

**TARCISIO PEDRO DE AZEVEDO**

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTOS DUROS  
SOLDADOS COM ARAME TUBULAR SOBRE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

**JARAGUÁ DO SUL, 2017**



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA  
CAMPUS JARAGUÁ DO SUL – RAU

**TARCISIO PEDRO DE AZEVEDO**

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTOS DUROS  
SOLDADOS COM ARAME TUBULAR SOBRE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

**Monografia apresentada ao  
Curso Superior de Tecnologia  
em Fabricação Mecânica do  
Instituto Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do  
diploma de Tecnólogo em  
Fabricação Mecânica.**

**Orientador: Fernando H. G.  
Colaço, Me. Eng.**

**JARAGUÁ DO SUL, 2017**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
por meio do programa de geração automática do câmpus Rau, do IFSC

Azevedo, Tarcisio Pedro de  
**Análise do desgaste abrasivo em revestimentos duros  
soldados com arame tubular sobre aço de alta resistência /**  
Tarcisio Pedro de Azevedo ; orientação de Fernando  
Henrique Gruber Colaço. Jaraguá do Sul, SC, 2017.  
63 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul -  
Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .  
Inclui Referências.

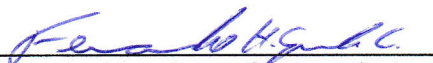
1. Soldagem. 2. Arame tubular. 3. Revestimento duro.  
4. Desgaste. I. Colaço, Fernando Henrique Gruber .  
II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

**ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTOS DUROS  
SOLDADOS COM ARAME TUBULAR SOBRE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA**

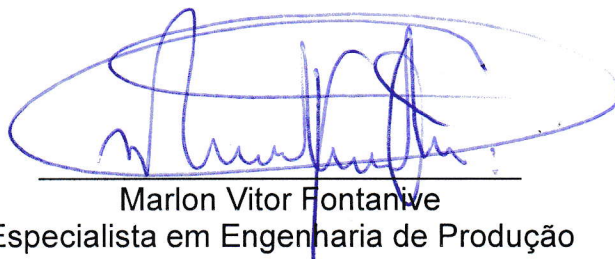
TARCISIO PEDRO DE AZEVEDO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Técnico em Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 13 de Dezembro de 2017.



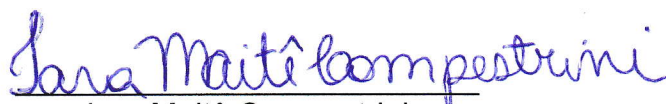
Fernando Henrique Gruber Colaço  
Mestre em Engenharia Mecânica e Materiais  
Orientador



Marlon Vitor Fontanive  
Especialista em Engenharia de Produção



Carlos Roberto Alexandre  
Especialista em Administração Industrial



Lara Maitê Campestrini  
Mestre em Física

Dedico este trabalho primeiramente a Deus,  
Senhor de todas as coisas, e em memória de minha  
querida mãe, Gertrudes.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por mais esta conquista, pela ajuda nos momentos difíceis e amparo com sua graça e paz.

Agradeço a minha esposa e minhas filhas, por todo apoio, paciência e dedicação empenhados a mim nesta jornada.

Agradeço ao meu pai, e a todos os amigos e familiares pelo incentivo ao estudo e também pelo carinho.

Agradeço ao meu orientador Fernando H. G. Colaço, pelo suporte técnico na minha orientação e pela amizade construída.

Aos bolsistas Fabiano Cardoso e Priscila Eduarda Kraft Lopes, pelo auxílio na realização dos trabalhos na etapa experimental.

Agradeço aos demais professores do IFSC pelo companheirismo e amizade durante esta caminhada acadêmica.

E por fim, agradeço ao Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) pela formação de qualidade e pelo suporte financeiro ofertado aos projetos de pesquisa realizados.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar a resistência ao desgaste abrasivo dos revestimentos duros depositados através da combinação dos arames tubulares das ligas FeCrC (60), FeCrC-Nb (68) e FeCrC-NbW (70), com diâmetro de 1,6 mm em camada única de revestimento. Para a deposição dos arames foi utilizado uma fonte de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) operando em corrente contínua (CC) e utilizando dois modos de transferência spray e globular. Como substrato, utilizou-se chapas de aço VC131 com dimensões de 100 x 50 x 10mm. Para o ensaio de desgaste, foram depositados numa extremidade da chapa cinco cordões sobrepostos lateralmente 40%, de modo a formar um revestimento, sendo retirado um corpo de prova de 25 x 75 mm da região central, as amostras foram submetidas a ensaio de desgaste utilizando um abrasômetro do tipo roda de borracha, padronizado pela norma ASTM G65-91 e obtido os valores de perda de massa. Na outra extremidade da chapa, depositou-se um cordão único para a avaliação da morfologia, diluição, microestrutura e microdureza. A análise morfológica dos cordões foi realizada através de macrografias da seção transversal dos cordões, para posterior cálculo da diluição. O estudo da microestrutura foi efetuado por meio de micrografias obtidas da seção transversal do cordão, e a microdureza, através de indentações na superfície da mesma seção. Todas as deposições foram realizadas com o auxílio de um manipulador de soldagem para a garantia do controle dos demais parâmetros envolvidos no processo. A partir dos resultados obtidos foi possível afirmar que o arame 68 (FeCrC+Nb) apresentou o maior desempenho com relação a resistência ao desgaste, seguido pelo arame 70 (FeCrC+NbW) com resultado muito próximo. O arame 60 (FeCrC), em relação aos demais, apresentou o menor desempenho. Todos os arames utilizados nas deposições deste experimento apresentaram trincas perpendiculares ao cordão, independentemente da condição de energia utilizada.

Palavras-Chave: Soldagem, Arame tubular, Revestimento Duro, Desgaste.

## ABSTRACT

This work aims to evaluate the abrasive wear resistance of the hard coatings deposited by combining the tubular wires of the FeCrC (60), FeCrC-Nb (68) and FeCrC-NbW (70) alloys with a diameter of 1.6 mm in single coating layer. For the deposition of the wires an FCAW (Flux Cored Arc Welding) welding source was used operating in direct current (DC) and using two modes of transfer and globular transfer. As substrate, plates of steel VC131 with dimensions of 100 x 50 x 10mm were used. For the wear test, five 40% laterally overlapped strands were deposited at one end of the sheet to form a coating, a 25 x 75 mm specimen was removed from the central region, the samples were subjected to wear test using a abrasive type rubber wheel, standardized by ASTM G65-91 and obtained mass loss values. At the other end of the plate, a single bead was deposited for the evaluation of morphology, dilution, microstructure and microhardness. The morphological analysis of the cords was done through macrographs of the cross section of the cords, for further calculation of the dilution. The study of the microstructure was done through micrographs obtained from the cross section of the cord, and the microhardness, through indentations on the surface of the same section. All the depositions were performed with the aid of a welding manipulator to guarantee the control of the other parameters involved in the process. From the obtained results it was possible to affirm that the wire 68 (FeCrC + Nb) showed the highest performance in relation to the resistance to wear, followed by the wire 70 (FeCrC + NbW) with very close result. The wire 60 (FeCrC), in relation to the others, presented the lowest performance. All the wires used in the depositions of this experiment presented cracks perpendicular to the cord, regardless of the energy condition used.

Keywords: Welding, Tubular Wire, Hard Coating, Wear.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo Arame Tubular.....	16
Figura 2 – Cordão de solda em corte, Área A (Reforço) e B (Penetração) .....	23
Figura 3 – Situações do desgaste abrasivo. ....	25
Figura 4 – Microsulcamento. ....	25
Figura 5 – Microcorte. ....	26
Figura 6 – Microtrincamento.....	26
Figura 7 – Abrasômetro de Roda de Borracha.....	27
Figura 8 – Microestrutura de revestimento duro liga FeCrC: a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C. ....	29
Figura 9 – Microestrutura da liga FeCrC. ....	30
Figura 10 – Microestrutura da liga FeCrC+Nb.....	31
Figura 11 – Composição química.....	32
Figura 12 – Fonte de soldagem.....	33
Figura 13 – Tocha modelo SU 735.....	34
Figura 14 – Tocha fixada na mesa de soldagem.....	35
Figura 15 – Abrasômetro "Roda de Borracha". ....	35
Figura 16 – Representação esquemática da deposição dos revestimentos e região de retirada dos corpos de prova da secção transversal dos cordões de solda. ....	37
Figura 17 – Amostras identificadas e embutidas em resina. ....	39
Figura 18 – Microscópio óptico e durômetro. ....	40
Figura 19 – Dados obtidos através da análise de imagem no software IMAGE-PRO PLUS.....	40
Figura 20 – Esquema realização do ensaio de microdureza.....	41
Figura 21 – Seção transversal dos cordões. ....	42
Figura 22 – Valores de Largura (a), Reforço (b) e Penetração (c). ....	43
Figura 23 – Valores médios de dureza dos cordões x Intensidade de energia. ....	46
Figura 24 – Valores médios de dureza x Tipo de arame.....	47
Figura 25 – Microestrutura dos cordões Baixa energia.....	48
Figura 26 – Microestrutura dos cordões Alta energia.....	50
Figura 27 – Representação gráfica do desgaste abrasivo x intensidade de corrente. ....	53
Figura 28 – Macrografia da seção desgastada.....	54
Figura 29 – Ampliação da região desgastada do ensaio. ....	55
Figura 30 – Representação gráfica do desgaste abrasivo x tipo de consumível.....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação do processo de soldagem. ....	18
Tabela 2 – Representação do tipo de metal de adição. ....	19
Tabela 3 – Representação do método de produção dos arames consumíveis. ....	20
Tabela 4 – Nível de dureza. ....	20
Tabela 5 – Representação das propriedades do metal de adição. ....	21
Tabela 6 – Dados dos consumíveis. ....	30
Tabela 7 – Especificações técnicas dos arames tubulares. ....	32
Tabela 8 – Parâmetros de soldagem. ....	33
Tabela 9 – Parâmetros para a deposição e identificação dos cordões de solda. ....	36
Tabela 10 – Identificação dos corpos de prova. ....	38
Tabela 11 – Valores de percentual de diluição dos cordões de solda. ....	44
Tabela 12 – Dureza média dos cordões. ....	45
Tabela 13 – Resultados do desgaste abrasivo. ....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	Objetivo	12
1.1.1	Objetivos específicos	12
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>13</b>
2.1	Processos de soldagem na aplicação de revestimentos duros	13
2.1.1	Processo de soldagem com arames tubulares (FCAW)	14
2.1.2	Classificação do processo Arame Tubular	16
2.1.3	Classificação dos consumíveis	17
2.2	Metal de base	21
2.3	Energia de soldagem	22
2.4	Diluição dos cordões de solda	22
2.5	Desgaste abrasivo	24
2.5.1	Classificação do desgaste abrasivo	24
2.5.2	Mecanismo de desgaste abrasivo	25
2.5.2	Avaliação de desgaste	27
2.5.3	Microestrutura de revestimentos duros aplicados com arame tubular	28
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
3.1	Materiais	32
3.2	Procedimento experimental	36
3.2.1	Micrografia	39
3.2.2	Microdureza	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
4.1	Morfologia dos cordões de solda	42
4.1.1	Diluição dos cordões	44
4.1.2	Dureza dos cordões de solda	45
4.1.3	Efeito da energia de soldagem	46
4.1.4	Efeito do tipo de arame	47
4.1.5	Microestrutura dos cordões	48
4.2	Revestimentos	51
4.2.1	Perda de massa dos revestimentos	51
4.2.2	Efeito da corrente de soldagem	52
4.2.3	Efeito do tipo de arame	56
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>58</b>

<b>ANEXO A</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO B</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO C</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas indústrias, a recuperação de peças e componentes de máquinas afetadas pelo desgaste durante o ciclo de produção é realizada através da aplicação de revestimentos duros por soldagem utilizando uma ampla variedade de consumíveis, técnicas e processos. Estes parâmetros selecionados corretamente tornam possível a transformação de elementos descartáveis em bens de capital recuperável, além de aumentar a eficiência e tempo de serviço dos equipamentos, diminuir custos de produção e as paradas para manutenção. A aplicação de revestimentos duros, além de recuperar componentes, pode ser utilizada, por exemplo, na melhora da resistência ao desgaste de facas picadoras e martelos desfibradores construídos em aço carbono (LIMA, 2008).

Na aplicação do revestimento, utilizam-se diferentes processos de soldagem, entre eles o Eletrodo Revestido, por ser de baixo custo e versatilidade na aplicação da solda, Arco Submerso, de custo moderado, semiautomático, mas limitado quanto à posição na soldagem e o Arame tubular que oferece alta produtividade, versatilidade, custo moderado e alta qualidade na solda, tornando-se assim, o mais utilizado na indústria da aplicação de revestimentos (BUCHELY et al., 2005).

Quanto à composição química dos consumíveis, são realizados diversos trabalhos com o intuito de avaliar a resistência ao desgaste de diferentes ligas do sistema Fe-Cr-C, utilizadas na soldagem dos revestimentos duros onde ocorre desgaste abrasivo. Sua composição é ajustada de forma a produzir, na solidificação da poça de fusão, microestrutura rica em carbonetos de cromo em matriz austenítica. Fiore, Kosel e Fulcher (1983) afirmam que dependendo da composição da liga e tratamento térmico recebido, podem se apresentar distintos tipos de carbonetos.

Em geral, os aços são metais de base apropriados para revestimento por soldagem, mas, certas ligas requerem cuidados. Aços de baixa liga e aços carbono com até 0,4% de carbono podem ser suscetíveis a trincas, sendo necessário pré-aquecimento para minimizar a ocorrência de martensita na zona afetada pelo calor. Aços inoxidáveis austeníticos, exceto os estabilizados com titânio, e a maioria das ligas a base de níquel podem ser revestidos com facilidade e resultado excelente. Aços inox martensíticos, aços-ferramenta e aços para matrizes também podem ser

revestidos, mas deve-se dar atenção especial aos requerimentos de pré-aquecimento, temperatura de interpasse e pós-aquecimento (INFOSOLDA, 2017).

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho é avaliar a resistência do revestimento duro, visando melhorias na resistência ao desgaste. Para isso, o processo de arame tubular será aplicado em três tipos diferentes de ligas para o revestimento duro, em que será analisado os efeitos sobre a qualidade do revestimento obtido, determinando a resistência ao desgaste (ensaio de Roda de Borracha) e a relação com a microestrutura formada.

## **1.1 Objetivo**

Avaliar a resistência ao desgaste de 3 tipos diferentes de revestimentos duros depositados em material de base aço ferramenta, através do processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding).

### **1.1.1 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- Testar 3 tipos de revestimentos duros que se adequem ao metal de base para efetuar o revestimento;
- Realizar ensaios variando o modo de transferência metálica, para detectar possíveis mudanças das características dos depósitos realizados;
- Avaliar os depósitos realizados através de ensaios não destrutivos (microscopia) e destrutivos (desgaste, dureza e microestrutura).
- Analisar os impactos positivos e negativos das aplicações dos revestimentos depositados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processos de soldagem na aplicação de revestimentos duros

Processos de soldagem com proteção gasosa foram utilizados inicialmente na década de 20, neste período, notavam-se melhorias significantes nas propriedades das soldas quando o arco e o metal fundido eram protegidos da contaminação pela atmosfera. Na década de 40, com a utilização comercial do processo de soldagem com eletrodo de tungstênio, reacendeu o interesse pela soldagem com proteção gasosa. O argônio e o hélio foram os primeiros gases de proteção a serem utilizados. Posteriormente, descobriu-se através de estudos que o gás gerado pela decomposição do revestimento é, predominantemente, CO<sub>2</sub>, a partir daí, testes para a utilização deste gás como proteção se iniciaram, e nos anos 50, foi lançado comercialmente (BRACARENSE, 2005).

A combinação do gás de proteção CO<sub>2</sub> com eletrodos, contendo fluxo interno (arames tubulares), introduzida na década de cinquenta, proporcionou melhorias nas condições de operação e qualidade da solda. A primeira apresentação pública do processo (FCAW - Flux-cored arc welding) aconteceu em 1954. Em seguida, variações deste processo surgiram, como arames tubulares que não necessitam de gás de proteção (auto protegidos) ou que utilizam fluxo aglomerado de proteção do arco e metal fundido (BRACARENSE, 2005).

De acordo com Quites (2002), os principais processos empregados na indústria na aplicação de revestimentos, são os processos de soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW - Shielded Metal Arc Welding), soldagem a arco com arame sólido alimentado continuamente (GMAW - Gas Metal Arc Welding), Arame Tubular (FCAW - Flux-cored arc welding), e Arco Submerso (SAW - Submerged arc welding).

O processo de soldagem a Arco Submerso (SAW), é aplicado na soldagem de chapas com grandes espessuras, articulações retas e na aplicação de cordões de revestimento, é o processo com a maior taxa de deposição do mercado. Apresenta elevada velocidade de soldagem e maior segurança para o operador. A limitação do processo é a posição de soldagem, pois, é indicado apenas para posições planas e horizontais, e sua aplicação fica restringida às chapas espessas (ESAB, 2004).

O processo de soldagem com Eletrodo Revestido (SMAW), ou soldagem manual a arco elétrico, tem boa flexibilidade de aplicação devido a facilidade na compra dos eletrodos, grande variedade de ligas e baixo investimento na compra do equipamento, porém, necessita de cuidados especiais na alocação dos eletrodos e com relação à emissão de gases e fumos durante o processo de soldagem (ESAB, 2005).

No processo MIG/MAG (GMAW), apresenta boa flexibilidade quanto a sua aplicação, o que o difere do processo de SMAW é a alimentação contínua do consumível através da tocha, aumentando a taxa de deposição e a frequência constante do revestimento. O equipamento GMAW tem um custo e um fator operacional mais elevado quando comparado ao processo SMAW (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

O processo Arame Tubular (FCAW) combina características de vários processos de soldagem como o Eletrodo Revestido, o MIG/MAG e o Arco Submerso. O equipamento utilizado na soldagem a arco elétrico com arame tubular é similar ao usado no processo de soldagem a arco com proteção gasosa (MIG/MAG) (AWS, 1997). A vantagem do processo Arame Tubular é obtida pela combinação da produtividade oferecida pela alimentação contínua do arame, dos benefícios metalúrgicos que podem ser obtidos e da proteção que a escória formada oferece ao metal em solidificação.

#### 2.1.1 Processo de soldagem com arames tubulares (FCAW)

O processo de soldagem a arco elétrico com Arame Tubular (FCAW) utiliza a energia do arco para a fusão de um arame oco alimentado continuamente e a fusão do metal base. O processo utiliza um fluxo formado por vários metais em pó, contido no interior do arame que no momento da fusão formam a atmosfera protetora, em alguns casos é possível utilizar gás de proteção adicional de uma fonte externa.

O que diferencia esse de outros processos de soldagem a arco é justamente esse encerramento dos componentes do fluxo dentro do arame que está sendo continuamente alimentado. Durante a soldagem, esse fluxo gera uma extensa

camada de escória sobre a face externa no cordão de solda (AWS, 1997). Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco.

Bracarense (2005) afirma que os benefícios da soldagem com arames tubulares estão relacionados a três características gerais: produtividade relacionada à utilização de arames contínuos; benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame; auxílio da escória na forma e aspecto do cordão de solda.

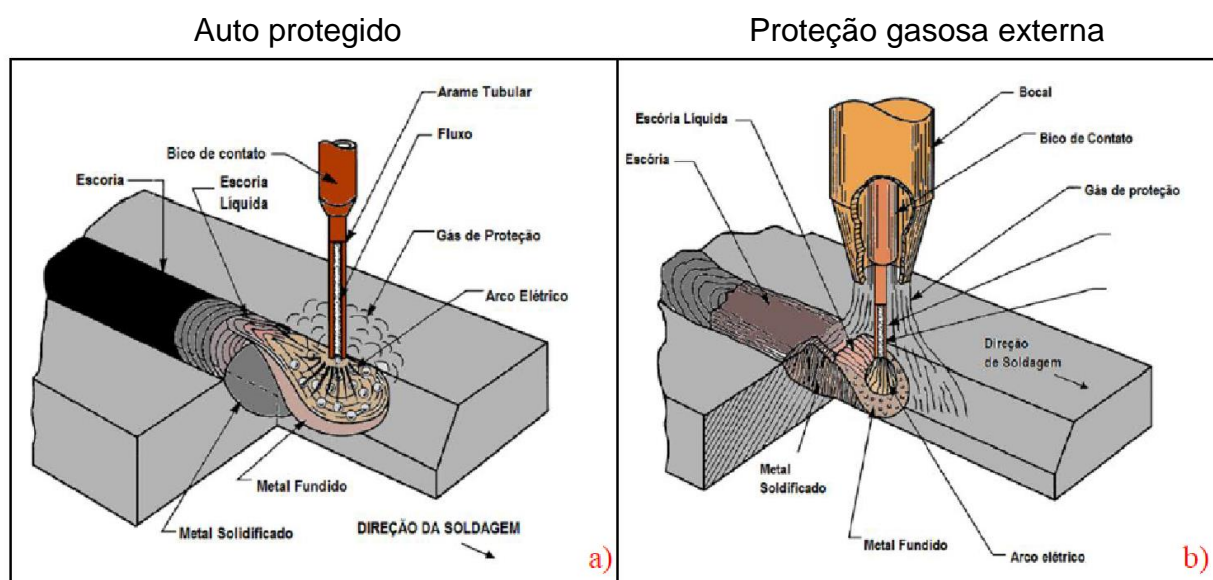
A utilização de arame tubular fornece uma alta qualidade ao metal de solda depositado, excelente aparência ao cordão de solda, boas características de arco, além de diminuir o número de respingos e possibilidade de solda em todas as posições, tendo ganho popularidade para soldagem de aços carbono e baixa liga, em chapas de espessura grossa e fina. Muitas vezes sendo utilizado onde a geometria de junta e posição de soldagem não permitia a aplicação de outros processos de alto rendimento tal como arco submerso ou eletro escória. Outras vantagens são a resistência a trincas do cordão, economia na engenharia para projeto de juntas, e praticidade na operação devido à alta facilidade de mecanização.

A utilização de arame tubular auto protegido tem tido grande interesse devido a sua versatilidade e possibilidade de aplicação em ambientes sujeitos a intempéries, como na fabricação de plataformas de prospecção de petróleo, estaleiros navais, em locais de difícil acesso e em estações de trabalho, onde até então era absoluto o domínio do processo de soldagem por eletrodos revestidos, assim como vem aumentando sua utilização em estações de trabalho automatizadas e ou robotizadas.

### 2.1.2 Classificação do processo Arame Tubular

O processo de soldagem com arame tubular classifica-se em dois tipos, que diferem na forma em que ocorre a proteção da poça de fusão da contaminação atmosférica. Os tipos são o auto protegido e com proteção gasosa externa. No primeiro, a poça de fusão é protegida pela decomposição da vaporização do núcleo devido ao calor gerado pelo arco. No segundo, a proteção é efetuada em conjunto com outro gás de proteção adicional inserido de uma fonte externa. Nos dois métodos, o arame tubular fornece uma camada de escória que visa proteger o metal que está solidificando (AWS, 1997). Os dois processos podem ser visualizados na Figura 1.

Figura 1 – Processo Arame Tubular.



Fonte: AWS (1997)

No processo auto protegido, Fig.1a, a proteção é obtida por meio da vaporização dos elementos misturados no fluxo. São produzidos elementos como o  $\text{CO}_2$  e há a introdução de agentes desoxidantes e desnitrificantes provenientes dos componentes do fluxo que se depositam na superfície da poça de fusão. Esse fator determinante explica porque os arames auto protegidos podem tolerar fortes correntes de ar, ao contrário de outros processos com gás de proteção externa. Por isso esse processo de soldagem é amplamente utilizado na soldagem em campo.

Quando se usa gás de proteção externa (Fig.1b), usualmente dióxido de

carbono ou misturas de argônio e dióxido de carbono, a poça de fusão fica melhor protegida do ar atmosférico pela formação de uma atmosfera protetora ao redor do arco e sobre a poça. Os arames utilizados nesse processo são formulados com o objetivo de prover desoxidantes que se combinam com pequenas quantidades de oxigênio que se encontra no gás de proteção.

O processo Arame Tubular possui grande vantagem obtida através da combinação da produtividade oferecida pela alimentação contínua do arame, dos vários benefícios metalúrgicos que podem ser obtidos e da proteção formada pela escória ao metal em solidificação. Esse processo reúne características positivas de vários outros processos de soldagem como, por exemplo, o processo de soldagem a Eletrodo Revestido, MIG/MAG e o Arco Submerso. O equipamento utilizado na realização da soldagem dos revestimentos com arame tubular é similar ao utilizado no processo de soldagem a arco com proteção gasosa MIG/MAG (AWS, 1997).

### 2.1.3 Classificação dos consumíveis

A diferença entre os 3 consumíveis (arames) utilizados é determinada pela variação em suas composições químicas. No arame 60, os principais componentes presentes são o carbono (C), o cromo (Cr), o silício (Si) e manganês (Mn). No arame 68 além dos anteriores há a adição de nióbio (Nb), e no arame 70 soma-se aos anteriores molibdênio (Mo), tungstênio (W) e vanádio (V), como pode ser observado nos anexos (Anexo A, Anexo B e Anexo C) a composição nominal fornecida pelo fabricante (BÖHLER, 2015).

O arame tubular 60 é de alta liga para revestimentos protetores resistentes à abrasão, com alto teor de cromo é usado para revestimentos duros de componentes sujeitos a altas taxas de abrasão, combinado com impactos moderados e compressão, possui estrutura rica em carbonetos de cromo, indicado para o revestimento de martelos de moinhos, dentes de escavadeiras, etc (BÖHLER, 2015).

O arame tubular 68 é de alta liga para revestimentos protetores contra extremo desgaste por abrasão, ligado ao Cr-Nb, é utilizado para revestimentos resistentes ao desgaste em aço sem liga, baixa liga e aço fundido, submetidos a médios impactos e severa abrasão causada por minerais, aplicado em revestimentos protetores

antidesgaste de lâminas, dentes, bordas de caçambas de carregadeiras, moinhos de rolos ou de martelos, etc (BÖHLER, 2015).

O arame 70 é um arame tubular altamente ligado para revestimentos extremamente duros e resistentes aos desgastes, mantendo a dureza em elevadas temperaturas, altamente ligado ao Cr-Mo-Nb-W-V. O revestimento com arame 70 apresenta carbonetos complexos em sua matriz, ideal para aplicação em britadores de sinter, facas de corte, rotores de dragas, etc (BÖHLER, 2015).

Conforme a norma UTP (2011), os arames tubulares de revestimento duro depositam matrizes com elevados teores de Cr, Mo e Nb, formando colônias complexas de carbonetos na superfície revestida, atenuando o desgaste abrasivo. Os arames tubulares UTP 60, 68 e 70 são encontrados comercialmente com diâmetros de 1,6 mm, 2,0 mm, 2,4 mm e 2,8 mm, em variados tipos de bobinas plásticas e metálicas (15 kg). A dureza dos cordões pode variar de 57 a 70 HRC (UTP, 2011).

A classificação dos arames tubulares para revestimento duro é apresentada entre as Tabelas 1 a 5, com especificações técnicas relativas ao arame MF-10-GF-65-GR referente ao arame UTP 68, tomado por exemplo. A Tabela 1 e 2, apresentam o processo de soldagem para qual o arame MF-10-GF-65-GR é indicado e o tipo de metal de adição, primeira e segunda descrição da classificação segundo a norma DIN 8555.

Tabela 1 – Representação do processo de soldagem.

<b>Exemplo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Processo de Soldagem</b>
	<b>G</b>	Soldagem Oxiacetilênica
	<b>E</b>	Soldagem manual ao arco elétrico com eletrodo revestidos
<b>MF</b>	<b>MF</b>	Soldagem ao arco elétrico utilizando-se arames tubulares
	<b>TIG</b>	Soldagem ao arco elétrico com eletrodo não consumível
	<b>MSG</b>	Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa
	<b>UP</b>	Soldagem ao arco submerso

Fonte: ESAB (2011)

Tabela 2 – Representação do tipo de metal de adição.

<b>Exemplo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Tipo de Metal de Adição</b>
1		Não ligado com 0,4%C ou baixa liga com até 0,4%C e até um máximo de 5% dos elementos de liga Cr, Mn, Ni no total
2		Não ligado com até ou mais de 0,4%C ou baixa liga com mais de 0,4C e até um máximo de 5% dos elementos de liga Cr, Mn, Mo, Ni no total
3		Ligado com as propriedades dos aços de trabalho à quente
4		Ligado, com as propriedades dos aços rápidos
5		Ligados, com mais de 5%Cr, com um baixo teor de C (até mais ou menos 0,2%)
6		Ligados, com mais de 5%Cr, com um teor maior de C (até mais ou menos 0,2% a 2,0%)
7		Martensíticos ao Mn com 11 a 18%Mn, mais de 0,5%C e até 3%Ni
8		Austeníticos Cr-Ni-Mn
9		Aços Cr-Ni (resistente à oxidação, ácidos e calor)
<b>10</b>	<b>10</b>	Com um alto teor de C e alto teor de Cr e sem agentes adicionais formadores de carbonetos
20		À base de Co, ligados a Cr-W, com ou sem Ni e Mo
21		À base de carbonetos (sintetizado, fundido ou tubular)
22		À base de Ni, ligado ao Cr, ligado ao Cr-B
23		À base de Ni, ligado ao Mo, com ou sem Cr
30		À base de Cu, ligado ao Sn
31		À base de Cu, ligado ao Al
32		À base de Cu, ligado ao Ni

Fonte: ESAB (2011)

A Tabela 3 representa o método de produção dos consumíveis, de acordo com a norma DIN 8555, através da terceira descrição da classificação.

Tabela 3 – Representação do método de produção dos arames consumíveis.

<b>Exemplo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Método de Produção</b>
	GW	Laminado
	GO	Fundido
	GZ	Extrudado
	GS	Sinterizado
<b>GF</b>	GF	Tubular
	UM	Revestido

Fonte: ESAB (2011)

As Tabelas 4 e 5 apresentam a faixa de dureza e as propriedades dos metais de adição, de acordo com a norma DIN 8555, na especificação do arame consumível através da quarta e quinta descrição da classificação.

Tabela 4 – Nível de dureza.

<b>Exemplo</b>	<b>Nível de Dureza</b>	<b>Faixa de Dureza</b>
	<b>150</b>	125 ≤ HB ≤ 175
	<b>200</b>	175 ≤ HB ≤ 225
	<b>250</b>	225 ≤ HB ≤ 275
	<b>300</b>	275 ≤ HB ≤ 325
	<b>350</b>	325 ≤ HB ≤ 375
	<b>400</b>	375 ≤ HB ≤ 425
	<b>450</b>	125 ≤ HB ≤ 170
	<b>500</b>	450 ≤ HB ≤ 530
	<b>40</b>	37 ≤ HRC ≤ 42
	<b>45</b>	42 ≤ HRC ≤ 47
	<b>50</b>	47 ≤ HRC ≤ 52
	<b>55</b>	52 ≤ HRC ≤ 57
	<b>60</b>	57 ≤ HRC ≤ 62
<b>65</b>	<b>65</b>	62 ≤ HRC ≤ 67
	<b>70</b>	HRC ≥ 68

Fonte: ESAB (2011)

Tabela 5 – Representação das propriedades do metal de adição.

<b>Exemplo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Propriedades do Metal de Adição</b>
	<b>C</b>	Resistência a corrosão
<b>G</b>	<b>G</b>	Resistente ao desgaste abrasivo
	<b>K</b>	Capaz de endurecer em trabalho
	<b>N</b>	Não magnetizável
	<b>P</b>	Resistente ao impacto
<b>R</b>	<b>R</b>	Resistente a formação de carepa
	<b>S</b>	Habilidade de corte (aços rápidos, etc)
	<b>T</b>	Tão resistente a altas temperaturas quanto os aços ferramenta para trabalho a quente
	<b>Z</b>	Resistente ao calor (não formadores de carepa), para temperaturas acima de 600°C

Fonte: ESAB (2011)

## 2.2 Metal de base

O material VC131 é um aço ferramenta que tem como características gerais a alta estabilidade dimensional e excelente resistência ao desgaste, especialmente em condições abrasivas, é fornecido já recozido com dureza máxima de 250HB.

As aplicações típicas são matrizes de corte, facas e tesouras de alto rendimento, para cortes de chapas de aço silício e chapas de aço de até 4mm de espessura, estampo para corte de precisão na indústria de papel, placas de revestimento de moldes, além de ferramentas para prensagem de pós-metálicos e materiais altamente abrasivos, guias para máquinas operatrizes, régua para retificadoras, ferramentas em geral, que exigem a máxima resistência à abrasão e retenção de corte (VILLARES METALS, 2016).

### 2.3 Energia de soldagem

Energia de soldagem, aporte térmico ou aporte de calor é a quantidade de calor aplicado a um material, por unidade de comprimento linear, considerando os efeitos de tensão no arco, corrente de soldagem, velocidade de soldagem e eficiência térmica do processo (AWS, 1991).

A equação 1 apresentada – a seguir é utilizada para calcular a energia de soldagem.

$$\text{Energia de Soldagem} \rightarrow (E) = \frac{n \cdot V \cdot I}{v} \quad (\text{J/mm}) \quad (1)$$

Onde:

n = eficiência térmica do processo em joules (J)

V = tensão no arco em volts (V)

I = corrente de soldagem em amperes (A)

v = velocidade de soldagem em milímetros por segundo (mm/s)

A energia de soldagem é um fator preponderante, pois tem grande influência nos valores de morfologia dos cordões, na microestrutura, na diluição, na dureza e na perda de massa dos revestimentos depositados (ESAB 2011).

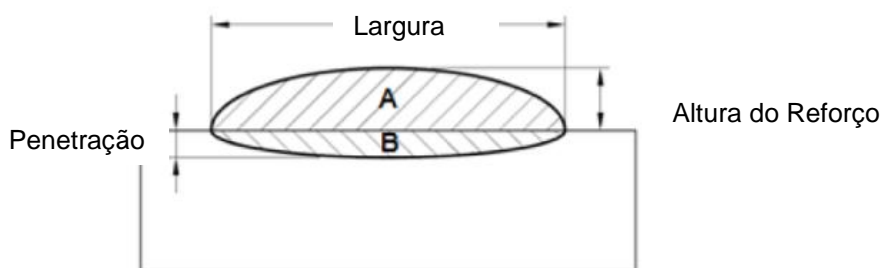
### 2.4 Diluição dos cordões de solda

Na soldagem por fusão, chama-se diluição a parcela de metal de base que entra na composição da zona fundida (AWS, 1991). O percentual de diluição é medido pela porcentagem do metal de base no cordão de solda e pode ser calculado conforme a equação a seguir:

$$\text{Diluição} = \left[ \frac{\text{área B}}{\text{área A} + \text{B}} \right] \times 100 \quad (2)$$

As áreas A (área de reforço do cordão de solda) e B (área de penetração do cordão de solda) utilizadas para o cálculo do percentual de diluição, podem ser visualizadas na Figura 2 que representa o cordão de solda em corte.

Figura 2 – Cordão de solda em corte, Área A (Reforço) e B (Penetração) .



Fonte: Autor (2016)

Com relação a resistência ao desgaste abrasivo, segundo experimentos realizados por Ribeiro (2004), observou-se que o aumento da corrente de soldagem resulta no aumento da perda de volume, devido ao aumento na diluição, ocorrendo a formação de microestruturas com baixa fração volumétrica de carbonetos.

Em deposições de revestimentos duros é desejável a ocorrência de uma baixa diluição de modo que as propriedades do metal de base influenciem minimamente a composição química e as propriedades do metal depositado, geralmente inferiores quanto ao requisito de resistência ao desgaste (LIMA *et al.*, 2007).

Na maioria das vezes, o material a ser depositado apresenta características superiores ao metal de base, devido a composição química mais elaborada contendo elevados teores de cromo (Cr), molibdênio (Mo), níquel (Ni), nióbio (Nb), tungstênio (W), carbono (C) e titânio (Ti), podendo então elevar a resistência ao desgaste do componente (FILHO *et al.*, 2010) (COLAÇO, 2013).

Em análise dos efeitos da taxa de diluição e microdureza na resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos duros depositados com liga FeCrC, Oliveira, Gallego e Ventrella (2014) concluíram que a taxa de diluição influenciou diretamente na microestrutura do revestimento duro em todas as camadas depositadas, e camadas que apresentaram formação de carbonetos primários obtiveram desempenho superior aos que apresentaram carbonetos secundários sob baixa tensão de ensaio abrasivo.

## 2.5 Desgaste abrasivo

Wainer, Brandi e De Mello (1992) afirmam que o desgaste de materiais puros é diretamente proporcional a sua própria dureza, enquanto que nas ligas metálicas essa proporcionalidade pode valer até determinado valor de dureza, a partir daí a resistência ao desgaste cresce com menor intensidade, podendo até diminuir.

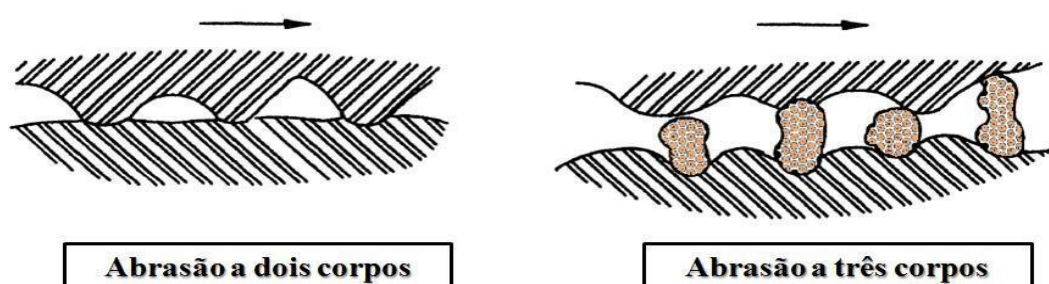
A norma ASTM G40-01 (2001) define o desgaste abrasivo como a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície e se movimentam ao longo dela, provocando danos superficiais intensos e com eles a destruição total ou parcial da peça.

Esse tipo de desgaste é frequentemente causado por partículas não metálicas, embora existam algumas metálicas com a capacidade de causar abrasão. O custo que o desgaste abrasivo representa no PIB de uma nação industrializada é estimado entre 1 a 4% (DAVIS, 2001). Esse efeito é mais evidente em áreas industriais, agricultura e mineração.

### 2.5.1 Classificação do desgaste abrasivo

Bayer (2004) classifica o desgaste abrasivo de acordo com o tipo e o ambiente de contato, assim como, abrasão a dois corpos e abrasão a três corpos. A abrasão a dois corpos acontece quando o desgaste é causado por protuberâncias ou partículas que estão aderidas a uma das superfícies, como no retificado e polimento. A abrasão a três corpos é quando as partículas não estão unidas, mas estão livres entre as duas superfícies. A Figura 3 ilustra a diferença.

Figura 3 – Situações do desgaste abrasivo.



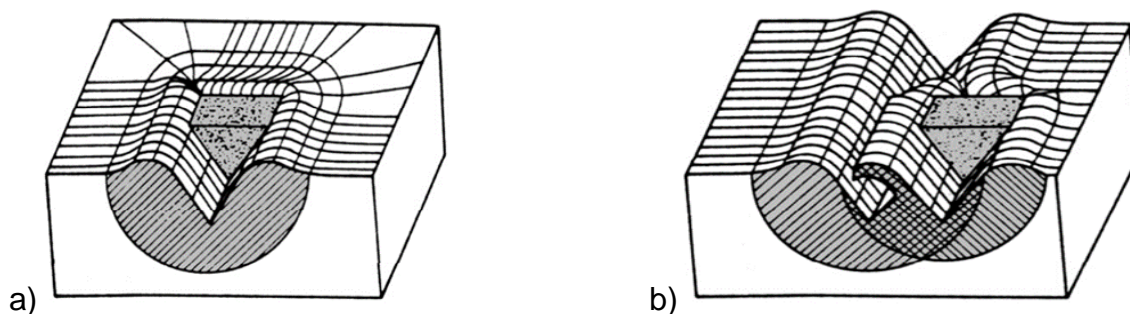
Fonte: (BAYER, 2004)

### 2.5.2 Mecanismo de desgaste abrasivo

Em estudos de fenômenos tribológicos relacionados à abrasão é importante identificar micromecanismos de desgaste, os quais definem quais processos de interação entre o abrasivo (ou asperidade dura) e a superfície desgastada ocorrem. Segundo EYRE (1991), os micromecanismos de desgaste abrasivo podem ser dúcteis (microsulcamento e microcorte) ou frágeis (microtrincamento).

No microsulcamento (Figura 4a e 4b) ocorre a interação entre a partícula e o abrasivo em condições dúcteis, provocando o deslocamento total do volume de material (ou fase), deformando plasticamente para as laterais do sulco e formando saliências. Durante a primeira etapa do microsulcamento não há perda de material efetivo, entretanto pela interação simultânea e sucessiva de várias partículas, as condições de desgaste (carga, tipo de material e abrasivo) podem levar à perda de material.

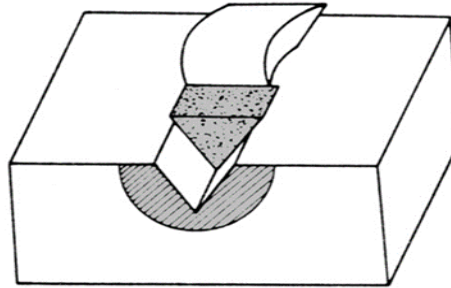
Figura 4 – Microsulcamento.



Fonte: (ZUM GAHR,1998)

Quando ocorre o microcorte, a perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo (Figura 5). Se as condições favorecem o microcorte puro, o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido.

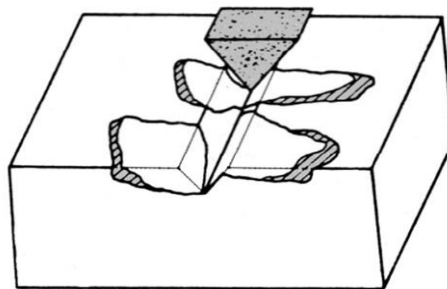
Figura 5 – Microcorte.



Fonte: (ZUM GAHR,1998)

Na ocorrência de microtrincamento, mecanismo típico de condições frágeis de desgaste, a interação entre a partícula e o material leva ao destacamento de grandes fragmentos, os quais podem ser maiores que a dimensão do próprio risco devido à formação e a propagação de trincas durante o evento (Figura 6).

Figura 6 – Microtrincamento.



Fonte: (ZUM GAHR,1998)

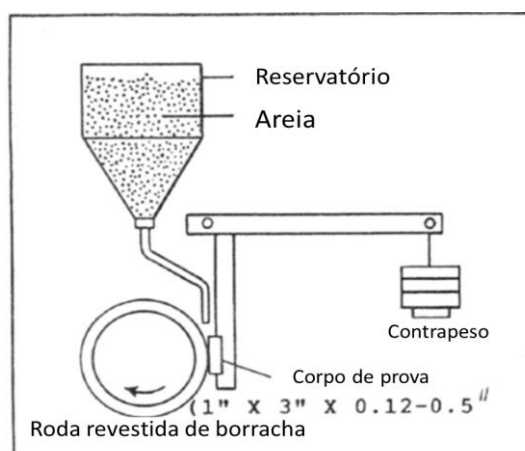
### 2.5.2 Avaliação de desgaste

Especificamente para reproduzir o desgaste abrasivo, existem diversos tipos de ensaios científicos, cujo equipamento utilizado é conhecido como “abrasômetro”. A partir daí é possível avaliar a perda de massa do corpo de prova e assim medir o percentual de desgaste sofrido pelo mesmo. O equipamento utilizado para teste abrasivo Roda de Borracha é o mais utilizado em ensaios de abrasão a baixa tensão, o procedimento é estabelecido pela norma ASTM G65-00.

Seu princípio de funcionamento consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado, com areia de tamanho de grão e a composição controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada em movimento de rotação, provocando o riscamento do corpo de prova (ASTM G 65-00, 2001).

O equipamento é acionado por um motor elétrico que move o contra-corpo, composto por um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore. O corpo de prova é fixado a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal ao mesmo via peso morto, enquanto o fluxo de abrasivo escoar por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste. A Figura 7 ilustra o funcionamento do abrasômetro.

Figura 7 – Abrasômetro de Roda de Borracha.



Fonte: ASTM G 65-00 (2001)

Esta configuração permite a aplicação de alta carga e utilização de um contra-corpo com baixa dureza, promovendo o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Como resultado da movimentação, as partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo. Para quantificar o desgaste é efetuada a pesagem dos corpos de prova antes e após o ensaio, e calculado o percentual de perda de massa sofrido pelo corpo de prova (ASTM G 65-00, 2001).

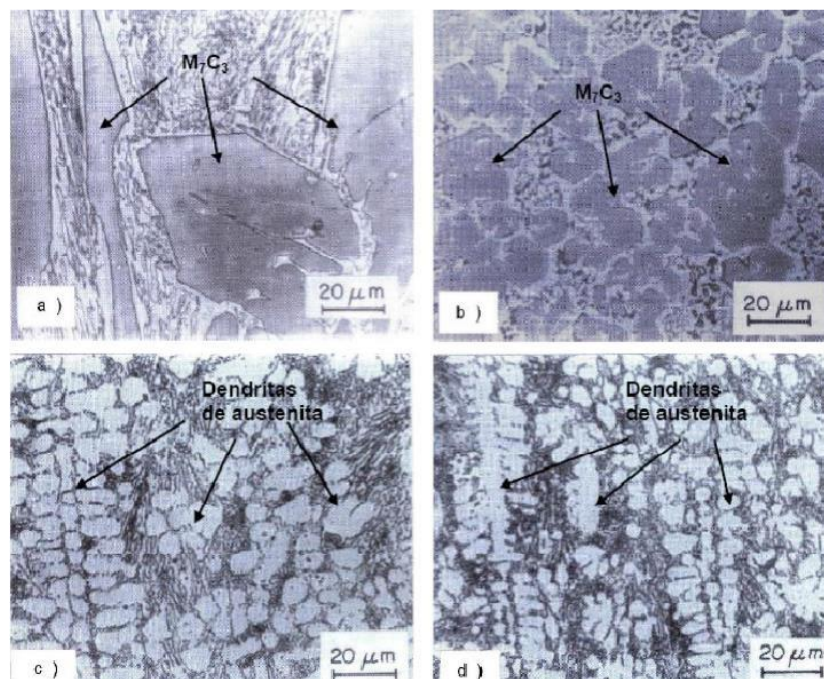
### 2.5.3 Microestrutura de revestimentos duros aplicados com arame tubular

A microestrutura dos revestimentos tem um papel importante no desempenho em relação a resistência ao desgaste, principalmente a microestrutura formada por fases duras ou carbonetos duros. Fatores como composição da liga e do tratamento térmico influenciam na formação de distintos tipos de carbonetos, como MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  e  $Cr_2C_3$ , onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos e C, carbono (LIMA; FERRARESI, 2009).

A quantidade de carbono no material é um fator importante para a confecção do revestimento. Chang et al (2009) verificaram que, em revestimentos hipereutéticos de Fe-Cr-C, o percentual de carbono influencia na fração volumétrica de carbonetos de materiais com o mesmo percentual de elementos formadores de carbonetos. Foi verificado que materiais com maior percentual de carbono apresentam mais carbonetos por unidade de área, porém com tamanhos menores, e materiais com menor percentual de carbono apresentam carbonetos primários de tamanho maior. Os revestimentos que apresentaram maior percentual de carbono foram responsáveis por apresentar maior dureza devido a maior quantidade de carbonetos de  $(Cr Fe)_7C_3$ .

Segundo Bálsamo, Scotti e De Mello (1995), a energia de soldagem tem grande influência na morfologia da microestrutura dos revestimentos duros, em particular no tamanho médio da mesma, quando o menor aporte térmico e, conseqüentemente, a maior velocidade de solidificação levam ao refinamento da microestrutura. A Figura 8 ilustra o efeito do teor de carbono e do aporte térmico na microestrutura e no tamanho dos microconstituintes.

Figura 8 – Microestrutura de revestimento duro liga FeCrC: a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C.



Fonte: (BÁLSAMO; SCOTTI; DE MELLO,1995)

Observa-se que a Figura 8a e 8b são constituídas predominantemente por carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$  em matriz eutética de austenita mais carboneto, enquanto que nas Figuras 8c e 8d, devido ao menor teor de carbono, a microestrutura é composta por dendritas de austenita em matriz eutética. Verifica-se comparativamente que nas ligas soldadas com menor térmico (Fig. 8b e 8d), tanto os carbonetos  $M_7C_3$  quanto as dendritas de austenita apresentam maior refino devido à maior velocidade de resfriamento (BÁLSAMO; SCOTTI; DE MELLO,1995).

Lima (2008) utilizou em sua pesquisa três arames tubulares auto protegidos de 1,6 mm de diâmetro. Estes arames tubulares da liga FeCrC diferem entre si pelos teores de ferro, cromo, carbono, silício e manganês, além da adição de Nb em uma liga e da adição de Ti e Mo em outra. A Tabela 6 apresenta a faixa de dureza a ser obtida pelo metal de solda em primeira camada, bem como, a composição típica dos arames, cujos dados foram obtidos do fabricante.

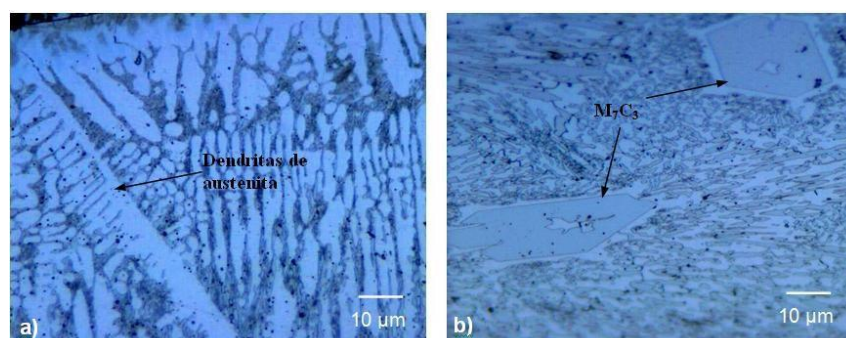
Tabela 6 – Dados dos consumíveis.

Tipo de Eletrodo	Dureza [HRc]	Composição química (%)								
		C	Cr	Mn	Si	S	P	Nb	Mo	Ti
FeCrC	59-61	4,11	23,10	0,52	0,20	--	--	-	-	-
FeCrC+Nb	57-64	4,50	22,00	0,50	0,60	0,02	0,001	6,50	-	-
FeCrC+Ti	52-64	1,80	7,50	0,84	0,50	0,018	0,027	-	1,50	5,26
ER1	58-63	5,10	44,00	0,75	1,25	0,025	0,035	-	-	-

Fonte: LIMA (2008)

A Figura 9 ilustra a microestrutura obtida com o arame FeCrC por microscopia. Na Figura 9a, observa-se que próximo à interface com o metal de base, o revestimento FeCrC apresentou uma microestrutura com crescimento dendrítico (dureza média de 393 HV0,01). No interior do revestimento (Fig. 9b), nas regiões mais próximas à superfície do cordão de solda se observam carbonetos primários ( $M_7C_3$ ), com dureza variando de 1051-1756 HV0,01 (média 1510 HV0,01), imersos em matriz eutética (austenita mais carbonetos) com dureza média de 668 HV0,01.

Figura 9 – Microestrutura da liga FeCrC.



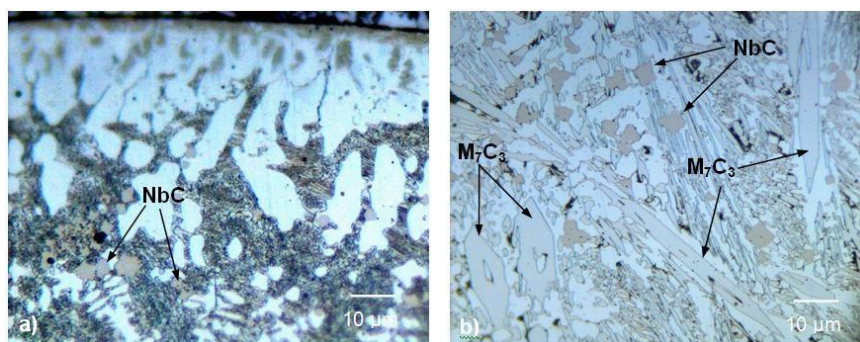
Fonte: LIMA (2008)

A microestrutura do revestimento FeCrC+Nb é apresentada na Fig. 10, mostrando uma formação que se assemelha ao revestimento FeCrC (Fig. 9a) para a região próxima ao metal de base (Fig. 10a), ou seja, microestrutura com crescimento dendrítico na interface com o metal de base, menos evidente que o FeCrC. A Fig. 10b mostra carbonetos primários ( $M_7C_3$ ), com dureza variando de 1168-1452 HV0,01 (média de 1356 HV0,01), imersos em matriz com dureza média de 650 HV0,01.

Observa-se também a presença em todo o volume do revestimento (da interface do metal de base até a superfície) de pequenos carbonetos de nióbio (5 a

10 $\mu$ m) finamente distribuídos na matriz. Esses carbonetos apresentam geometria diversa de forma similar ao obtido por Buchely et al (2005). A sua dureza varia de 1027-1514 HV<sub>0,01</sub> (média de 1207 HV<sub>0,01</sub>), inferior ao obtido na literatura, em torno de 2400 HV (BUCHELY et al, 2005).

Figura 10 – Microestrutura da liga FeCrC+Nb.



Fonte: LIMA (2008)

De acordo com Hernandez (1997), as ligas do sistema FeCrC+Nb apresentam essencialmente o mesmo tipo de contraste de microestrutura das ligas contendo apenas FeCrC, formando-se dendritas de austenita ou carbonetos  $M_7C_3$  massivos, além da presença de carbonetos NbC, na forma primária e/ou em frações mais finas, oriundas de reações mais complexas do sistema quaternário. Ensaio abrasivos em ligas fundidas desse sistema indicaram que é possível obter um menor desgaste de ligas austeníticas fundidas contendo  $(FeCr)_7C_3$ , pela substituição parcial desse carboneto de cromo por carbonetos NbC, para certas porcentagens de fases e características microestruturais.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para deposição dos revestimentos utilizou-se como metal de base o aço denominado VC131, do fabricante Villares Metals S.A., nas medidas 100mm x 50mm x 10mm, este material foi selecionado por ser uma das matérias primas utilizadas na fabricação de rolos de laminação, tendo em sua composição C, Cr, W e V conforme Figura 11.

Figura 11 – Composição química.

C	Cr	W	V
<b>2,10</b>	<b>11,5</b>	<b>0,70</b>	<b>0,15</b>

Fonte: Villares Metals (2016)

Para o depósito dos revestimentos foram utilizados 3 tipos diferentes de arames tubulares. Os respectivos arames foram selecionados com base em sua composição química, dentre eles os arames tubulares auto protegidos com 1,6 mm de diâmetro, cuja composição C, Si, Mn, Cr, Mo, V, W e Nb após revestimento encontra-se descrita na Tabela 7. Os certificados de qualidade dos arames encontram-se nos Anexos A, B e C.

Tabela 7 – Especificações técnicas dos arames tubulares.

ARAME TUBULAR	Classificação DIN 8555	Porcentagem em peso (%)										Dureza HRC média
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Nb	Co	B	
UTP AF LEDURIT 60	MF 10-GF-60-GR	3,34	0,82	0,314	27,0	0,026	-	0,007	-	0,01	0,311	61
UTP AF LEDURIT 68	MF 10-GF-65-GR	3,41	1,05	0,228	17,88	-	-	-	3,06	-	-	65
UTP AF LEDURIT 70	MF 10-GF-70- GRTZ	4,56	0,57	0,25	19,0	-	0,67	1,53	5,5	-	-	67

Fonte: O autor(2016)

O tipo de corrente utilizada na soldagem para os três arames é CC com polaridade inversa (+). Os parâmetros de soldagem especificados pelo mesmo fabricante são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros de soldagem.

<b>Eletrodo Tubular</b>	<b>Ø(mm)</b>	<b>Corrente(A)</b>	<b>Tensão(V)</b>	<b>Rendimento(Kg/h)</b>
UTP AF LEDURIT 60	1,6	150 - 350	22 - 29	5 - 7
UTP AF LEDURIT 68	1,6	150 - 350	22 - 29	5 - 8
UTP AF LEDURIT 70	1,6	180 - 200	26 - 30	5 - 8

Fonte: BÖHLER(2015)

Para a realização dos testes preliminares, deposição dos cordões e revestimentos, foi utilizada uma bancada de soldagem, composta por uma fonte de soldagem eletrônica com alimentador de arame, tocha e mesa de soldagem. Antes da realização dos testes foram realizadas as calibrações dos equipamentos utilizados. A fonte utilizada foi uma multiprocesso modelo SIGMA 500 (Figura 12) com alimentador de arame-eletrodo acoplado à fonte de soldagem, que tem como função alimentar o arame-eletrodo até o arco. A SIGMA 500 é viável para uso em vários processos de soldagem, dentro de suas várias funcionalidades, foi utilizado no experimento a função MIG-MAG convencional.

Figura 12 – Fonte de soldagem.



Fonte: SUMIG (2016)

A tocha utilizada foi o modelo SU 735 (Figura 13), a mesma é indicada para soldas pesadas, trabalhos com arames sólidos, tubulares, alumínio e inox. Suporta correntes até 550 amperes (A), o que é ponto importante para uso no experimento já que foram efetuadas deposições no modo Spray que demandam altos valores de corrente, o ciclo trabalho em corrente de 500 A (60%), utiliza arames de 0,80mm a 1,60mm de diâmetro.

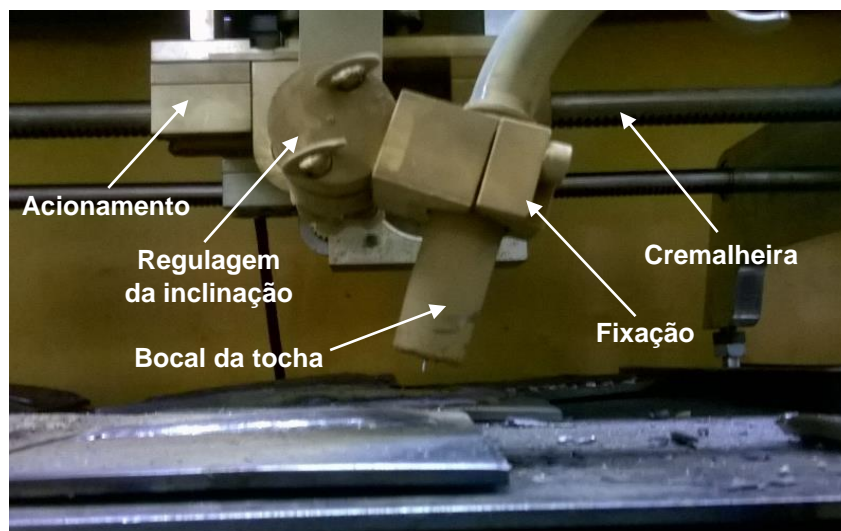
Figura 13 – Tocha modelo SU 735.



Fonte: SUMIG (2016)

A mesa de soldagem é um sistema de deslocamento e posicionamento da tocha de soldagem, composto por um dispositivo eletromecânico onde é fixada a tocha pelo bocal, onde podem ser efetuadas regulagens nos três eixos de movimentação. O dispositivo é acoplado por meio de engrenagem a uma cremalheira por onde é realizado o tracionamento do mesmo através de um motor elétrico controlado por um circuito eletrônico e segue por um trilho. Esse equipamento permitiu manter o controle da velocidade de soldagem (mm/s), a distância bico de contato peça (DBCP) (mm) e a inclinação da tocha constantes de modo a garantir a correta determinação das energias de soldagem aplicadas na realização do experimento. O dispositivo pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Tocha fixada na mesa de soldagem.



Fonte: Laboratório IFSC Campus Jaraguá do Sul – Rau (2016)

O equipamento utilizado para avaliar o desgaste abrasivo dos revestimentos é chamado abrasômetro "Roda de Borracha" (Figura 15) foi construído nos laboratórios do IFSC Campus Jaraguá do Sul, bairro Rau, obedecendo a norma ASTM G65. Este equipamento é formado basicamente de um reservatório de abrasivo, uma roda revestida de borracha e um porta amostra com dispositivo de medição das forças aplicadas. Seu funcionamento se dá, com a aproximação e aplicação de uma carga na amostra contra a roda de borracha em movimento gerando o atrito, enquanto ocorre a vazão do abrasivo entre as partes gerando o desgaste.

Figura 15 – Abrasômetro "Roda de Borracha".



Fonte: Laboratório IFSC Campus Jaraguá do Sul – Rau (2016)

### 3.2 Procedimento experimental

Na primeira etapa, as chapas foram limpas por meio de lixamento para remover possíveis impurezas que pudessem prejudicar a obtenção de dados confiáveis, após foi regulada a máquina de soldagem e realizados testes preliminares variando os parâmetros de tensão e corrente a partir dos parâmetros recomendados pelo fabricante. A Tabela 9 mostra os valores utilizados dos parâmetros de tensão, velocidade do arame, velocidade de soldagem e tipo de arame utilizado nas deposições preliminares, conforme recomendação do fabricante do eletrodo e de maneira a obter a estabilidade do processo.

Tabela 9 – Parâmetros para a deposição e identificação dos cordões de solda.

Corpos de Prova	Variáveis						Energia de soldagem [J/mm]
	Tensão [V]	Corrente [A]	Tipo de Arame [UTP AF LEDURIT]	Modo de Transferência	V arame [mm/s]	V solda [mm/s]	
A - 60	35	300	60	Spray	15	800	787,5
A - 68	35	300	68	Spray	15	800	787,5
A - 70	35	300	70	Spray	15	800	787,5
B - 60	27	196	60	Globular	7,7	412	770,7
B - 68	27	196	68	Globular	7,7	412	770,7
B - 70	27	196	70	Globular	7,7	412	770,7

Fonte: Autor (2016)

Foram mantidos constantes em todas as deposições a distância entre o bico de contato com a peça (DBCP) em 20 mm, o grau de inclinação da tocha de soldagem em 73° e soldagem na direção empurrando.

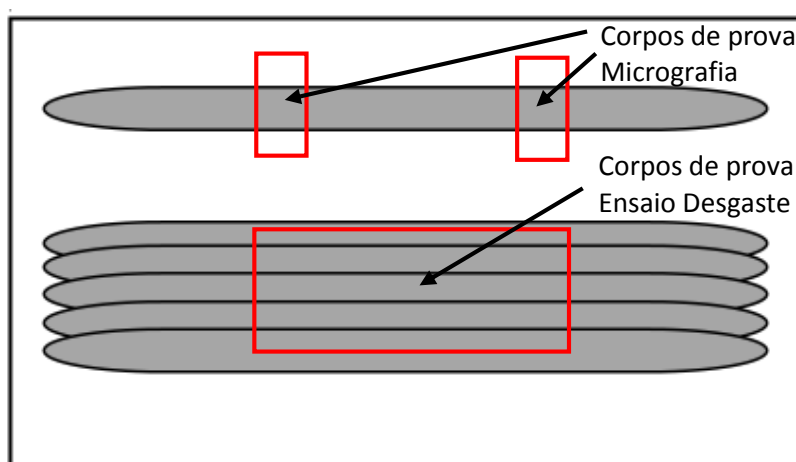
Após uma avaliação visual das características como largura, penetração, reforço, presença de discontinuidades e geração de respingos, realizou-se uma pré-seleção dos parâmetros que apresentaram melhores resultados, escolhidos mediante análise das características geométricas (largura, penetração, reforço, área fundida, área de reforço e diluição) e selecionado o parâmetro de soldagem que mais se aproximou das características desejadas nos revestimentos (baixa diluição, baixa penetração, maior largura e maior reforço).

Na segunda etapa, efetuou-se a soldagem dos cordões e dos revestimentos

nas amostras de VC131 utilizando as condições de consumíveis e os parâmetros de soldagem encontrados nas fases anteriores. Foi utilizado uma base metálica que serviu de suporte para fixação das chapas, essa fixação foi efetuada por meio de alicates de pressão instalados na borda das chapas de modo que não interferissem na deposição dos revestimentos de solda, com o objetivo de evitar que as chapas se movimentassem durante o processo de soldagem e minimizar o efeito das tensões do material, como o empenamento, além de dissipar parte do calor gerado pela soldagem. Os cordões foram depositados com o objetivo de determinar a dureza, a morfologia e a diluição dos cordões em função da energia de soldagem.

No processo de deposição dos cordões e revestimentos foram utilizados três tipos de arame e dois tipos de transferência metálica (spray e globular) para cada tipo de arame, também foram efetuadas três repetições para cada experimento, o que totalizou 18 corpos de prova. O depósito dos cordões foram efetuados em um único cordão próximo a borda da chapa para análise da geometria do cordão, deixou-se um espaço de 20 mm, então, aplicou-se os cordões subsequentes de modo a formar um revestimento sobre o metal de base, conforme Figura 16. Os cordões foram sobrepostos lateralmente, aproximadamente 40% sobre uma das laterais do cordão anterior.

Figura 16 – Representação esquemática da deposição dos revestimentos e região de retirada dos corpos de prova da secção transversal dos cordões de solda.



Fonte: Autor (2016)

Em seguida, prosseguiu-se com a preparação das amostras para ensaios de Micrografia e Desgaste, que consistiu na retirada de Corpos de Prova das chapas revestidas por meio de corte a fio. Afim de avaliar a geometria do cordão, dureza, resistência ao desgaste e microestrutura dos revestimentos, foram confeccionados corpos de prova a partir dos parâmetros descritos na Figura 16.

Depois de cortadas as amostras, foi efetuada a identificação dos corpos de prova do Ensaio de Desgaste de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 – Identificação dos corpos de prova.

<b>Condição de deposição(x3)</b>	<b>Energia</b>	<b>Tipo de Arame</b>	<b>Tipo de Transferência</b>
<b>A 60</b>	Alta	LEDURIT 60	Spray
<b>A 68</b>	Alta	LEDURIT 68	Spray
<b>A 70</b>	Alta	LEDURIT 70	Spray
<b>B 60</b>	Baixa	LEDURIT 60	Globular
<b>B 68</b>	Baixa	LEDURIT 68	Globular
<b>B 70</b>	Baixa	LEDURIT 70	Globular

Fonte: Autor (2016)

Após a identificação, os corpos de prova do Ensaio de Desgaste tiveram as superfícies retificadas em retifica plana, de modo a obter uma superfície plana na região a ser desgastada.

Em seguida, realizou-se o ensaio de desgaste com Abrasômetro de Roda de Borracha. Os parâmetros de ensaios seguiram o procedimento B da Norma ASTM G65-00, que consiste na aplicação de desgaste em 10 minutos, com rotação de 200 rpm, carga de 130 N e areia Normal Brasileira nº 100 (0,15). O desgaste foi avaliado em função da perda de massa dos corpos de prova pela comparação entre a massa antes e após o ensaio, através da pesagem em balança eletrônica com resolução de 0,1mg. Antes da pesagem, as amostras foram cuidadosamente limpas. Depois, foi realizada a análise da resistência ao desgaste, avaliação da dureza dos revestimentos e análise micro estrutural dos revestimentos.

### 3.2.1 Micrografia

O objetivo da micrografia é verificar a presença de trincas e micro trincas nas estruturas avaliadas e visualizar a microestrutura predominante das amostras, assim como mostrar a diferença de tamanhos de grão entre diferentes regiões da solda e da chapa nos locais dos revestimentos. Para efetuar os ensaios de micrografia foram cortadas amostras dos corpos de prova na seção do revestimento de solda (Figura 16). Em seguida, com o objetivo de obter uma superfície suficientemente lisa, efetuou-se uma série de operações para polir a superfície de modo a observar a peça ao microscópio sem riscos. Para efetuar o polimento, as amostras foram primeiramente etiquetadas e, em seguida, embutidas em resina fenólica transparente, conforme Figura 17.

Figura 17 – Amostras identificadas e embutidas em resina.



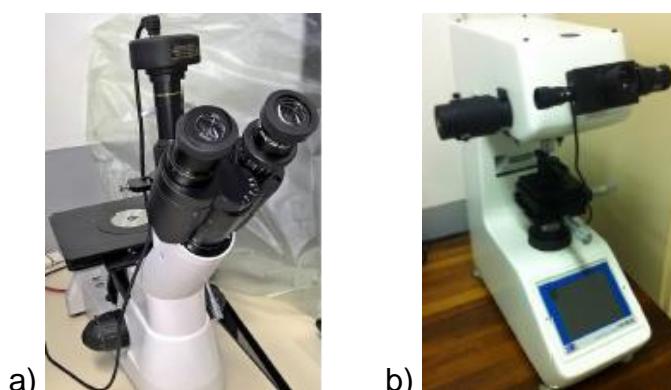
Fonte: Autor (2016)

A etapa seguinte foi realizado o polimento manual das amostras, que inicia pelo lixamento utilizando uma politriz lixadeira metalográfica equipada com lixas de granulometria 180, 320, 400, 600 e 1200, respectivamente, seguido de limpeza com álcool e secagem com ar quente. Após o processo de lixamento, as amostras foram polidas com alumina 2  $\mu\text{m}$ , em seguida lavadas em água, limpas com álcool e secas com ar quente. Após, as seções dos revestimentos soldados foram atacadas com reativo de Vilella por 4 segundos, limpas e secas novamente. Vilella é reativo para micrografia de aços ao manganês e aços-liga com alto teor de cromo, tem o objetivo de revelar a área da seção do cordão.

Em seguida, realizou-se a visualização microscópica da amostra, onde se

observou a microestrutura em microscópio óptico fazendo uma análise detalhada da região do cordão de solda. Em relação às imagens, a amostra foi focada de modo a visualizar os detalhes da microestrutura, geralmente amplia-se para resolução de 400x seguida de 1000x. Para avaliar os corpos de prova utilizou-se um microscópio óptico mostrado na Figura 18 (a).

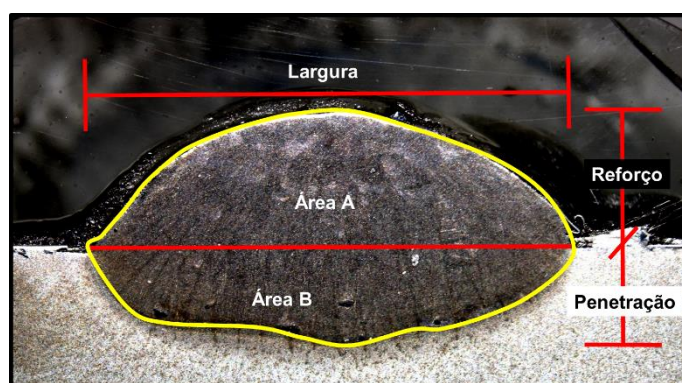
Figura 18 – Microscópio óptico e durômetro.



Fonte: Laboratório IFSC Campus Jaraguá do Sul – Rau (2016)

Para a análise das imagens, utilizou-se o software IMAGE-PRO PLUS. Foram medidas as áreas de penetração e de reforço, como apresentado na Figura 19. Através da relação dos valores das áreas foi possível calcular o percentual de diluição do cordão de solda, conforme Equação 2.

Figura 19 – Dados obtidos através da análise de imagem no software IMAGE-PRO PLUS.

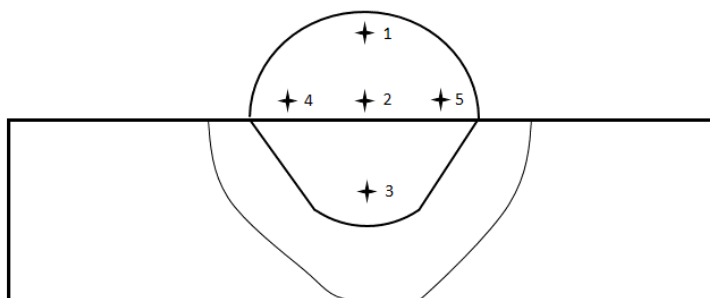


Fonte: O autor (2016)

### 3.2.2 Microdureza

A avaliação da microdureza foi realizada com o auxílio do equipamento de microdureza modelo FM – 800 conforme Figura 18 (b). Foram realizados 5 pontos de medições na seção transversal do cordão, seguindo a sequência mostrada na Figura 20. A carga utilizada para o ensaio foi de 300 g durante 10 segundos, apresentando os resultados finais em HV (Microdureza Vickers), sendo convertidos automaticamente pelo equipamento para HRc (Dureza Rockwell C).

Figura 20 – Esquema realização do ensaio de microdureza.



Fonte: O autor (2016)

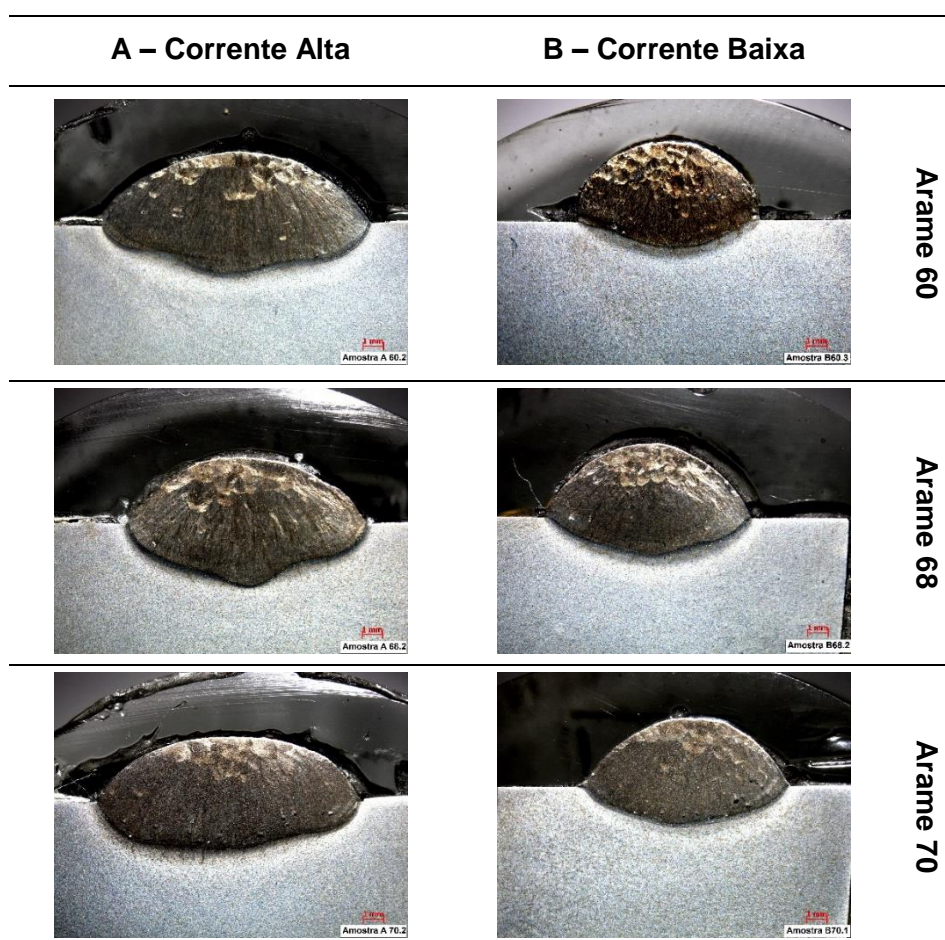
## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados de morfologia, diluição, microestrutura e dureza dos cordões e dos revestimentos depositados por soldagem.

### 4.1 Morfologia dos cordões de solda

A Figura 21 apresenta as macrografias das seções transversais dos cordões de solda depositados, ilustrando o efeito da variação de intensidade de corrente de soldagem (Alta e Baixa) e as diferentes ligas de FeCrC.

Figura 21 – Seção transversal dos cordões.

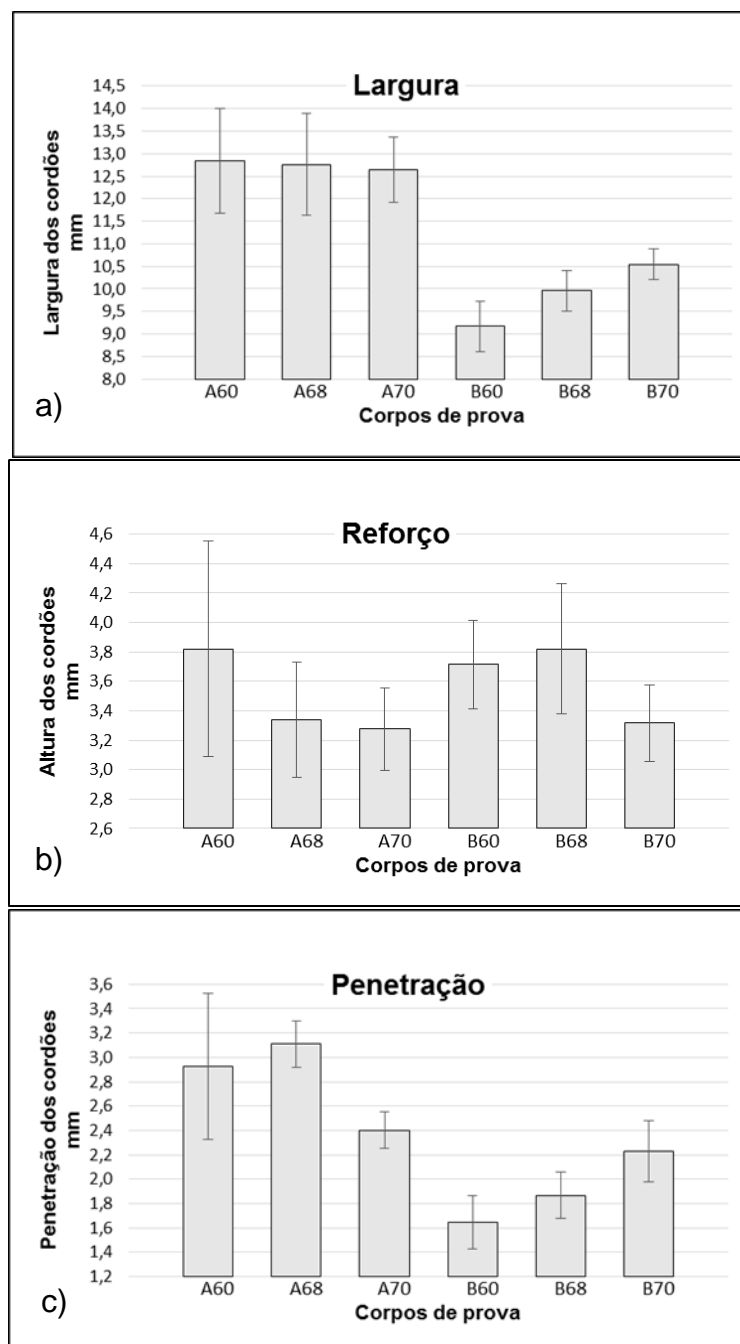


Fonte: O autor (2017)

As macrografias da Figura 21 foram analisadas no software IPWIN 32,

permitindo a quantificação das características morfológicas dos cordões, sendo estas, largura (L), reforço (R) e penetração (P) dos cordões. A Figura 22 apresenta os valores obtidos, em forma gráfica, para as características analisadas.

Figura 22 – Valores de Largura (a), Reforço (b) e Penetração (c).



Fonte: O autor (2017)

Da análise da Figura 21 e 22 verifica-se que a energia de soldagem influenciou significativamente a morfologia dos cordões de solda. Nota-se que a largura dos cordões depositados com alta energia de soldagem (A) para o arame 60 foi 40% maior

que os depositados com baixa energia (B). Para o arame 68, foi de 28% maior que os depositados com baixa energia. Para o arame 70, foi de 20% maior que os depositados com baixa energia. O efeito do tipo de liga não foi influente no valor da largura.

Em relação ao reforço dos cordões, a energia de soldagem não influenciou significativamente, já que houve pouca ou, dependendo do arame, quase nenhuma variação de alta para baixa energia, permanecendo dentro da faixa de desvio padrão.

Os valores de penetração também foram influenciados em alta energia. Para os arames 60 e 68, houve um aumento de 77,9% e 66,5%, respectivamente, em relação aos depositados em baixa energia. O arame 70 não sofreu influência, pois os valores de penetração encontrados foram semelhantes para cordões depositados tanto em alta (A) como em baixa (B) energia de soldagem.

Ribeiro (2004), em seus experimentos, também constatou que o aumento da corrente de soldagem resulta em um aumento da perda de volume devido ao aumento na diluição, o que propicia a formação de microestruturas com baixa fração volumétrica de carbonetos.

#### 4.1.1 Diluição dos cordões

A Tabela 11 apresenta valores das áreas de reforço (A) e de penetração (B) dos cordões de solda e o percentual de diluição resultante.

Tabela 11 – Valores de percentual de diluição dos cordões de solda.

<b>Diluição[%]</b>			
<b>CP</b>	<b>Área A(mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área B(mm<sup>2</sup>)</b>	<b>% Diluição</b>
<b>A60</b>	37,3	24,3	39,5
<b>A68</b>	35,3	26,3	43,1
<b>A70</b>	31,2	22,5	41,9
<b>B60</b>	26,3	8,7	25,1
<b>B68</b>	27,9	12,0	30,3
<b>B70</b>	25,2	15,4	37,9

Fonte: O autor (2017)

Pelos resultados apresentados na Tabela 11, verifica-se que a energia de soldagem influenciou de modo significativo os cordões depositados.

Nota-se que a diluição dos cordões depositados com alta energia de soldagem para o arame 60, foi de aproximadamente 14,4% a mais do que o depositado com baixa energia.

Para o arame 68 em alta corrente a diferença foi de 12,8% a mais do que para o depositado em baixa corrente.

Para o arame 70, a diferença de alta para baixa energia caiu apenas 4%. Segundo resultados obtidos por Oliveira, Gallego e Ventrella (2014) a taxa de diluição influencia diretamente na microestrutura do revestimento duro. Além disso, as camadas que apresentaram formação de carbonetos primários obtiveram desempenho melhor aos que apresentaram carbonetos secundários sob baixa tensão de ensaio abrasivo.

#### 4.1.2 Dureza dos cordões de solda

A Tabela 12 apresenta os resultados médios de Dureza HRc e desvio padrão (Dp) na superfície dos cordões de solda para as amostras depositadas, variando as condições de corrente de soldagem e tipo de consumíveis. Conforme a norma UTP (2011), a dureza dos revestimentos deve ficar entre 57 – 62HRc para o consumível **60**, de 63 – 65HRc para o consumível **68** e, de 65 – 70HRc, para o consumível **70**.

Tabela 12 – Dureza média dos cordões.

<b>Dureza HRc</b>		
<b>CP</b>	<b>Média dureza HRc</b>	<b>D.p.</b>
<b>A 60</b>	55,9	3,6
<b>A 68</b>	59,0	2,8
<b>A 70</b>	62,2	3,6
<b>B 60</b>	57,3	3,2
<b>B 68</b>	62,8	2,5
<b>B 70</b>	62,6	2,4

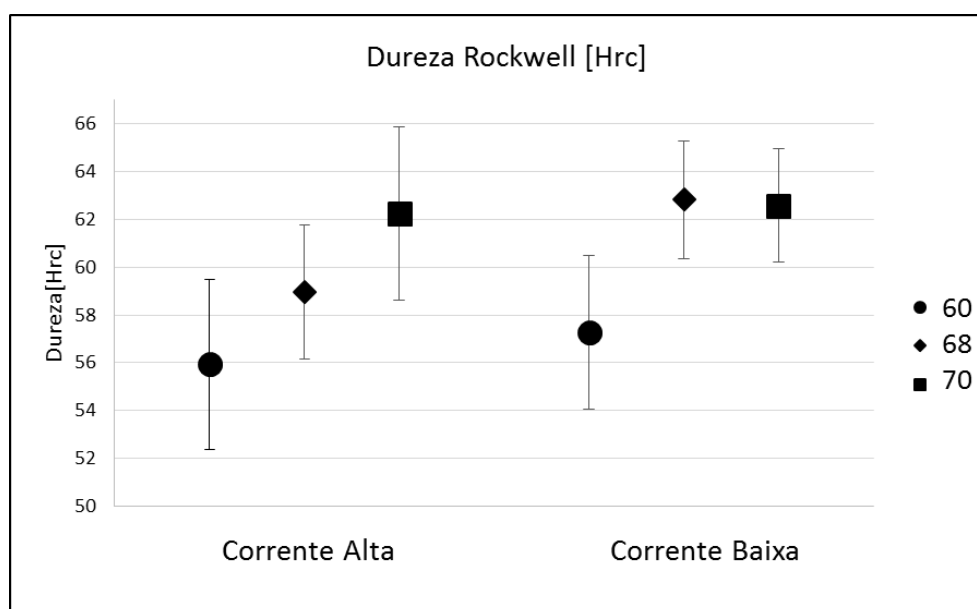
Fonte: O autor (2017)

Conforme a Tabela 12, a menor dureza encontrada foi de aproximadamente 55,9 HRc para o CP A60 e a maior dureza foi 62,8 HRc para o CP B68. A dureza depende de vários fatores como velocidade de resfriamento, temperatura entre passes, pré-aquecimento entre outros. Então pode-se dizer que é possível obter uma faixa de valores diferentes de dureza para um mesmo material. No geral se considerarmos o desvio padrão das amostras a dureza ficou bem próxima da recomendada pela norma UTP (2011).

#### 4.1.3 Efeito da energia de soldagem

A Figura 23, ilustra em representação gráfica, os resultados de dureza HRc dos cordões encontrados na tabela 12, em relação ao efeito da variação de corrente e tensão aplicada.

Figura 23 – Valores médios de dureza dos cordões x Intensidade de energia.



Fonte: Autor (2017)

Analisando a Figura 23, verifica-se que a energia de soldagem não influenciou a dureza em todas as condições de deposição dos revestimentos. De uma forma geral, o aumento da energia de soldagem proporcionou uma diminuição do percentual

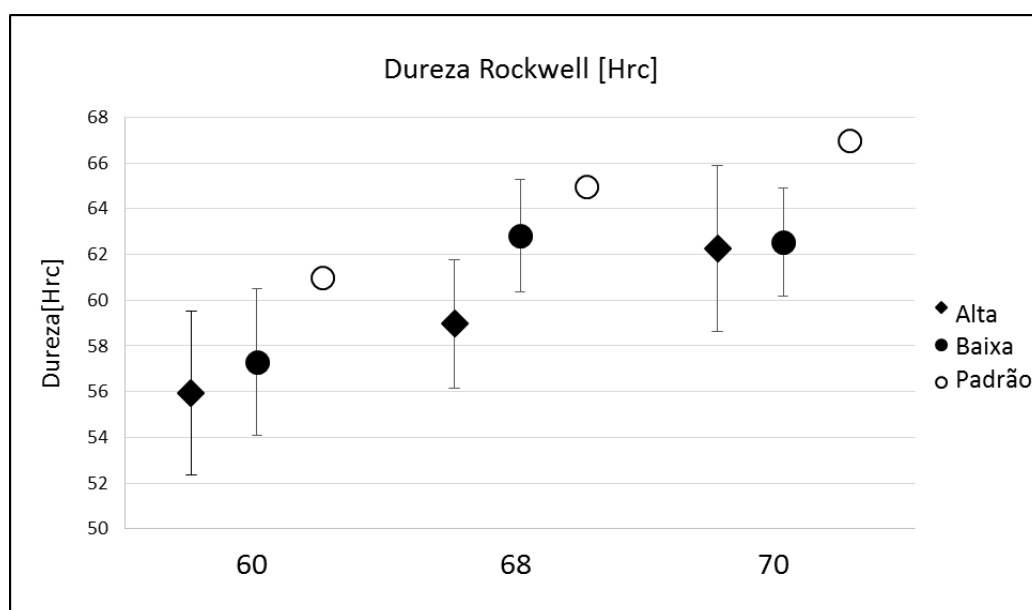
de dureza média em todas as condições.

As condições A60 e B60 obtiveram média de 55,9 e 57,2 HRc, respectivamente, para as condições A70 e B70 praticamente se manteve o mesmo patamar, com dureza média de 62,2 e 62,6 HRc. Já para a condição A68 e B68, houve um aumento mais significativo de dureza com uso de baixa energia em relação as demais, de 59 HRc em média para 62,8 HRc, como observado na Figura 23. Portanto, as amostras A68 e B68 apresentaram aumento de aproximadamente de 6,5% na dureza, contra 2,4% das amostras A60 e B60 e 0,5% das amostras A70 e B70. Porém, considerando o desvio padrão, as diferenças não foram significativas.

#### 4.1.4 Efeito do tipo de arame

Embora tenha sido observada pouca influência da variação na intensidade da corrente sobre a dureza dos cordões, nota-se que, em baixa energia, os arames 60 e 68 se aproximaram mais do valor médio especificado pelo fabricante. Para o arame 70, quase não houve variação significativa em relação a intensidade de corrente aplicada, no entanto, estava abaixo dos valores de referência, como pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Valores médios de dureza x Tipo de arame.

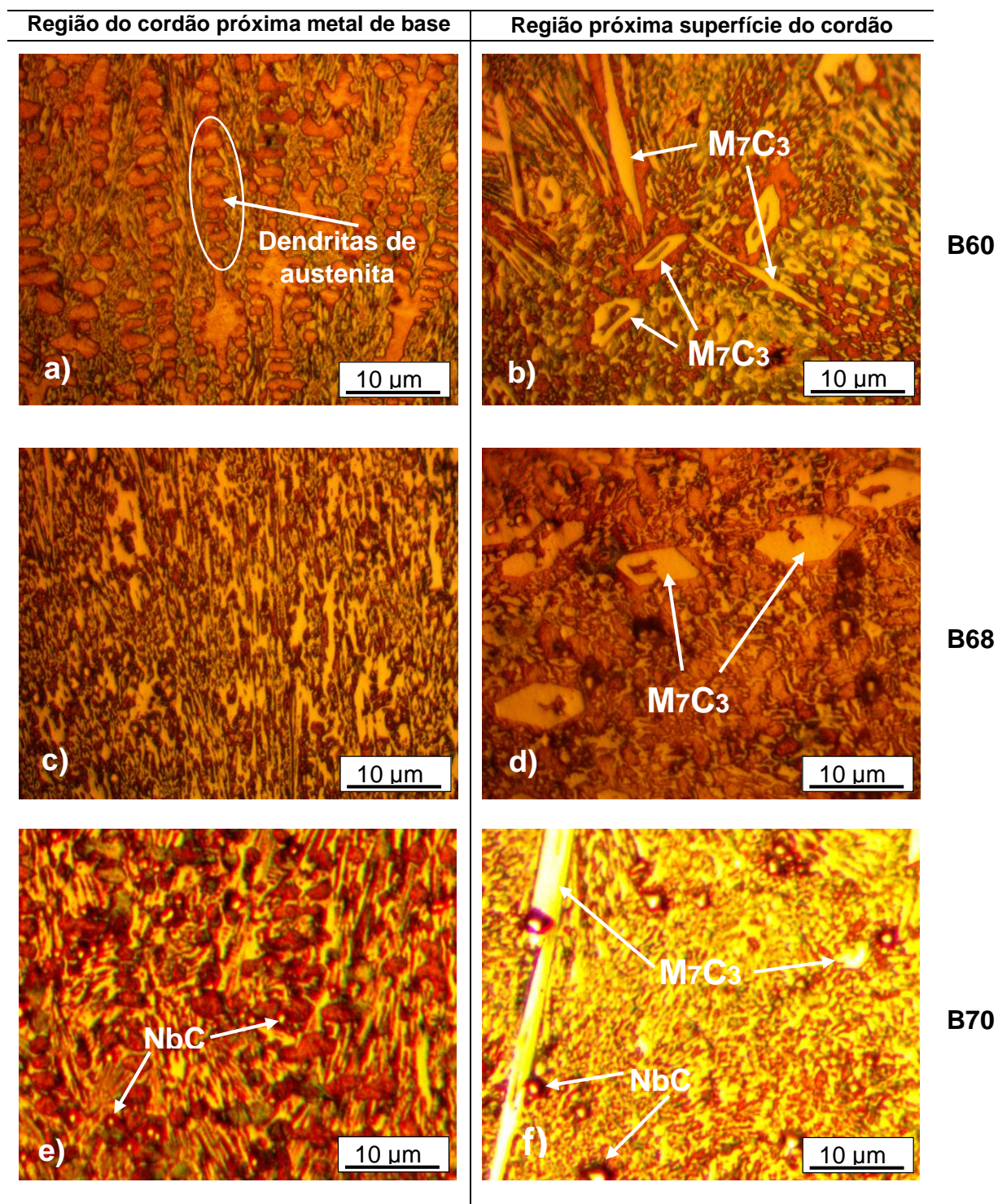


Fonte: Autor (2017)

## 4.1.5 Microestrutura dos cordões

A seguir a visualização da microestrutura dos 3 tipos diferentes de consumíveis depositados com baixa energia de soldagem. A Figura 25 ilustra a microestrutura obtida por microscopia óptica após ataque com o reagente Vilella por 4 segundos.

Figura 25 – Microestrutura dos cordões Baixa energia.



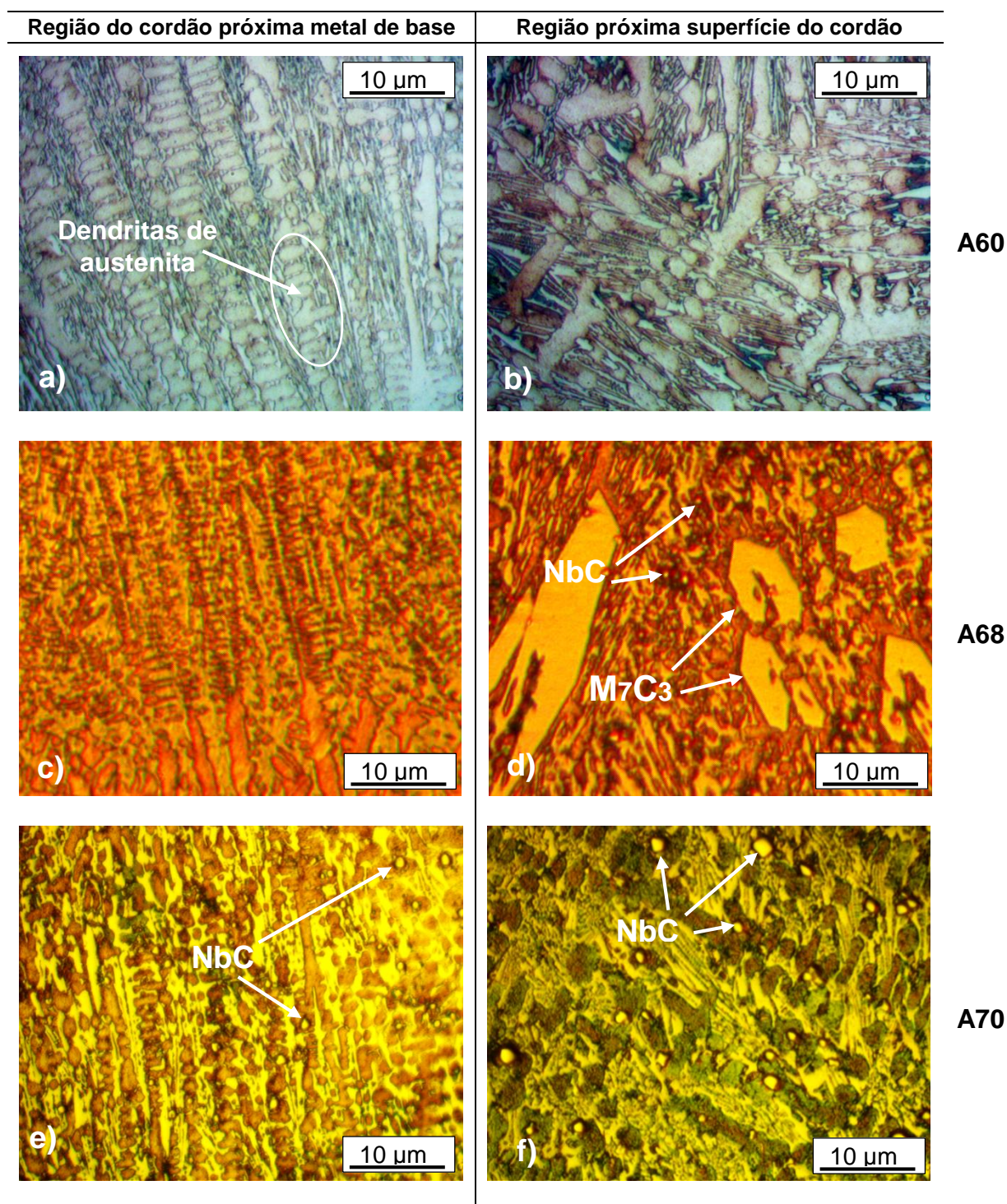
Analisando as microestruturas a baixa energia, observa-se que próximo à interface com o metal de base (Figura 25a), o arame 60 (FeCrC) apresentou uma microestrutura com crescimento dendrítico. Nas regiões mais próximas à superfície do cordão de solda (Figura 25b), se observam carbonetos primários ( $M_7C_3$ ), imersos em matriz eutética (austenita mais carbonetos).

A microestrutura do arame 68 (FeCrC+Nb) é apresentada na Figura 25c e 25d, mostrando uma microestrutura predominantemente eutética, na região próxima à interface com o metal de base. A Figura 25d mostra carbonetos primários ( $M_7C_3$ ) na região próxima à superfície, uma formação que se assemelha ao arame 60 mas, observa-se também a presença em todo o volume do cordão de pequenos carbonetos de nióbio distribuídos na matriz.

O Arame 70 (FeCrC+NbW) tem sua microestrutura apresentada na Figura 25e, 25f, onde pode-se verificar uma maior quantidade de carbonetos de nióbio que o arame anterior, com carbonetos primários ( $M_7C_3$ ) imersos em matriz eutética lamelar formada por  $Cr_7C_3$  secundários (região clara), austenita e martensita (regiões escuras). Segundo Lima e Ferraresi (2009), a microestrutura das ligas FeCrC sofre pouca alteração com a adição de outros elementos de liga, como Nb, W, Ti, M, utilizados para estabilizar, refinar e enrijecer as ligas.

A seguir pode-se visualizar a microestrutura dos 3 tipos diferentes de consumíveis depositados com alta energia de soldagem, a Figura 26 ilustra a microestrutura obtida.

Figura 26 – Microestrutura dos cordões Alta energia.



Fonte: Autor (2017)

A análise da microestrutura dos cordões de solda em alta energia é apresentada na Figura 26. Na Figura 26(a) observa-se na região do cordão próximo ao substrato, um crescimento dendrítico da austenita em direção ao centro do cordão

depositado, caracterizado pela coloração alaranjada, semelhante ao observado nas micrografias anteriores. Intercalada a ramificação dendrítica, encontra-se a matriz eutética lamelar formada por  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  secundários (região mais clara), austenita e martensita (regiões escuras). Na Figura 26(d) são mostrados os  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , com coloração mais clara, que apresentam geometria poligonal, também nas Figuras 26(d), (e) e (f) apresenta-se os carbonetos de nióbio ( $\text{NbC}$ ) distribuídos uniformemente na matriz.

De maneira geral, os 3 diferentes arames apresentaram morfologia semelhante independente da corrente utilizada, com exceção do arame 60 que, em baixa energia, apresentou precipitação de carbonetos  $\text{M}_7\text{C}_3$  massivos. Hernandez (1997) afirma que ligas do sistema  $\text{FeCrC}+\text{Nb}$  apresentam basicamente o mesmo tipo de microestrutura de ligas que contém apenas  $\text{FeCrC}$ , dendritas de austenita com carbonetos  $\text{M}_7\text{C}_3$  massivos e também com presença de carbonetos  $\text{NbC}$ , na forma primária e secundária. Fato também observado neste trabalho.

## 4.2 Revestimentos

### 4.2.1 Perda de massa dos revestimentos

Os resultados do desgaste abrasivo foram obtidos através da medição da perda de massa dos corpos de prova, após o ensaio no abrasômetro do tipo Roda de Borracha, para as amostras de revestimento depositadas variando o tipo de transferência metálica e 3 diferentes ligas. A Tabela 13 apresenta os valores de perda de massa.

Tabela 13 – Resultados do desgaste abrasivo.

<b>Perda de Massa [mg]</b>		
<b>C.P.</b>	<b>P. M. Media</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>A60</b>	174,21	26,30
<b>A68</b>	35,17	6,23
<b>A70</b>	44,19	5,10
<b>B60</b>	134,73	5,98
<b>B68</b>	44,51	5,25
<b>B70</b>	49,27	3,09

Fonte: O autor (2017)

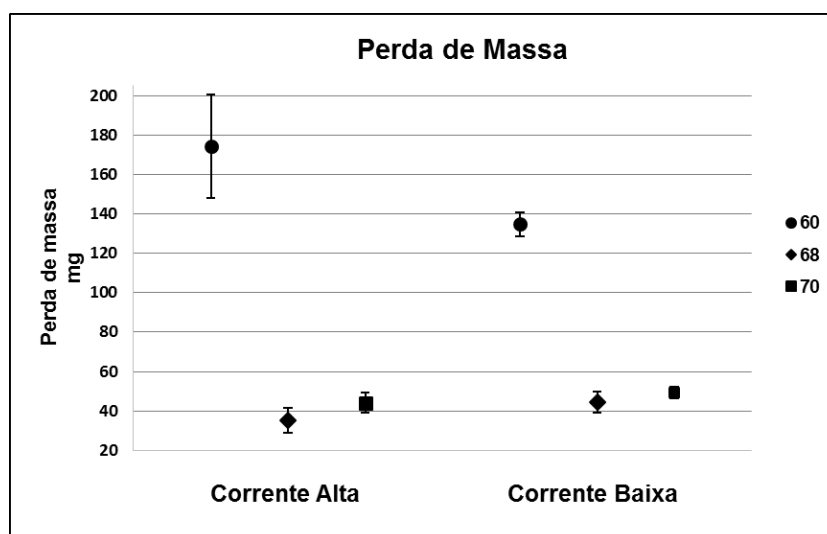
Pode-se verificar, na Tabela 13, uma variação da resistência ao desgaste entre as ligas tanto para o modo de transferência metálica com alta corrente, quanto para baixa corrente. Sendo que, na média geral, a liga 68 na condição de alta corrente obteve menos desgaste.

#### 4.2.2 Efeito da corrente de soldagem

A Figura 27 demonstra a variação de massa em relação a intensidade de corrente de soldagem utilizada.

Analisando a Figura 27, pode-se visualizar a variação de massa em relação às condições de soldagem. Percebe-se que com a variação da intensidade de corrente elétrica alta ou baixa, houve variação significativa somente para o arame 60. Devido a menor diluição apresentada pela amostra soldada com corrente baixa, esta teve uma perda de massa inferior em relação à corrente alta. Segundo Bálsamo, Scotti e De Mello (1995), nas ligas soldadas com menor aporte térmico, tanto os carbonetos  $M_7C_3$  quanto as dendritas de austenita apresentam maior refino de grão, devido à maior velocidade de resfriamento, o que justifica a menor perda de massa do arame 60 em baixa energia.

Figura 27 – Representação gráfica do desgaste abrasivo x intensidade de corrente.



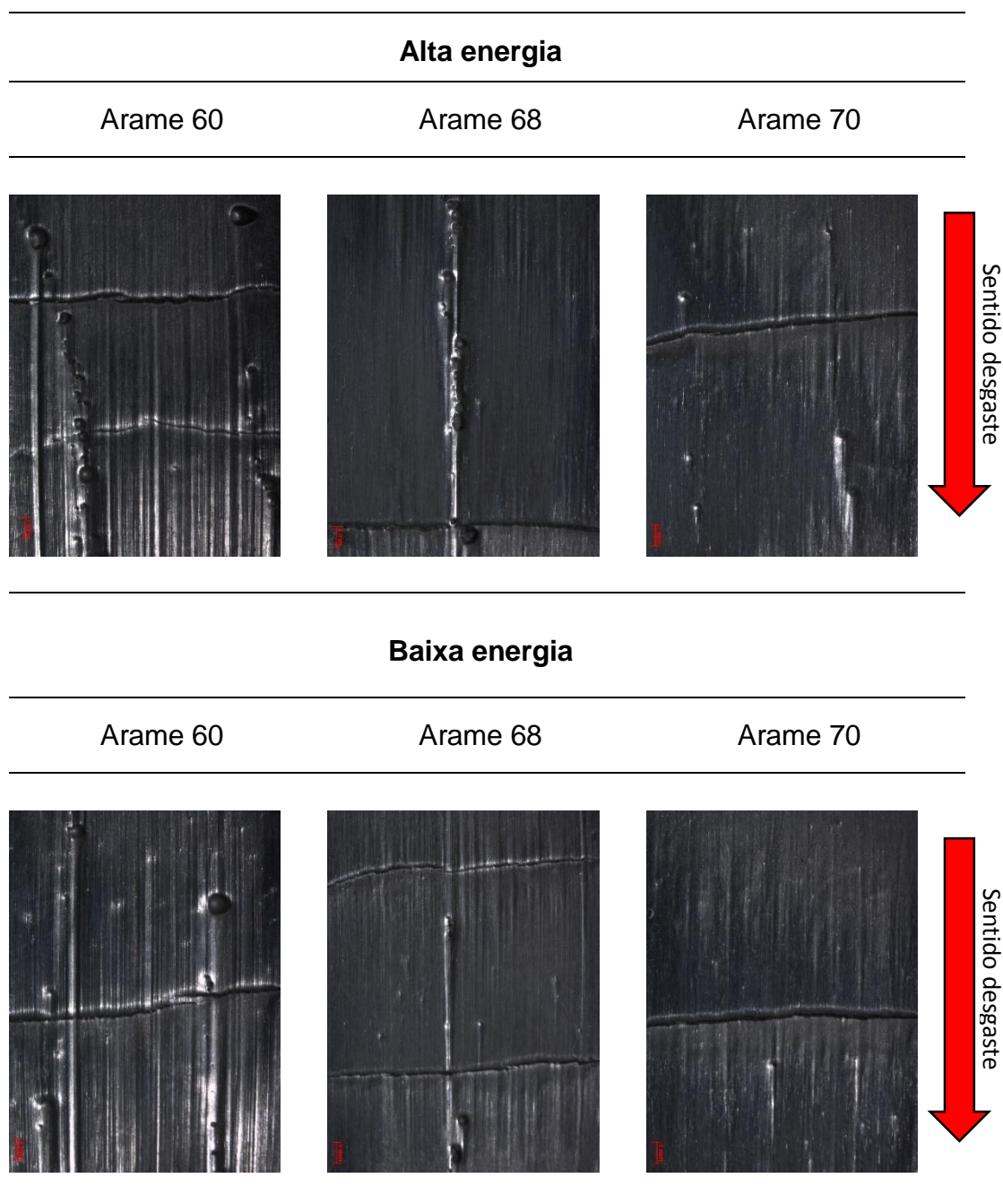
Fonte: O autor (2017)

Além disto, o arame 60 (FeCrC) também apresentou menor resistência ao desgaste abrasivo por roda de borracha em relação as demais ligas, independentemente da intensidade de corrente de soldagem utilizada, comportamento explicado pela microestrutura e dureza reduzida.

O arame 68 (FeCrC+Nb) obteve o melhor resultado em relação as outras duas ligas, tanto em alta quanto em baixa corrente, fato que pode estar relacionado com a percentagem em peso de Nb, já que somente as ligas 68 e 70 tem o elemento Nb 3,05% e 5,5%, respectivamente, em sua composição. Apesar do arame 70 apresentar um alto teor Mo W Nb e V, este último teve desempenho um pouco inferior. Wainer, Brandi e De Mello (1992) afirmam que, nas ligas metálicas, o valor de dureza pode aumentar até certo ponto, a partir daí a resistência ao desgaste cresce com menor intensidade, podendo até diminuir.

Na Figura 28 podem ser observadas imagens da seção desgastada durante o ensaio de desgaste em Roda de Borracha. As superfícies da região desgastada foram analisadas em microscópio óptico com aumento de 6,5 vezes. A seta indica o sentido de deslizamento da roda de borracha sobre a superfície do corpo de prova.

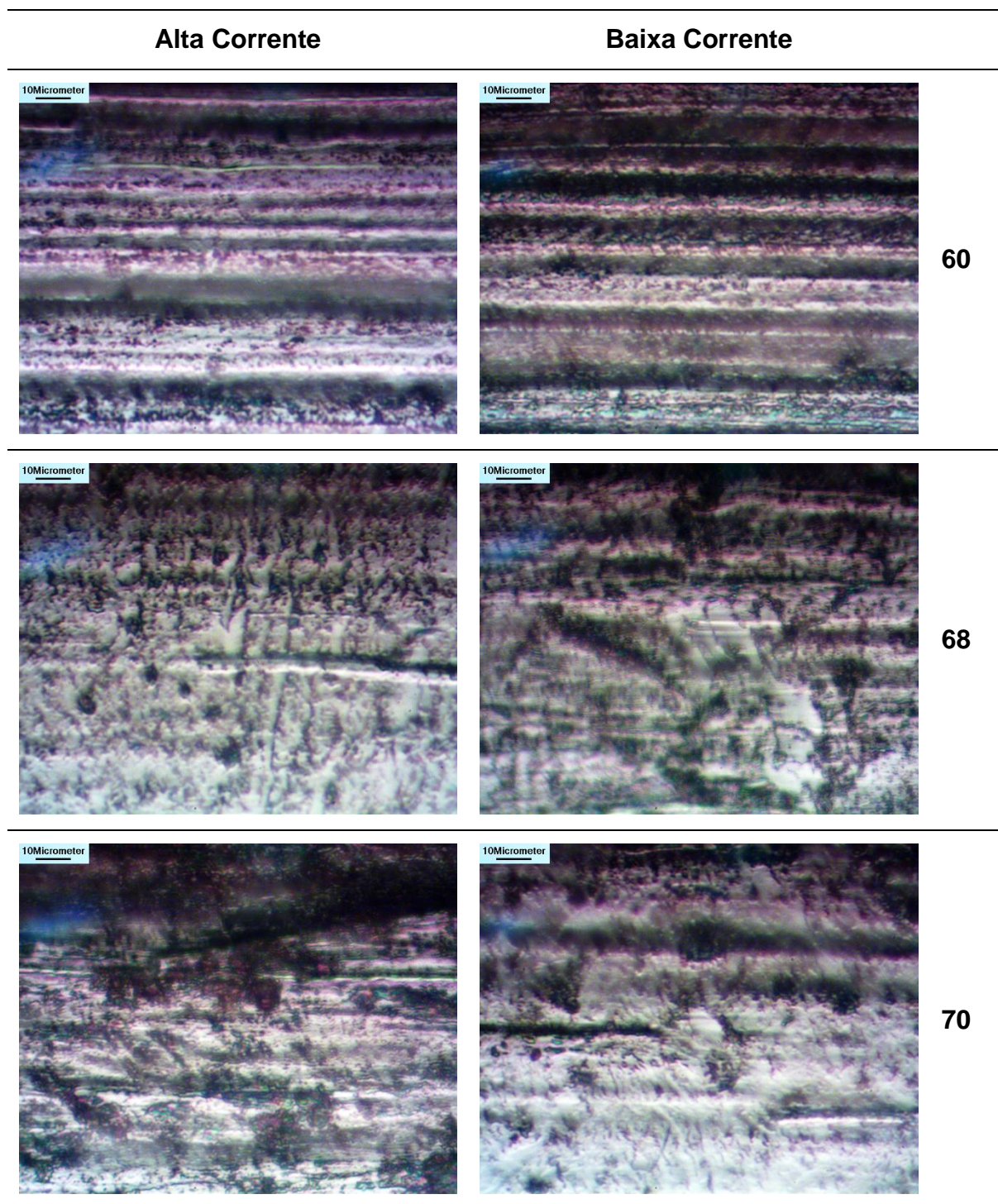
Figura 28 – Macrografia da seção desgastada.



Fonte: O autor (2017)

Todas as amostras depositadas apresentaram trincas na camada de revestimento (Fig.28), essas trincas contribuíram para perda de massa devido a degradação das bordas das trincas, comportamento similar ao encontrado por Colaço (2013) e Lima e Ferraresi (2009), onde afirmam que as trincas intervêm diretamente na perda de massa, devido à propagação de microtrincas paralelas às trincas oriundas da solidificação.

Figura 29 – Ampliação da região desgastada do ensaio.



Fonte: O autor (2017)

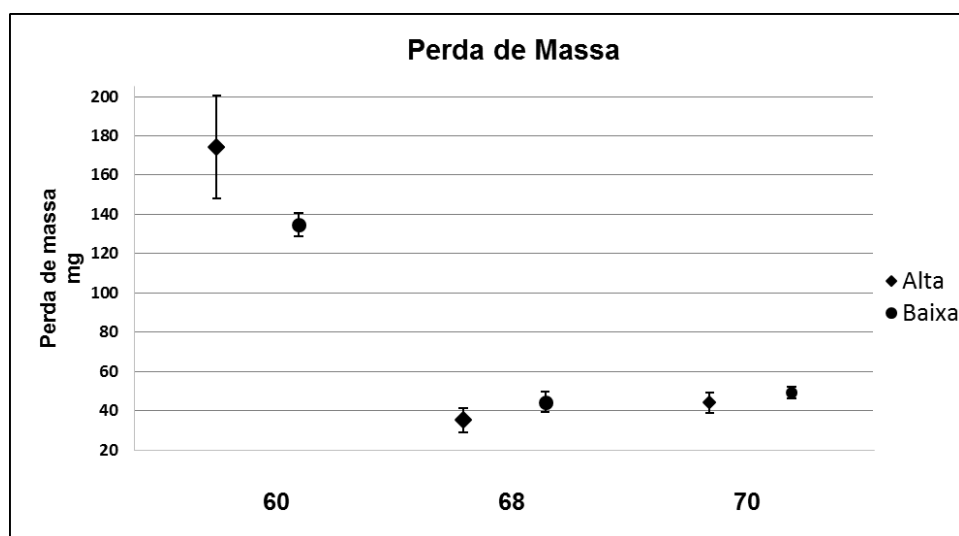
Os revestimentos também apresentaram porosidades dispersas ao longo do revestimento, sendo em maior número para o arame 60 (FeCrC), condição que acabou contribuindo no aumento do desgaste deste arame, principalmente na região de saída do abrasivo. As superfícies de desgaste foram observadas em microscópio óptico com

aumento de 1000 vezes para uma análise mais detalhada dessa região, conforme é apresentado na Figura 29. Observa-se na Figura 29 a predominância de microcorte e microsulcamento para os revestimentos com todos os 3 consumíveis utilizados. Para o arame 60, os sulcos provocados pela penetração das partículas abrasivas foram mais profundos em relação as demais ligas, já para o arames 68 e 70 notou-se a presença de riscamento mais fino. Zum Ghar (1998) afirma que a diferença na rugosidade de amostras submetidas às mesmas condições de ensaios de desgaste se deve a diferentes microestruturas das amostras de cada consumível.

#### 4.2.3 Efeito do tipo de arame

Na Figura 30 pode-se comparar o desgaste abrasivo em relação ao tipo de consumível utilizado nas deposições.

Figura 30 – Representação gráfica do desgaste abrasivo x tipo de consumível.



Fonte: O autor (2017)

Com relação à variação entre os 3 tipos de consumíveis, a variação mais significativa foi para o arame 60, que apresentou menor resistência ao desgaste abrasivo por Roda de Borracha, independentemente da variação de intensidade da energia de soldagem. Essa menor efetividade quanto ao desgaste abrasivo pode estar correlacionada à configuração da microestrutura, ou seja, foram observadas colônias distintas de possíveis  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , distribuídos de forma desordenada na seção transversal do cordão (Figura 26b).

## 5 CONCLUSÕES

A liga 68 contendo FeCrC+Nb apresentou em média a maior resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão nos depósitos realizados, seguida da liga 70 (FeCrC+NbW) que também obteve um excelente resultado ficando no mesmo patamar da liga 68, se considerado o desvio padrão entre as amostras. Já para a liga 60 (FeCrC), percebeu-se um desgaste maior em relação às duas primeiras ligas.

Concluiu-se, que a liga 68 é a mais adequada para revestimento de aço de alta resistência submetidos à desgaste abrasivo dentre os arames utilizados neste experimento.

Todos os arames utilizados nas deposições deste experimento apresentaram trincas perpendiculares ao cordão, independentemente da condição de energia utilizada.

Em relação a influência da variação na intensidade de corrente sobre a dureza dos cordões, concluiu-se que em baixa corrente, os arames 60 e 68 alcançaram níveis maiores de dureza, para o arame 70 não houve variação significativa.

Observou-se nas superfícies desgastadas a presença de microcorte e microsulcamento em todos os revestimentos utilizados. No arame 60 ficou mais evidente a predominância do microsulcamento com sulcos mais profundos, já para os revestimentos 68 e 70 observou-se tanto microcorte quanto microsulcamento.

O arame 60 (FeCrC) proporcionou revestimentos com microestrutura formada por dendritas de austenita com eutética interdendrítica, e a menor dureza e resistência ao desgaste.

Os arames 68 (FeCrC+Nb) e 70 (FeCrC+NbW) proporcionaram revestimentos com microestruturas formadas por carbonetos de Cr primários M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e NbC em matriz eutética, apresentando maior dureza média do depósito e maior resistência ao desgaste.

## 6 BIBLIOGRAFIA

ASTM – American Standard for Testing Materials. G40-01 – Standard Terminology Relating to Wear and Erosion. Annual Book of Standards Volume 03.02: Wear and Erosion; Metal Corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

ASTM – American Standard for Testing Materials. G65-00e1 – Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Annual Book of Standards Volume 03.02: Wear and Erosion; Metal Corrosion. Philadelphia, USA, 2001.

AWS – **American Welding Society, Welding Handbook**, 8th edition, Volume 2: Flux Cored Arc Welding., AWS, p.158. 1991.

AWS – **American Welding Society, Welding Handbook**, 8th ed. New York. 1997.

BÁLSAMO, P.S.S.; SCOTTI, A.; DE MELLO, J.D.B, Interpretación de la microestructura de Recargues Duros Depositados por Soldadura Utilizando la Superfície de Líquidos de Diagramas Fe-Cr-C. **Rev. Soldadura**, 25 (4), CENIN, Madrid, p. 199-207, 1995.

BAYER, G. Raymond. **Mechanical Wear Fundamentals and Testing**. 2. Ed. USA, 399p. 2004.

BÖHLER – <<http://www.voestalpine.com/welding/br/Servicos/Downloads>>. Acesso em: 06 Jun. 2015.

BRACARENSE, ALEXANDRE Q. **Processo de soldagem por Arame Tubular – FCAW**, Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

BUCHELY, M. F., *et al.* **The effect of microstructure on abrasive wear of hardfacing alloys**. In: Tribology International. V259, p.52-61, 2005.

CHANG, Chia-Ming; LIN, Chi-Ming; HSIEH, Chih-Chun; CHEN, Jie-Hao; Fan, Chih-Ming; WU, Weite; Effect of Carbon Content on Microstructural Characteristic of the Hypereutectic Fe-Cr-C Cladding's. **Materials Chemistry and Physics**. v. 117, p. 257-261, 2009.

COLAÇO, Fernando Henrique Gruber; MARANHO, Ossimar. **Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti**. Consolda, Curitiba, p.1-12, 28 Nov. 2013. Anual.

DAVIS, J.R., Davis & Associates. Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance. **ASM International**, USA. 319 p. 2001.

ESAB. **Apostila de Arco Submerso**. 2004. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1\\_apostilaarco\\_submerso.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1_apostilaarco_submerso.pdf)>. Acesso em: 06 Jun. 2016.

ESAB. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. 2005. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1\\_apostilaeletrodosrevestidos\\_ok.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf)>. Acesso em: 06 Jun. 2016. ESAB. **Catálogo de Arames Tubulares**.

ESAB. **Catálogo de Arames Tubulares**. ESAB – 2011. Disponível em: <[Http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/tubulares/upload/1900280-rev-20\\_CatalogoSoldagemcomAramesTubulares\\_pt.pdf](Http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/consumiveis/tubulares/upload/1900280-rev-20_CatalogoSoldagemcomAramesTubulares_pt.pdf)> Acesso em: 09 Out. 2016.

EYRE, T. S. **Friction and Wear Mechanisms**. ABM. II Seminário sobre Materiais Resistentes ao Desgaste. Uberlândia – MG. p. 263-306, dez. 1991.

FIORE, N. F.; KOSEL, T. H.; FULCHER, J. K. The Effect of Carbide Volume fraction on the Low Abrasion Resistance of High Cr-Mo White Cast Irons. **Wear** n. 84. p. 313-325, 1983.

FILHO, Pedro Pedrosa R., *et al.* **Sistema Computacional para Determinação da Taxa de Diluição em Soldadura**. Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões: Mecânica Experimental, Portugal, v. 18, n. 32, p.55-61, 8 Fev. 2010.

HERNÁNDEZ, O. J. S. Otimização do Consumível na Solda de Revestimento Aplicada na Indústria Sucroalcooleira. Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 1997, 102 p.

INFOSOLDA. **Revestimento por soldagem** – Processos de soldagem para revestimento. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/180-revestimento-por-soldagem-processos-de-soldagem-para-revestimento.html>>. Acesso em: 20 Out. 2017.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antônio. Avaliação de Desgaste Abrasivo de Baixa Tensão por Roda de Borracha em Revestimentos Duros Soldados com Arames Tubulares. **Femec**, Uberlândia, p.1-9, Jun. 2007. Anual.

LIMA, Aldemi Coelho. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar**. 2008. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

LIMA, A., FERRARESI, V. Análise da microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento duro Utilizado pela Indústria sucroalcooleira. **Soldagem & Inspeção**, SP, Vol. 14, pp 140-150, 2009.

OLIVEIRA, D. L.; GALLEGOS, J.; VENTRELLA, V. A. Análise da Resistência ao Desgaste em Revestimento Duro Aplicado por Soldagem Através de Esfera Fixa Rotativa. **Cbecimat**, Cuiabá, p.1-8, 13 Nov. 2014. Anual.

QUITES, Almir Monteiro. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. 1ª. Edição, Florianópolis: Soldasoft, 2002.

RIBEIRO, RUBENS. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-C- Cr Utilizados na Indústria Sucroalcooleira**. 2004. 104p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. 2004.

UTP. **Consumíveis de Soldagem**. 2011. Disponível em: <[www.voestalpine.com/.../vabw](http://www.voestalpine.com/.../vabw) - Catálogo de Consumíveis UTP>. Acesso em: 30 Jul. 2016.

VILLARES METALS (Sumaré - Sp). **VC-131**. Disponível em: <<http://www.villaresmetals.com.br/pt>>. Acesso em: 26 Nov. 2016.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; DE MELLO, F. D. H. **Soldagem – Processos e Metalurgia**. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo – Brasil. 494 p. 1992.

WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; MELLO, Fábio Décourt Homem de. **Soldagem: Processos e Metalurgia**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005. 494 p.

ZUM GAHR, K. H. Wear by Hard Particles. **Tribology International**, vol. 31, no 10, pp. 587- 596, 1998.

## ANEXO A



voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Amado Magnocaro nº371  
04691-061 - São Paulo - SP  
Tel: (11) 2094-6377 - Fax: (11) 2651-4652

E-mail: info.welding@voestalpine.com  
Site: www.voestalpine.com/welding

FERNANDO HENRIQUE GRUBER COLACC

RUA DOS IMIGRANTES 445  
89254-430 JARAGUA DO SUL  
Brasil

**CERTIFICADO DA QUALIDADE****Test Report 2.2**

conforme / as per : EN 10204

No. : No. : 2016-000138638-1-900006-003

Rev. 0

Página / Page : 1 / 1

Pedido No	PO no.	EMAIL FERNANDO	de / of	05.02.2016
Ordem de Produção	Order no.	1005288840		
Fatura	Delivery note/pos./split	2005327507000010/900006	de / of	15.02.2016
Produto	Product	Arame Tubular (FCW) / GMAW tubular corad wire electrode		201602 0640
Designação da Marca	Trade name	<b>UTP AF LEDURIT 60</b>		Nº78149 064
Classificação	Standard designation	EN 8555 MF 10-GF-60-GR		
Dimensão	Dimension	1,6 mm		
Comida	Serial no.	1601078		
Quantidade	Quantity	15,0 KG		

Análise Química % do metal depositado

Chemical composition in % of the weld metal

C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	B						
3,340	0,820	0,314	27,000	0,026	3,007	0,010	0,311						

T	HRC média/ average HRC					
20°C	61					

Lugar / Town  
Sao Paulo

Data / Date  
15.02.2016

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

Impresso por computador, válido sem assinatura

This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD.

## ANEXO B



voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magnifico nº 371  
04591-060 - São Paulo - SP  
Tel: (11) 5694-6377 - Fax: (11) 5631-6882

E-mail: info.welding@voestalpine.com  
Site: www.voestalpine.com/welding

FERNANDO HENRIQUE GRUBER COLACO

RUA DOS IM GRANTES 445  
89254-430 JARAGUA DO SUL  
Brasil

## CERTIFICADO DA QUALIDADE

## Test Report 2.2

conforme / as per : EN 10204

No. : No. : 2016-000138638-1-900007-003

Rev. 0

Página / Page: 1 / 1

Pedido No	PO no.	EMAIL FERNANDO	de / of	05.02.2016
Ordem de Produção	Order no.	1005288840		
Fatura	Delivery note/pos./splitt	2005327507/000020/900007	de / of	15.02.2016
Produto	Prduct	Arame Tubular (FCW) / GMAW tubular cored wire electrode		20102 89071
Designação da Marca	Trade name	<b>UTP AF LCDURIT 60</b>		WE1507 0004
Classificação	Standard designation	DIN 8555 MF 0-GF-65-GR		
Dimensão	Dimension	1,6 mm		
Comida	Serial no	1601168		
Quantidade	Quantity	15,0 KG		

Análise Química % do metal depositado

Chemical composition in % of the weld metal

C	Si	Mn	Cr	Nb									
3,410	1,050	0,228	17,880	3,080									

T	HRC média/ average HRC				
20°C	65				

Lugar / Town  
Sao Paulo

Data / Date  
15.02.2016

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

Impresso por computador, válido sem assinatura  
This certificate was issued by CP-equipment and does not require signature.

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD.

## ANEXO C



## voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Arnaldo Magniccaro nº 371  
04691-060 - São Paulo - SP  
Tel. (11) 5694-8377 - Fax: (11) 5631-4682

E-mail: info.welding@voestalpine.com  
Site: www.voestalpine.com/welding

FERNANDO HENRIQUE GRUBER COLACO

RUA DOS IMIGRANTES 445  
89254-430 JARAGUA DO SUL  
Brasil

## CERTIFICADO DA QUALIDADE

## Test Report 2.2

conforme / as per : EN 10204

No. : No. : 2016-000138657-1-900003-003

Rev. 0

Pagina / Page : 1 / 1

Pedido No	PO no.	EMAIL FERNANDO...	de / of	05.02.2016
Ordem de Produção	Order no.	1005288840		
Fatura	Delivery note/pos./splitt	2005327586/000030/900003	de / of	15.02.2016
Produto	Product	Arame Tubular (FCW) / GMAW tubular cored wire electrode		281802
Designação da Marca	Trade name	<b>UTP AF LEDURIT 70</b>		74901
Classificação	Standard designation	DIN 8555 MF10-GF-70-GRTZ		5VE16R1F 0054
Dimensão	Dimension	1,6 mm		
Corrida	Serial no.	1601156		
Quantidade	Quantity	15,0 KG		

## Análise Química % do metal depositado

## Chemical composition in % of the weld metal

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Nb							
4,560	0,570	0,250	19,000	6,110	0,670	1,530	5,500							

T	HRC média/ average HRC					
	67					

Lugar / Town  
Sao Paulo

Data / Date  
18.02.2016

Representante da Qualidade Autorizado / Authorized representative

Impresso por computador, válido sem assinatura  
This certificate was issued by DP-equipment and does not require signature.

**voestalpine**  
ONE STEP AHEAD.