

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

RICARDO MISSIO

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO DE PEÇAS AGRÍCOLAS REVESTIDAS
POR DIFERENTES PROCESSOS DE SOLDAGEM**

**Alegrete
2017**

RICARDO MISSIO

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO DE PEÇAS AGRÍCOLAS REVESTIDAS
POR DIFERENTES PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. M.^º Alexandre Urbano Hoffmann.

Coorientador: Prof. Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira.

**Alegrete
2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

M678a Misso, Ricardo

ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO DE PEÇAS AGRÍCOLAS REVESTIDAS
POR DIFERENTES PROCESSOS DE SOLDAGEM / Ricardo Misso.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA MECÂNICA, 2017.

"Orientação: Alexandre Urbano Hoffmann".

1. Soldagem. 2. Revestimento. 3. Eletrodo Revestido. 4.
Arame tubular. 5. MIG. I. Título.

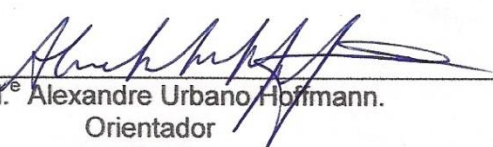
RICARDO MISSIO

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO DE PEÇAS AGRÍCOLAS REVESTIDAS
POR DIFERENTES PROCESSOS DE SOLDAGEM**

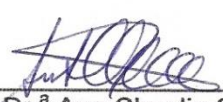
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Pampa, como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 04 de julho de 2017.


Banca examinadora:



Prof. M.^o Alexandre Urbano Hoffmann.
Orientador
UNIPAMPA



Prof. Dr.^a Ana Claudia Costa de Oliveira
Coorientador
UNIPAMPA



Prof. M.^o Aldoni Gabriel Wiedenhoft
UNIPAMPA

A Deus, por me dar forças
nos momentos que pensei em desistir,
e sempre me guiar pelo caminho certo.

AGRADECIMENTO

Reservo meus agradecimentos primeiramente a meus pais, Walter e Marilene, meus irmãos, Filipe e Luciane, pelo absoluto apoio e suporte para meu estudo, por sempre acreditarem em meu potencial.

Ao meu orientador professor Mestre Alexandre Urbano Hoffmann, e coorientadora professora Doutora Ana Cláudia Costa de Oliveira, pelo apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha namorada Thais, por todo amor, carinho e incentivo nessa etapa de nossa caminhada juntos.

Aos meus amigos, Dionnathan, Erick, Maicon, Vitor, Jorge, Rafael, Thiago, Frederico e outros não citados aqui, pelas horas de estudos e dedicação, pelas festas e chimarrão como distração.

RESUMO

O processo de fabricação por soldagem teve grande impulso com o advento da Primeira e Segunda Guerra mundial. A soldagem consiste na união de dois materiais que ocorre devido à fusão localizada, ela pode ser realizada com ou sem adição de material. Este processo é utilizado na união permanente de estruturas ou peças metálicas, porém nos últimos anos vem sendo largamente empregado como revestimento de materiais, através da deposição superficial de material. Esse método surge da necessidade de se ter peças com uma superfície que contenham características diferentes do restante do componente, que possam resistir ao ambiente de trabalho designado. A empresa LEZY da cidade de Alegrete/RS é uma indústria agrícola que fabrica rotores axiais muito utilizados em colhedoras de arroz, e aplica solda de revestimento nestes rotores buscando a maior durabilidade dos mesmos contra o desgaste sofrido pela casca do arroz. Na deposição desse revestimento, a empresa utiliza o processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding), porém, é um método que demanda muito tempo pela necessidade de troca constante do eletrodo, com isso, o presente trabalho visa comparar esse processo utilizado pela empresa, com o MIG “Metal Inert Gas” (GMAW – Gas Metal Arc Welding) e arame tubular (FCAW – Flux Cared Arc Welding), métodos que possuem alimentação contínua de arame, e então menos tempo para realizar o revestimento, procurando manter ou até melhor as qualidades da solda. Os resultados foram obtidos a partir de ensaios de microdureza, desgaste por abrasão, micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura e análise de diluição. Os ensaios e análises mostraram que a microdureza obtida pelo arame tubular foi superior aos outros dois processos, porém o desgaste por abrasão foi menor para o realizado com eletrodo revestido.

Palavras-Chave: soldagem, eletrodo revestido, MIG, arame tubular, revestimento.

ABSTRACT

The process of manufacturing by welding had great impetus with the advent of the First and Second World War. Welding consists of the union of two materials that occurs due to the localized fusion, it can be realized with or without addition of material. This process is used in the permanent joining of metallic structures or parts, but in recent years it has been widely used as a coating of materials, through surface deposition of material. This method arises from the need to have parts with a surface that contain characteristics different from the rest of the component, which can withstand the designated working environment. The company LEZY of the city of Alegrete/RS is an agricultural industry that manufactures axial rotors widely used in rice harvesters, and welded applications of coating in these rotors seeking a greater durability of the same ones against the wear suffered by the husk of the rice. In the deposition of this coating, the company uses the SMAW (Shielded Metal Arc Welding), however, it is a method that demands a long time for the need for constant electrode exchange, with this, the present work aims to compare this process used by the company, with GMAW (Gas Metal Arc Welding) and FCAW (Flux Cared Arc Welding), methods that have continuous wire feed, and then less time to perform the coating, trying to maintain or better Solder qualities. The results were obtained from tests of microhardness, abrasion wear, micrographs obtained by the scanning electron microscope and dilution analysis. The tests and analyzes showed that the microhardness obtained by the FCAW was superior to the other two processes, but the wear by abrasion was smaller than the one performed with SMAW.

Keywords: Shielded metal arc welding, gas metal arc welding, flux cared arc welding, coating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes com revestimento já desgastados do rotor axial.	16
Figura 2 - Rotor axial usado.	16
Figura 3 - Faixa usual de intensidade da fonte.	20
Figura 4 - Soldagem com Eletrodo Revestido.	21
Figura 5 - Classificação de eletrodos de aços carbono de acordo com a AWS.	23
Figura 6 – Equipamento para soldagem com eletrodos revestidos.	23
Figura 7 – Processo de soldagem MIG/MAG.	24
Figura 8 – Representação equipamentos processo MIG/MAG.	26
Figura 9 – Distância entre o bico de contato e a peça.	27
Figura 10 - Classificação para arames sólidos e com enchimento metálico, de acordo com a AWS.	30
Figura 11 – Soldagem sem proteção gasosa.	31
Figura 12 – Soldagem com proteção gasosa.	32
Figura 13 – Fabricação de arames tubulares.	33
Figura 14 - Diluição.	33
Figura 15 – Endentador pirâmide Diamante Vickers.	34
Figura 16 – Fluxograma de atividades.	36
Figura 17 - Equipamento para soldagem.	37
Figura 18 – Eletrodo revestido utilizado na empresa LEZY.	37
Figura 19 - Cordão de solda com Eletrodo Revestido.	38
Figura 20 – Máquina de solda MIG e consumível.	38

Figura 21 – Arames sólidos MIG/MAG.....	39
Figura 22 - Cordão de solda MIG.....	39
Figura 23 - Máquina de solda Arame tubular e consumível.....	40
Figura 24 - Cordão de solda com Arame Tubular.....	40
Figura 25 - Microdurômetro.....	41
Figura 26 - Esquema ensaio de microdureza.....	41
Figura 27 – Máquina de corte.....	42
Figura 28 - Corpos de prova das soldas.....	42
Figura 29 - Equipamento para ensaio de desgaste.....	43
Figura 30 - Corpo de prova sendo desgastado.....	43
Figura 31 - Balança de precisão.....	44
Figura 32 - Microscópio Eletrônico de Varredura.....	45
Figura 33 - Perfil de microdurezas.....	46
Figura 34 - Amostras após ensaio de desgaste.....	47
Figura 35 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste.....	48
Figura 36: Eletrodo Revestido (a) interface, (b) solda.....	49
Figura 37: MIG (a) interface, (b) solda.....	50
Figura 38: Arame Tubular (a) interface, (b) solda.....	51
Figura 39 - Microestrutura de revestimento duro liga Fe-Cr-C: a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros e de diferentes materiais.....	28
Tabela 2 - Arames de aço carbono de baixa liga.....	29
Tabela 3 – Resultado ensaio de desgaste.....	47
Tabela 4: Diluição para o Eletrodo Revestido (a), MIG (b) e Arame Tubular (c).....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MIG – Metal Inert Gas

MAG – Metal Active Gas

SMAW – Shielded Metal Arc Welding

GMAW – Gas Metal Arc Welding

FCAW – Flux Cared Arc Welding

AWS – American Welding Society

TD – Taxa de Deposição

mf – Massa Final da Chapa

mi – Massa inicial da Chapa

Ts – Tempo de Soldagem

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contextualização do problema	14
1.2	Objetivos.....	15
1.3	Justificativa	15
1.4	Estrutura do trabalho.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1	Desgaste por Abrasão	18
2.2	Solda de revestimento.....	19
2.3	Solda a arco elétrico.....	20
2.3.1	Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido.....	21
2.3.2	Soldagem a Arco com proteção por gás MIG/MAG	24
2.3.2.1	Aspectos operacionais do processo.....	26
2.3.3	Soldagem a arco com Arame Tubular.....	30
2.4	Diluição na Soldagem.....	33
2.5	Dureza Vickers	34
3	METODOLOGIA	36
3.1	Realização das soldas.....	36
3.1.1	Solda Eletrodo Revestido.....	36
3.1.2	Solda MIG	38
3.1.3	Solda Arame Tubular	39
3.2	Ensaio de Microdureza	40
3.3	Ensaio de Desgaste	42
3.4	Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	44
3.5	Cálculo da Diluição	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	Microdureza.....	46
4.2	Ensaio de Desgaste	47
4.3	MEV	48
4.4	Taxa de Diluição.....	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	55
	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

O processo de fabricação por soldagem teve grande impulso com o advento da Primeira e Segunda Guerra mundial. A soldagem consiste na união de dois materiais que ocorre devido à fusão localizada, ela pode ser realizada com ou sem adição de material. A união soldada assegura a continuidade na junta das características mecânicas e químicas (MACHADO 1996).

A soldagem é muito utilizada na união permanente de estruturas ou peças metálicas, porém nos últimos anos vem sendo largamente empregada como revestimento de materiais, através da deposição superficial de material. Este método surge da necessidade de ter peças com uma superfície que contenham características diferentes do restante do componente, que possam resistir ao ambiente de trabalho designado.

Existem vários processos de soldagem que podem ser utilizados nas operações de revestimento. Neste trabalho será analisada a soldagem para revestimento através dos processos com: eletrodo revestido, MIG “Metal Inert Gas” e arame tubular.

A soldagem de revestimento vem sendo utilizada em componentes de máquinas agrícolas que trabalham em colheita de arroz. Este produto, por possuir grande quantidade de sílica em sua casca, provoca desgaste por abrasão nos componentes que possuem contato com o mesmo.

Este trabalho busca a otimização do processo de deposição de solda para revestimento em componentes do rotor axial, utilizado em colhedoras de arroz fabricados pela empresa LEZY, da cidade de Alegrete/RS. Atualmente a empresa utiliza o método de soldagem com eletrodo revestido, o qual possui uma baixa taxa de deposição e qualidade, quando comparado a outros processos.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral comparar a soldagem de revestimento, realizada pelo processo de eletrodo revestido com os processos MIG (GMAW – Gas Metal Arc Welding) e com arame tubular (FCAW – Flux Cared Arc Welding). Visando a otimização do tempo de produção/deposição, aumento da qualidade do cordão de solda e resistência do revestimento, aplicado em rotores axiais utilizados na indústria agrícola.

Objetivos específicos:

- Avaliar a taxa de deposição;
- Avaliar resistência mecânica, microdureza;
- Avaliar desgaste por abrasão;
- Avaliar parâmetros de soldagem;
- Avaliar taxa de diluição.

1.3 Justificativa

A realização deste estudo visa à busca por melhores resultados para a solda de revestimento contra desgaste abrasivo, comparando o processo que utiliza eletrodo revestido com os processos MIG e arame tubular. Hoje esse método de revestimento é realizado nos rotores axiais da empresa LESY, Figura 1, utilizando eletrodo revestido. Porém, o tempo gasto no desempenho desta tarefa pelos funcionários da empresa pode ser reduzido se utilizado outro processo, mantendo ou melhorando a qualidade da solda, fazendo com que os empregados possam desempenhar outras funções, ou até reduzir o número de funcionários na realização desta atividade.

Figura 1 – Componentes com revestimento já desgastados do rotor axial.



Fonte: acervo do autor.

Figura 2 - Rotor axial usado.



Fonte: acervo do autor.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho é composto por cinco capítulos:

Capítulo 1 – Apresenta a contextualização do problema, objetivos gerais e específicos do trabalho, bem como, a justificativa para realização do mesmo.

Capítulo 2 – Consiste nos aspectos considerados importantes para o bom entendimento do trabalho, abordando conceitos de desgaste por abrasão, solda de revestimento, solda a arco elétrico, solda a arco com eletrodo revestido, solda a arco MIG, solda a arco com arame tubular, diluição na soldagem e dureza Vickers.

Capítulo 3 – Apresenta a metodologia utilizada no procedimento prático para chegar aos objetivos, bem como, os materiais utilizados e ensaios realizados.

Capítulo 4 – Apresenta os resultados obtidos nos ensaios e as discussões sobre eles e comparando com a literatura.

Capítulo 5 – Consiste nas considerações finais abordando conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Desgaste por Abrasão

Para Zum Gahr apud Lima (2008) o desgaste abrasivo caracteriza-se pela retirada de material causado pela presença de partículas duras entre duas áreas ou incrustadas em uma delas, que possuem movimento relativo.

Já Gates apud Lima (2008) define como um desgaste, na qual asperidades duras sobre uma superfície que se move contra a outra superfície, sujeitas á pressão, a qual penetra e remove material da superfície de menor dureza, formando sulcos e/ou riscos.

Segundo Baptista e Nascimento o desgaste por abrasão acontece quando partículas de vegetais ou minerais deslizam sobre partes metálicas, acompanhada de grande pressão ocasionando a retirada de metal por deslocamento ou amassamento. A variação do tamanho das partículas e da pressão empregada determina a classificação do tipo de abrasão que pode ser:

- Abrasão por Goivagem – partículas abrasivas de grandes dimensões com regiões pontiagudas de maior dureza do que o metal em desgaste, de velocidades e pressões variadas e repetitivas. Promovem penetração mais profunda do abrasivo no metal, ocasionando fissuras profundas. Exemplo: caçambas submetidas ao contato com areia, rochas ou esteiras transportadoras de minério bruto.
- Abrasão por Moagem ou Alta Pressão – o desgaste ocorre por prensagem, com pressões fortes ou médias de partículas com dimensões médias, menores que 5 cm, ou pequenas, menores que 1 cm, contra o metal. Neste caso ocorre fragmentação do abrasivo durante o contato e uma penetração ainda maior na superfície desgastada. Ocorre com frequência em implementos de moagem de minérios.
- Abrasão por Riscamento ou a Baixa Pressão – o desgaste ocorre quando a superfície do material é riscada ou polida, pelo abrasivo. Ocorre frequentemente em componentes de máquinas agrícolas, de escavação em que direta ou indiretamente manuseia: terra, areia dentre outros.

Ribeiro (2004) expõe alguns fatores que afetam o desgaste abrasivo, os quais também são relacionados com o desgaste ocasionado pela casca de arroz, são eles:

- Geometria das partículas abrasivas – partículas que apresentam arestas cortantes propiciam maior desgaste do que as arredondadas.
- Velocidade de deslizamento – a velocidade deslizamento do abrasivo está diretamente relacionada com o volume de material removido, devido ao aquecimento da superfície provocando diminuição das propriedades mecânicas do material.
- Força de compressão entre abrasivo e superfície – até certo valor quanto maior a pressão de compressão entre abrasivo e superfície maior será a retirada de material.

2.2 Solda de revestimento

A soldagem de revestimento é definida por Phillips apud Gomes (2010) como a deposição de um metal sobre um metal base com o intuito de obter dimensões e/ou características desejadas. O revestimento também tem como objetivo a recuperação de peças desgastadas, estender a vida útil dos elementos aplicando propriedades necessárias requeridas para o ambiente de trabalho ou a formação de superfícies com peculiaridades especiais.

Para Ribeiro (2004), a taxa de deposição e diluição são causas que mais influenciam as propriedades do revestimento, elas são influenciadas pelas variáveis do processo. A deposição pode ser feita em passes simples ou múltiplos, porém a altura do cordão não deve ser exagerada e deve-se controlar a penetração do mesmo no metal base, para que a zona termicamente afetada não seja grande.

Conforme Hutchings apud Lima (2008) o revestimento duro é depositado por soldagem na superfície de aços de baixo ou médio carbono, material mole, com a finalidade de inserir maior dureza e resistência ao desgaste, mantendo o mesmo dúctil e tenaz.

Lima (2008) afirma também, que a solda de revestimento é muito utilizada nas indústrias brasileiras de açúcar e álcool, os equipamentos envolvidos na extração do caldo são submetidos a severos desgastes, devido à ação abrasiva do bagaço da cana e demais elementos estranhos. Com isso, é realizada a manutenção preventiva, aplicando em peças novas o revestimento duro na superfície que será

sujeita ao desgaste, e na manutenção corretiva a solda é aplicada após a peça ser retirada do trabalho pelo grande desgaste sofrido.

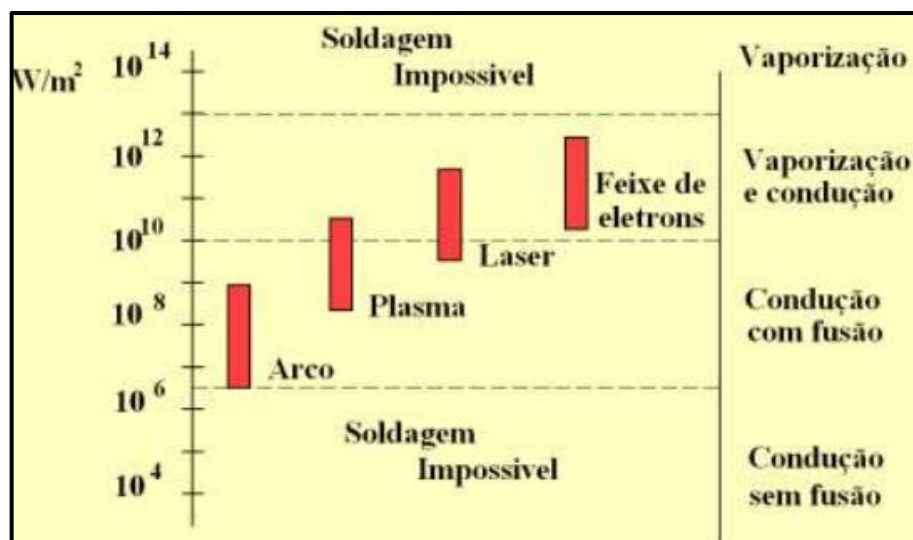
2.3 Solda a arco elétrico

A solda a arco elétrico faz parte da solda por fusão, a qual une as partes a partir da energia química ou elétrica fornecida a uma taxa elevada, e em uma área pequena para garantir a fusão localizada do metal. Segundo Soldagem (Cap4) o arco elétrico é um feixe de descargas elétricas formadas entre dois eletrodos e mantidas pela formação de um meio condutor gasoso chamado de plasma.

As temperaturas geradas oscilam entre 5000 e 30000 K, excepcionalmente alcançando 50000 K. A tensão máxima admissível de trabalho é aproximadamente 100 V, por razões de segurança. A queda de potencial no cátodo (eletrodo negativo) em torno de 9 V e corrente mínima de 0,1 A (MACHADO 1996).

A potência específica usada na soldagem por fusão deve ficar entre 10^6 a 10^{13} W/m^2 , como ilustrado na Figura 3. Acima desse valor o calor fornecido irá vaporizar a região de contato, isso é necessário quando se deseja corte. Valores abaixo desse limite somente irá aquecer o material como um todo, sem que ocorra a fusão localizada (MODENESI 2006).

Figura 3 - Faixa usual de intensidade da fonte.

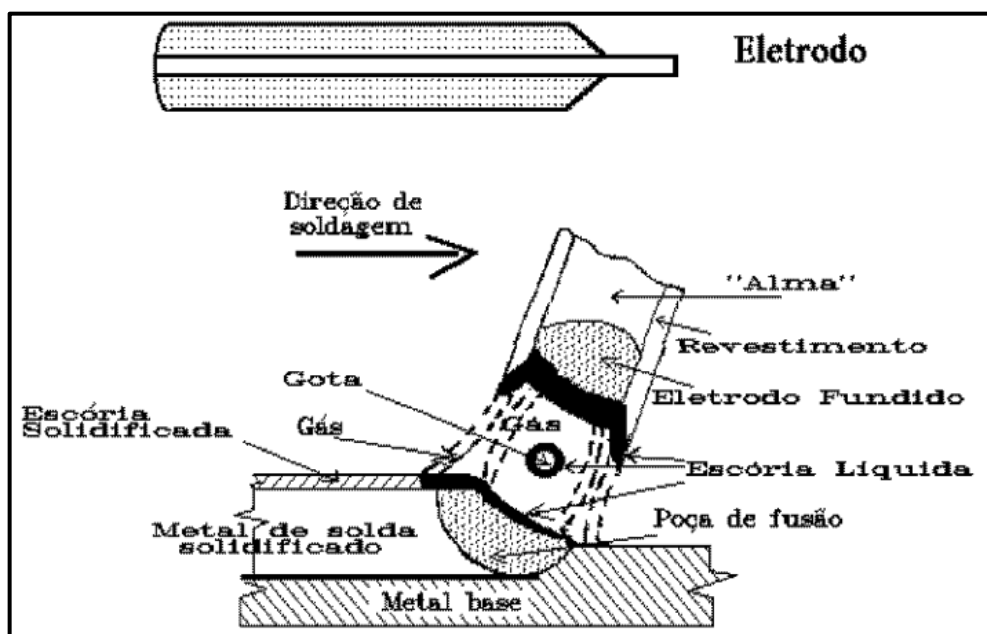


Fonte: Modenesi (2006).

2.3.1 Soldagem a Arco com Eletrodo Revestido

Processo de soldagem em que o arco elétrico ocorre entre um eletrodo revestido consumível (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) e metal base, conforme ilustrado na Figura 4. O eletrodo é formado por um arame (“alma”) que serve como material de adição e conduz a corrente elétrica. A alma é revestida por uma camada de diversos minerais e produtos químicos (revestimento), que atuam como proteção da poça de fusão contra gases da atmosfera, além de ajudar a estabilizar o arco elétrico (MACHADO 1996).

Figura 4 - Soldagem com Eletrodo Revestido.



Fonte: Machado (1996).

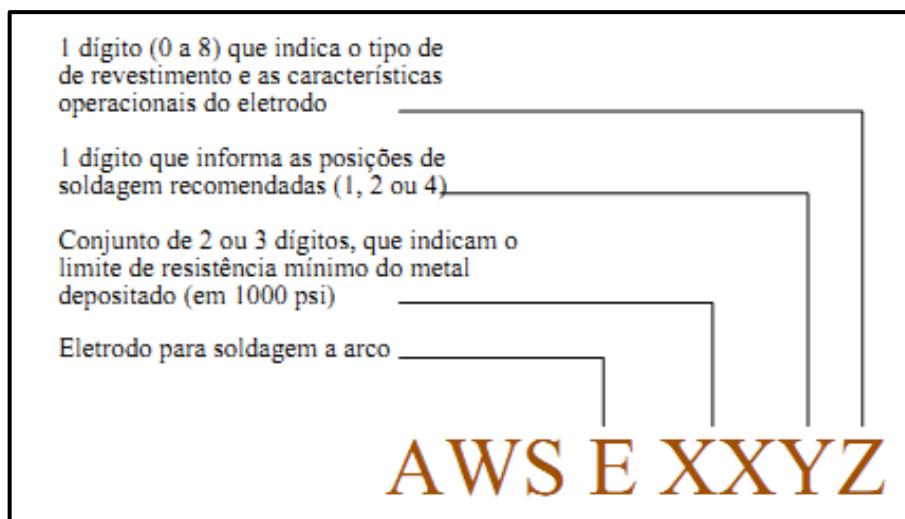
Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) o revestimento dos eletrodos ajuda na composição química do cordão, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas. Também confere características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e à solda.

A principal característica do processo de soldagem por eletrodo revestido está associada à versatilidade em ligas soldáveis, boa operacionalidade além das características mecânicas e metalúrgicas do metal depositado. Isso se deve a possibilidade de inúmeras formulações para o revestimento o qual possibilita a soldagem em locais abertos, sujeitos à ação de vento.

Conforme Modenesi e Marques (2006) os eletrodos utilizados para aços de baixo carbono são especificados com base nas propriedades mecânicas do metal depositado, no tipo de revestimento e em suas características operacionais. A Figura 5 mostra como é feita a representação para estes aços segundo especificações da AWS (American Welding Society) no Brasil. O revestimento é classificado em quatro tipos:

- Celulósicos (EXX10 e EXXX1): Elevada produção de gases, que protegem o metal líquido devido à queima da matéria orgânica principalmente a celulose, produz pouca escória, alta penetração no metal base, porém um grande volume de respingos. Deposita alto nível de hidrogênio não sendo indicado para soldagem de aços de alto teor de carbono, aços ligados, pois pode fragiliza-los.
- Rútílicos (EXXX2, EXXX3 e EXXX4): Contém altas quantidades de rutilo (TiO_2) em seu revestimento, produz grande quantidade de escória e facilmente destacável. Indicados para soldagem em qualquer posição podendo operar tanto em CA (Corrente Alternada) como CC (Corrente Contínua), gerando um cordão de baixa ou média penetração.
- Básicos (EXXX5, EXXX6 e EXXX8): Contém quantidades significativas de carbonatos (de cálcio e de outros elementos) e de fluorita produzindo uma solda altamente desoxidada com baixo nível de inclusões de sulfetos e fosfetos. A escória básica juntamente com o CO_2 reduz o risco de formação de trincas de solidificação. A penetração é média e o cordão possui boas propriedades mecânicas metalúrgicas destacando-se a tenacidade. Indicado para soldagem de juntas espessas de grande responsabilidade e para aços de elevado teor de carbono.
- Oxidantes (EXX20 e EXX27): O revestimento é constituído de óxidos de ferro e manganês que produz escória abundante, oxidante e fácil remoção. O metal depositado possui grandes quantidades de inclusões, baixo teor de carbono e manganês sendo utilizado em soldagem subaquática.

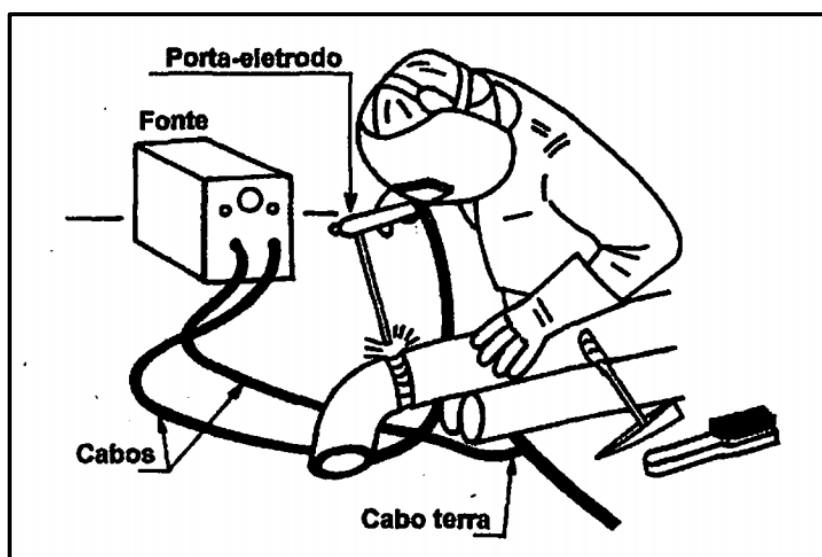
Figura 5 - Classificação de eletrodos de aços carbono de acordo com a AWS.



Fonte: Modenesi e Marques (2006).

Outras vantagens dos eletrodos revestidos são: o baixo custo, ótima versatilidade na posição de soldagem e projeto da junta, utiliza um equipamento simples Figura 6 – , comparado com outros processos, que consiste basicamente em uma fonte de energia, cabos e porta-eletrodos. Também é necessária a utilização de ferramentas (escova de aço, picadeira) para retirada da escória, quando se deseja depositar mais de um passe de solda ou limpar a peça a ser soldada. Além dos equipamentos de segurança como: avental, luvas, óculos, máscara dentre outros (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE 2005).

Figura 6 – Equipamento para soldagem com eletrodos revestidos.



Fonte: Marques, Modenesi e Bracarense (2005).

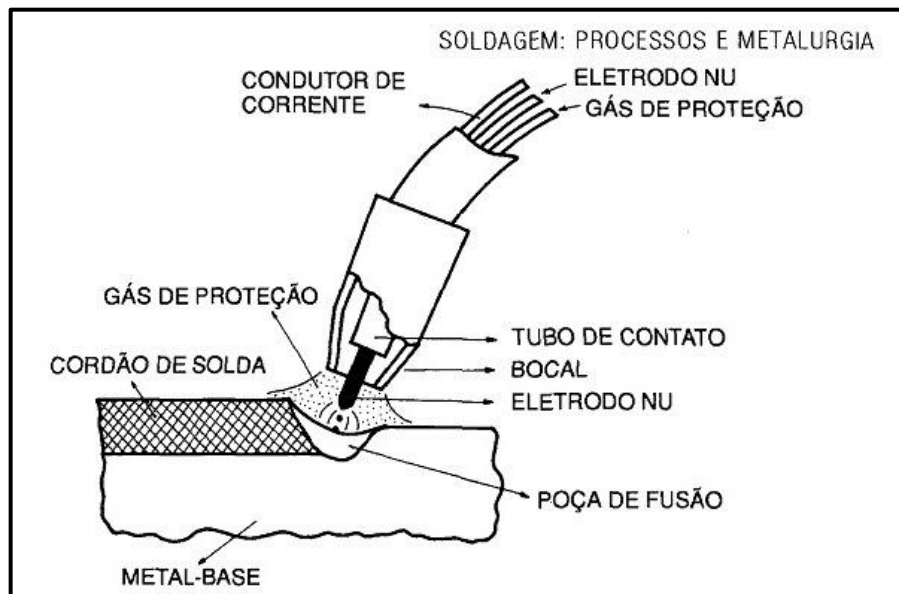
A taxa de deposição para Fontes (2005) influencia no custo do metal de solda depositado, que aumenta com a corrente elétrica e é definida pela quantidade de metal depositado por unidade de tempo (de arco aberto). E com isso altera a eficiência de deposição de um determinado eletrodo, que é representado pela divisão da massa do metal depositado pela massa total do eletrodo. Parte da massa do eletrodo é perdida como escória, respingos, fumos, gases e pontas.

Algumas limitações mostradas por Modenesi e Marques (2006) são que a taxa de deposição é de 1 a 8 Kg/h, a necessidade de interrupção do arco para troca de eletrodo e remoção de escória para novos passes. Isto influencia diretamente no fator de ocupação do soldador, que em geral é menor do que outros processos de soldagem.

2.3.2 Soldagem a Arco com proteção por gás MIG/MAG

Soldagem a arco com proteção gasosa (Gas Metal Arc Welding - GMAW) mostrado na Figura 7, ocorre entre um eletrodo metálico nu, consumível, alimentado continuamente na forma de arame e metal base. A união dos mesmos ocorre pelo aquecimento por arco elétrico, o qual é protegido contra a contaminação pela atmosfera por um gás inerte (Argônio e Hélio) para o processo MIG e utilizando gás ativo (Gás Carbônico, Oxigênio e Nitrogênio) ou mistura do inerte com ativo para o processo MAG (Metal Active Gas) (BRANDI; WEINER; MELO 2004)

Figura 7 – Processo de soldagem MIG/MAG.



Fonte: Brandi, Weiner e Mello (2004)

Conforme Santos (2010) o processo MIG/MAG tem se firmado como uma alternativa eficiente para as indústrias no cenário mercado mundial por apresentar qualidade e produtividade garantindo maior competitividade. Esse processo permite soldar vários tipos de metais em diferentes posições além de poder operar de forma semiautomática e automática.

Segundo Pessoa (2009) algumas vantagens e desvantagens do processo são:

Vantagens:

- Procedimento semiautomático e automático;
- Soldagem em todas as posições;
- Atende praticamente todas as ligas comerciais e metais;
- Eletrodo constantemente alimentado;
- Amplas extensões de espessuras soldáveis;
- Altas taxas de deposições;
- Altas velocidades de soldagem;
- Variados modos de transferência metálica;
- Mão-de-obra acessível;
- Grande penetração;
- Pouca geração de fumo e escória, reduzindo riscos de inclusões e tempo, pois não necessita remove-la;
- Uniformidade na penetração da raiz;

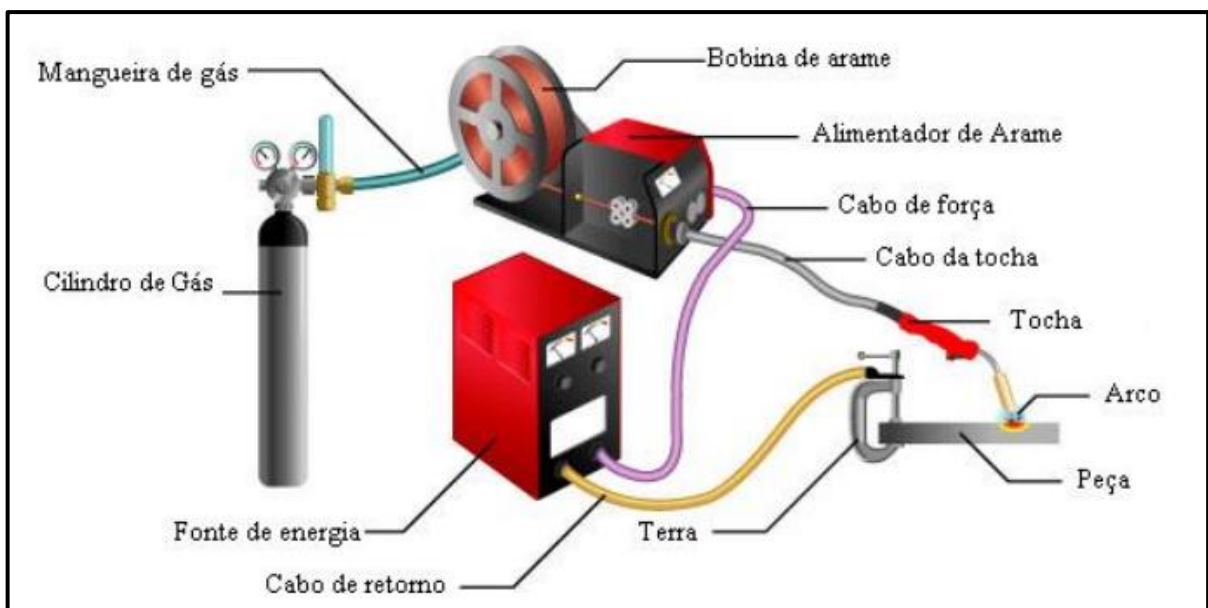
Desvantagens:

- Inviável soldagem em ambientes expostos pela necessidade de proteção do arco contra correntes de ar;
- Equipamento de maiores dimensões e alto custo;
- Grande emissão de radiação térmica;
- Necessidade da tocha próxima da junta na soldagem (entre 10 e 20 mm).

2.3.2.1 Aspectos operacionais do processo

Os equipamentos utilizados para soldagem MIG/MAG são basicamente uma tocha de soldagem, cabos, unidade para controle da soldagem, fonte de potência e gás protetor, conforme mostrado na Figura 8. Esse processo comparado ao eletrodo revestido é relativamente mais simples, pelo sistema de alimentação do consumível e a quase inexistência de formação de escória. Porém a existência de diversos parâmetros de soldagem que aumentam a complexidade do processo como: corrente, tensão e velocidade de soldagem; espessura, constituição e velocidade do arame-eletrodo; tipo do gás de proteção e distância entre bico da tocha e a peça (AGUIAR 2010).

Figura 8 – Representação equipamentos processo MIG/MAG.



Fonte: Pessoa (2009).

A corrente elétrica, de acordo com Nilo Jr (2003), influencia diretamente no modo de transferência metálica, na qualidade geométrica do cordão e na taxa de deposição. Com isso, o diâmetro do eletrodo e a espessura da junta a ser soldada devem ser considerados na determinação da corrente.

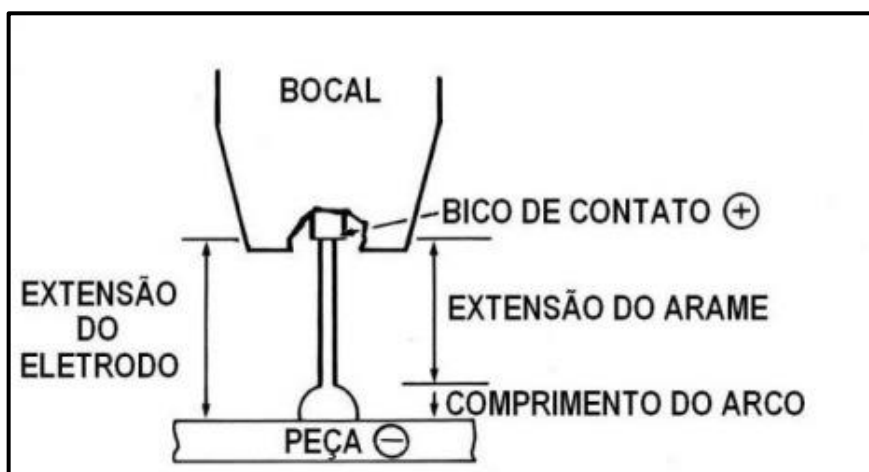
Afirma também que a tensão e comprimento do arco estão diretamente relacionados, que pequenos comprimentos de arco se obtêm com baixos valores de tensão. Porém, o comprimento do arco depende também do diâmetro e composição do eletrodo, além do modo de transferência e tipo de gás utilizado. Valores altos de

tensão podem gerar defeitos como: porosidade, mordedura e valores baixos geram instabilidade no arco e facilitam surgimento de sobreposições.

De acordo com Fortes (2005), a velocidade de soldagem é o tempo gasto para percorrer a trajetória da solda pelo arco, que com aumento da espessura da peça a velocidade deve diminuir, de modo que a velocidade deve aumentar com o aumento da corrente mantendo o tipo de junta.

Fortes (2005), também assegura que a extensão do eletrodo (stick-out) Figura 9, da ponta do bico de contato até a peça, deve ser controlada, pois afeta a corrente de soldagem essencial para fundir o arame a uma determinada velocidade de alimentação do mesmo. Para extensões muito grandes de eletrodo, tem-se excesso de metal de solda com baixo calor no arco podendo resultar em um cordão de baixa penetração e geometria inadequada.

Figura 9 – Distância entre o bico de contato e a peça.



Fonte: Fontes (2005).

Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) o diâmetro do eletrodo é determinado especialmente em função da espessura da peça a ser soldada, posição de soldagem e fatores que intervêm o tamanho da poça de fusão ou quantidade de calor cedida à peça. Para determinados diâmetros de eletrodos existe certa corrente adequada em que o arco tem ótimas condições de operações, como exposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas de corrente utilizáveis com arames de diferentes diâmetros e de diferentes materiais.

Material	Diâmetro do eletrodo (mm)	Faixa de corrente (A)
Aço carbono e de baixa liga	0,8	70 – 180
	1,0	90 – 220
	1,2	100 – 270
	1,6	190 – 360
	2,4	280 – 490
	3,2	270 - 580
Aço inoxidável austenítico	0,8	60 – 180
	1,0	80 – 200
	1,2	90 – 260
	1,6	170 – 320
	2,4	250 – 450
Alumínio	0,8	70 – 150
	1,2	80 – 200
	1,6	120 – 300
	2,4	180 - 350
Cobre	0,8	70 – 170
	1,2	90 – 250
	1,6	150 - 400

Fonte Marques, Modenesi e Bracarense (2005)

A vazão do gás de proteção afeta as características do metal depositado, ela deve ser determinada levando em consideração o diâmetro do bocal da tocha e distância do mesmo até a peça de trabalho. Pouca vazão pode não proteger a poça de fusão resultando em defeitos como porosidade e oxidação. Por outro lado, uma grande vazão pode gerar turbulência acrescentando impurezas no metal depositado (VILLANI et al. apud AGUIAR 2010).

Outra variável de grande importância no processo de soldagem MIG/MAG segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2005) é o modo pelo qual o material é transferido no arco, pois isso influencia a estabilidade do arco, a quantidade de gases absorvida pelo metal fundido, a aplicação do processo em diferentes posições e nível de respingos gerados. São basicamente três diferentes modos:

- Transferência por curto circuito – ocorre para valores baixos de corrente e tensão muito utilizado em peças de pequena espessura e soldagem em posições diferentes da plana. A gota de metal aumenta até tocar a poça de fusão sendo atraída pela mesma. Neste modo pode ocorrer intensa formação de respingos pela instabilidade do arco.

- Transferência globular – ocorre para valores intermediários de corrente e tensão ocasionando um arco mais estável, porém produz elevada taxa de respingos devido à transferência caótica. As gotas são de diâmetro maior que o eletrodo e o número de gotas é baixo, geralmente de 1 a 10 gotas por segundo, e sua transição é por ação da gravidade limitando as posições de soldagem.
- Transferência aerossol ou spray – ocorre aumentando a corrente e tensão até ultrapassar a chamada “corrente de transição” mudando bruscamente o modo de transferência de globular para spray. O diâmetro das gotas é pequeno, porém em grandes quantidades.

Os arames utilizados na solda MIG para aço carbono são mostrados na Tabela 2.

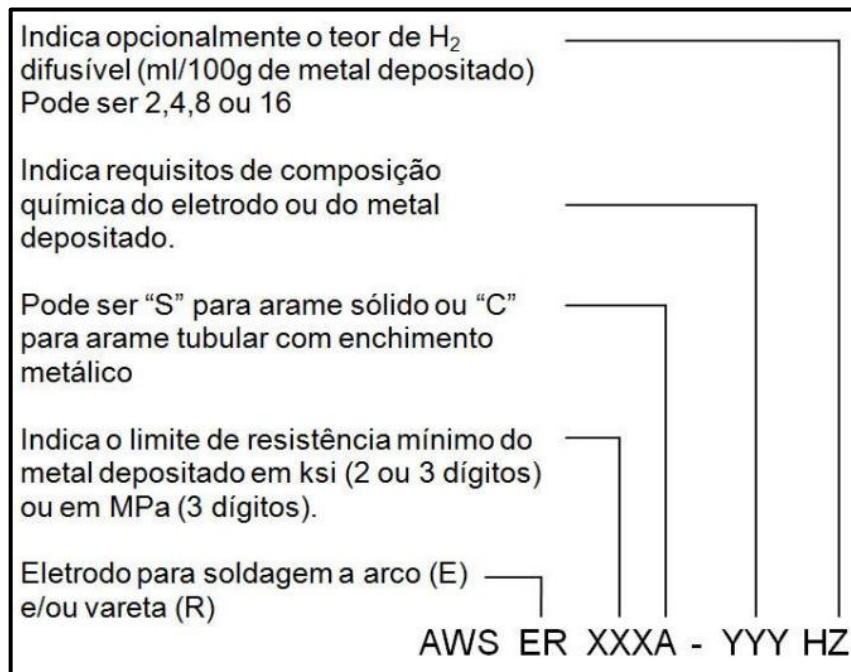
Tabela 2 - Arames de aço carbono de baixa liga.

AWS	ESAB	C	Mn	Si	S	P	Mo	Outros
ER70S-2	65	0,07	0,90-1,40	0,40-0,70	≤0,035	≤0,025	---	0,05-0,15 Ti 0,02-0,12 Zr 0,05-0,15 Al
ER70S-3	29S ou 82	0,06-0,15	0,90-1,40	0,45-0,75	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-4	85	0,07-0,15	1,00-1,50	0,65-0,85	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-5	---	0,07-0,19	0,90-1,40	0,30-0,60	≤0,035	≤0,025	---	0,50-0,90 Al
ER70S-6	OK 12.51	0,07-0,15	1,40-1,80	0,80-1,15	≤0,035	≤0,025	---	
ER70S-7	87HP	0,07-0,15	1,50-2,00	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	---	
ER80S-D2	83 ou Hi84	0,07-0,12	1,60-2,10	0,50-0,80	≤0,035	≤0,025	0,40-0,60	
ER70S-G	não especificado – requisitos a serem acordados entre o cliente e o fornecedor							

Fonte: Fontes (2005).

A classificação conforme Soldagem (Cap8), segundo as especificação da AWS A 5.18 e A 5.28 que engloba arames sólidos e os arames com enchimento metálico é mostrada na Figura 10.

Figura 10 - Classificação para arames sólidos e com enchimento metálico, de acordo com a AWS.



Fonte: Soldagem (Cap8).

A taxa de deposição (TD) no processo MIG/MAG conforme Nilo Jr (2003) é a quantidade de arame fundido por unidade de tempo que foi adicionado no metal base, e é um dos fatores de desempenho econômico que deve ser levado em consideração na seleção do processo de soldagem. Esta taxa pode ser obtida pela equação 1.

$$TD = \frac{3,6 (mf - mi)}{ts} \quad \left[\frac{Kg}{h} \right] \quad \text{Equação 1}$$

mf – massa final da chapa (g);

mi – massa inicial da chapa (g);

ts – tempo de soldagem (s).

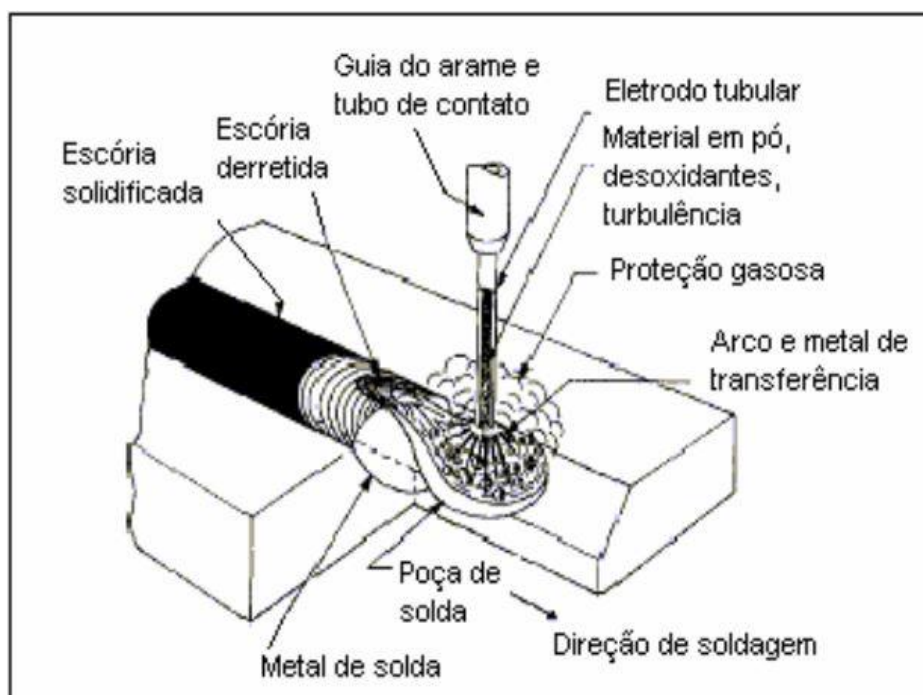
2.3.3 Soldagem a arco com Arame Tubular

No processo de soldagem a arco com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding - FCAW) ocorre formação do arco elétrico entre o metal base e um arame tubular contínuo, consumível. A proteção do arco pode ocorrer pelos gases decorrentes da queima dos componentes do eletrodo, chamado de eletrodo auto-protegido, ou por um fluxo externo de gás geralmente CO₂.

O processo de soldagem é geralmente semiautomático semelhante ao MIG/MAG em relação aos equipamentos utilizados, dando ao processo alto fator de trabalho, alta taxa de deposição, altos rendimentos e grande produtividade. Por outro lado, ele também é semelhante aos eletrodos revestidos, pois possui alta versatilidade, grande possibilidade de mudança da composição química do metal de solda e a possibilidade da operação de soldagem em campo, devido aos arames tubulares auto-protegidos (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE. 2005).

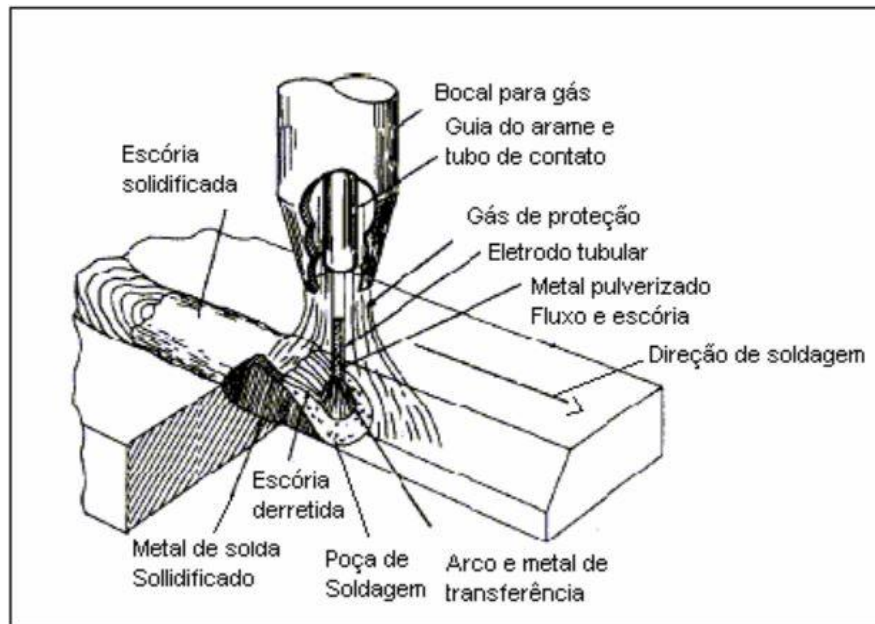
Conforme Machado (1996), o processo sem gás de proteção Figura 11, arame tubular auto-protegido, possui uma reduzida penetração no metal base e utiliza uma tocha mais simples, quando comparado ao que utiliza gás auxiliar Figura 12. Os modos de transferência de metal recomendados são: curto-circuito e globular, pela menor área externa total das gotas a serem protegidas. Também possui a vantagem de soldagem em locais com correntes de ar, juntas mal posicionadas além de todas as posições, quando utilizado o arame de pequenos diâmetros. Porém a qualidade da solda é inferior, comparado àquela que utiliza gás auxiliar, devido à contaminação atmosférica deixando poros.

Figura 11 – Soldagem sem proteção gasosa.



Fonte: Rodrigues (2005).

Figura 12 – Soldagem com proteção gasosa.



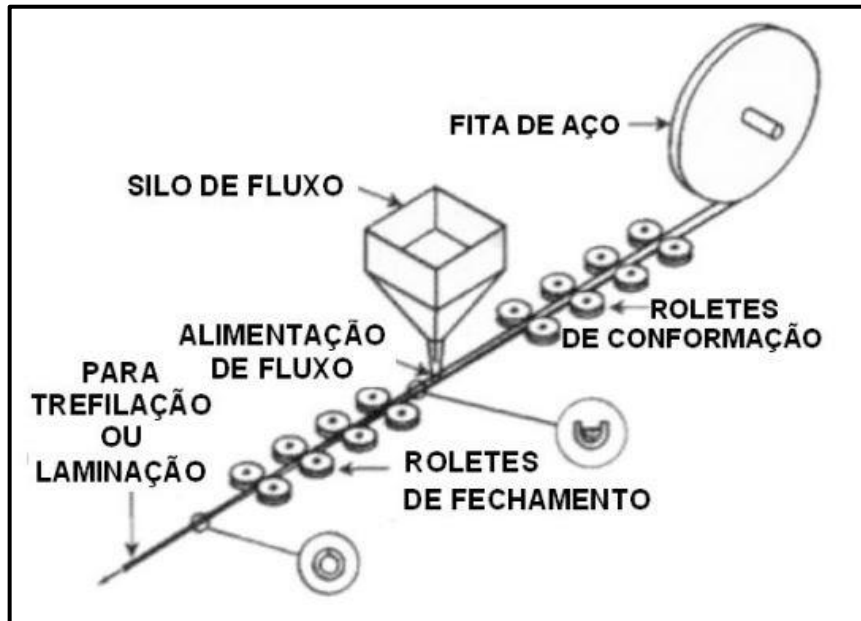
Fonte: Rodrigues (2005).

De acordo com Rodrigues (2005), a soldagem com proteção gasosa Figura 12, são utilizados para aços de baixo carbono e de baixa liga. Pode ocorrer com fluxo não metálico, rutílico, básico, e fluxo metálico.

- Eletrodos Rutílicos – excelente soldabilidade, arco estável, bom formato da gota sendo utilizado em todas as posições, baixo nível de respingos e fácil remoção da escória. Modo de transferência comum é spray.
- Eletrodos Básicos – soldas com excelente ductilidade e tenacidade, soldabilidade inferior ao rutílico e gera quantidade maior de respingos. Indicados quando requerido propriedades mecânicas e baixo nível de depósito de hidrogênio. Modo de transferência é globular.
- Fluxo Metálico – função de unir o metal de solda juntamente com os elementos incluso no interior do eletrodo, aplicados em peças com boa limpeza e geram pouca escória. A qualidade da solda depende das propriedades mecânicas do metal de solda do eletrodo.

O processo de fabricação dos arames tubulares, Figura 13, constitui-se de uma fita metálica enrolada na forma de uma bobina, e de um pó com formulações específicas. A fita metálica é deformada por roletes formando uma seção de canaleta (“U”), a qual recebe o fluxo de pó, posteriormente a fita é fechada por roletes seguindo para trefilação ou laminação diminuindo seu diâmetro.

Figura 13 – Fabricação de arames tubulares.

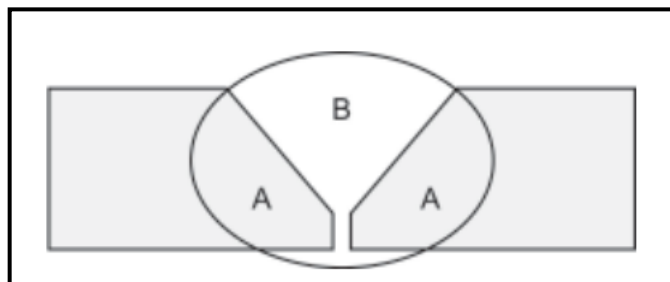


Fonte: Fontes (2005).

2.4 Diluição na Soldagem

Diluição, Figura 14, pode ser definida como a porcentagem de metal base que penetra na composição do metal adicionado pela soldagem. Esse percentual pode variar, para os processos por fusão, de 5% até 100% (sem metal de adição) e obtido através do cálculo (Equação 2), da divisão do metal base fundido (A) pela soma do metal base fundido (A) e metal de adição (B). Em casos de soldagem de revestimento, onde a composição do material base e consumível são bem diferentes, podem ocorrer problemas de elevada diluição prejudicando a resistência necessária no revestimento (ZEEMANN 2003).

Figura 14 - Diluição.



Fonte: adaptado de Zeemann (2003).

$$Diluição(\%) = \frac{A}{A+B} 100$$

Equação 2

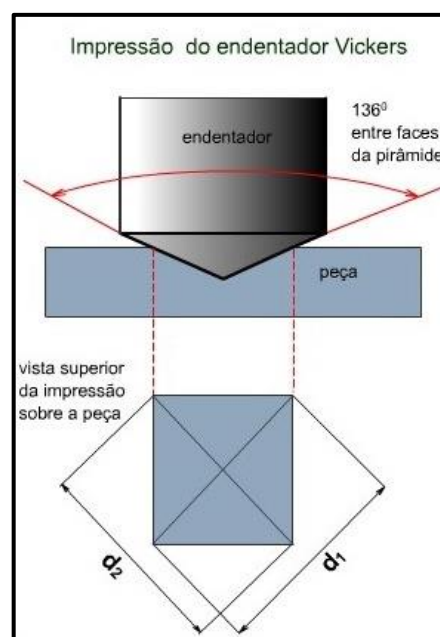
Segundo Ramalho et al. (2013) a composição química e demais propriedades desejáveis para uma liga de revestimento, em casos de resistência ao desgaste, se degradam quando a diluição aumenta. Para uma diluição de 10%, tem-se que na zona fundida possui 10% de metal de base e 90% de liga de revestimento.

Com o aumento da corrente, o arco penetra mais e funde mais metal base aumentando a diluição. Quando se utiliza corrente contínua com polaridade direta a penetração é menor do que corrente contínua com polaridade inversa, conseqüentemente a diluição será maior com polaridade inversa. Eletrodo com bitola menor é associado com pequena tensão, ou seja, baixa diluição. Com o aumento da velocidade de avanço diminui a quantidade de metal fundido, diminuindo a diluição (RAMALHO et al. 2013).

2.5 Dureza Vickers

Essa dureza levou o nome Vickers devido à companhia Vickers-Armstrong Ltda., muito conhecida para operar com esse tipo de dureza. A máquina para esse tipo de ensaio possui o penetrador em forma de pirâmide de diamante Figura 15, praticamente indeformável, de base quadrada e com ângulo de 136° entre faces opostas. Todas as impressões são parecidas entre si, independente do tamanho e carga, isto é, o número de dureza obtido é o mesmo para qualquer carga usada para materiais homogêneos (SOUZA, 1982).

Figura 15 – Endentador pirâmide Diamante Vickers.



Fonte: CIMM.

Conforme Schio (2013) a carga deve ser aplicada progressivamente por meio de um pistão, sem vibrações ou choques e mantida por um tempo de 10 a 15 segundos. Após a retirada da carga, a impressão deixada pelo diamante é analisada por meio de um microscópio acoplado, através dele é possível obter as medidas das diagonais “d1” e “d2”, para o cálculo da dureza Vickers por meio da equação 3. As cargas (F) recomendadas são de: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 e 120 Kgf.

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2}$$

Equação 3

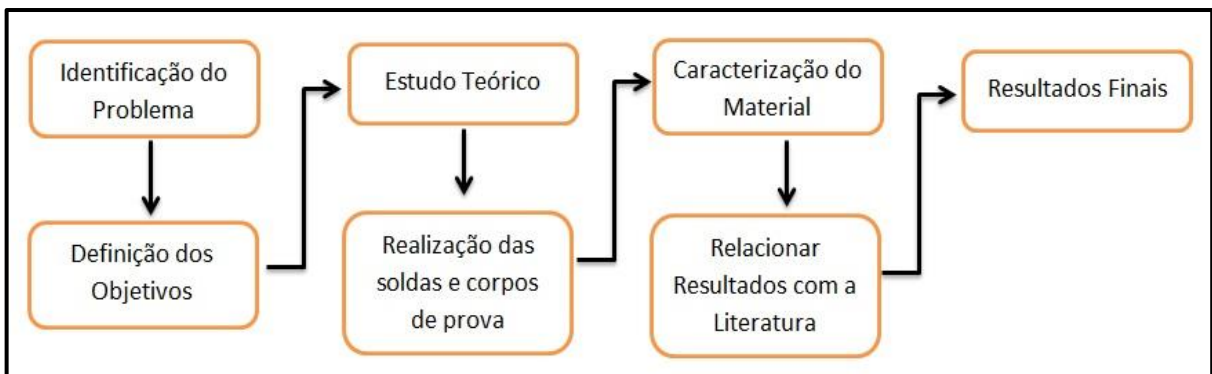
F - carga;

d - média das diagonais.

3 METODOLOGIA

A Figura 16 mostra o fluxograma das atividades realizadas a partir da identificação do problema.

Figura 16 – Fluxograma de atividades.



Fonte: autoria própria.

3.1 Realização das soldas

As soldas foram realizadas em aço SAE 1045 de composição C=0,45% Mn=0,75% (valores teóricos), e os equipamentos utilizados pertencentes ao Laboratório de Máquinas da Unipampa.

3.1.1 Solda Eletrodo Revestido

O equipamento utilizado foi uma máquina de solda da marca ESAB modelo Heliarc255 Figura 17.

Figura 17 - Equipamento para soldagem.



Fonte: autoria própria.

O eletrodo utilizado foi o UNADUR 600 (composição: C, Mn, Si, Cr e Mo), o mesmo usado pela empresa LESY. A Figura 18 apresenta algumas características do eletrodo como: corrente, posição de soldagem, composição química e algumas aplicações. Os parâmetros de soldagem empregados para este ensaio foram:

- Corrente contínua polaridade positiva;
- Corrente de 170 A (amperes) e tensão de 70 V (volts);

Figura 18 – Eletrodo revestido utilizado na empresa LEZY.

Produto	Corrente/ Polaridade	Posição de Soldagem	Composição Química/ Propriedades Mecânicas	Aplicação
UNADUR 600 DIN 8555 E1 UM 600 REVESTIDO	CC+		Cr Mo Mn C Si D: 600HB	Eletrodo Cr – Mn – C e Mo – C para revestimento anti-desgaste por atrito, compressão, impacto e abrasão moderada. Muito utilizado para enchimentos de grande extensão e espessura, sem risco de destacamento e como camada intermediária para revestimento de maior dureza.

Fonte: adaptado, catálogo CIFARELLI & UNA.

Após a calibração dos equipamentos, foi realizado um passe de solda Figura 19, sobre o metal base (aço 1045).

Figura 19 - Cordão de solda com Eletrodo Revestido.



Fonte: autoria própria.

3.1.2 Solda MIG

Para a soldagem MIG, utilizou-se a máquina de solda da marca ESAB modelo Smashweld 257, Figura 20.

Figura 20 – Máquina de solda MIG e consumível.



Fonte: autoria própria.

O consumível utilizado foi de espessura 1,00mm representado na Figura 21 (composição: C, Mn, Si), e os parâmetros de soldagem utilizados foram:

- Corrente contínua polaridade positiva;
- Corrente de 162A (amperes) e tensão de 22V (volts);
- Gás de proteção Ar/CO₂;
- Alimentação do arame de 8m/min.

Figura 21 – Arames sólidos MIG/MAG.

CONSUMÍVEIS DE SOLDAGEM PARA AÇOS CARBONO			
ARAMES SÓLIDOS MIG/MAG			
REFERÊNCIA H SOLDAS	NORMA AWS	DIÂMETRO (MM)	DESCRIÇÃO/APLICAÇÃO
HS FB 2 IG	ER 70S-6	0,60 0,80 1,00 1,20	Arame sólido (MIG/MAG) indicado para USO UNIVERSAL. Ideal para CHAPAS DE AÇO CARBONO. Utilizado em SERRALHERIAS, fábricas de móveis tubulares, CHASSI DE CAMINHÃO, ESTRUTURAS METÁLICAS. Soldar utilizando mistura Ar/CO2 ou CO2 como gás de proteção.

Fonte: adaptado, catálogo H Soldas.

Após a calibração dos equipamentos, conforme os parâmetros anteriores, foi realizado um passe de solda Figura 22 sobre o metal base (aço 1045).

Figura 22 - Cordão de solda MIG.



Fonte: autoria própria.

3.1.3 Solda Arame Tubular

Para soldagem com arame tubular, utilizou-se o mesmo equipamento da solda MIG, realizando algumas adaptações devido a diferença de espessura do arame, Figura 23.

Figura 23 - Máquina de solda Arame tubular e consumível.



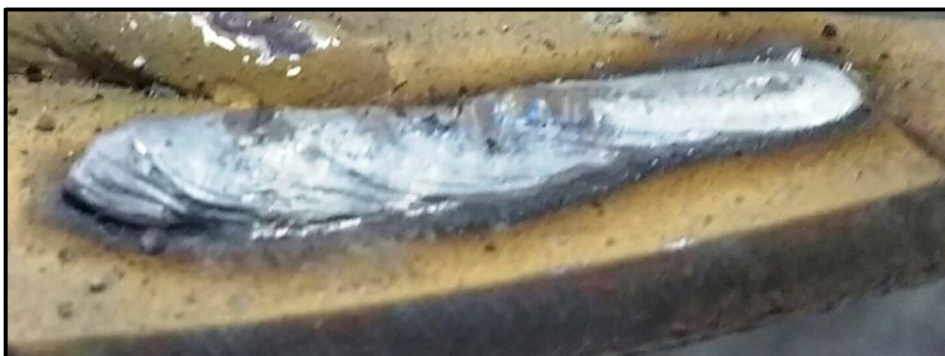
Fonte: autoria própria.

O consumível utilizado foi o LINCORE 55-G (composição: C, Mn, Si, Cr e Mo) de espessura 1,60 mm, e os parâmetros de soldagem utilizados foram:

- Corrente contínua polaridade positiva;
- Corrente de 162A (amperes) e tensão de 22V (volts);
- Gás de proteção Ar/CO₂;
- Alimentação do arame de 3m/min.

Após a calibração dos equipamentos, conforme os parâmetros citados, foi realizado um passe de solda sobre o metal base, Figura 24.

Figura 24 - Cordão de solda com Arame Tubular.



Fonte: autoria própria.

3.2 Ensaio de Microdureza

Os ensaios foram realizados no microdurômetro pertencente ao Laboratório de Ensaio Mecânicos da Unipampa, da marca Buehler modelo MicroMet 6010 representado na Figura 25.

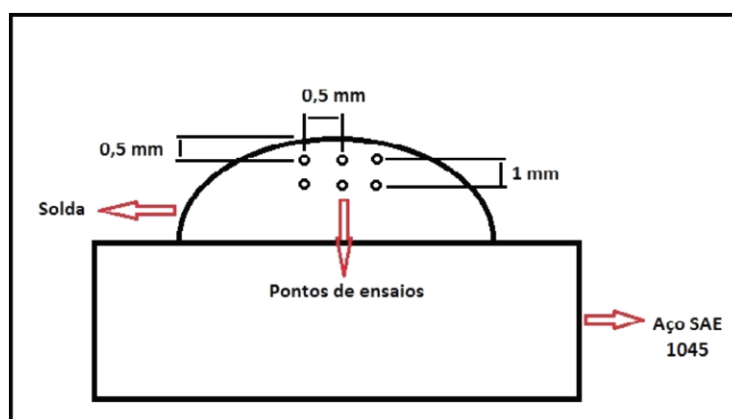
Figura 25 - Microdurômetro.



Fonte: autoria própria.

O ensaio utiliza escala Vickers e os mesmos foram feitos com carga de 1kg a 0,5 mm da extremidade da solda avançando em 1 mm em direção a raiz da mesma, e também 0,5 mm para ambos os lados, obtendo-se uma média, conforme esquema da Figura 26. Com isso, tem-se o perfil de microdureza em relação à profundidade da solda até chegar ao metal base.

Figura 26 - Esquema ensaio de microdureza.



Fonte: autoria própria.

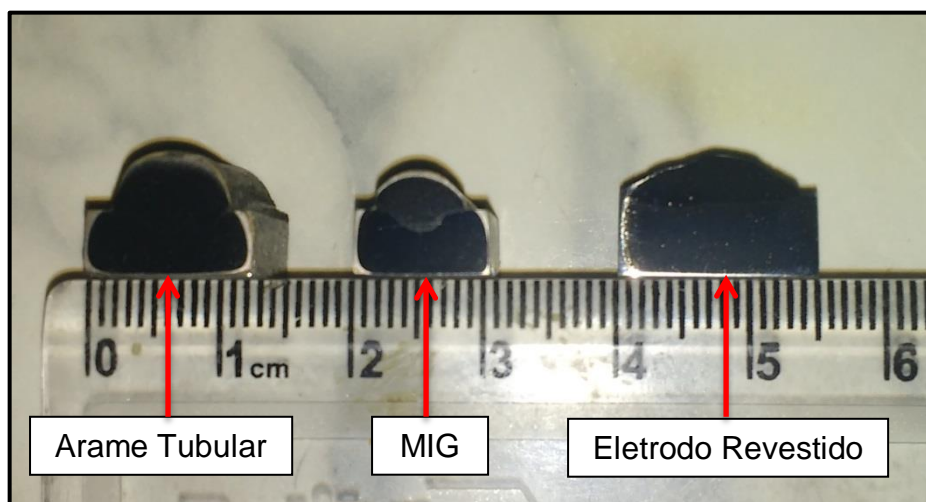
Para realização deste ensaio as amostras foram cortadas na máquina de corte da marca Teclano modelo CM60, Figura 27, pertencente ao Laboratório de Máquinas da Unipampa. A solda e o substrato foram expostos na face onde se iam realizar os ensaios, além de deixar as demais faces planas para a fixação do corpo de prova no microdurômetro.

Figura 27 – Máquina de corte.



Fonte: autoria própria.

Figura 28 - Corpos de prova das soldas.



Fonte: autoria própria.

3.3 Ensaio de Desgaste

Para a realização deste ensaio foi utilizado o equipamento Phoenix Tribology, modelo TE 53 SLIM, representado na Figura 29, o qual pertence ao Laboratório de Máquinas da Unipampa.

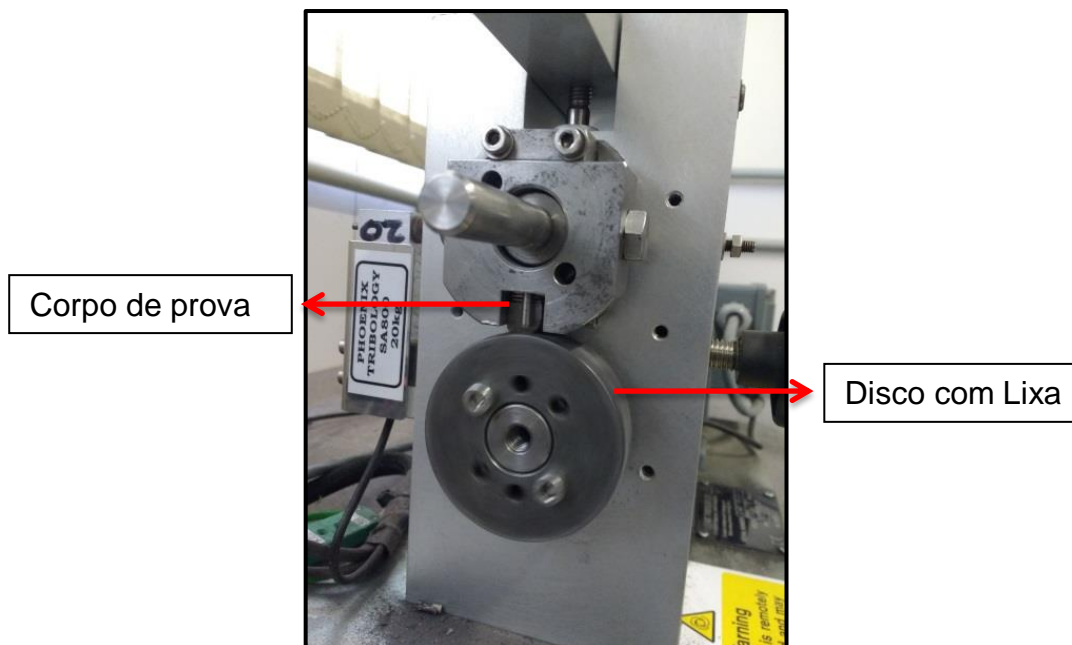
Figura 29 - Equipamento para ensaio de desgaste.



Fonte: autoria própria.

Neste equipamento o corpo de prova é acoplado no suporte conforme Figura 30, que permanece parado, enquanto exerce uma força sobre um disco com lixa que através do movimento circular produz o desgaste, utilizando o princípio de bloco sobre anel.

Figura 30 - Corpo de prova sendo desgastado.



Fonte: autoria própria.

Para realização deste ensaio as amostras foram cortadas com comprimento de aproximadamente 12 mm, utilizando a máquina de corte Figura 27. Também foi necessária a colocação de uma lixa da marca VONDER com granulometria 120

grãos/pol² coladas com cola instantânea no disco, para que ocorresse um desgaste mensurável das amostras.

Os parâmetros utilizados para realização dos ensaios foram:

- Carga de 1kg;
- Rotação de 50 rpm ($\approx 9\text{m/s}$) na superfície do disco;
- 440 ciclos com troca da lixa aos 220 ciclos.

Com o auxílio de uma balança de precisão Figura 31, marca Shimadzu com resolução de 0,001g, mensurou-se as amostras antes e depois do teste para obtenção do desgaste através da perda de massa calculada pela equação 4.

$$\textit{Perda de massa} = m_i - m_f \quad 4$$

m_i – massa inicial;

m_f – massa final.

Figura 31 - Balança de precisão.



Fonte: autoria própria.

3.4 Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Para análise de alta resolução do revestimento das amostras, foi utilizado o MEV, pertencente ao Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da Unipampa, modelo EVO MA10 da marca Zeis, representado pela Figura 32.

Figura 32 - Microscópio Eletrônico de Varredura.



Fonte: autoria própria.

Para realização deste ensaio as amostras foram embutidas e lixadas, as sequências dos procedimentos foram:

- Corte das amostras com 10 mm de espessura, utilizando a máquina de corte Figura 27;
- Embutimento em baquelite utilizando o processo a frio;
- Para o lixamento foi utilizado lixas com granulometria: 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1200, 1500, 2000 grãos/pol²;
- Polimento em pasta diamantada de alumina 9 μ m;
- Ataque químico com Kalling (3g CuCl₂; 5ml HCl; 50ml Etanol) nos cordões de eletrodo revestido e arame tubular, por 10 segundos;
- Ataque químico com nital 5% na solda MIG e nos metais base, por aproximadamente 30 segundos.

Foi utilizado o ataque com Kalling pois o nital 5% não causava efeito nessas soldas, que pudessem ser observados no MEV.

3.5 Cálculo da Diluição

Utilizando macrografias das amostras após ataque químico, foram medidas as áreas A (metal diluído) e B (metal de adição) conforme Figura 14. Para isso utilizou-se o aplicativo Autocad, e através da equação 2 chegou-se a taxa de diluição.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Microdureza

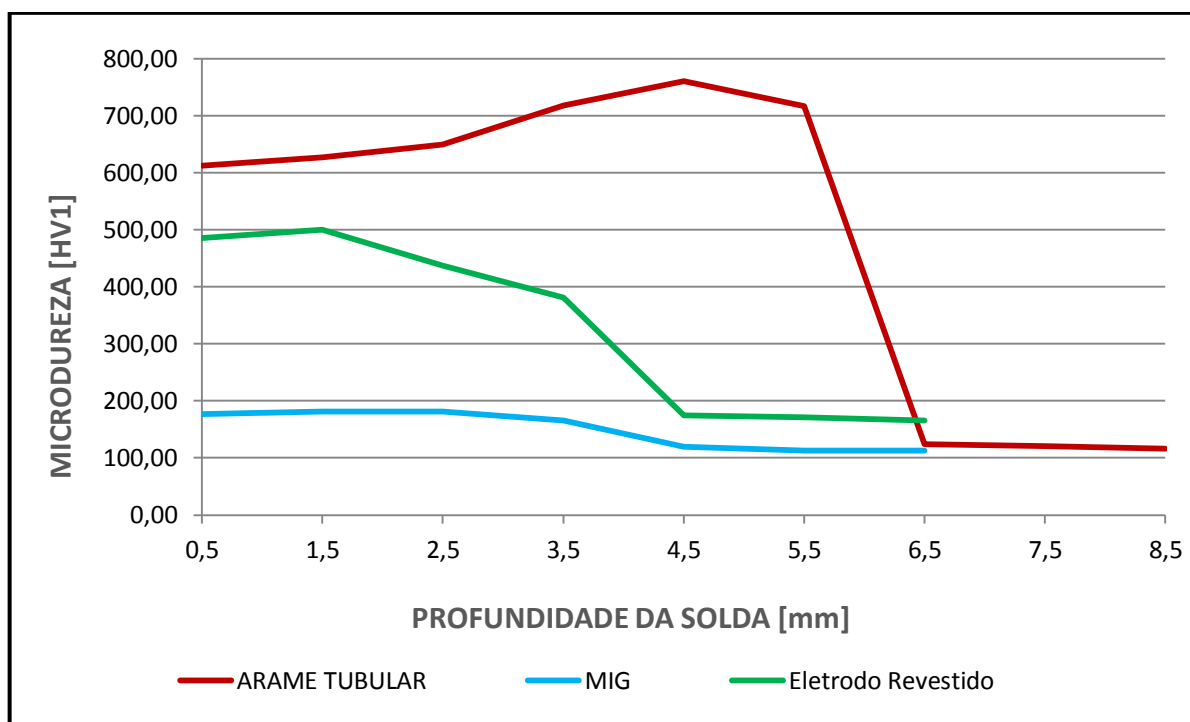
O ensaio de microdureza foi realizado na escala Vickers (HV) com carga de 1kg (HV1), o gráfico da Figura 33 apresenta o perfil de microdureza em relação à profundidade da solda até chegar ao metal base, realizado conforme esquema da Figura 26. O gráfico expõe os três processos para a melhor comparação entre eles.

O processo que apresentou microdureza mais elevada foi o que utilizou arame tubular, a média geral no cordão de solda foi de 673,85HV chegando até 761HV em 4,5mm de profundidade.

Já o processo com eletrodo revestido, obteve média geral de microdureza no cordão de solda de 474,39HV e chegando ao máximo de 500HV em 1,5mm de profundidade. Tanto o processo com arame tubular quanto o com eletrodo revestido tem em sua composição química C, Mn, Si, Cr e Mo.

E para o cordão de solda MIG, como esperado, a média de microdureza na solda foi de 179,96HV, devido a composição química do arame ser basicamente de C, Mn, Si.

Figura 33 - Perfil de microdurezas.

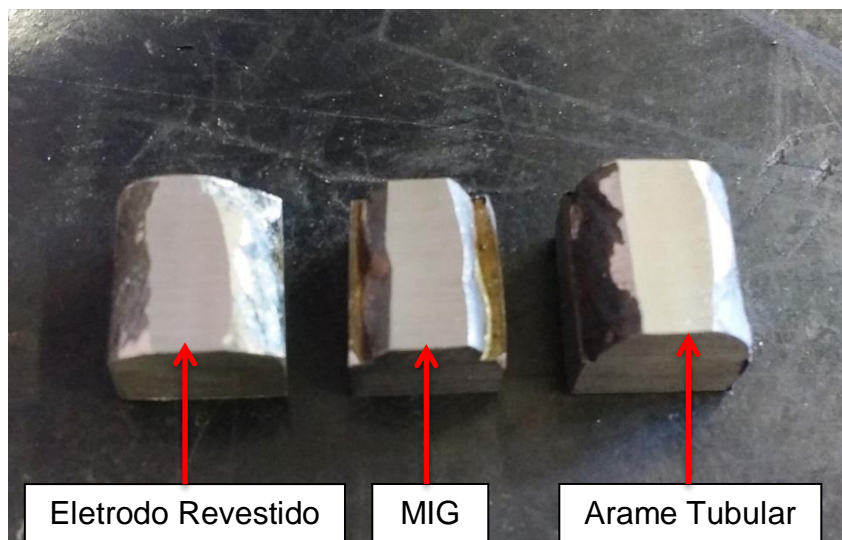


Fonte: autoria própria.

4.2 Ensaio de Desgaste

Foi realizado o ensaio de desgaste bloco sobre anel com as amostras de eletrodo revestido, MIG e arame tubular como pode ser observado na Figura 34. A Tabela 3 e Figura 35, apresentam os resultados do ensaio realizado com lixa de granulometria 120 grãos/pol².

Figura 34 - Amostras após ensaio de desgaste



Fonte: autoria própria.

Tabela 3 – Resultado ensaio de desgaste.

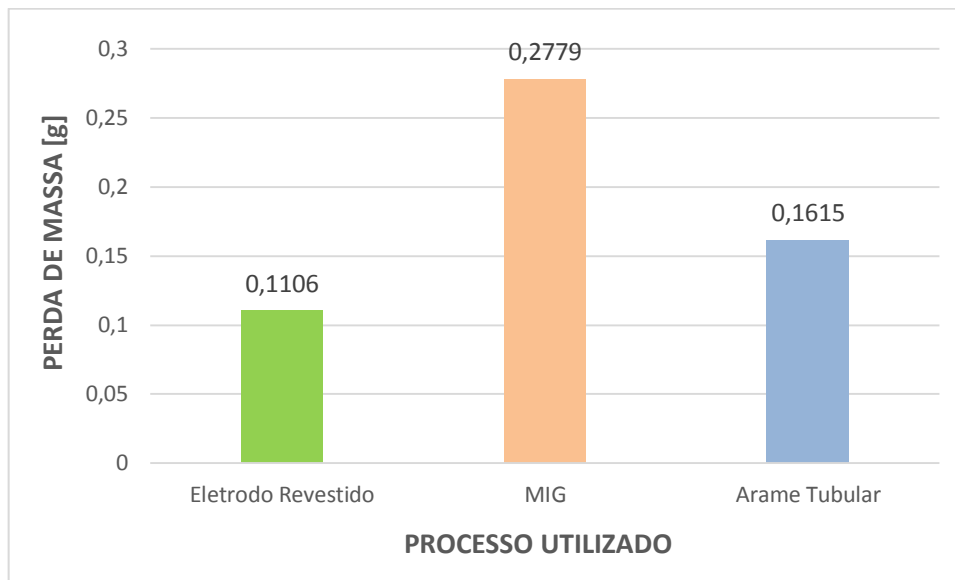
	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Perda de Massa (g)
Eletrodo Revestido	7,6105	7,4999	0,1106
MIG	6,1756	5,8977	0,2779
Arame Tubular	8,3586	8,1971	0,1615

Fonte: autoria própria.

As perdas de massa obtidas foram:

- Eletrodo revestido = 1,45%;
- MIG = 4,5%;
- Arame tubular = 1,93%.

Figura 35 - Gráfico com os resultados do ensaio de desgaste.



Fonte: autoria própria.

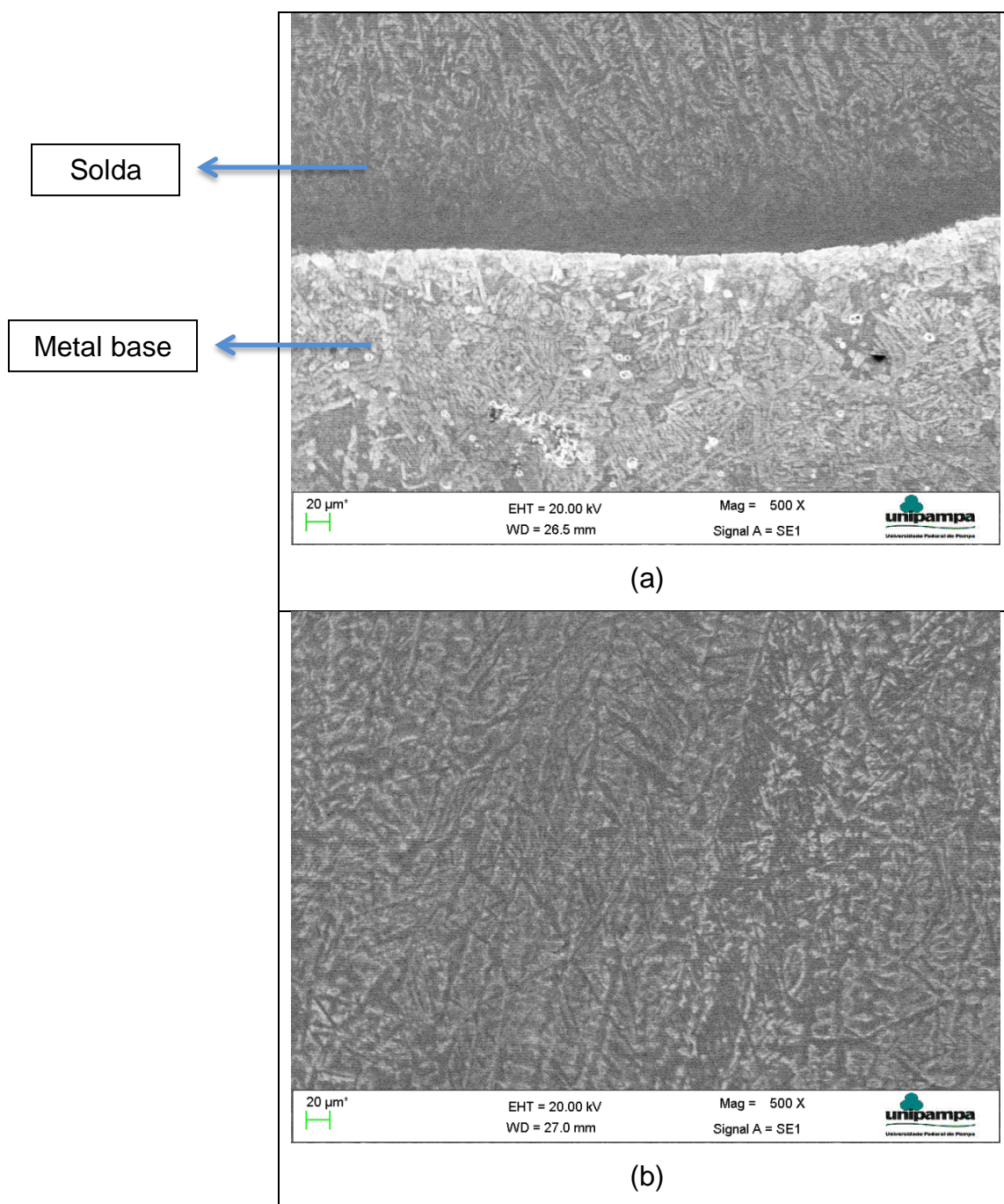
Pelo gráfico da Figura 35, fica evidente a diferença de perda de massa entre os processos, pode-se perceber que o desgaste com arame tubular foi 1,7 vezes menor do que o processo MIG. Porém, comparado o arame tubular com eletrodo revestido a perda de massa foi de 1,46 vezes maior para o arame tubular.

Comparando os ensaios de microdureza e desgaste, para o primeiro caso a soldagem com arame tubular obteve o melhor desempenho, aproximadamente 200HV a mais que o eletrodo revestido e 493HV a mais que a MIG. Já para o ensaio de desgaste o eletrodo revestido obteve melhor desempenho, a perda de massa foi de aproximadamente 1,46 vezes menor que o arame tubular e 2,51 vezes menor que a MIG.

4.3 MEV

A seguir serão mostradas as imagens analisadas nas regiões das soldas, obtidas no MEV.

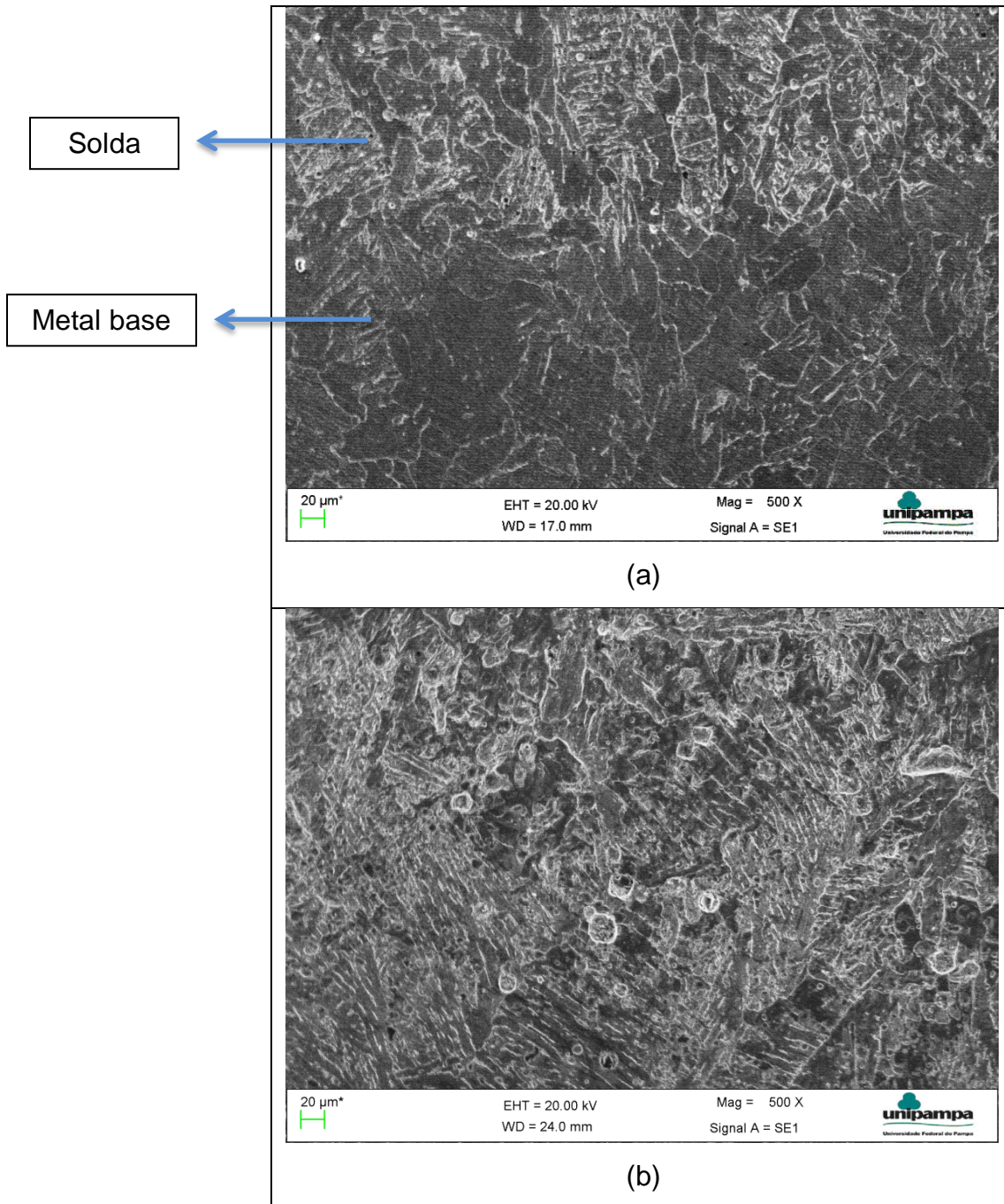
Figura 36: Eletrodo Revestido (a) interface, (b) solda.



Fonte: autoria própria.

Analisando a Figura 36(a) é bem nítida a interface entre a solda e o metal base, e que este é formado por perlita e ferrita. Já na Figura 36(b), região da solda a microestrutura de austenita com um crescimento dendrítico, não é possível verificar a formação de carbonetos primários tipo M_7C_3 .

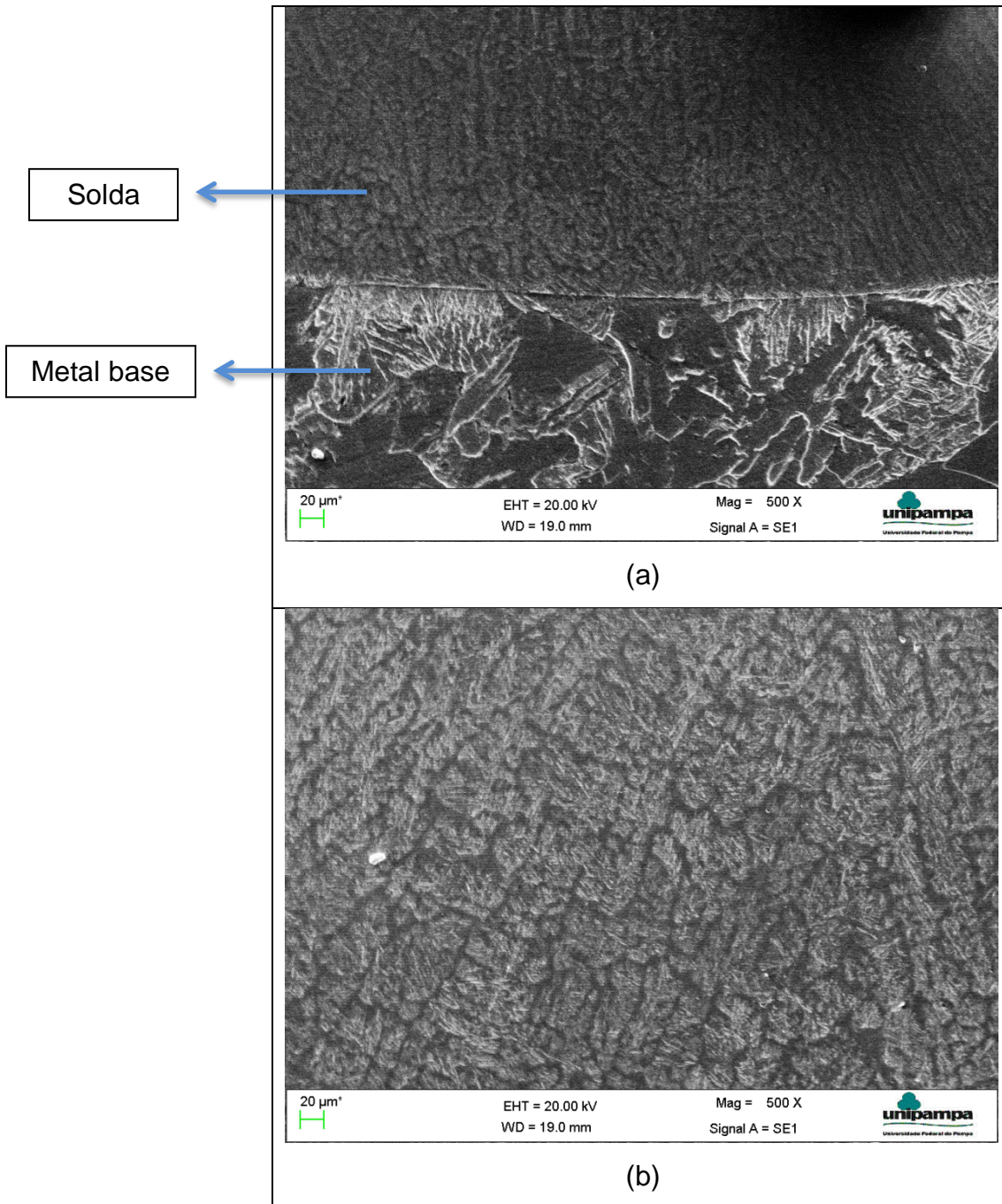
Figura 37: MIG (a) interface, (b) solda.



Fonte: autoria própria.

Pela imagem da Figura 37 (a), a interface entre a solda e o metal base não é bem nítida, e é possível perceber também que tanto a microestrutura do metal base quanto a da solda, Figura 37 (b), é formada por perlita e ferrita. Deve-se a essa microestrutura, a baixa microdureza encontrada e também a alta perda de massa obtida no ensaio de desgaste.

Figura 38: Arame Tubular (a) interface, (b) solda.



Fonte: autoria própria.

Analisando a Figura 38 (a) fica bem visível a interface entre a solda e o substrato de perlita e ferrita. Já na Figura 38 (b) a solda possui microestrutura de austenita com crescimento dendrítico e também não é possível verificar a formação de carbonetos primários tipo M_7C_3 .

Para MACEDO et al (2010), o crescimento dendrítico pode resultar em uma distribuição assimétrica dos carbonetos ao longo da superfície, o que pode levar a

um comportamento que apresenta propriedades diferentes em determinadas direções do revestimento, quanto à resistência ao desgaste.

Segundo o estudo de Hernandez apud LIMA e FERRARESI (2009) a microestrutura com maior resistência à abrasão foi o carboneto primário em uma matriz eutética de carbonetos mais austenita, obtidas a partir de revestimentos com teores mais elevados de Cr e C. A maior resistência à abrasão ocorreria pelo aumento da fração volumétrica dos carbonetos e pela diminuição da largura das dendritas de austenita as quais ficaram menos expostas à ação das partículas abrasivas.

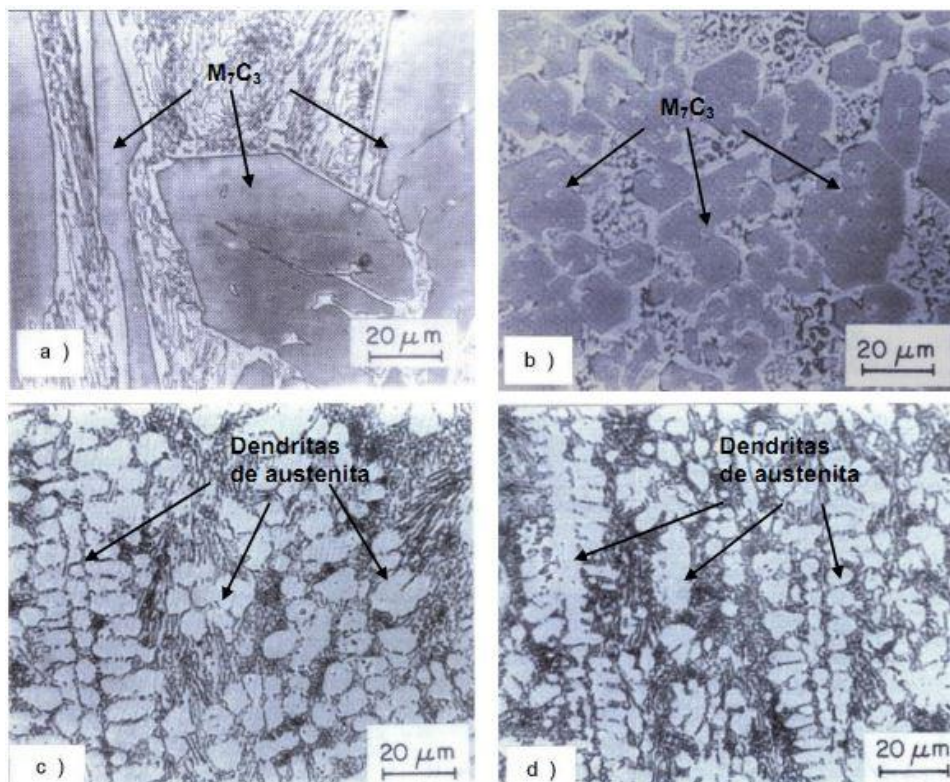
Comparando as imagens do eletrodo revestido Figura 36(b) e arame tubular Figura 38 (b) percebe-se que a largura dos dendritos de austenita é menor no primeiro caso, o que explica o menor desgaste obtido pelo eletrodo revestido, Figura 35.

Conforme Bálsamo et al apud Lima (2008) o aporte de energia tem grande influência no tamanho médio, na morfologia da microestrutura. Para ocorrer um refinamento da microestrutura é necessária uma maior velocidade de solidificação e para isso, um menor aporte térmico.

Pode-se observar na Figura 39 o efeito do teor de carbono e aporte térmico na microestrutura, percebe-se que o maior teor de carbono influencia na formação de carbonetos primários tipo M_7C_3 (morfologia hexagonal) em matriz eutética de austenita mais carboneto, Figura 39(a e b). Já o menor teor, resulta em uma microestrutura composta por dendritas de austenita em matriz eutética Figura 39(c e d). Comparativamente é observado um maior refino da microestrutura, tanto em carbonetos M_7C_3 quanto as dendritas de austenita Figura 39(b e d), devido ao menor aporte térmico que foram submetidas durante a soldagem (Bálsamo et al apud Lima 2008).

Neste experimento tanto as amostras de eletrodo revestido Figura 36, como arame tubular Figura 38, apresentarem dendritas de austenita, a diferença observada nestas imagens foi no refino da microestrutura. Pelo exposto anteriormente, essa diferença pode ser explicada devido o aporte térmico utilizado, e com isso a velocidade de solidificação da solda.

Figura 39 - Microestrutura de revestimento duro liga Fe-Cr-C: a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C.




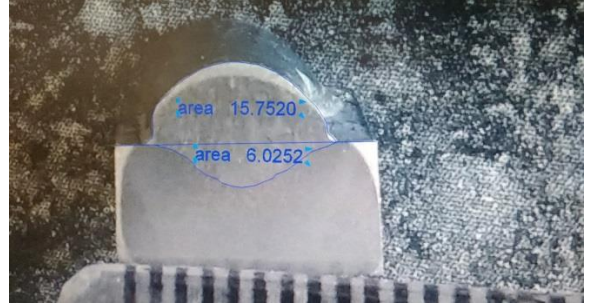

Fonte: Bálamo et al apud Lima (2008).

4.4 Taxa de Diluição

A taxa de diluição influencia na microestrutura do revestimento, pois, muda a composição química do metal de adição pela mistura com o metal base, diminuindo a resistência ao desgaste, com isso é desejável uma pequena taxa de diluição em soldas de revestimento duro.

Na Tabela 4 são mostrados os resultados da diluição encontrada para os três processos de soldagem, conforme descrito no item 3.5 deste trabalho. Analisando a tabela, pode-se observar que a menor taxa de diluição foi obtida pelo eletrodo revestido, seguida pelo arame tubular e MIG.

Tabela 4: Diluição para o Eletrodo Revestido (a), MIG (b) e Arame Tubular (c).

 <p>(a)</p>	Taxa de Diluição= 19,53%
 <p>(b)</p>	Taxa de Diluição= 27,67%
 <p>(c)</p>	Taxa de Diluição= 21,78%

Fonte: autoria própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final deste trabalho sobre o estudo da aplicação da solda de revestimento duro por diferentes processos, analisando a microestrutura através da análise metalográfica, realizando perfil de microdureza, desgaste e diluição, pode-se chegar a algumas conclusões:

Nas medições de microdureza, o arame tubular resultou em valores mais elevados, a média na solda foi de aproximadamente 200HV a mais que o eletrodo revestido e 493HV a mais que a MIG.

No ensaio de desgaste, a amostra de eletrodo revestido apresentou menor perda de massa, aproximadamente 1,46 vezes menor que o arame tubular e 2,51 vezes menor que a MIG.

Pela análise das imagens do MEV, percebeu-se que tanto a solda com o eletrodo revestido quanto a de arame tubular, formaram uma microestrutura de austenita com crescimento dendrítico, com diferença na largura das dendritas.

Pelos cálculos de diluição, tem-se que a taxa de diluição para o eletrodo revestido foi de 2,25% menor que o de arame tubular.

O aporte térmico pode ter influenciado no refino da microestrutura com isso na largura das dendritas encontradas no nas imagens do MEV, influenciando na perda de massa obtida no ensaio de desgaste. O aporte térmico também está diretamente relacionado com a taxa de diluição, a qual deve ser baixa para revestimentos duros.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar ensaio de desgaste utilizando como abrasivo a casca do arroz simulando o desgaste real dos rotores.
- Modificar parâmetros de soldagem, diminuindo o aporte térmico.
- Realizar estudos com dois ou mais passes de solda, pois a taxa de diluição influencia mais no primeiro passe.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, W. M. **Revestimento por soldagem MIG/MAG empregando ligas de níquel para aplicações em componentes do setor de petróleo e gás natural.** Tese de Doutorado. Universidade Federal Do Ceará Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, 2010.

BAPTISTA, A. L. de B.; NASCIMENTO, I. de A. **Revestimento duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas.** Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>>. Acesso em 11 de junho de 2016.

BRANDI, S. D.; WEINER, E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem – Processos e Metalurgia.** São Paulo: Edgard Blucher. 2004.

FORTES, C. **Apostila de Eletrodos Revestidos OK.** ESAB, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 02/05/2016

FORTES, C. **Apostila de soldagem MIG/MAG OK.** ESAB, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemmigmag_low.pdf>. Acesso em: 07/06/2016

FORTES, C. **Apostila de Arames Tubulares OK.** ESAB, 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901098rev1_apostilaaramestubulares_ok.pdf>. Acesso em: 29/06/2016

GOMES, J. H. de F. **Análise e otimização da soldagem de revestimento de chapas de aço ABNT 1020 com utilização de arame tubular inoxidável austenítico.** Dissertação. Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

LIMA, A. C. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto a resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar.** Tese. Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia, 2008.

LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. **Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira.** Soldagem INSP. São Paulo, Vol. 14, No. 2, p. 140-150, Abr/jun 2009

MACEDO, B. P. N.; TREVISAN, L. A.; CRESPO, G. da S.; MANERA, R. da S. **Revestimentos duros depositados por soldagem: o papel dos carbonetos sobre a resistência ao desgaste abrasivo.** Recife, PE, XXXVI CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem, 2010.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas: Processos.** Porto Alegre: editado pelo autor, 1996. 477p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. **Soldagem I: Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

NILO Jr., L. P. **Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos**. Dissertação. UNIFEI, Itajubá, 2003.

PESSOA, A. R. P. **Revestimento de ligas de níquel pelo processo MIG/MAG com transferência por curto-circuito**. Dissertação. Universidade Federal Do Ceará Centro de Tecnologia Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Fortaleza, 2009.

RAMALHO, J. P. et al. **Soldagem**. São Paulo: Editora SENAI-SP, 2013, 720p. il.

RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. Dissertação. Universidade Estadual Paulista Faculdade de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 2004.

RODRIGUES, L. de O. **Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular**. Dissertação. Universidade Federal De Itajubá Instituto De Engenharia Mecânica, Itajubá, 2005.

SANTOS, R. P. G. **Uma avaliação comparativa dos processos MIG/MAG e eletrodo tubular em termos de capacidade produtiva, geração de fumos e de respingos**. Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia. MG. 2010.

SCHIO, F. **Análise comparativa entre soldagem MIG/MAG manual e robotizada**. Trabalho de conclusão de curso. UNIJUI, Panambi/RS, 2013.

SOLDAGEM. **Introdução à soldagem: Física do arco elétrico**. Capítulo 4. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT4.pdf>>. Acesso em: 2/05/2016

SOLDAGEM. **Introdução à soldagem: Soldagem MIG/MAG**. Capítulo 8. Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/ciclo10/CAPIT8.pdf>>. Acesso em: 23/06/2017

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. São Paulo: Editora Blucher, 1982. 286 p

ZEEMANN, A. **Infosolda Diluição**. Engenharia Mecânica, D Sc em Eng. Metalúrgica e de materiais no PEMM – COPPE/UFRJ. 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/images/Downloads/Artigos/metaldiluio.pdf>>. Acesso em: 18 de junho de 2016.