

CRISTIANO MOREIRA DOMINGUES

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECÔNOMICA DE UMA
ALTERAÇÃO DE PROCESSO DE COMPONENTE DE SEMEADORA

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Esmerio Mazzaferro

Porto Alegre
2004



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DE UMA ALTERAÇÃO DE
PROCESSO DE COMPONENTE DE SEMEADORA**

CRISTIANO MOREIRA DOMINGUES

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA
DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Prof. Dr. Flávio José Lorini
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Porto Alegre
2004

Dedico este trabalho aos meus pais, Anita e Glicério Domingues.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade e a empresa John Deere que me propiciaram a execução deste trabalho.

Em particular aos laboratórios de soldagem e técnicas conexas, GPFAl, laboratório de usinagem e laboratório de metalurgia física e aos inúmeros colegas e professores pela troca de idéias no decorrer do trabalho.

DOMINGUES, C. M. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de uma Alteração de Projeto de Componente de Implemento Agrícola**. 2004. f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

RESUMO

Este trabalho busca, através de uma alteração de processo, reduzir o custo de fabricação de um componente mecânico de um implemento agrícola. A alteração prevista consiste em trocar uma união parafusada, por uma união por soldagem, visando fundamentalmente reduzir custos de produção associados às operações. As peças a serem soldadas são de materiais dissimilares e de difícil soldabilidade, trata-se da união de um ferro fundido nodular com uma peça de aço médio carbono. Estudar-se-á a viabilidade técnica e econômica desta alteração. Foram executadas soldas utilizando dois metais de adição distintos: eletrodo revestido ER7018 e arame NiFe-2. A qualidade do metal de solda resultante foi verificada através de inspeção visual, análise metalográfica e medição de dureza. Os resultados indicam a possibilidade de utilização do arame para realização das soldas em questão. Economicamente a alteração apresenta um ganho, pois a união através de soldagem do conjunto resulta em menores custos comparada a união parafusada.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem, Ferro Fundido; Aço Médio Carbono, Soldagem de Materiais Dissimilares, Máquinas Agrícolas.

DOMINGUES, C. M.. **Technical and Economic Evaluation of a Change in the Manufacturing Process of na Agricultural Machine Component**. 2004. 22f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

ABSTRACT

The main aim of this work is to propose a change in the manufacturing process on an agricultural machine satisfying project requirement and reducing production costs. It was proposed to change a screw connection by a welded joint. The joint is composed by two different base metals: nodular cast iron and meddium alloy steel. The following filler metals were tested: a ER7018 shielded metal and a NiFe-2 MIG/MAG wire. The weld metal quality was verifies by visual inspection, metalografic analysis and hardness measurement. The best results werw observed to the joints welded with the NiFe-2 wire, indicating that is possible to produce sound weld metals. This change in manufacturing process reduces the production costs of this component.

KEYWORDS: Weldability, Nodular Cast Iron; Medium Alloy Steel, Dissimilar Weld Metals; Agricultural Machine.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1. Ferro Fundido.....	9
2.1.1. Ferro Fundido Nodular.....	9
2.1.2. Soldabilidade do Ferro Fundido Nodular.....	9
2.1.2.1. Microestrutura de Soldagem.....	9
2.1.2.2. Porosidade e Falta de Aderência na Solda.....	10
2.1.2.3. Preparação e Técnicas Operacionais de Soldagem.....	11
2.1.2.4. Pré e Pós-Aquecimento.....	11
2.2. Aço Liga Médio Carbono.....	11
2.2.1. Soldabilidade de Aço Liga Médio Carbono.....	12
3. PROJETO DA JUNTA.....	13
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	13
4.1. Primeiro Ensaio.....	13
4.2. Segundo Ensaio.....	14
4.2.1. Microestrutura da Junta Soldada.....	14
4.2.2. Microdureza dos Corpos de Prova.....	15
4.3. Terceiro Ensaio.....	16
4.3.1. Microestrutura da Junta Soldada.....	17
4.3.2. Microdureza dos Corpos de Prova.....	17
4.4. Quarto Ensaio.....	18
4.4.1. Microestrutura da Junta Soldada.....	18
4.4.2. Microdureza dos Corpos de Prova.....	18
4.5. Quinto Ensaio.....	18
4.5.1. Microestrutura da Junta Soldada.....	19
4.5.2. Microdureza dos Corpos de Prova.....	19
4.6. Sexto Ensaio.....	20
4.6.1. Microestrutura da Junta Soldada.....	20
4.6.2. Microdureza dos Corpos de Prova.....	20
4.7. Energia de Soldagem Utilizada nos Ensaios.....	21
5. VIABILIDADE ECÔNOMICA.....	21
6. CONCLUSÃO.....	21
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	22
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22
9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	22

1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje a procura pela redução de custo na fabricação de um componente é fator essencial nas empresas, pois isto influi no preço final do produto. Com o mercado cada vez mais competitivo há a necessidade de se aliar o custo e a qualidade do produto. Com este intuito são utilizadas diversas técnicas para dimensionar a parte do projeto que necessita ser atacada visando esta redução. Através da análise de valor pode-se chegar ao componente ou processo que está agregando muito valor ao produto final.

Este trabalho visa avaliar a viabilidade técnica e econômica de uma alteração no processo de fabricação de um componente mecânico, mantendo suas mesmas funções e não alterando seu desempenho.

O produto em questão trata-se de uma semeadora de plantio direto, implemento utilizado para efetuar o plantio sem a necessidade de preparo do solo antes da aplicação das sementes. A semeadora é dividida em linhas, e cada uma dessas linhas é composta de um disco de corte, que tem a função de limpar a área a ser semeada, após tem-se a opção de utilizar hastes, discos concêntricos ou discos duplos desencontrados, que têm a função de abrir o sulco para aplicação do adubo e posteriormente a sua deposição, na sequência encontram-se dois discos desencontrados para abertura do sulco e deposição da semente, e por fim há duas rodas em ângulo com a função de fechamento do sulco.

O componente foco deste trabalho tem a função de abrir o sulco para deposição de adubo e localiza-se atrás do disco de corte da semeadora. Trata-se do suporte do sulcador mostrado na figura 1, peça fabricada em ferro fundido nodular que é ligada a dois eixos de aço 4340, mostrados na figura 2, por meio de união parafusada, estes eixos suportam os dois discos desencontrados. O suporte do sulcador, por apresentar uma geometria complexa, necessita ser usinado em uma máquina de comando numérico para construção da rosca, o que agrega custo ao produto, pois a operação de usinagem se torna cara.

A alteração proposta consiste na substituição da união do suporte com os eixos que está sendo feita por meio de união parafusada por uma união por soldagem, eliminando assim a necessidade de usinagem do suporte do sulcador. Esta união através de soldagem, em função das características dos materiais e dos requisitos mecânicos, principalmente a tenacidade, torna o processo bastante complicado.



Figura 1: Suporte do sulcador



Figura 2: Eixos

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. *Ferro Fundido*

Os ferros fundidos são ligas contendo basicamente ferro, carbono variando de 2 a 4,5%, silício de 0,5 a 3%, e até 1% de manganês. 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 de propriedades mecânicas inferiores.

As propriedades mecânicas do ferro fundido dependem da microestrutura e distribuição dos elementos constituintes, principalmente a grafita livre. Com base nestas características, os ferros fundidos são classificados segundo o formato e distribuição desta grafita. O ferro fundido é produzido com a adição de carbono, durante a solidificação uma parte desse carbono se dissolve em cementita ou grafita, a forma com que esta parte se apresenta é determinada pela composição química e taxa de resfriamento. Se a taxa for alta se solidificará como cementita e se for baixa, como grafita.

2.1.1. *Ferro Fundido Nodular*

A adição de elementos nodularizantes, como o magnésio faz com que o carbono se solidifique como pequenas esferas o que faz com que ocorra mínima interrupção na continuidade da matriz metálica.

Apresentam alta fluidez, contração inferior, além de serem mais resistentes e mais dúcteis do que os ferros fundidos cinzentos.

O ferro fundido utilizado para fabricação do suporte do sulcador é um ferro fundido nodular SAE J434, classe D5506, composto de 3,2 a 4,1% de carbono, 1,8 a 3% de silício, 0,1 a 1% de manganês, 0,015 a 0,1% de fósforo e 0,005 a 0,035% de enxofre, apresentando matriz ferrítica-perlítica, dureza de 187-255 Brinell, resistência à tração de 552 MPa, limite de escoamento de 379 MPa e um alongamento em 50mm de 6%.

2.1.2. *Soldabilidade do Ferro Fundido Nodular*

Os processos de soldagem envolvem aplicação de calor, com ou sem uso de metal de adição, para produzir uma união localizada. O rápido aquecimento e resfriamento do metal 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 parte normalmente mais crítica na soldagem, no caso dos ferros fundidos, é o material que circunda a solda, a zona afetada pelo calor (ZAC), região que não fundiu, mas foi de alguma forma afetada pela energia térmica aportada pelo processo.

2.1.2.1. *Microestrutura de Soldagem*

Segundo Paris (2003), uma das dificuldades, senão a principal na soldagem de ferros fundidos, é a sua tendência para formar microestruturas duras e frágeis na zona afetada pelo calor. O carbono do metal fundido resfriado se separa como constituinte livre, e a quantidade e forma resultantes dependem da velocidade de resfriamento. A estrutura da zona afetada pelo calor é complexa, normalmente consiste de uma mistura de martensita, austenita, carbonetos primários e eutéticos.

Estas estruturas se formam devido à influência do calor do arco e do metal fundido do cordão, uma zona estreita, adjacente ao metal de 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 rica em carbono. À medida que o metal de solda e a zona afetada pelo calor 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; isto acontece em fração de segundos.

No caso de ferros fundidos nodulares, a zona afetada pelo calor consiste de uma zona de fusão (ou linha) imediatamente adjacente ao cordão de solda, uma segunda zona que foi aquecida acima da temperatura eutética e finalmente uma terceira zona, adjacente ao metal de base, não afetado, que foi aquecido acima da temperatura eutetóide, mas abaixo da temperatura eutética. A segunda zona é a área na qual carbonetos frágeis podem se formar. Após a solidificação, a área ao redor de um nódulo é composta de carbonetos, ferrita, perlita, bainita e martensita. A quantidade e tipo de fase formada dependem do aporte de energia, taxa de resfriamento e composição do metal base.

Mesmo o recozimento após a solda não fará com que o metal de solda atinja a tenacidade e ductilidade do metal base, pois persiste sempre uma fina distribuição de partículas de grafita secundária na zona afetada pelo calor. Na soldagem empregando eletrodos de aço baixo carbono, a grafita e o carbono combinados do ferro fundido, mais o ferro e carbono do aço, diluem-se no metal fundido e uma pequena parte do carbono e silício são queimados. O ferro fundido rapidamente resfriado solidifica-se como uma mistura de austenita e cementita, quando resfriado abaixo de 727°C a austenita muda para perlita. Na temperatura ambiente, a liga consiste de uma mistura de perlita e cementita porque a maioria do carbono livre é retido na forma combinada. Esta estrutura metálica é ferro fundido branco que é muito dura e frágil, não usinável, e formada no metal próximo da interface. Além da interface, a estrutura é formada de martensita e, mais afastado, o metal de solda é aço de alto teor de carbono. Ambos os constituintes prejudicam a usinabilidade da junta. A área interfacial é uma estrutura complexa que inclui grafita livre, martensita, perlita e alguma ferrita. O ferro fundido branco, na zona da solda, é duro e quebradiço, e quando a junta soldada falha sob tensão é justamente nesta região.

2.1.2.2. Porosidade e Falta de Aderência na Solda

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. Um dos métodos para evitar essa porosidade é o uso de pré-aquecimento, que permite que a massa fundida se mantenha mais tempo no estado líquido e fluída, obturando os espaços. Outro método é a utilização de material de adição mais fluido, que permita o preenchimento das porosidades deixadas pela grafita. Neste aspecto, os eletrodos a base de níquel são recomendados.

Um problema enfrentado na soldagem de ferros fundidos é a falta de aderência, que acontece quando o metal depositado sobre a peça a soldar não molha suficientemente a superfície, formando uma ligação de baixa resistência. Este problema pode ser resolvido com uso de eletrodos à base de níquel, que formam uma liga de melhor qualidade.

2.1.2.3. Preparação e Técnicas Operacionais de Soldagem:

As peças obtidas em ferro fundido estão sob esforços internos, em razão do resfriamento diferenciado em suas diversas seções. Associa-se a essas tensões residuais a precipitação de grafita livre, que torna o ferro fundido frágil. Esta falta de ductilidade dos ferros fundidos é um fator que contribui para a dificuldade operacional de soldagem.

Os limites de aplicação do tipo de junta dependem de cada caso, mas sugere-se a aplicação de juntas tipo V ou tipo U.

Na soldagem de ferro fundido o primeiro passe é crítico para obtenção de soldas sem defeitos. Para minimizar o aporte de energia e diminuir a taxa de diluição é importante a escolha do formato do cordão. A largura do cordão não deve ser maior que três vezes o diâmetro do eletrodo, o normal é depositar cordões sem tecimento para evitar aquecimento excessivo da peça, e estes cordões devem ser executados com comprimento curto. O metal adjacente à solda nunca deve atingir a cor vermelho cereja, pois atingiria a zona de transformação, afetando as propriedades do metal base. Deve-se empregar o menor diâmetro de eletrodo possível, com correntes mínimas e arco médio- longo para minimizar a diluição. Como o aço se contrai mais que o ferro fundido, no caso da soldagem com eletrodos de aço, o cordão trincar-se-á, podendo mesmo ser destacado da peça. Para superar esta dificuldade, os cordões devem ser depositados em caminhos curvos em vez de retos.

2.1.2.4 Pré e Pós-aquecimento

A necessidade de pré aquecer as peças depende de seu tamanho e forma geométrica, do grau de distorção aceitável, tipo de ferro fundido e do metal de deposição. A utilização desta técnica permite reduzir o gradiente térmico formado entre o metal de solda em altas temperaturas e as regiões adjacentes em baixas temperaturas. O pré-aquecimento previne a formação de trincas, reduzindo tensões residuais e distorções, diminui as taxas de resfriamento, mas em contrapartida, aumenta diluição, alarga a zona de fusão e a zona afetada pelo calor e pode aumentar a formação de uma rede de carbonetos contínuos duros na linha de fusão. O controle do pré-aquecimento é essencial para evitar a formação da martensita e os problemas associados com a grafitização secundária.

Nos ferros fundidos nodulares nem sempre o pré-aquecimento é benéfico ou necessário. Para situações em que altas tensões térmicas são prováveis, a temperatura deve ser baixa, da ordem de 150 a 180°C. Para temperaturas mais altas, acima de 315°C, carbonetos contínuos são formados ao longo da linha de fusão, reduzindo as propriedades mecânicas.

Com tratamento térmico pós-soldagem as superfícies duras podem ser levemente amaciadas, mas não se restaura a ductilidade e tenacidade total da zona afetada pelo calor.

2.2. Aço Liga Médio Carbono

Estes aços apresentam alta quantidade de carbono resultando em uma elevada resistência quando temperados.

Especificamente o aço 4340 é composto de cromo, níquel e molibdênio, tendo cada um uma propriedade importante para a aplicação deste material.

Este tipo de aço apresenta de 0,4 a 0,9% de cromo, que se incorpora ao aço na forma de ferro cromo, a sua influência sobre o aço é baixar a temperatura de transformação da martensita, aumentar a dureza do aço formando carbonetos muito duros e fortalecendo a ferrita, aumentar a resistência à tração, limite elástico, resistência à corrosão e a tenacidade. Este elemento limita o crescimento de grão e retarda a descarbonetação superficial, e eleva a

temperatura crítica do aço para tratamento térmico, mas diminui as velocidades das reações metalúrgicas.

O níquel neste tipo de aço se encontra entre 1,65 e 2% e produz um fortalecimento da matriz ferrítica do aço, melhorando a resistência mecânica e à fadiga e reduzindo a dureza. Ele baixa a temperatura crítica e amplia a faixa requerida para o sucesso do tratamento térmico. Aços com níquel possuem grande temperabilidade e dureza.

O molibdênio se encontra entre 0,2 e 0,3% e se incorpora ao aço na forma ferro molibdênio. O molibdênio aumenta a temperabilidade do aço quando ele aquece a uma temperatura suficiente para difundir os carbonetos. Aumenta a resistência à tração, o limite elástico e a dureza devido ao fortalecimento da ferrita e a formação de carbonetos muito duros, assegurando ao aço finos grãos com o aumento da resistência a fadiga.

O aço utilizado para fabricação dos eixos é um 4340, temperado e revenido, apresentando uma dureza entre 38 e 42 RC, limite de resistência à tração de 1207 MPa, limite de escoamento de 470 MPa, alongamento em 50mm de 22%.

2.2.1 Soldabilidade de Aços Liga Médio Carbono

A zona afetada pelo calor será dura, de baixa tenacidade e susceptível a trinca. É indicado um pré-aquecimento do metal base que pode reduzir a taxa de resfriamento da área soldada, reduzindo a probabilidade de formação de martensita. O pós-aquecimento pode diminuir a taxa de resfriamento da solda ou temperar alguma martensita que tenha se formado.

A temperatura de pré-aquecimento recomendada é de 315 a 370°C, e depende do carbono equivalente, da espessura da junta e do procedimento de soldagem. Um processo de soldagem com consumíveis de baixo hidrogênio é ideal para este tipo de material. Modificações no processo de soldagem como uso de junta tipo V longa ou múltiplos passes também reduzem a taxa de resfriamento e a probabilidade de trinca.

A diluição pode ser minimizada pela deposição de filete sobreposto ou usando procedimento de soldagem que permita pouca penetração. Isso é para minimizar o carbono na base do metal e a quantidade de produtos duros na zona de fusão.

O cálculo do carbono equivalente do aço 4340, partindo da seguinte fórmula:

$$C_{eq} = C + Ni/15 + Cr/5 + Mo/5 \quad (1)$$

Este aço apresenta em sua composição 0,4% de carbono, 1,83% de níquel, 0,5 a 0,8% de cromo e 0,25% de molibdênio, leva a um carbono equivalente entre 0,672 a 0,732%.

Para aços com carbono equivalente acima de 0,6 é recomendável o pré e o pós-aquecimento.

3. PROJETO DA JUNTA

A partir de dados de medições de esforços no eixo do suporte do sulcador, fornecidos pelo fabricante, foi feita uma análise pelo método dos elementos finitos, com auxílio de um programa comercial de simulação, obteve-se um valor máximo de tensão (von Misses) na junta, de 470Mpa.

Partindo desta tensão seleciona m-se o eletrodo revestido e o arame para soldagem pelo processo MIG/MAG a serem utilizados nos ensaios. O eletrodo escolhido é o ER7018 composto de 0,07% de carbono, 0,98% de manganês, 0,55% de silício, 0,013% de fósforo e 0,011% de enxofre, produz metal de solda com mínima resistência a tração de 560MPa. O

aramé a ser utilizado é o DIN NiFe-2 que apresenta uma resistência a tração de 500MPa, e a sua composição é de 58% de níquel, 0,07% de carbono e 41,93% de ferro.

Utilizando o método analítico de dimensionamento das juntas soldadas que considera a solda como uma linha, obtém-se um valor de perna de cordão de 2,38mm para eletrodo revestido E7018 e 2,13mm para arame NiFe.

Define-se o chanfro do tipo V e a junta de filete, devido à dificuldade para se construir dispositivos que possibilitem a soldagem na posição plana.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A empresa forneceu para ensaio seis conjuntos formados de um suporte e dois eixos. Durante a execução dos experimentos todos os cuidados previstos na bibliografia para obtenção de soldas de boa qualidade foram observados. Os chanfros foram usinados em um torno mecânico e a tinta removida com lixa na região a ser soldada. Como as peças vieram conforme são fabricadas atualmente houve a necessidade de remoção da rosca dos eixos, operação também realizada em torno mecânico. As temperaturas da estufa e da peça na hora da soldagem foram medidas com auxílio de um termopar. Nos seis ensaios buscou-se variar parâmetros como a temperatura de pré-aquecimento, diâmetro de eletrodos, controle de resfriamento, sempre de acordo com o resultado do ensaio anterior. Utilizou-se de martelamento pós-soldagem para alívio de tensões. As soldagens foram feitas em passe único; com cada cordão constituído de três segmentos curtos, conforme recomendação bibliográfica. A velocidade de soldagem era controlada pelo soldador para conseguir cordões conforme especificado. O gás utilizado para soldagem pelo processo MIG foi o C25, composto de 75% de argônio e 25% de CO₂, com uma vazão de 15 l/min. Os eletrodos utilizados no processo de eletrodo revestido foram devidamente ressecados em forno antes da soldagem.

Após a soldagem as peças foram cortadas para confecção de corpos de prova para análise da microestrutura e microdureza. Os corpos de prova foram atacados com nital 2%, e para microdureza aplicou-se uma carga de 200g. As figuras 3 e 4 mostram a microestrutura do ferro fundido e do aço em uma região onde não houve alterações provocadas pela soldagem, para comparação das fotos onde houve modificação significativa.



Figura 3: Microestrutura do Fofó



Figura 4: Microestrutura do aço4340

4.1 Primeiro ensaio

Construiu-se um dispositivo para soldagem na posição plana, mostrado na figura 5, posição que daria uma boa penetração da solda e possibilitaria melhor controle do cordão por parte do soldador, produzindo menor incidência de defeitos. O dispositivo faz com que a peça gire ficando a parte a ser soldada no centro de giro. Devido à geometria complexa da peça, e

ao fato de os dois eixos a soldados não serem concêntricos, centrou-se o dispositivo entre esses eixos, fazendo com que eles variassem o mínimo possível. Devido a esta dificuldade de centrar os eixos o soldador deve controlar a velocidade de giro da peça e a distância da tocha. O soldador teve dificuldade em controlar esses dois parâmetros não conseguindo fazer um cordão de boa qualidade. O pré-aquecimento utilizado nesse ensaio foi de 325°C. Os parâmetros utilizados no processo MIG foram tensão de 24V, corrente de 125 A e velocidade de alimentação do arame de 3,6m/min, devido às dificuldades enfrentadas pelo soldador a soldagem não foi concluída. O resultado do ensaio indicou a necessidade de redução dos parâmetros de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento, pois a peça apresentou deformações provocadas pela alta energia de soldagem. Para os futuros ensaios a solda foi realizada na posição horizontal, conforme ilustra a figura 6.



Figura 5: Dispositivo de soldagem



Figura 6: Posição de soldagem horizontal

4.2 Segundo ensaio

No segundo ensaio realizado soldou-se o primeiro eixo com eletrodo revestido E7018 com 3,25 mm de diâmetro e o segundo eixo com o processo MIG e arame NiFe-2; utilizou-se uma temperatura de pré-aquecimento de 250°C e após término da soldagem as peças foram levadas à estufa que continuava ligada, que após a colocação das peças era desligada possibilitando um resfriamento lento. Os parâmetros utilizados na soldagem com eletrodo revestido foram corrente de 94 A, tensão variando de 19 a 23 V e velocidade de soldagem de 0,32 mm/s; no processo MIG a velocidade de alimentação foi de 1,9 m/min, tensão de 20 V, corrente de 70 A e velocidade de soldagem de 0,25 mm/s. Observou-se que o diâmetro do eletrodo poderia ser diminuído para 2,5 mm sem prejuízo à junta e possibilitando um menor aporte de calor.

4.2.1 Microestrutura da Junta Soldada

No primeiro eixo soldado com eletrodo revestido observam-se duas trincas na região do ferro fundido, mostradas nas figuras 7 e 8, próximo à solda. Houve formação de martensita na região afetada pelo calor entre os nódulos de grafita conforme mostra a figura 9. Já no aço 4340 que apresenta uma matriz martensítica revenida pode-se notar a formação de uma martensita não revenida na zona afetada pelo calor conforme na figura 10.



Figura 7: Trinca no ferro fundido



Figura 8: Trinca no ferro fundido

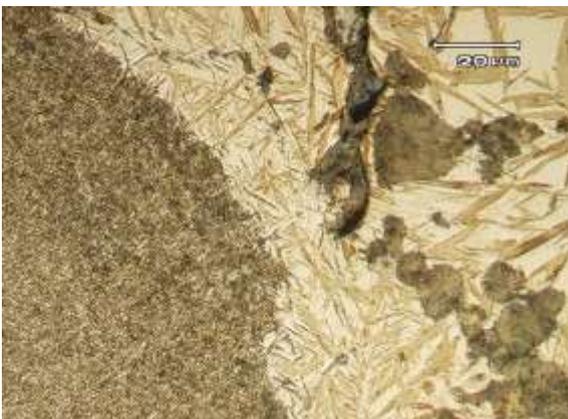


Figura 9: Interface solda/ferro fundido



Figura 10: Interface solda/aço

No segundo eixo soldado com MIG não houve constatação de trincas, na interface solda/ferro fundido houve formação de carbonetos e logo após nota-se os nódulos rodeados de agulhas de martensita conforme figura 11. Na interface solda aço observa-se martensita não revenida conforme figura 12.



Figura 11: Interface solda/ferro fundido



Figura 12: Interface solda/aço

4.2.2 Microdureza dos Corpos de Prova

As figuras 13 e 14 apresentam os gráficos de microdureza feitos nos corpos de prova soldados com eletrodo revestido E7018, com uma temperatura de pré-aquecimento de 250°C.

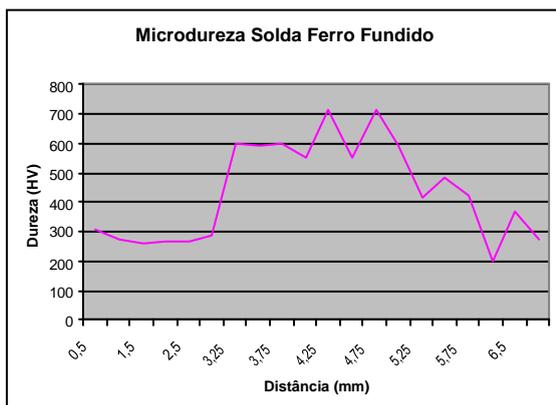


Figura 13: Microdureza interface solda/fofo

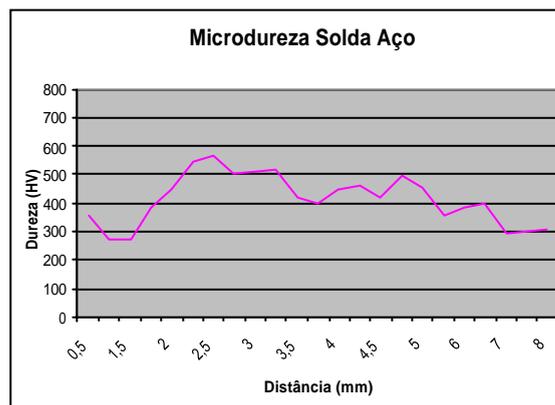


Figura 14: Microdureza interface solda/aço

Nestes gráficos pode-se notar que a dureza do metal de solda encontra-se na ordem de 300 HV e a região onde houve trincas apresenta uma dureza acima de 600 HV. Esta elevada dureza é causada pela formação de martensita nesta região. Já na interface solda/aço encontram-se regiões com dureza acima de 500 HV, resultado da martensita não revenida que se encontra nessa região.

O perfil de microdureza no eixo soldado com MIG é mostrado nas figuras 15 e 16 .

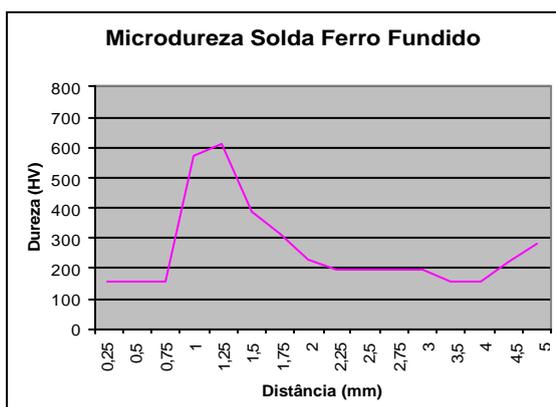


Figura 15: Microdureza interface solda/fofo

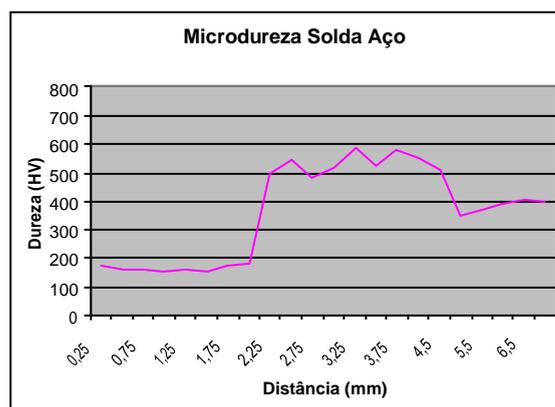


Figura 16: Microdureza interface solda/aço

O metal de solda resultante do arame NiFe apresentou uma dureza inferior ao eixo soldado com eletrodo revestido. Pode-se notar que o pico de dureza ficou em 600HV na interface metal de solda/ferro fundido, na interface metal de solda/aço as durezas ficaram abaixo de 600HV. Não foram observadas trincas, mas as microestruturas formadas em virtude do aporte de calor do processo de soldagem fragilizaram os materiais. O tamanho da zona afetada pelo calor também foi menor que no eixo soldado com o E7018.

4.3 Terceiro Ensaio

No terceiro ensaio realizado soldaram-se os dois eixos com eletrodo revestido E7018 com 2,5 mm de diâmetro, utilizou-se uma temperatura de pré-aquecimento de 300° C e após a soldagem as peças foram levadas à estufa, onde resfriaram lentamente.

Os parâmetros utilizados foram corrente de 75 A, tensão variando de 20 a 23V e velocidade de soldagem de 0,27mm/s. Observou-se a olho nu uma trinca no cordão de solda.

4.3.1 Microestrutura da Junta Soldada

Neste ensaio a zona afetada pelo calor do ferro fundido apresentou a formação de menos carbonetos do que na junta soldada à 250°C, conforme figura 17, mas constataram-se trincas nos cordões de solda, ilustrada na figura 18. Já na zona afetada pelo calor do aço 4340 notou-se a formação de martensita não revenida, mostrada na figura 19, da mesma forma que no eixo soldado a 250°C.



Figura 17: Interface solda/fofo



Figura 18: Metal de solda



Figura 19: Interface solda/aço

4.3.2 Microdureza dos Corpos de Prova

Os resultados do perfil de microdureza feitas nos corpos de prova encontram-se nos gráficos apresentados nas figuras 20 e 21.

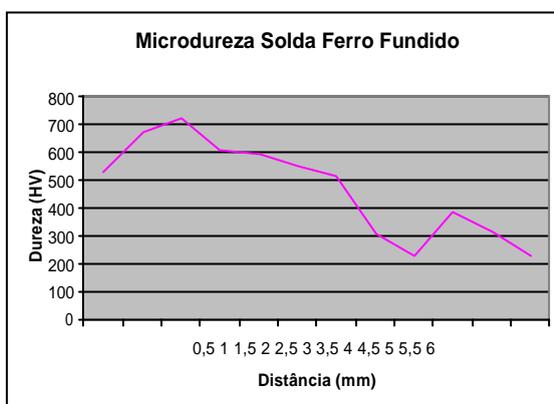


Figura 20: Microdureza interface solda/fofo

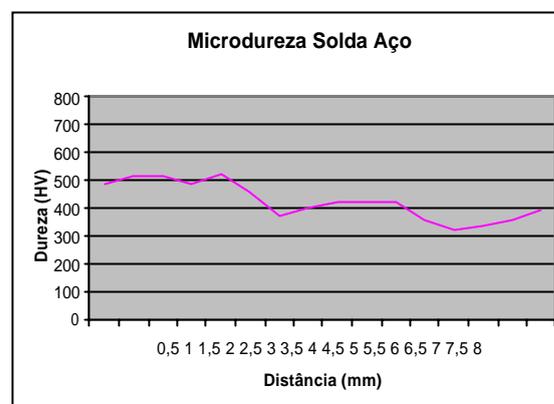


Figura 21: Microdureza interface solda/aço

Pode-se notar a elevada dureza no metal de solda, atingindo valores acima de 700 HV na região onde a solda apresenta trincas. Nas interfaces solda/aço e solda/ferro fundido as durezas atingiram um pico de 516,4 HV no ferro fundido e 524,2HV no aço, apresenta uma zona afetada pelo calor menor que nos ensaios anteriores.

4.4 Quarto Ensaio

No quarto ensaio realizado soldaram-se os dois eixos com MIG arame NiFe-2, utilizou-se uma temperatura de pré-aquecimento de 150° C, e após a soldagem as peças foram levadas à estufa, onde resfriaram lentamente.

Os parâmetros utilizados foram velocidade de alimentação de 1,9 m/min, corrente de 70 A, tensão de 20V e velocidade de soldagem de 0,3 mm/s. Não houve constatação de trincas a olho nu, constatou-se a presença de porosidades em um dos eixos soldados.

4.4.1 Microestrutura da Junta Soldada

Observou-se a formação de carbonetos na região parcialmente fundida, região que vem após a poça de fusão, onde constatou-se a formação de ferro fundido branco, mostrada na figura 22, que é muito duro e frágil. Na zona afetada pelo calor percebe-se a formação de martensita conforme figura.23 No aço 4340 encontrou-se a martensita não revenida na zona afetada pelo calor mostrada na figura 24 e não houve constatação de trincas em nenhum ponto do corpo de prova.



Figura 22: Ferro fundido



Figura 23: Ferro fundido



Figura 24: Interface solda/aço

4.4.2 Microdureza dos Corpos de Prova

Os resultados dos perfis de microdureza feitas nos corpos de prova encontram-se nas figuras 25 e 26

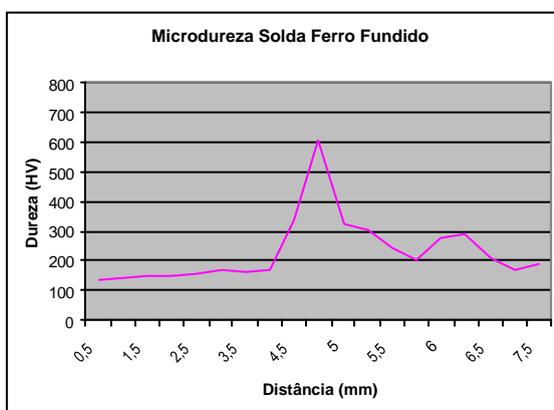


Figura 25: Microdureza interface solda/fofo

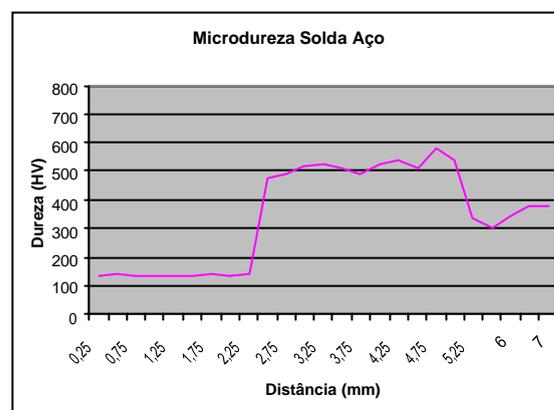


Figura 26: Microdureza interface solda/aço

O metal de solda apresenta uma dureza abaixo de 200 HV, mas as interfaces solda/ferro fundido e solda/aço apresentam picos de dureza em torno de 600 HV. Não foram observadas trincas, mas as microestruturas formadas provenientes do calor gerado na soldagem alteram as propriedades mecânicas destes materiais, tornando-os mais frágeis.

4.5 Quinto Ensaio

No quinto ensaio realizado soldou-se os dois eixos com eletrodo revestido E7018 com 2,5 mm de diâmetro, utilizou-se uma temperatura de pré-aquecimento de 150° C, e após a soldagem as peças foram levadas à estufa onde resfriaram lentamente. Os parâmetros utilizados foram corrente de 75 A, tensão variando de 20 a 23V e velocidade de soldagem de 0,28 mm/s. Foram observadas trincas na zo na afetada pelo calor no ferro fundido.

4.5.1 Microestrutura da Junta Soldada

Neste ensaio foi possível observar uma faixa logo após a poça de fusão composta de ferro fundido branco, e sem presença de nódulos de grafita conforme figura 27. Após esta faixa se encontram os nódulos de grafita envoltos de martensita resultante das altas taxas de resfriamento a que foi submetida esta peça, mostrado na figura 28. Na interface solda/aço constata-se a presença de martensita não revenida conforme figuras 29 e 30, constatou-se trincas no ferro fundido e no metal de solda ilustradas pelas figuras 31 e 32.



Figura 27: Interface solda/fofo

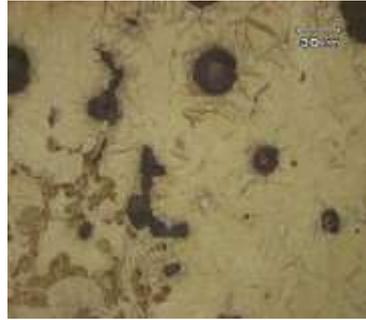


Figura 28: Ferro fundido



Figura 29: Interface solda/aço



Figura 30: Aço 4340

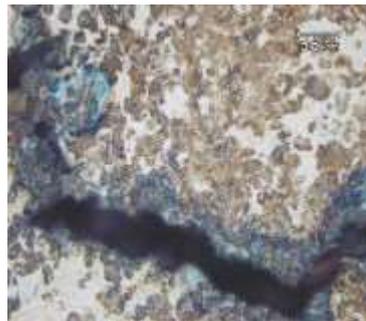


Figura 31: Trinca no fofo



Figura 32: Trinca na solda

4.5.2 Microdureza dos Corpos de Prova

Os resultados do perfil de microdureza nos corpos de prova são ilustrados nas figuras 33 e 34.

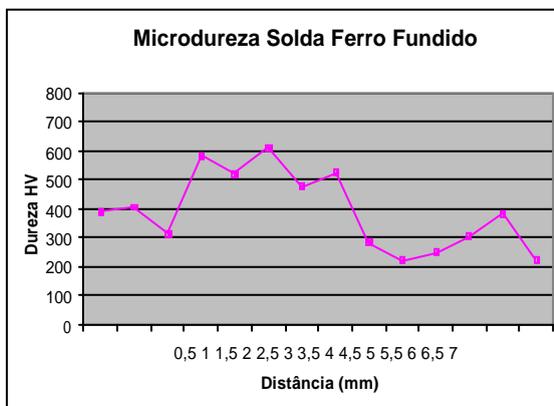


Figura 33: Microdureza interface solda/fofo

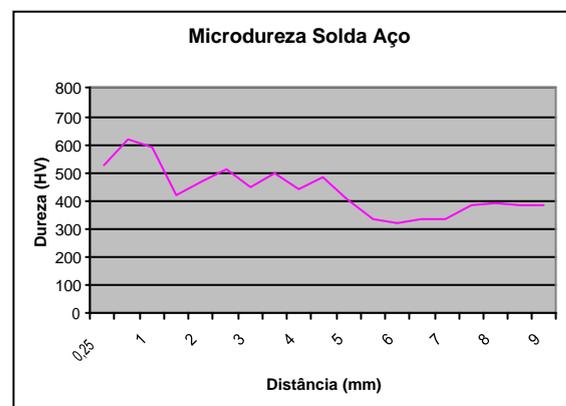


Figura 34: Microdureza interface solda/aço

As durezas no metal de solda, onde ocorreram trincas, alcançaram picos acima de 600 HV, e na zona afetada pelo calor do ferro fundido onde se encontra outra trinca foi notada

uma dureza em torno de 600 HV. Na interface solda/aço a dureza ficou em torno de 500HV. Esta elevada dureza na zona afetada pelo calor do ferro fundido explica-se pela formação dos carbonetos e da martensita na zona afetada pelo calor.

4.6 Sexto ensaio

No sexto ensaio realizado soldou-se os eixos sem pré-aquecimento, utilizando o processo MIG com arame de NiFe, os eixos foram soldados e deixados resfriar na temperatura ambiente. Os parâmetros utilizados para soldagem foram velocidade de alimentação de 2,6 m/min, tensão de 24V, corrente de 95 A e velocidade de soldagem de 0,24 mm/s. Não foram constatadas trincas a olho nu.

4.6.1 Microestrutura da Junta Soldada

Pode-se observar claramente neste ensaio a formação de duas regiões distintas na zona afetada pelo calor na interface solda/ferro fundido mostradas nas figuras 35 e 36; em uma primeira região encontra-se uma estrutura de ferro fundido branco e em uma segunda zona encontram-se nódulos de grafita envoltos em martensita. Já na interface solda/aço constatou-se a formação de martensita não revenida conforme figura 37. Não foram constatadas trincas.



Figura 35: Interface solda/fofo



Figura 36: Ferro fundido



Figura 37: Intreface solda/aço

4.6.2 Microdureza dos Corpos de Prova

Os resultados dos perfis de microdureza feitos nos corpos de prova encontram-se nas figuras 38 e 39.

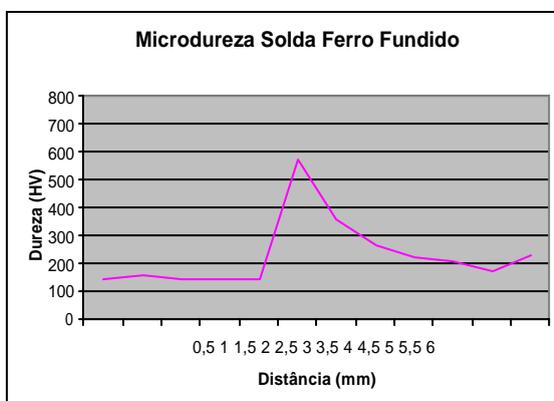


Figura 38: Microdureza interface solda/fofo

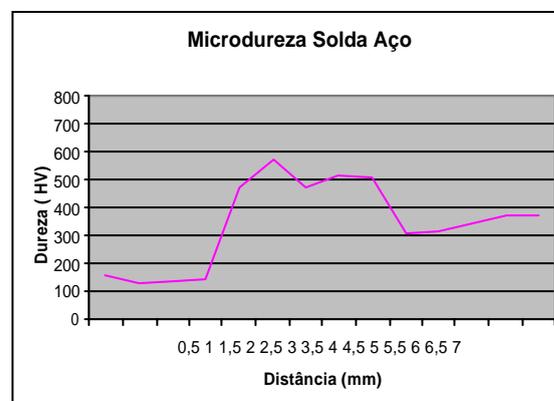


Figura 39: Microdureza interface solda/aço

A dureza do metal de solda encontra-se em torno de 150 HV, mas nas interfaces solda/ferro fundido e solda/aço encontram-se picos de dureza na ordem de 570HV causadas pelas microestruturas frágeis formadas nessa região, os materiais não apresentaram trincas, mas foram fragilizados em virtude da solda.

4.7 Energias de Soldagens Utilizadas:

As energias de soldagem utilizadas nos ensaios descritos acima estão expostas na tabela abaixo:

	I(A)	U(V)	V(mm/s)	E (W)
E7018 (250°C)	94	20	0,32	5875
MIG (250°C)	70	20	0,25	5600
E7018 (300°C)	75	20	0,27	5555,56
MIG (150°C)	70	20	0,3	4666,67
E7018 (150°C)	75	20	0,28	5357,14
MIG	95	24	0,24	9500

5. VIABILIDADE ECONÔMICA

Considerando que a soldagem de boa qualidade só foi conseguida com arame Din 8573 NiFe-2, estipula-se o custo com a utilização deste consumível.

Segundo fabricante o arame custa R\$ 148,00 por quilograma, tendo 113,36 m/Kg, utilizando os parâmetros do último ensaio realizado, da junta soldada sem pré-aquecimento, com um fator de desperdício de 30% tem-se que, para soldagem dos dois eixos no suporte são necessários 6,8m de arame. São gastos R\$8,88 em consumível para soldagem de um conjunto, tendo-se que acrescer a este valor a hora máquina de uma MIG, e o tempo despendido para se trocar o arame na máquina.

A operação de usinagem deste componente feita em uma máquina de comando numérico é, usinagem, furo e rosca, resultando em um tempo de usinagem de 5min e 15 segundos, o valor orçado do custo do centro de usinagem é de R\$190,00 por hora, cada peça custa R\$16,25 para ser usinada. A este valor tem que ser adicionados os gastos de montagem e cola para travamento.

6. CONCLUSÕES

Através dos ensaios realizados acima constata-se que não foi possível obter soldas de boa qualidade com eletrodo revestido E7018, apresentando trincas na zona afetada pelo calor ou no metal de adição.

Foi possível a obtenção de soldas de boa qualidade utilizando o arame que consistia em uma liga de níquel ferro, mas o calor aportado pelo processo de soldagem gera microestruturas frágeis que afetam a resistência mecânica dos materiais, quando o pré-aquecimento é feito a baixas temperaturas.

Através da análise econômica, observa-se que a alteração de processo resultaria em menores custos de produção, no entanto as juntas soldadas apresentaram mudanças significativas na microestrutura dos materiais, alterando sua tenacidade, aumentando sua dureza, e o prejuízo causado por essas alterações só poderá ser avaliado mediante um ensaio dinâmico.

7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de construção do suporte, e do eixo com outros materiais, de fácil soldagem, estes mantendo as funções e propriedades do atual é uma possibilidade de trabalho futuro, podendo-se agregar ganhos funcionais na remodelagem do sistema.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PARIS, A. **Tecnologia da Soldagem dos Ferros Fundidos**, 1ª ed., Ed. UFSM, Santa Maria, 2003.

METALS HANDBOOK,.: **Properties and Selection**, 10º ed., vol.1 Aladon, 1996.

ROSS, R., **Metallic Material Specification Handbook**, 4ª ed, Ed. Chapman & Hall, 1992.

CHIAVEINI, V., **Aços e Ferros Fundidos**, 7ª ed., Ed. ABM, 1996.

STEPHEN K., **Ductile Iron Production Practices**, Americans Foundrymen's Society, 1985.

MACHADO, I. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**, 1ª ed., 1996

9. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

METALS HANDBOOK, **Welding and Brazing**, 6º vol., 8ª ed, 1971.