

Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Departamento Acadêmico de Mecânica - DAMEC  
Engenharia Mecânica

Ana Luiza Beltrão Santana

**Influência da corrente de soldagem e  
velocidade de alimentação do arame  
tubular no desgaste abrasivo de  
revestimentos depositados pelo processo  
TIG alimentado arame frio.**

**Monografia**

**Curitiba  
2016**

Ana Luiza Beltrão Santana

**Influência da corrente de soldagem e velocidade de  
alimentação do arame tubular no desgaste abrasivo  
de revestimentos depositados pelo processo TIG  
alimentado arame frio.**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Mecânica na Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador: Ossimar Maranhão

Curitiba  
2016

## TERMO DE APROVAÇÃO

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa *Influência da corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame tubular no desgaste abrasivo de revestimentos depositados pelo processo de soldagem TIG alimentado arame frio*, realizado pela aluna Ana Luiza Beltrão Santana, como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Ossimar Maranhão  
Damec, UTFPR  
Orientador

Prof. Dr. Aldo Santos Pereira  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Prof. Dr. Walter Luís Mikos  
Damec, UTFPR  
Avaliador

Curitiba, 15 de junho de 2016.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação esquemática do processo de soldagem TIG. Fonte: Adaptado de (WAINER, 2000). . . . .	15
Figura 2 – Equipamentos utilizados no processo de soldagem TIG. Fonte: adaptado de (MARQUES, 2011) . . . . .	16
Figura 3 – Influência da corrente de soldagem na diluição. Fonte: Adaptado de (KANNAN; MURUGAN, 2006) . . . . .	17
Figura 4 – Influência da corrente de soldagem na perda de massa de revestimentos. Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2004) . . . . .	18
Figura 5 – Influência da velocidade de alimentação do arame (F) na diluição. Fonte: Adaptado de (SHANMUGAN; MURUGAN, 1999). . . . .	19
Figura 6 – Influência da velocidade de alimentação do arame (F) na diluição para diferentes velocidades de soldagem. a) Corrente de soldagem de 80A; b) Corrente de soldagem de 90A. Fonte: Adaptado de (LIN, 2013). . . . .	19
Figura 7 – Influência da energia de soldagem na perda de massa, diluição e dureza. Fonte: Adaptado de (RIBEIRO; VENTRELA; GALLEGU, 2005). . . . .	21
Figura 8 – Representação de uma macrografia do cordão de solda para obtenção da diluição. W representa a largura, R o reforço e P a penetração do cordão. Fonte: Adaptado de (MODENESI, 2012). . . . .	21
Figura 9 – Aumento da produtividade no processo de soldagem TIG com a utilização de alimentação automática de arame. Fonte: Adaptado de (ZEEMANN et al., 1995). . . . .	22
Figura 10 – Esquema do processo de fabricação dos arames tubulares. Fonte: Adaptado de (BRACARENSE, 2006) . . . . .	23
Figura 11 – Seções dos arames tubulares. Fonte: Adaptado de (BRACARENSE, 2006) . . . . .	23
Figura 12 – Tipos de desgaste abrasivo: a) desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992) . . . . .	24
Figura 13 – Representação do mecanismo de desgaste abrasivo de microsulcamento: a) sulcos com material deslocado para as bordas; b) sulcos com formação de proa. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992) .	25
Figura 14 – Representação do mecanismo de desgaste abrasivo de microcorte. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992). . . . .	26



Figura 15 – Representação do mecanismo de desgaste por fratura frágil. Fonte: Adaptado (MARANHO, 2006) . . . . .	27
Figura 16 – Micrografia das Superfícies desgastadas de revestimentos depositados pelo processo FCAW. a) Revestimento com baixo teor de Ti; b) Revestimento com um teor Ti mais elevado. Fonte: Adaptado de (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009) . . . . .	27
Figura 17 – Superfícies dos revestimentos desgastadas. Fonte: Adaptado de (LIMA; FERRARESI, 2010) . . . . .	28
Figura 18 – Esquema com as dimensões das chapas: a) representação da chapa que será utilizada para depositar um cordão de solda; b) representação da chapa que será utilizada para fazer o revestimento. Fonte: autoria própria. . . . .	29
Figura 19 – Representação das atividades que foram executadas neste do trabalho. Fonte: Autoria própria. . . . .	31
Figura 20 – Tocha de soldagem TIG que será utilizada para depositar os cordões e revestimentos. Fonte: autoria própria. Fonte: Autoria própria . .	32
Figura 21 – Representação das etapas de preparação dos Corpos de prova conforme recomendação da norma (ASTM, 2001)[G65 01]. Fonte: Autoria própria . . . . .	33
Figura 22 – Abrasômetro tipo roda de borracha projetado conforme recomendação da norma (ASTM, 2001)[G65 01], onde (1): é o reservatório de abrasivo, (2): é a roda de borracha e (3): é o porta amostra com dispositivo de medição. Fonte: Adaptado de (COLAÇO, 2013) . .	34
Figura 23 – Corpo de prova após ensaio de desgaste abrasivo. Fonte: Autoria própria . . . . .	35
Figura 24 – Representação das medições de dureza nos corpos de prova desgastados. Fonte: Adaptado de (COLAÇO, 2013) . . . . .	36
Figura 25 – Representação das medidas das áreas para calcular a diluição. Fonte: Autoria própria. . . . .	36
Figura 26 – Diluição em função da velocidade de alimentação do arame e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria. . . . .	38
Figura 27 – Perda de massa dos revestimentos em função da velocidade de alimentação do arame tubular e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria. . . . .	39
Figura 28 – Perda de massa dos revestimentos em função da diluição. Fonte: Autoria própria. . . . .	40

Figura 29 – Dureza superficial dos revestimentos em função da velocidade de alimentação do arame tubular e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria. . . . .	41
Figura 30 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,0m/min (R220/1.0) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	42
Figura 31 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R220/1.3) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	43
Figura 32 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R220/1.6) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	43
Figura 33 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R280/1.3) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	44
Figura 34 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,6m/min (R280/1.6) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	45
Figura 35 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,9m/min (R280/1.9) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria. . . . .	45

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Composição Química do arame tubular KST TUB TIC OA, porcentagem em peso. Fonte: adaptado de (ESAB, 2013) . . . . .	30
Tabela 2 – Nomenclatura utilizada para identificação dos cordões de solda e revestimentos depositados nas chapas. . . . .	33
Tabela 3 – Valores de diluição obtidos para os cordões. . . . .	37
Tabela 4 – Resultados obtidos para perda de massa corrigida (pmc) dos revestimentos. . . . .	39
Tabela 5 – Valores médios de durezas dos revestimentos . . . . .	40

# Lista de abreviaturas e siglas

A	Representação da quantidade de área proporcional de material de adição fundido
A	Ampère unidade da corrente de soldagem
ABNT	<i>Associação Brasileira de Normas Técnicas</i>
Ar	Argônio
ASTM	<i>American Standard for Testing Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
B	Representação da quantidade de área proporcional de metal base
C	Carbono
Cr	Cromo
CC+	Polaridade inversa da corrente de soldagem
CC-	Polaridade direta da corrente de soldagem
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
Cpd	Corpo de prova
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i>
Fe	Ferro
(g)	Grama, unidade de massa
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
m	metro
MB	Metal base
$m_i$	Massa inicial do corpo de prova

$m_f$	Massa final do corpo de prova
min	Minuto, unidade de tempo
$mm^2$	Unidade de área
ms	Milisegundo, unidade de tempo
N	Newton, unidade de força
Nb	Niobio
P	Penetração de um cordão de solda
$P_m$	Perda de massa do corpo de prova
$P_{mc}$	Perda de massa corrigida do corpo de prova
R	Reforço de um cordão de solda
R 220/1.0	Simbologia utilizada para representar o revestimento feito com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,0 m/min
R 280/1.3	Simbologia utilizada para representar o revestimento feito com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3 m/min
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>
Ti	Titânio
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
UTFPR	<i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i>
V	Tensão de soldagem
V	Volt, unidade da tensão de soldagem
W	Largura do cordão de solda

# Lista de símbolos

$\eta$	Letra grega Eta: usada para representa a eficiência térmica do processo de soldagem
$\phi_i$	Letra grega Phi: usada para representa o diâmetro inicial da roda de borracha
$\phi_f$	Letra grega Phi: usada para representa o diâmetro final da roda de borracha

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo</b>	<b>14</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo secundário</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Processo de Soldagem TIG</b>	<b>15</b>
2.1.1	Princípio de Funcionamento	16
2.1.2	Variáveis do Processo de Soldagem	16
2.1.2.1	Tensão do arco	16
2.1.2.2	Corrente de soldagem	16
2.1.2.3	Velocidade de soldagem	18
2.1.2.4	Velocidade de alimentação do arame	18
2.1.2.5	Gás de proteção	20
2.1.3	Energia de soldagem	20
2.1.4	Diluição	21
2.1.5	Processo TIG com alimentação automática de arame	22
2.1.6	Arames Tubulares	23
<b>2.2</b>	<b>Desgaste Abrasivo</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Mecanismos de Desgaste Abrasivo</b>	<b>25</b>
2.3.1	Mecanismo de desgaste por deformação	25
2.3.2	Mecanismo de desgaste por fratura frágil	26
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais</b>	<b>29</b>
3.1.1	Metal base	29
3.1.2	Consumíveis	29
3.1.3	Equipamentos de Soldagem	30
<b>3.2</b>	<b>Metodologia Experimental</b>	<b>30</b>
3.2.1	Definição das variáveis de soldagem	31
3.2.2	Deposição dos cordões e revestimentos	32
3.2.3	Preparação dos corpos de prova	33
3.2.4	Ensaio de desgaste abrasivo	34
3.2.5	Dureza	35
3.2.6	Diluição	36

4	RESULTADOS E DISCUSÕES . . . . .	37
4.1	Diluição dos cordões . . . . .	37
4.2	Perda de massa dos revestimentos . . . . .	38
4.3	Dureza dos revestimentos . . . . .	40
4.4	Mecanismos de desgaste . . . . .	41
5	CONCLUSÕES . . . . .	47
5.1	Sugestões de trabalhos futuros . . . . .	47
	REFERÊNCIAS . . . . .	48



## RESUMO

Neste trabalho foi analisada a influência das variáveis velocidade de alimentação do arame tubular e corrente de soldagem no desgaste abrasivo de revestimento depositados pelo processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) alimentado arame frio. Também foi feita uma análise secundária da influência das variáveis de soldagem citadas acima na diluição e dureza dos revestimentos. Para análise do desgaste abrasivo, a partir da perda de massa dos corpos de prova, foi utilizado um abrasômetro tipo roda de borracha, utilizando como abrasivo areia normalizada, para realização dos ensaios de desgaste conforme procedimento estabelecido pela norma ASTM G65. A dureza dos revestimentos foi obtida a partir das médias de cinco medições realizadas na superfície dos corpos de prova e para diluição foi feita a deposição de um único cordão de solda para cada par das variáveis velocidade de alimentação do arame tubular e corrente de soldagem estabelecidos no trabalho. Observou-se que a perda de massa diminuiu com o aumento da velocidade de alimentação do arame tubular para as duas correntes de soldagem utilizadas. Contudo verificou-se que a maior corrente de soldagem proporcionou uma maior perda de massa quando comparada com a menor corrente de soldagem. Os resultados obtidos para diluição apresentaram o mesmo comportamento dos resultados encontrados para perda de massa, a diluição diminuiu com o aumento da velocidade de alimentação do arame tubular para ambas as correntes de soldagem e a diluição dos cordões aumentou com a utilização da maior corrente de soldagem. A dureza praticamente não teve influências das variáveis estudadas os resultados médios obtidos para dureza dos revestimentos analisados com seus respectivos desvios padrão foram praticamente iguais.

**Palavras chaves:** TIG arame tubular, revestimentos, desgaste abrasivo, diluição, desgaste.

# 1 INTRODUÇÃO

As indústrias de equipamentos e componentes mecânicos estão cada vez mais interessadas em tecnologias e materiais que proporcionem as melhores relações custo/benefício para seus produtos. Um dos principais vilões que afeta esta relação é o desgaste abrasivo, o qual é responsável pelas maiores despesas com manutenção e reposição de componentes. O desgaste abrasivo consiste da perda de massa superficial de um componente e ocorre quando duas superfícies, de durezas superficiais diferentes e com a presença ou sem de partículas abrasivas, entram em contato com movimento relativo uma com a outra (CZICHOS, 1978).

Segundo (BAPTISTA; NASCIMENTO, 2009) quase 50% dos problemas de desgaste nas indústrias estão relacionados com o desgaste abrasivo. Para combater o desgaste abrasivo a utilização de revestimentos duros depositados por soldagem tem sido uma alternativa economicamente viável.

A soldagem de revestimentos consiste da deposição de um material mais nobre com maior resistência ao desgaste abrasivo e dureza que o material base do componente. Os revestimentos podem ser depositados por diversos processos de soldagem a escolha do processo dependerá de alguns fatores como: produtividade, custo, qualidade, versatilidade, diluição, energia de soldagem entre outros (WAINER, 2000).

A indústria usualmente utilizam como material de adição os eletrodos revestidos para depositar revestimentos, porém devido alta qualidade e elevada taxa de produtividade proporcionada pelos arames tubulares este tipo de metal de adição está se tornando uma alternativa mais praticável (LIMA; FERRARESI; GONÇALVES, 2007). Segundo (CONDE, 1986) a utilização dos arames tubulares tem conquistado espaço na indústria devido a sua maior produtividade e menores distorções da zona termicamente afetada do cordão de solda.

Outro fator importante que deve ser analisado na soldagem de revestimento é a característica do material de adição utilizado, uma vez que, a composição química bem como a microestrutura do metal de adição serão os responsáveis em proporcionar as propriedades mecânicas necessárias para que o revestimento seja resistente ao desgaste abrasivo (WAINER, 2000).

Alguns exemplos da aplicação de revestimentos para evitar ou retardar o desgaste abrasivo na indústria são observados em facas picadoras de cana de açúcar, martelos desfibradores, escavadeiras, britadores, entre outros (LIMA; FERRARESI, 2010).

Visando o grande aumento da utilização de revestimentos depositados por soldagem na indústria para reduzir o desgaste abrasivo este trabalho analisou a influência das

variáveis de soldagem: velocidade de alimentação do arame tubular e corrente de soldagem no desgaste abrasivo de revestimento depositados pelo processo TIG alimentado arame frio.

## 1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das variáveis corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame tubular no desgaste abrasivo de revestimento depositados pelo processo de soldagem TIG alimentado arame frio.

## 1.2 Objetivo secundário

Analisar a influência das variáveis corrente de soldagem e velocidade de alimentação do arame tubular na diluição e dureza dos revestimentos.

## 1.3 Justificativa

A utilização de revestimentos depositados por soldagem é uma das alternativas mais econômica utilizada por muitos setores da indústria para evitar ou prolongar os problemas causados pelo desgaste abrasivo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processo de Soldagem TIG

O processo de soldagem TIG (Tungsten Inert Gas) ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), Figura 1, utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre um eletrodo não consumível de tungstênio (W) e a poça de fusão (AWS, 2004). A soldagem TIG pode ser manual ou automática e feita com ou sem material de adição. A proteção da região de soldagem é feita por um gás inerte, os gases mais utilizados são o argônio, hélio e a mistura de ambos. (WAINER, 2000)

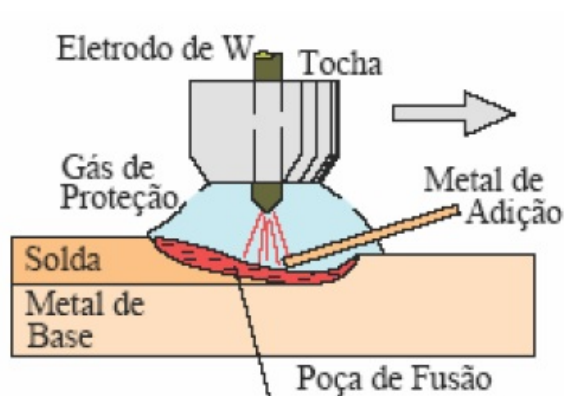


Figura 1 – Representação esquemática do processo de soldagem TIG. Fonte: Adaptado de (WAINER, 2000).

O processo TIG é utilizado para soldagem de ligas de alumínio, magnésio, titânio, aços inoxidáveis entre outros materiais. Algumas vantagens e limitações do processo são (WAINER, 2000):

- Produz soldas de alta qualidade e excelente acabamento;
- Gera pouco ou nenhum respingo;
- Excelente controle da poça de fusão;
- Exige pouca ou nenhuma limpeza após a soldagem;
- Baixa produtividade em processos manuais;
- Custo de consumíveis e equipamento é alto.

### 2.1.1 Princípio de Funcionamento

Para realizar a soldagem TIG alguns equipamentos são necessários como por exemplo: fonte de energia elétrica, uma tocha de soldagem apropriada, uma fonte de gás protetor, um dispositivo para abertura do arco, cabos e mangueiras, Figura 2 (MARQUES, 2011). O arco elétrico é estabelecido pela corrente que atravessa o gás ionizado entre a ponta do eletrodo de tungstênio e a peça. O calor gerado funde o metal base e forma uma poça de fusão (ZEEMANN et al., 1995).

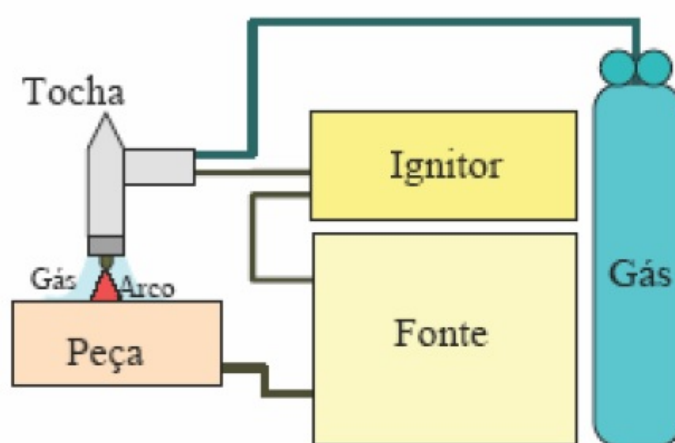


Figura 2 – Equipamentos utilizados no processo de soldagem TIG. Fonte: adaptado de (MARQUES, 2011)

### 2.1.2 Variáveis do Processo de Soldagem

As variáveis do processo de soldagem, especificadas abaixo, estão diretamente relacionadas com as características geométricas do cordão de solda.

#### 2.1.2.1 Tensão do arco

A tensão do arco é conhecida como a tensão entre o eletrodo e a peça, esta variável de soldagem é influenciada por quatro fatores: corrente do arco; perfil da ponta do eletrodo; distância entre o eletrodo e a peça e pelo tipo do gás de proteção. (MARQUES, 2011)

#### 2.1.2.2 Corrente de soldagem

A corrente de soldagem influencia a penetração e a largura da solda, com efeito diretamente proporcional, ou seja quanto maior a corrente maior será a penetração e a largura do cordão. Para outros parâmetros constantes, o reforço do cordão tende a

diminuir com o aumento da corrente para as soldas com metal de adição. (MARQUES, 2011)

Os autores (KANNAN; MURUGAN, 2006) avaliaram a influência da corrente de soldagem para algumas velocidades de soldagem em revestimentos depositados por FCAW (Flux Cored Arc Welding), Figura 3, e identificaram que o aumento da corrente de soldagem gera um aumento da diluição.

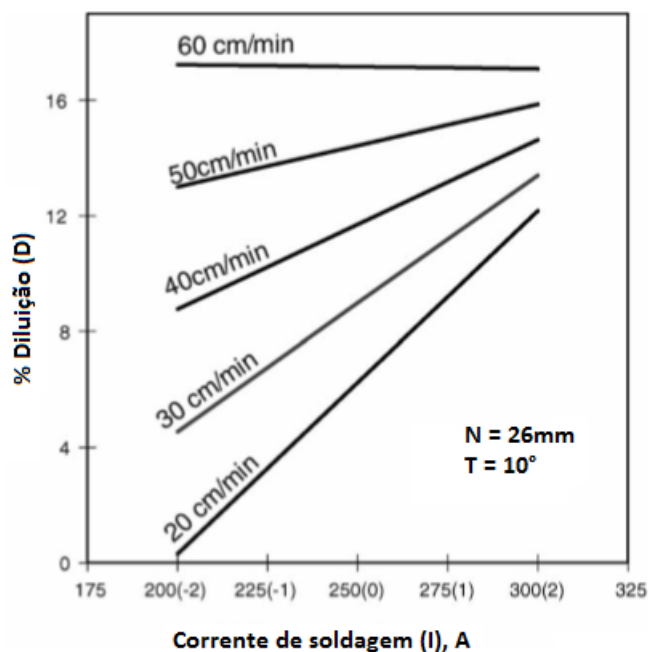


Figura 3 – Influência da corrente de soldagem na diluição. Fonte: Adaptado de (KANNAN; MURUGAN, 2006)

(RIBEIRO, 2004) estudou a influência da corrente de soldagem na perda de massa e pela Figura 4 é possível observar que o aumento da corrente proporciona um aumento da perda de massa isto ocorre devido ao aumento da diluição.

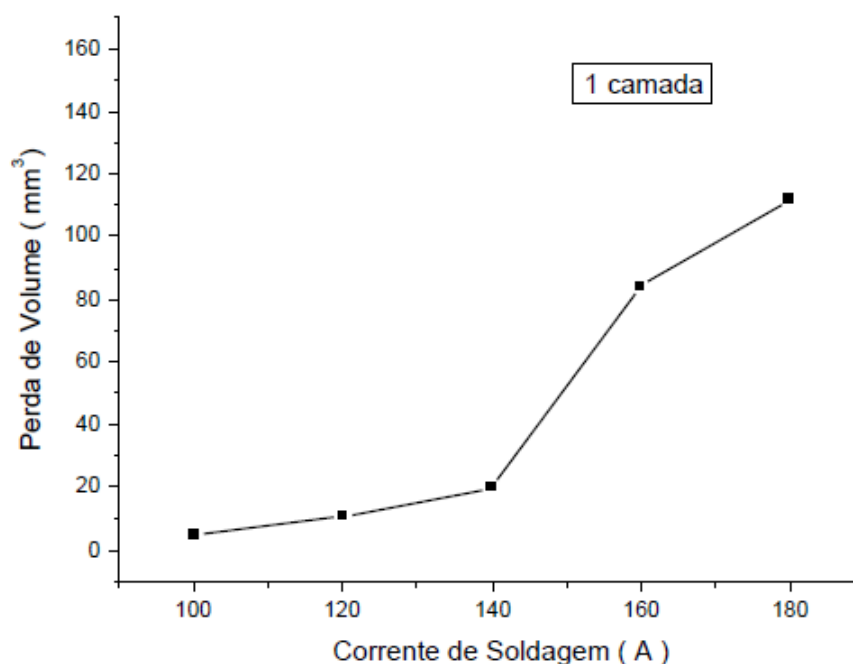


Figura 4 – Influência da corrente de soldagem na perda de massa de revestimentos.  
Fonte: Adaptado de (RIBEIRO, 2004)

#### 2.1.2.3 Velocidade de soldagem

A velocidade de soldagem altera a penetração e a largura do cordão de solda, sendo a largura mais afetada do que a penetração. Quanto maior a velocidade da soldagem melhor será a eficiência e a produtividade da operação, com conseqüente redução de custos por unidade de comprimento de solda produzida. (MARQUES, 2011)

#### 2.1.2.4 Velocidade de alimentação do arame

A alimentação do material de adição é outro parâmetro importante, pois em processos manuais, a maneira como o material é adicionado influencia no número de passes e na aparência da solda acabada. Na soldagem mecanizada a posição e a velocidade de alimentação do arame são importantes pois uma velocidade de alimentação de arame elevada pode provocar um reforço excessivo do cordão de solda e até uma fusão parcial do arame. No caso da posição se a alimentação for feita no arco de soldagem, ao invés de ser feita na poça de fusão, a transferência de metal para a peça se torna muito irregular o que pode causar instabilidade no arco e provocar defeito no cordão de solda. (MARQUES, 2011)

Estudos feitos por (SHANMUGAN; MURUGAN, 1999) demonstram que o aumento da velocidade de alimentação do arame, Figura 5, acarreta um decréscimo na diluição. Isso acontece devido ao fato de que com o aumento da velocidade de alimen-

tação do arame uma maior quantidade de material terá que ser fundida com a mesma energia de soldagem.

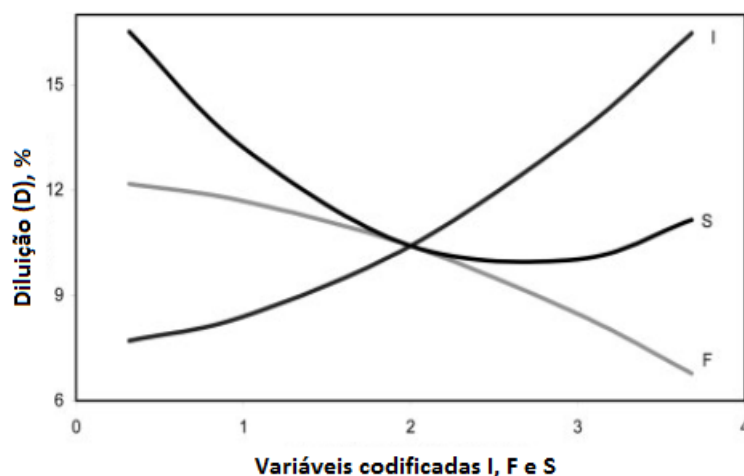


Figura 5 – Influência da velocidade de alimentação do arame (F) na diluição. Fonte: Adaptado de (SHANMUGAN; MURUGAN, 1999).

A Figura 6 mostra os resultados obtidos por (LIN, 2013) da influência da velocidade de alimentação do arame com velocidades de soldagem diferentes e para duas correntes de soldagem. É possível observar que novamente a diluição diminuiu com o aumento da velocidade de soldagem e que a corrente de soldagem maior,  $I=90A$ , proporciona uma maior diluição que também tende a diminuir com o aumento da velocidade de alimentação.

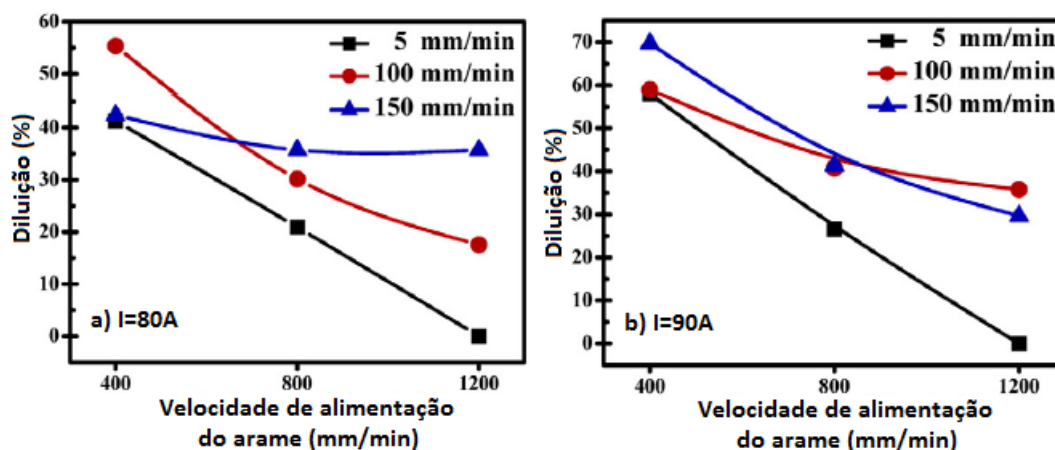


Figura 6 – Influência da velocidade de alimentação do arame (F) na diluição para diferentes velocidades de soldagem. a) Corrente de soldagem de 80A; b) Corrente de soldagem de 90A. Fonte: Adaptado de (LIN, 2013).



### 2.1.2.5 Gás de proteção

A principal função do gás é proteger a poça de fusão da atmosfera. Para escolher o tipo de gás que será utilizado, o fator que deve ser analisado é a densidade do gás, isso porque a densidade influencia o comportamento do arco elétrico além de alterar as características do cordão de solda. A vazão do gás também afeta a qualidade do cordão de solda, vazão muito baixa resulta em proteção insuficiente o que pode levar à oxidação do cordão de solda e formação de porosidade. Por outro lado vazão elevada, geralmente não causa nenhum problema porém encarece o custo da operação. (MARQUES, 2011)

Outras variáveis operatórias do processo de soldagem TIG que podem influenciar de forma secundária as características do cordão de solda são: ângulo da ponta do eletrodo e a distância do bocal à peça. (MARQUES, 2011)

### 2.1.3 Energia de soldagem

A energia de soldagem é definida como a quantidade de calor adicionada ao material soldado por unidade de comprimento linear. A energia de soldagem ( $E$ ) pode ser calculada pela Equação 2.1 (AWS, 2004).

$$E = \frac{\eta VI}{V_s} \quad (2.1)$$

onde:

$\eta$ : é a eficiência térmica do processo;

$V$ : é a tensão de soldagem;

$I$ : é a corrente de soldagem;

$V_s$ : é a velocidade de soldagem.

A Figura 7 mostra os resultados obtidos por (RIBEIRO; VENTRELA; GALLEGU, 2005) da influência da energia de soldagem na diluição, dureza e perda de volume de revestimentos depositados com eletrodo revestido de liga de Fe-Cr-C em um material base de aço estrutural de ASTM A-36. Os autores concluíram que o aumento da energia de soldagem proporciona um aumento na diluição e na perda de volume e uma diminuição não muito significativa da dureza.

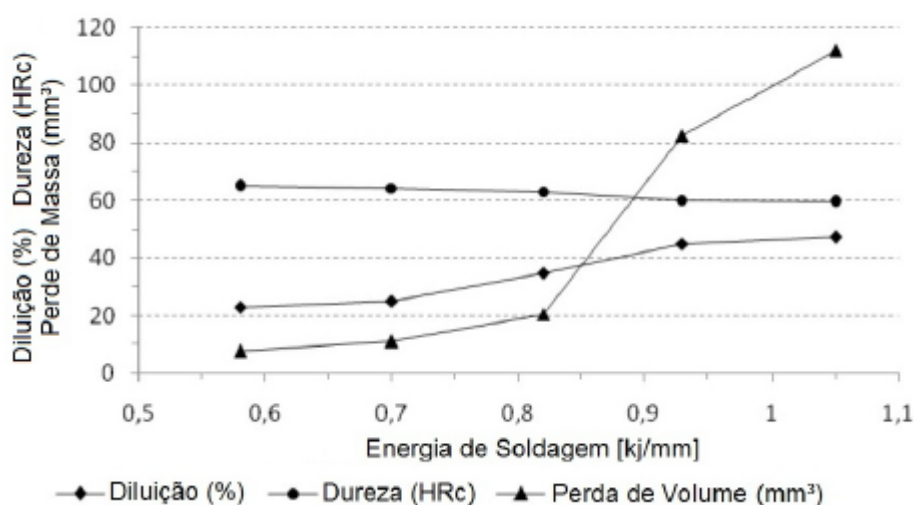


Figura 7 – Influência da energia de soldagem na perda de massa, diluição e dureza. Fonte: Adaptado de (RIBEIRO; VENTRELA; GALLEGO, 2005).

### 2.1.4 Diluição

A porcentagem de diluição de um cordão de solda ( $D$ ) pode ser definida como a razão entre a área proporcional da quantidade de metal base ( $B$ ) pela soma da área proporcional de material de adição fundido ( $A$ ) com a área ( $B$ ), Equação 2.2. As áreas  $A$  e  $B$  são obtidas pela análise de imagem da macrografia da seção transversal do cordão de solda, Figura 8. O valor da diluição depende do processo de soldagem, das condições de operação e da espessura da chapa (MODENESI, 2012).

$$D(\%) = \frac{B}{A + B} \times 100 \tag{2.2}$$

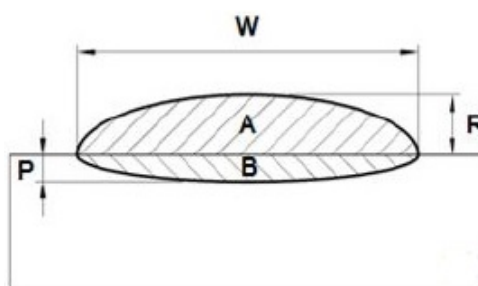


Figura 8 – Representação de uma macrografia do cordão de solda para obtenção da diluição.  $W$  representa a largura,  $R$  o reforço e  $P$  a penetração do cordão. Fonte: Adaptado de (MODENESI, 2012).

O conceito de diluição é importante quando se deseja controlar a participação do metal base na formação da solda, como por exemplo, na soldagem de metais dissimilares e em processos de revestimentos feitos por soldagem (MODENESI, 2012). Segundo (WEMAN, 2012) o desejável para revestimentos é uma baixa porcentagem de diluição.

### 2.1.5 Processo TIG com alimentação automática de arame

Existe dois tipos de alimentadores de arame para o processo de soldagem TIG conhecidos como "Cold Wire" e "Hot Wire". No processo "Cold Wire" o arame é alimentado na temperatura ambiente, normalmente utilizado para aço carbono, aço inox, alumínio, cobre e ligas de cobalto para revestimento. Já para o "Hot Wire" o arame é alimentado pré-aquecido por resistência utilizando-se corrente alternada, muito utilizado nos aços oxidáveis, ligas de níquel, cobre e titânio. O processo TIG "Hot Wire", TIG alimentado arame quente, oferece maiores taxas de deposição com velocidades de soldagem mais altas quando comparado com o processo TIG "Cold Wire", TIG alimentado arame frio.

Uma das grandes vantagens de utilizar alimentação automática no processo de soldagem TIG é o aumento da produtividade. A Figura 9 mostra uma comparação entre o processo TIG alimentado arame frio com o processo TIG com alimentação manual. (ZEEMANN et al., 1995)

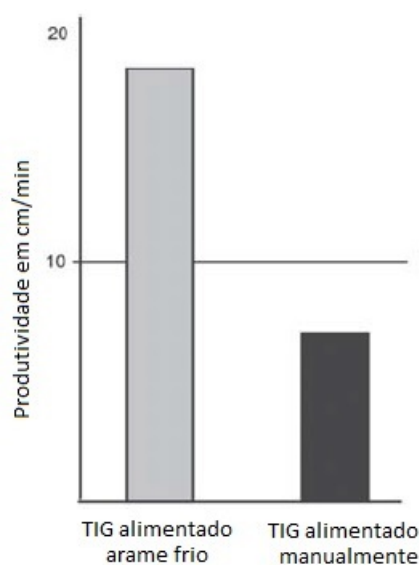


Figura 9 – Aumento da produtividade no processo de soldagem TIG com a utilização de alimentação automática de arame. Fonte: Adaptado de (ZEEMANN et al., 1995).

### 2.1.6 Arames Tubulares

A fabricação dos arames tubulares, Figura 10, é feita por uma fita ou fio que passa por um conjunto de rolos de conformação até sua seção transversal possuir um perfil em forma de "U", depois o fluxo interno é alimentado e outro conjunto de rolos de conformação fecha a sua seção. Após o preenchimento do fluxo o arame tem seu diâmetro reduzido, por feiras ou rolos até atingir a dimensão desejada. (BRACARENSE, 2006)

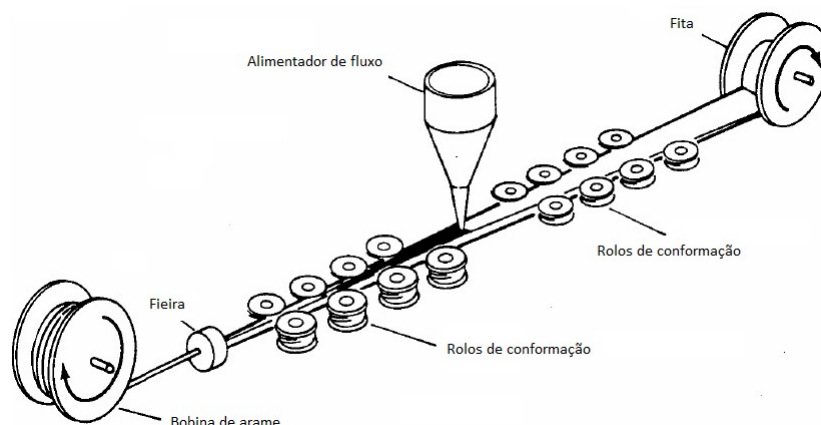


Figura 10 – Esquema do processo de fabricação dos arames tubulares. Fonte: Adaptado de (BRACARENSE, 2006)

Os arames tubulares podem ter diferentes tipos de seção. As mais usuais são com fechamento de topo e sobreposta (*overlap*), Figura 11. (BRACARENSE, 2006)



Figura 11 – Seções dos arames tubulares. Fonte: Adaptado de (BRACARENSE, 2006)

O percentual de fluxo dentro do arame varia entre 15 a 50% do seu peso, este percentual dependerá das funções a serem desempenhadas pelo fluxo. Arames tubulares auto-protégidos possuem percentuais de fluxos maiores do que os arames de proteção gasosa. A composição do fluxo pode ser classificada como básicos, rútilicos e metal cored. Os básicos produzem soldas com excelentes propriedades mecânicas e baixos teores de hidrogênio, os rútilicos proporcionam uma fácil soldagem e um excelente aspecto visual para o cordão e os do tipo metal cored, os quais possuem altos percentuais de ferro em sua composição, proporcionam altas taxas de deposição e rendimento (BRACARENSE, 2006).

## 2.2 Desgaste Abrasivo

Segundo (ASTM, 2013)[G40 13] o desgaste abrasivo é a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície na qual as mesmas se movem. O desgaste abrasivo pode ser classificados em duas condições: desgaste abrasivo a dois corpos e desgaste abrasivo a três corpos, Figura 12. A principal diferença entre as duas classificações é que no desgaste abrasivo a dois corpos os abrasivos estão fixos em um dos dois corpos com movimento relativo já no desgaste abrasivo a três corpos os abrasivos estão livres para se movimentar entre os corpos que tem movimento relativo (HUTCHINGS, 1992).

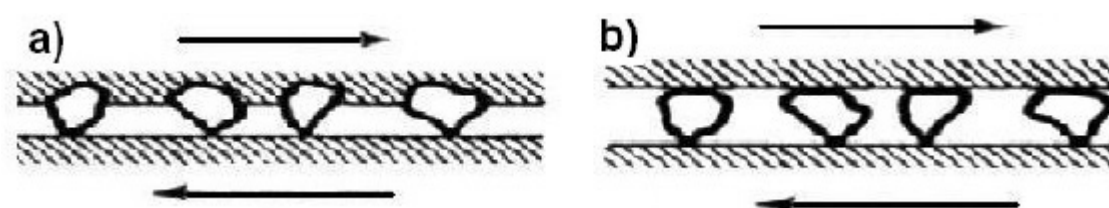


Figura 12 – Tipos de desgaste abrasivo: a) desgaste abrasivo a dois corpos; b) desgaste abrasivo a três corpos. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992)

(GATES, 1998) defende que a classificação de dois e três corpos abordada pela (ASTM, 2013)[G40 13] para o desgaste abrasivo não é adequada pois pode gerar confusão de interpretação. Um exemplo citado pelo autor seria o caso do ensaio de desgaste abrasivo em roda de borracha que seria classificado como um desgaste de três corpos, pois utiliza como abrasivo um fluxo contínuo de areia, porém a areia utilizada no ensaio pode ficar encrustada na roda de borracha e no caso a classificação correta deveria ser de dois corpos. Por isso para o autor o desgaste abrasivo deve ser classificado de acordo com a gravidade da perda de massa proporcionada pelo desgaste abrasivo seguindo a subdivisão: desgaste abrasivo moderado, desgaste abrasivo severo e desgaste abrasivo extremo.

Os autores (LEITE; MARQUES, 2009) realizaram um estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos depositados com arames tubulares autoprotégidos de três ligas diferentes, o primeiro com uma liga Fe-Cr-C, o segundo com a liga Fe-Cr-C com adição de nióbio e boro e o terceiro com a liga Fe-Cr-C com adição apenas de nióbio. A segunda liga com adição de nióbio e boro foi a que teve menor desgaste abrasivo. Este desempenho ao desgaste abrasivo da liga com adição de nióbio e boro pode estar relacionada com a presença de microestruturas com características de resistência ao desgaste abrasivo.

Estudos realizados por (LIMA; FERRARESI, 2010) para analisar a resistência ao desgaste abrasivo de facas picadoras de cana-de-açúcar comparou o desempenho

de revestimentos depositados por eletrodo revestido da liga FeCrC com três diferentes ligas de arames tubulares. As ligas utilizadas nos arames tubulares foram (Fe-23,1Cr-4,11C), (Fe-22Cr-4,5C-6,5Nb) e (Fe-1,8C-7,5Cr-1,5Mo-5,26Ti). O revestimento que teve a menor perda de massa foi o feito com o arame tubular cuja liga continha titânio. Segundo (WANG et al., 2004) o carboneto de titânio (TiC) tem uma maior dureza e estabilidade quando comparado com o carboneto de cromo (CrC) por isso ligas que possuem titânio formam cadeias mais fortes o que proporciona uma melhor resistência ao desgaste abrasivo.

## 2.3 Mecanismos de Desgaste Abrasivo

Os mecanismos de desgaste abrasivo podem ser dividido em: desgaste por deformação plástica, desgaste por fratura frágil ou em ambos os desgaste citados anteriormente.

### 2.3.1 Mecanismo de desgaste por deformação

No mecanismo de desgaste por deformação plástica pode ocorrer ou não ocorrer remoção de material da superfície. Quando não ocorre remoção de material da superfície o mecanismo de desgaste é chamado de microsulcamento. O microsulcamento, Figura 13 a, tem como característica a formação de sulcos cujas bordas possui material que foi deslocado por deformação plástica. Um caso mais severo do microsulcamento pode ser observado na Figura 13 b, onde o material deslocado da deformação plástica está na frente da partícula abrasiva, este microsulcamento é conhecido como microsulcamento com formação de proa (HUTCHINGS, 1992).

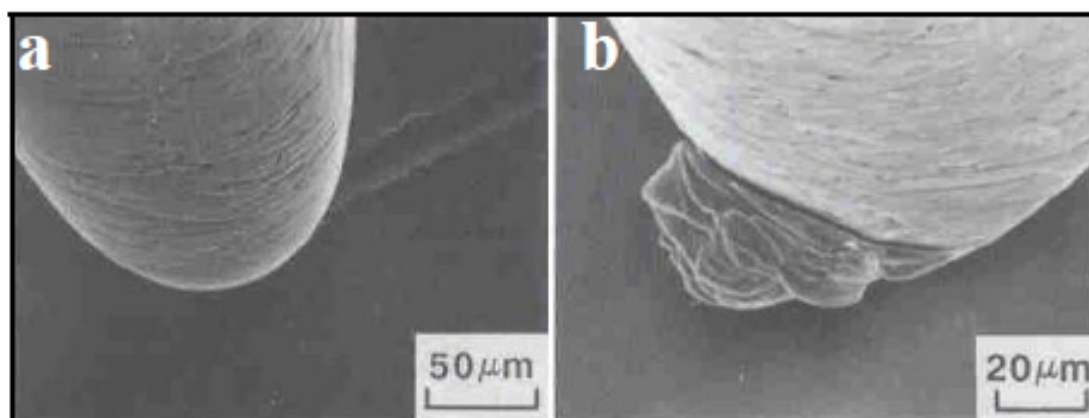


Figura 13 – Representação do mecanismo de desgaste abrasivo de microsulcamento: a) sulcos com material deslocado para as bordas; b) sulcos com formação de proa. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992)

O mecanismo de desgaste por deformação plástica com remoção de material é conhecido por microcorte ou riscamento, para este mecanismo de desgaste as tensões atuantes entre partícula abrasiva e superfície e o ângulo de ataque das partículas abrasivas provocam um destacamento do material a frente da partícula na forma de cavaco Figura 14.

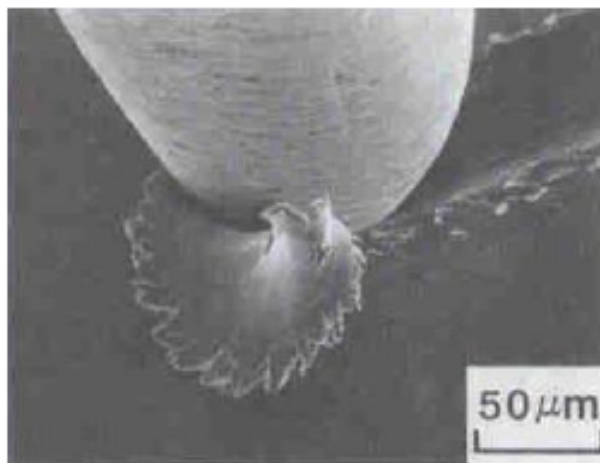


Figura 14 – Representação do mecanismo de desgaste abrasivo de microcorte. Fonte: Adaptado de (HUTCHINGS, 1992).

Para estabelecer a diferença entre microsulcamento e microcorte é necessário analisar algumas variáveis como: carga aplicada, dureza do material desgastado e angulosidade do abrasivo (MARANHO, 2006).

### 2.3.2 Mecanismo de desgaste por fratura frágil

O mecanismo de desgaste por fratura frágil acontece quando atinge-se as tensões de limite de resistência do material e com isso ocorre o microtrincamento lateral. Este mecanismo é devido a formação de trincas na região deformada plasticamente pela passagem das partículas abrasivas e por causa dessas trincas ocorre o destacamento de fragmentos de material, Figura 15 (HUTCHINGS, 1992).

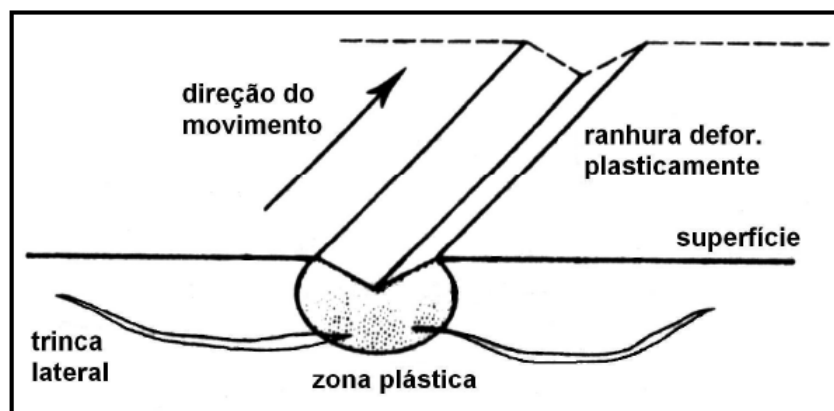


Figura 15 – Representação do mecanismo de desgaste por fratura frágil. Fonte: Adaptado (MARANHO, 2006)

A Figura 16 apresenta as superfícies desgastadas obtidas por (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009) em um estudo utilizando o ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha. Segundo os autores a Figura 16 a) mostra que o mecanismo de desgaste predominante foi o riscamento. Na Figura 16 b) também identifica-se o mecanismo de desgaste por riscamento sendo que com riscos mais superficiais. A diferença de profundidade dos riscos é explicada pelos autores devido a diferença do teor de Ti dos arames utilizados para fazer os revestimentos, o revestimento feito com arame de teor mais elevado de Ti tem uma maior resistências ao desgaste abrasivo pelo fato de ter uma maior quantidade de carbonetos ricos em Ti distribuídos uniformemente na matriz.

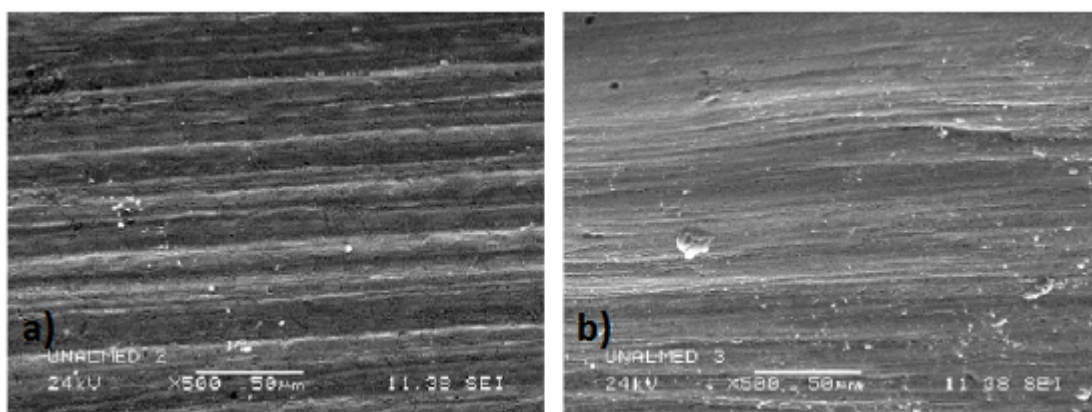


Figura 16 – Micrografia das Superfícies desgastadas de revestimentos depositados pelo processo FCAW. a) Revestimento com baixo teor de Ti; b) Revestimento com um teor Ti mais elevado. Fonte: Adaptado de (CORONADO; CAICEDO; GÓMEZ, 2009)

A Figura 17 apresenta as superfícies desgastadas de revestimentos depositados com



diferentes composições de arames tubular estudadas por (LIMA; FERRARESI, 2010). Pode-se perceber que os mecanismos de desgaste destas superfícies também são o risamento (Figura 17 a) e identações provocada pela partícula abrasiva Figura 17 b) e c). As identações acontecem quando as partículas de areia ficam encrustadas na roda de borracha.

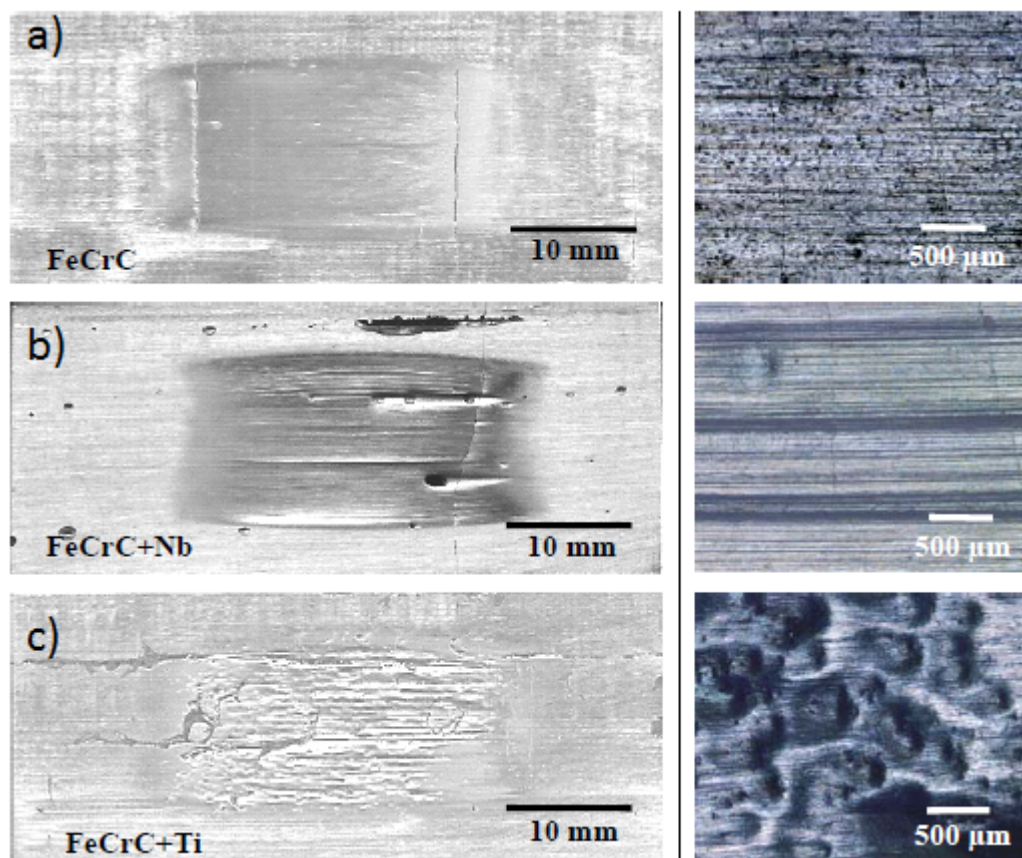


Figura 17 – Superfícies dos revestimentos desgastadas. Fonte: Adaptado de (LIMA; FERRARESI, 2010)

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito todos os materiais e os procedimentos utilizados para realização deste trabalho.

### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Metal base

Foram utilizadas chapas de aço carbono ABNT 1020 para realizar os revestimentos. Primeiramente apenas um cordão de solda foi depositado para obter a diluição, Figura 18 a), e posteriormente em outra chapa foi feita a deposição do revestimento, Figura 18 b).

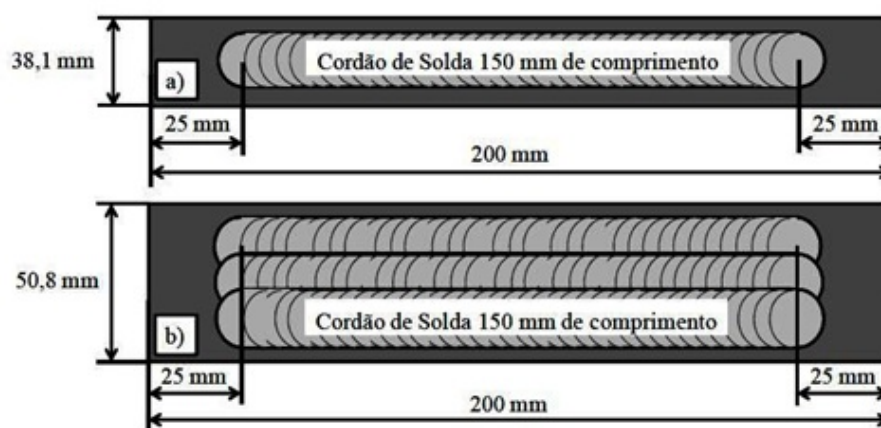


Figura 18 – Esquema com as dimensões das chapas: a) representação da chapa que será utilizada para depositar um cordão de solda; b) representação da chapa que será utilizada para fazer o revestimento. Fonte: autoria própria.

#### 3.1.2 Consumíveis

Os revestimentos foram depositados utilizando um arame tubular KST TUB TIC OA com diâmetro de 1,6 mm classificado como MF 6-60-GP pela norma DIN 8555. A composição química do arame tubular está apresentada na Tabela 1. Segundo o catálogo de consumíveis (ESAB, 2013) o arame tubular utilizado tem a seguinte especificação:

- Representação do processo de soldagem (MF): Soldagem ao arco elétrico utilizando-se arames tubular;
- Representação do tipo de metal de adição (6): Ligados, com mais de 5% Cr, com um teor maior de C (até mais ou menos 0,2%);
- Representação da faixa de dureza apresentada pelos consumíveis aplicados (60):  $57 \leq \text{HRC} \leq 62$ .
- Representação das propriedades do metal de adição (GP): Resistente ao Impacto.

Como gás de proteção utilizou-se o argônio com grau de pureza de 99,99% e um eletrodo de tungstênio ligado com tório (2%) com um diâmetro de 3,2mm e ângulo de ponta de 60°.

Tabela 1 – Composição Química do arame tubular KST TUB TIC OA, porcentagem em peso. Fonte: adaptado de (ESAB, 2013)

C	Ti	Cr	Mo	Mn	Si
1,8	5	7	1,4	1,4	0,9

### 3.1.3 Equipamentos de Soldagem

Os revestimentos foram feitos em uma bancada composta por: um sistema de aquisição de dados de soldagem, marca IMC, modelo SAP 4.0, uma fonte de energia de soldagem, marca IMC, modelo DIG Plus A7 versão 450, cabeçote alimentador de arame para soldagem TIG com bobina enclausurada, marca IMC, modelo STA 20-3 , e um sistema de deslocamento linear da tocha microcontrolado que permite posicionamento e movimentação automática da tocha, marca IMC, modelo Tartílope V1.

## 3.2 Metodologia Experimental

A Figura 19 apresenta um fluxograma com o resumo da sequência de todas as atividades realizadas neste trabalho .

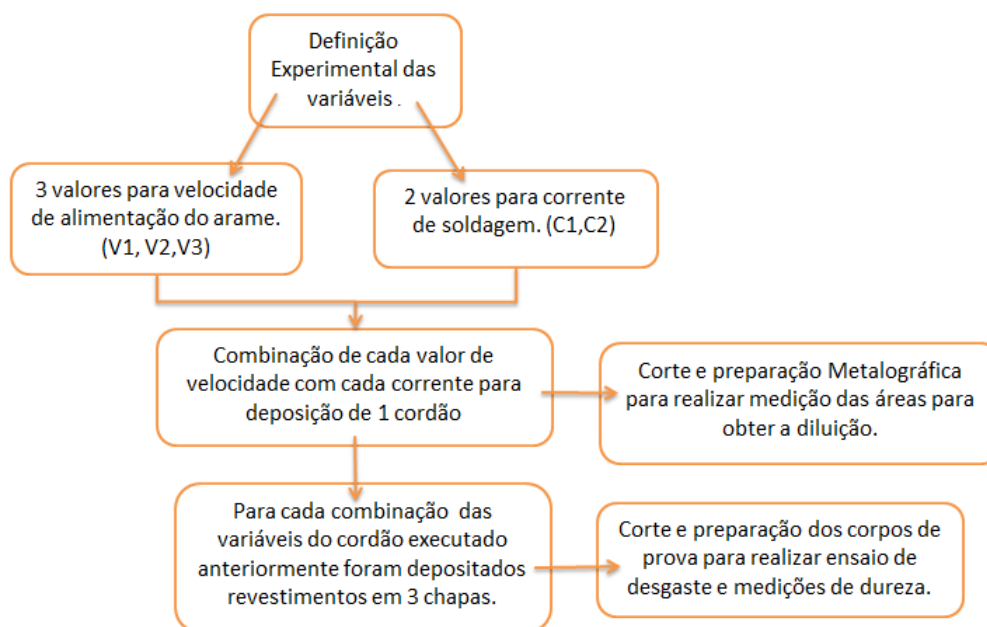


Figura 19 – Representação das atividades que foram executadas neste do trabalho.  
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.1 Definição das variáveis de soldagem

Foram realizados testes experimentais de deposição de cordão de solda para definir valores de velocidade de alimentação do arame tubular e valores para a corrente de soldagem com os quais fosse possível realizar um cordão de solda. A quantidade de valores para cada variável de estudo, 3 valores para velocidade de alimentação do arame tubular e 2 valores para corrente de soldagem, foram determinadas visando um total de combinações que não gerasse um número muito grande de corpos de prova, o que impossibilitaria a realização do trabalho no tempo determinado, bem como um número de valores que possibilitasse a exposição dos resultados de maneira gráfica para facilitar a análise e discussão dos resultados.

Os limites inferior (150A) e superior (300A) para a variável corrente de soldagem foram adotados conforme recomendação do catálogo de consumíveis (ESAB, 2013). Primeiramente foram realizados testes com uma velocidade de soldagem constante para definir os valores para corrente de soldagem, os resultados obtidos foram 220A e 280A. Após a determinação dos valores de corrente de soldagem foram feitos testes para a determinação das velocidade de alimentação do arame tubular cujos resultados foram: para a corrente de 220A foi possível realizar um cordão com as velocidades 1m/min, 1,3m/min e 1,6m/min e para a corrente de 280A as velocidades 1,3m/min, 1,6m/min e 1,9m/min. O objetivo inicial do estudo era utilizar os mesmos valores de velocidade de alimentação do arame tubular para os dois valores de corrente de soldagem determi-

nados porém não foi possível obter um cordão de solda com a combinações dos valores das variáveis de 280A e 1m/min e 220A e 1,9m/min.

### 3.2.2 Deposição dos cordões e revestimentos

Os revestimentos foram depositados no laboratório de soldagem da UTFPR, utilizando o processo de soldagem TIG alimentado arame tubular frio com arame na posição plana e com a tocha na vertical formando um ângulo de 90°. A distância entre o bocal da tocha e a superfície da chapa foi mantido constante. O suporte de alimentação do arame foi acoplado à tocha em disposição longitudinal na direção da velocidade de soldagem. O arame formou um ângulo de 45° com a horizontal da chapa, Figura 20.

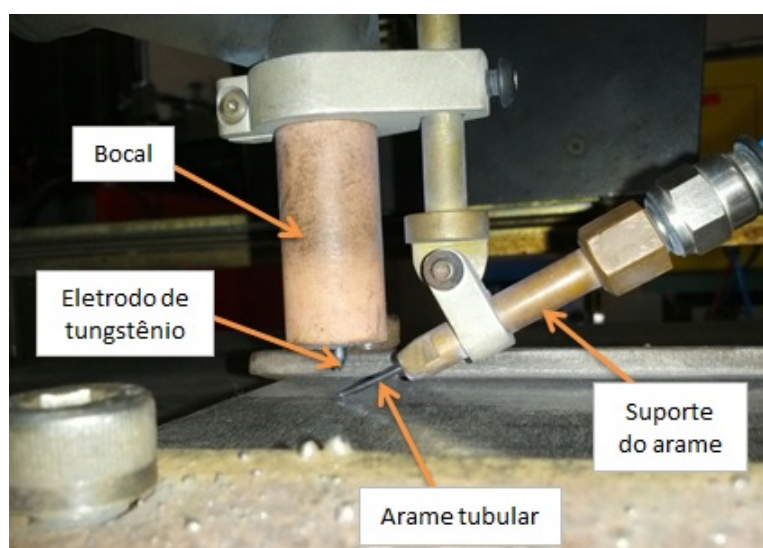


Figura 20 – Tocha de soldagem TIG que será utilizada para depositar os cordões e revestimentos. Fonte: autoria própria. Fonte: Autoria própria

Para cada valor de velocidade de alimentação do arame tubular, 3 condições, e para cada valor de corrente de soldagem, 2 condições, foi depositado um cordão de solda para se obter a diluição e posteriormente foram depositados revestimentos em três chapas para cada condição de velocidade de alimentação do arame e corrente de soldagem anteriormente definidas. Logo no total foram 6 chapas com um cordão de solda e 18 chapas revestidas. Antes da aplicação dos cordões e revestimentos as chapas foram devidamente limpas.

A Tabela 2 apresenta a nomenclatura utilizada para identificação dos cordões de solda e revestimentos depositados nas chapas.

Tabela 2 – Nomenclatura utilizada para identificação dos cordões de solda e revestimentos depositados nas chapas.

Codificação	Tipo de deposição	Corrente de soldagem (A)	Velocidade de alimentação do arame ( $m/min$ )
C220/1.0	(C)- Cordão de solda	220	1,0
C220/1.3	(C)- Cordão de solda	220	1,3
C220/1.6	(C)- Cordão de solda	220	1,6
C280/1.3	(C)- Cordão de solda	280	1,3
C280/1.6	(C)- Cordão de solda	280	1,6
C280/1.9	(C)- Cordão de solda	280	1,9
R220/1.0	(R)- Revestimento	220	1,0
R220/1.3	(R)- Revestimento	220	1,3
R220/1.6	(R)- Revestimento	220	1,6
R280/1.3	(R)- Revestimento	280	1,3
R280/1.6	(R)- Revestimento	280	1,6
R280/1.9	(R)- Revestimento	280	1,9

### 3.2.3 Preparação dos corpos de prova

A preparação dos corpos de prova foi feita conforme especificação da norma (ASTM, 2001)[G65 01], as chapas foram cortadas na região central do revestimento com auxílio da cortadora automática Delta 2215 fabricada pela Buehler, depois os corpos de provas foram fresados e retificados para obter uma superfície plana na área a ser desgastada, Figura 21.



Figura 21 – Representação das etapas de preparação dos Corpos de prova conforme recomendação da norma (ASTM, 2001)[G65 01]. Fonte: Autoria própria



### 3.2.4 Ensaio de desdaste abrasivo

O ensaio de desgaste abrasivo foi feito em um abrasômetro tipo roda de borracha, Figura 22, desenvolvido pelo departamento de soldagem da UTFPR conforme recomendação da norma (ASTM, 2001)[G65 01] e como abrasivo foi utilizado areia normalizada pela (ABNT, 1982) e com granulometria fina de (#100).

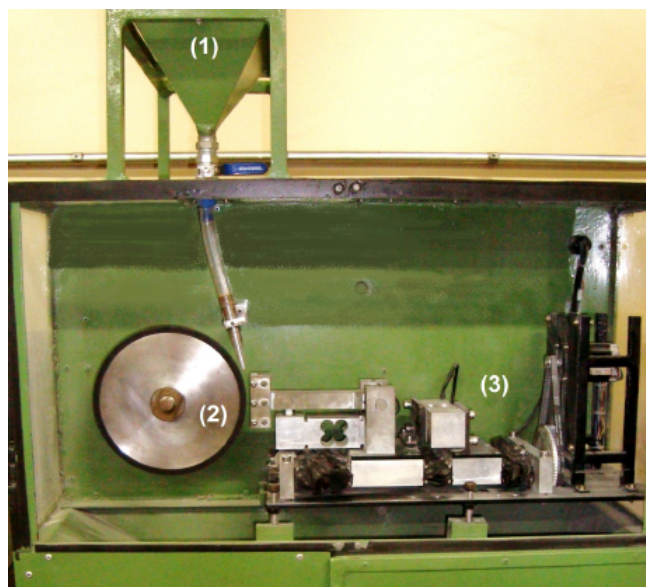


Figura 22 – Abrasômetro tipo roda de borracha projetado conforme recomendação da norma (ASTM, 2001)[G65 01], onde (1): é o reservatório de abrasivo, (2): é a roda de borracha e (3): é o porta amostra com dispositivo de medição. Fonte: Adaptado de (COLAÇO, 2013)

Os ensaios de desgaste abrasivo foram feitos de acordo com o procedimento "b" da norma (ASTM, 2001)[G65 01] com tempo de duração do ensaio de 5 minutos. Foi adotada uma ordem aleatória de escolha do revestimento para a execução dos ensaios de desgaste, e não foram realizados ensaios de desgaste seguidos de corpos de prova com as mesmas variáveis de soldagem. Antes do ensaio os corpos de prova passaram por uma limpeza em ultrassom por 5 minutos, após limpeza os corpos de prova foram secos em uma secadora de amostra e depois tiveram suas massas iniciais ( $m_i$ ) medidas por uma balança.

Ao término de cada ensaio de desgaste a roda de borracha tinha seu diâmetro medido para ajustar a perda de massa com relação ao diâmetro inicial ( $\phi_i$ ) padronizado de 228,6 mm pela norma ASTM G65 com o diâmetro final ( $\phi_f$ ) do ensaio. Após medição a roda era lixada, com uma lixa de granulometria de 400 mesh para garantir as mesmas condições iniciais para todos os ensaios. Depois de realizar o ensaio de desgaste os corpos de prova, Figura 23, passaram pelos mesmos procedimentos de limpeza, secagem realizados antes do ensaio e posteriormente era feita a medição da

massa final ( $m_f$ ). O próximo ensaio de desgaste só era realizado após a medição da massa final do corpo de prova que a havia sido ensaio anteriormente, este procedimento foi adotado para tentar simular as mesmas condições da roda de borracha para todos os ensaios, evitando possíveis dilatações da roda de borracha caso fosse feito um ensaio seguido do outro.



Figura 23 – Corpo de prova após ensaio de desgaste abrasivo. Fonte: Autoria própria

A partir dos dados de ( $m_i$ ) e ( $m_f$ ) foi possível calcular a perda de massa ( $Pm$ ), Equação 3.1 .

$$Pm[g] = m_i - m_f \quad (3.1)$$

A perda de massa corrigida ( $Pmc$ ) com relação ao diâmetro inicial ( $\phi_i$ ) e final ( $\phi_f$ ) da roda de borracha foi calculada pela Equação 3.2 .

$$Pmc[g] = Pm \times \frac{\phi_i}{\phi_f} \quad (3.2)$$

### 3.2.5 Dureza

As medições de dureza foram feitas na superfície desgastada do corpo de prova, Figura 24, com o equipamento EMCO TEST M4C 025 G3M utilizando um padrão de 30 HV (carga nominal de 294,30N). Ao total foram realizadas 6 medições e o valor de dureza adotado foi a média aritmética desses 6 valores .



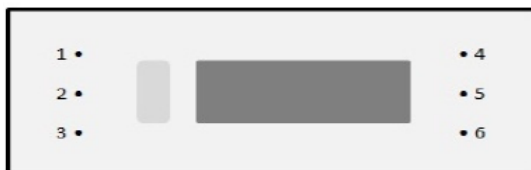


Figura 24 – Representação das medições de dureza nos corpos de prova desgastados. Fonte: Adaptado de (COLAÇO, 2013)

### 3.2.6 Diluição

Para medição da diluição foi necessário a preparação metalográfica das amostras. O lixamento e o polimento foram feitos com auxílio da politriz semiautomática modelo Ecomet 250 com cabeçote Automet 250 fabricada pela Buehler. As medidas das áreas de reforço (área A) e das áreas de penetração (área B) de cada cordão foram medidas a partir do software *Image PRO Plus*, Figura 25.

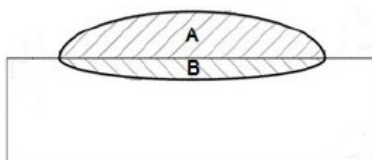


Figura 25 – Representação das medidas das áreas para calcular a diluição. Fonte: Autoria própria.

Para calcular a diluição foi utilizado a Equação 3.3.

$$D(\%) = \frac{B}{A + B} \times 100 \quad (3.3)$$

## 4 Resultados e Discussões

A partir do ensaio de desgaste foi possível observar a influências das variáveis de soldagem estudadas neste trabalho na diluição, dureza e perda de massa dos revestimentos.

### 4.1 Diluição dos cordões

A Tabela 3 mostra os valores obtidos para porcentagem de diluição para os cordões depositados. É possível perceber que a menor diluição ocorreu com a menor corrente de soldagem e com a maior velocidade de alimentação do arame.

Tabela 3 – Valores de diluição obtidos para os cordões.

Diluição (%)	
C220/1.0	45,52
C220/1.3	39,59
C220/1.6	30,03
C280/1.3	60,24
C280/1.6	53,83
C280/1.9	43,06

A Figura26 apresenta a representação gráfica dos resultados obtidos para a diluição em função da velocidade de alimentação do arame tubular para as duas correntes de soldagem estudadas.

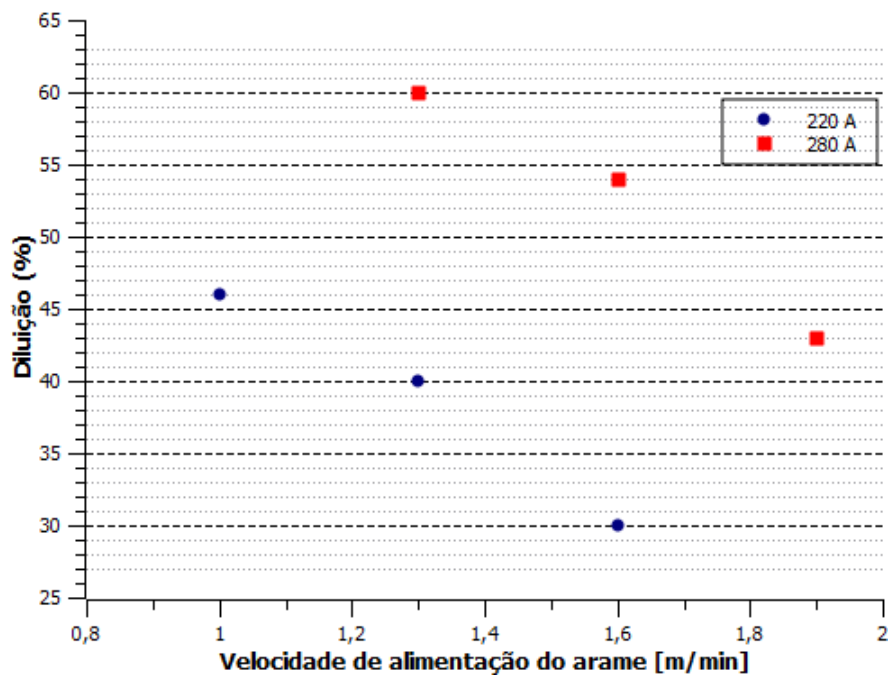


Figura 26 – Diluição em função da velocidade de alimentação do arame e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 mostra com clareza que a diluição diminui com o aumento da velocidade de alimentação do arame tubular para as duas correntes de soldagem utilizadas. Por outro lado com o aumento da corrente de soldagem a diluição aumenta. Esse aumento da diluição está correlacionado com o aumento da energia de soldagem devido ao fato da corrente de soldagem ser diretamente proporcional com a energia de soldagem. Estudos realizados por (RIBEIRO; VENTRELA; GALLEGRO, 2005), Figura 7, confirmam esta influência da corrente de soldagem na diluição.

## 4.2 Perda de massa dos revestimentos

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para perda de massa média dos revestimentos, observa-se que a maior perda de massa ocorreu para a corrente de soldagem de 280A com a menor velocidade de alimentação do arame tubular (1,3m/min). Este resultado pode ser justificado pelo fato do revestimento R280/1.3 ter tido a maior diluição.

Uma representação gráfica da perda de massa em função da velocidade de alimentação do arame pode ser observada na Figura 27. A partir do gráfico é possível perceber que a perda de massa dos revestimentos tende a diminuir com o aumento da velocidade de alimentação do arame para as duas correntes de soldagem utilizadas.

Analisando a perda de massa com os seus desvios padrão é possível perceber que para as duas maiores velocidades de alimentação do arame, de ambas as correntes de

Tabela 4 – Resultados obtidos para perda de massa corrigida (pmc) dos revestimentos.

	Média Pmc (g)	Desvio Padrão
R220/1.0	0,093	0,014
R220/1.3	0,070	0,005
R220/1.6	0,072	0,003
R280/1.3	0,117	0,012
R280/1.6	0,094	0,006
R280/1.9	0,083	0,009

soldagem, a perda de massa é praticamente a mesma.

Também observa-se que a perda de massa para os revestimentos R220/1.0, R280/1.6 e R280/1.9 é aproximadamente igual.

Para uma análise da perda de massa utilizando a mesma velocidade de alimentação do arame tubular com as duas correntes de soldagem utilizadas neste trabalho percebe-se que a variação dos valores para perda de massa entre as correntes de soldagem é relativamente maior para a velocidade de 1,3m/min do que para a de 1,6m/min.

A partir dessas análises fica evidente que uma maior corrente de soldagem proporciona uma maior perda de massa. Os resultados obtidos nestas análises estão de acordo com as conclusões relatadas na literatura por (RIBEIRO, 2004).

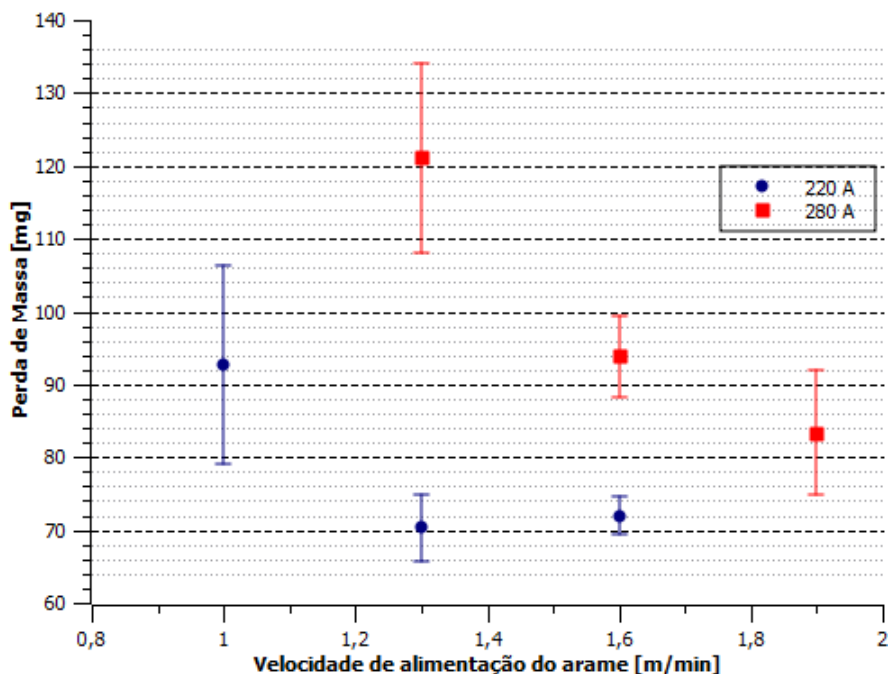


Figura 27 – Perda de massa dos revestimentos em função da velocidade de alimentação do arame tubular e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria.

A Figura 28 apresenta a perda de massa em relação a diluição dos revestimentos. Observa-se que quanto maior a diluição maior é a perda de massa. Estudos feitos por

(BUCHELY et al., 2005) mostram que a diluição está diretamente relacionada com a perda de massa.

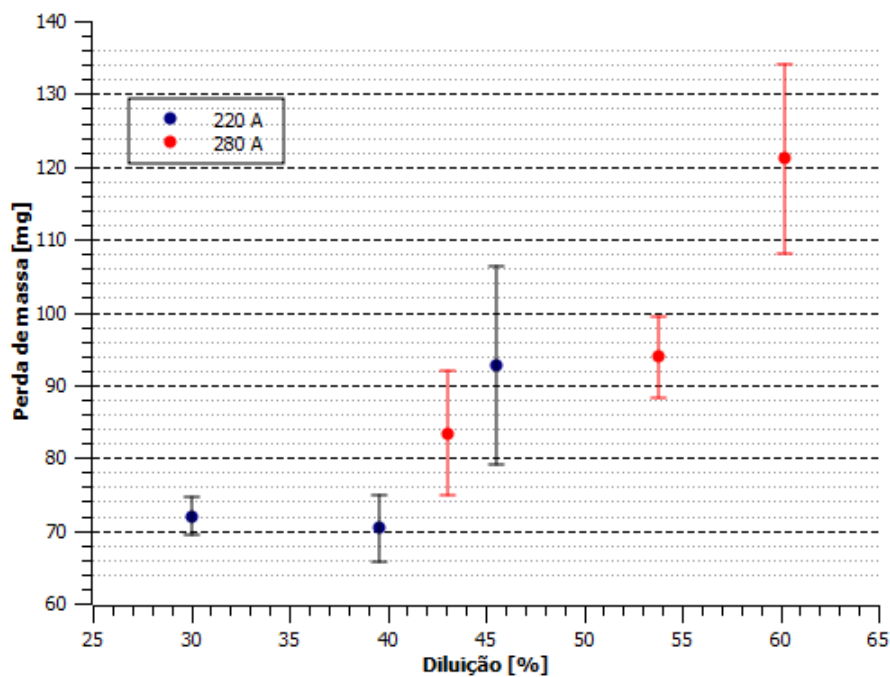


Figura 28 – Perda de massa dos revestimentos em função da diluição. Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Dureza dos revestimentos

A Tabela 5 apresenta os valores médios de dureza superficial dos revestimentos e a Figura 29 mostra a representação gráfica desses resultados em função da velocidade de alimentação do arame tubular. Avaliando os resultados de dureza média com os desvios padrão pode-se assumir que as durezas de todas as condições de revestimentos são iguais.

Tabela 5 – Valores médios de durezas dos revestimentos

	HV 30	Desvio Padrão
R220/1.0	784,92	37,59
R220/1.3	741,11	41,23
R220/1.6	825,39	4,16
R280/1.3	791,78	21,46
R280/1.6	805,22	14,91
R280/1.9	803,39	6,58 2

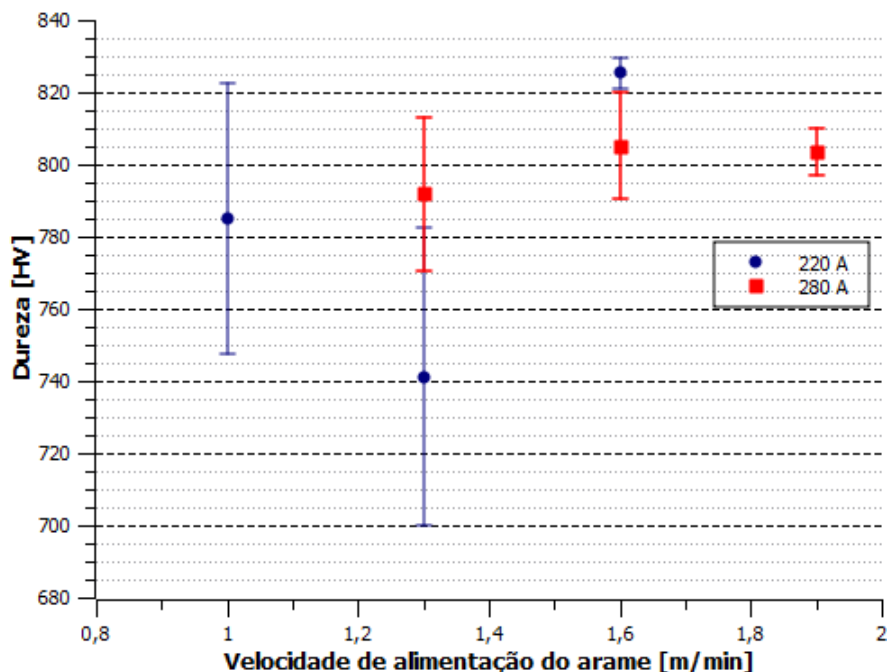


Figura 29 – Dureza superficial dos revestimentos em função da velocidade de alimentação do arame tubular e da corrente de soldagem. Fonte: Autoria própria.

De acordo com estudos feitos por (KOTECKI; OGBORN, 1995) para revestimentos depositados em aços médio carbono com valores de durezas próximos entre si podem ter diferentes resistências ao desgaste abrasivo. Este resultado encontrado pelos autores está de acordo com os resultados obtidos neste trabalho onde mesmo com durezas próximas os revestimentos depositados obtiveram perdas de massas diferentes.

#### 4.4 Mecanismos de desgaste

As Figuras 30, 31, 32, 33, 34, 35 mostram as micrografias da superfície desgastada dos revestimentos feitas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A Figura 30 apresenta a micrografia do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação 1,0m/min (R220/1.0). É possível observar que os mecanismos de desgaste predominantes neste revestimento foram o riscamento, identificado na figura por A, e o microsulcamento com deslocamento de material para as bordas, identificado na figura por B. Ao analisar o mecanismo de desgaste com a perda de massa percebe-se que este revestimento apresentou a maior perda de massa em comparação com os revestimentos depositados com a corrente de 220A, contudo obteve uma menor perda de massa em comparação com o revestimento de R280/1.3 que obteve maior diluição.

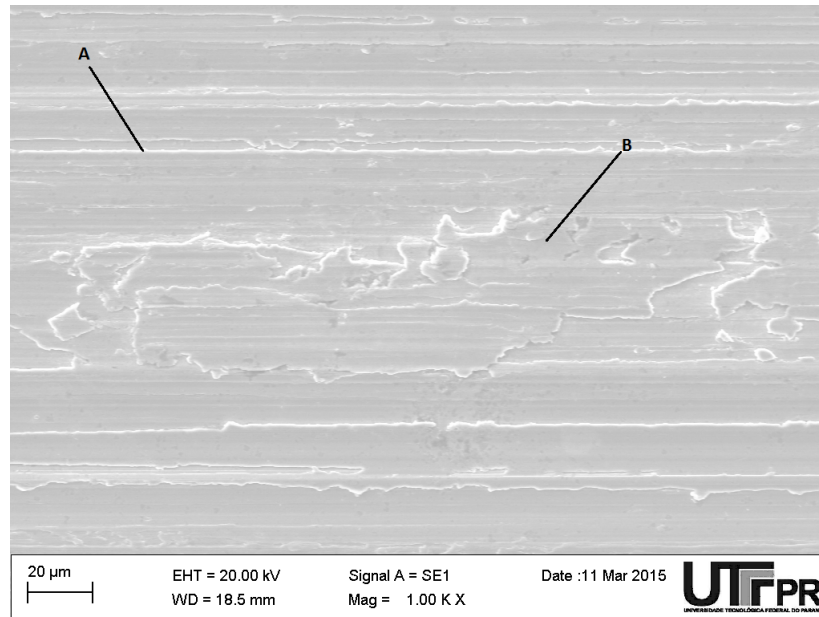


Figura 30 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,0m/min (R220/1.0) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

As Figuras 31, 32 mostram as micrografias dos revestimentos depositados com corrente de soldagem de 220A com 1,3m/min e 1,6m/min de velocidade de alimentação do arame tubular respectivamente. É possível observar que as micrografias são muito parecidas o que pode ser justificado pelo valor obtido para perda de massa que foram muito próximo para as duas condições, 0,070g para o R220/1,3 e 0,072g para o R220/1,6. O mecanismo de desgaste desses revestimentos pode ser classificado como uma mescla de riscamento, identificado por A nas figuras e idetações, identificado por C nas figuras. Percebe-se também que em comparação com a Figura 30 estas duas micrografias apresentam menos riscos e muitas idetações o que justifica a menor perda de massa, isso acontece porque em comparação com o mecanismo de desgaste de riscamento as idetações retiram menos material.



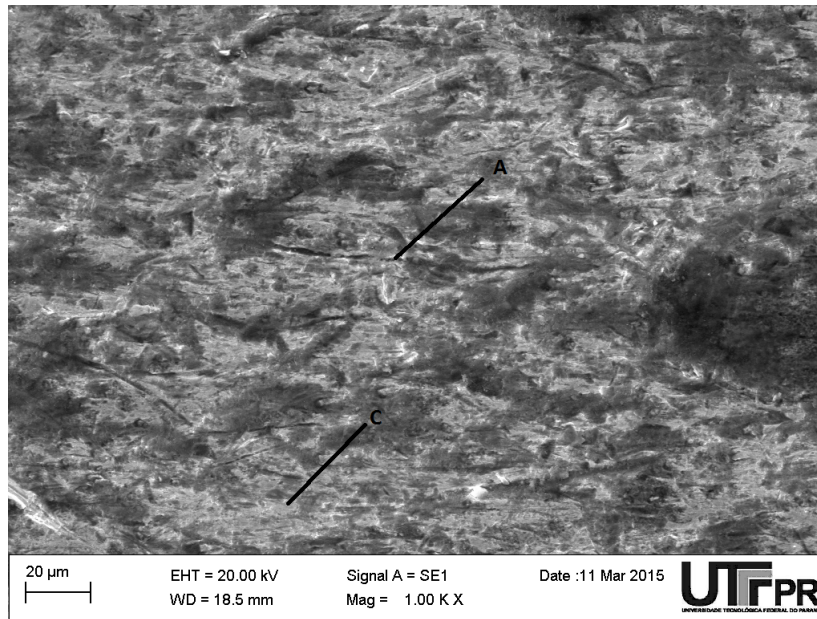


Figura 31 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R220/1.3) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

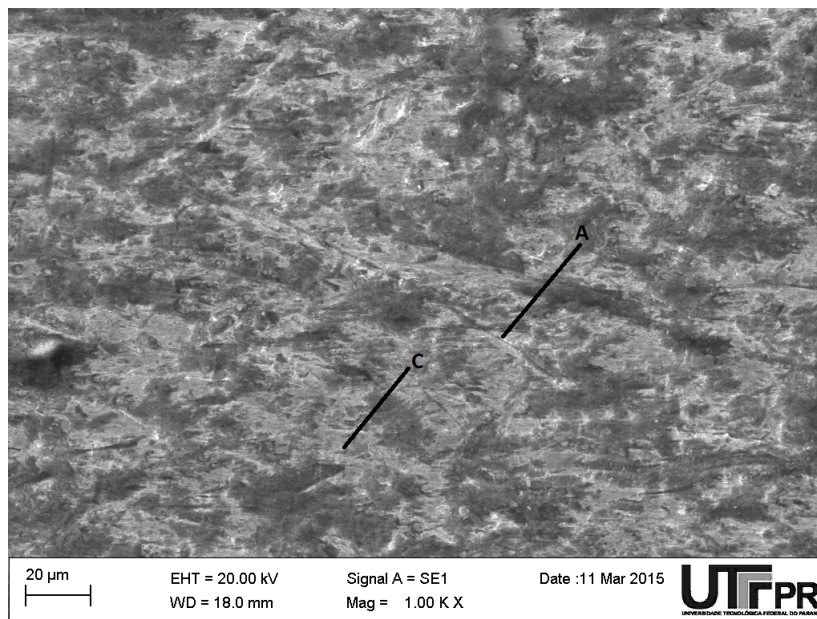


Figura 32 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 220A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R220/1.6) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 apresenta a micrografia da área desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame



de 1,3m/min. É possível perceber a presença de risco e identações que atuaram como mecanismo de desgaste desse revestimento. Este revestimento apresentou a maior perda de massa dentre todas as condições de revestimentos avaliadas. Essa maior perda de massa está mais relacionada com o fato deste revestimento ter obtido a maior diluição em comparação com os outros do que com o mecanismo de desgaste.

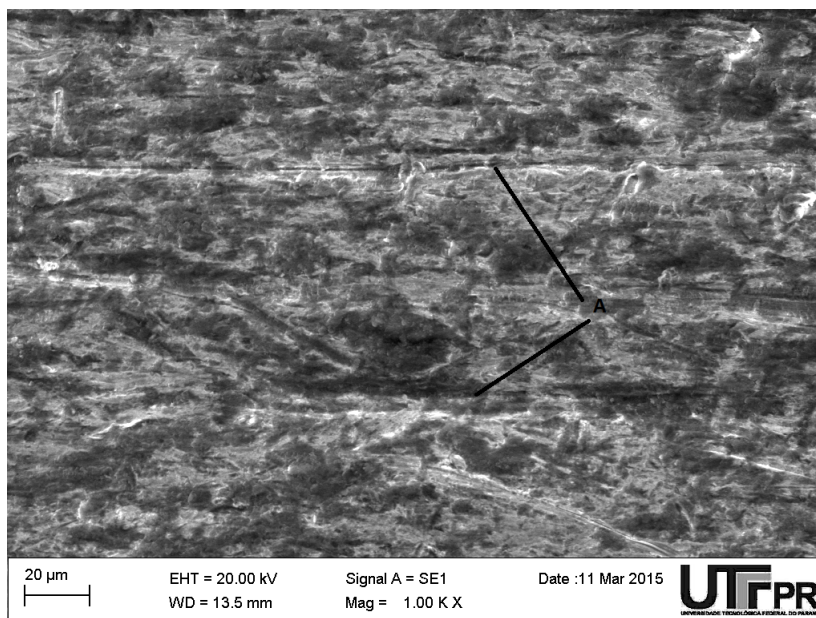


Figura 33 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,3m/min (R280/1.3) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

As Figuras 34, 35 são as micrografias das superfícies desgastadas dos revestimentos depositados com corrente de soldagem de 280A e velocidade de alimentação do arame tubular de 1,6m/min e 1,9m/min respectivamente. Observa-se que essas micrografias também apresentam riscos, identificado por A na figura, e identações, identificado por C na figura, como mecanismo de desgaste. As micrografias são muito parecidas o que pode ser justificado pela valor de perda de massa que também foi bem próximo para as duas condições.

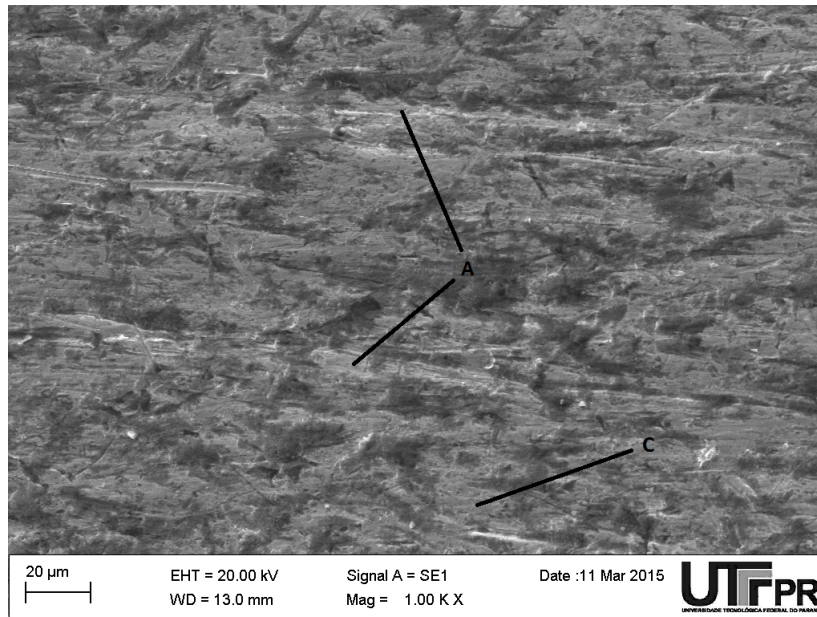


Figura 34 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,6m/min (R280/1.6) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

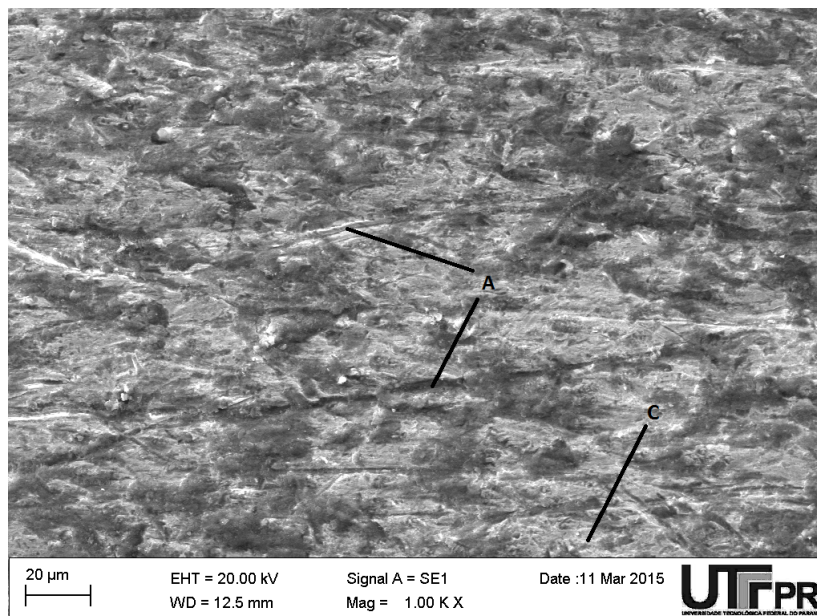


Figura 35 – Micrografia da superfície desgastada do revestimento depositado com uma corrente de soldagem de 280A e uma velocidade de alimentação do arame tubular de 1,9m/min (R280/1.9) aumento de 1000x. Fonte: Autoria própria.

Ao analisar todas as micrografias das superfícies desgastada dos revestimentos pode-se assumir que o mecanismo de desgaste mais agressivo de riscamento ocorreu para o

revestimento R220/1.0, contudo devido ao fato da diluição desse revestimento ser menor do que o valor de diluição do revestimento R280/1.3 a perda de massa do revestimento R220/1.0 foi menor do que a revestimento R280/1.3. É possível perceber que com relação aos revestimentos depositados com 220A o revestimento R220/1.0 teve mais riscamento que os demais revestimentos e não apresentou o mecanismo de indentações o que justifica a sua maior perda de massa em comparação com os outros revestimentos de mesma corrente de soldagem.

## 5 Conclusões

A partir dos resultados encontrados neste trabalho pode-se concluir que:

- A perda de massa foi menor para uma corrente de soldagem menor e tende a diminuir com o aumento da velocidade de alimentação do arame.
- A perda de massa está diretamente correlacionada com a diluição, quanto maior a diluição maior será a perda de massa.
- A diluição dos revestimentos aumenta com aumento da corrente de soldagem e diminui com o aumento da velocidade de alimentação do arame tubular.
- A dureza média superficial dos revestimentos não teve uma variação significativa para poder ser avaliada a sua influência na perda de massa dos revestimentos.

### 5.1 Sugestões de trabalhos futuros

- Uma análise microestrutural dos revestimentos para analisar como a dureza se comporta com a sobreposição dos cordões de solda.

## Referências

- ABNT. *Areia Normal para Ensaio de Cimento. NBR 7214. Associação Brasileira de Normas Técnicas*. [S.l.], 1982. Rio de Janeiro.
- ASTM. *Standard Test Method for Measuring Abrasion Usind the DRY SAND/RUBBER Wheel Apparatus G65-01. American Standard for TesTest Materials*. [S.l.], 2001.
- ASTM. *Standard Terminology Relating to Wear and Erosin G40-13. American Standard for TesTest Materials*. [S.l.], 2013.
- AWS. *Welding Handbook. American Welding Society*. 9. ed. [S.l.], 2004.
- BAPTISTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A. Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositado por soldagem utilizados por soldagem na recuperação de elementos de máquinas. *Spectru Instrumental Científico LTDA*, 2009.
- BRACARENSE, A. Q. Processo de soldagem com arame tubular - fcaw. *Universidade Federal de Minas Gerais*, 2006.
- BUCHELY, M. et al. The effect of microstructere on abrasive wear of hardfacing alloys. *Wear*, n. 259, p. 52–61, May 2005.
- CHATTERJEE, S.; PAL, T. Wear behaviour of hardfacing deposits on cast iron. *Wear*, V. 255, p. p. 417–425, 2003.
- COLAÇO, F. H. G. Avaliação da perda de massa de revestimento duro depositado por soldagem com arame tubular de liga fe cr c-ti. Dissertação de Mestrado - UTFPR. 2013.
- CONDE, R. Recubrimiento resistentes al desgaste. *Boletim Técnico Conarco, Buenos Aires, Argentina*, p. 44, 1986.
- CORONADO, J. J.; CAICEDO, H. F.; GÓMEZ, A. L. The effect of welding process on abrasive wear resistance for hardfacing deposits. *Tribology International*, v. 42, p. p. 745 –749, 2009.
- CZICHOS, H. A systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear. *Tribology series*, 1978.
- ESAB. *Catálogo de Consumíeis. ESAB*. Disponível em :<[www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/catalogo-consumiveis-esab.pdf)>, 2013. Acesso em: 23 de janeiro de 2016.
- GATES, J. Two-body and tree-body abrasion: A critical discussion. *Wear*, v. 214, n. 1, p. p. 139–146, 1998.
- HUTCHINGS, I. M. *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials*. [S.l.: s.n.], 1992.

- KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of flux cored arc welding process parameters on duplex stainless steel clad quality. *Materials Processing Technology*, v. 176, p. p. 230–239, 2006.
- KOTECKI, D.; OGBORN, J. S. Abrasion resistance of iron based hardfacing alloy. *Welding Journal*, p. p. 269 – 278, 1995.
- LEITE, R. V. de M.; MARQUES, P. V. Estudo comparativo da resistência ao desgaste abrasivo do revestimento de três ligas metálicas utilizadas na indústria, aplicadas por soldagem com arames tubulares. *Soldagem e Inspeção*, v. 14, n. 4, p. 239–335, 2009.
- LIMA, A.; FERRARESI, V.; GONÇALVES, R. Avaliação de resistência ao desgaste de revestimentos duros aplicados com arames tubulares de liga ferro-cromo-carbono. *8 Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica. CIBIM8*, 2007.
- LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. *Soldagem e Inspeção*, 2010.
- LIN, C. M. Relationship between microstructures and properties of buffer layer with inconel 52m clad on aisi 316l stainless steel by gtaw processing. *Surface & Coatings Technology*, n. 228, p. 234–241, April 2013.
- MARANHO, O. Aspersão térmica de ferro fundido branco multicomponente. Tese de Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2006.
- MARQUES, P. V. *Soldagem Fundamentos e Tecnologia*. 3. ed. [S.l.]: Editora UFMG, 2011.
- MODENESI, P. J. Introdução à metalurgia da soldagem. *Universidade Federal de Minas Gerais*, p. 209, 2012.
- RIBEIRO, R. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo fe-c-cr utilizados na indústria sucroalcooleira. Dissertação. Universidade Estadual Paulista. 2004.
- RIBEIRO, R.; VENTRELA, V.; GALLEGO, J. Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo fe-c-cr utilizados na indústria sucroalcooleira. *60º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. Belo Horizonte -MG*, Julho 2005.
- SHANMUGAN, R.; MURUGAN, N. Effect of gas tungsten arc welding process variables on dilution and bead geometry of stellite 6 hardfaced valve seat rings. *British Corrosion Journal*, p. 375–383, fevereiro 1999.
- STARLING, C. M. D.; MODENESI, P. J.; BORBA, T. M. D. Caracterização de cordões na soldagem fcaw com um arame tubular "metal core". *Soldagem e Inspeção*, V. 16, n. N. 3, p. p. 285–300, 2011.
- WAINER, E. *Soldagem Processo e Metalurgia*. [S.l.]: Edgard Blucher LTDA, 2000.
- WANG, X. H. et al. Microstructure and wear properties of fe-band hardfacing coating reinforced by tic particles. *Journal of materials processing Technology*, p. 3–6, 2004.

WEMAN, K. *Welding processes handbook*. Second edition. [S.l.], 2012.

ZEEMANN, A. et al. A soldagem gtaw. *Associação Brasileira de Soldagem - ABS*, p. 7, 1995.