

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA

FABIANO CARDOSO

ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTO DURO DEPOSITADO  
PELO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW COM DUPLO ARAME TUBULAR DAS  
LIGAS FeCrC-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW

JARAGUÁ DO SUL  
2016

FABIANO CARDOSO

ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTO DURO DEPOSITADO  
PELO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW COM DUPLO ARAME TUBULAR DAS  
LIGAS FeCrC-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW

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  
2016

C268a Cardoso, Fabiano

Análise do desgaste abrasivo em revestimento duro depositado pelo processo de soldagem GTAW com duplo arame tubular das ligas FeCrC-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW / Fabiano Cardoso ; orientador Fernando H. G. Colaço. – Jaraguá do Sul, SC, 2016.  
80 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina.  
Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica. 2. Soldagem. 3. GTAW. 4. Duplo arame. 5. Revestimento. 6. Desgaste. I. Colaço, Fernando H. G.. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

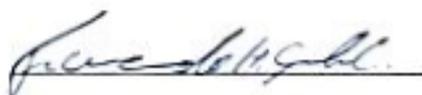
Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

ANÁLISE DO DESGASTE ABRASIVO EM REVESTIMENTO DURO DEPOSITADO  
PELO PROCESSO DE SOLDAGEM GTAW COM DUPLO ARAME TUBULAR DAS  
LIGAS FeCrC-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW

FABIANO CARDOSO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de tecnólogo  
e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora  
abaixo indicada.

Jaraguá do sul, 09 de setembro de 2016.



Fernando H. G. Colaço

Me. Eng



Joel Stryhalski

Dr. Eng



Gabriel Costa Sousa

Me. Eng

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha esposa Cristhine Beppler, por todo apoio, paciência e dedicação empenhados a mim nesta jornada.

Agradeço aos meus sogros, Mauro e Silvia Beppler pelo incentivo ao estudo dado a mim e também pelo carinho.

Agradeço ao meu cunhado Rhafael Beppler, pelo companheirismo e amizade nos últimos três anos e meio. Agradeço também aos meus cunhados, Regiane e Luciano Schmitz e Cristiane Beppler e Wilson Nascimento pelo suporte dado no início da jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Fernando H. G. Colaço, pelo suporte técnico na minha orientação e pela amizade construída no dia a dia nos projetos de pesquisa realizados.

Agradeço aos demais professores do IFSC, em especial aos professores Marlon V. Fontanive, Giovani Carlini, Gabriel C. Sousa e Joel Stryhalski, pelo companheirismo e amizade durante esta caminhada acadêmica.

E por fim, agradeço a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pela parceria na realização dos ensaios de FEG-MEV e EDS e também ao IFSC pela formação de qualidade e pelo suporte financeiro ofertado aos projetos de pesquisa realizados.

O homem que consagra suas horas com  
infatigável empenho a honrosos objetivos,  
traça luminosamente o seu destino.  
(Edward Kong)

## 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-B, FeCrC-Nb e FeCrC-NbW, com diâmetro de 1,6 mm e camada única de revestimento. Para a deposição dos arames foi utilizado uma fonte de soldagem GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) operando em corrente contínua (CC) e corrente pulsada (CP). Para tanto, utilizou-se chapas de aço SAE 1020 com dimensões de 200 x 150 x 6,00 mm. Para a avaliação da perda de massa, utilizou-se um abrasômetro do tipo roda de borracha, padronizado pela norma ASTM G65-91. Para o ensaio de desgaste foram depositados cinco cordões sobrepostos lateralmente 40%, sendo retirado um corpo de prova de 25 x 75 mm da região central. 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 endentações na superfície da mesma seção. As deposições foram realizadas com o auxílio de um manipulador de soldagem para a garantia do controle dos demais parâmetros envolvidos no processo. A observação dos resultados da microestrutura demonstrou similaridade entre os parâmetros propostos, uma matriz formada pela fase  $\alpha$  (dendritas de austenita) com precipitação de NbC, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e de MoC em todas as amostras depositadas. O conjunto dos resultados também permitiu afirmar que a combinação das ligas de FeCrC-Nb(68)+FeCrC-NbW(70) por deposição CC obteve a menor perda de massa, tornando-a a combinação mais efetiva para o desgaste abrasivo. Este fato está relacionado à quantidade de Nb, que promove a formação de NbC, fortalecendo e protegendo a matriz devido a sua elevada dureza.

Palavras-Chave: Soldagem, GTAW, Duplo Arame, Revestimento, Desgaste.

## ABSTRACT

This study aims to evaluate the abrasive wear resistance of the deposited hard coatings by combining the cored wire alloys FeCrC-B, FeCrC-Nb and FeCrC-NbW with a diameter of 1.6 mm and single coating layer. For the deposition of the wires was used a source of GTAW (Gas-Shielded Tungsten Arc Welding) operating in direct current (DC) and pulsed current (CP). The substrates used is SAE 1020 steel plates with dimensions of 200 x 150 x 6,00 mm. For the evaluation of weight loss, we used a abrasometer wheel type rubber standardized by ASTM G65-91. For the wear test were deposited five strands overlapping laterally 40%, was removed a specimen 25 x 75 mm in the central region. At the other end of the plate was deposited a single strand for the assessment of morphology, dilution microstructure and hardness. Morphological analysis of the beads was performed using macrographs the cross section of the beads for subsequent calculation of the dilution. The study of the microstructure was performed by micrographs of the cross section of the bead, and the hardness through indentations in the surface. The depositions were carried out with the aid of a welding manipulator to control the security of the other parameters involved in the process. The observation of the results of the microstructure showed similarity between the proposed parameters, a matrix formed by the phase- $\alpha$  (austenite dendrites) with precipitation of NbC, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and MoC in all samples deposited. The set of results also allowed us to conclude that the combination of alloys FeCrC-Nb (68) + FeCrC-NbW(70) by CC deposition obtained smaller mass loss, making it the most effective combination to abrasive wear. This fact is related to the amount of Nb, which promotes the formation of NbC, strengthening and protecting the matrix due to its high hardness.

Keywords: Welding, GTAW, Double Wire, Coating, Wear.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução cronológica dos processos de soldagem.....	20
Figura 2 – Equipamento básico para soldagem GTAW (esquemático).....	23
Figura 3 – Indicação comercial para arames tubulares segundo a Norma AWS A5.12-92.....	24
Figura 4 – Aspecto superficial e geométrico dos cordões.....	25
Figura 5 – Morfologia dos cordões depositados.....	27
Figura 6 – Ilustração dos efeitos dos tipos de corrente e polaridade na soldagem GTAW.....	28
Figura 7 – Maior percentual de porosidade com a variação de energia.....	30
Figura 8 – Mudança na microestrutura decorrente da variação de energia.....	31
Figura 9 – Modo de desgaste de dois e três corpos.....	38
Figura 10 – Mecanismos de desgaste.....	40
Figura 11 – Configuração dos carbonetos de Ti, Nb e carbonetos primários.....	41
Figura 12 – Mecanismo de microcorte em revestimento duro, a indicação “A” apresenta a trilha de desgaste gerada pelo abrasivo, na indicação “B” esta trilha é barrada por TiC.....	41
Figura 13 – Trincas na superfície do revestimento.....	42
Figura 14 – Fonte e manipulador utilizado para deposição dos revestimentos.....	46
Figura 15 – Máquina de eletroerosão a fio.....	47
Figura 16 – Microscópio e Microdurômetro utilizado para análise das amostras.....	48
Figura 17 – Equipamento roda de borracha.....	48
Figura 18 – Fluxograma das etapas realizadas.....	50
Figura 19 – Esquema da metodologia de extração da amostra.....	51
Figura 20 – Corte das amostras no processo de eletroerosão a fio.....	51
Figura 21 – Embutimento a frio das amostras.....	52
Figura 22 – Representação esquemática da largura, reforço (R), penetração (P), áreas A e B.....	53
Figura 23 – Foto obtida da seção transversal do cordão no estereoscópio.....	53
Figura 24 – Dados obtidos através da análise de imagem no <i>software</i> IMAGE-PRO PLUS.....	54
Figura 25 – Representação esquemática das medições da dureza na zona fundida do cordão de solda.....	54
Figura 26 – Amostras cortadas e limpas para os ensaios de desgaste.....	55
Figura 27 – Microscópio eletrônico de varredura (FEG-MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).....	56
Figura 28 – Valores de Largura (A), Penetração (B) e Reforço (C).....	58

Figura 29 – Valores de percentual de diluição.....	60
Figura 30 – Valores médios das durezas dos cordões.....	61
Figura 31 – Endentação realizada em Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> .....	62
Figura 32 – Microestrutura dos cordões.....	63
Figura 33 – Ensaio de FEG-MEV e EDS realizada na amostra CC60-68.....	64
Figura 34 – Diferença entre a formação da microestrutura com corrente Pulsada.....	65
Figura 35 – Carbonetos primários de e os secundários na fase eutética.....	65
Figura 36 – Representação gráfica do desgaste abrasivo.....	67
Figura 37 – Risco do abrasivo sendo barrados por Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub> e MoC.....	68
Figura 38 – Macrográfica da região desgastada do ensaio.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos processos de soldagem por fusão segundo a fonte de energia....	21
Tabela 2 – Especificações para mistura dos gases de proteção segundo a norma AWS A5.32	26
Tabela 3 – Representação dos processos de soldagem.....	33
Tabela 4 – Tipo de metal de adição.....	33
Tabela 5 – Método de produção do arame.....	34
Tabela 6 – Nível de dureza dos consumíveis.....	34
Tabela 7 – Propriedades dos metais de adição.....	34
Tabela 8 – Técnica de soldagem.....	35
Tabela 9 – Classificação por severidade do desgaste.....	39
Tabela 10 – Parâmetros para os testes segundo a Norma ASTM G65.....	43
Tabela 11 – Tamanho dos abrasivos segundo Norma ASTM G65.....	44
Tabela 12 – Composição química dos arames utilizados.....	45
Tabela 13 – Parâmetros utilizados para a deposição e identificação dos cordões de solda.....	49
Tabela 14 – Seção transversal dos cordões.....	57
Tabela 15 – Valores dos percentuais de diluição.....	60
Tabela 16 – Especificação do fabricante quanto a microdureza média.....	62
Tabela 17 – Caracterização química da matriz e da austenita retidas na matriz.....	64
Tabela 18 – Resultado do ensaio de desgaste dos corpos de prova para a combinação das três ligas.....	66

## LISTA DE ABREVIações

*ABNT* – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
*AHW* – Soldagem com hidrogênio atômico  
*ASME* – Sociedade Americana de Engenharia Mecânica  
*ASTM* – Sociedade Americana para Teste e Materiais  
*AWS* – American Welding Society  
*B* – Boro  
*C* – Carbono  
*CAW* – Soldagem com eletrodo de carvão  
*CO<sub>2</sub>* – Dióxido de Carbono  
*Cr* – Cromo  
*Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>* – Carboneto secundário de cromo  
*Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub>* – Carboneto primário de cromo  
*DIN* – Deutsches Institut für Normung  
*EDS* – Espectroscopia de Energia Dispersiva  
*EGW* – Soldagem eletro-gás  
*ESAB* – Elektriska Svetsnings Aktie Bolaget  
*ESW* – Soldagem por eletroescória  
*FCAW* – Soldagem com eletrodo tubular  
*Fe* – Ferro  
*FW* – Soldagem por centelhamento  
*GMAW* – Soldagem a gás com eletrodo metálico  
*GTAW* – Soldagem a gás com eletrodo de tungstênio  
*HFRW/IB* – Soldagem/Brasagem por indução  
*HRC* – Dureza Rockwell C  
*HV* – Dureza Vickers  
*Hz* – Hertz  
*I<sub>b</sub>* – Corrente de base  
*I<sub>M</sub>* – Corrente média  
*I<sub>p</sub>* – Corrente de pico  
*kJ* – Quilojoules  
*LBW* – Soldagem a laser

LTM – Ensaio de desgaste abrasivo não severo  
m – metro  
MAG – Metal Active Gas  
MEV – Microscópio eletrônico de varredura  
MIAB – Soldagem com arco magneticamente impelido  
MIG- Metal Inert Gas  
mm – Milimetro  
N – Newton  
Nb – Nióbio  
NBR – Norma Brasileira  
PAW – Soldagem a plasma  
PEW – Soldagem por percussão  
PIB – Produto interno bruto  
PVC – Policloreto de vinila  
RPW – Soldagem de projeção  
RSEW – Soldagem de costura  
RSW – Soldagem a ponto  
SAE – Society of Automotive Engineers  
SAW – Soldagem ao arco submerso  
SMAW – Soldagem com eletrodo revestido  
SW – Soldagem com prisioneiro  
Ti – Titânio  
TIG – Gás Inerte de Tungstênio  
TLPB – Brasagem reativa/união com fase líquida transiente  
TW – Soldagem Aluminotérmica  
UW – Soldagem de topo  
W – Tungstênio  
ZTA – Zona Termicamente afetada

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Objetivos.....</b>	<b>18</b>
1.1.1 Objetivo geral.....	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Processo de soldagem.....</b>	<b>19</b>
2.2.1 Processo de soldagem GTAW.....	22
2.2.1.1 Eletrodo de Tungstênio.....	24
2.2.1.2 Gases de proteção.....	26
2.2.1.3 Tipo de corrente e polaridade do eletrodo.....	28
<b>2.3 Soldagem de revestimentos.....</b>	<b>31</b>
2.3.1 Processos de revestimento duro.....	31
2.3.1.1 Classificação dos arames tubulares para revestimento duro.....	32
2.3.1.2 Escolha do processo de soldagem para aplicação de revestimento duro.....	35
2.3.1.3 Taxa de diluição.....	36
<b>2.4 Desgaste em superfícies revestidas.....</b>	<b>37</b>
2.4.1 Desgaste abrasivo.....	38
<b>2.5 Ensaio de desgaste.....</b>	<b>42</b>
2.5.1 Abrasômetro do tipo roda de borracha.....	43
<b>3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>45</b>
<b>3.2 Equipamentos.....</b>	<b>45</b>
3.2.1 Bancada para deposição dos cordões.....	46
3.2.2 Equipamentos para o corte e acabamento superficial das amostras.....	46
3.2.3 Equipamentos para análise da microestrutura e microdureza.....	47
3.2.4 Equipamento para análise do desgaste abrasivo do tipo “roda de borracha”.....	48
<b>3.3 Procedimento Experimental.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 Aplicação dos cordões.....	50
3.3.2 Preparação metalográfica.....	51
3.3.2.1 Análise morfológica.....	53
3.3.2.2 Microdureza.....	54

3.3.3	Análise da perda de massa dos revestimentos.....	55
3.3.4	Análise de FEG-MEV e EDS.....	56
<b>4.</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1</b>	<b>Morfologia dos cordões de solda.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2</b>	<b>Taxa de diluição.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3</b>	<b>Dureza dos cordões de solda.....</b>	<b>61</b>
<b>4.4</b>	<b>Microestrutura dos cordões de solda.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5</b>	<b>Perda de massa dos revestimentos.....</b>	<b>66</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>71</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>78</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>79</b>
	<b>ANEXO C.....</b>	<b>80</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Com a globalização, a competitividade de uma indústria vai além da geração de produtos com qualidade. A obtenção de um processo enxuto, livre de paradas não programadas, pode ser o fator primordial para o sucesso de uma indústria no mercado global (CORIAT, 1994). Aumentar o tempo de vida de componentes mecânicos, reduzindo assim o tempo de paradas para manutenção, vem sendo visto pela indústria como um potencial a ser explorado. Nas indústrias sucroalcooleira por exemplo, as manutenções periódicas impactam diretamente no custo final do produto, representando um gasto de até 40% da planta industrial, devido à troca, recuperação e inspeção dos equipamentos (PERTICARARI, 2010).

Com base no exposto, nota-se que a fase de beneficiamento do produto do setor em questão sofre os principais transtornos tecnológicos. Segundo Lima e Ferraresi (2009) tais contrariedades estão diretamente ligadas ao fenômeno de desgaste abrasivo, causado pelo atrito entre as facas picadoras com areia, pedaços de madeira, pedras e ferro, coletados durante o processo de carregamento da cana. Entre tanto, este fenômeno também pode ser observado em outros setores da indústria com a de mineração e na petroquímica. Estima-se que o desgaste abrasivo representa quase 50% dos problemas com desgaste nas indústrias, representando um gasto de 1 a 5% do PIB (Produto Interno Bruto) dos países desenvolvidos na recuperação ou troca dos componentes avariados (CZICHOS, 1992).

Como solução tecnológica efetiva para o problema mencionado, técnicas para a proteção da superfície através do endurecimento ou *hardfancing* (revestimento duro) estão sendo estudados e aplicados. Trata-se da aplicação de uma ou mais camadas de material através do processo de soldagem a fim de aumentar a resistência ao desgaste abrasivo da superfície (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005). O processo de revestimento duro busca recuperar peças avariadas pelo desgaste abrasivo como também pode ser utilizado para revestir componentes novos, aos quais se estimam grandes perdas progressivas de material decorrentes do atrito entre as superfícies.

Segundo Wainer, Brandi, Mello (2005), a aplicação de revestimento por meio de um processo de soldagem depende do correto balanço das características mecânicas desejadas, com as características do processo selecionando, buscando sempre a melhor taxa de deposição com a menor diluição. Para isso um dos processos de soldagem que se enquadra em uma boa produtividade com baixa diluição é o processo GTAW automatizado. Para Chi-mig *et al.* (2010), a aplicação de revestimento duro com o processo GTAW com arame tubular da liga FrCrC apresenta boas qualidades na resistência ao desgaste abrasivo. Para o autor o aumento

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo serão abordadas as principais bibliografias específica da área de soldagem de revestimento, onde a fundamentação teórica servirá de base para o estudo realizado. Em um primeiro momento será realizada uma contextualização dos processos de soldagens, a definição, a classificação e um apanhado geral sobre os principais processos de soldagem. Em seguida será abordado o processo de soldagem GTAW, os processos de revestimentos e suas variáveis, os tipos de desgaste e seus mecanismos, além dos ensaios utilizados para qualificar os processos de revestimento. Durante toda a fundamentação buscase apresentar os principais estudos relacionados com os tema principal do trabalho.

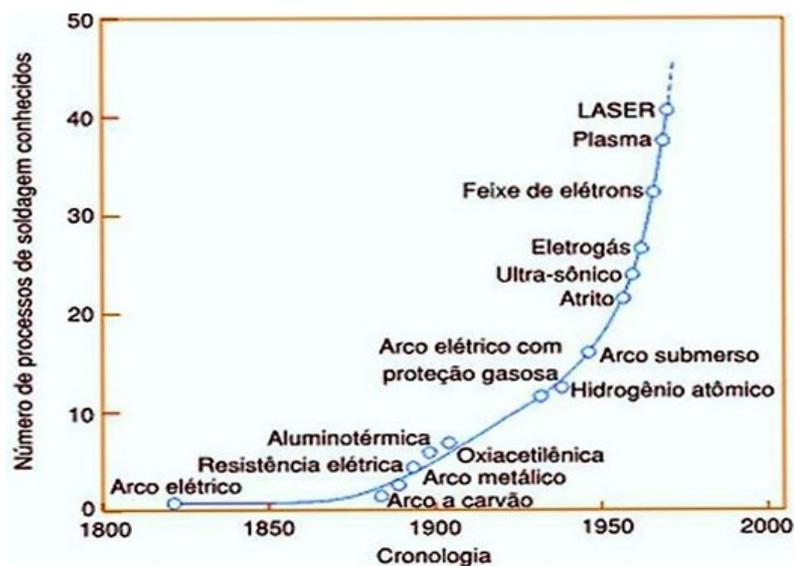
### **2.1 Processo de soldagem**

A soldagem por meio de arco elétrico tem seu princípio na brasagem e na soldagem por forjamento. Segundo Marques, Modenesi e Bracarense (2009), os processos de soldagem foram considerados na Antiguidade e na Idade Média os principais processos metalúrgicos. Atualmente, existem evidências no Museu do Louvre que estes processos foram utilizados pelos Persas por volta de 4000 a.C., na confecção de pingentes de ouro, armas e artefatos de usos gerais.

A importância do processo de soldagem diminuiu durante os séculos XII e XIII com o desenvolvimento de tecnologias que possibilitaram a obtenção de ferro fundido no estado líquido. Já nos séculos XIV e XV, a soldagem passou a ser vista como um processo secundário com o desenvolvimento dos altos-fornos, sendo o processo de soldagem por forjamento substituído pelos processos de rebitagem e parafusagem (WAINER; BRANDI; MELLO, 2005).

Com o início da Segunda Guerra Mundial, por volta de 1940, os processos de soldagem passaram a ser vistos como o principal recurso nas indústrias automotivas e navais para a união de dois ou mais componentes, sendo também propulsor do desenvolvimento de novos processos de união e desenvolvimento tecnológico dos já existentes (WAINER; BRANDI; MELLO, 2005). A Figura 1 apresenta a evolução cronológica dos processos de soldagem.

Figura 1 – Evolução cronológica dos processos de soldagem



Fonte: Wainer; Brandi; Mello (1992, p.12)

Atualmente, mais de 50 diferentes processos de soldagem têm utilização industrial. A soldagem é tida como a mais importante técnica para união permanente de metais. Sua importância é ainda mais evidente quando observado que os mais diversos processos estão dispostos nas mais variadas atividades da indústria, tanto para união quanto para reconstrução e revestimento de componentes mecânicos, influenciando diretamente no desenvolvimento de novos tipos de aços e outra ligas (WAINER; BRANDI; MELLO, 2005).

Segundo American Welding Society (AWS), o processo de soldagem pode ser definido como o “Processo de união de materiais usado para obter a coalescência (união) localizada de metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.” Para isto, é fundamental a utilização de material adicional na junta a ser unida, assegurando o fechamento das folgas entre as juntas. Além do material de adição é essencial prover a completa penetração das juntas a serem unidas (QUITES, 2002).

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2005), cada processo de soldagem deve preencher os seguintes requisitos:

- a) gerar uma quantidade de energia capaz de unir dois materiais, similares ou não;
- b) remover as contaminações das superfícies a serem unidas;
- c) evitar que o ar atmosférico contamine a região durante a soldagem;
- d) propiciar o controle da transformação de fase, para que a solda alcance as propriedades desejadas, sejam elas físicas, químicas ou mecânicas.

Segundo Mesler (1999), os processos de soldagem antigos, tais como brasagem e

soldagem por forjamento se tornaram obsoletos, dando lugar a novos processos e técnicas com elevados índices de eficiência e qualidade decorrentes dos avanços tecnológicos. Sendo assim o autor classifica os processos principais de soldagem pela fonte de energia aplicada, como mostra Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação dos processos de soldagem por fusão segundo a fonte de energia

<b>Tipo de Fonte</b>		
<b>Química</b>	<b>Energia radiante</b>	
Soldagem a gás (OFW)	Soldagem a laser (LBW)	
Brasagem com tocha (TB)	Soldagem por feixe de	
Soldagem Aluminotérmica (TW)	elétrons (EBW)	
Brasagem reativa/união com fase	Soldagem ou brasagem com	
líquida transiente (TLPB)	infravermelho (IB)	
	Soldagem por micro-ondas	
	Brasagem em forno (FB)	
	Brasagem por imersão (DB)	
<b>Tipo de Fonte</b>		
<b>Arco - Elet. Não Consumível</b>	<b>Arco - Elet. Consumível</b>	<b>Energia Radiante</b>
Soldagem a gás com eletrodo de tungstênio (GTAW ou TIG)	Soldagem a gás com eletrodo metálico ( GMAW ou MIG/MAG)	Soldagem a ponto (RSW)
Soldagem a plasma (PAW)	Soldagem com eletrodo revestido	Soldagem de costura (RSEW)
Soldagem com eletrodo de carvão (CAW)	(SMAW)	Soldagem de projeção (RPW)
Soldagem com prisioneiro (SW)	Soldagem com eletrodo tubular	Soldagem por centelhamento (FW)
Soldagem com hidrogênio atômico (AHW)	(FCAW)	Soldagem de topo (UW)
Soldagem com arco magneticamente impelido (MIAB)	Soldagem ao arco submerso (SAW)	Soldagem por percussão (PEW)
	Soldagem eletro-gás (EGW)	Soldagem/Brasagem por indução (HFRW/IB)
		Soldagem por eletroescória (ESW)

Fonte: Mesler (1999, p.29)

Embora exista uma classificação, cada processo de soldagem apresenta vantagens e limitações, sendo que o adequado balanço dessas características determinam sua aplicabilidade (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005). Devido aos estudos e à grande diversidade de processos de soldagem no mercado, este deixou de ser um processo unicamente de união. Podendo ser aplicado na reconstrução de equipamentos avariados, como dentes de engrenagens e mancais, recobrimento de superfícies nas quais presumem-se elevados fenômenos de corrosão, abrasão etc (soldagem de revestimento), como em martelos

de moinhos, eixos, tubulações com grãos sólidos/ou produtos químicos.

Segundo Quites (2002), os principais processos de soldagem empregados na indústria, para união e para aplicação de revestimentos, são os processos de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), soldagem a arco com arame sólido nu alimentado continuamente (GMAW), eletrodo tubular (FCAW), arco submerso (SAW) e soldagem a gás com eletrodo de tungstênio (GTAW). Esse são os principais processos empregados na indústria por que apresentam um bom conjunto de características como boa taxa de deposição, versatilidade e baixo custo.

O processo de soldagem com eletrodo revestido (SMAW), ou soldagem manual a arco elétrico, apresenta boa flexibilidade de aplicação devido facilidade na compra dos eletrodos, encontrados com uma grande variedade de ligas e um baixo investimento para compra do equipamento. Porém o processo de soldagem SMAW necessita de cuidados especiais quanto à alocação dos eletrodos e à emissão de gases e fumos durante a soldagem (ESAB, 2005).

Os processos MIG/MAG, ou GMAW, e o processo de soldagem com arame tubular, também apresentam boa flexibilidade quanto a sua aplicação. As características que os diferem do processo de SMAW são a possibilidade de automatização do processo de soldagem GMAW com arame tubular, aumentando em até três vezes 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).

Segundo a ESAB (2004), o processo de soldagem a arco submerso (SAW) é indicado para a soldagem de chapas com grandes espessuras, articulações retas e para a aplicação de cordões de revestimento, em razão de ser o processo com a maior taxa de deposição encontrada no mercado. Apresenta elevada velocidade de soldagem e uma maior segurança para o operador. A limitação do processo encontra-se na posição de soldagem, pois é indicado para posições planas e horizontais, e na aplicação, que é restringida às chapas espessas.

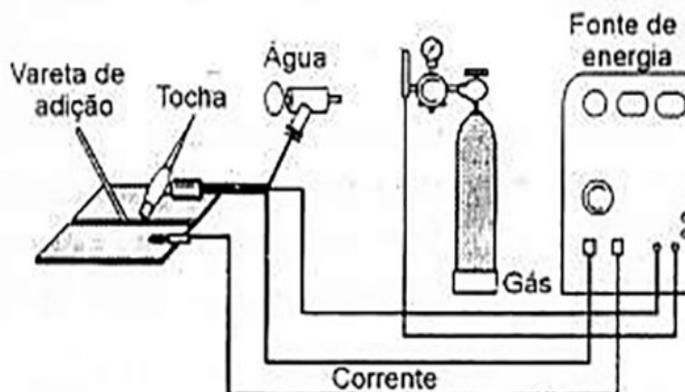
O processo GTAW apresenta excelente estabilidade durante o processo de soldagem, baixo percentual de diluição, cordões com descontinuidades reduzidas (trincas, porosidades) e produz cordões com excelente qualidade. Assim, optou-se nesta pesquisa, pela utilização do processo GTAW na deposição dos cordões de revestimento duro.

### 2.2.1 Processo de soldagem GTAW

O processo de soldagem GTAW tem seu início nos anos 1920. Contudo, somente em 1942 o processo passou a ser comercializado nos Estados Unidos para a soldagem em ligas de magnésio. Atualmente, o processo GTAW é mais empregado na soldagem de ligas de

alumínio, magnésio, titânio e aços inoxidáveis (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005). A Figura 2 apresenta de forma esquemática os equipamentos utilizados no processo GTAW.

Figura 2 – Equipamento básico para soldagem GTAW (esquemático)



Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2005, p.18)

No processo de soldagem GTAW, a energia de soldagem é gerada por um arco voltaico entre o eletrodo de tungstênio e a peça a ser soldada. A proteção da zona fundida e do eletrodo, dá-se através do gás inerte que flui do bocal cerâmico para a ponta do eletrodo. A soldagem pode ser realizada com ou sem metal de adição (QUITES, 2002).

Os equipamentos básicos para a realização do processo são (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005):

- a) fonte de energia – composta de um transformador e retificador, produz corrente contínua (CC) ou apenas um transformador para soldagem em corrente alternada (CA), dependendo do metal a ser soldado;
- b) unidade de alta frequência – fundamental para soldagem em corrente alternada, necessitando de intensidade regulável e controle de pré e pós-vazão do gás inerte, quando não incluso na fonte de energia;
- c) sistema de refrigeração – para refrigeração da fonte de energia e da tocha, por meio de água, geralmente recirculada em um circuito fechado;
- d) reservatório de gás de proteção – geralmente cilíndrico, possuindo reguladores de pressão e de vazão;
- e) tocha GTAW – dispositivo utilizado para fixação do eletrodo de tungstênio que conduz corrente elétrica e a proteção gasosa necessária para a poça de fusão.

### 2.2.1.1 Eletrodo de Tungstênio

O eletrodo de tungstênio tem a função focal, ou seja, este direciona o arco elétrico para

a peça, sendo que o mesmo não se fundirá ao metal de base; para tanto, utiliza-se o tungstênio que tem ponto de fusão acima de 3340 °C. Além desta característica, o eletrodo é considerado termoiônico, ou seja, tem maior facilidade de emitir elétrons, dando estabilidade ao processo. O eletrodo pode ser puro (99%) ou com ligas de Zircônio, Tório, Cério e Lantânio (QUITES, 2002).

O eletrodo de tungstênio puro apresenta a vantagem de ser comercialmente barato, por outro lado, tem baixa durabilidade. Os elementos químicos adicionados servem para aumentar o desempenho e a vida útil do eletrodo. Os eletrodos com adição de zircônio ou tório são mais duráveis, pois têm maior durabilidade com potências elevadas e melhores propriedades de ignição. Suas desvantagem são o seu custo elevado e a menor estabilidade com corrente alternada (ZIEDAS, TATINI,1997).

A Norma AWS A5.12-92 identifica os eletrodos conforme a composição química. Segundo esta, a letra E significa eletrodo, a letra W, Wolfrâmio, ou Tungstênio (elemento químico de que é feito o eletrodo), X, o elemento químico adicionado ao eletrodo e a letra P significa a pureza do material. A Figura 3 apresenta a indicação comercial segundo a Norma AWS A5.12-92.

Figura 3 – Indicação comercial para arames tubulares segundo a Norma AWS A5.12-92

<b>Eletrodo</b>	<b>Tungstênio</b>	<b>Elemento químico adicionado</b>	<b>Tungstênio puro</b>
E	W	X	P

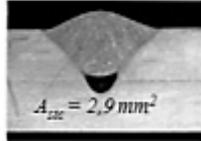
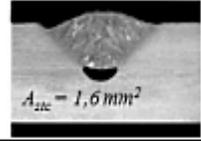
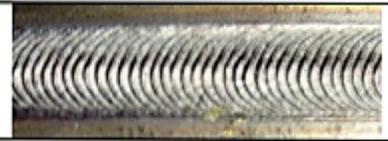
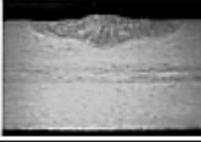
Fonte: Norma AWS A5.12-92 (1992)

A preparação da ponta do eletrodo é realizada de acordo com o tipo de corrente utilizada, CC ou CA. Efetuada por meio de esmerilhamento da ponta, o sentido é sempre longitudinal para facilitar o direcionamento do elétrons. Na soldagem com corrente contínua, o eletrodo deve ser pontiagudo, onde a altura do cone deve ser duas vezes o diâmetro do eletrodo, para a união de ligas de aço. Já na soldagem com corrente alternada, o eletrodo deve estar ligeiramente arredondado, recomendado para a aplicação em alumínio (ZIEDAS, TATINI, 1997).

Tokar e Ponomarov (2015) realizaram estudos utilizando vários níveis de afiação da ponta do eletrodo Toriado (AWS EWTh2%), com fonte de soldagem TIG pulsada. Mantendo constantes a corrente média ( $I_M=183,0$ ), a amplitude da corrente de pulso ( $I_p=350,0$ ) e de base ( $I_b=15,0$ ), constataram que além da influência na geometria do cordão, a variação da afiação do eletrodo também influi na formação dos “defeitos de túnel” ou “porosidades de túnel”. A

Figura 4 apresenta os resultados obtidos na largura do cordão (L), penetração (P) e área total do cordão, incluindo a cavidade ( $A_{ft}$ ), com variação do ângulo de afiação de 30 ° a 80°.

Figura 4 – Aspecto superficial e geométrico dos cordões

Teste	Aspecto superficial do cordão	Seção transversal do cordão	$A_{ft}(\text{mm}^2)$	L(mm)	P (mm)
1 (30°)			20,5	8,9	3,7
2 (40°)			20,4	8,3	3,8
3 (60°)			21,9	8,8	3,9
4 (70°)			13,8	10,1	1,9
5 (80°)			11,4	9,8	1,6

Fonte: Tokar e Ponomarov (2015, p.3)

Paris (1986) avaliou os efeitos do ângulo de afiação do eletrodo na morfologia dos cordões de solda, depositados pelo processo de soldagem TIG sem a deposição de material. Para tanto, o autor combinou diferentes níveis de afiação da ponta do eletrodo com outros parâmetros, tais como a velocidade de soldagem, o comprimento do arco e a vazão do gás de proteção. Essa combinação foi necessária para avaliar o efeito do ângulo do eletrodo na largura, reforço e penetração dos cordões e no perfil do arco (tensão e corrente). Desta forma, o autor concluiu que a afiação do eletrodo interfere nas características avaliadas, pois seu aumento elevou diretamente os valores de penetração e diminuiu indiretamente os valores de largura e a tensão para uma mesma intensidade de corrente.

Felizardo e Bracarense (2003) realizaram estudos para verificar a influência do ângulo de fixação da tocha e o sentido de soldagem no crescimento colunar e na penetração dos cordões. Para isso, depositaram cordões simples e múltiplos de solda sob chapas de aço-carbono com diferentes ângulos de inclinação da tocha para ambos os sentidos de soldagem (positivo e negativo) como uma fonte de soldagem GTAW. Concluíram que ambas as variáveis tiveram influência no crescimento dos grãos e na ordenação deste na região fundida

(único cordão) e refundida (múltiplos cordões). A alternância do sentido de soldagem, mantendo-se constante os demais parâmetros, resulta em variações significativas nos valores de largura e reforço, porém, a penetração sofre maior influência com variação do ângulo de fixação Ibidem.

### 2.2.1.2 Gases de proteção

Os gases de proteção influenciam diretamente no resultado final do processo de soldagem TIG, sendo os mais utilizados o Argônio e o Hélio, ou uma mistura de ambos. Os gases são direcionados por bocais de cerâmica, metálicos ou por bocais do tipo gás-lens.

Tabela 2 – Especificações para mistura dos gases de proteção segundo a norma AWS A5.32

Classificação AWS	Misturas Típicas de Gás (%)	Gases de proteção
SG-Ahe-10	90/10	Argônio + Hélio
SG-AH-5	95/5	Argônio + Hidrogênio
SG-HeA-25	75/25	Hélio + Argônio
SG-A-G	Especial	Argônio + Misturas

Fonte: Norma AWS A5.32 (2011)

A Tabela 2 apresenta a nomenclatura das misturas e as relações mais comuns de porcentagem de cada gás. As especificações da AWS A5.32 são voltadas diretamente para os gases de proteção utilizados no processo TIG, identificando os componentes individuais nas misturas de gases, como: Ar – Argônio, He – Hélio, H – Hidrogênio, N – Nitrogênio, etc.

Para a seleção do gás de proteção adequado, necessita-se da definição do processo de soldagem, do material que se deseja unir ou revestir, consumíveis do processo e parâmetros. A seguir são descritas as utilizações mais comuns dos gases de proteção (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

a) *Argônio* – gás mais utilizado na indústria para o processo TIG, devido ao melhor custo-benefício à alta disponibilidade, além de outras vantagens. Promove um arco elétrico mais suave e estável, sem turbulências, além de facilitar a abertura do arco elétrico.

b) *Hélio* – gás utilizado para soldagem de materiais mais espessos, devido ao elevado coeficiente térmico, gerando uma elevação na tensão elétrica e, conseqüentemente, no calor de soldagem. Promove maior penetração do cordão, entretanto tem maior custo devido à difícil obtenção.

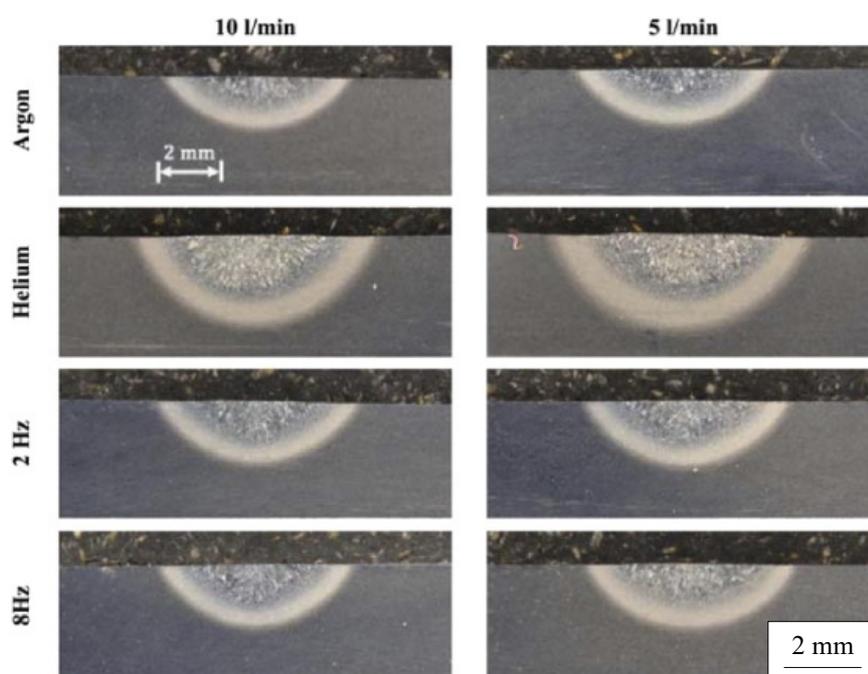
c) *Argônio – Hélio* – a utilização da mistura de ambos os gases é comum na soldagem das ligas de alumínio, titânio, cobre e aços inoxidáveis. O objetivo da mistura é a junção das

características únicas, que cada gás promove ao conjunto, aumentando a largura de fusão e melhorando a aparência do cordão.

d) *Misturas especiais* – atualmente o Hidrogênio é o gás mais utilizado nestas misturas, atuando como agente inibidor da formação de óxidos. Já o gás Nitrogênio é utilizado como gás de proteção de raiz ou gás purga, evitando a contaminação com o ar atmosférico. O Nitrogênio é utilizado também, na adição de 3%, em mistura com o gás Argônio para soldagem de aços inoxidáveis duplex.

Bitharas *et al.* (2015) realizaram estudos sobre a influência dos gases de proteção na soldagem TIG, sobre uma placa de cobre arrefecida com água para evitar a fusão da superfície do ânodo. Utilizaram, para tanto, os gases Argônio, Hélio e uma pré mistura comercial. Através de um equipamento especial, controlaram os pulsos dos gases Argônio e Hélio na poça de fusão com frequência de 2 Hz e 8 Hz. Concluíram desta forma, que a condição que apresentou maior estabilidade foi a 5 L/min com pulso de 8 Hz, que possibilitou uma mistura de 50% (em volume) de ambos os gases. Sendo assim, esta mistura afeta as características geométricas do cordão, podendo diminuir em até 13 % sua penetração e 3% a largura do cordão quando comparados aos ensaios onde o fluxo de gás não foi alternado com uma pré mistura comercial, como observado na Figura 5.

Figura 5– Morfologia dos cordões depositados



Fonte: Bitharas *et al.* (2015)

Cardoso, Colaço e Machado (2015) avaliaram o efeito da variação de diferentes tipos de gases na morfologia (largura, reforço, penetração e diluição), para a deposição de

revestimento duro em chapas de aço-carbono AISI 1020, através do processo de soldagem GMAW. Os gases utilizados para o ensaio foram gases puros e uma pré mistura com diferentes percentuais de argônio (Ar), dióxido de carbono (CO<sup>2</sup>) e oxigênio (O<sub>2</sub>). Além da variação dos gases, também foi avaliado o sentido de soldagem (positivo e negativo) quanto ao efeito deste na morfologia e diluição do cordão. Concluíram o estudo afirmando que o gás Argônio 100% obteve menores valores de diluição e que o sentido de soldagem também teve influência na penetração dos cordões.

### 2.2.1.3 Tipo de corrente e polaridade do eletrodo

A corrente de soldagem e a polaridade do eletrodo influenciam na morfologia dos cordões depositados. A Figura 6 demonstra os efeitos dos tipos de corrente e polaridade na soldagem TIG (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2009).

Figura 6 – Ilustração dos efeitos dos tipos de corrente e polaridade na soldagem GTAW

Tipo de corrente	CC -	CC +	CA (Balancada)
Polaridade de eletrodo	Negativa ou direta	Positiva ou inversa	
Fluxo de elétrons e íons			
Característica de penetração			
Ação de limpeza de óxidos	Não	Sim	Sim, em cada semi-ciclo
Balanco de calor no arco (aprox.)	70 % na peça 30 % no eletrodo	30 % na peça 70 % no eletrodo	50 % na peça 50 % no eletrodo
Penetração	Estreita e profunda	Rasa e Superficial	Média
Aplicação	Aço, Cu, Ag, Aços austeníticos ao Cr - Ni e ligas resistentes ao calor.	Utiliza-se correntes pequenas. Não viável para correntes elevadas.	Al, Mg, e suas ligas.

Fonte: Wainer, Brandi e Mello (2005)

A corrente contínua com polaridade negativa ou direta (CC-) dar-se-á quando o eletrodo estiver ligado ao polo negativo. Tal ligação acarretará um bombardeamento de elétrons sobre a superfície do material a ser soldado, gerando uma concentração de calor de aproximadamente 70% na peça, e 30% no eletrodo. Essa concentração resultará em cordões mais estreitos, com profundidades maiores, sendo indicados para a soldagem de ligas de aço, cobre, entre outras (BRACARENSE 2000).

A corrente contínua com polaridade positiva (CC+) é o inverso da CC-, na qual o eletrodo fica ligado ao polo positivo, gerando uma inversão no sentido dos elétrons, o que

causa considerável concentração de calor na extremidade do eletrodo. Essa ligação é indicada quando se deseja realizar a limpeza de camadas de óxidos da superfície, entretanto, devido à necessidade de eletrodos com diâmetros maiores, torna-se pouco utilizada Ibidem.

A corrente alternada (CA) é uma junção CC- e CC+. A corrente tem o comportamento semelhante ao de uma onda: quando está na crista (parte superior), equivale à ligação CC- e quando está no vale (parte inferior), corresponde à CC+. Nesta ligação, o fluxo de elétrons tem duplo sentido, ou seja, parte tanto do eletrodo para a peça, quanto da peça para o eletrodo, proporcionando um equilíbrio de calor entre a peça e o eletrodo. Esta ligação é indicada para a soldagem de ligas de Alumínio, Magnésio e suas ligas (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005).

O processo de soldagem TIG com corrente pulsada é indicado para soldagem de materiais muito finos, pois combina boa penetração e fusão do pulso, enquanto mantém a área de soldagem relativamente fria. Assim, torna-se possível obter valores de penetração superiores aos valores com CC- (BRACARENSE 2000).

A energia de soldagem (E), também chamada aporte térmico ou aporte de calor, é de grande importância no processo de soldagem, seja ela de união ou de revestimento. Com influência direta na morfologia dos cordões, a energia de soldagem pode alterar as características de microestrutura, diluição, dureza e no desgaste dos revestimentos depositados (MARINHO *et al.*, 2005). A energia de soldagem é expressa pela Equação 1.

$$\text{Energia de soldagem} = \frac{n * V * L}{v} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

V= Tensão no arco (volts)

L= Corrente de soldagem (Amperes)

v = Velocidade de soldagem (mm/s)

n = Eficiência térmica do processo

Mohamat *et al.* (2012) realizaram estudos observando os efeitos da tensão, energia e velocidade de soldagem na penetração e microestrutura dos cordões de revestimento aplicados com FCAW. Os autores concluíram que a tensão e a velocidade de soldagem tem pouca influência na penetração do cordão, sendo a corrente o principal fator causador do aumento da penetração.

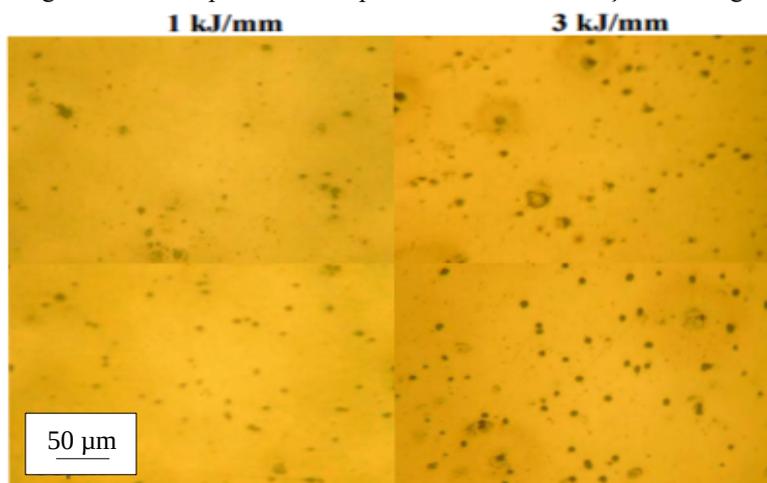
Corrêia e Trevisan (2001) avaliaram os efeitos da corrente convencional e pulsada na morfologia e na microestrutura de revestimentos duros depositados com o processo de soldagem MIG. Os autores concluíram que o aumento da corrente média foi responsável pela

elevação da largura e do reforço, porém, o aumento da penetração foi ocasionada pelo aumento da frequência de pulso, onde foram utilizadas 0 (convencional), 55, 70 e 85 Hz. As variáveis selecionadas não influíram na microestrutura do material, *Ibidem*.

Nunes *et al.* (2012), estudaram os efeitos da energia de soldagem na microestrutura e na microdureza de revestimentos de aços inoxidáveis duplex. Segundo os autores a variação da energia de soldagem não proporcionou mudanças significativas nos níveis de microdureza, porém a elevação da energia, apresentou a tendência de diminuição da microdureza e da resistência à corrosão do revestimento.

Energia de soldagem também interfere diretamente na formação de escórias. Na Figura 7, pode-se observar um aumento relativo da quantidade e do tamanho das porosidades, em função da variação da energia de soldagem entre 1 kJ/mm e 3 kJ/mm. Estes resultados são esperados, já que, com o aumento da temperatura, pode haver uma maior dissolução dos óxidos no metal fundido. Para a realização dos ensaios, utilizou-se o processo de soldagem por arco submerso, com variação da energia, como citado anteriormente (ASSELLI e GALLEGO, 2007).

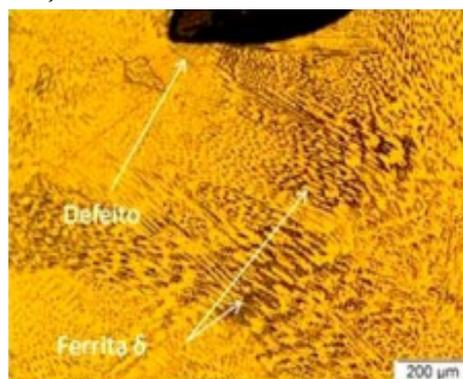
Figura 7 – Maior percentual de porosidade com a variação de energia



Fonte: Asselli e Gallego (2007, p.5).

Melo *et al.* (2012) avaliaram os efeitos da energia de soldagem na microestrutura, na microdureza e na composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem FCAW e SAW. Os autores afirmam que a energia de soldagem apresenta influência na composição química do material e na microestrutura. Na Figura 8, observa-se um aumento significativo de ferrita ( $\delta$ ), em espinha e laminar, na matriz austenítica, influenciadas pela energia de soldagem. Ou seja, quanto maior a energia de soldagem, maior será a fração volumétrica de ferrita, elevando os valores da microdureza do revestimento.

Figura 8 – Mudança na microestrutura decorrente da variação de energia



Fonte: Melo *et al.*(2012, p.10)

## 2.3 Soldagem de revestimentos

O processo de soldagem de revestimento pode ser definido como a deposição de uma liga sobre uma superfície do metal de base, obtendo as propriedades adequadas para cada condição de trabalho (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005). O processo de revestimento é classificado de acordo com a sua aplicação e as propriedades que se deseja obter (CONDE, 1986):

- a) revestimento de aços inoxidáveis (“cladding”) – tem por finalidade a obtenção de superfícies com propriedades anticorrosivas;
- b) revestimento de reconstrução (“build-up”) – empregado na recuperação de componentes avariados pelo desgaste;
- c) amanteigamento (“buttering”) – aplicado com um ou múltiplos passes de solda em uma face da junta;
- d) revestimento duro (“hardfacing”) – tem a finalidade de aumentar a resistência ao desgaste da superfície com a deposição de material.

Em consonância com o desenvolvimento em estudo, optou-se pela utilização do processo de revestimento duro, devido à aplicabilidade diversa de seus recursos técnicos, e à ampla variedade de ligas especiais à sua disposição. Desta forma, descreve-se na sequência do texto, a procedimentos necessários para a aplicação da técnica de revestimento duro.

### 2.3.1 Processos de revestimento duro

O processo de revestimento duro pode ser definido como a deposição de material, por fusão, sobre uma superfície, a fim de minimizar os efeitos dos desgastes abrasivos, do

processo de erosão, de cavitação e de adesão (WAINER; BRANDI; MELLO, 2005).

A soldagem de revestimento duro é utilizada em aplicações com aferição de altas taxas de desgaste abrasivo e impacto (conjunto porta faca, camisa de moenda, dentes de engrenagem, etc). Essas deposições normalmente são realizadas com camadas espessas, acima de 2 mm, podendo ser utilizadas multicamadas para inibir problemas metalúrgicos. Para tanto, eletrodos e arames tubulares estão disponíveis para garantir diferentes graus de proteção contra o desgaste abrasivo, erosivo e o calor.

### *2.3.1.1 Classificação dos arames tubulares para revestimento duro*

Devido à grande concorrência tecnológica no mercado global, oriunda do desenvolvimento econômico, busca-se o avanço de parâmetros que potencializem a competitividade, através da redução dos custos e do aumento da produtividade.

O processo de soldagem, com arames tubulares, tem em seu escopo a junção das melhores características do arco submerso, bem como técnicas de soldagem que empregam o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) como gás de proteção, na soldagem com processo GMAW e FCAW. A junção da proteção externa, com o fluxo contido no interior do arame, proporciona cordões com alto grau de qualidade e uma soldagem com menos respingos (ESAB, 2011).

A proteção do arco e do cordão de solda é realizada através do fluxo contido no interior dos arames e pode ser complementada por uma proteção gasosa alimentada externamente (WAINER, BRANDI, MELLO, 2005). O fluxo contido no interior, pode ser utilizado tanto para a proteção da poça de fusão, quanto para acrescentar características mecânicas ao equipamento revestido (ESAB, 2011).

Segundo a UTP (2011), os arames tubulares de revestimento duro são recomendados para esta aplicação pois depositam matrizes com elevados teores de Cr, Mo e Nb etc., formando colônias complexas de carbonetos na superfície revestida, que atenuam 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, 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 Norma DIN 8555 é responsável pela classificação dos arames tubulares para revestimento duro. Com base no escopo normativo, apresenta-se na sequência do texto, entre as Tabelas 3 a 7, especificações técnicas relativas ao arame MF-10-GF-65-GR, tomado por exemplo. Na Tabela 3, apresenta-se o processo de soldagem para qual o arame MF-10-GF-65-GR é indicado, segundo a norma DIN 8555, por meio da primeira descrição na classificação.

Na Tabela 4, representa-se o tipo de metal de adição, ou seja, a quantidade de componentes químicos compostos na liga, segundo a norma DIN 8555, através da segunda descrição na classificação.

Tabela 3 – Representação dos processos de soldagem

Exemplo	Sigla	Descrição
	<b>G</b>	Soldagem oxi-acetilênica
	<b>E</b>	Soldagem manual ao arco elétrico com eletrodo revestido
	<b>MF</b>	Soldagem ao arco elétrico utilizando-se arames tubulares
	<b>TIG</b>	Soldagem ao arco elétrico com eletrodo não consumíveis de tungstênio
	<b>MSG</b>	Soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa
	<b>UP</b>	Soldagem ao arco submerso

Fonte: ESAB (2011, p.27).

Tabela 4 – Tipo de metal de adição

Exemplo	Sigla	Descrição
	<b>1</b>	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.
	<b>2</b>	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.
	<b>3</b>	Ligado com as propriedades dos aços de trabalho à quente.
	<b>4</b>	Ligado, com as propriedades dos aços rápidos.
	<b>5</b>	Ligados, com mais de 5%Cr, com um baixo teor de C (até mais ou menos 0,2%).
	<b>6</b>	Ligados, com mais de 5%Cr, com um teor maior de C (até mais ou menos 0,2% a 2,0%).
	<b>7</b>	Martensíticos ao Mn com 11 a 18%Mn, mais de 0,5%C e até 3%Ni.
	<b>8</b>	Austeníticos Cr-Ni-Mn
	<b>9</b>	Aços Cr-Ni (resistente à oxidação, ácidos e calor)
10	<b>10</b>	Com um alto teor de C e alto teor de Cr e sem agentes adicionais formadores de carbonetos
	<b>20</b>	À base de Co, ligados a Cr-W, com ou sem Ni e Mo.
	<b>21</b>	À base de carbonetos (sintetizado, fundido ou tubular).
	<b>22</b>	À base de Ni, ligado ao Cr, ligado ao Cr-B.
	<b>23</b>	À base de Ni, ligado ao Mo, com ou sem Cr.
	<b>31</b>	À base de Cu, ligado ao Sn
	<b>32</b>	À base de Cu, ligado ao Al.
	<b>33</b>	À base de Cu, ligado ao Ni.

Fonte: ESAB (2011, p.27).

As Tabelas 5, 6 e 7 apresentam os métodos de deposição, as faixas de durezas e as propriedades dos metais de adição segundo a norma DIN 8555, através da terceira, quarta e

quinta descrição da classificação.

Tabela 5 – Método de produção do arame

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

Fonte: ESAB (2011, p.27).

Tabela 6 – Nível de dureza dos consumíveis

<b>Exemplo</b>	<b>Nível de Dureza</b>	<b>Faixa de Dureza</b>
	<b>40</b>	$37 \leq \text{HRc} \leq 42$
	<b>45</b>	$42 < \text{HRc} \leq 47$
	<b>50</b>	$47 < \text{HRc} \leq 52$
	<b>55</b>	$52 < \text{HRc} \leq 57$
	<b>60</b>	$57 < \text{HRc} \leq 62$
65	<b>65</b>	$62 < \text{HRc} \leq 67$
	<b>70</b>	$\text{HRc} \geq 68$
	<b>150</b>	$125 \leq \text{HB} \leq 175$
	<b>200</b>	$175 < \text{HB} \leq 225$
	<b>250</b>	$225 < \text{HB} \leq 275$
	<b>300</b>	$275 < \text{HB} \leq 325$
	<b>350</b>	$325 < \text{HB} \leq 375$
	<b>400</b>	$375 < \text{HB} \leq 425$
	<b>500</b>	$450 < \text{HB} \leq 530$

Fonte: ESAB (2011, p.27).

Tabela 7 – Propriedades dos metais de adição

<b>Exemplo</b>	<b>Sigla</b>	<b>Descrição</b>
	<b>C</b>	Resistente à corrosão
G	<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
R	<b>R</b>	Resistente à 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, p.27).

### 2.3.1.2 Escolha do processo de soldagem para aplicação de revestimento duro

Atualmente, as técnicas de soldagem por fusão mais empregadas na deposição de revestimento duro são os processos LBW, PAW, SMAW, GTAW, GMAW, FCAW, SAW. Dentre todos os processos, o mais empregado na indústria é o processo com arco elétrico, por meio de eletrodo revestido, devido ao baixo custo do equipamento e à facilidade de aplicação dos cordões. Em contrapartida, os arames tubulares apresentam melhor qualidade e alta produtividade (BUCHELY *et al*, 2005).

Já para Wainer, Brandi e Mello (2005), o processo de soldagem mais adequado à aplicação de um revestimento depende de diversos fatores. Por meio da relação entre as características químicas e a microestrutura do depósito, constata-se o conjunto de propriedades mecânicas desejadas para que o revestimento resista ao desgaste.

Tabela 8 – Técnica de soldagem

<b>Características</b>	<b>SMAW</b>	<b>GTAW</b>	<b>GMAW</b>	<b>FCAW</b>	<b>SAW</b>	<b>OAW</b>	<b>PAW</b>
<b>Custo</b>	1	4	3	2	3	1	4
<b>Energia de soldagem</b>	2	2	3	3	4	3	1
<b>Diluição (%)</b>	10 à 30	2 à 20	10 à 50	20 à 40	30 à 80	2 à 80	20
<b>Taxa de deposição (kg/h)</b>	1 à 5	0,2 à 4,0	1 à 15	1 à 15	6 à 20	0,2 à 1	2 à 6

Fonte: O autor (2016), Adaptado de Wainer, Brandi e Mello (2005)

Ziedas e Tatini (1997) define que, a seleção do processo de soldagem acompanhado da seleção da liga, são os dois parâmetros fundamentais para a otimização e estabilidade do processo de revestimento. Outros fatores técnicos que influenciam na seleção do processo, são as propriedades e a qualidade do revestimento, as características físicas das peças, as propriedades metalúrgicas do metal de base, a forma e a composição da liga a ser depositada e a habilidade do soldador. Atualmente as condições econômicas e o custo do processo a ser utilizado são parâmetros determinantes na seleção final do processo. Neste sentido a Tabela 8 apresenta uma comparação entre os principais processos de soldagem com os fatores mais importantes no processo de revestimento. Considerando que o processo de soldagem TIG apresenta uma das melhores taxas de diluição e que o mesmo pode ser automatizado, diminuindo assim as variações durante o processo de soldagem de revestimento, optou-se pela utilização deste para a aplicação dos cordões de revestimento.

### 2.3.1.3 Taxa de diluição

Chama-se percentual de diluição a quantidade de material de base que participa da formação do material depositado. Esta interação entre materiais, em muito casos, é o principal parâmetro a ser monitorado na soldagem de revestimento duro. Na maioria das vezes, o material a ser depositado apresenta características superiores ao metal de base, devido a uma composição química mais elaborada que contém elevados teores de Cromo (Cr), Molibdênio (Mo), Níquel (Ni), Nióbio (Nb), Tungstênio (W) e Carbono (C), Titânio (Ti), podendo, por exemplo, elevar a resistência ao desgaste do componente (FILHO *et al.*, 2010) (COLAÇO, 2013).

A diluição depende do tipo de junta, do processo utilizado ou dos parâmetros. Esta pode sofrer mínima variação percentual, sendo, neste caso, indicada para soldagem de revestimento, como também pode chegar a 100% na soldagem convencional de união (RYUICHI; HIROSHIGE, 2005).

Segundo AWS (1991), a diluição pode ser definida pela Equação 2:

$$\text{Diluição} = \left[ \frac{\text{área do reforço}}{\text{área do reforço} + \text{área de penetração}} \right] \times 100 [\%] \quad \text{Eq. 2}$$

Cardoso e Colaço (2015) apontam os efeitos da deposição de revestimento duro com o processo de soldagem TIG, variando a alimentação dos arames entre um e dois arames. Os autores concluíram que a taxa de diluição sofre pouca interferência com o tipo de variação da alimentação, para ambos os casos (um ou dois arames); entretanto, a microdureza para alimentação com duplo arame apresenta-se abaixo da microdureza observada com alimentação em arame único.

Oliveira, Gallego e Ventrella (2014) avaliaram os efeitos da taxa de diluição e microdureza na resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos duros depositados com múltiplas camadas com a liga FeCrC. Afirmaram que a taxa de diluição influenciou diretamente na microestrutura do revestimento duro em todas as camadas. As camadas que apresentaram carbonetos primários obtiveram desempenho acima dos que apresentaram carbonetos secundários sob baixa tensão de ensaio abrasivo.

## 2.4 Desgaste em superfícies revestidas

Desgaste é definido pela Norma ASTM G77-91 como “dano a uma superfície sólida envolvendo uma perda progressiva de materiais devido à movimentação relativa entre superfícies ou em contato com outro material ou materiais”. A partir desta definição, pressupõe-se três conceitos principais sobre o desgaste (WAINER; BRANDI; MELLO, 2005):

- a) o desgaste é um fenômeno tipicamente de superfície;
- b) o estudo da movimentação relativa auxilia na compreensão dos fenômenos envolvidos e os fatores que o aceleram;
- c) o tipo de material influencia na severidade do desgaste e no tipo de desgaste que atuará na superfície.

Segundo a mesma Norma ASTM G77-91 o desgaste pode ser dividido em:

- a) abrasão: ocorre devido à presença de partículas ou protuberâncias duras pressionadas sobre uma superfície com movimentação relativa;
- b) adesão: desgaste devido à interação entre duas superfícies sólidas, havendo transferência de material entre estas;
- c) corrosão: advém da reação química e eletroquímica entre as superfícies com o meio circundante;
- d) erosão: há a perda progressiva de material através da interação da superfície com o fluido, choque de um jato líquido ou partículas sólidas;
- e) cavitação: formação de bolhas de vapor ou gases em uma superfície em que, a implosão destas, retira material da superfície.

Segundo Wainer, Brandi e Mello (2005), o processo de desgaste, grande parte das vezes, atua em consonância, ou seja, observa-se a atuação de dois ou mais tipos de desgastes em uma mesma superfície. A interação entre os tipos de desgaste diminui consideravelmente a vida do componente, induzindo, muitas vezes, à recuperação ou troca do equipamento avariado. Segundo pesquisa realizada por Rabiniwivz (1985), a deterioração da superfície é responsável por aproximadamente 70% da perda de equipamentos avariados, fator significativo na economia.

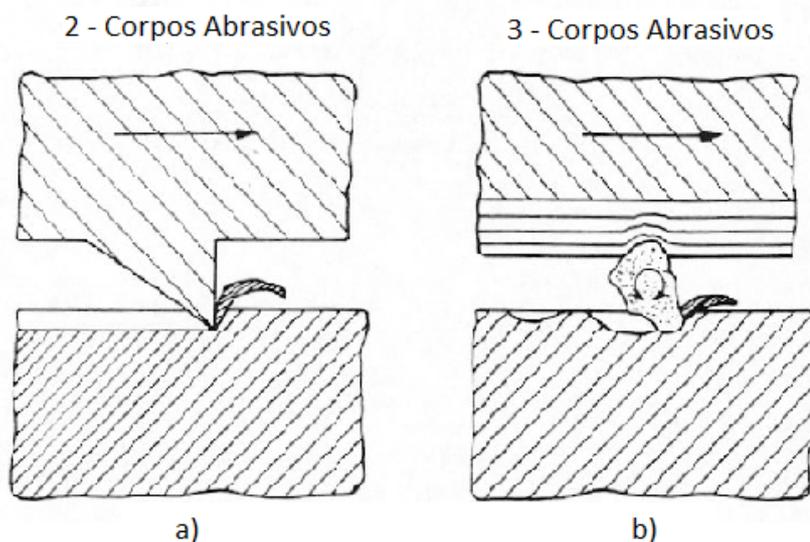
Responsável por 50% de todos os danos causados pelo fenômeno de desgaste em equipamentos, estima-se que os gastos diretos e indiretos gerados pelo desgaste abrasivo nos equipamentos em países desenvolvidos ficam em torno de 1 a 5% do PIB (CZICHOS,1992). Com base nos dados, optou-se por compreender os efeitos deste fenômeno sobre superfícies

revestidas. Serão descritos a seguir os principais fatores relacionados ao desgaste abrasivo.

#### 2.4.1 Desgaste abrasivo

De acordo com a Norma ASTM G40, o desgaste abrasivo é definido como “a perda progressiva de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras que são forçadas contra uma superfície, ao longo da qual se movem”. Este fenômeno ocorre em equipamentos de terraplenagem, pás de turbinas, tubulações, moinhos, trituradores, rolos de laminação, etc. Uma das maiores dificuldades de entender, prever e controlar o desgaste abrasivo, está na falta de compreensão dos mecanismos envolvidos durante o processo, pois na grande maioria dos casos, não há um único mecanismo atuante (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2002).

Figura 9 – Modo de desgaste de dois e três corpos



Fonte: O autor (2016), Adaptado de Gahr, (1987, p.84)

A literatura define dois tipos básicos de desgastes abrasivos, dois e três corpos, determinados pela forma que os grãos são ordenados na superfície em que estão passando (HUTCHINGS, 1992). Conforme observado na Figura 9 a), no desgaste abrasivo a dois corpos, os grãos ou as protuberâncias são rigidamente fixas no primeiro corpo, causando risco no segundo corpo, com a incrementação de movimento relativo. Para o desgaste a três corpos, Figura 9 b), os grãos e as protuberâncias ficam soltas, livres para rolares em todos os sentidos (HUTCHINGS, 1992) (GAHR, 1987).

Conforme salienta Regattieri (2006), em estudo realizado no ferro fundido branco com altos teores de cromo e molibdênio (diferentes percentuais), as ligas eutéticas (colônias de

precipitação de carbonetos) apresentam melhores resultados quanto à taxa de desgaste no ensaio não padronizado LTM a três corpos, devido ao tamanho, forma e distribuição do carboneto  $Cr_7C_3$ .

Chi-mig *et al.* (2010), afirmam que a soldagem de revestimento duro com o processo de soldagem TIG apresenta boas qualidades na resistência ao desgaste abrasivo. O fato é oriundo do aumento da concentração de Carbono (C) nas liga de FeCrC (2,3% para 5,9%). A maior concentração (5,9% de Carbono) apresentou 3,6 vezes mais resistência no ensaio de desgaste abrasivo a seco (roda de borracha), do que a menor concentração (2,3% de carbono), devido ao aumento da formação de carbonetos na superfície revestida.

Em estudos realizado por Leite e Marques (2009), as ligas de FeCrC com adição de Nb e B apresentaram os melhores valores médio de dureza superficial e de perda de massa nos ensaios de desgaste abrasivo de baixas tensões. O estudo foi realizado utilizando-se as ligas FeCrC, FeCrCNb e FeCrCNbB depositadas sobre uma chapa de aço A36 com o processo de soldagem FCAW.

Tabela 9 – Classificação por severidade do desgaste

Situação típica	Modo de desgaste abrasivo		
	Moderado	Severo	Extremo
<b>Tamanho da partícula</b>	Pequena	Média	Grande
<b>Restrição ao movimento</b>	Livre	Parcialmente restringida pela contra face	Fortemente constringida
<b>Geometria da partícula</b>	Arredondado	Anguloso	Anguloso
<b>Tensão de contato</b>	Baixa – Insuficiente para fraturar as partículas	Moderada – Suficiente para fraturar as partículas	Muito alta – Causa deformação macroscópica
<b>Mecanismos dominante</b>	Microsulcamento	Microcorte	Microcorte
<b>Termos equivalentes</b>	- Abrasão baixa tensão - Abrasão por riscamento - Baixa tensão a três corpos	- Abrasão à alta-tensão - Abrasão por moagem - Alta tensão a três corpos - Baixa tensão a dois corpos.	Abrasão por goivadura - Alta tensão a dois corpos

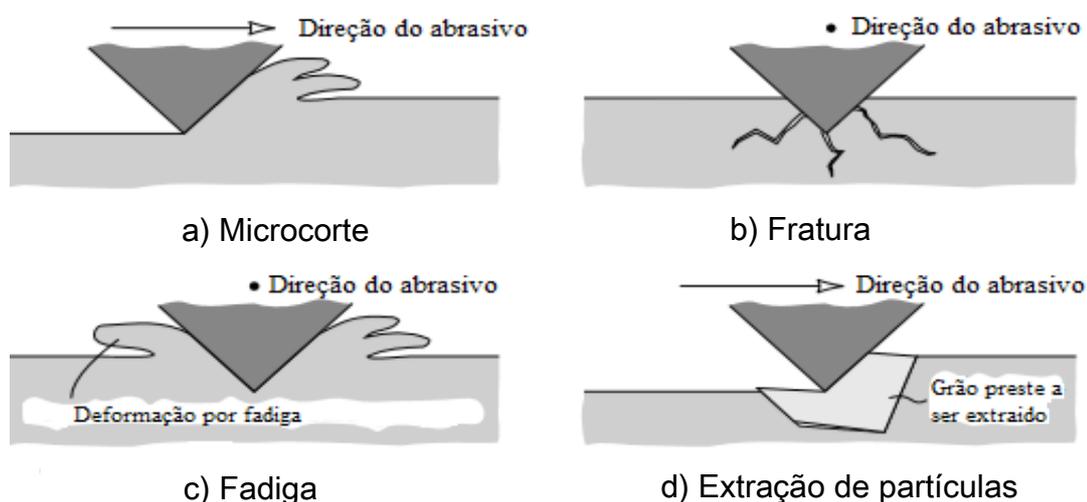
Fonte: O autor (2016), Adaptado de Gates (1998)

Já segundo Gates (1998), a classificação do desgaste abrasivo de dois e três corpos para o ensaio do tipo roda de borracha, padronizado pela Norma ASTM G65, deve ser utilizado com ressalvas; durante o ensaio, grãos abrasivos podem se encrostar na roda de borracha apresentando características de desgaste a dois corpos. Para isto, o autor classifica o desgaste abrasivo em três tipos de regimes de gravidade: moderado, severo e extremo. As variáveis consideradas para esta classificação são o tamanho, angulosidade, restrição ao movimento dos abrasivos e os níveis de tensão aplicada. A Tabela 9 apresenta a classificação por severidade,

Ibidem.

Outra forma de classificar o desgaste abrasivo é por meio dos tipos de mecanismos de desgaste atuantes, como apresentado na Figura 10, podendo ser por microcorte, fratura, fadiga e extração de grãos. Os mecanismos de desgaste são definidos pelo procedimento, químico ou físico, de retirada de material da superfície. No início dos estudos de fundamentação sobre o desgaste, por volta de 1967, imaginava-se que o mecanismo de desgaste abrasivo fosse semelhante aos processos de cortes convencionais. A ideia provou-se controversa com o avanço dos microscópios eletrônicos por varredura, o que permitiu uma visão mais detalhada das superfícies desgastadas. Concluiu-se, então, que existem um ou mais mecanismos complexos agindo sobre o desgaste (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2002).

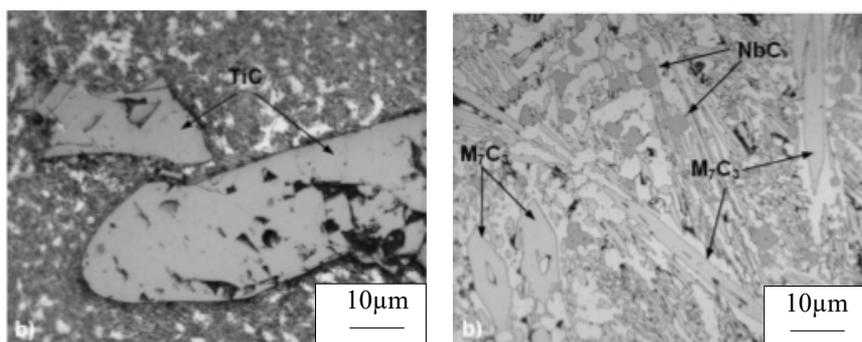
Figura 10 – Mecanismos de desgaste



Fonte: O autor (2016), Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2002 p.484)

Lima e Ferraresi (2009) e Macedo e Gallego (2009) avaliaram os efeitos do desgaste abrasivo na microestrutura de revestimentos duros, quando depositados em camadas únicas com diferentes ligas de FeCrC. Os autores concluíram que as microestruturas formadas por fases duras e por carbonetos apresentaram um melhor desempenho em relação ao desgaste abrasivo. Elementos como a composição da liga e o tratamento térmico auxiliam na formação de carbonetos distintos do tipo MC, M<sub>6</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub>, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> e Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>, onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos e C, Carbono. Na Figura 11, observa-se a configuração dos carbonetos de Ti, Nb e carbonetos primários.

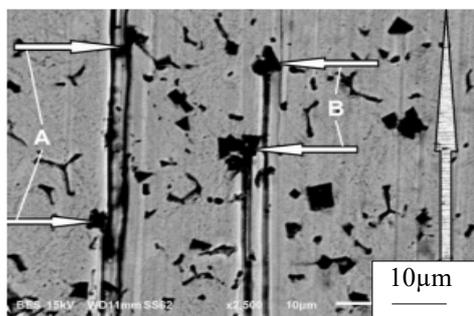
Figura 11 – Configuração dos carbonetos de Ti, Nb e carbonetos primários.



Fonte: Lima e Ferraresi (2009)

Colaço (2013) afirma em seu estudo de revestimento duro, com a liga FeCrC-Ti em aços AISI 1020, que a presença de uma matriz com carbonetos de titânio pode barrar grãos e dendritos oriundos do processo de microcorte, intervindo na perda de massa. O autor concluiu que a variável está no tamanho dos carbonetos, pois quando são maiores que os grãos e dendritos, impendem sua passagem e deformação. Em contrapartida, quando os carbonetos são menores, não influenciam na deformação causada pelo grão e dendritos, permitindo sua passagem na superfície da amostra, como observado na Figura 12.

Figura 12 – Mecanismo de microcorte em revestimento duro, a indicação “A” apresenta a trilha de desgaste gerada pelo abrasivo, na indicação “B” esta trilha é barrada por TiC.



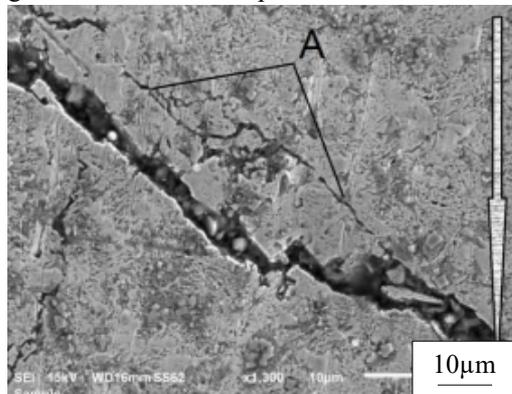
Fonte: Colaço; Maranhão (2013, p.10)

Oliveira; Gallego e Ventrella (2014), afirmam ainda, que a quantidade de camadas de revestimento interfere na microdureza e na resistência ao desgaste abrasivo. Buchely *et al.* (2005) realizaram ensaios em um abrasômetro, do tipo roda de borracha, para qualificar seus revestimentos depositados por eletrodo com altos percentuais de Cr, W e carbonetos complexos. Os autores constataram uma diminuição da perda de massa com o aumento do número de camada de Cromo e carbonetos complexos. Verificaram também, maior presença de trincas nos ensaios realizados com os eletrodos de Cromo.

Segundo Colaço (2013) e Lima e Ferraresi (2009), o desgaste abrasivo pode ser influenciado diretamente pela presença de trincas decorrentes do processo de solidificação do

material depositado para revestimento duro, como pode ser observado na Figura 13. A passagem decorrente dos grãos abrasivos gera trincas paralelas às trincas já existentes, deixando o revestimento vulnerável ao desprendimento de material.

Figura 13 – Trincas na superfície do revestimento



Fonte: Colaço (2013, p 10)

## 2.5 Ensaios de desgaste

Segundo Li (2012), a compreensão dos efeitos do desgaste, sobre determinada superfície é fundamental para orientar a seleção e o desenvolvimento de materiais mais resistentes ao mesmo. Para isto, busca-se, em laboratório, condições semelhantes às sofridas pelos componentes, a fim de prever o desempenho de desgaste e os mecanismos envolvidos neste.

Com o intuito de avaliar os efeitos do desgaste, inúmeros ensaios são utilizados, tendo cada técnica e procedimento, características particulares; tais técnicas são descritas em literaturas e normas específicas. Os aparelhos de ensaios de desgaste são conhecidos por desgaste testador, tribotester ou tribômetro. Três dos ensaios mais utilizados em laboratório serão descritos abaixo (LI, 2012):

a) tribômetro de desgaste por *pin-on-disc*: regido pela Norma ASTM G99, trata-se de um ensaio a dois corpos, onde a amostra cilíndrica plana é rotacionada contra um pino. O resultado do ensaio será uma pista de desgaste circular.

b) tribômetro de desgaste por *rolamento deslizante*: um dos ensaios mais populares para análise de desgaste a dois corpos. Consiste no emprego de dois discos fixados em dois eixos paralelos. Um eixo é impulsionado através de um motor e um trem de engrenagens, enquanto o outro fica fixo. Grãos abrasivos podem ser utilizados para alcançar o ensaio de desgaste a três corpos.

c) tribômetro de desgaste por *roda de borracha*: neste ensaio a amostra é fixada contra

um disco ou roda de borracha em rotação padrão. O abrasivo é inserido entre a roda e a amostra através de um bocal dosador e a carga estática é aplicada através de uma alavanca.

Por se tratar de um ensaio fundamental para a realização deste trabalho, o ensaio de desgaste por roda de borracha terá seu procedimento abordado no decorrer da análise.

### 2.5.1 Abrasômetro do tipo roda de borracha

O equipamento abrasômetro do tipo “roda de borracha” é utilizado para determinar a resistência ao riscamento da superfície do material, ou seja, simular em laboratório condições reais de desgaste abrasivo (areia) em materiais metálicos. Regido pela Norma ASTM G65, os principais elementos do equipamento são a roda metálica revestida com o polímero de dureza específica (60 Shore), o tipo de carga a ser aplicada e o tipo de abrasivo, que variam com o procedimento a ser adotado no ensaio (ASTM G65-00).

Tabela 10 – Parâmetros para os testes segundo a Norma ASTM G65

<b>Procedimento especificado</b>	<b>Força N(lb)</b>	<b>Número de revoluções (rpm)</b>	<b>Comprimento do ensaio</b>	
			<b>m</b>	<b>(ft)</b>
<b>A</b>	130(30)	6000	4309	14 138
<b>B</b>	130(30)	2000	1436	4 711
<b>C</b>	130(30)	100	71,8	236
<b>D</b>	45(10,1)	6000	4309	14 138
<b>E</b>	130(30)	1000	718	2 360

Fonte: Norma ASTM G65 (2001, p.260)

O processo de ensaio consiste na aplicação de uma força preestabelecida no corpo de prova contra a roda metálica revestida, desgastando-o com areia normalizada pela Norma ABNT NBR 7214 (ABNT 1982). Segundo a normativa, os ensaios de desgaste devem seguir as configurações da Tabela 10.

A Norma ASTM G65 salienta que, a correta escolha do procedimento deve levar em consideração fatores como o grau específico de resistência ao desgaste ou a espessura do material de teste. A seguir serão descritos os procedimentos adotados para realização dos ensaios de “roda de borracha”, Ibidem.

Procedimento “A”: este procedimento é recomendado para condições severas de desgaste, podendo ser utilizado para listar materiais de baixa à alta resistência abrasiva;

Procedimento “B”: pequena variação do processo “A”, utilizado quando a perda de volume de material é maior que 100 mm<sup>3</sup>. Recomendado para materiais de média a baixa

resistência abrasiva;

Procedimento “C”: também é uma pequena variação do procedimento “A”, sendo recomendado para pequenas camadas;

Procedimento “D”: recomendado para materiais com baixa resistência abrasiva, pois a carga aplicada sobre o corpo de prova é inferior aos demais (45N);

Procedimento “E”: este por sua vez é variação do procedimento “B”, sendo recomendado para materiais de média à baixa resistência abrasiva.

Além dos procedimentos, a Norma ASTM G65 descreve o tipo de abrasivo de sílica para os ensaios e a abertura do bico do bocal para padronizar a vazão específica para cada procedimento. A Tabela 11 apresenta os tipos de abrasivos utilizados nos ensaios de desgaste abrasivo quanto a sua granulometria.

Tabela 11 – Tamanho dos abrasivos segundo Norma ASTM G65

<b>Tamanho da peneira</b>	<b>Abertura</b>
<b>40</b>	425µm
<b>50</b>	300µm
<b>70</b>	212µm
<b>100</b>	150µm

Fonte: Norma ASTM G65 (2001, p.254)

### 3. MATERIAIS, EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1 Materiais

O substrato utilizado na deposição de todos os cordões e revestimento foram chapas de aço carbono SAE 1020, com dimensões de 150 mm de largura, 200 mm de comprimento e 6,5 mm de espessura. Para a realização das soldas foi utilizado arame tubular com diâmetro de 1,6 mm, contendo em sua composição C, Si, Mn, Cr, Mo, V, W, Nb, Co e B, conforme pode ser observado os percentuais de cada elemento na Tabela 12. Os certificados de qualidade dos arames estão nos Anexos A, B e C.

Tabela 12 – Composição química dos arames utilizados

Arame- Norma DIN 8555	Composição Química (%wt)											
	COD	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	Nb	Co	B	Liga
UTPAF LEDURIT 60 MF-10-GF-60-GR	“60”	3,34	0,82	0,314	27	0,026	-	0,007	-	0,010	0,311	FeCrC-B
UTPAF LEDURIT 68 MF-10-GF-65-GR	“68”	3,41	1,05	0,228	17,88	-	-	-	3,060			FeCrC-Nb
UTPAF LEDURIT 70 MF-10-GF-70-GRTZ	“70”	4,56	0,57	0,25	19	6,10	0,67	1,53	5,5			FeCrC- NbW

Fonte: O autor (2016)

A proteção da poça de fusão foi realizada com o gás inerte Argônio puro com vazão de 25 L/min, com a finalidade de proteger contra contaminação por gases externos que possam influenciar o resultado final. Outros materiais importantes pode ser citados como: o eletrodo de Tungstênio com adição de 2% de tório, a solução de alumina 2 µm utilizada para o polimento das amostras, o reagente Villela utilizado para o ataque químico das superfícies das amostras e a areia padronizada pela Normal Brasileira nº 100 (0,15) em embalagem de 25 kg usada no ensaio de desgaste abrasivo a baixa tensão.

#### 3.2 Equipamentos

Neste capítulo serão apresentados os equipamentos utilizados para a realização, preparação e obtenção dos dados relatados neste trabalho.

### 3.2.1 Bancada para deposição dos cordões

Foi utilizada uma bancada de soldagem composta por um sistema de deslocamento automático do tipo cartesiano em X e Y para a movimentação da tocha, conforme apresenta a Figura 14. O deslocamento é realizado através de motores de passo, cremalheira, polias e correias. A bancada foi equipada com uma fonte de soldagem SUMIG Lion 300 operando em corrente contínua com polaridade direta (CC-) e corrente pulsada (CP). A regulagem da corrente pode variar de 20 a 300 A. Além da fonte de soldagem, foi necessário a utilização de cilindro de gás, regulador de pressão, mangueiras e tocha de soldagem.

Figura 14 – Fonte e manipulador utilizado para deposição dos revestimentos



Fonte: O autor (2016)

Para a deposição dos cordões, foram adaptados dois alimentadores convencionais, tracionadores de arame, da SWISSFEED SF300, com a possibilidade de avanço até 24 m/min. Os alimentadores foram posicionados paralelamente na bancada de ensaio, garantindo a alimentação contínua de ambos os arames na poça de fusão.

### 3.2.2 Equipamentos para o corte e acabamento superficial das amostras

Para o corte das amostras, utilizou-se o equipamento de eletroerosão a fio AGIE CHARMILLES FW-1U, observado na Figura 15. O processo de usinagem por eletroerosão a fio consiste na remoção de material através de descargas elétricas entre a peça e um fio de latão ou tungstênio submerso em água deionizada, gerando a trajetória do corte da peça.

Figura 15 – Máquina de eletroerosão a fio



Fonte: O autor (2016)

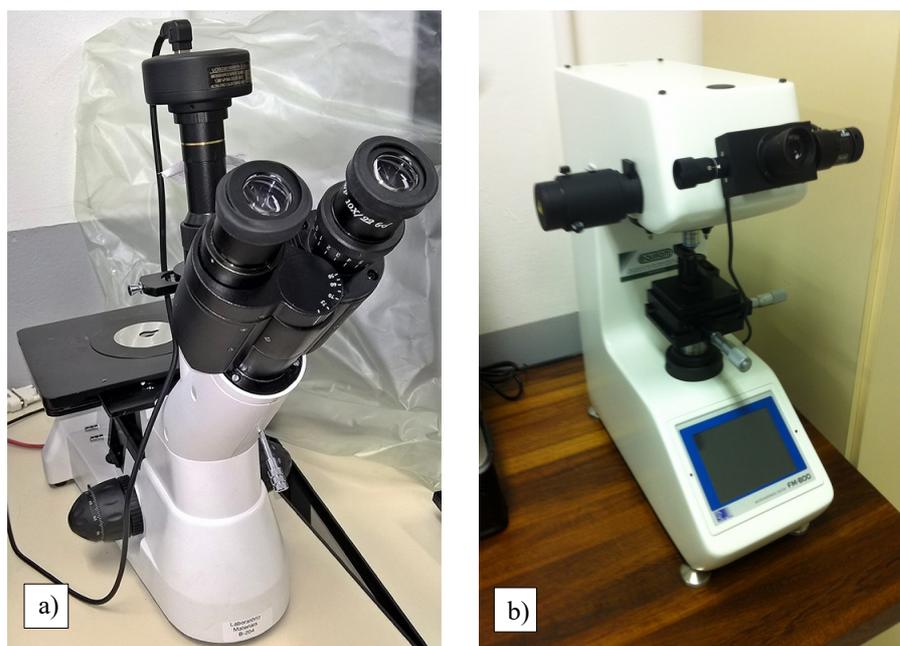
Após o corte, foi realizada a retificação das amostras para melhorar o acabamento superficial, garantido assim, a planeza das amostras utilizadas nos ensaios de desgaste abrasivo e diminuindo o tempo de lixamento para a preparação metalográfica. O processo de retificação foi realizado em uma retificadora plana tangencial MELLO P25, com sistema de avanços e ciclo vertical automático. Para a preparação metalográfica, as amostras foram lixadas e polidas em uma lixadeira e politriz FORTEL modelo PLF.

### 3.2.3 Equipamentos para análise da microestrutura e microdureza

Para a análise da microestrutura, utilizou-se um microscópio trinocular invertido XJM 400, observado na Figura 16 a), com lentes objetivas com ampliação de 20, 40 e 100X. O equipamento é provido de uma câmera acoplada ao microscópio, com resolução de 1,3 megapixels, e software TOUP VIEW, responsável pela captura das imagens da microestrutura do material, conhecida como micrografia.

A dureza HRC foi obtida com um equipamento de microdureza FM-800, observado na Figura 16 b). O equipamento possibilita a obtenção das microdurezas Vickers (HV) e Knoop (HK), com conversão para as escalas Brinell (HB) e algumas escalas Rockwell, incluso escala “C”, com indicação no painel. As cargas padronizadas disponíveis no equipamento estão entre 50 g e 1 kg.

Figura 16 – Microscópio e Microdurômetro utilizado para análise das amostras



Fonte: O autor (2016)

### 3.2.4 Equipamento para análise do desgaste abrasivo do tipo “roda de borracha”

Seguindo-se a Norma ASTM G65, construiu-se nos laboratórios do Instituto Federal de Santa Catarina – Campus Geraldo Werninghaus, o equipamento de desgaste abrasivo do tipo roda de borracha. Este equipamento é constituído por um disco de aço SAE 4140 revestido de borracha vulcanizada com diâmetro externo de 228,6 mm e dureza de 60 Shore, um recipiente para armazenagem do abrasivo, dispositivo de fixação para as amostras e uma carga estática padronizada segundo esta norma, necessitando atender a força normal de 130 N na amostra conforme indicação da seta na Figura 17 (ASTM, 2001).

Figura 17 – Equipamento roda de borracha



Fonte: O autor (2016)

### 3.3 Procedimento Experimental

Os parâmetros estabelecidos para a realização dos ensaios, observados na Tabela 13, foram selecionados segundo as especificações do fabricante dos consumíveis utilizados e por pesquisas já realizadas na área de soldagem de revestimento duro. Os revestimentos foram depositados com arames tubulares específicos para resistência à abrasão. Além dos arames, foram variados também os tipos de corrente, sendo elas corrente contínua com polaridade direta (CC-) e corrente pulsada (CP-).

Tabela 13 – Parâmetros utilizados para a deposição e identificação dos cordões de solda

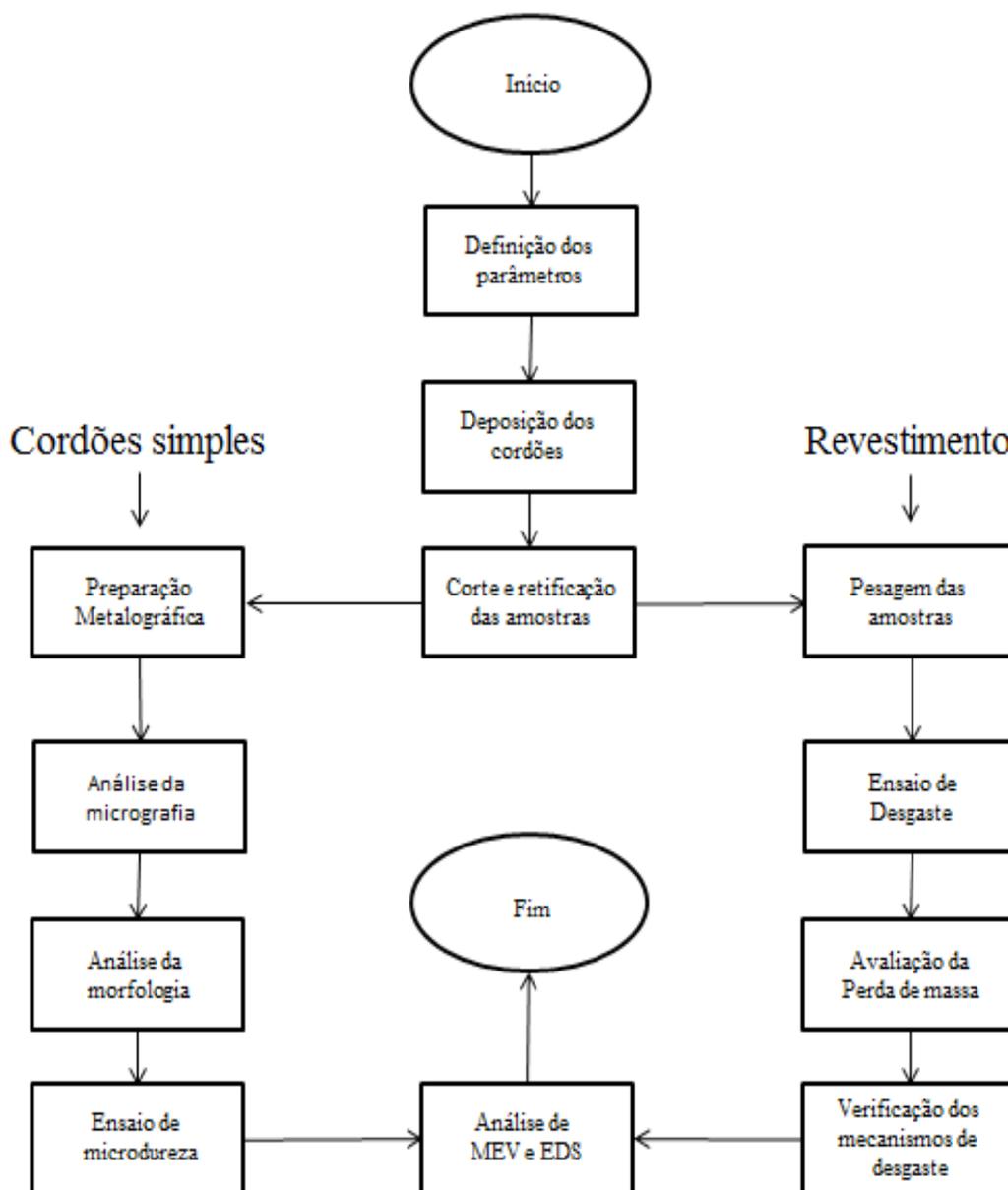
Condições	Parâmetros variáveis				Média
	Arames	Tipo de Corrente	Corrente de base	Corrente de pico	
1	60 – 68	Contínua (CC)	-	-	225
2	60 – 70				
3	68 – 70				
4	60 – 68	Pulsada (CP)	195	255	225
5	60 – 70				
6	68 – 70				

Fonte: O autor (2016)

A velocidade de soldagem ( $V_{sol}$ ), a distância entre a ponta do eletrodo de Tungstênio e a peça (DPEP) e o grau de inclinação da tocha foram mantidos constantes, sendo estes respectivamente, 15 cm/min, 7 mm e 75° com relação à peça. A velocidade e o grau de inclinação da alimentação dos arames foram 66 cm/min e 50°, respectivamente. Utilizou-se um eletrodo de Tungstênio com Tório de diâmetro 2,4 mm para a realização dos ensaios. Para aumentar a confiabilidade dos dados, cada experimento foi realizado duas vezes.

As etapas desenvolvidas para a realização desta pesquisa estão sendo apresentados no fluxograma (Figura 18) no decorrer do texto.

Figura 18 – Fluxograma das etapas realizadas

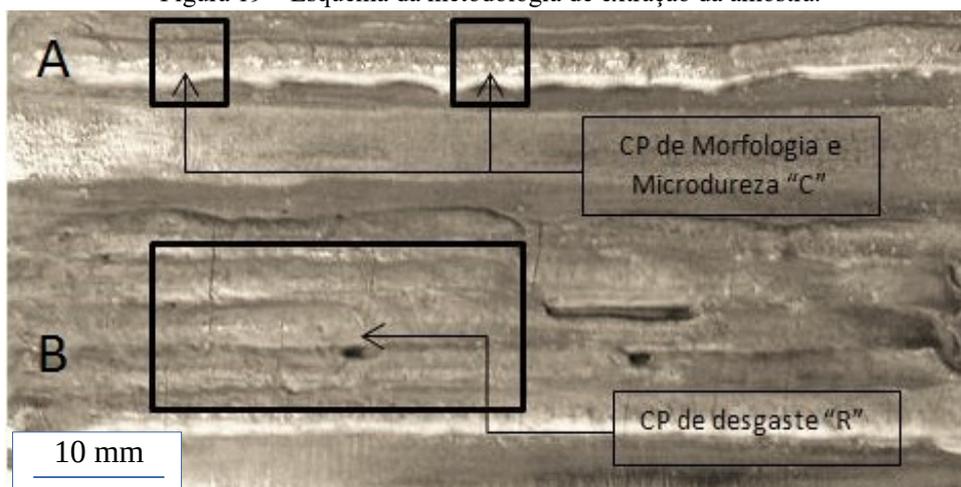


Fonte: O autor (2016)

### 3.3.1 Aplicação dos cordões

Os ensaios foram realizados alternando-se entre os parâmetros estabelecidos, garantindo o resfriamento das amostras. Estes são possíveis de ser observados na Figura 19. O cordão “A” foi depositado para a avaliação da geometria e o conjunto de cordões (revestimento) “B”, para a análise da perda de massa do revestimento. Para a deposição dos cordões de revestimento “B”, a sobreposição lateral foi de aproximadamente 40% da largura do mesmo.

Figura 19 – Esquema da metodologia de extração da amostra.

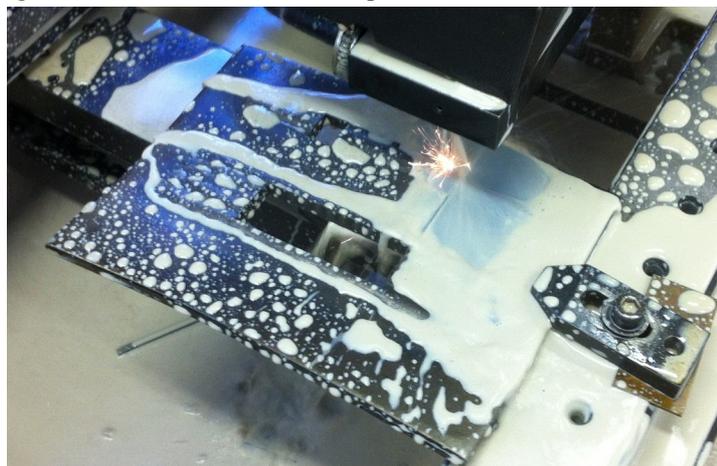


Fonte: O autor (2016)

### 3.3.2 Preparação metalográfica

Para a análise da morfologia e da microdureza foi necessário seccionar as amostras dos cordões depositados. Os cortes foram realizados conforme indicação “C” na Figura 19, no processo de corte por eletroerosão a fio, como observado na Figura 20. Ao término dos cortes, as amostras foram limpas e identificadas, sendo todas retificadas com a finalidade de melhorar a planicidade e o processo de lixamento.

Figura 20 – Corte das amostras no processo de eletroerosão a fio



Fonte: O autor (2016)

Em seguida, realizou-se a preparação metalográfica. Com as amostras já cortadas e retificadas foi necessário realizar o embutimento a frio devido ao seu tamanho, garantindo a planeza das amostras e um menor arredondamento das arestas, consequência do processo de lixamento. Para tanto, confeccionaram-se doze moldes de PVC, com 32 mm de diâmetro. A

escolha deste material deve-se ao fato do bom acabamento interno e da facilidade de extração das amostras após a cura da resina acrílica. Para o embutimento das amostras foi utilizada resina acrílica cristal, devido ao fato desta ser translúcida quando solidificada, facilitando a identificação das amostras. A identificação foi realizada através da etiquetagem codificada.

Na etapa seguinte, os moldes foram espalhados sobre uma mesa de mármore com vaselina sob a superfície. Em cada molde, duas amostras foram alocadas com suas etiquetas de identificação, como pode ser visto na Figura 21. Após a organização de todas as amostras, realizou-se a preparação da resina acrílica com o catalisador e posteriormente o preenchimento dos moldes.

Figura 21 – Embutimento a frio das amostras



Fonte: O autor

O lixamento das amostras foi realizado com as lixas 240, 320, 600, 800 e 1200. A troca da lixa por outra, com número maior, foi realizada sempre que observada a ausência de riscos na lixa em uso. Para tanto, Colpaert (2008) indica que na troca de lixa a amostra deve sempre ser rotacionada 90°, para que os riscos da lixa anterior fiquem perpendiculares aos riscos da nova lixa, procedimento realizado conforme citação. Após a lixa 1200, a amostra foi lavada com água corrente para a remoção de pequenas partículas de materiais removidos com a lixa, passando para o processo de polimento.

O polimento das amostras foi realizado com suspensão de alumina de 1µm sobre um pano de polimento metalográfico. No polimento, diferentemente do processo de lixamento no qual a amostra fica parada, a amostra deve ser rotacionada no sentido contrário da rotação do pano, minimizando a quantidade de riscos provenientes de grãos retirados no processo de lixamento. Após o polimento, as amostras foram lavadas para a retirada total da suspensão de alumina, limpas com um algodão embebido em álcool e seca com jato de ar quente.

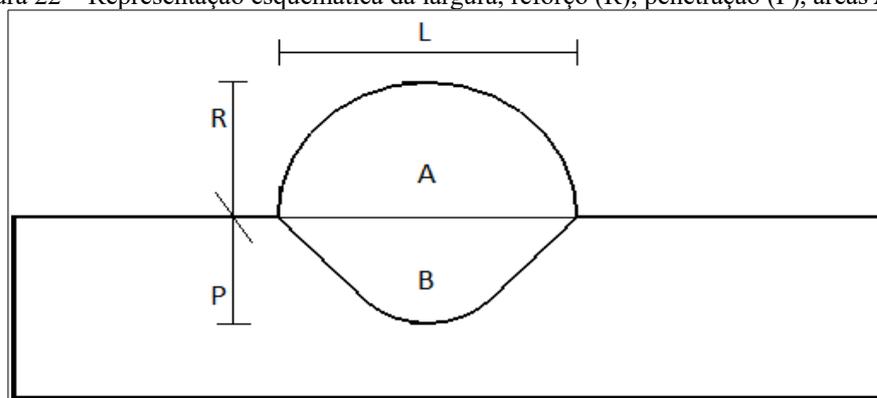
Para o ataque químico, utilizou-se a técnica da imersão, ou seja, a amostra foi imersa com a face polida para baixo em uma solução composta de 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico e 100 ml de etanol, solução reagente conhecida por Vilella. O ataque teve tempo médio de 2 minutos. Após o ataque químico, as amostras foram lavadas com água corrente

para remoção do excesso do reagente, sendo posteriormente limpas com um algodão embebido em álcool e secas com o jato de ar quente. O ataque químico é utilizado para a revelação das fases presentes.

### 3.3.2.1 Análise morfológica

Na análise morfológica foram avaliadas a largura (L), reforço (R), penetração (P) e áreas A e B do cordão de solda, de acordo com o esquema da Figura 22.

Figura 22 – Representação esquemática da largura, reforço (R), penetração (P), áreas A e B



Fonte: O autor (2016)

A análise da morfologia do cordão foi realizada posteriormente ao ataque com Vilella, facilitando a visualização das linhas de fusão, já que as amostras atacadas aparentam diferenças de tonalidade de cor, o que possibilitou a medição da penetração, largura e reforço dos cordões. Para realizar as medições foi necessário obter fotos da seção transversal do cordão atacado, sendo para tanto, utilizado o estereoscópio. A escala de 2 mm foi acrescentada às fotografias após calibração, como observado na Figura 23, para aferição do *software* de medição.

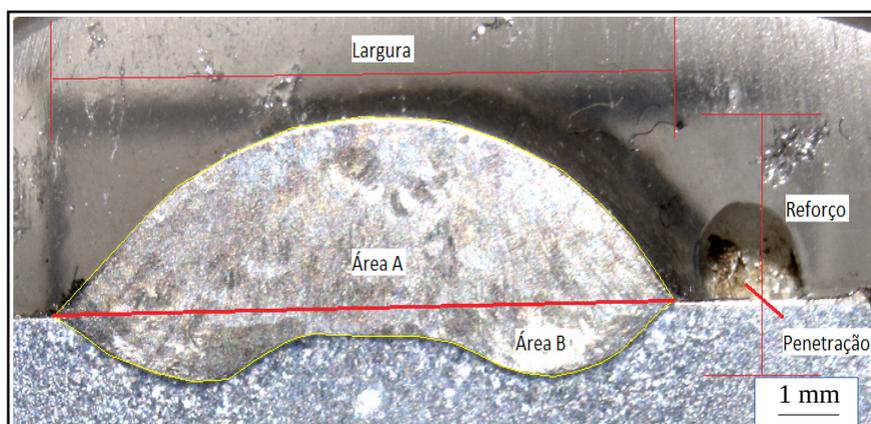
Figura 23 – Foto obtida da seção transversal do cordão no estereoscópio



Fonte: O autor (2016)

Para o tratamento das imagens, utilizou-se o software IMAGE-PRO PLUS para a medição das áreas de penetração e de reforço, como apresentado na Figura 24. Através da relação dos valores das áreas foi possível calcular o percentual de diluição do cordão de solda conforme Equação 2.

Figura 24 – Dados obtidos através da análise de imagem no software IMAGE-PRO PLUS

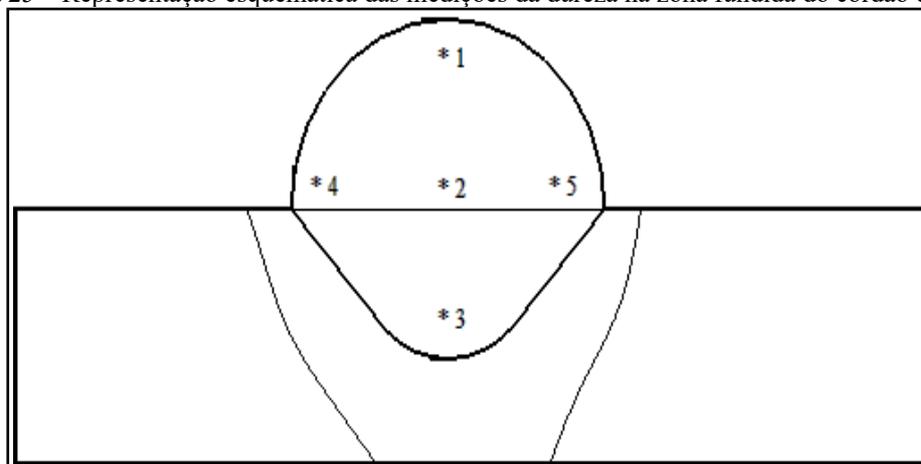


Fonte: O autor (2016)

### 3.3.2.2 Microdureza

A avaliação da microdureza foi realizada após a análise morfológica. Com o auxílio do equipamento para medição de microdureza foram realizados 5 pontos de medições na seção transversal do cordão seguindo a metodologia mostrada na Figura 25. 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 25 – Representação esquemática das medições da dureza na zona fundida do cordão de solda.



Fonte: O autor (2016)

### 3.3.3 Análise da perda de massa dos revestimentos

As amostras foram cortadas seguindo as recomendações na Norma ASTM G65, nas dimensões, 25 mm de largura por 75 mm de comprimento, como observado na Figura 26. Após o corte, as amostras foram retificadas para a limpeza da superfície e para garantir a planicidade, possibilitando o máximo contato possível entre as amostras e a roda de borracha no ensaio de desgaste.

Figura 26 – Amostras cortadas e limpas para os ensaios de desgaste



Fonte: O autor (2016)

Os ensaios foram realizados utilizando-se o abrasivo normatizado pela NBR 7214, com granulometria 100  $\mu\text{m}$  a seco. A rotação do equipamento foi mantida constante em 200 rotações por minuto (rpm), bem como a carga normal estática de 130 N. O tempo de ensaio foi definido em 10 minutos por amostra, conforme o procedimento B descrito na Norma ASTM G65.

Ao início de cada ensaio e ao término, as amostras foram limpas e pesadas para obtenção da variação de massa. Tendo em vista que o ensaio de desgaste do tipo “roda de borracha” fornece os dados de perda de massa ( $P_m$ ), por meio da determinação da variação do peso inicial ( $P_{\text{inicial}}$ ) e peso final ( $P_{\text{final}}$ ) das amostras, a Equação 3 é descrita a seguir:

$$P_m[\text{g}] = P_{\text{inicial}} - P_{\text{final}} \quad \text{Eq. 3}$$

A Norma ASTM G65 assume que além dos desgastes ocorridos nas amostras, a roda de borracha também tem perda de massa, sugerindo um fator de correção que elimina possíveis erros decorrentes do desgaste da roda. A Equação considera a variação entre o diâmetro inicial ( $D_{\text{inicial}} = 228,6 \text{ mm}$ ) e o diâmetro final ( $D_{\text{final}}$ ) da roda ao término de cada ensaio.

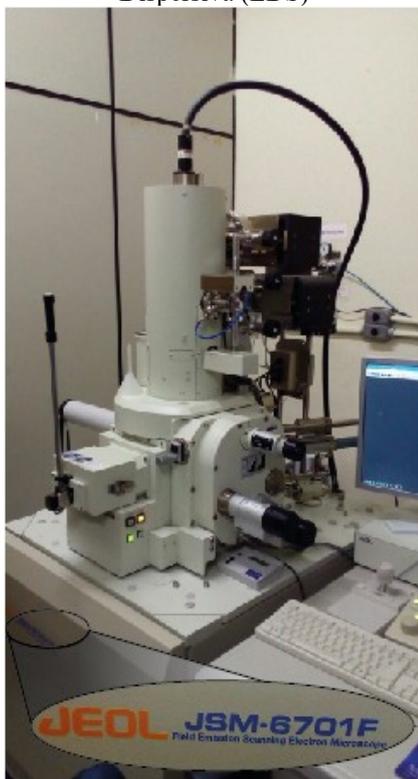
$$Pmc[g]=[Pm]\times\left[\frac{D_{inicial}}{D_{final}}\right] \quad \text{Eq. 4}$$

### 3.3.4 Análise de MEV e EDS

Os revestimentos foram caracterizados através de microscópio eletrônico de varredura com emissão de campo (FEG-MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) em parceria com a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), campus CCT-Joinville. A universidade possui o equipamento FEG-MEV da marca JEOL JSM-6701F permitindo a ampliação da superfície analisada em até 300000X. Ao equipamento está acoplado um sensor EDS, permitindo a análise da composição química através da emissão de raios-X (EDS).

No ensaio de FEG-MEV foram caracterizadas a superfícies das amostras e no EDS a composição química de pontos específicos da superfície das mesmas. Ambos os ensaios foram aplicados tanto nas amostras embutidas (cordão único), quanto nas amostras submetidas ao ensaio de desgaste abrasivo. Na Figura 27 observa-se o equipamento utilizado para estas análises.

Figura 27– Microscópio eletrônico de varredura (FEG-MEV) e Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS)



Fonte: O autor

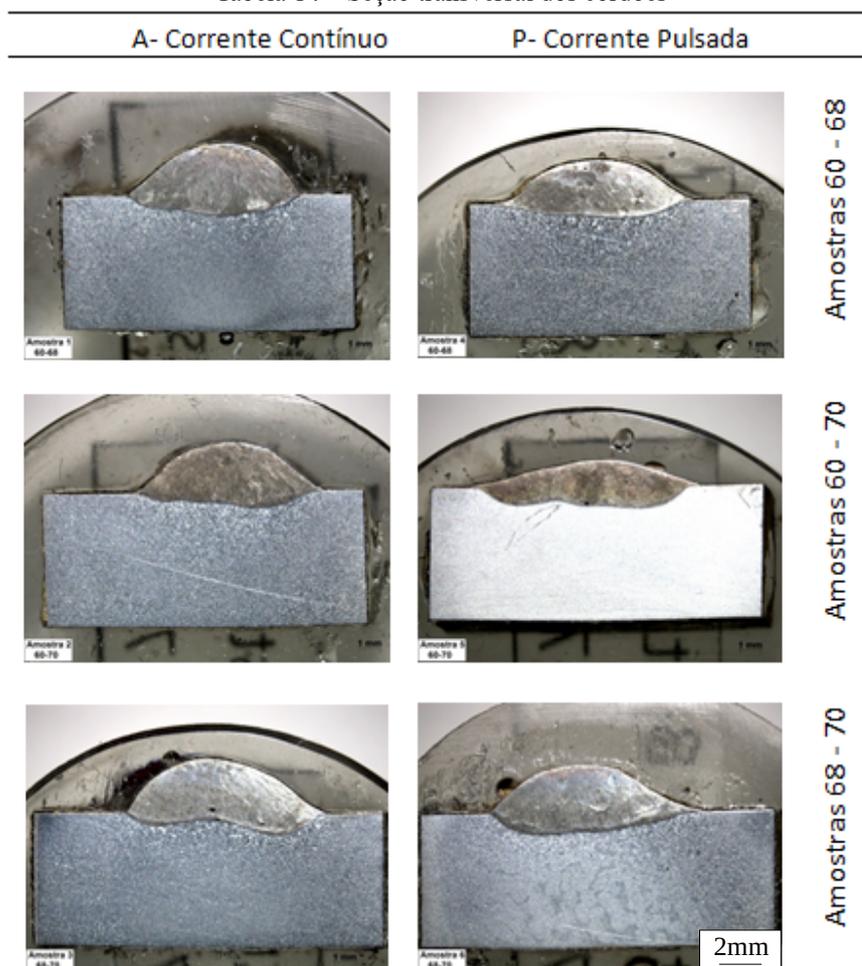
#### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Serão discutidos neste capítulo os resultados obtidos nos ensaios de revestimento duro realizados, sendo divididos em duas etapas: a primeira com a deposição de um único cordão de solda (morfologia, taxa de diluição, microdureza dos cordões e microestrutura) e a segunda com múltiplos cordões (perda de massa).

##### 4.1 Morfologia dos cordões de solda

A Tabela 14 apresenta as macrografias das seções transversais dos cordões de solda depositados, ilustrados o efeito da variação do tipo de corrente de soldagem (contínua e pulsada), e as combinações das diferentes ligas de FeCrC.

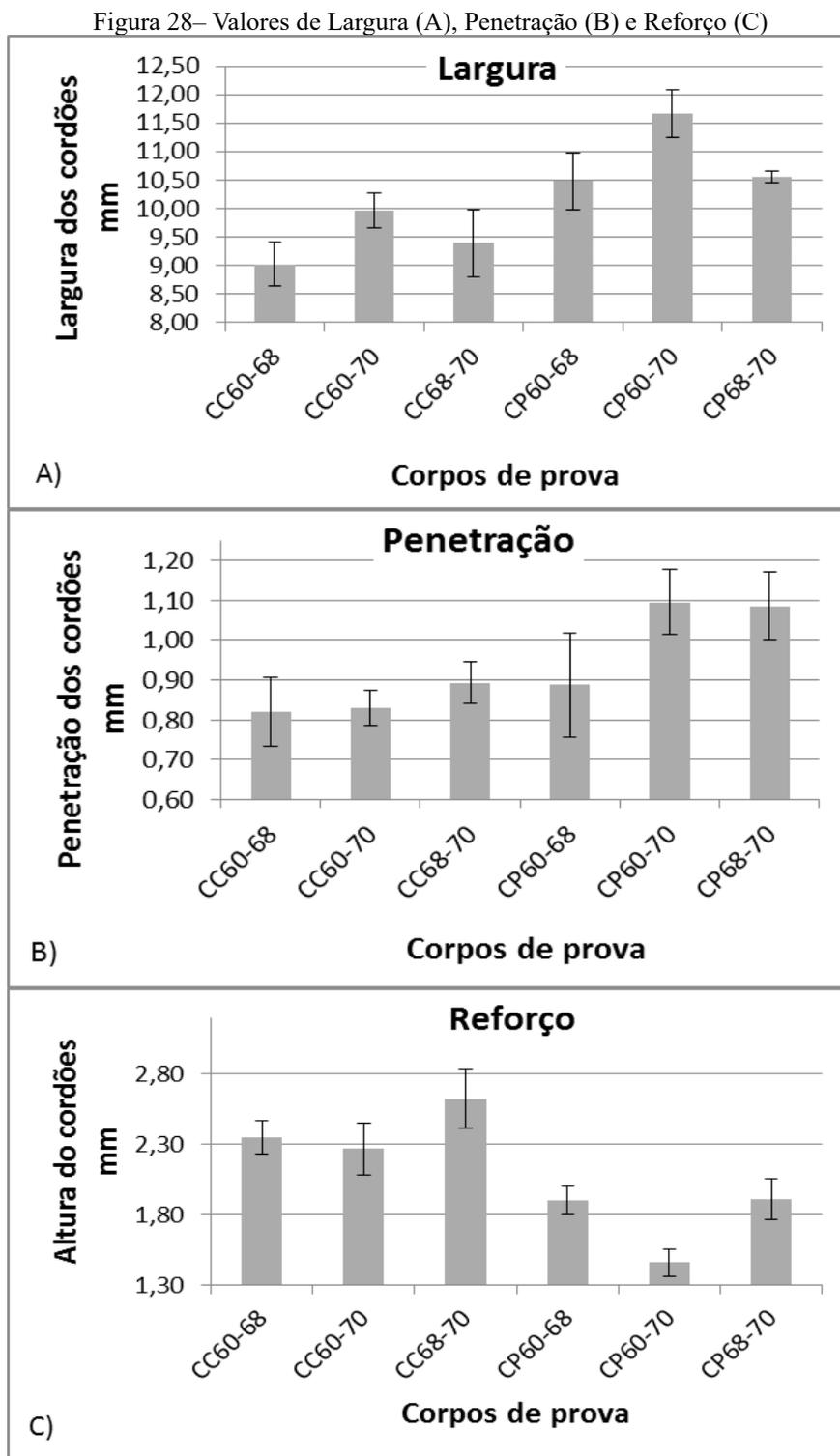
Tabela 14 – Seção transversal dos cordões



Fonte: O autor (2016)

As macrografias da Tabela 14 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 28 apresenta os valores obtidos em forma gráfica para as características analisadas.



Fonte: O autor (2016)

Através da análise das macrografias da Tabela 14 e dos dados da Figura 28, foi possível verificar que o tipo de corrente empregado afetou as características morfológicas. A largura

para os cordões depositados com corrente contínua (CC) foram relativamente inferiores às dos depositados com corrente pulsada (CP), como observado na Figura 28 a).

Como pode ser observado na Figura 28 a), a influência mais expressiva foi observada para a combinação 68-70, as amostras depositadas com CC obtiveram largura de 9,97 mm, enquanto que as amostras depositadas com CP atingiram largura de 11,67 mm, representando aumento de 15 % na largura comparada as mostras depositadas com CC. Tal aumento na largura das amostras depositadas com CP, esta relacionado a frequência de pulso da corrente de soldagem, pois segundo Corrêia e Trevisan (2001), este aumento da frequência eleva os valores de penetração e largura dos cordões de solda.

Contudo, a penetração não apresentou diferenças significativas para o tipo de liga, no entanto, o tipo de corrente pulsada promoveu maior penetração para as condições P60-70 e P68-70. A elevação da penetração com a CP valida os resultados de Mohamat *et al.*, (2012), no qual cita que a elevação da corrente foi o principal fator para o aumento da penetração, o que ocorre no processo da corrente pulsada. Colaço (2013), descreve que a corrente de soldagem não influenciou nos valores de penetração de seus resultados, porém neste trabalho, a corrente de soldagem foi a principal responsável pela alteração da característica morfológica do cordão.

Resultado inverso foi percebido nos valores do reforço, onde a corrente pulsada promoveu menores valores de reforço para todas as ligas depositadas. Uma característica relevante do tipo de liga que a condição 60-70 sempre apresentou as maiores diferenças tanto para altura do reforço quanto para a largura do cordão e profundidade de penetração.

## 4.2 Taxa de diluição

Na Tabela 15 é possível verificar os valores de diluição das amostras depositadas com corrente contínua (CC) e pulsada (CP), além das ligas estudadas neste trabalho. Nesta tabela observa-se que os cordões depositados com CP tiveram aumento de 47 % de área total com relação aos depositados com CC, tal valor corresponde a um ganho de 3,66 mm<sup>2</sup> de área de seção transversal do cordão.

Tabela 15 – Valores dos percentuais de diluição

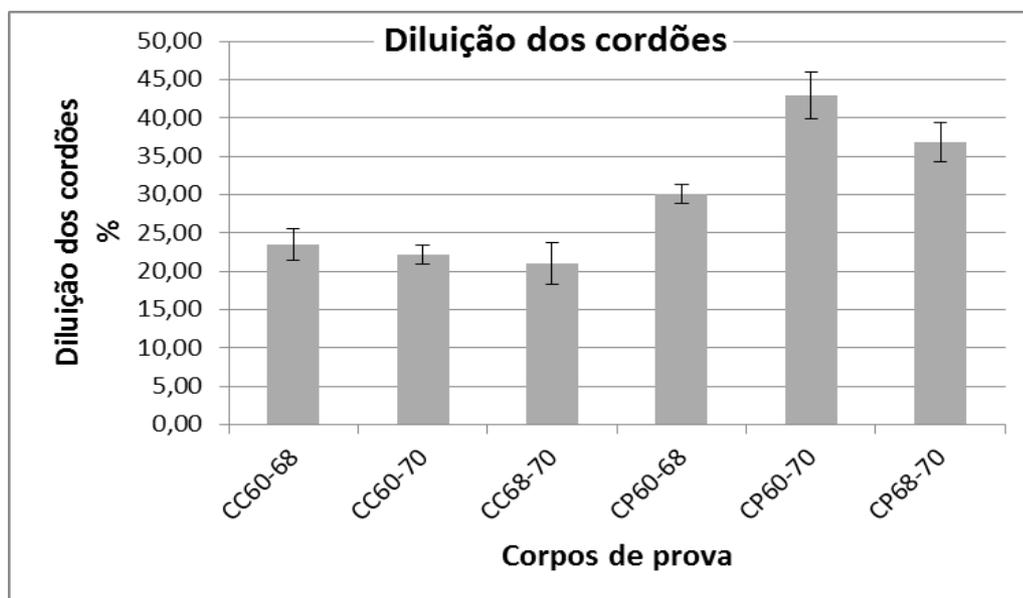
CP's	Diluição [%]		Diluição
	Áreas		
	A (mm <sup>2</sup> )	B (mm <sup>2</sup> )	
CC60-68	14,39	4,41	23,46
CC60-70	14,62	4,12	22,14
CC68-70	15,80	4,19	21,02
CP60-68	12,50	5,40	30,08
CP60-70	10,42	7,78	42,92
CP68-70	12,01	6,93	36,86

Fonte: O autor

Este ganho reflete no aumento da diluição dos cordões, fator prejudicial para a resistência ao desgaste abrasivo (OLIVEIRA, GALLEGO e VENTRELLA, 2014). Os cordões depositados com CP apresentaram valor médio da área de reforço de 11,65 mm<sup>2</sup>, correspondendo uma redução de 22 % em relação aos cordões depositados com CC, os quais tiveram média de 14,93 mm<sup>2</sup>.

A Figura 29 apresenta os percentuais de diluição dos cordões depositados com CC e CP. A taxa de diluição foi calculada de acordo com a Equação 2.

Figura 29– Valores de percentual de diluição



Fonte: O autor

Pelos resultados apresentados na Figura 29, pode-se verificar que para a corrente contínua não houve variação significativa na taxa de diluição, porém para corrente pulsada a liga P60-70 apresentou maior valor de diluição e todas as ligas depositadas com CP

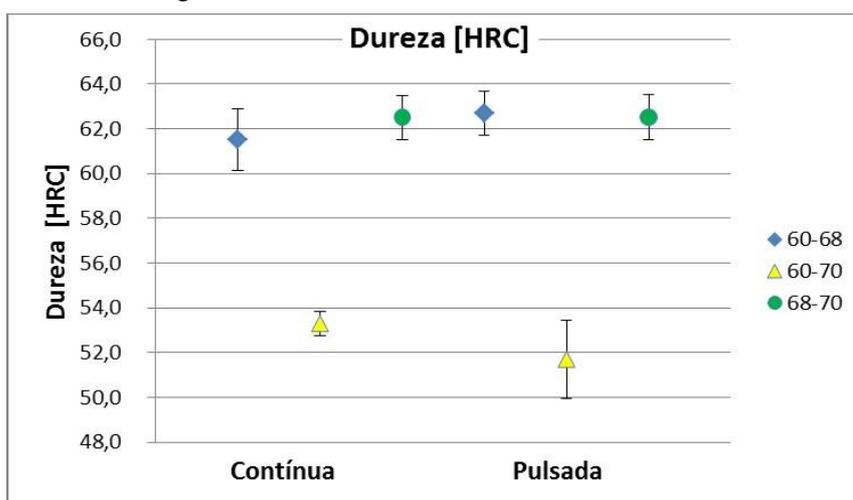
apresentaram maior diluição em relação as depositadas com CC.

Este aumento repentino da diluição é visto por Oliveira, Gallego e Ventrella (2014), como o principal parâmetro a ser controlado, devido à respectiva perda da resistência ao desgaste com o gradativo aumento do percentual de diluição. Para Filho *et al.*, (2010) e Colaço, (2013), a perda da resistência está relacionada a maior interação entre o material de base e as complexas composições de ligas utilizadas para a deposição dos revestimento.

### 4.3 Dureza dos cordões de solda

A Figura 30 mostra os resultados de dureza HRC dos revestimentos em relação ao efeito do tipo de corrente e ligas depositadas. Pode-se verificar que não houve variação significativa em relação ao tipo de corrente. Porém, com relação ao tipo de liga depositada percebeu-se que as amostras C60-70 e P60-70 apresentaram redução de aproximadamente 16 % na dureza em relação a todas as outras, com valor de aproximadamente 52HRC. As combinações das ligas 60-68 e 68-70, para ambas as condições de corrente obtiveram dureza média de 62,1 HRC para a combinação 60-68 e de 62,5 HRC para a 68-70, como observado na Figura 30. Os resultados corroboram com os obtidos por Colaço (2013) e de Nunes *et al.*(2012), onde relatam que a energia de soldagem não influencia de forma significativa a microdureza dos cordões depositados.

Figura 30 – Valores médios das durezas dos cordões



Fonte: O autor (2016)

Embora não tenha sido observada influência do tipo de corrente na dureza dos cordões, nota-se que apenas as combinações 60-70 e 68-70 alcançaram o valor médio da dureza especificado pelo fabricante, conforme Tabela 16, já a combinação 60-68 apresentou uma

queda de 19% do valor médio da dureza especificado.

Tabela 16– Especificação do fabricante quanto a microdureza média

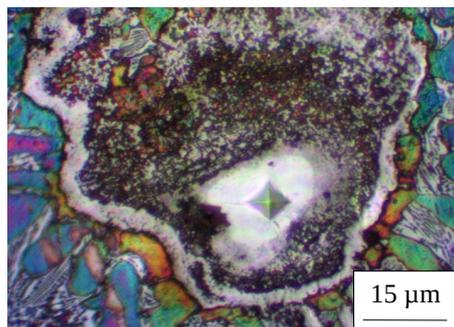
Ligas	Microdureza especificada pelo fabricante
60	61 HRC
68	65 HRC
70	67 HRC

Fonte: UTP (2012)

Analisando a seção transversal dos cordões depositados com a combinação das ligas 60-68 com CC e CP, observou-se uma precipitação superior de  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  as demais combinações de ligas. Esta precipitação de  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  obteve dureza de 71,5 HRC, valor acima da média estipulada pelo fabricante.

Esta precipitação de carboneto empobreceu a matriz de elementos dissolvidos, ou seja, a matriz não apresentou endurecimento por solução sólida. A Figura 31 mostra a precipitação de um  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  e sua respectiva indentação.

Figura 31 – Endentação realizada em  $\text{Cr}_7\text{C}_3$



Fonte: O autor (2016)

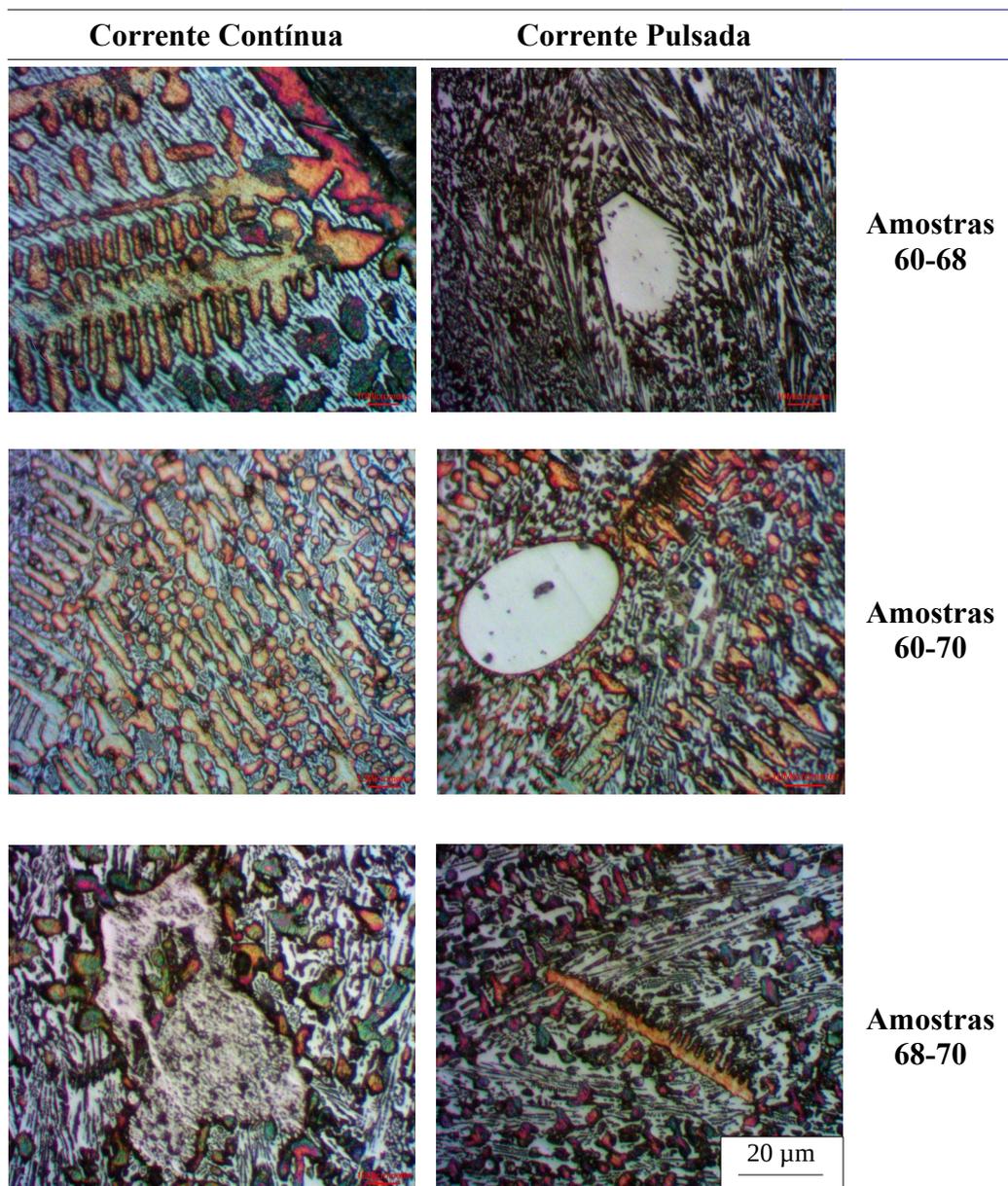
Embora as combinações das ligas 60-70 tenham apresentado a dureza superficial inferior as demais combinações, Kotecki e Ogborn (1995) afirmam que embora seja importante uma alta dureza superficial, esta característica não é o único fator a ser avaliado para a qualificação dos revestimentos. Devem-se, igualmente serem considerados os resultados da perda de massa e os resultados da análise da microestrutura.

#### 4.4 Microestrutura dos cordões de solda

As micrografia das seções transversais dos cordões revelaram uma microestrutura semelhante para todas as combinações de ligas e para ambas as condições de corrente.

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. Na Figura 32 são apresentadas as micrografias das microestruturas dos cordões de solda.

Figura 32– Microestrutura dos cordões



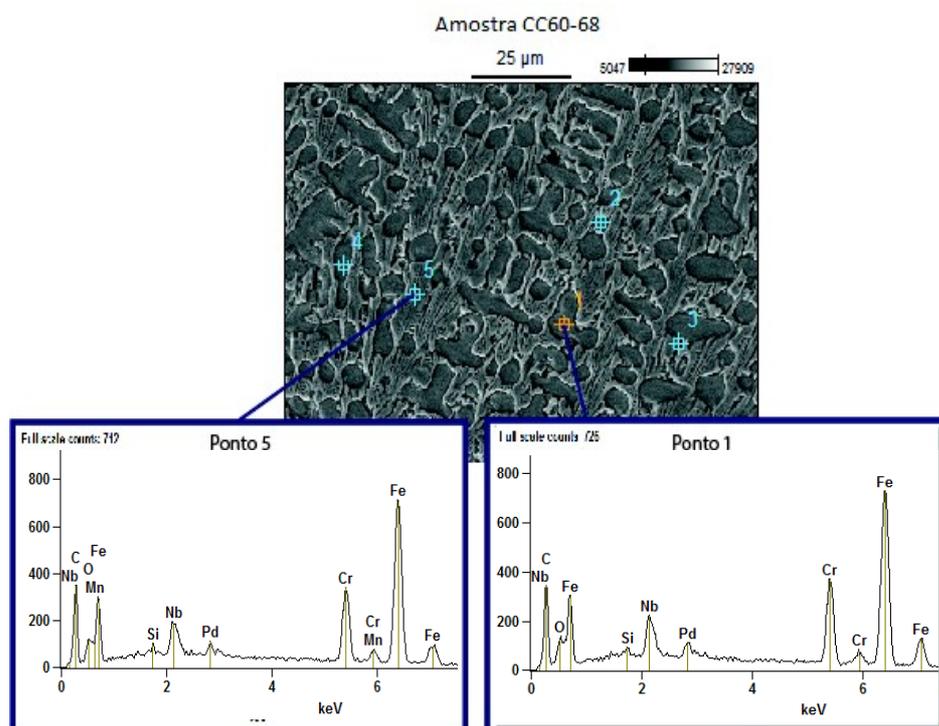
Fonte: O autor (2016)

De modo geral apresentaram a mesma morfologia independente da combinação de liga ou da corrente utilizada. Na Figura 32 (a) pode-se observar a região do cordão próximo ao substrato, sendo possível identificar um crescimento dendrítico da austenita em direção ao centro do cordão depositado, este caracterizado pela coloração alaranjada, semelhante ao observado nas demais micrografias. Intercalado a ramificação dendrítica, encontra-se a matriz

eutética lamelar formada por  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  secundários (região clara), austenita e martensita (regiões escuras) (LIMA e FERRARESI, 2009) (LEITE e MARQUES, 2009). Nas Figuras 32 (b), (d) e (e) são mostrados os  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ , com coloração clara, que apresentam geometria poligonal, (Figura 32 b), elíptico (Figura 32 d) e com geometria irregular na Figura 32 e).

Para complementar a caracterização da microestrutura e obter a composição química, foram realizados ensaios de FEG-MEV e EDS. Os resultados obtidos da amostra depositada com CC para a combinação 60-68 estão apresentados na Figura 33.

Figura 33– Ensaio de MEV e EDS realizado na amostra CC60-68



Fonte: O autor (2016)

No ensaio de FEG-MEV não foram observadas diferenças microestruturais significativas comparadas as micrografias ópticas. No ensaio de EDS, comprovou-se a composição química esperada no cordão depositado, conforme observado na Tabela 17, onde os valores são semelhantes ao especificado pelo fornecedor e a literatura da área.

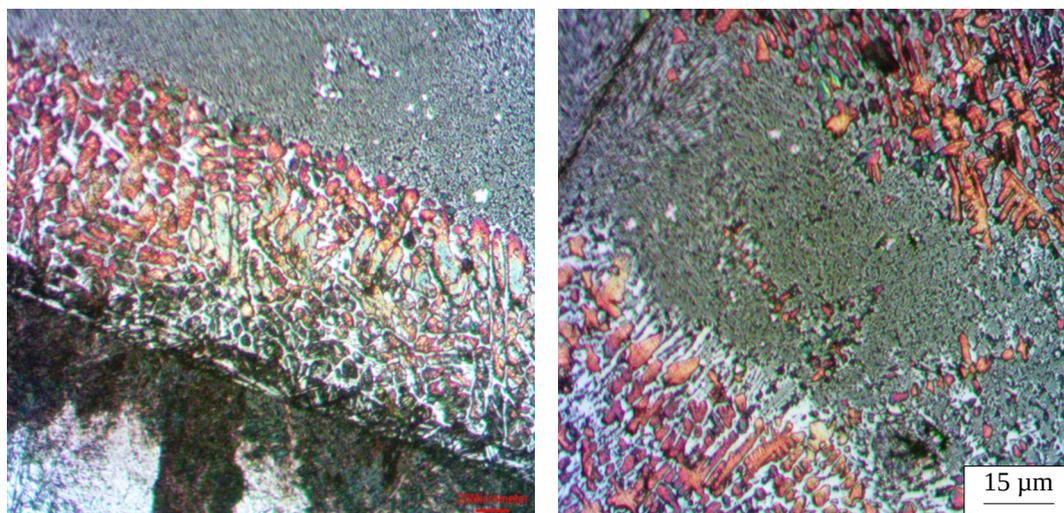
Tabela 17– Caracterização química da matriz e da austenita retidas na matriz

	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>Si</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Nb</i>	<i>Pd</i>
<i>Ponto 1</i>	6.03	1.81	0.47	17.48		64.38	6.43	3.41
<i>Ponto 2</i>	5.97	2.11	0.47	16.98	1.08	63.77	6.17	3.44
<i>Ponto 3</i>	5.63	2.23	0.46	18.10	1.49	63.51	5.83	2.75
<i>Ponto 4</i>	5.94	2.11		16.88		65.89	5.71	3.48
<i>Ponto 5</i>	6.40	2.08	0.44	16.73	0.98	64.83	6.04	2.51

Fonte: O autor (2016)

Apesar da semelhança entre as microestruturas, observou-se que os cordões depositados com CP apresentaram irregularidade durante a solidificação das fases descritas. Na Figura 34 observou-se a formação de uma região formada somente de uma fase eutética em meio a microestrutura padrão descrita neste estudo.

Figura 34– Diferença entre a formação da microestrutura com corrente Pulsada

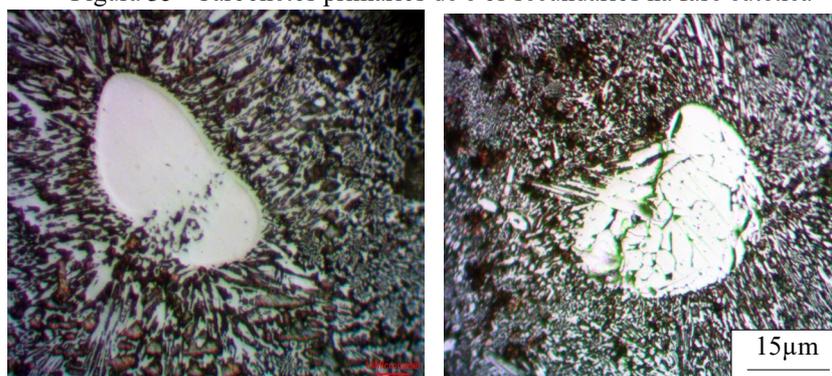


Fonte: O autor (2016)

Este resultado vai contra aos obtidos por Lima e Ferraresi (2009) e Leite e Marques (2009), ao qual em estudo semelhante com ligas de FeCrC obtiveram uma microestrutura homogênea, formada de dendritas de austenita imersas em uma matriz eutética (austenita mais carbonetos), porém no caso dos autores citados o processo de soldagem foi diferente (FCAW) gerando uma taxa de resfriamento diferente.

Além disso, as amostras depositadas com CP apresentaram precipitação de  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  com dimensões micro e macrovisuais, como observado na Figura 35. Entretanto, devido a taxa de resfriamento ocorreu a formação da fase eutética entorno dos  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  (precipitações claras) com crescimentos alinhados para o centro dos carbonetos primários.

Figura 35– Carbonetos primários de e os secundários na fase eutética



Fonte: O autor (2016)

#### 4.5 Perda de massa dos revestimentos

Os resultados do desgaste abrasivo foram obtidos através da medição da perda de massa das amostras após o ensaio no abrasômetro do tipo roda de borracha para as amostras de revestimento depositadas variando o tipo de corrente e combinações de ligas. Os parâmetros de ensaios seguiram o procedimento B da norma, na qual especifica-se a rotação de 200 rpm, carga de 130 N e areia Normal Brasileira nº 100 (0,15). A Tabela 18 apresenta os valores de perda de massa.

Tabela 18 – Resultado do ensaio de desgaste dos corpos de prova para a combinação das três ligas

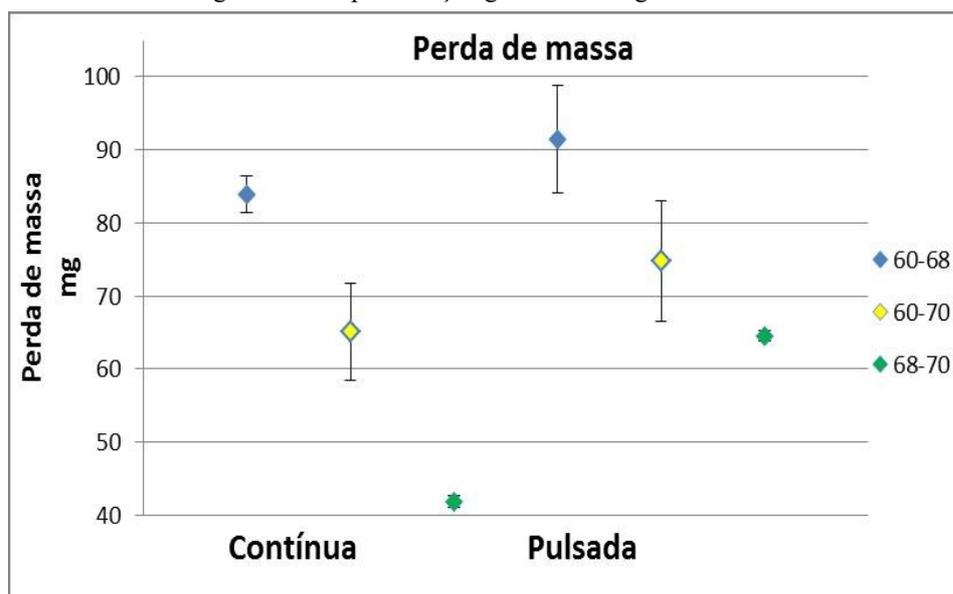
<b>Perda de Massa [mg]</b>		
<b>Amostras</b>	<b>Pm Média</b>	<b>DEV. S Padrão</b>
<b>CC60-68</b>	83,90	4,95
<b>CC60-70</b>	65,05	13,36
<b>CC68-70</b>	41,80	1,56
<b>CP60-68</b>	91,45	14,78
<b>CP60-70</b>	74,75	16,62
<b>CP68-70</b>	64,50	1,56

Fonte: O autor (2013)

Pode-se verificar na Tabela 18 uma variação da resistência ao desgaste entre as ligas tanto para corrente contínua quanto para corrente pulsada, sendo a combinação mais resistente a condição das ligas 68-70. O fato pode estar relacionado com a porcentagem em peso de Nb em cada combinação, já que na combinação 60-68, somente a liga 68 tem o elemento Nb (3,05%) em sua composição, tratando-se da menor porcentagem possível de Nb entre as três combinações realizadas. Já quando combinados os arames 68-70, a porcentagem de Nb passa a ser de 4,28%, com um acréscimo de 182% em peso do elemento no cordão. Além do arame 70 apresentar um alto teor Mo W Nb e V.

A Figura 36 mostra mais claramente a variação de massa em relação as condições de soldagem. Pode-se perceber que com a variação do tipo de corrente contínua e pulsada que houve variação significativa somente para as amostras 68-70, devido a menor diluição apresentada pela amostra soldada com corrente contínua. Com relação às combinações dos arames a depositados com a liga 60, apresentou menor resistência ao desgaste abrasivo por roda de borracha independente do tipo de corrente de soldagem, comportamento explicado pela microestrutura e dureza reduzida

Figura 36 – Representação gráfica do desgaste abrasivo



Fonte: O autor (2016)

Os resultados obtidos são validados quando comparados aos ensaios realizados por Lima e Ferraresi (2007) e Leite (2008) com ligas de FeCrC, com percentuais dos elementos similares. Nestes ensaios, afirmam que a liga de FeCrC, com a adição de Nb e Mo, apresentam uma melhor resistência ao desgaste abrasivo, devido à formação de carbonetos de Níbio (NbC) e de Cromo ( $Cr_7C_3$ ) assim como os resultados deste trabalho. A presença de Nb na liga representa ganho significativo na resistência ao desgaste abrasivo em ensaios realizados em laboratório. Porém, devido à presença de trincas na superfície revestida, os revestimentos com Nb são pouco empregados em campo, devido ao lascamento ocasionado por impactos nas regiões trincadas (LIMA e FERRARESI, 2010)

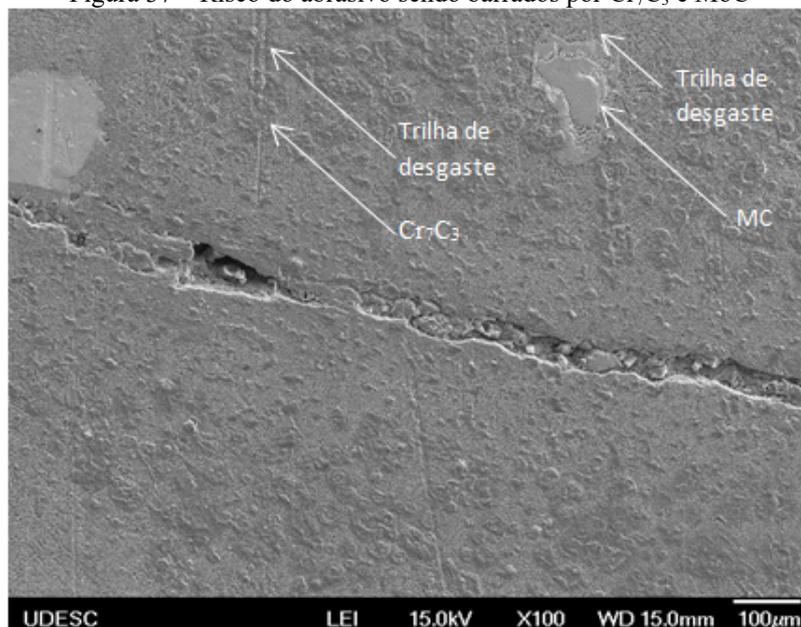
Embora as combinações das ligas 60-68, para ambos os tipos de corrente, tenham apresentado os menores valores de dureza superficial, conforme observado na Figura 36, estas obtiveram a segunda menor perda média de volume, cerca de 69,9 mg, sendo a segunda melhor combinação para resistência ao desgaste. Para tanto, a dureza superficial não apresentou com fidelidade a resistência ao desgaste abrasivo dos corpos de prova das ligas 60-70, não podendo ser utilizado exclusivamente como ferramenta qualitativa do revestimento (KOTECKI; OGBORN, 1995).

Na sequência da análise é possível verificar que a combinação das ligas 60-68, apresentaram a menor efetividade quanto ao desgaste abrasivo. O fato pode estar correlacionado à configuração da microestrutura, ou seja, foram observadas colônias distintas de possíveis  $Cr_7C_3$ , distribuídos de forma desordenada na seção transversal do cordão.

Devido à combinação das ligas 68-70 com CC ter apresentado uma excelente resistência ao desgaste abrasivo, analisou-se as duas amostras depositadas com tal combinação após o ensaios de desgaste no microscópio eletrônico por varredura (FEG-MEV). A avaliação da superfície é fundamental para a compreensão dos mecanismos de desgaste envolvidos durante o ensaio. Com a análise no FEG-MEV, observou-se que o mecanismo de desgaste atuante em todos os ensaios foi por microcorte, este mecanismo de desgaste também foi observado por Lima e Ferraresi (2007) e Leite (2008) Colaço (2013) em estudo do desgaste abrasivo em revestimento duro com ligas semelhantes. Para tanto, a Figura 37 apresenta a trilha de desgaste sendo barrada por MoC e  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  nas amostras depositadas com CC, na combinação das ligas 68-70.

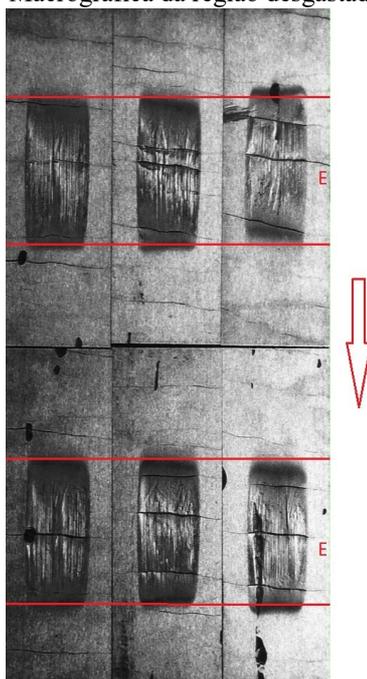
A Figura 38 apresenta uma visão macrográfica da seção desgastada durante o ensaio. A região “E” condiz com a região desgastada, enquanto que a seta representa o sentido de deslizamento da roda de borracha sobre a superfície do corpo de prova. Foram observados, em todas as amostras depositadas, a presença de trincas na camada de revestimento. Essas trincas atenuaram a perda de masa devido a degradação das bordas das trincas, comportamento idêntico ao apresentado por Colaço (2013) e Lima e Ferraresi (2009) onde afirmam que as trincas intervirem diretamente na perda de massa, devido à propagação de microtrincas paralelas às trincas oriundas da solidificação.

Figura 37 – Risco do abrasivo sendo barrados por  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  e MoC



Fonte: O autor (2016)

Figura 38 – Macrográfica da região desgastada do ensaio



Fonte: O autor (2016)

## 5. CONCLUSÃO

Com base no estudo proposto, torna-se possível afirmar que os objetivos preestabelecidos no início da pesquisa foram alcançados com êxito. Embora a pesquisa tenha caráter científico, não sendo estudado em uma aplicação prática, os resultados aqui descritos podem ser utilizados como base em estudos práticos futuros nas diversas áreas de atuação das indústrias. Sendo assim, serão descritos no decorrer do texto as conclusões obtidas após a realização do estudo:

a) as combinações de duas ligas não tiveram influência na largura, reforço e penetração dos cordões depositados. Todavia, o tipo de corrente utilizado apresentou, para a corrente pulsada, maior largura e menor reforço do cordão em relação a corrente contínua.

b) a corrente contínua proporcionou um revestimento com menor diluição em relação a corrente pulsada.

c) a dureza dos cordões não foi influenciada pela variação do tipo de corrente, mas apresentou variação em relação as combinações das ligas. A combinação 60-70 apresentou menor dureza em relação as outras.

d) a deposição com CC e a com CP não alterou significativamente a microestrutura dos cordões depositados para as diferentes combinações dos arames. Entretanto, as amostras depositadas com CC apresentaram maior porcentagem da fase  $\alpha$  (dendritas de austenita).

e) Observou-se uma microestrutura formada por dendritas de austenita e  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  primários, imersos em uma matriz eutética (austenita e martensita mais  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  secundário) em todas as combinações ensaiadas, de ligas e correntes.

f) os outros elementos importantes para a resistência ao desgaste ficaram dispersos na matriz.

g) as combinações realizadas com as ligas 60-68 com CC e CP caracterizaram a menor resistência ao desgaste abrasivo de baixa tensão, com perda de volume de 83,9 mg para a CC e 91,45 mg com CP. Já a combinação realizada com a ligas 68-70, com CC, obteve valor médio de perda de massa de 41,8 mg, qualificando-a como a combinação mais efetiva testada contra o desgaste abrasivo.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7214: **Areia Normal para Ensaio de Cimento**. Rio de Janeiro, 1982.

ASSELLI, Alexandre Augusto Cesario; GALLEGO, Juno. **Efeitos da Energia de Soldagem Sobre a Microestrutura do Metal de Solda Depositado por Arco Submerso**. Uberlândia, p.1-10, nov. 2007. Anual.

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. G77-91, **Standard test method for ranking resistance of materials to sliding using block-on-ring wear test 1**, Vol.03.02, p. 310-320 (1992).

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.

ÁQUILA, Victor. **Processo de Soldagem Tig**: Apostila L&A Soldagem. 2012. Disponível em: <[http://www.lasoldagem.com.br/apostilas/APOSTILA\\_TIG\\_L&A\\_rev\\_2.pdf](http://www.lasoldagem.com.br/apostilas/APOSTILA_TIG_L&A_rev_2.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

AWS (2011). **Welding Consumables—Gases and Gas Mixtures for Fusion Welding and Allied Processes** . ANSI/AWS A5.32M-97 , Apr.

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

AWS (1992). **Specification for Tungsten and Tungsten Alloy Electrodes for Arc Welding and Cutting**. ANSI/AWS A5. 12-92, Apr.

BITHARAS, Ioannis et al. **View Alternating Gas Flow Protection GTAW Process**. Materials And Design, Edimburgo, p.1-8, 24 nov. 2015.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Processo de Soldagem TIG - GTAW**. Belo Horizonte, 2000.

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

CARDOSO, Fabiano; COLAÇO, Fernando Henrique Gruber; MACHADO, Adriano Albino. **Avaliação da geometria do cordão depositado com diferentes gases pelo processo GMAW**. Consolda, Salvador, p.1-6, 13 out. 2015. Anual.

CARDOSO, Fabiano; COLAÇO, Fernando Henrique Gruber. **Caracterização de Cordões para Revestimentos Depositados por TIG com Alimentação Automática de Arames**. Consolda, Salvador, p.1-7, 13 out. 2015. Anual.

CBMM. **Carboneto de Nióbio em matriz de ferro**. Araxá: CBMM, 2014. 3 p.

CONDE, R.H. **Recubrimientos resistentes al desgaste**. Boletín Técnico Conarco, n.85, p.2-20, dec. 1986.

COLAÇO, Fernando H. G., **Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC-Ti**. 2013, Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 122p.

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.

CORRÊA, Celso Alves; TREVISAN, Roseana da Exaltação. **INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA SOLDAGEM MIG PULSADA E CONVENCIONAL NA MORFOLOGIA DO CORDÃO E NA MICROESTRUTURA**. Cobef, Curitiba, p.1-8, 4 abr. 2001. Anual.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Bluchter, 2008. 652 p. Revisão técnica André Luiz V. da Costa.

CORIAT, B. (1994). *Pensar pelo avesso: o modelo japonês de trabalho e organização*. Rio de Janeiro: UFRJ

CHI-MING, Lin, et al. **Microstructure and wear characteristics of high-carbon Cr-based alloy claddings formed by gas tungsten arc welding (GTAW)**. *Surface & Coatings Technology*, Taiwan, p.1-7, jul. 2010.

CZICHOS, H. and HABIG, K. H.; **Tribologie Handbuch – Reibung und Verschleiß**. Vieweg Verlag, Braunschweig, 560 pg, 1992.

DEUS, Gustavo Portela de. **Análise e avaliação dos elementos de penetração no solo de equipamentos rodoviários após revestimento**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciências e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

ESAB. **Apostila de Arco Submerso**. 2004. Disponível em: <[http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1\\_apostilaarcosubmerso.pdf](http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1_apostilaarcosubmerso.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 – 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: 10 jul. 2016.

FELIZARDO, Ivanilza; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. *Influência do Ângulo da Tocha e do Sentido de Soldagem no Crescimento Colunar e na Penetração de Cordões de Solda Realizados com o Processo GMAW Robotizado*. **Cobef**, Uberlândia, v. 2, n. 1, p.1-10, 19 maio 2003. Anual.

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.

GATES, J. Two-Body and Three-Body Abrasion: A Critical Discussion. **Wear**, v.214, n.1, p.139-146, 1998.

HUTCHINGS, I. M.. **Tribology: Friction and Wear of engineering materials**. Cambridge: Butterwort Heiinann, 1992. 271 p.

LI, C. X.. **Wear Testing and Wear Measurement**. Surface Engineering, Birmingham, p.1-5, out. 2012. Disponível em: <[http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz\\_anyagtech/1\\_konzultacio\\_elemei/wear\\_testing\\_measurement.htm](http://emrtk.unimiskolc.hu/projektek/adveng/home/kurzus/korsz_anyagtech/1_konzultacio_elemei/wear_testing_measurement.htm)>. Acesso em: 10 jul. 2016.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise da Microestrutura e da Resistência ao Desgaste de Revestimento Duro Utilizado pela Indústria Sucroalcooleira. **Soldagem & Inspeção**, Goiânia, v. 14, n. 2, p.140-150, abr. 2009.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio. Análise da Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duro Aplicados por Soldagem em Facas Picadoras de Cana-de-Açúcar. **Soldagem Insp**, São Paulo, v. 15, n. 2, p.94-102, 24 maio 2010. Anal.

LIMA, Aldemi Coelho; FERRARESI, Valtair Antonio. 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.

LEITE, Ricardo Vinícius de Melo; MARQUES, Paulo Villani. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. **Soldagem Insp**, São Paulo, v. 14, n. 4, p.329-335, out. 2009. Anual.

MACEDO, Bruno Pereira Navarro; GALLEGO, Juno. Efeito da Morfologia dos Carbonetos e da Variação da Microdureza em Revestimentos Duros Resistentes ao Desgaste Abrasivo com Aplicação na Indústria Sucroalcooleira. **Creem**, Florianópolis, p.1-6, ago. 2009. Anual.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: Ufmg, 2009. 361 p.

MARINHO, Fábio L. C. *et al.* **Influência da Utilização da Polaridade Negativa Sobre as Características Geométricas de Soldas de Revestimento**. Ilha Solteira, p.1-2, 26 ago. 2005. Anual.

MELO, R. H. F. de et al. **Efeito do processo de soldagem na microestrutura, microdureza e composição química de revestimentos de aço inoxidável aplicados por soldagem**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, Campina Grande, v. 7, n. 3, p.192-204, out. 2012. Disponível em: <<http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/viewFile/324/266>>. Acesso em: 27 jan. 2016.

MESLER, Robert W.. **Principles of welding: Processes, Physics, Chemistry and Metallurgy**. Nova York: Wiley-vch, 1999. 639 p.

MOHAMAT, S. A.; IBRAHIM, I. A.; AMIR, A.; GHALIB, A.; **The effect of Flux Core Arc Welding (FCAW) Processes on Different Parameters**. Procedia Engineering. V 41, p. 1497-1501. 2012.

NUNES, Everton Barbosa *et al.* Influência da Energia de Soldagem na Microestrutura e na Microdureza de Revestimentos de Aço Inoxidável Duplex. **Consolda 2011**, São Paulo, v. 17, n. 2, p.114-122, 2 mar. 2012. Anual.

OLIVEIRA, D. L.; GALLEGO, 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.

PARIS, Aleir Antônio Fontana de. **Relação entre o Ângulo da Ponta do Eletrodo e a Geometria do Cordão de Solda no Processo de Soldagem TIG**. 1986. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e dos

Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

PERTICARARI. **Manutenção Preventiva em Equipamentos e Componentes de Usinas de Açúcar, Álcool e Bioenergia.**2010. Disponível em: <[http://www.infomine.com/suppliers/PublicDoc/Perticarari\\_Testing/Artigo\\_tecnico\\_de\\_manutenção\\_preventiva.pdf](http://www.infomine.com/suppliers/PublicDoc/Perticarari_Testing/Artigo_tecnico_de_manutenção_preventiva.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2016.

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

RABINOWICZ, Ernest. - **Friction and wear of materials.** 2a.Ed. New York: John Wiley & sons, p.315, 1985.

REGATTIERI, Cíntia Nunes Braga. **Estudo Da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Ferros Fundidos Brancos Alto Cromo e Molibdênio.**2006. 115 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

RYUICHI, H.; HIROSHIGE, I. **Effects of Base Material Dilution on the Corrosion Resistance of the Weld Joint of Super GAMMA System Stainless Steel**, Current Advances in Materials and Processes 18(2),p.604, 2005.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W..**ENGINEERING TRIBOLOGY.** Australia: Butterwort Heiinann, 2002. 770 p.

TAKANO, Edson Hiromassa; QUEIROZ, Douglas de; D'OLIVEIRA, Ana Sofia Clímaco Monteiro. **Avaliação dos Parâmetros de Processamento Por Pta Nas Superfícies Processadas.**ABCM, Paraná, p.1-10, out. 2007. Anal.

TOKAR, Anna; PONOMAROV, Volodymyr. **Influência Do Ângulo de Afição do Eletrodo na Formação do Cordão em Chapas de Aço Inoxidável.** Posmec 2015, Uberlândia, p.1-5, nov. 2015.

UTP. **Consumíveis de Soldagem.** 2011. Disponível em: <[www.voestalpine.com/.../vabw](http://www.voestalpine.com/.../vabw) -

Catálogo de Consumíveis UTP>. Acesso em: 10 jul. 2016.

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

ZIEDAS, Selma e TATINI, Ivanisa, **Soldagem** – Coleção Tecnologia – Senai, 1ª ed., São Paulo, 1997, p.373 a 385.

GAHR, Zum K. H., **Microstructure and Wear of Material**. Elsevier, 1997.

## ANEXO A



voestalpine Böhler Welding Soldas do Brasil Ltda

Rua Amado Magnocaro nº371  
04691-068 - São Paulo - SP  
Tel: (11) 3694-6371 - Fax: (11) 3691-4682

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 Pagina / Page : 1 / 1

Pedido No	PO no.	EMAIL FERNANDO	de / of	05.02.2016
Ordem de Produção	Order no.	1006288840		
Fatura	Delivery note/pos./split	2005327507.000010/90C006	de / of	15.02.2016
Produto	Product	Arame Tubular (FCW) / GMAW tubular cored wire electrode		201602 06470
Designação da Marca	Trade name	<b>UTP AF LEDURIT 60</b>		14/12/10P 0654
Classificação	Standard designation	DIN 8555 MF 10-GF-60-GR		
Dimensão	Dimension	1,6 mm		
Corrida	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 Magagnoli nº 371  
04591-060 - 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 IMGRANTES 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	Product	Arame Tubular (FCW) / GMAW tubular cored wire electrode		201602 86671
Designação da Marca	Trade name	<b>UTP AF LEDURIT 60</b>		50E1507 0064
Classificação	Standard designation	DIN 8555 MF 0-GF-65-GR		
Dimensão	Dimension	1,6 mm		
Corrida	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 Magnicaro 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	UTP AF LEDURIT 70		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.



