

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Mestrado Profissionalizante em Engenharia

**REVESTIMENTO SUPERFICIAL EM COMPONENTE FUNDIDO
DE MÁQUINA AGRÍCOLA**

Rosnei Silveira

Porto Alegre, 2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**REVESTIMENTO SUPERFICIAL EM COMPONENTE FUNDIDO DE MÁQUINA
AGRÍCOLA**

Rosnei Silveira

Porto Alegre, Abril de 2004.

Este trabalho de conclusão foi analisado e julgado adequado para obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. José Antônio Esmerio Mazzaferro, Dr.

Orientador
Escola de Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof^a. Helena Betella Cybis, Dra.

Coordenadora
Mestrado Profissionalizante em Engenharia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vilson João Batista, Dr. Eng.

DEMEC/EE/UFRGS

Prof. Flavio José Lorini, Dr. Eng.

DEMEC/EE/UFRGS

Prof. Eduardo André Perondi, Dr. Eng.

DEMEC/EE/UFRGS

AGRADECIMENTOS

À empresa John Deere Brasil Ltda por oportunizar a realização do mestrado profissionalizante em Horizontina.

Agradeço ao Prof. José Antônio Esmerio Mazaferro, por ter aceitado a orientação deste trabalho mesmo sabendo da dificuldade extra, imposta pela distância e pelo caráter não acadêmico do mestrado.

Aos Professores componentes da banca examinadora, pelas contribuições realizadas ao examinarem este trabalho.

Aos colegas de mestrado, os quais passamos muitos dias juntos analisando os diversos assuntos propostos pelos mestres.

Um agradecimento especial aos Engenheiros Jackson A. Schneider e Nelson Paulo Fischer por terem tido a coragem de acreditar e apostar em nossa capacidade para desenvolvimento do processo de revestimento superficial e posterior industrialização do item fundido, o qual é o tema principal deste trabalho.

RESUMO

A necessidade de desenvolver o processo de manufatura para aplicação de revestimento superficial em peças fundidas de máquinas agrícolas viabilizou a realização deste trabalho junto à indústria.

A análise das principais variáveis do processo produtivo foi considerada levando-se em conta recursos necessários, tais como, ferramental e equipamentos, material de adição (arame de soldagem), inspeção das características macroscópicas e, principalmente, as especificações de engenharia do item.

A revisão bibliográfica ressaltou os problemas normalmente existentes quando da soldagem de peças fabricadas de ferro fundido, assim como esclareceu os principais cuidados necessários para obtenção de revestimentos superficiais com qualidade.

Para definição e aprovação do processo de soldagem a ser usado, foram realizados testes simulando uma soldagem automatizada, controlando os principais parâmetros de soldagem.

A análise da qualidade do cordão de solda, sob o ponto de vista de aparência geral, geometria, presença de descontinuidades (porosidade e inclusões de escória), foi feita através de inspeção visual.

Devido a necessidade de estruturar o processo de solda afim de possibilitar fornecimento continuada de peças para a linha de montagem, foi analisado e proposto um conceito de gabarito de soldagem.

Os ensaios de micrografia mostraram a penetração e aspectos internos do depósito de solda. O exame micrográfico mostrou também que a trinca transversal que ocorre no material não avança para dentro do metal base.

Os resultados dos testes e ensaios proporcionaram os subsídios para permitir a aprovação do método proposto a fim de dar continuidade na estruturação do processo de soldagem para revestimento superficial das peças fundidas.

ABSTRACT

“Hardfacing by Arc Welding in Combine Casting Parts”

The main aim of this work was to develop combine cast parts manufactured by arc welding hardfacing.

The process variables were analyzed taking in account tools and equipment, hardfacing materials (welding wire), macroscopic characteristics in visual inspection and project specifications.

The research in this subject shown the mainly problems in the hardfacing cast parts. The criteria to get good quality in hardfacing welding also was taking in account.

To define and approve the final welding process, tests were made to evaluate the effect of basic welding parameters on weld bead geometry and quality.

The project requirements were verified in samples by metallographic characterization and surface hardness measurements. Overall joint quality was evaluated by visual examination of weld bead shape and size, and the presence of known discontinuities as pores, undercut and slag entrapment.

Due the aim to develop the process to product parts in big amount, it was discussed and suggested one concept to welding tooling.

The metallographic tests shown that internal aspects of the welding hardfacing has good quality and the transversal crack is not goes to inside of the base material.

The test results allow the approval of proposed manufacturing process. Welding hardfacing produces components that reach the project requirements and specifications, improving original cast wear properties.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	OBJETIVO	3
1.2	FASES DO DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	3
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS DOS FERROS FUNDIDOS	4
2.1	CONCEITOS BÁSICOS DA SOLDABILIDADE DO FERRO FUNDIDO	7
2.2	FERRO FUNDIDO BRANCO	8
2.3	FERRO FUNDIDO CINZENTO	9
2.4	FERRO FUNDIDO NODULAR (OU DÚCTIL).....	10
2.5	FERRO FUNDIDO MALEÁVEL.....	10
2.6	PRÁTICAS COMUNS PARA SOLDAGEM DE FERROS FUNDIDOS	11
2.7	ALÍVIO DE TENSÕES PÓS-SOLDAGENS	11
2.8	CONSIDERAÇÕES METALÚRGICAS.....	12
2.8.1	<i>Zona Afetada pelo Calor</i>	12
2.8.2	<i>Região Parcialmente Fundida</i>	14
2.8.3	<i>Zona Fundida</i>	14
2.8.4	<i>Efeito da Forma da Grafita</i>	15
2.8.5	<i>Efeito da Estrutura da Matriz</i>	15
2.9	MATERIAIS DE ADIÇÃO (ARAMES E ELETRODOS)	15
2.9.1	<i>Eletrodos a base de ferro</i>	15
2.9.2	<i>Eletrodos a base de níquel</i>	16
2.9.3	<i>Eletrodo Revestido para Soldagem do Ferro Fundido</i>	17
2.9.4	<i>Arame Tubular para Soldagem de Ferros Fundidos</i>	18
2.9.5	<i>Arames sólidos c/ proteção gasosa p/ soldagem do ferro fundido</i>	19
2.10	PROCESSOS DE UNIÃO E DE SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO	20
2.10.1	<i>Eletrodo Revestido</i>	20
2.10.2	<i>Arames Tubulares para Soldagem do Ferro Fundido</i>	21
2.10.3	<i>Soldagem com Eletrodo Sólido e Proteção Gasosa (MIG/MAG)</i>	21
2.11	REVESTIMENTO SUPERFICIAL.....	22
2.11.1	<i>Processos de Endurecimento Superficial</i>	23
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
3.1	EXTRATOR DE ESPIGAS DE MILHO	29
3.2	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO.....	30
3.2.1	<i>Recuperação do Revestimento Superficial</i>	30
3.2.2	<i>Material do Revestimento Superficial</i>	31
3.2.3	<i>Comprimento do Cordão</i>	31
3.2.4	<i>Largura do Revestimento Superficial</i>	32

3.2.5	<i>Centragem do cordão de solda</i>	33
3.2.6	<i>Altura do depósito de solda</i>	33
3.2.7	<i>Porosidades</i>	33
3.3	APROVAÇÃO DO MATERIAL DE DEPOSIÇÃO	33
4	ESTUDO DE CASO	35
4.1	ENSAIOS DE VERIFICAÇÃO.....	35
4.2	DEFINIÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	35
4.3	GABARITO DE SOLDAGEM.....	35
	<i>Definição da Opção 01</i>	36
	<i>Definição da Opção 02</i>	36
	<i>Definição da Opção 03</i>	36
	<i>Definição da Opção 04</i>	37
4.4	FONTE DE SOLDAGEM	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	CARACTERÍSTICAS MACROSCÓPICAS DO REVESTIMENTO	38
5.2	MICROESTRURA DA ZONA SOLDADA	40
5.3	TRINCAS TRANSVERSAIS.....	40
5.4	TESTES DE SOLDAGEM	41
5.5	ESCOLHA DO CONCEITO DO DISPOSITIVO.....	42
5.6	ESCOLHA DA FONTE DE SOLDAGEM	45
5.7	TOCHA DE SOLDA	45
5.8	GÁS DE PROTEÇÃO	46
5.9	PROCEDIMENTO PADRÃO DE SOLDAGEM	46
6	CONCLUSÕES	47
6.1	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49
	A N E X O S	51
	ANEXO 01 : EXEMPLO DE FOLHA DE PROCEDIMENTO OPERACIONAL	52

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Amperes
AWS	<i>American Welding Society</i>
CLP	Controle Lógico Programável
CO ₂	Gás Carbônico
CCEN	Corrente Contínua Eletrodo Negativo
CCEP	Corrente Contínua Eletrodo Positivo
°C	Graus Celsius
DC	Direct Current
Fe ₃ C	Carboneto de Ferro
HRB	Hardness Brinell
HRC	Hardness Rockwell
JDB	John Deere Brasil Ltda
KSI	Kilopound Second Inches
Mpa	Mega Pascall
MIG	Metal Inert Gás
MAG	Metal Active Gás
RCF	Rolling Contact Fatigue
SAE	Society American Engineering
TIG	Tungsten Inert Gás
V	Volts
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – CURVA TENSÃO DEFORMAÇÃO - AÇO E FERRO FUNDIDO	2
FIGURA 2.1 – FERRO FUNDIDO CINZENTO.....	5
FIGURA 2.2 – FERRO FUNDIDO NODULAR	5
FIGURA 2.3 – FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	6
FIGURA 2.4 – RELAÇÃO COMPRESSÃO E TRAÇÃO DO FERRO FUNDIDO.....	7
FIGURA 2.5 – FORMA DA MARTENSITA NO FERRO FUNDIDO.....	8
FIGURA 2.6 – FASES E MICROESTRUTURAS NA SOLDAGEM DO FERRO FUNDIDO.....	13
FIGURA 3.1 - SEQUÊNCIA DA METODOLOGIA EXPERIMENTAL	28
FIGURA 3.2 – PLATAFORMA PARA MILHO – COLHEITADEIRA JOHN DEERE.....	30
FIGURA 3.3 – PEÇA COM A SOLDA DE REVESTIMENTO APLICADA NAS ALETAS	31
FIGURA 3.4 – PEÇAS REVESTIDAS NO PRODUTO FINAL	32
FIGURA 5.1 - ASPECTO VISUAL DA SOLDA	38
FIGURA 5.2 - LARGURA DO CORDÃO DE SOLDA	39
FIGURA 5.3 - ALTURA DO CORDÃO DE SOLDA	39
FIGURA 5.4 - MICROESTRUTURA DOS CORPOS DE PROVA	40
FIGURA 5.5 - DETALHE DA TRINCA NO CORDÃO DE REVESTIMENTO	41
FIGURA 5.6 – PREPARAÇÃO PARA SOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	42
FIGURA 5.7 – PERSPECTIVA DO DISPOSITIVO PROPOSTO	43
FIGURA 5.8 - RÉGUA DE VERIFICAÇÃO DO DIÂMETRO EXTERNO.....	44
FIGURA 5.9 – FONTE DE SOLDA PULSARC 4000®	45

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2-1 - PARÂMETROS PARA SOLDAGEM C/ ARAME TUBULAR ENIFET3-CI.....	18
TABELA 2-2 – PROCESSOS E MATERIAIS DE REVESTIMENTO SUPERFICIAL BÁSICO.....	23
TABELA 3-1 – DADOS BÁSICOS DE SOLDAGEM COM ARAME STOODY® 101-HC	34

1 INTRODUÇÃO

Dentre os diversos tipos de materiais existentes e atualmente usados como matéria-prima nas indústrias metal-mecânicas, destaca-se o *ferro fundido* em suas diferentes configurações: ferro fundido branco, ferro fundido maleável, ferro fundido cinzento e ferro fundido dúctil ou nodular.

Das principais razões da larga aplicação que o ferro fundido possibilita, pode-se destacar o baixo custo de obtenção e a capacidade de absorção de vibrações, sendo, devido a isso, muito aplicado em estruturas de máquinas operatrizes [AWS,1998]. A facilidade de obtenção, facilidade de compor formas complexas com paredes relativamente finas e resistência ao desgaste são outras razões de seu uso intenso [Lincoln, 1994].

Em geral, os ferros fundidos possuem faixas de fusão menores do que os aços, são menos viscosos quando fundidos e possuem moderada contração durante o resfriamento e solidificação. A tenacidade e a ductilidade do ferro fundido são menores do que a dos aços carbono. Estas propriedades mais baixas limitam a aplicação do ferro fundido [AWS, 1998]. Materiais comuns de construção, tais como aços carbono e aços inoxidáveis possuem a curva tensão-deformação similar à curva superior da Figura 2.1.

A curva inferior, para ferro fundido, é a típica curva tensão-deformação para ferro fundido branco e cinzento, (esta curva não é válida para ferro fundido maleável ou dúctil). A parte da curva que se aproxima de uma reta, descreve a ductilidade elástica de um material, sendo a ductilidade elástica a capacidade de um material de absorver energia quando submetida a solicitações, sem resultar em deformações plásticas . A inclinação da linha é geralmente chamada de módulo de elasticidade do material, ou *módulo de Young* [AWS, 1998].

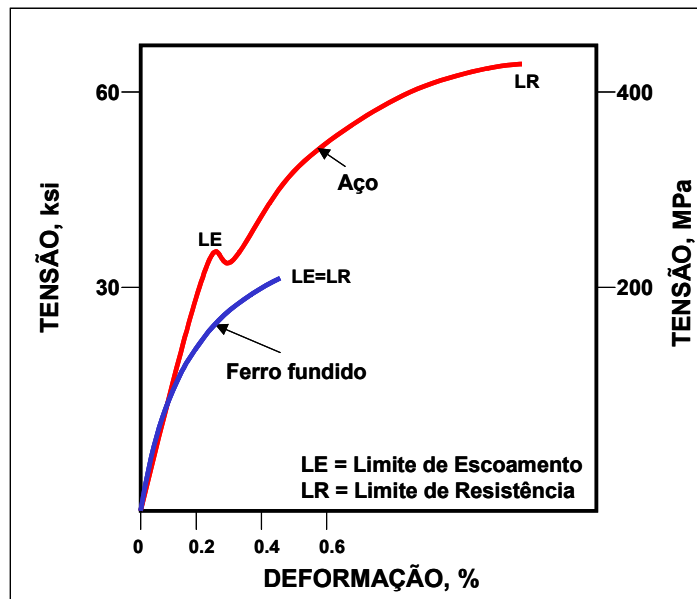


Figura 1.1 – Curva Tensão Deformação - Aço e Ferro Fundido

Fonte : AWS

Como pode ser visto no gráfico da Figura 1.1, ferro fundido branco e cinzento não possuem ductilidade plástica. Se estes materiais forem solicitados além de seus limites de escoamentos eles não se deformarão, eles quebrarão [AWS, 1998].

Dentre as boas qualidades do ferro fundido, pode-se destacar a fácil usinabilidade, porém a falta de ductilidade plástica do ferro fundido, freqüentemente contribui para o aumento da dificuldade de soldagem deste material.

A soldagem de ferro fundido é mais difícil do que a soldagem de aço baixo carbono, mas apesar disto, há operações típicas que requerem soldagens em ferro fundido, tais como :

- recuperações de novos fundidos que apresentam defeitos de fundição tais como porosidades e/ou inclusões de areia;
- fabricação de conexões especiais tais como eixos para conexões de uniões;
- correções de erros de fabricação provenientes do processo de usinagem, furos desalinhados, etc;
- reparação de componentes antigos que quebraram ou desgastaram em serviço;
- restauração de resistência à corrosão ou integridade estrutural pela soldagem superficial;
- revestimento superficial em peças submetidas à solicitações que causam desgastes superficiais; [Lincoln, 1994].

Nem todos os ferros fundidos são prontamente soldáveis, alguns requerem cuidadoso acompanhamento para obter procedimentos de soldagens a fim de produzir soldas satisfatórias. Por outro lado, como será visto mais adiante, o ferro fundido branco é considerado não soldável.

A obtenção de soldas de boa qualidade em peças fundidas é possível através do uso dos processos de soldagem ao arco com eletrodos revestidos, soldagem com eletrodo tubular, MIG/MAG e TIG quando usados com arames e eletrodos baseados no níquel, [Howard, 1994].

1.1 Objetivo

Tem-se como objetivo deste trabalho, a realização de um estudo de viabilidade técnica para posterior implementação do processo de revestimento superficial em peças de ferro fundido cinzento.

1.2 Fases do desenvolvimento do trabalho

Na primeira fase fez-se uma análise da fundamentação teórica sobre o assunto, destacando as caracterizações do ferro fundido, conceitos básicos de soldagem de ferro fundido e teoria do revestimento superficial.

A 2ª fase envolve a análise dos requisitos de projeto e a pesquisa sobre o metal base especificado no projeto e sobre os materiais de revestimento superficial disponíveis comercialmente para esta necessidade.

Na fase 3 os primeiros testes foram realizados, a fim de verificar o desempenho do material de adição e verificar se os requisitos do projeto poderiam ser satisfatoriamente atendidos.

A 4ª fase compreendeu a definição conceitual do gabarito de soldagem, fonte de soldagem, gás de proteção e tocha de solda.

A parte final apresenta a análise dos resultados obtidos, conclusões e sugestões de continuidade para o referido processo de soldagem.

2 Conceitos Fundamentais dos Ferros Fundidos

O termo ferro fundido é aplicado para uma grande quantidade de fundidos à base de ferro que apresentam a composição dentro dos seguintes limites: carbono (C), 1.7 a 4.5%; silício (Si), 0.5 a 3%; manganês (Mn), 0.2 a 1.3%; fósforo (P), máximo 0.8%; e enxofre (S), máximo 0.2%. Molibdênio, níquel, cromo, cobre podem ser adicionados para melhorar algumas propriedades específicas do ferro fundido. As categorias gerais dos ferros fundidos são ferro fundido cinzento, ferro fundido branco, ferro fundido maleável, e ferro fundido dúctil (ou nodular), [AWS, 1998].

As propriedades mecânicas de um ferro fundido dependem, do tipo de microestrutura e da forma e distribuição dos microconstituintes. Um microconstituente, grafita livre (carbono), tem um efeito significativo nas propriedades mecânicas. A quantidade, tamanho e forma das partículas de microconstituintes afetam a resistência e ductilidade de um ferro fundido.

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 uma aparência de lamelas, figura 2.1, e no ferro fundido nodular, uma aparência esferoidal, figura 2.2, enquanto que no ferro fundido maleável, uma aparência quase esferoidal, figura 2.3.

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 ferro fundido nodular não apresentam esta característica de fragilidade porque 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 estes materiais influenciam a forma estrutural que o carbono exibe no ferro fundido, conforme pode ser visto nas Figuras 2.1; 2.2 e 2.3.



Figura 2.1 – Ferro Fundido Cinzento

Fonte : AWS

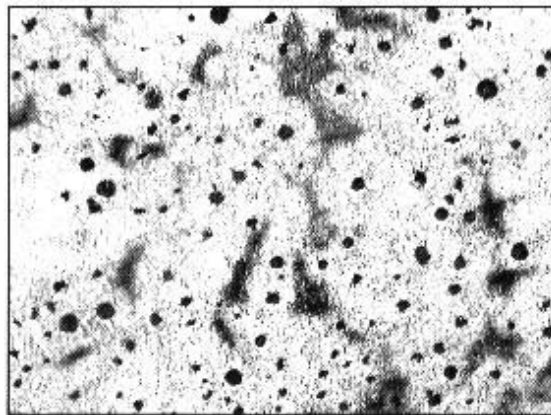


Figura 2.2 – Ferro Fundido Nodular

Fonte : AWS

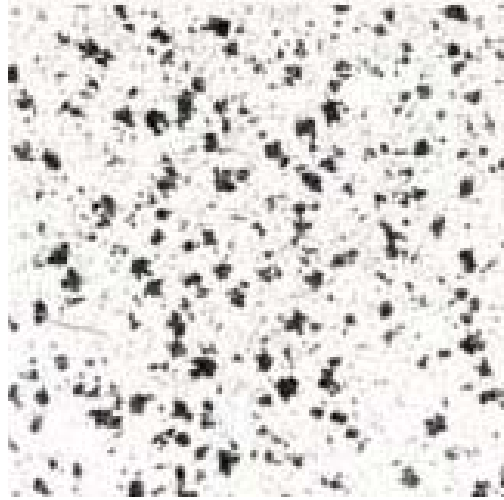


Figura 2.3 – Ferro Fundido Maleável

Fonte : AWS

O sistema metaestável carboneto ferro-ferro coexiste com o sistema estável ferro-grafita em um ferro fundido. Estes 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 esferóides. O tamanho, a forma, e a distribuição da grafita influenciam as propriedades mecânicas e físicas do ferro fundido [AWS, 1998; Lincoln, 1994].

A resistência da grafita é um pouco diferente da sua resistência encontrada nos eletrodos de grafite de lapiseiras. Cada lamela de grafita age essencialmente como uma trinca no ferro fundido cinzento causando uma redução na resistência à tensão apresentada pelo material. O ferro fundido cinzento raramente é usado em aplicações submetidas a solicitações de tensão ou fadiga. Apesar da redução na resistência à tensão, a microestrutura da grafita oferece algumas vantagens, por exemplo, o ferro fundido apresenta uma excelente resistência a compressão, comparativamente a sua resistência a tração, como pode ser visto na Figura 2.4.

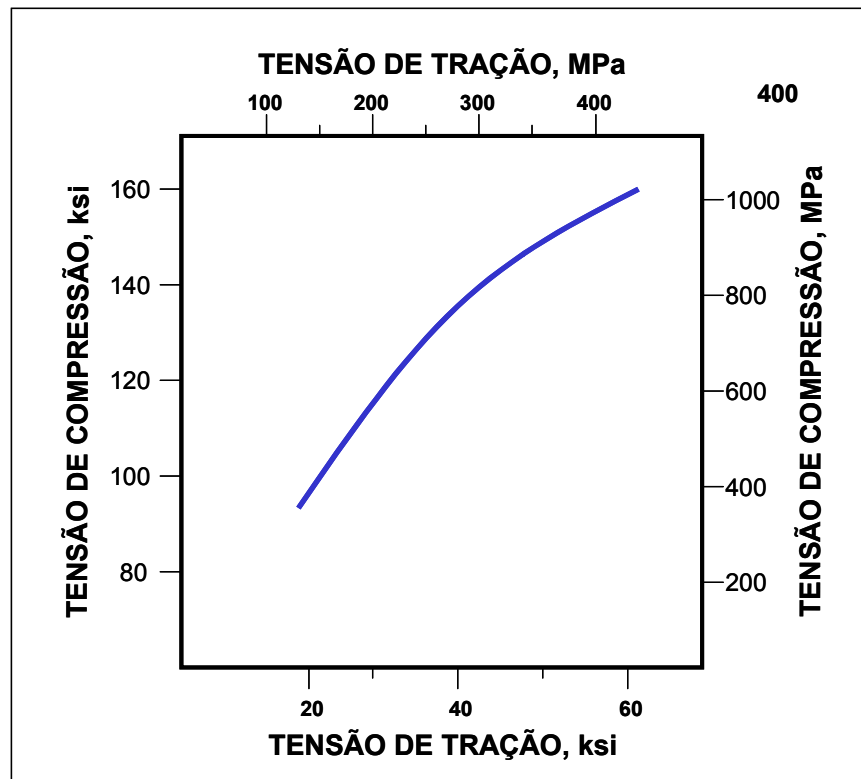


Figura 2.4 – Relação Compressão e Tração do Ferro Fundido

Fonte : AWS

2.1 Conceitos Básicos da Soldabilidade do Ferro Fundido

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

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 2.5, e cementita. Estes fatores metalúrgicos fazem o ferro fundido ser mais difícil de soldar do que o aço [AWS, 1998].

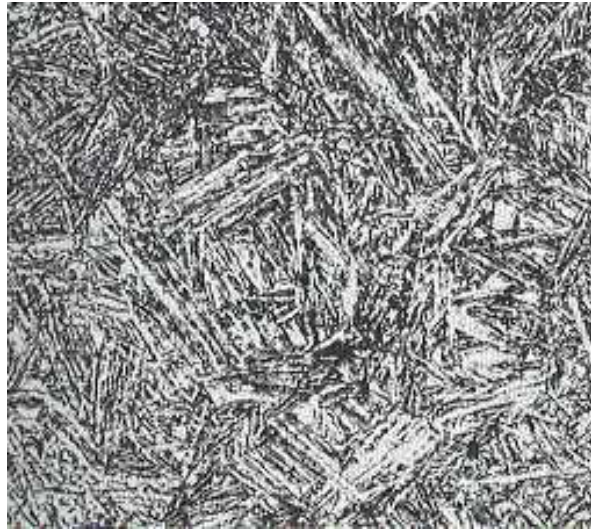


Figura 2.5 – Forma da Martensita no Ferro Fundido

Fonte : AWS

Dependendo do conteúdo da liga, prática de fusão, e tratamentos térmicos, o ferro fundido representa uma grande gama de materiais. As propriedades mecânicas e soldabilidade do ferro fundido são dependentes da microestrutura que está diretamente relacionada à divisão do carbono durante a solidificação e subsequente resfriamento. As propriedades mecânicas podem ser melhoradas pela adição de elementos de liga, tratamento térmico, e prática de fundição [AWS, 1998].

2.2 Ferro Fundido Branco

Ferro fundido branco é o ferro fundido virtualmente livre de carbono grafítico. Seu conteúdo de silício é mantido baixo para inibir a precipitação de carbono como grafita durante a solidificação. O carbono combina com ferro, cromo ou molibdênio para formar carbonetos metálicos. A maioria do carbono é combinada com o constituinte cementita intermetálico: carboneto de ferro, Fe_3C , um microconstituente duro e quebradiço [AWS, 1998].

Ferros fundidos brancos possuem sua microestrutura com granulação mais fina do que outros fundidos devido ao seu rápido resfriamento na obtenção. Este ferro fundido pode ser usado em áreas de desgaste de grandes fundidos. Isto é obtido pela adição de barras resfriadas no molde para apressar o resfriamento.

O ferro fundido branco geralmente é considerado não soldável. A falta de qualquer ductilidade que acomodaria tensões induzidas pela soldagem no metal base resulta em trincas na zona afetada pelo calor na solda. Contudo, tais coisas como um suporte de conexão soldado tem sido reportado usando eletrodos de níquel (ENiFe-CI) [AWS, 1998; Lincoln, 1994].

A excelente resistência a abrasão do ferro fundido branco tem sido já muito bem documentado. Ferro fundido branco com alto conteúdo de cromo são muito utilizados devido as formações de carbonetos duros de M_7C_3 . Acredita-se que estes carbetos são os responsáveis pela excelente resistência ao desgaste que os ferro fundido branco possuem, enquanto que sua matriz dúctil dá a liga uma razoável resistência ao impacto. O trabalho de Stevenson e Hutching, propunha-se a examinar a resistência relativa a erosão de ferros fundido branco disponíveis comercialmente e usados como material de revestimento por solda. Outra finalidade do trabalho, era explorar os mecanismos de erosão dos ferro fundidos branco.

2.3 Ferro Fundido Cinzento

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 resistência à 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 a compressão do ferro fundido cinzento é de 2,5 a 4,5 vezes maior do que a sua resistência à tração. Já a sua resistência ao impacto geralmente é baixa, particularmente quando fósforo está no seu nível mais alto. Fósforo também tem um efeito indesejado na soldabilidade. Com níveis de fósforo muito alto, trincas no metal de solda poderão aparecer.

Este ferro fundido é muito usado em condições de cargas estáticas, em aplicações de movimentação ou para equipamentos de processo fracamente tensionado. A tensão de resistência específica (classe do ferro fundido), a forma e distribuição da grafita, a porcentagem de fósforo e enxofre, e o nível de compressão são fatores para considerar quando da aplicação do processo de soldagem deste material [AWS, 1998; Howard, 1994].

2.4 Ferro Fundido Nodular (ou Dúctil)

Ferro fundido nodular e o ferro fundido cinzento possuem composição semelhante quanto ao conteúdo de silício e carbono e em termos de práticas de fundição gerais para a produção do ferro fundido. O ferro fundido nodular, contudo, requer menor quantidade de enxofre e condições mais limpas, com o método de introdução de inoculantes. Eles diferem na forma geométrica assumida pela grafite livre.

A forma das partículas de carbono na microestrutura auxilia para a superioridade na resistência e ductilidade do ferro fundido nodular quando comparados com um ferro fundido cinzento, de similar composição química.

A soldabilidade do ferro fundido dúctil é maior do que a do ferro fundido cinzento [AWS, 1998; Lincoln, 1994; Howard, 1994].

O desenvolvimento do ferro fundido dúctil austemperado nos anos 70, resultou em um novo e importante impulso no uso do ferro fundido dúctil, devido a excelente combinação de resistência e dureza do ferro fundido dúctil austemperado. N. REBASA, R. DOMMARCO e J. SIKORA, focaram sua pesquisa no estudo da influência dos nódulos do ferro fundido nodular na resistência ao desgaste do ferro fundido dúctil, avaliando em particular o efeito na resistência a abrasão e na fadiga de contato de rolamento (RCF) do ferro fundido dúctil e do ferro fundido austemperado [REBASA, 2002].

2.5 Ferro Fundido Maleável

Ferro fundido maleável é um ferro fundido branco tratado termicamente com adequada composição química. A formação da cementita no ferro fundido branco é promovida pelo seu relativo baixo conteúdo de carbono e silício. O fundido é então submetido a um tratamento de maleabilização em fornalhas de estágio ou em fornalhas contínuas. O ferro fundido maleável produzido desta forma, é ou ferrítico ou perlítico, dependendo do ciclo de maleabilização usado.

Ferro fundido maleável possui alguma ductilidade, devido ao carbono aglomerar-se em formas simétricas as quais são algo parecido com nódulos no ferro fundido nodular.

Ferro fundido nodular e ferro fundido maleável possuem comportamento quanto a soldabilidade muito semelhantes. Embora todas as classes de ferro fundido nodular e maleável sejam consideradas soldáveis, melhores resultados são obtidos quando soldar classes de menor resistência e maior ductilidade que possuem matriz ferrítica ou maioria de matriz ferrítica. Boa

eficiência da junta (100%), é obtido usando procedimentos de soldagem estabelecidos com o ferro que apresenta uma resistência a tensão máxima de 448 MPa [AWS, 1998].

2.6 Práticas Comuns para Soldagem de Ferros Fundidos

Soldagem ao arco elétrico, usando eletrodos revestidos é o processo dominante usado na união de ferro fundido.

Práticas comuns, normalmente usadas para ferros fundidos, podem ser resumidas como segue:

- Sem pré-aquecimento, a temperatura entre os passes não deverá exceder 95°C;
- Com pré-aquecimento, a temperatura interpasse não deve exceder a temperatura de pré-aquecimento em mais do que 40°C;
- Quando o ferro fundido cinzento é pré-aquecido, um mínimo de 315°C reduz a formação de martensita na zona afetada pelo calor para um nível aceitável;
- Para minimizar as tensões de soldagem, soldagem com passe à ré pode ser usado. Cordões longos e finos devem ser de no máximo 76mm; e cada cordão de solda deve resfriar para aproximadamente 40°C antes que subseqüentes depósitos sejam feitos;
- Fusões do ferro fundido maiores do que o estritamente necessário deverá ser evitado.

Quando possível, dois ou mais passes de solda devem ser depositados a fim de aumentar a usinabilidade da ZAC, que é a região do metal base adjacente ao metal de solda que não sofre fusão, mas tem suas propriedades alteradas pela alta temperatura e tempo de exposição.

- O arco deve ser direcionado para a junta a ser soldada, nunca no ferro fundido;
- Comprimento do arco elétrico (*stick-out*) deverá ser mantido tão pequeno quanto possível;
- A corrente de soldagem precisa ser reduzida em 25% para a posição vertical e em 15% para posição sobre-cabeça. [AWS, 1998; Lincoln, 1994; Howard, 1998].

2.7 Alívio de Tensões Pós-Soldagens

Após a soldagem, tratamentos térmicos do ferro fundido poderão ser necessários para obter as seguintes características:

- Melhorar a ductilidade da zona afetada pelo calor (ZAC);
- Melhorar a usinabilidade da solda e ZAC;
- Decompor a cementita formada durante a soldagem;

- Transformar a martensita para uma microestrutura menos quebradiça;
- Alívio de tensões residuais.

Considerações práticas podem requerer que a solda final esfrie até a temperatura ambiente antes que o tratamento térmico posterior tenha início. Quando o tratamento térmico não é iniciado imediatamente após a soldagem, o ferro fundido poderá ser resfriado lentamente da temperatura de soldagem para a temperatura ambiente pela cobertura da peça por materiais isolantes. Tratamento térmico devem ser iniciados imediatamente após a soldagem, especialmente se a peça possui uma geometria complexa, microestrutura quebradiça, ou altas tensões térmicas induzidas [AWS, 1998].

2.8 Considerações Metalúrgicas

2.8.1 Zona Afetada pelo Calor

Todos os ferros fundidos possuem um problema comum afetando sua soldabilidade, devido ao seu alto teor de carbono. O processo de manufatura é capaz de produzir microestruturas que possuem propriedades mecânicas. A soldagem de ferro fundido é caracterizada pelo rápido resfriamento da poça de fusão comparado com o mais lento resfriamento do ferro durante a fundição. O ciclo térmico da solda não produz uma microestrutura desejável. A solda resulta em uma microestrutura como mostrado na Figura 2.6.

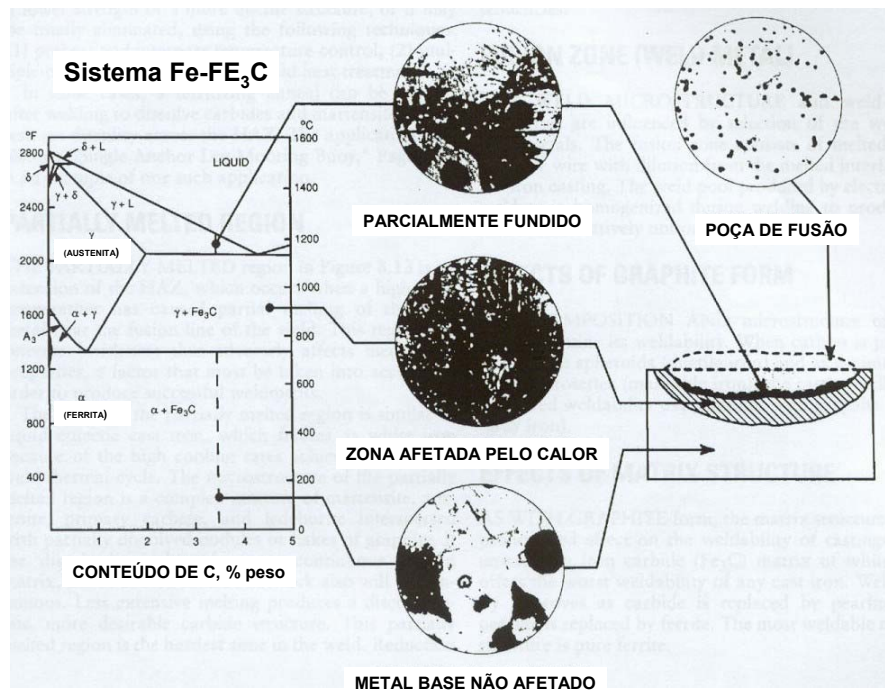


Figura 2.6 – Fases e Microestruturas na Soldagem do Ferro Fundido

Fonte : AWS [5]

A microestrutura mostrada nesta figura representa as estruturas como elas existem a temperaturas ambiente, como um resultado da exposição às faixas de temperaturas indicadas no diagrama de fase do calor de soldagem. A poça de fusão não possui uma localização correspondente no diagrama de fase porque ela é uma composição contendo níquel e então está livre das fases problemáticas ilustradas em outras regiões.

Durante a soldagem, a ZAC é aquecida próxima do ponto de fusão. A taxa de resfriamento da ZAC e da poça de fusão é alta, com carbonetos sendo formado na ZAC. As altas temperaturas da ZAC durante a soldagem levam o carbono a difundir-se na austenita a qual, sob resfriamento, transforma-se em martensita de alto carbono (um produto desintegrado eutetóide duro). Estas microestruturas (cementita e martensita) são duras e podem causar trincas, espontaneamente ou durante o serviço. O grau de dureza dependerá da quantidade de cementita e martensita formadas. A propensão a trincas dependerá da composição do ferro fundido, do procedimento de soldagem empregado, e de qualquer subsequente tratamento térmico.

Soldagem ao arco elétrico gera intenso calor localizado o qual produz tensões térmicas na área da solda. Para acomodar estas tensões de solda, o metal base deve ser capaz de alguma

deformação plástica para prevenir trincas. As tensões geradas pelas operações de soldagem podem ser reduzidas ou equalizadas usando um procedimento de soldagem adequado. Dentre os fatores a considerar no estabelecimento de um procedimento de soldagem destacam-se:

- preaquecimento e pós-aquecimento;
- seqüência de soldagem (passe à ré, trabalhada, seqüencial intermitente);
- Controle (redução) da diluição da poça de fusão;
- Alívio de tensão entre passes (“*shot peening*”).

O carbono no ferro fundido ferrítico está na forma de grafita, a qual é dissolvida lentamente durante a soldagem e produz baixa martensita ou cementita. Este fenômeno pode ser usado como vantagem na soldagem do ferro dúctil ferrítico. Usando um processo com alta densidade de corrente que permita alta velocidade de soldagem, tal como arame tubular ou MIG/MAG, o tempo à elevada temperatura na qual a zona afetada pelo calor é minimizado. Isto limita a quantidade de calor (energia) que difunde a partir dos nódulos de grafita e permite a retenção de uma ferrita quase pura na ZAC [AWS, 1998].

2.8.2 Região Parcialmente Fundida

A região parcialmente fundida na Figura 2.6 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 diversificado com nódulos ou flocos de grafita parcialmente dissolvida. Redução dos picos de temperatura e tempo a altas temperaturas são os mais eficientes métodos de reduzir qualquer tendência a trincas [AWS, 1998].

2.8.3 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].

2.8.4 Efeito da Forma da Grafita

A composição e microestrutura do ferro fundido determinam sua soldabilidade. Quando o carbono está presente como grafita esferoidal (nodular) e grafita rosetada esferoidal (maleável), o Ferro Fundido terá soldabilidade aumentada sobre os fundidos com grafita em lamelas (cinzento) [AWS, 1998].

2.8.5 Efeito da Estrutura da Matriz

A estrutura da matriz tem um pronunciado efeito na soldabilidade dos fundidos. A não soldabilidade dos carbonetos da matriz do ferro fundido branco oferece a pior soldabilidade de qualquer ferro fundido. A soldabilidade aumenta se os carbonetos forem transformados em perlita e a perlita em ferrita. A matriz de maior soldabilidade é a ferrítica [AWS, 1998].

2.9 Materiais de Adição (Arame e Eletrodos)

Uma variedade de metais de adição existe para a soldagem de ferro fundido. Eletrodo revestido são os mais usados, mas barras de arame e arame tubular baseado no níquel têm encontrado grande aceitabilidade.

A norma internacional ANSI/AWS A5.15, *Specification for Welding Electrodes and Rods for Cast Iron*, designa os principais materiais de deposição para ferro fundido [AWS, 1998].

2.9.1 Eletrodos a base de ferro

Eletrodos contendo uma alma de ferro fundido recoberto 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 soldagem do ferro fundido dúctil e do ferro fundido 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 usados para reparos de pequenas falhas e trincas. Os eletrodos ESt podem ser usados para reparos de fundidos que necessitam 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 usado para 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 coeficiente 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 propriedades magnéticas são especificadas [AWS, 1998].

2.9.2 Eletrodos a base de níquel

Metais de adição à base de níquel são largamente usados para a soldagem de ferro fundido cinzento, dúctil e maleável. Isto se deve ao fato deste tipo de eletrodo auxiliar na prevenção de trincas nos ferros fundidos. Contudo, existem alguns casos onde a quantidade de diluição dentro da solda do ferro fundido deve ser controlada para prevenir trincas no metal de solda. Os produtos de níquel puro (ENi-CI) raramente trincam devido à diluição excessiva, porque eles contém 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 esfria, 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; AWS, 1981].

2.9.3 Eletrodo Revestido para Soldagem do Ferro Fundido

Os eletrodos classificados pela ANSI/AWS A5.15 como ENi-CI usam essencialmente uma alma de níquel puro com grafita adicionada através do revestimento.

Isto produz um depósito de alto conteúdo de níquel, até mesmo quando em altíssimas diluições com o metal base, como em uma soldagem de passe único. O depósito permanece dúctil e usinável. Este eletrodo é largamente usado quando a usinabilidade do passe único e a superfície da solda é importante.

Os eletrodos classificados pela ANSI/AWS A5.15 como ENiFe-CI são largamente usados e possuem muitas vantagens sobre os eletrodos ENi-CI e sobre as outras classes de metais de deposição para ferros fundidos existentes.

As principais vantagens dos eletrodos ENiFe-CI para soldagem dos ferros fundidos são como segue :

- Os depósitos são mais resistentes e mais dúcteis; este aumentado nível de resistência faz o produto adequado para a soldagem dos mais resistentes ferro fundidos cinzentos, maleáveis e dúcteis. Estes eletrodos são adequados para muitas aplicações de soldagem de metais dissimilares quando o ferro fundido está envolvido.
- Depósitos de ferro-níquel são mais tolerantes ao fósforo do que depósitos de níquel, e eletrodos ENiFe-CI são preferidos quando os conteúdos de fósforos são altos.
- O coeficiente de expansão do depósito de solda ferro-níquel diluído é algumas vezes menor que o depósito de níquel, tornando estes metais de adição úteis na soldagem de seções grandes. Isto previne as trincas na linha de centro da solda devido às diferenças de dilatação. Assumindo uma diluição de 30 a 40% de níquel no metal base (dos nominais 55% de conteúdo de níquel do metal de deposição ENiFe-CI), uma baixa expansão (dilatação) na composição ferro-níquel será produzida. Os coeficientes de expansão destas soldas podem ser similares à expansão controlada ferro-níquel das ligas que contém 36% de níquel balanceado no ferro.
- O menor conteúdo de níquel dos eletrodos ENiFe-CI deixam este tipo de eletrodo com custo menor do que os eletrodos ENi-CI.

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 a alta diluição do metal base que pode resultar em trincas [AWS, 1998; Howard, 1984].

2.9.4 Arame Tubular para Soldagem de Ferros Fundidos

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 trincas a quente e aumentar a resistência e ductilidade do metal de solda. Este eletrodo é usualmente usado para metais base de pouca espessura ou onde o processo possa ser automatizado. Sendo particularmente útil para fabricação de conjunto soldado feitos de ferros fundido nodular e aço.

Um exemplo de parâmetros para soldagem com este tipo de arame tubular pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2-1 - Parâmetros para Soldagem c/ Arame Tubular ENiFeT3-CI

Fonte : AWS

Parâmetros	Valor
Corrente de soldagem	350-450 A
Tensão de soldagem	29 V
Velocidade de soldagem	6,4-12,7mm/s
Extensão do eletrodo (stick-out)	22,1-15,9mm
Diâmetro do eletrodo	2,36mm
Gás de proteção	Não
Opcional	18,9 L/min (CO ₂)
Especificação	ERNiFeT3-CI
Pré-Aquecimento	Não
Opcional	316° C
Taxa de deposição	5,4-6,8 kg/h
Produto	ENiFeT3-CI
Propriedades Típicas	
Limite tensão resistência	483 MPa
Limite elástico	310 MPa
Alongamento	12-16%
Dureza	85-95 HRB

Junto com outras ligas apropriadamente adicionadas, o manganês nos eletrodos 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 aquelas depositadas por eletrodos ENiFe-CI, mas com um mais alto conteúdo 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 auto proteção através do fluxo interno, mas é aceitável proteção gasosa de CO₂.

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

2.9.5 Arames sólidos c/ proteção gasosa p/ soldagem do ferro fundido

Materiais de deposição tipo ERNi-1 são usados algumas vezes para soldar 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 carbeto de titânio duros.

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

O arame sólido ENiFeMn-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 soldagem de ferro fundido estão muito próximos do níquel puro (ENi-CI e ENi-Ci-A) ou 55% de níquel, balanceado com ferro (ENiFe-CI e ENiFe-CI-A), ambos com temperaturas de solidificação mais alta do que o metal base ferro fundido. Quando o metal de solda solidifica antes a 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-CI 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-CI apresenta uma temperatura *liquidus* de 82° C menor do que a do sistema de eletrodo revestido ENiFe-CI, e a temperatura *solidus* é correspondentemente menor. Como resultado do uso de ENiFeMn-CI, menores tensões de contração são formadas enquanto a fase líquida persiste na ZAC. Isto resulta em menos trincas. Também, ENiFeMn-CI possui a vantagem de possuir um coeficiente de expansão térmica muito parecido com o do Ferro fundido. A combinação destas características resulta em soldas que solidificam sobre uma faixa de temperatura muito mais próximo 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-CI é usada, a necessidade de pré-aquecimento é 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 qtd de cementita (Fe₃C) que se forma na ZAC. A fase cementita pode ser mais prejudicial do que a martensita para as propriedades mecânicas. Ferro fundido de matriz ferrítico soldado sem pré-aquecimento previne o desenvolvimento de uma banda contínua de carbonetos na ZAC do ferro fundido mas resulta na formação de martensita [AWS, 1998].

2.10 Processos de União e de Soldagem do Ferro Fundido

2.10.1 Eletrodo Revestido

Muitos fatores devem ser levados em consideração quando desenvolvendo um adequado procedimento de soldagem de ferro fundido. Entre os mais importantes fatores, pode-se destacar os seguintes:

- tipo de ferro fundido;
- propriedades mecânicas desejadas na junta;
- tipos de inspeções de qualidade requerida antes, durante e após a soldagem (por exemplo, líquido penetrante, partículas magnéticas, radiografia, procedimentos de qualificação, ensaios destrutivos, testes mecânicos, etc.)

- tolerância do metal de soldagem para diluição pelo metal base (muitas vezes, isto envolve testes de líquido penetrante de um cordão na chapa, base macia)
- ductilidade do metal de solda (para evitar alívio de tensões de solda)
- usinabilidade da solda e ZAC;
- cor adequada do metal de solda e do metal base;
- aplicável processo de soldagem;
- custos envolvidos
- adequação da peça soldada para o serviço desejado.

2.10.2 Arames Tubulares para Soldagem do Ferro Fundido

O processo de soldagem com arame tubular, é um processo a arco elétrico que produz coalescência de metais pelo aquecimento com um arco entre um eletrodo contínuo (arame) e a peça em trabalho. A proteção do arco é provida por um fluxo situado no interior do eletrodo tubular. Proteção adicional pode ou não pode ser obtido de uma fonte externa de gás ou mistura de gases de proteção.

Junto com os ingredientes do fluxo (formação da escória, desoxidantes e estabilizadores do arco), a alma de um eletrodo do processo tubular pode incluir adições metálicas. Eletrodos podem ser auto protegido ou eles podem requerer uma proteção gasosa. Dependendo da forma da escória formada, o arco pode alcançar ou penetração profunda ou superficial.

A inclusão de fluxo no eletrodo torna o processo altamente versátil, sendo que ele tem a vantagem adicional de continuamente alimentar o material de deposição. Os materiais da alma do eletrodo podem ser variados para ajustar a composição química do metal de solda ou controlar a taxa de resfriamento, como é feito com fluxos nos eletrodos para processo de eletrodo revestido. O processo combina as melhores características do processo de eletrodo revestido com o processo com proteção gasosa [AWS, 1998].

2.10.3 Soldagem com Eletrodo Sólido e Proteção Gasosa (MIG/MAG)

O processo de soldagem com proteção gasosa, é um processo que produz coalescência de uma peça em trabalho e um eletrodo alimentado continuamente (arame) através do aquecimento com

um arco elétrico. Uma fonte externa de gás ou mistura de gases fornece a proteção para o arco elétrico. Pela variação da tensão de soldagem e da velocidade do arame, e em alguns casos pelo gás de proteção, este processo pode produzir alto calor adicionado, excelente penetração e altas taxas de deposição. O processo pode também ser variado para produzir soldas de mínima penetração ou mínimo calor adicionado, tanto quanto pode ser usado soldagem fora de posição.

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 a 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 com modos de transferência de baixo aporte de calor são usados para a maioria das soldagens em ferro fundido.

A soldagem MIG/MAG de ferro fundido é normalmente acompanhado pelo uso de materiais de deposição tipo ERNiFeMn-CI. Todos os modos de transferência metálica podem ser usados na soldagem do ferro fundido [AWS, 1998; MACHADO, 1994].

2.11 Revestimento Superficial

A Tabela 2.2 apresenta os diversos tipos de processos de revestimento superficial existentes:

Tabela 2-2 – Processos e Materiais de Revestimento Superficial Básico

Fonte : AWS

Processo	Modo de Aplicação	Forma Material de Revestimento
Gás Oxiacetilênico (OFW)	Manual ou semiautomático	Pó, barras e eletrodos tubulares
Eletrodo Revestido (SMAW)	Manual	Eletrodo revestido, eletrodo sólido e eletrodo tubular
Arame Tubular (FCAW)	Semiautomático ou automático	Eletrodo composto de capa metálica e pó
Soldagem c/ Proteção	Semiautomático ou automático	Barra sólida e eletrodo tubular
Arco Submerso (SAW)	Automático	Barra sólida e arames tubulares
Solda TIG (GTAW)	Manual ou automático	Pó, barras sólida e arames tubulares e eletrodos de ferro em barra
Soldagem Plasma (PAW)	Automático	Pó, barras sólida e arames tubulares

2.11.1 Processos de Endurecimento Superficial

Conceitos Fundamentais

O revestimento superficial é definido na AWS A3.0, *Standard Welding Terms and Definitions*, como “A aplicação por soldagem, brasagem ou aspensão térmica, de uma camada ou camadas de material sobre uma superfície a fim de obter propriedades ou dimensões desejadas” [AWS, 1998].

Os processos superficiais podem ser agrupados como:

- depósito de material superficial para aumentar a resistência à corrosão ou ao calor (“*cladding*”);
- depósito de material para atingir dimensões requeridas (“*buildup*”);
- depósito de um material superficial a fim de preparar a superfície para outra aplicação de solda (“*buttering*”);
- material superficial depositado por soldagem para reduzir o desgaste (“*hardfacing*”) [AWS, 1998].

Em aplicações de revestimento superficial, uma camada de material é aplicada para reduzir o desgaste pelo aumento da resistência de um metal de superfície a abrasão, impacto, erosão, danificação ou cavitação.

Além das características do material superficial e do metal base, outras importantes considerações devem ser levadas em conta na escolha do método ideal de revestimento, como:

- geometria da peça a ser revestida;
- custo do material e da mão de obra;
- técnicas para prevenir trincas na superfície;
- técnicas para minimizar distorções de tensões térmicas de soldagem;
- qualidade do depósito.

Quando comparado com outros processos de revestimento o revestimento superficial por soldagem apresenta as seguintes vantagens:

- resistência adicional ao desgaste ou a corrosão exatamente onde ela é necessária;
- possibilidade de aplicações em campo;
- uso econômico de ligas caríssimas;
- deposição de uma camada de superfície dura para resistir ao desgaste, sobre uma base resistente a solicitações de cargas.

O comportamento do desgaste abrasivo de diferentes materiais de revestimento depositados em ferro fundido cinzento, foram estudados por Chatterjee e Pal (2003). Os resultados mostraram que, diferentes materiais de revestimento assim como variações nos procedimentos de soldagem usando materiais de adição similar tem muitos efeitos na resistência a abrasão do depósito. Tais efeitos na resistência a abrasão são principalmente atribuídos a variação na composição química do depósito e sua microestrutura. O conteúdo de carbono é um importante fator que determina a microestrutura de tais revestimentos superficiais e em consequência, sua resistência ao desgaste. Além disto, o comportamento do desgaste também indicou que a resistência ao desgaste abrasivo não está simplesmente relacionado a dureza do depósito mas também é determinado pelos carbonetos e pela estrutura da matriz do depósito [Chatterjee, 2003]

J. KOHOPAA, H. HAKONEN e S. KIVIVUORI, analisaram em Seu trabalho “*Wear Resistance of Hot Forging Tools Surfaced by Welding*”, a resistência ao desgaste de diferentes tipos de revestimentos em ferramentas de forjamento a quente [KOHOPAA, 1989].

Efeitos das Variáveis de Soldagem na Diluição

A maioria dos métodos de endurecimento superficial utiliza processos de soldagem com eletrodo consumível para depositar material com determinadas características sobre um substrato. Diluição é a mudança na composição química na solda de um material de deposição causada pela

mistura do metal base ou prévio metal de solda no cordão de solda. É medido pela porcentagem de metal base ou prévio metal de solda no cordão de solda.

Devido à importância da diluição, é necessário que o efeito de cada variável da soldagem por eletrodo consumível seja conhecido. Muitas das variáveis de soldagem que afetam a diluição, e portanto requerem um bom controle no revestimento, não necessitam ser controladas quando é uma soldagem de união. [AWS, 1998]

Variáveis de soldagem que afetam a diluição

Corrente de soldagem

Aumentando a corrente de soldagem aumenta a diluição. O arco torna-se mais duro e mais quente, penetrando mais profundamente e fundindo uma quantidade maior de metal base.

Polaridade

Corrente contínua com eletrodo negativo (CCEN) - proporciona menor penetração resultando em uma menor diluição do que em corrente contínua com eletrodo positivo (CCEP). Alternando a corrente proporciona-se uma diluição intermediária entre CCEN e CCEP .

Tamanho do eletrodo

Eletrodos menores implicam em menores correntes de soldagem, como regra, e conseqüentemente menor diluição. Em soldagem com proteção gasosa, para uma dada corrente, eletrodos de maior diâmetro (e menores densidades de corrente) significam menor diluição se os eletrodos maiores resultam em transferência por *spray*. Em outros processos de soldagem os resultados podem variar.

Extensão do eletrodo (“*stick-out*”)

Para processos com eletrodo consumível, um longo *stick-out* diminui a diluição pelo aumento da taxa de deposição do eletrodo e difunde a energia do arco assim que ela colide no metal base. Opostamente, um pequeno *stick-out* aumenta a diluição, dentro dos limites.

Velocidade de soldagem

A diminuição na velocidade de soldagem diminui a quantidade de metal base fundido e aumenta a quantidade de material de revestimento adicionado, por unidade de tempo ou distância, diminuindo a diluição. Esta redução na diluição é induzida pela mudança na forma e tamanho do cordão e pelo fato de que a força do arco é despendida na poça de fusão ao invés do metal base.

Posição de soldagem e inclinação do trabalho

A posição de soldagem na qual o revestimento é aplicado tem uma importante influência na quantidade de diluição obtida. Dependendo da posição de soldagem ou inclinação de trabalho, gravidade fará com que a poça de fusão ande mais à frente, se mantenha sob ou ande mais atrás do arco. Quanto mais a poça fique a frente ou sob o arco, menor será a penetração no metal base e menor será a diluição; além disso, a poça age como uma forração, absorvendo um pouco da energia do arco antes dele atingir o metal base. Esta absorção de energia do arco achata e esparrama a poça e também, o cordão de solda. Se a poça for tão longe à frente do arco terá fusão insuficiente do revestimento do metal base e a fusão não acontecerá.

A ordem da diminuição da diluição para a posição de trabalho é como segue:

- vertical ascendente (a maior diluição)
- horizontal
- plano inclinado ascendente
- plano sem inclinação
- plano inclinado descendente (a menor diluição).

A grande maioria dos revestimentos, são obtidos na posição plana. Soldagens ascendentes ou descendentes podem ser obtidas pela inclinação da peça a ser revestida ou pela aplicação de soldas distantes do centro em peças cilíndricas.

Proteção do arco

A proteção média, gás ou fluxo, tem um efeito importante na diluição. Ela influencia a fluidez e a tensão superficial da poça de fusão. Estes, por sua vez, determinam a extensão na qual o metal de solda irá atingir o metal base e misturar com as bordas do cordão de solda, formando uma boa forma

do cordão de solda. A proteção média também possui um significativo efeito no tipo de corrente de soldagem que pode ser usado. A lista abaixo ranqueia, em geral, o decréscimo da diluição com os diferentes tipos de proteção média.

- gás hélio (mais alta diluição);
- fluxos granulares sem adição de liga;
- gás dióxido de carbono;
- gás argônio;
- fluxos granulares com adição de liga (mais baixa diluição).

Metal de revestimento auxiliar

A adição de metal de revestimento (além do eletrodo) a poça de fusão durante o revestimento pode grandemente reduzir a diluição. O metal extra, adicionado separadamente como pó, arame, nu ou com fluxo, reduz a diluição pelo aumento da quantidade total de metal de revestimento e reduzindo a quantidade de metal base que é fundida. Isto é resultado do uso de parte da energia do arco para fundir o metal do revestimento auxiliar e não o metal base. Quanto maior for a quantidade de metal de revestimento adicionado, menor a diluição [BRANDI, 1992; AWS, 1998; AWS, 1981; MACHADO, 1994].

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A Figura 3.1 mostra a seqüência metodológica aplicada neste trabalho.

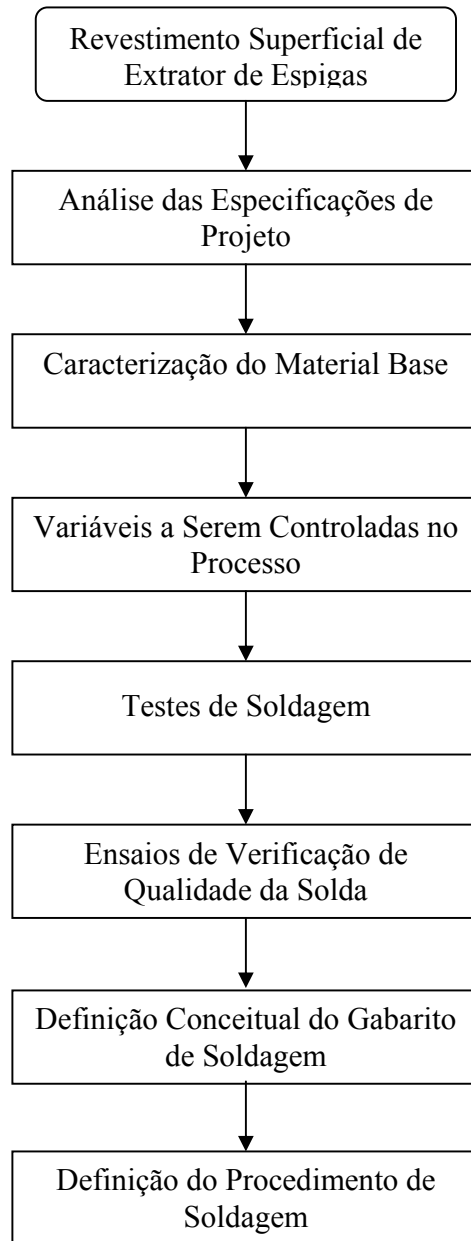


Figura 3.1 - Seqüência da Metodologia Experimental

A primeira etapa do trabalho prático corresponde à análise e entendimento de todos os requisitos de projeto, esta análise deve ser executada nas documentações de projeto, tais como desenhos de engenharia.

A caracterização do material base deverá ser executada através de ensaios de metalografia e medições de dureza. Estas medições deverão se executadas em uma amostra retirada de uma peça e os resultados da mesma deverão ser confrontados com a especificação do material base.

As variáveis a serem controladas no processo de soldagem deverão ser previamente definidas de acordo com as especificações do projeto e os itens de controle de qualidade exigidos pelo cliente.

Testes de soldagem a serem realizados nas amostras deverão ser cuidadosamente preparados a fim de obter dados das variáveis importantes e que influem no resultado final do processo.

Os ensaios de verificação das características principais deverão ser conduzidos de acordo com os procedimentos padrão de preparação e análise de amostras de matérias.

O gabarito de soldagem é uma etapa do processo importante na obtenção do resultado final adequado com as exigências de qualidade e repetibilidade. Portanto, parâmetros e variáveis observados nos testes iniciais serão valiosos para definição do conceito final do gabarito de soldagem.

Finalmente, um procedimento de soldagem (FPS= Folha de Processo de Soldagem) deverá ser elaborado para orientação dos operadores na execução do revestimento em processo produtivo.

3.1 Extrator de Espigas de Milho

O item fundido “extrator de espigas”, compreendem componentes das plataformas para colheita de milho das colheitadeiras John Deere, Figura 3.2. A função destas peças é a de “extrair” as espigas de milho das plantas.

Devido à grande abrasividade das plantas, nesta nova configuração do produto foi especificada pela engenharia do produto a necessidade de revestimento superficial (“*hardfacing*”) sobre as aletas longitudinais da peça, conforme detalhe na foto da Figura 3.3.



Figura 3.2 – Plataforma para Milho – Colheitadeira John Deere

Fonte : JDB

3.2 Especificações de Projeto

O projeto do item contém as informações necessárias que deverão ser controladas para a correta aplicação do revestimento superficial na peça, as quais são:

3.2.1 Recuperação do Revestimento Superficial

- Para recuperação do fundido, o material da solda e a área adjacente devem ser compatíveis com o metal base nodular;
- Para a recuperação do revestimento, a solda e a área adjacente deve ser resistente ao desgaste;
- A área soldada deve estar conforme às dimensões do desenho;
- Áreas usinadas não devem ser afetadas. Não é permitido respingo de solda nas superfícies acabadas;



Figura 3.3 – Peça com a Solda de Revestimento Aplicada nas Aletas

Fonte : JDB

3.2.2 Material do Revestimento Superficial

- Usar material de revestimento tipo ferro-carbono-cromo. A liga de revestimento (material de adição) estará sujeito a aprovação da engenharia de materiais;
- Dureza mínima do revestimento superficial de 58 HRC;
- Mínimo conteúdo de carboneto cromo pró-eutetóide pode ser de 10%;
- Trincas no depósito são permitidas mas as mesmas não podem prolongar-se para dentro do metal base. Devem ter uma dimensão máxima de 2,5 mm e não poderá ter uma quantidade maior do que 7;

3.2.3 Comprimento do Cordão

- Nervuras : Revestimento deve seguir através da aleta para produzir um comprimento de 404mm nas 06 aletas;
- Transição da nervura para espiral – 02 posições : revestimento deve se sobrepor e fazer o canto na parte frontal da nervura onde a transição para o espiral começa;

- Frente chanfrada da nervura – 04 posições : revestimento deve sobrepor e fazer o canto onde a transição para a frente do chanfro começa;
- Final da nervura - 06 posições : revestimento deverá iniciar dentro de um espaço de 2,5mm da borda das nervuras;



Figura 3.4 – Peças Revestidas no Produto Final

Fonte : JDB

3.2.4 Largura do Revestimento Superficial

- A largura do revestimento deve ter no mínimo 4,5 B1mm. Deve ser através do perímetro externo ou na extremidade de cada aleta;
- O revestimento não precisa cobrir completamente a aleta em áreas onde o metal base é mais largo do que a largura nominal da aleta;
- Largura do revestimento maior que 4,5mm é permitido, desde que o sobremetal escorra suavemente para o lado da aleta;
- Máxima largura do cordão, devido ao excesso do depósito no final da base é 10mm;

3.2.5 Centragem do cordão de solda

- Cordão de solda deve ser centrado dentro de ± 1 mm da linha de centro da aleta, exceto na área de alimentação do molde onde o cordão de solda deve ser centrado dentro de ± 3 mm da linha de centro da aleta;

3.2.6 Altura do depósito de solda

- A altura do depósito de no mínimo 1,5 mm, ela deve ser contínua ao longo de todo o comprimento de cada aleta, exceto na área de alimentação do molde onde a profundidade do cordão pode ser de 0,75 mm;

3.2.7 Porosidades

Defeitos causados por furos de areia (defeitos do fundido), acúmulo de gás de proteção ou infiltração de ar durante o processo de revestimento será aceito dentro dos seguintes parâmetros :

- Defeitos aleatórios com diâmetros dos furos de até a metade da largura do cordão (2,25mm máximo) é permissível;

3.3 Aprovação do Material de Deposição

Conforme especificado no projeto do item, o material de adição (arame de solda) deve ser da família Stoody® 101 HC ou 100 HC. Este é um arame tubular específico para revestimento duro em ferro fundido.

O arame Stoody® 101HC é uma alta liga ferro-cromo recomendada para aplicações sujeitas a abrasão severa e moderado impacto e calor. Apresenta excelente resultado em dimensões estreitas e é frequentemente usado para aplicações envolvendo severa abrasão metal-terra. Geralmente limitada para dois passes. O metal de solda não é usinável ou forjável e podem ser usados em aplicações de desgaste a quente até 482°C, dados de regulagem de parâmetros para este consumível são apresentados na Tabela 3.1.

Procedimentos de Soldagem/Características – Polaridade reversa DC usando ou contínuo ou ondas. Pode ser aplicado para aço carbono baixa liga e aço manganês. Os arames de diâmetros menores podem ser usados em soldagens fora de posição usando velocidade relativamente altas e sem oscilação. A adição de gás CO₂ com arame de 1,6mm de diâmetro reduz a quantidade de respingos e melhora o desempenho para soldagens fora de posição.

Aplicações: bordas de pás, faca de corte, lâminas de corte, dentes e colunas de despedaçador, pás de escavadeiras, revestimentos de conchas, equipamentos de plantio, revestimento de sem-fins e parafuso propulsor.

Composição Nominal

Conteúdo de liga – 26% (cromo, carbono, manganês, silício)

Base – ferro

Propriedade Mecânica Típica (Dureza Rockwell)

- 01 camada (1 passe) em metal base de 0,20%C => 55-58 HRc
- 02 camadas (2 passes) em metal base de 0,20%C => 62-64 HRc
- 01 passe em aço médio carbono => 55-64 HRc
- 02 passes em aço médio carbono => 59-64 HRc
- em aços de médio carbono => levemente magnético
- em aços ao manganês => magnético

Principais Parâmetros de Soldagem

Tabela 3-1 – Dados Básicos de Soldagem com Arame Stody® 101-HC

Fonte : Stody

Diâmetro Arame	Gás de Proteção	Prâmetros de Soldagem		
		Stick-Out	Amps	Volts
1,2 mm	98% Ar / 2% O ₂ ou 75% Ar / 25% CO ₂	12,5 - 19 mm	150-200	22-26
1,6 mm	Sem proteção gasosa ou CO ₂	12,5 - 25 mm	200 - 260	24 - 28
2 mm	Sem proteção gasosa	19 - 32 mm	225 - 375	24 - 28

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Ensaios de verificação

Para avaliar o desempenho do material de revestimento foram preparados corpos de prova e foram realizados ensaios de metalografia em amostras preparadas conforme procedimento padrão de preparação de amostra metalográfica. As características analisadas nas amostras foram de penetração, microestrutura, existência de trincas, porosidades no interior do depósito de solda e o comportamento da interface entre o cordão de solda e o material base, ou seja, a zona afetada pelo calor.

4.2 Definição do Processo de Soldagem

A análise do item em questão mostra que para a realização da soldagem, dois movimentos serão necessários:

- movimento giratório da peça, com o objetivo de posicionar a aleta a ser revestida na posição plana superior;
- movimento longitudinal da tocha de soldagem ou da peça, a fim de realizar o depósito de solda em toda a extensão longitudinal superior das aletas.

Para o movimento giratório, pode-se optar por atuação manual ou automatizada. Já para o deslocamento longitudinal, obrigatoriamente deve ser automatizado pois a velocidade de soldagem é uma variável muito importante no processo de soldagem e para obter boa qualidade, deve-se ter o controle desta variável.

Com o auxílio de um equipamento porta-tocha portátil de deslocamento longitudinal constante, realizou-se os testes iniciais a fim de avaliar o comportamento das principais variáveis e o desempenho do depósito de solda sobre a peça fundida.

4.3 Gabarito de Soldagem

A definição conceitual do dispositivo de soldagem envolveu a análise de várias hipóteses para as formas de deslocamentos (rotação da peça e deslocamento longitudinal da tocha de soldagem).

A primeira definição foi a de que, para o deslocamento longitudinal, a peça deveria ficar parada e a tocha deveria deslocar-se.

Definição da Opção 01

A opção 01 considerava a total automação do processo de soldagem. Para este caso, o trabalho do operador (soldador) consistiria em alimentar o sistema com as peças e monitorar o funcionamento do dispositivo de solda. Conceitualmente, seria feito uso de elementos eletromecânicos para realizar e controlar os movimentos. Um servo-motor com fuso de esferas realizaria o deslocamento longitudinal da tocha. Outro servo-motor faria o giro da peça após finalização de cada cordão de solda. Para sincronizar os movimentos seria necessário um CLP programável com sensores de contato nos finais de curso. Possivelmente, com este conceito seria atingido um alto grau de automação com grande produtividade.

Definição da Opção 02

Nesta opção analisou-se a possibilidade de realização dos movimentos com auxílio de elementos hidráulicos. Uma unidade hidráulica corretamente especificada proporcionaria a vazão de óleo necessária para realizar o deslocamento controlado de um cilindro hidráulico, no qual estaria acoplado um suporte para a tocha de solda e outro cilindro hidráulico para travar a peça com a aleta a ser soldada na posição superior. O controle da velocidade de deslocamento longitudinal seria proporcionado por válvulas controladoras de vazão. Neste conceito, o deslocamento longitudinal seria hidráulico e o giro das peças seria manual com travamento hidráulico.

Definição da Opção 03

Semelhantemente ao conceito da opção 02, neste conceito foi considerado a possibilidade de realização dos movimentos com auxílio de elementos pneumáticos. Um compressor corretamente especificado proporcionaria a vazão de ar comprimido na pressão ótima de trabalho para realizar o deslocamento controlado de um cilindro pneumático, no qual estaria acoplado um suporte para a tocha de solda. O controle da velocidade de deslocamento longitudinal seria proporcionado por válvulas controladoras de vazão. O cilindro de deslocamento longitudinal, poderia ser de dupla ação

para proporcionar a soldagem nos dois sentidos de deslocamento possíveis. Outro cilindro pneumático para travar a peça com a aleta a ser soldada na posição superior. Neste caso o deslocamento longitudinal seria automatizado pneumáticamente e o giro das peças seria manual com travamento pneumático.

Definição da Opção 04

Nesta opção foi considerada a possibilidade de realização dos movimentos com auxílio de um fuso e motor de corrente contínua ou alternada. Um variador de velocidades proporcionaria o controle da velocidade de soldagem. Portanto, o deslocamento longitudinal seria controlado por um fuso no qual estaria acoplado um suporte para a tocha de solda. Para o travamento da peça, poderia ser usado um cilindro pneumático ou uma trava mecânica com pino e mola. A diferença entre este conceito e o conceito da opção 01 é de que aqui seria montado o sistema com as peças individualmente, enquanto que na opção 01, o sistema seria adquirido como uma solução pronta.

4.4 Fonte de Soldagem

Uma fonte de soldagem semi-automática de tensão constante seria a fonte mais adequada para esta aplicação de solda. Existe uma variedade bastante grande de fontes a disposição no mercado, mas esta configuração do equipamento cumpriria com qualidade adequada a execução da soldagem.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características Macroscópicas do Revestimento

A análise visual do revestimento mostra que o processo utilizado resultou em um cordão de solda de boa qualidade. O aspecto externo da solda apresenta uma boa aparência, conforme pode ser visto na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Aspecto Visual da Solda

As características externas “largura e altura” da solda de revestimento foram aferidas com instrumento de medição padrão, tais como paquímetro e os resultados mostraram conformidade com as especificações de projeto, Figuras 5.2 e 5.3.

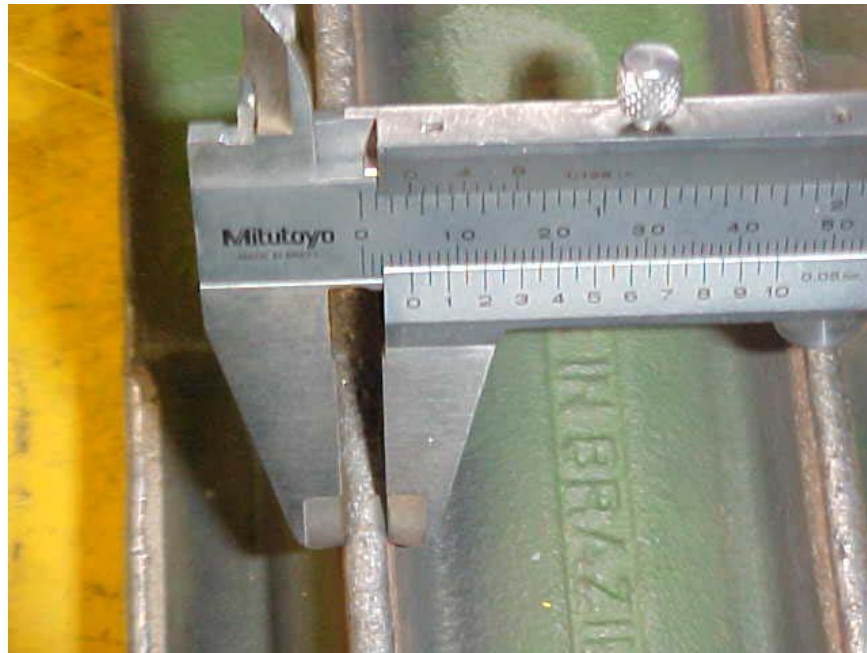


Figura 5.2 - Largura do Cordão de Solda



Figura 5.3 - Altura do Cordão de Solda

5.2 Microestrutura da Zona Soldada

A análise da microestrutura do revestimento superficial em corpos de prova mostra que :

- Região A => microestrutura do cordão de solda. Apresenta dureza de 59 HRc;
- Região B => microestrutura na região de fusão. Apresenta uma matriz martensítica e a dureza está entre 58 e 59 HRc;
- Região C => microestrutura na zona afetada pelo calor. A matriz é martensítica e a dureza está entre 57 e 58 HRc;
- Região D => microestrutura do metal base. Apresenta matriz perlítica, típica do ferro fundido nodular SAE D5506 com dureza de 255 Brinell (aproximadamente 25 HRc).

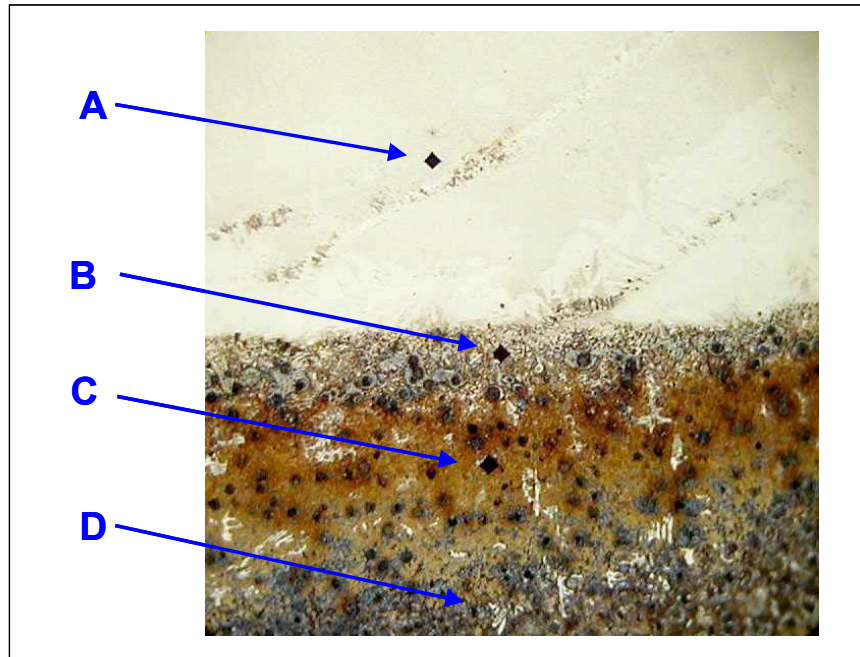


Figura 5.4 - Microestrutura dos Corpos de Prova

Fonte : Laboratório de Materiais JDB - Ampliação de 100 X

5.3 Trincas Transversais

A análise das trincas que ocorrem mostraram que todas elas aparecem na posição transversal e que a mesma não avança para dentro do metal base, mas ocorre em toda a extensão do cordão de revestimento superficial, conforme pode ser visto na Figura 5.5.

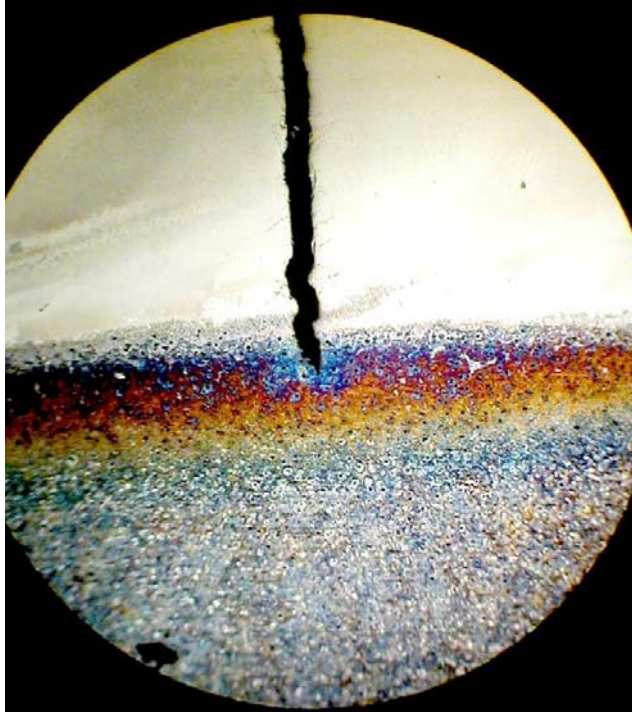


Figura 5.5 - Detalhe da Trinca no Cordão de Revestimento

Fonte : Laboratório de Materiais JDB – Ampliação 50 X

5.4 Testes de Soldagem

A foto da Figura 5.6 ilustra a preparação de equipamentos para a realização destes testes.

Os equipamentos utilizados foram basicamente uma máquina portátil sobre trilho, suporte para tocha de solda, tocha de soldagem e fonte de solda semi-automática.

Os testes iniciais realizados permitiram-nos definir os parâmetros que deveriam ser controlados assim como conhecer as variáveis mais críticas do processo.

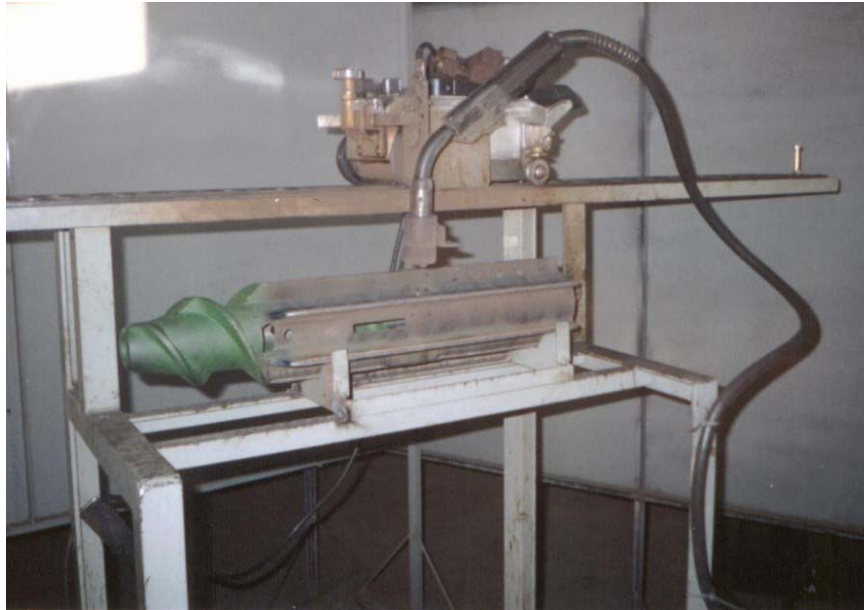


Figura 5.6 – Preparação para Soldagem dos Corpos de Prova

A tensão e a corrente de soldagem é controlada pela fonte de soldagem. A velocidade de soldagem pode ser controlada através do potenciômetro do equipamento portátil. O *stick-out* (distância do bico de contato até a peça a ser soldada) foi definido e fixado. O alinhamento e o nivelamento da peça são as outras variáveis importantes para o processo.

Os resultados iniciais mostraram que o conceito testado poderia ser usado pois as peças de amostra atingiram todas as especificações do projeto.

A aprovação dos testes iniciais permitiu-nos passar para a fase seguinte que compreendia a definição do conceito do dispositivo de soldagem.

5.5 Escolha do Conceito do Dispositivo

A análise para a definição do conceito final envolvia muitas variáveis, dentre as quais podemos destacar a previsão do volume de itens a serem fabricados (dado este fornecido pelo cliente), o custo do dispositivo, confiança no conceito a fim de obter qualidade e repetibilidade na industrialização, tempo de produção por peça, dentre outros.

Baseado nos dados conhecidos, fornecidos pelo cliente e na experiência em projetos de outros dispositivos para a soldagem e acrescentando o suporte técnico assegurado para especificação dos

elementos corretos, foi definida a escolha da opção 3 para a elaboração do projeto e fabricação do dispositivo de soldagem. Este conceito determinava a aplicação de elementos pneumáticos para realização controlada dos movimentos necessários.

A Figura 5.7 mostra uma perspectiva do projeto do dispositivo, proporcionando a identificação dos principais elementos que o compõe.

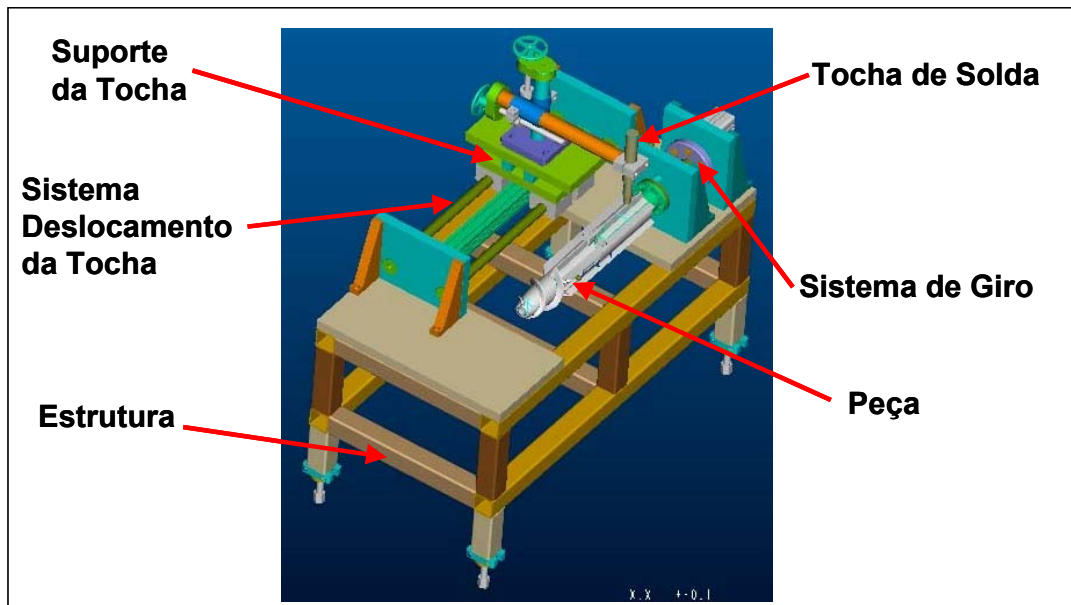


Figura 5.7 – Perspectiva do Dispositivo Proposto

Estrutura tubular com pés de apoio reguláveis a fim de permitir o nivelamento do dispositivo quando em operação.

Elementos de fixação, apoio e movimentos montados sobre uma base de chapa plana (usinagem realizada com uma única centragem).

Suporte para a tocha apoiada sobre guias lineares com o deslocamento através de rolamentos de esferas recirculantes.

Ajustes manuais, através de parafusos, para o deslocamento vertical e transversal da tocha. Estes movimentos são necessários a fim de permitir a correta centragem transversal da tocha sobre a aleta a ser soldada e o correto ajuste do *stick-out* da tocha.

Centragem e fixação da peça sobre um eixo giratório. Este tipo de centragem é possível, pois o item possui usinagem nos diâmetros interno antes da soldagem.

Giro da peça facilitado, pois o mesmo ocorre sobre dois mancais com rolamentos.

Travamento da peça na posição de soldagem através de cilindro pneumático, pino cônico e disco com furos cônicos.

O acionamento do cilindro de deslocamento ocorre através de pedal, sendo o acionamento do cilindro de travamento através de alavanca. Uma unidade reguladora para proporcionar a alimentação da pressão desejada e válvulas reguladoras de fluxo completam os elementos definidos para o dispositivo.

O conceito do dispositivo prevê ainda a instalação de uma régua ajustável com o objetivo de realizar inspeção simultânea em 100% das peças em processo. A especificação de engenharia define que o diâmetro externo do item após a realização da solda de revestimento não pode ultrapassar a dimensão de 117mm. O detalhe da Figura 5.8 mostra o sistema proposto para aferição do diâmetro do diâmetro em 100% dos itens.

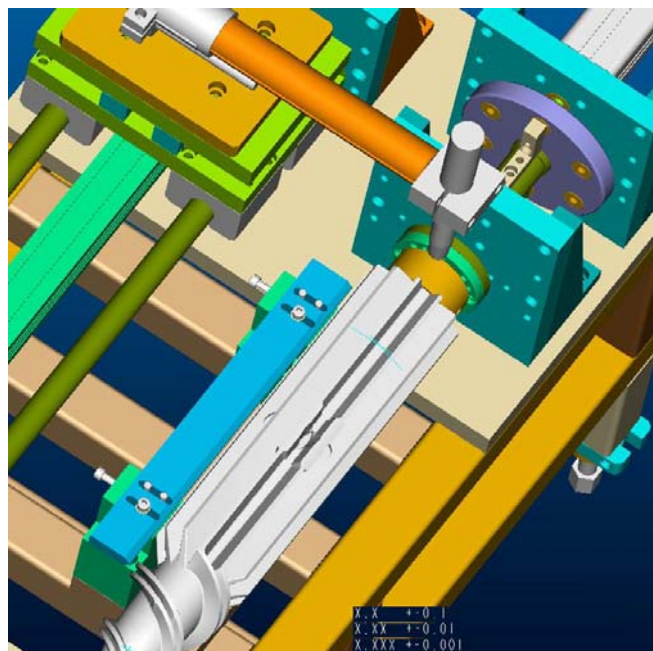


Figura 5.8 - Régua de verificação do diâmetro externo

Após finalizar esta etapa, os esforços foram concentrados na definição dos outros recursos necessários para a definição de todo o ciclo que compreende o processo de soldagem.

5.6 Escolha da Fonte de Soldagem

Após análise das características principais das fontes de soldagem, foi definida a fonte de soldagem de fabricação nacional Pulsarc4000®, Figura 5.9. Esta fonte possui capacidade de 400A para ciclo de trabalho a 60% e de 300A para ciclos de trabalho a 100%. Considerando que a corrente de soldagem está em torno de 200A, ter-se á um coeficiente de segurança quanto a potência requerida.

O cabeçote de alimentação do arame de solda possui 4 roletes, sendo que para o arame tubular de revestimento, os roletes possuem superfície recartilhada. Esta característica proporciona uma melhor alimentação do arame, garantindo desta forma a constância na altura do depósito (exigência do projeto do item).



Figura 5.9 – Fonte de Solda Pulsarc 4000®

5.7 Tocha de Solda

Para a execução do processo de soldagem, a tocha de solda deveria ser adequada para o processo de automação. A tocha de soldagem definida foi o modelo com característica própria para

sistemas automatizados (parte frontal reta), sem refrigeração forçada e com chave para abertura do arco a ser definido conforme a característica de operação do conjunto dispositivo-fonte-peça.

5.8 Gás de Proteção

O processo de soldagem requer a correta escolha do gás de proteção para a manutenção da estabilidade do arco elétrico e proteção da poça de fusão. O fabricante do material de deposição (arame tubular Stoody® 101HC – 1,2mm) sugere o uso de uma mistura de dois gases, sendo um dos gases inerte e o outro ativo. Para o processo de revestimento do item fundido foi definido o uso da mistura comercialmente designada por C25. Esta mistura é composta de 25% de CO₂ e de 75% de Argônio. Testes realizados com esta mistura, mostraram boa proteção da poça de fusão e excelente estabilidade do arco elétrico.

5.9 Procedimento Padrão de Soldagem

Para orientação dos soldadores e afim de garantir a repetibilidade do padrão de qualidade obtido com o sistema, foi elaborado uma folha de processo de solda. A folha de processo de soldagem contém as informações básicas sobre o item, os parâmetros de soldagem e um croqui do item. O Anexo 01 mostra o aspecto final da folha de processo de soldagem.

6 CONCLUSÕES

O estudo para implementação do processo de revestimento superficial em peças fundidas mostrou que :

- o processo de soldagem semi-automático com proteção gasosa composta de 25% de CO₂ e 75% de Ar é adequado para o revestimento superficial do item fundido devido à boa estabilidade do arco obtida e a aparência visual do cordão de solda de revestimento;
- a ausência de pré ou pós-aquecimento na peça causa o aparecimento de trincas transversais no cordão de solda depositado;
- o aparecimento das trincas transversais ocorre somente na parte depositada não avançando para dentro do material base;
- o processo de soldagem testado mostrou adequada penetração do revestimento no metal base;
- o controle dos parâmetros de solda, tais como, *stick-out*, posição da tocha e velocidade de soldagem são essenciais para manter a homogeneidade do depósito de solda;
- o uso da pneumática como meio de deslocamento longitudinal da tocha de solda não foi aprovada devido à dificuldade de obtenção de baixas e constantes velocidades de deslocamento necessárias para manutenção de arco elétrico estável. O problema aqui era a obtenção de depósitos de solda contínuos de boa qualidade;
- a análise de várias opções conceituais do dispositivo de soldagem proporcionou uma escolha acertada pois permite obter um balanço entre os recursos do dispositivo e as outras variáveis do processo ;
- o uso do arame tubular Stoodly 101 HC é o material de adição adequado pois proporciona boa estabilidade do arco e dureza adequada na faixa de 58 a 62 HRc alcançando desta forma a especificação do projeto;

6.1 Sugestões de Continuidade

- Para minimizar o aparecimento de trincas transversais, considerar a possibilidade de trabalhar com pré e pós aquecimentos na peça a ser soldada, a fim de tornar a curva de resfriamento mais suave;
- Testar o sistema de deslocamentos e giros do dispositivo com auxílio de pneumática, haja visto ser este um sistema menos caro e mais limpo;
- Testar consumíveis de solda de revestimento de fabricação nacional, devido ao fato do consumível atual ser importado e de alto custo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

L-TEC. **Mig Welding Handbook**. Welding and Cutting Systems. Edited by Union Carbide Corporation, 1986. Florence, S.C.

LYTTLE, K.A. & STAPON, F.G. **Select the Best Shielding Gas Blend for the Application**. Paper presented at the AWS Detroit Section Sheet Metal Welding Conference IV, held October 10-12, 1990, in Detroit, Mich.

BRANDI, S. D.; WAINER, E.; MELLO, F.D.H.; **Soldagem - Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher Ltda. 1992, São paulo, SP.

OKUMURA, T & TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, RJ.

AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY. **Cast Irons**. Chapter 8. LeJeune Road, 33126. Miami, Florida. 1998.

LINCOLN ELECTRIC COMPANY. **The Procedure Handbook of Arc Welding**. The Lincoln Electric Company. 22801 St. Clair Avenue. Cleveland, Ohio. 1994.

CARY, HOWARD B. **Modern Technology**. American Welding Society – AWS. Third Edition. Regent / Prentice Hall – Englewood Cliff, New Jersey, 1994.

AWS, AMERICAN WELDING SOCIETY. **The Practical Reference Guide for Hardfacing**. LeJeune Road, 33126. Miami, Florida. 1998.

AWS – Welding Handbook, Fundamentals of Welding, Seventh edition. Volume 1, Editado por Charlotte Weisman. Miami, Flórida, USA. 1981.

FBTS – Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem. **Inspetor de Soldagem**. Editora da FBTS. Volume 1, Fascículo 1. Rio de Janeiro, RJ. 1987.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS. **Metals Handbook – Welding and Brazing**, 8° Ed. Vol. 6, Ohio, USA, 1956.

MACHADO, Ivan Guerra. **Soldagem & Técnicas Conexas**. UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Editora da UFRGS. 1° Ed. Porto Alegre / RS, 1994.

CRAIG, Ed. **Gás Metal Arc & Flux Cored Welding Parameters**. Ed by Ed Braig. Chicago, USA, 1991.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Apresentação de Relatório Técnico-Científico**. NBR 10719. Fórum Nacional de Normalização. Agosto, 1989.

J. KOHOPAA, H. HAKONEN e S. KIVIVUORI, **Wear Resistance of Hot Forging Tools Surfaced by Welding**. Helsinki University of Technology. Finlândia, 1989.

N. REBASA, R. DOMMARCO, J. SIKORA, **Wear Resistance of High Nodule Count Ductile Iron**. Universidade Nacional de Mar del Plata. Argentina, 2002.

RIAHI, A. R., ALPAS. **Wear Map for Grey Cast Iron**. University of Windsor. Canadá, 2003.

STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS I. M. **Wear of Hardfacing White Cast Irons by Solid Particle Erosion**. University of Cambridge. Cambridge, 1995.

CHATTERJEE, S.; PAL, T. K. **Wear Behaviour of Hardfacing Deposits on Cast Iron**. Jadavpur University. Índia, 2003.

ANEXOS

Anexo 01 : Exemplo de Folha de Procedimento Operacional

FOLHA DE PROCESSO DE SOLDA

Item (s) : H150138 / H150139
 Equipamento : TA001 (Tartaruga + Suporte)
 Fonte de Solda : FS001 (Pulsarc 4000)
 Consumível : Arame Stoodly 101 HC
 Gás de proteção : C25 (CO₂ + Ar)

Regulagem do Equipamento

Tensão de soldagem : 23,2 V
 Corrente de soldagem : 155 A
 Regulagem arame : 7,5
 Stick-out : 10 mm
 Vazão gás de proteção : 9 a 11 L/min
 Velocidade de soldagem : 6,5 (regular na tartaruga)

- | Seq. | Operações |
|-------------|---|
| 1. | Lixar a superfície superior da aleta |
| 2. | Posicionar a peça no dispositivo (cfe foto) |
| 3. | Alinhar a tocha com a aleta |
| 4. | Regular fonte de soldagem |
| 5. | Ligar equipamentos |
| 6. | Realizar soldagem da aleta |
| 7. | Repetir para as demais aletas |
| 8. | Tirar peça do dispositivo |
| 9. | Limpar peça |



Preparação da Peça



Aspecto Final da Peça

Elaborador :

Data :