do dióxido de carbono, ou mais comumente em forma de misturas. Segundo Hilton e Norrish (1988), em geral 1 a 2% de oxigênio ou 2 a 4% de CO₂ são adicionados ao argônio para melhorar a estabilidade do arco e reduzir a formação de respingos na soldagem MIG. Estes gases promovem constantemente a reconstituição da camada de óxido, facilitando assim a emissão de elétrons, diminuem a tensão superficial, facilitando a transferência metálica.

4 EQUIPAMENTOS, MATERIAIS E PROCEDIMENTOS

4.1 EQUIPAMENTOS

Os testes foram realizados na célula automática de soldagem de mancais existente na empresa abordada, conforme figura 18.

Figura 18: Célula de soldagem do mancal.

Fonte: Tecumseh do Brasil LTDA.

A célula de soldagem automática de mancais é composta por:

- I) 01 Robô com seis eixos, marca ABB, com garra mecânica utilizando cilindro pneumático – marca SMC (código comercial CP95SDB50-60) acoplado em seu punho.
- II) 03 fontes de soldagem, marca CLOOS, modelo Quinto 503 (uma fonte para cada tocha).
- III) 01 dispositivo de soldagem composto por 03 tochas de soldagem, marca Oximig, com 540 mm de comprimento sem refrigeração (tocha desenvolvida para a empresa) com sistemas independentes de tração do arame.

Na célula, o robô realiza a manipulação dos compressores da linha de montagem para o dispositivo de soldagem, e após a soldagem, retorna o compressor para a linha. O processo de soldagem consiste de dois disparos distintos e simultâneos. O primeiro com duração de 1.5s e o segundo, com duração de 0.5s. Entre os disparos há um intervalo de 2s. Utilizam-se fontes de soldagem, marca CLOOS, modelo Quinto 503, com capacidade de 500 A / 39 V a 100% de ciclo de trabalho e velocidade de alimentação de arame de até 30m/min.

4.2 MATERIAIS

A tabela 2 usada pelo fabricante de compressores descreve o material com o qual foram calandradas e soldadas longitudinalmente as carcaças usadas no estudo. O termo apresentado na coluna *Especificação* se refere ao código do fornecedor da chapa.

Tabela 2 – Especificação e composição química da chapa da carcaça

Código	Especificação	Espessura	Tolerância	
150-10016	SAE1020	3.10mm	+/- 0.1	
Composição química (% máx. Peso)				
Especificação	C	Mn	P	S
Usiminas SAE1020	0.23	0.60	0.030	0.050

Fonte: Tecumseh do Brasil LTDA.

A figura 19 apresenta as dimensões típicas de uma carcaça de compressor hermético, aplicadas em sistemas de ar condicionado.

Figura 19: Dimensões típicas de um compressor para utilização em aparelhos de ar condicionado (Em amarelo, na vista em 3D, observa-se o mancal de ferro fundido cinzento).

A figura 20 apresenta o *design* do mancal de ferro fundido cinzento que é soldado a carcaça de aço de baixo carbono.

Figura 20: Design do mancal de ferro fundido cinzento.

O mancal de ferro fundido deve estar livre de carepas, coquilhamento, rechupe, juntas frias e outros defeitos que sejam prejudiciais à usinagem ou às funções dos fundidos.

A microestrutura deve ser constituída de:

Um mínimo de 80% da matriz deverá ser perlítica.

Um mínimo de 80% dos veios de grafita deverá ser do tipo A.

Um máximo de 10% dos veios de grafita deverá ser do tipo C.

A dureza deve estar entre 170-241HB medida utilizando-se uma carga de 3000 kg com um penetrador de esfera de 10 mm. A mesma deve ser verificada após a remoção da camada ferrítica de modo a representar o material em si.

A composição do mancal é pode ser visualizada na tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do mancal de ferro fundido cinzento

%C	%Mn	%Si	%P	%S
3.1	0.6	2.2	0.2	0.08

Fonte: Tecumseh do Brasil LTDA

No trabalho comparativo foram utilizados os arames ANSI/AWS A5.15 ERNiFeMn-CI, ANSI/AWS A5.18 ER70S-6 e ANSI/AWS A5.18 E70C-6M, todos com diâmetro de 1.6mm.

O arame ER70S-6 é o arame utilizado na unidade do Brasil e o arame E70C-6M é o arame utilizado atualmente pela unidade da França. As literaturas sobre soldagem de ferro fundido não citam a utilização dos arames ER70S-6 e E70C-6M para tal. Os mesmos são utilizados, em virtude do baixo custo.

A composição química dos arames fornecida pelos fabricantes é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 – Composição química dos arames consumíveis

Tipo arame	%C	%Mn	%Si	%Ni	%Fe	%P	%S	%Cu
ER70S-6	0.15	1.85	1,15	—	—	0.025	0.035	0.50
E70C-6M	0.12	1.75	0,90	—	—	0.03	0.03	0.50
ERNiFeMn-CI	0.10	0.60	0.10	60	Bal.	0.010	0.010	—

Fonte: ER70S-6 e E70C-6M fornecedor KISWELL – ERNiFeMn-CI fornecedor Weld-inox

Como gás protetivo, foi utilizado a mistura C8 (92%Ar + 8%CO₂) com vazão de 18 l / min. em cada tocha.

Com relação aos parâmetros de soldagem (tabelas 05, 06 e 07), os mesmos foram definidos por meio de testes considerando como critério de aceitação o não aparecimento de defeitos como falhas ou excesso de respingos, além da aprovação do teste de resistência de solda. Abaixo temos os parâmetros utilizados na soldagem utilizando os diferentes arames. Entre os disparos há um intervalo de 2s.

Tabela 5 – Parâmetros de soldagem arame ERNiFeMn-CI

Parâmetros	1º Disparo	2º Disparo
Duração disparo	1.4s	0.5s
Alimentação de arame	8.0 m/min.	8.0 m/min.
Frequência	220 Hz	220 Hz
Voltagem	36 V	36 V
Tempo pulso	2.20ms	2.20ms
Corrente base	60A	60A
Gás de proteção	C8	C8
Vazão gás de proteção	18 l/min.	18 l/min.
Pré-gás	0.5s	0
Pós-gás	0	0.5s
Stick-out	16mm	NA
Ângulo tocha	0°	0°

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem arame E70C-6M

Parâmetros	1º Disparo	2º Disparo
Duração disparo	1.4s	0.5s
Alimentação de arame	7.0 m/min.	7.0 m/min.
Frequência	200 Hz	200 Hz
Voltagem	35V	35V
Tempo pulso	2.20ms	2.20ms
Corrente base	60A	60A
Gás de proteção	C8	C8
Vazão gás de proteção	18 l/min.	18 l/min.
Pré-gás	0.5s	0
Pós-gás	0	0.5s
Stick-out	16mm	NA
Ângulo tocha	0°	0°

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem arame ER70S-6

Parâmetros	1º Disparo	2º Disparo
Duração disparo	1.4s	0.5s
Alimentação de arame	7.0 m/min.	7.0 m/min.
Frequência	200 Hz	200 Hz
Voltagem	35V	35V
Tempo pulso	2.20ms	2.20ms
Corrente base	60A	60A
Gás de proteção	C8	C8
Vazão gás de proteção	18 l/min.	18 l/min.
Pré-gás	0.5s	0
Pós-gás	0	0.5s
Stick-out	16mm	NA
Ângulo tocha	0°	0°

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A síntese dos ensaios é mostrada na tabela 8.

Tabela 8 – Síntese dos ensaios

ENSAIO	TIPO	OBJETIVO
Soldagem do mancal utilizando os arames: ER70S-6 E70C-6M ERNiFeMn-CI	Célula automática.	Avaliar a qualidade dos resultados obtidos.
Análise da área fundida.	Micrografia da solda.	Avaliar penetração, zona fundida e ZAC.
Análise de índices qualitativos.	Teste com Hélio e sniffer e testes funcionais.	Avaliar hermeticidade, entreferro e ruído stall.
Ensaio de resistência mecânica.	Norma interna.	Avaliar resistência da soldagem realizada.

Conjuntos (carcaça e mancal) foram soldados utilizando os diferentes arames para análise quanto à resistência da solda utilizando prensa hidráulica CARLSONS (área do cilindro com 21,2cm²).

Corpos de prova foram extraídos de juntas para análise metalográfica com auxílio de disco de corte.

Compressores completos foram soldados para avaliação quanto ao entreferro, hermeticidade e ruído *stall*. No teste inicial comparativo, foram soldados vinte (20) compressores com cada arame, sessenta (60) no total, em virtude da pouca quantidade disponível do arame ERNiFeMn-CI.

4.3.1 METALOGRAFIA E MICRO DUREZA

Três corpos de prova referentes à deposição com diferentes arames, foram cortados no sentido transversal do cordão de solda e embutidos a quente para análise da macroestrutura e microestrutura. Posteriormente, utilizando as mesmas amostras, foi realizada análise de micro dureza Vickers. Os ensaios foram realizados no departamento de Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo – Campus São Carlos.

Figura 21: Corpo de prova embutido a quente para análise metalografica.

4.3.2 MACROGRAFIA

Para a macrografia os corpos de prova foram lixados obedecendo a seguinte ordem de granulometria das lixas: 120, 220, 320 e 400 mesh. Depois de terminada esta etapa, as amostras foram atacadas com Nital 1% durante 4 segundos. Uma solução de 50% ácido nítrico e 50% ácido acético foi utilizado para revelar a solda do arame ERNiFeMn-Cl. O objetivo desta análise foi realizar uma inspeção visual a fim de verificar a penetração e a zona termicamente afetada nas amostras.

4.3.3 MICROGRAFIA

Terminada a macrografia continuou-se lixando as amostras com as lixas de 600 e 1200 mesh e na sequência realizou-se o polimento em feltro com pasta de diamante de quatro (4) mícrons e um (1) micron de granulometria. As superfícies então foram atacadas com Nital 1% durante 02 segundos para análise da área do mancal de ferro fundido, durante 04 segundos para análise da área da solda e da carcaça. A região da solda do arame ERNiFeMn-CI foi atacada com uma solução de 50% ácido nítrico + 50% ácido acético, durante 15 segundos.

Depois de atacadas, as amostras foram analisadas através de um microscópio óptico com intuito de identificar a microestrutura dos metais base, ZTA, ZPD e do metal de adição.

4.3.4 PERFIL DE MICRO DUREZA

A partir das amostras polidas usadas na macrografia e micrografia foram realizados os perfis de micro dureza Vickers. Foi realizada uma linha de perfil horizontal passando pela carcaça, ZAC e ZPD e carcaça novamente (buscou-se percorrer a região de interface da solda com o mancal). Outras duas linhas foram feitas no sentido vertical passando pelo mancal, ZAC, ZPD e metal de adição. As linhas podem ser visualizadas na figura 22. O equipamento utilizado foi um micro durômetro LEIKA VMHT MOT (figura 23). Uma carga de 200g foi aplicada sobre a superfície durante 15 segundos e com distância entre pontos de 0.05 – 0.20 mm.

Figura 22: Desenho esquemático das linhas percorridas para elaboração dos perfis de micro dureza.

Figura 23: Micro durômetro Leica VMHT Mot utilizada para medição dos perfis de micro dureza.

4.3.5 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA SOLDADA

O ensaio quanto à resistência da soldagem foi realizada no setor de montagem de compressores rotativos na empresa abordada no trabalho. Este ensaio visou verificar a resistência de cada arame no processo de soldagem do mancal.

Os ensaios foram conduzidos em um ambiente com temperatura de 22°C. Foi utilizado para tal, prensa hidráulica CARLSONS, onde o conjunto soldado (carcaça e mancal), deve ser posicionado de tal forma que ele fique centralizado no cilindro hidráulico (figura 24).

O mancal precisa suportar a força de 90 kgf. / cm² durante sessenta (60) segundos. Se a pressão cair antes de alcançar os 90 kgf. / cm² ou antes dos sessenta (60) segundos estourar, a solda falhou. Após a solda resistir a 90 kgf. / cm² por sessenta (60) segundos, aumenta-se a pressão até o mancal quebrar as três (3) soldas da carcaça.

Figura 24: Prensa hidráulica de ensaio quanto à resistência da soldagem: I) Vista geral do equipamento; II) e III) Conjunto centralizado no equipamento de tal forma que a força seja realizada sobre os pontos de soldagem.

Os pedaços de solda são utilizados para visualmente se avaliar a questão penetração. As figuras 25 e 26 ilustram as duas condições de solda, com penetração aceitável e sem penetração.

Figura 25: Mancal com penetração aceitável.

Figura 26: Mancal sem penetração.

4.3.6 ENSAIO DE HERMETICIDADE

Um dos requisitos da soldagem do mancal é garantir a estanqueidade adequada, ou seja, a vedação deve garantir a permanência do fluido refrigerante

ao longo de toda a vida útil do compressor, sob pena de este sofrer queda de eficiência ou deixar de funcionar.

As normas de fabricação estabelecem que a perda de gás deva ser inferior a meia grama anuais. Desta forma, o compressor precisa ser hermético durante toda sua vida útil, prevista de dez a quinze anos. Portanto, todos os compressores são testados quanto à sua hermeticidade.

O compressor em estudo é testado quanto a vazamentos utilizando gás Hélio e um *sniffer* no interior de uma câmara de vácuo.

Uma carga de 05 Bar de gás Hélio é aplicada no compressor e automaticamente o mesmo adentra em uma câmara para a realização do teste (figura 27). Vácuo é realizado na câmara e caso seja detectado a presença de Hélio por um sniffer em seu interior, o compressor é rejeitado.

Figura 27: I) Carga de 05 Bar de Hélio aplicada manualmente no compressor; II) Compressor no interior da câmara de ensaio sendo testado quanto a sua hermeticidade.

4.3.7 ENSAIO QUANTO AO ENTREFERRO DO MOTOR

Após a soldagem do mancal não se pode observar perda no entreferro no motor (O entreferro é a folga existente entre o rotor e o estator). Para impedir distorções durante a soldagem, o compressor é soldado com um dispositivo, chamado internamente de “caneca”, com espessura de 0.40mm, posicionada entre o subconjunto rotor e estator (figura 28). A “caneca” deve passar por todo o comprimento do rotor. Depois que o conjunto interno é soldado à carcaça, a caneca é retirada e o entreferro é verificado com o auxílio de um calibrador de lâminas.

O calibrador de lâmina com espessura de 0.38mm deve ser inserido entre o diâmetro externo do rotor e o diâmetro interno do estator. O calibrador de lâminas deve passar livremente, sem força excessiva, radialmente, pelo entreferro, em arco de 360° (figura 29).

Figura 28: I) “Caneca” que é inserida entre o subconjunto rotor e estator; II) “Caneca” inserida entre o subconjunto rotor e estator.

Figura 29: I) Calibrador de lâmina utilizado para verificar o entreferro entre o rotor e o estator; II) Entreferro sendo verificado.

4.3.8 ENSAIO QUANTO AO RUÍDO *STALL*

O ensaio de *stall* consiste em pressurizar o compressor com 76 x 175psig (pressões de sucção e descarga, respectivamente), e aplicar a tensão nominal na bobina de marcha e auxiliar por um período de um (1) a três (3) segundos. O compressor será rejeitado se houver emissão de ruído. Caso o conjunto interno não esteja soldado / posicionado corretamente, durante a energização do compressor, o rotor em contato com o estator gera o ruído. A figura 30 mostra o compressor sendo testado quanto ao ruído *stall*.

Figura 30: Compressor sendo testado quanto ao ruído *stall*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 MACROGRAFIA

As macrografias das figuras 31 (utilizando o arame ER70S-6) e figura 32 (utilizando o arame E70C-6M), mostram penetração parcial na carcaça e mancal.

Na amostra soldada com o arame ER70S-6 (sólido) verifica-se uma penetração maior no mancal do tipo dediforme.

É possível constatar em ambos os casos a formação de duas ZTA's, uma de granulometria fina e outra grosseira junto à carcaça e de uma larga zona parcialmente diluída (ZPD) bem como uma ZTA próxima ao mancal. Para ambos os arames de baixa liga verifica-se o crescimento de trincas térmicas ao longo da ZPD devido à formação de fases frágeis nessa região.

Figura 31: Penetração tipo dediforme no mancal na amostra soldada utilizando o arame ER70S-6.

Figura 32: Penetração parcial e as diversas regiões na carcaça e mancal utilizando o arame E70C-6M.

A macrografia da figura 33, mostra a solda realizada utilizando o arame ERNiFeMn-CI.

Observa-se que a penetração na carcaça e no mancal é maior em relação aos arames de baixa liga. A baixa condutividade elétrica e térmica deste eletrodo propicia uma concentração maior do calor na poça de fusão, tornando a temperatura de pico mais elevada e o resfriamento mais lento. Isso favorece uma fusão mais ampla da interface com o mancal de ferro fundido. No entanto, não ocorre a formação de uma zona parcialmente diluída com fases frágeis no mancal para o arame ERNiFeMn-CI.

Além disto, verifica-se que a ZTA na carcaça se torna mais estreita para este arame em comparação com os arames ER70S-6 e E70C-6M.

Observa-se ainda a presença de poros próxima à interface e no centro do metal de adição. Considerando que a velocidade de alimentação do arame foi praticamente à mesma para os três metais de adição, a temperatura de

soldagem mais elevada do arame ERNiFeMn-CI aumenta a fluidez na poça de fusão, tornando a deposição do metal fundido mais turbulenta, favorecendo assim o aprisionamento de gás e a formação de poros.

Figura 33: Penetração parcial e as diversas zonas na carcaça e mancal utilizando o arame ERNiFeMn-CI.

5.2 MICROGRAFIA

As figuras 34 a 40, apresentam as micrografias referente às juntas soldadas produzidas com os diferentes arames.

5.2.1 ARAME ERNiFeMn-CI

A figura 34 mostra a interface entre a solda com o arame ERNiFeMn-CI e o mancal.

A microestrutura se caracteriza por três regiões distintas: o metal de base do mancal na região I, a zona termicamente afetada do mancal na região II e a zona parcialmente diluída junto ao ponto de solda na posição III.

Na posição I, correspondente ao metal de base do mancal, observa-se os veios de grafite tipo A de um ferro fundido cinzento e sua matriz predominantemente perlítica.

Na ZTA do mancal, situada na posição II, não crescem camadas contendo martensita e/ou ledeburita. Ocorre apenas a decomposição de algumas colônias perlíticas em ferrita e lamelas mais grossas de grafite.

Na posição III, observa-se que a ZPD desenvolve uma matriz austenítica favorecida pelo alto teor de Ni e C, contendo a precipitação de glóbulos finos de grafite. O interior do metal de solda é completamente austenítico, conforme mostra a figura 35.

Figura 34: Microestrutura da solda com o arame ERNiFeMn-Cl: a) vista geral da interface do mancal com a solda; b-c) região do mancal de ferro fundido; d-e) zona termicamente afetada do mancal; f-g) zona de fusão do arame ERNiFeMn-Cl. Micrografias: a-e) ataque com Nital 1% e micrografias: f-g) ataque com 50% ácido nítrico e 50% ácido acético.

Figura 35: Metal de solda produzido com o arame ERNiFeMn-CI.

Ataque ácido nítrico 50% e ácido acético 50%.

A figura 36 apresenta a interface do aço SAE 1020 da carcaça com o metal de solda do arame ERNiFeMn-CI.

Na posição I, corresponde à ZTA de granulometria fina, observa-se uma austenitização parcial. Nesta região são formados grãos equiaxiais de ferrita, além de perlita fina próximo aos contornos de grão. Não se observa na região a formação de constituintes duros, como bainita ou martensita.

Na posição II, observa-se a ZTA de granulometria grosseira, que sofre austenitização completa em virtude da temperatura elevada durante o ciclo térmico de soldagem. Nesta região, crescem no resfriamento, a partir dos grãos grosseiros de austenita, ferritas alotriomórfica e do tipo Widmannstaetten junto aos contornos de grão, além de bainita, ferrita acicular fina e pequenos glóbulos de cementita no interior dos grãos.

Figura 36: Microestrutura da interface da carcaça e solda: a) vista geral da interface da carcaça com a solda; b-c) região da ZTA de granulometria fina; d-e) região da ZTA de granulometria grossa. Micrografias: a-e) ataque com Nital 1%.

5.2.2 ARAME E70C-6M

A figura 37 mostra a interface entre o mancal e a solda produzida com o arame tubular E70C-6M.

Observa-se na posição I da figura 37, a microestrutura do ferro fundido cinzento, contendo os veios de grafite do tipo A e a matriz perlítica.

Na posição II da figura 37, partindo do mancal em direção ao metal de solda, observa-se primeiramente a formação de uma zona parcialmente fundida com microestrutura complexa, onde o metal de base é aquecido acima da temperatura eutética, assim, a matriz é inicialmente austenitizada e em seguida fundida, próximo às lamelas de grafite durante a deposição do metal de solda. No resfriamento, a fase líquida formada se solidifica como ferro fundido branco, contendo ledeburita, enquanto a austenita enriquecida em carbono se transforma em martensita. Saindo da zona parcialmente fundida, ocorre uma zona estreita e contínua de cementita, resultante ainda da rápida solidificação da fase líquida na forma de ferro fundido branco. Após a camada branca de carbonetos e próximo ao metal de solda, observa-se a formação da ZPD do metal de solda com microestrutura martensítica. Esta região resulta do resfriamento acelerado de uma austenita enriquecida em carbono devido à diluição do arame com o mancal de ferro fundido, que causa a formação de martensita.

A posição III da figura 37 mostra a microestrutura do metal de solda E70C-6M, que se caracteriza pela formação de ferritas alotriomórfica e do tipo Widmannstaetten junto aos contornos de grão, enquanto ferrita acicular fina e glóbulos de cementita crescem no interior dos grãos.

Figura 37: Microestrutura da solda com o arame E70C-6M: a) vista geral da interface do mancal com a solda; b-c) região do mancal de ferro fundido; d-e) zona termicamente afetada do mancal; f-g) zona de fusão do arame E70C-6M. Micrografias: a-g) ataque com Nital 1%.

A figura 38 apresenta a interface da carcaça de aço SAE 1020 com o metal de solda E70C-6M.

Na posição I da figura 38, observa-se a microestrutura do metal de base contendo ferrita fina com perlita nos contornos de grão.

Na posição II da figura 38, ocorre a ZTA da carcaça com granulometria grosseira, que apresenta a formação de ferritas alotriomórfica e acicular, além de bainita. Entre o metal de base e a ZTA grosseira, verifica-se ainda a formação de uma ZTA de granulometria fina e microestrutura predominantemente ferrítica, resultante de uma austenitização parcial na região intercrítica.

Figura 38: Microestrutura da interface da carcaça e solda: a) vista geral da interface carcaça e solda; b-c) região da ZTA de granulometria fina; d-e) região da ZTA de granulometria grosseira. Micrografias: a-e) ataque com Nital 1%.

5.2.3 ARAME ER70S-6

A figura 39 mostra a interface do metal de solda ER70S-6 com o mancal.

O gradiente microestrutural nesta interface é similar ao caso da soldagem com o arame tubular E70C-6M.

Na posição I da figura 39, observam-se os veios de grafite tipo A do ferro fundido cinzento com sua matriz predominante perlítica.

Nas posições II e III da figura 39, verifica-se a formação da zona parcialmente fundida próximo ao ferro fundido, onde a fase líquida se solidifica como um ferro fundido branco formando ledeburita, enquanto as regiões austenitizadas formam martensita no resfriamento. Entre a zona parcialmente fundida do mancal e a ZPD do metal de solda, observa-se novamente a formação de uma camada branca contínua de cementita. A ZPD do metal de solda também forma uma microestrutura puramente martensítica devido ao resfriamento acelerado de uma austenita rica em carbono, produzida pela diluição do arame com o ferro fundido cinzento.

O metal de solda, posição IV da figura 39, desenvolve uma microestrutura polifásica contendo ferritas alotriomórfica e acicular, cementita fina e bainita.

Figura 39: Microestrutura da solda com o arame ER70S-6: a) vista geral da interface do mancal com a solda; b-c) região do mancal de ferro fundido; d-e-f-g) zona termicamente afetada do mancal; h-g) zona de fusão do arame ER70S-6. Micrografias: a-g) ataque com Nital 1%.

A figura 40 mostra a interface da carcaça com o metal de solda ER70S-6.

Na posição I da figura 40, observa-se a microestrutura da ZTA de granulometria refinada na carcaça com a presença de ferrita poligonal e uma pequena fração de perlita fina nos contornos de grão.

A ZTA com grãos mais grosseiros está apresentada na posição II da figura 40. Nesta região crescem a partir dos grãos de austenita ferritas alotriomórfica e acicular, além de bainita no interior dos grãos.

Figura 40: Microestrutura da interface da carcaça e solda: a) vista geral da interface da carcaça com a solda; b-c) região da ZTA de granulometria fina; d-e) região ZTA de granulometria grosseira. Micrografias: a-e) ataque com Nital 1%.

5.3 PERFIS DE MICRO DUREZA

Os resultados obtidos nos perfis de micro dureza das juntas soldadas com o arame ERNiFeMn-CI podem ser vistos na figura 41, os resultados do arame E70C-6M podem ser vistos na figura 42, e os resultados do arame ER70S-6 podem ser vistos na figura 43.

Observa-se na figura 41, uma pequena variação na dureza entre o mancal e o material de adição, característica desejada em processos de soldagem.

Figura 41: Perfis de micro dureza da amostra soldada com o arame ERNiFeMn-CI.

Observa-se na figura 42, nos gráficos das linhas verticais, que a dureza do material de adição E70C-6M é um superior ao metal de base. Observa-se também na linha horizontal e nas linhas verticais um aumento considerável da dureza na zona parcialmente fundida (ZPF) com largura média de 0.40mm. Esse aumento de dureza ocorre devido à formação de constituintes duros, como ledeburita e martensita na região.

Figura 42: Perfis de micro dureza da amostra soldada com o arame E70C-6M.

Observa-se na figura 43, nas linhas verticais, que o metal de adição ER70S-6 possui dureza um pouco superior em relação ao mancal. Na linha horizontal e nas linhas verticais, observam-se os mesmos picos de dureza provenientes das microestruturas duras formadas na ZPD, da mesma forma que na soldagem com o arame tubular E70C-6M. No entanto, a largura média desta região cresce para o arame sólido e atinge mais de 1.0mm.

Figura 43: Perfis de micro dureza da amostra soldada com o arame ER70S-6.

5.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA DA SOLDA

Todas as juntas soldadas resistiram o período de 60s sob a aplicação de 90 kgf/cm², conforme especifica o procedimento interno de qualificação. No entanto, a pressão para o arrancamento do mancal foi máxima para a soldagem com o arame ERNiFeMn-CI, intermediária para o arame tubular E70C-6M e mínima para o arame sólido ER70S-6, conforme mostra a figura 44.

Figura 44: Pressão de arrancamento dos diferentes arames.

Os resultados obtidos na análise da resistência das juntas soldadas com os arames ERNiFeMn-CI, E70C-6M e ER70S-6, podem ser vistos respectivamente nas figuras 45, 46 e 47.

Figura 45: Resistência da soldagem utilizando o arame ERNiFeMn-CI.

Figura 46: Resistência da soldagem utilizando o arame E70C-6M.

Figura 47: Resistência da soldagem utilizando o arame ER70S-6.

5.5 ENSAIO QUANTO AO ENTREFERRO DO MOTOR

Sessenta (60) compressores foram soldados, vinte com cada arame, e na tabela 9, são apresentados os resultados da verificação quanto ao entreferro.

Tabela 9: Resultados da análise de entreferro

PEÇA	ERNiFeMn-CI	E70C-6M	ER70S-6
01	OK	OK	OK
02	OK	NOK	OK
03	OK	OK	OK
04	OK	OK	OK
05	OK	OK	OK
06	OK	OK	OK
07	OK	OK	OK
08	OK	OK	OK
09	OK	OK	OK
10	OK	OK	OK
11	OK	OK	OK
12	OK	OK	OK
13	OK	OK	OK
14	OK	OK	OK
15	OK	OK	OK
16	OK	OK	OK
17	OK	OK	OK
18	OK	OK	NOK
19	OK	OK	OK
20	OK	OK	NOK

Nos compressores soldados utilizando o arame E70C-6M, observou-se a perda do entreferro entre as soldas número um (1) e número dois (2) no compressor número dois (2).

Nos soldados utilizando o arame ER70S-6, observou-se a perda do entreferro entre as soldas número um (1) e número dois (2) nos compressores número dezoito (18) e número vinte (20).

Nos soldados utilizando o arame ERNiFeMn-CI não se evidenciou compressores com perda no entreferro.

A figura 48 apresenta os locais dos pontos de solda nº01, 02 e 03.

Figura 48: Mancal indicando a posição e o número da soldagem realizada.

5.6 ENSAIO QUANTO A HERMETICIDADE

Os mesmos sessenta (60) compressores soldados foram submetidos ao teste hermético.

Na tabela 10 observam-se os resultados obtidos e na tabela 11 a taxa de vazamento identificada (Vazamentos inferiores a 1.8×10^{-5} mbar l / s são permissíveis (0.5 gramas / ano)).

Tabela 10: Resultados da análise quanto à hermeticidade dos compressores

PEÇA	ERNiFeMn-CI	E70C-6M	ER70S-6
01	OK	OK	OK
02	OK	OK	OK
03	OK	OK	OK
04	OK	OK	OK
05	OK	OK	OK
06	OK	OK	OK
07	OK	OK	OK
08	OK	OK	NOK (Solda nº 1)
09	OK	OK	OK
10	OK	OK	OK
11	OK	OK	OK
12	OK	OK	OK
13	OK	OK	OK
14	OK	OK	OK
15	OK	OK	OK
16	OK	OK	OK
17	OK	OK	OK
18	OK	OK	OK
19	OK	OK	OK
20	OK	OK	OK

Tabela 11: Taxa de vazamento identificada nos compressores

PEÇA	ERNiFeMn-CI	E70C-6M	ER70S-6
01	5.5×10^{-6} mbar l / s	7.9×10^{-6} mbar l / s	9.2×10^{-6} mbar l / s
02	9.3×10^{-6} mbar l / s	1.5×10^{-5} mbar l / s	1.5×10^{-5} mbar l / s
03	6.2×10^{-6} mbar l / s	6.4×10^{-6} mbar l / s	8.4×10^{-6} mbar l / s
04	5.1×10^{-6} mbar l / s	8.1×10^{-6} mbar l / s	8.2×10^{-6} mbar l / s
05	5.5×10^{-6} mbar l / s	6.5×10^{-6} mbar l / s	9.2×10^{-6} mbar l / s
06	5.9×10^{-6} mbar l / s	1.1×10^{-5} mbar l / s	7.6×10^{-6} mbar l / s
07	7.5×10^{-6} mbar l / s	7.8×10^{-6} mbar l / s	8.9×10^{-6} mbar l / s
08	8.2×10^{-6} mbar l / s	7.1×10^{-6} mbar l / s	2.7×10^{-4} mbar l / s*
09	8.9×10^{-6} mbar l / s	9.5×10^{-6} mbar l / s	1.3×10^{-5} mbar l / s
10	9.3×10^{-6} mbar l / s	9.2×10^{-6} mbar l / s	9.8×10^{-6} mbar l / s
11	5.3×10^{-6} mbar l / s	1.3×10^{-5} mbar l / s	1.4×10^{-5} mbar l / s
12	5.7×10^{-6} mbar l / s	1.1×10^{-5} mbar l / s	1.7×10^{-5} mbar l / s
13	4.8×10^{-6} mbar l / s	8.5×10^{-6} mbar l / s	0.8×10^{-5} mbar l / s
14	9.5×10^{-6} mbar l / s	8.9×10^{-6} mbar l / s	1.1×10^{-5} mbar l / s
15	7.3×10^{-6} mbar l / s	8.3×10^{-6} mbar l / s	9.2×10^{-6} mbar l / s
16	5.8×10^{-6} mbar l / s	6.9×10^{-6} mbar l / s	9.5×10^{-6} mbar l / s
17	8.2×10^{-6} mbar l / s	8.1×10^{-6} mbar l / s	8.8×10^{-6} mbar l / s
18	7.9×10^{-6} mbar l / s	6.1×10^{-6} mbar l / s	9.2×10^{-6} mbar l / s
19	5.5×10^{-6} mbar l / s	7.2×10^{-6} mbar l / s	7.8×10^{-6} mbar l / s
<u>20</u>	<u>6.6×10^{-6} mbar l / s</u>	<u>9.2×10^{-6} mbar l / s</u>	<u>9.1×10^{-6} mbar l / s</u>
Média	6.9×10^{-6} mbar l / s	9.5×10^{-6} mbar l / s	0.6×10^{-5} mbar l / s

* Valor desconsiderado para efeito da taxa de vazamento média.

No teste hermético foram identificados vazamentos na solda número 01, do compressor número 08, soldado com o arame ER70S-6, conforme mostrado na figura 49.

Figura 49: Vazamento identificado no centro da solda.

Um corpo de prova foi retirado da região apresentando o vazamento no sentido transversal ao cordão, e foi embutido a quente para realização da análise metalográfica. Na figura 50, é possível observar a presença de uma trinca ao longo da interface do mancal com a carcaça e a mesma propagando próximo ao centro do ponto de solda. A região passante da trinca provavelmente foi eliminada durante o corte para a preparação do corpo de prova.

Observa-se ainda falta de material e penetração na parte inferior da carcaça, podendo resultar na perda de sustentação da poça, alterando assim o seu perfil. Esse perfil côncavo pode ter contribuído para a formação da trinca.

Figura 50: Trinca ao longo da interface do mancal com o ponto de solda: I) Região da interface; II) Região da trinca passante.

Ataque Nital 1%.

Nos compressores soldados com os arames ERNiFeMn-Cl e E70C-6M não foram detectados vazamentos.

5.7 ENSAIO QUANTO AO RUÍDO *STALL*

Os sessenta (60) compressores soldados, foram submetidos ao teste de ruído *stall*. A tabela 12 apresenta os resultados.

Tabela 12: Resultados do ruído *stall*

PEÇA	ERNiFeMn-CI	E70C-6M	ER70S-6
01	OK	OK	OK
02	OK	NOK	OK
03	OK	OK	OK
04	OK	OK	OK
05	OK	OK	OK
06	OK	OK	OK
07	OK	OK	OK
08	OK	OK	NOK
09	OK	OK	OK
10	OK	OK	OK
11	OK	OK	OK
12	OK	OK	OK
13	OK	OK	OK
14	OK	OK	OK
15	OK	OK	OK
16	OK	OK	OK
17	OK	OK	OK
18	OK	OK	NOK
19	OK	OK	OK
20	OK	OK	NOK

Nos compressores soldados com o arame E70C-6M, foi observado o defeito *stall* no compressor número 2 (dois). Em análise de entreferro realizada anteriormente, a perda de entreferro já tinha sido identificada neste compressor.

Nos compressores soldados utilizando o arame ER70S-6, observou-se o defeito *stall* nos compressores oito (8), dezoito (18) e vinte (20).

No compressor número oito (8), foram identificados vazamentos na solda número 01, e conforme análise realizada em corpo de prova retirado da região foi observado que o mancal estava praticamente solto da carcaça, o que explica o defeito.

Nos compressores dezoito (18) e vinte (20), em análise de entreferro realizada anteriormente, já se tinha observado a perda de entreferro nestes compressores.

Nos compressores soldados com o arame ERNiFeMn-CI não foram observados o defeito *stall*.

5.8 DISCUSSÃO

Os resultados para as amostragens utilizadas mostraram que o arame ERNiFeMn-CI é o mais indicado para a soldagem do mancal de compressores rotativos. Foram obtidas juntas com propriedades próximas as do mancal além de adequadas para o serviço pretendido. Em sua microestrutura não foram evidenciados a formação de camadas de ledeburita e martensita, o que explica os melhores resultados obtidos no teste de resistência da solda, suportando pressão acima de 100 kgf/cm^2 , algo próximo a 12% superior a resistência do arame utilizado atualmente. Os índices de perfil de entreferro e taxa de vazamento também diminuíram. Estes defeitos são potenciais causas para o defeito stall.

Na soldagem utilizando o arame E70C-6M observou-se na microestrutura a formação de camadas de ledeburita e martensita, porém com comprimento médio de 0.4mm, inferior ao observado nos compressores que utilizaram o arame ER70S-6. A solda suportou a pressão de 95 kgf/cm^2 , algo próximo a 4% superior ao arame utilizado atualmente. Os índices de entreferro e taxas de vazamentos tiveram melhora significativa.

Na soldagem utilizando o arame ER70S-6 os piores resultados foram observados. Na análise da microestrutura observou-se a formação de camadas de ledeburita e martensita com comprimento médio de 1.0mm. O teste de resistência suportou a menor pressão, 92 kgf/cm^2 . Os índices de perfil de entreferro e taxa de vazamento também apresentaram resultados inferiores.

Após os dados obtidos, um levantamento de custo dos arames foi realizado junto aos fornecedores.

Constatou-se que o custo do arame ERNiFeMn-CI é aproximadamente 44 vezes superior ao custo dos arames E70C-6M e ER70S-6 devido ao alto teor de Níquel, tornando-o inviável mesmo com os ganhos observados.

O custo do arame E70C-6M é 1,3 vezes superior ao arame ER70S-6.

Visto os melhores resultados obtidos com o arame E70C-6M e a pequena diferença no custo em relação ao arame ER70S-6, uma nova soldagem comparativa foi realizada para comprovar os melhores resultados do arame E70C-6M em relação ao arame ER70S-6, porém em uma amostragem maior,

utilizando 375 kg de cada arame (produção aproximada de três (3) semanas). Os parâmetros utilizados anteriormente foram mantidos.

Durante a soldagem, foram avaliados: entreferro, vazamentos e o defeito *stall*.

Os resultados estão registrados na tabela 13, e podem ser visualizados nas figuras 51, 52 e 53.

Tabela 13: Resultados obtidos no teste comparativo entre os arames E70C-6M e ER70S-6

Semana	Arame	Peças soldadas	Entreferro peças	Entreferro PPM	Vazamento peças	Vazamento PPM	Stall peças	Stall PPM
36	ER70S-6	15513	60	3867	449	28943	38	2449
37		20653	68	3292	454	21982	34	1646
38		23652	62	2621	638	26974	64	2705
39	E70C-6M	18900	51	2698	94	4973	32	1693
40		23755	66	2778	166	6988	17	715
41		19136	64	3344	114	5957	6	313

Figura 51: Acompanhamento do entreferro.

Figura 52: Acompanhamento do vazamento na soldagem do mancal.

Figura 53: Acompanhamento do defeito stall.

Os melhores resultados do arame E70C-6M se repetiram nas semanas de teste quanto aos índices de vazamento e *stall*. O índice de entreferro teve resultado semelhante.

Constatou-se ainda à redução do defeito “Compressor travado por resíduo metálico”. O compressor rotativo possui folgas milésimas, onde um fio de cabelo pode ocasionar o seu travamento. A baixa geração de respingos, observada durante a utilização do arame E70C-6M, pode explicar a diminuição do defeito, que pode ser visualizado na figura 54.

Figura 54: Acompanhamento do defeito roller preso por resíduo metálico.

A figura 55 mostra que o aspecto visual da soldagem utilizando o arame E70C-6M também é melhor, quando comparado a soldagem utilizando o arame ER70S-6.

Figura 55: Aspecto visual da soldagem realizada com o arame E70C-6M e com o arame ER70S-6.

6 CONCLUSÕES

Na presente dissertação foi possível comprovar que o arame sólido ER70S-6 é o metal de adição menos indicado para a soldagem dos mancais de ferro fundido cinzento com a carcaça de aço SAE 1020. Isso se deve à formação de uma ZPF fragilizada pela formação de ledeburita e martensita, além de uma geração mais intensa de respingos.

O arame ERNiFeMn-CI mostra-se o mais indicado em virtude de sua composição química, que evita a formação de constituintes frágeis na diluição com o mancal de ferro fundido. Desta forma, pôde-se prevenir a formação e a propagação de trincas nas ZPF e ZPD, associadas às tensões de contração térmica.

As juntas produzidas com o arame ERNiFeMn-CI apresentaram níveis de dureza próxima ao do mancal e ao da carcaça. No teste de resistência do metal de solda, verificou-se uma pressão acima de 102 kgf/cm² para o arrancamento do mancal. Isso representa uma resistência 12% superior àquela alcançada com o arame sólido de baixa liga. Os índices de perfil de entreferro e taxa de vazamento, assim como a geração de ruído também diminuíram.

Embora com desempenho melhor nos ensaios, poros foram observados na solda do arame ERNiFeMn-CI. Uma possível causa desta porosidade é o superaquecimento deste arame, que apresenta menor condutividade térmica e elétrica. Isso favorece uma deposição mais turbulenta do metal fundido e o consequente aprisionamento de gás, visto que a velocidade de alimentação do arame foi praticamente à mesma aplicada aos arames de baixa liga. Esta deposição turbulenta de metal fundido está relacionada também com a maior geração de respingos observada com o arame ERNiFeMn-CI.

Um ponto a ser considerado é o tamanho da amostragem utilizada. Considerando a soldagem de 1M compressores / ano, estatisticamente deveriam ter sido soldados 9.513 compressores (margem de erro de 1%) utilizando o arame ERNiFeMn-CI para a afirmação dos resultados. Em virtude de seu alto custo, o teste com a amostragem maior foi realizada utilizando os arames ER70S-6 e E70C-6M.

Na soldagem utilizando os arames ER70S-6 e E70C-6M foram observados na microestrutura trincas e a formação de camadas endurecidas com a presença de ledeburita e martensita. No entanto, o comprimento da zona fragilizada foi menor para o arame E70C-6M em comparação com o arame ER70S-6. Isso contribui para os melhores resultados alcançados nos testes de vazamento e ruído realizados com as juntas soldadas com o arame tubular.

Na soldagem comparativa usando amostragem maior para os arames E70C-6M e ER70S-6, foi evidenciado um acabamento superficial melhor e uma geração muito baixa de respingos utilizando o arame E70C-6M, fato que favoreceu a redução do defeito causado por resíduo metálico durante as semanas do teste comparativo. Além disso, o pequeno número de respingos contribui para diminuir as paradas necessárias para limpeza da tocha, aumentando a produtividade da linha. Assim, pôde-se alcançar a soldagem de um número maior de compressores (aproximadamente 4%) sem a necessidade de retrabalho, utilizando o arame E70C-6M.

O arame E70C-6M possui um arco mais largo, que conseqüentemente faz as gotas se espalharem e criarem uma área de projeção maior, distribuindo a energia de soldagem mais uniformemente. A penetração dos arames tubulares tem uma forma mais rasa, porém mais larga, possibilitando uma tolerância maior quanto a desalinhamento da tocha, e adicionalmente reduz os defeitos de falta de fusão, que podem ser comprovados pela diminuição nos índices de vazamentos e ruído.

Portanto, conclui-se que o arame E70C-6M representa uma solução economicamente viável para a diminuição do ruído em compressores rotativos. Já o arame ERNiFeMn-CI mostrou ser a solução técnica recomendada para a eliminação do defeito, assim como para aplicações de juntas soldadas entre ferro fundido e aço carbono sujeitas a maiores solicitações mecânicas.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. F. R. **Estudo comparativo da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI-316L utilizando os processos de soldagem TIG, FCAW e MIG/MAG**. 2008. Monografia (TCC) - Centro Universitário de Itajubá, Itajubá, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 92-82**: Standard test method for Vickers hardness of metallic materials. Philadelphia, 1999. v.3, p.1-8.

AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding handbook**. 7thed. New York: AWS, 1980. v.3, p.170–238.

_____. **Cast Irons**. New York: AWS, 1998. Cap.8.

_____. **The Practical reference guide for hard facing**. New York: AWS, 1998.

ARAUJO, W. R. **Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger**. 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

BARHORST, S. **Metal cored electrode basics**. [S.l.]: The American Welder. p.13-15.

BAUNÈ, E.; BONNET, C.; LIU, S. Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable - Part 1 – Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as Basicity Indicato. **Welding Journal**, p.57s-64s, Mar. 2000.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 3. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2008.

DE PARIS, A. **Tecnologia da soldagem de ferros fundidos**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2003.

FELIZARDO, I. **Soldagem MIG/MAG e com arame tubular**. (Coletânea de informações retiradas de diversas bibliografias). 2005. Disponível em:<www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAW-FCAW_Ivanilza.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2013.

FORTES, C. **Metalurgia da soldagem**. Contagem: ESAB-Brasil, 2004.

_____. **Soldagem MIG/MAG**. Contagem: ESAB-Brasil, 2005.

GIMENES JR., LUIZ; RAMALHO, J.P. **Conceitos De soldagem Mig/Mag**. Disponível em: <www.infosolda.Com.br/download/61dpe.Pdf - 2005>. Acesso em: 20 jun. 2013.

GIRALDO, J. et al. Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para El proceso GMAW. **Dyna**, v.76, n.157, p.205-212. Marzo 2008.

GOMES, E. B. **Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi**. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

HILTON, D. E.; NORRISH, J. Shielding gases for arc welding. **Welding & Metal Fabrication**, p.189-196, May/June, 1998.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **The Procedure handbook of arc welding**. Ohio: The Lincoln Electric Company, 1994.

LUCAS, W. Choosing shielding gas – part 2. **Welding & Metals Fabrication**, n.7, p.269-276, 1999.

MACHADO, I.G. **Soldagem & técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Autor, 1996.

MODENESI, P.J. **Introdução à física do arco elétrico e sua aplicação na soldagem dos metais**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2000. Apostila.

MODENESI, P.J.; MARQUES, P.V.; BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ed.UFMG, 2009.

MOSTAFA, N.B.; KHAJAVI, M.N. Optimization of welding parameters for weld penetration in FCAW. **Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v.16, p.132-138, june 2006.

OKUMURA, T.; TANIGUSHI, C. **Engenharia de soldagem e aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

RODRIGUES, L. O. **Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular**. 2005. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

SALES et al. **Estudo da geometria do cordão de solda usando CO2 e mistura de Ar e CO2 na soldagem com arame tubular AWS E71T-1**. 2001. p. 543-551. Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, Uberlândia.

SOUZA, S.A. **Composição química dos aços**. São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

SUBAN, M.; TUSEK, J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on de type of shielding gas used. **Journal of Materials Processing Technology**, p.185-192, 2001.

UNDERWRITE LABORATORIES. **1995/1984** - Strength test approval. Englewood, 2000.

WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. **Soldagem, processos e metalurgia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.