

DANIEL DOMINICES BAÍA GOMES DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO  
UTILIZANDO O PROCESSO FCAW DUPLO ARAME  
PARA DIFERENTES TIPOS DE CONSUMÍVEIS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2015

DANIEL DOMINICES BAÍA GOMES DE SOUZA

**APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO UTILIZANDO O PROCESSO  
FCAW DUPLO ARAME PARA DIFERENTES TIPOS DE  
CONSUMÍVEIS**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Valtair Ferraresi

UBERLÂNDIA – MG

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S729a Souza, Daniel Dominices Baía Gomes de, 1990-  
2015 Aplicação de revestimento duro utilizando o processo FCAW duplo  
arame para diferentes tipos de consumíveis / Daniel Dominices Baía  
Gomes de Souza. - 2015.

116 f. : il.

Orientador: Valtair Antonio Ferraresi.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Soldagem - Teses. 3. Desgaste  
mecânico - Teses. 4. Resistência de materiais - Teses. I. Ferraresi, Valtair  
Antonio. II. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

---

CDU: 621

**DANIEL DOMINICES BAÍA GOMES DE SOUZA**

**APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO UTILIZANDO O PROCESSO  
FCAW DUPLO ARAME PARA DIFERENTES TIPOS DE  
CONSUMÍVEIS**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Valtair Antônio Ferraresi – UFU - Orientador

---

Prof. Dr. Louriel Oliveira Vilarinho – UFU - Componente

---

Prof. Dr. Kléber Mendes de Figueiredo – UFG - Componente

**Uberlândia, Julho de 2015.**

*“Nós somos o que fazemos repetidas vezes.  
Portanto, a excelência não é um ato, mas um  
hábito.”*

(Aristóteles)

## **AGRADECIMENTOS**

Ao programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade de realizar este Curso e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A minha mãe, meu pai e meus irmãos, pelo sacrifício, dedicação e carinho por todo esse tempo.

Ao Prof. Valtair Antônio Ferraresi, por ter contribuído com sua orientação para a realização deste trabalho.

A Prof.<sup>a</sup> Carmem Celia do Nascimento e Prof. Waldemir dos Passos Martins, por proporcionar-me a oportunidade de iniciar na pesquisa científica.

A Prof.<sup>a</sup> Márcia Milach por ter contribuído com a revisão deste trabalho.

Aos meus amigos Alisson, Ivanilson, Douglas, Edson, Diego e Gil por toda essa caminhada que fizemos juntos durante a Pós-graduação.

Aos demais professores que contribuíram na minha formação.

SOUZA, D. D. B. G. de. **Aplicação de Revestimento Duro Utilizando o Processo FCAW Duplo Arame para Diferentes Tipos de Consumíveis**. 2015. 120 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Resumo**

A aplicação de revestimentos com o objetivo de reduzir o desgaste e, conseqüentemente os custos de manutenção, busca o incremento da vida em serviço dos componentes e na redução das paradas programadas. Uma correta seleção do material depositado permite, dentre outras coisas, transformarem elementos descartáveis por desgaste em bens de capital recuperável, aumentar a resistência e prover as superfícies susceptíveis ao desgaste de características e propriedades desejadas e, em geral, aumentar a eficiência do processo. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos duros depositados em camada única através do processo de soldagem FCAW (Flux - Cored Arc Welding) Duplo Arame, com arame tubular auto protegido. Foram utilizados três tipos de consumíveis (FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb) de diâmetro 1,6 mm em doze condições de revestimento diferentes. O revestimento por soldagem foi aplicado sobre uma chapa de aço carbono SAE 1020 com e sem amantejamento de liga E308LSi, utilizando-se o modo de transferência metálica por curto-circuito. Construiu-se corpos de prova para a avaliação do desgaste em laboratório com abrasômetro Roda de Borracha de acordo com a norma ASTM G65-00. A avaliação de desgaste foi feita via perda de massa. Foram realizadas também análise de dureza, microdureza e microestrutura dos revestimentos. Os melhores resultados de resistência ao desgaste foram obtidos com a utilização dos dois arames eletrodo de mesma composição (FeCrC+Ti - FeCrC+Ti). A presença do Ti no revestimento apresenta menor quantidade de trincas e melhora a resistência ao desgaste com o ensaio utilizado nesta pesquisa. As condições com amantejamento não demonstraram bons resultados com relação a resistência ao desgaste dos revestimentos.

**Palavras Chave:** *FCAW duplo arame, revestimento duro, arame tubular, resistência ao desgaste.*

SOUZA, D. D. B. G. de. **Application of Diferents Types Consumables of Hard Facing with the FCAW Double Wire Process**. 2015. 120 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

### **Abstract**

The application of hardfacing brings the reduction of the wear and therefore increases service life of components and reducing the maintenance shutdowns. This work aims to study the wear resistance of hardface applied by welding, by using the process FCAW (Flux-Cored Arc Welding) Self-Shield Double Wire. Three types of consumables were used (FeCrC, FeCrC+Ti and FeCrC + Nb) with diameter 1.6 mm in twelve coating conditions. The coating was applied by welding on a steel SAE 1020 with and without E308LSi buttering, with metal transfer mode in short circuit. It was compared the deposits made with each condition. It was constructed specimens for the evaluation of wear in the laboratory with Rubber Wheel according to ASTM G65-00. The wear evaluation was made via mass loss. It was also carried analysis hardness and microhardness of the coating microstructure. The best wear resistance results were obtained with the use of two wires electrode with the same composition (FeCrC + Ti). The presence of Ti in the coating has fewer cracks and improves wear resistance in this study. The conditions with buttering have not shown good results with respect to wear resistance of coatings.

**Keywords:** FCAW Double Wire, Hardfacing, Wear Resistance, Welding Process.

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
FIGURA 2. 1 - ESQUEMA DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DO PREPARO DO CALDO DE CANA DE AÇÚCAR (MUNDO DA CANA, 2011). ....	5
FIGURA 2. 2 - (A) VISTA INTERNA DO PICADOR E (B) EXEMPLO DE UMA FACA PICADORA DESGASTADA APÓS TRABALHO EM CAMPO (LIMA, 2008).....	6
FIGURA 2. 3 – PROCESSO GS-FCAW (BRACARENSE, 2005).....	8
FIGURA 2. 4 - PROCESSO GS-FCAW (BRACARENSE, 2005). ....	8
FIGURA 2. 5 - PROCESSO FCAW DUPLO ARAME. ADAPTADO DE (CAIMACAM, 2014).....	10
FIGURA 2. 6 - EXEMPLO DA UTILIZAÇÃO DO PROCESSO COM DUPLO ARAME COM DISPOSIÇÃO EM: A) PARALELO (“TWIN WIRE”) E B) SERIE (“TANDEM WIRE”). ADAPTADO DE (GROETELAARS, 2005). ....	11
FIGURA 2. 7 - DEMONSTRAÇÃO ESQUEMATICAMENTE À CLASSIFICAÇÃO DO DESGASTE ABRASIVO: ABRASÃO ENTRE DOIS CORPOS (A) E ABRASÃO ENTRE TRÊS CORPOS (B) (BRANKOVIC, 1998) APUD KÖNIG (2007). ....	14
FIGURA 2. 8 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS QUATRO TIPOS DE DESGASTE. A) ABRASÃO A BAIXA TENSÃO, B) ABRASÃO A ALTA TENSÃO, C) ABRASÃO POR ARRANQUE E D) POLIMENTO (BUDINSKI,1988).....	15
FIGURA 2. 9 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS PRINCIPAIS MICRO-MECANISMOS DE DESGASTE ABRASIVO: A) E B) MICROSULCAMENTO, C) MICROCORTE E D) MICROTRINCAMENTO (ZUM GAHR,1998). ....	16
FIGURA 2. 10 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DO FUNCIONAMENTO DO ABRASÔMETRO DE RODA DE BORRACHA (GARCÍA, 2011). ....	17
FIGURA 2. 11 – FACAS PICADORAS RECUPERADAS PELA APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO (LIMA 2008).....	18
FIGURA 2. 12 – FACAS DESGASTADAS, COM DETALHE DO CANTO DE MAIOR DESGASTE: ARAME FeCrC, FeCrC+Nb, FeCrC+Ti E ELETRODO REVESTIDO ER1 (LIMA, 2008). ....	22
FIGURA 2. 13 – MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO DURO LIGA FE-CR- : A) LIGA 30Cr5,5C; B) LIGA 30Cr5,5C; C) LIGA 30Cr1,7C; D) LIGA 30Cr1,7C (BÁLSAMO, SCOTTI E DE MELLO,1995).....	26
FIGURA 2. 14 - COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE ENTRE DIFERENTES TÉCNICAS DE SOLDAGEM E CONSUMÍVEIS.....	28

FIGURA 2. 15 - MICROESTRUTURA DO ARAME FeCrC NA INTERFACE COM O MB (A) E NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO (B) (ATAQUE NITAL 2%; AUMENTO DE 1000X) (LIMA, 2008).	28
FIGURA 2. 16 - MICROESTRUTURA DO ARAME FeCrC (A) 200X E (B) 1000X. ATAQUE NITAL 2% (LEITE, 2009).....	29
FIGURA 2. 17 - MICROESTRUTURA DE REVESTIMENTO DURO Fe-42Cr-5,3C EM PRIMEIRA E SEGUNDA CAMADA (POLIDO E GALLEGOS, 2006).....	29
FIGURA 2. 18 - MICROESTRUTURA DO ARAME FeCrC+Ti NA INTERFACE COM O METAL DE BASE (A) E NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO (B) (ATAQUE NITAL 2%; AUMENTO DE 1000X) (LIMA, 2008).	30
FIGURA 2. 19 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DA LIGA FeCrC+Ti. A) ATAQUE COM KALLING 10S E B) ATAQUE COM MURAKAMI 60° POR 10S (GARCIA, 2011).	30
FIGURA 2. 20 - DISTRIBUIÇÃO DE PARTÍCULAS DE TiC NA CAMADA DE REVESTIMENTO DURO. IMAGENS DE MICROSCOPIA A) ÓTICA E B) ELETRÔNICA DE VARREDURA (WANG ET AL., 2005).	30
FIGURA 2. 21 - MICROESTRUTURA DO ARAME FeCrC+Nb NA INTERFACE COM O MB (A) E NA SUPERFÍCIE DO REVESTIMENTO (B) (ATAQUE NITAL 2%; AUMENTO DE 1000X) (LIMA, 2008).	31
FIGURA 2. 22 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO DA LIGA FeCrC+Nb. A) ATAQUE COM KALLING 10S E B) ATAQUE COM MURAKAMI 60° POR 10S (GARCIA, 2011).....	31
FIGURA 2. 23 – MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO COM A LIGA FeCrC+Nb. A) 200X E B) 1000X. ATAQUE: NITAL 2% (LEITE, 2009).	32
FIGURA 2. 24 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO FEITOS COM FeCrC+Ti COM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO DE FeCrC. A) ATAQUE COM KALLING 10S E B) ATAQUE COM MURAKAMI 60° POR 10S (GARCIA, 2011).....	32
FIGURA 2. 25 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO FEITOS COM FeCrC+Ti COM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO DE FeCrC+Nb. A) ATAQUE COM KALLING 10S E B) ATAQUE COM MURAKAMI 60° POR 10S (GARCIA, 2011).....	33
FIGURA 2. 26 - MICROESTRUTURA DO REVESTIMENTO FEITOS COM FeCrC+Nb COM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO DE ER308LSI. A) ATAQUE COM KALLING 10S E B) ATAQUE COM MURAKAMI 60° POR 10S (GARCIA, 2011).....	33
FIGURA 3. 1 - DIMENSÕES DAS CHAPAS DE TESTE. A) PARA OS TESTES PRELIMINARES E B) PARA A CONFECÇÃO DOS REVESTIMENTOS - ESPESSURA DE 12,7 MM NOS DOIS CASOS. ADAPTADO DE (GARCÍA, 2011).....	34
FIGURA 3. 2 – BANCADA DE SOLDAGEM DO LAPROSOLDA .....	36
FIGURA 3. 3 – TOCHA DE SOLDAGEM COM REGULAGEM DE DISTANCIA ENTRE BICOS. ....	37

FIGURA 3. 4 – ESQUEMA DE MONTAGEM PARA CALIBRAÇÃO DA MESA DE SOLDAGEM (GARCÍA, 2011). .....	38
FIGURA 3. 5 – CURVA DE CALIBRAÇÃO DA MESA DE SOLDAGEM. ....	38
FIGURA 3. 6 – ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA UTILIZADO PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE DESGASTE. ....	40
FIGURA 3. 7 – DURÔMETRO METROLTEC. ....	40
FIGURA 3. 8 - MICRODURÔMETRO SHIMADZU. ....	41
FIGURA 3. 9 - MICROSCÓPIO UTILIZADO PARA OBSERVAR A MICROESTRUTURA DOS CORPOS DE PROVA. ....	41
FIGURA 3. 10 - CORTADORA METALGRÁFICA CM 70 TECLAGO. ....	42
FIGURA 3. 11 - RETIFICADORA MELLO. ....	42
FIGURA 3. 12 - LIXADEIRA METALGRÁFICA MARCA AROTEC. ....	43
FIGURA 3. 13 – DISPOSIÇÃO “TANDEM WIRE”. ....	43
FIGURA 3. 14 – EXTRAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA PARA O ENSAIO DE DESGASTE. ....	44
FIGURA 3. 15 - AMANTEIGAMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA REVESTIMENTO E POSTERIOR ENSAIO DE DESGASTE. ....	45
FIGURA 3. 16 – PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE MACROGRÁFICA E ILUSTRAÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS DOS REVESTIMENTOS. ....	46
FIGURA 4. 1 - APARÊNCIA DO CORDÃO DE REVESTIMENTO PARA A CONDIÇÃO DE ENSAIO 7, CONFORME A TAB. 4.1. ....	50
FIGURA 4. 2 – DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) - FeCrC(2). ....	52
FIGURA 4. 3 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2). ....	52
FIGURA 4. 4 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2). ....	52
FIGURA 4. 5 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2). ....	52
FIGURA 4. 6 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2). ....	53

FIGURA 4. 7 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2).....	53
FIGURA 4. 8 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) – FeCrC(2) COM AMANTEIGAMENTO.....	53
FIGURA 4. 9 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO. ....	53
FIGURA 4. 10 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO. ....	54
FIGURA 4. 11 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO.....	54
FIGURA 4. 12 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO. ....	54
FIGURA 4. 13 - DETALHE DA SUPERFÍCIE DAS CHAPAS REVESTIDAS COM A COMBINAÇÃO FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO.....	54
FIGURA 4. 14 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A QUANTIDADE DE TRINCAS MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO. ....	56
FIGURA 4. 15 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A QUANTIDADE DE TRINCAS MÉDIAS DOS REVESTIMENTOS COM E SEM ADIÇÃO DE TI.....	57
FIGURA 4. 16 – SEÇÃO TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS SEM AMANTEIGAMENTO. A) FeCrC(1) - FeCrC(2); B) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2); C) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2); D) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) E E) FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2); F) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2).58	
FIGURA 4. 17 - SEÇÃO TRANSVERSAL DOS REVESTIMENTOS COM AMANTEIGAMENTO. G) FeCrC (1) - FeCrC(2) COM AMANTEIGAMENTO; H) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO; I) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO; J) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO; K) FeCrC (1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO E L) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb (2) COM AMANTEIGAMENTO.....	59
FIGURA 4. 18 – VALORES DA PENETRAÇÃO DOS REVESTIMENTOS. ....	61
FIGURA 4. 19 - VALORES DE REFORÇO DOS REVESTIMENTOS.....	61
FIGURA 4. 20 – COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A PENETRAÇÃO MEDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO. ....	62
FIGURA 4. 21 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE O REFORÇO MÉDIO DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO.....	62
FIGURA 4. 22 – LARGURA DOS REVESTIMENTOS COM TRÊS CORDÕES DE SOLDA. ....	63

FIGURA 4. 23 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A LARGURA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO.....	64
FIGURA 4. 24 – ÁREA FUNDIDA DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM CADA CONDIÇÃO DE SOLDAGEM.....	65
FIGURA 4. 25 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A ÁREA FUNDIDA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO. ....	65
FIGURA 4. 26 – DILUIÇÃO DOS REVESTIMENTOS APLICADOS. ....	66
FIGURA 4. 27 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A DILUIÇÃO MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO.....	67
FIGURA 4. 28 – DESGASTE MÉDIO (PERDA DE MASSA) PARA CADA CONDIÇÃO DE REVESTIMENTO UTILIZADO. ....	70
FIGURA 4. 29 – ANÁLISE COMPARATIVA DE RESISTÊNCIA AO DESGASTE DOS REVESTIMENTOS. ....	71
FIGURA 4. 30 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A RESISTÊNCIA AO DESGASTE MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO.....	72
FIGURA 4. 31 – IMAGEM DE CADA REVESTIMENTO FEITA APÓS O ENSAIO DE DESGASTE COM ABRASÔMETRO DE RODA DE BORRACHA. A) FeCrC(1) - FeCrC(2); B) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2); C) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2); D) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2); E) FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2); F) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2); G) FeCrC (1) - FeCrC(2) COM AMANTEIGAMENTO; H) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO; I) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO; J) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) COM AMANTEIGAMENTO; K) FeCrC (1) - FeCrC+Nb(2) COM AMANTEIGAMENTO E L) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb (2) COM AMANTEIGAMENTO. ....	73
FIGURA 4. 32 – COMPARAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO DESGASTE E NÚMERO DE TRINCAS NO REVESTIMENTO.....	74
FIGURA 4. 33 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	75
FIGURA 4. 34 - COMPARAÇÃO ENTRE A RESISTÊNCIA AO DESGASTE E DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS. ....	76
FIGURA 4. 35 - COMPARAÇÃO FEITA ENTRE A DUREZA MÉDIA DOS REVESTIMENTOS COM E SEM AMANTEIGAMENTO.....	76
FIGURA 4. 36 – MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	78
FIGURA 4. 37 – EXTRAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL. ....	79
FIGURA 4. 38 – MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) FeCrC(1) - FeCrC(2) E B) FeCrC(1) - FeCrC(2) COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	80

FIGURA 4. 39 - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) $\text{FeCrC}+\text{Ti}(1) - \text{FeCrC}+\text{Ti}(2)$ E B) $\text{FeCrC}+\text{Ti}(1) - \text{FeCrC}+\text{Ti}(2)$ COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	81
FIGURA 4. 40 - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) $\text{FeCrC}+\text{Nb}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ E B) $\text{FeCrC}+\text{Nb}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	83
FIGURA 4. 41 - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) $\text{FeCrC}(1) - \text{FeCrC}+\text{Ti}(2)$ E B) $\text{FeCrC}(1) - \text{FeCrC}+\text{Ti}(2)$ COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	84
FIGURA 4. 42 - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) $\text{FeCrC}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ E B) $\text{FeCrC}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	85
FIGURA 4. 43 - MICROESTRUTURAS DOS REVESTIMENTOS FEITOS COM AS CONDIÇÕES: A) $\text{FeCrC}+\text{Ti}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ E B) $\text{FeCrC}+\text{Ti}(1) - \text{FeCrC}+\text{Nb}(2)$ COM AMANTEIGAMENTO. COM AUMENTOS DE 500X E 1000X RESPECTIVAMENTE. ....	86

## LISTA DE TABELAS

	<b>Pág.</b>
TABELA 2. 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ARAMES-ELETRODOS FORNECIDA PELO FABRICANTE. .....	27
TABELA 2. 2 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	27
TABELA 3. 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS ARAMES TUBULARES AUTOPROTEGIDOS FORNECIDA PELO FABRICANTE.....	35
TABELA 3. 2 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO ARAME MACIÇO FORNECIDA PELO FABRICANTE. ....	35
TABELA 3. 3 - PARÂMETROS PARA AMANTEIGAMENTO DOS CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE DESGASTE. ....	45
TABELA 4. 1 - PARÂMETROS DE REVESTIMENTO UTILIZADOS NOS ENSAIOS PRELIMINARES COM A COMBINAÇÃO FeCrC E FeCrC+Ti. ....	50
TABELA 4. 2 - PARÂMETROS DE SOLDAGEM UTILIZADOS NO ENSAIO DE DESGASTE. ....	51
TABELA 4. 3 – QUANTIDADE (QT) DE TRINCAS VERIFICADAS NO REVESTIMENTO DE CADA COMBINAÇÃO DE ARAMES TUBULARES. ....	55
TABELA 4. 4 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS REVESTIMENTOS.....	60
TABELA 4. 5 – DADOS DE MASSA E DESGASTE POR CONDIÇÃO DE REVESTIMENTO. ....	69
TABELA 4. 6 – DUREZA DOS REVESTIMENTOS.....	75
TABELA 4. 7 – MICRODUREZA DOS REVESTIMENTOS. ....	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Am:** Amplitude

**Af:** Área Fundida

**Ar:** Área de Reforço

**ASTM:** American Society for Testing Materials

**AWS:** American Welding Society

**CA:** Corrente Alternada

**Cd:** Constante de Deposição

**CP:** Corpo(s) de Prova

**D:** Densidade do Material [g/cm<sup>3</sup>]

**DBCP:** Distância Bico-Contato-Peça

**Desgm:** Desgaste médio por Condição de Consumível

**Dil:** Diluição

**DP:** Desvio Padrão

**ER:** Eletrodo Revestido

**f:** Frequência

**FCAW:** Fluxed Cored Arc Welding

**FCAW-CW:** Arame Tubular com Adição de Arame Frio

**GMAW:** Gas Metal Arc Welding

**GTAW:** Gas Tungsten Arc Welding

**HRC:** Dureza Rockwell C

**HV:** Dureza Vickers

**Im:** Corrente Média

**MIG/MAG:** Metal Inert Gas/Metal Active Gas

**MC:** Carbonetos, onde M Representa um ou Mais Tipos de Átomos Metálicos

**P:** Passo da Solda (Referente à Soldagem)

**Rdesgate:** Resistência ao Desgaste

**Rdesgm:** Resistência ao Desgaste Médio por Condição de Consumível

**SAW:** Submerged Arc Welding

**SMAW:** Shielded Metal Arc Welding

**Tdesgm:** Taxa de Desgaste Médio por Condição de Consumível

**Um:** Tensão Média

**Ur:** Tensão de Referência

**Valim:** Velocidade de Alimentação

**Valim2:** Velocidade de Alimentação do Arame não Energizado

**Vsold:** Velocidade de Soldagem

## SUMÁRIO

CAPITULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
CAPITULO II.....	4
REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....	4
2.1. Setor Sucroalcooleiro .....	4
2.2. Equipamentos de Extração de Caldo de Cana.....	4
2.3. Soldagem com arame tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding) .....	7
2.4. Soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) Duplo Arame .....	10
2.5. Desgaste .....	12
2.6. Revestimento Duro.....	17
2.7. Amanteigamento .....	23
2.8. Microestrutura e Resistência ao desgaste.....	24
CAPITULO III .....	34
MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. Materiais.....	34
3.2. Equipamentos .....	36
3.3. Metodologia .....	43
3.4. Procedimento Experimental .....	47
CAPITULO IV .....	49
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
4.1. Ensaio Preliminares .....	49
4.2. Revestimentos das chapas de teste .....	50
4.3. Avaliação do Desgaste .....	68
4.4. Microestruturas dos Revestimentos .....	79
CAPITULO VI.....	88
CONCLUSÕES .....	88
6.1. Quanto à técnica de soldagem:.....	88
6.2. Quanto às características geométricas dos revestimentos: .....	88
6.3. Quanto à resistência ao desgaste: .....	89
CAPITULO VII.....	90
TRABALHOS FUTUROS .....	90

CAPITULO VIII .....	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	91

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Introduzida no período colonial, a cana-de-açúcar se transformou em uma das principais monoculturas da economia brasileira. O Brasil não é apenas o maior produtor de cana-de-açúcar, mas também o primeiro do mundo na produção de açúcar e etanol e tem conquistado o mercado externo devido à utilização de biocombustíveis como alternativa energética por meio de material renovável. Responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, o País deve alcançar taxa média de aumento da produção de 3,25%, até 2018/19, e colher 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008. (DALCHIAVON et al., 2014).

Na safra 2012/13, o Brasil produziu aproximadamente 532 milhões de toneladas de cana, matéria-prima utilizada para a produção de 34 milhões de toneladas de açúcar e 21,3 bilhões de litros de etanol (UNICA, 2013). Por sua vez, a perda de material por mecanismos de desgaste representa um custo significativo para a operação de usinas de açúcar e destilarias de álcool, onde a deterioração das ferramentas é grande e a vida em serviço dos componentes é curta (LIMA, 2008).

Nos componentes dos equipamentos do setor sucroalcooleiro, em especial nos de preparo da cana, predomina a ocorrência de desgaste abrasivo. O desgaste é provocado pelo deslizamento de vários materiais na superfície da peça, como bagaço da cana, areia, terra e outros materiais estranhos, bem como, pela corrosão devido à acidez do caldo da cana (BUCHANAN, SHIPWAY e MCCARTNEY, 2007).

Alguns métodos foram desenvolvidos e incorporados aos processos de fabricação visando prolongar a durabilidade de componentes. Entre eles a técnica de revestimento duro (Hardfacing), que trata da deposição por soldagem de um material com elevada resistência ao desgaste sobre a superfície da peça (MILLER, 2005).

Os processos de soldagem mais utilizados para a aplicação de revestimentos são aqueles que têm como característica grande taxa de deposição e, se possível, menor diluição. Com isso obtém-se alto rendimento e menor influência do material de base na composição do

metal solidificado (WAINER *et al.*, 1992). O eletrodo revestido (SMAW – Shielded Metal Arc Welding), anteriormente utilizado para esta aplicação, perdeu espaço devido a sua baixa produtividade quando comparado com outros processos de soldagem, apesar de apresentar baixo custo e grande versatilidade. Dentre os processos, um dos quais se enquadra no quesito de produtividade é o processo de soldagem com arame tubular (FCAW – *Flux Cored Arc Welding*) (KANNAN e MURUGAN, 2006).

Novos desenvolvimentos visando alta produtividade e melhores qualidades do processo de soldagem FCAW conduziram para a criação de variantes dessa técnica. O processo FCAW Duplo Arame foi desenvolvido para áreas de aplicação onde altas taxas de deposição são necessárias (comparável ao processo arco submerso), mas que a flexibilidade do processo FCAW é desejada. A versão mais comum do processo com Duplo Arame é realizada com a utilização de duas fontes de energia e dois arames alimentados separadamente, através de uma única tocha. Neste caso, a disposição dos eletrodos na tocha é realizada de maneira a se permitir arcos trabalhando no modo sequencial (“Tandem”).

Quanto à composição química dos consumíveis têm-se realizado diversos trabalhos com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste de diferentes ligas de ferro com alto teor de cromo e carbono (FeCrC), utilizadas na soldagem dos revestimentos duros onde ocorre desgaste abrasivo, cuja composição pode ser ajustada de forma a produzir, na solidificação da poça de fusão, microestrutura rica em carbonetos de cromo em uma matriz austenítica (GARCÍA, 2011).

Buchely *et. al.* (2005) avaliaram revestimentos de varias ligas contendo Ferro, Cromo, Carbono e outros elementos depositados pelo processo eletrodo revestido. Constataram que a liga rica em Cr (liga do Tipo FeCrC) demonstrou maior resistência ao desgaste abrasivo, utilizando Abrasômetro Roda de Borracha, que a liga rica em carbonetos complexos, como  $\text{Mo}_2\text{C}$ , NbC e  $\text{M}_7\text{C}_3$  (liga C-Cr-W-Nb-Mo-V).

Lima (2008) estudou a aplicação de revestimentos duros depositados por soldagem com o processo FCAW em facas picadoras de cana-de-açúcar, utilizando quatro tipos de consumíveis, sendo três arames tubulares e um eletrodo revestido com elementos básicos idênticos de FeCrC, diferenciados pela adição de Ti e Nb. Foi verificado um melhor desempenho no ensaio de desgaste por roda de borracha da liga com adição de Níbio (Nb). Entretanto, em aplicações em campo, onde além do desgaste abrasivo, é possível observar a presença de cargas cíclicas geradas pelo impacto das facas sobre a estrutura, a presença de trincas influenciava de forma significativa na durabilidade do revestimento. O revestimento

com maior quantidade de trincas apresentava no final da utilização do equipamento (facas picadoras) um maior desgaste médio comparado com os revestimentos com menor nível de trincas antes de sua utilização.

Por outro lado, Garcia (2011) observou uma quantidade menor de trincas nos revestimentos aplicados com adição de arame não energizado, sendo a melhor condição encontrada na adição de arame não energizado ER308LSi (aço inoxidável).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é estudar a técnica de aplicação de revestimento duro em chapas de aço carbono utilizando o processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) Duplo Arame, visando aumento de produtividade, melhorias na resistência ao desgaste abrasivo e diminuindo a ocorrência de trincas de solidificação, pela aplicação da técnica de amanteigamento que proporciona maior alívio de tensões.

## CAPÍTULO II

### REVISÃO BIBLIOGRAFICA

#### 2.1. Setor Sucroalcooleiro

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, possuindo uma produção superior a 600 milhões de toneladas por ano, se destacando na produção de açúcar e etanol (no caso do etanol os Estados Unidos detém a maior produção, enquanto o Brasil, a segunda). Segundo Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2013), o país foi responsável pela produção de 42% da cana-de-açúcar do mundo, seguido da Índia (17% da produção mundial) e da China (7%).

Com base neste fato, o Brasil é referência para outros países produtores de açúcar e etanol (mesmo sendo segundo produtor mundial) em função do solo e clima propícios e custos de produção baixos, alcançados principalmente com as tecnologias aplicadas na melhoria genética da cana-de-açúcar, bem como pelo aproveitamento dos resíduos e das capacidades tecnológicas inerentes a esta secular atividade produtiva (VELOSO et al., 2010; SHIKIDA e PEROSA, 2012).

Segundo Alves Filho (2001), em 1983 o Brasil desenvolveu um sistema de moagem próprio, que o transformou no mais produtivo do mundo, substituindo os equipamentos de tecnologia australiana, introduzidos na década anterior. Entre 1980 e 1990, o setor iniciou o emprego de tecnologias para a redução dos custos de produção, iniciativa que foi consolidada na década seguinte. Atualmente, o segmento trabalha em novos projetos, como a redução de perdas na fabricação de açúcar, a autossuficiência energética, a melhoria da qualidade do açúcar e a diversificação da produção, principalmente por meio do aproveitamento do bagaço e da palha de cana, os quais podem ser utilizados na produção de energia elétrica, de etanol e de celulose.

#### 2.2. Equipamentos de Extração de Caldo de Cana

A cana é cortada, por processo mecanizado ou manual (mais de 90% do corte é mecanizado no Brasil), e transportada até a unidade de produção. Podem ser utilizados caminhões de até 45 toneladas de capacidade de carga, que percorrem distancias de até 20 km

da usina produtora. O primeiro passo é a passagem pela balança para medir a quantidade de toneladas de cana-de-açúcar que será processada; na sequência ocorre uma retirada de amostra para medir o teor de sacarose, a porcentagem de sólidos solúveis e o teor de fibra; a cana entra na mesa alimentadora para a lavagem com água; o quarto passo do processo é o preparo da cana nos picadores e desfibradores (visa à abertura das células da cana); em seguida ocorre a extração do caldo da cana, que pode ser por dois processos, moagem e difusor, apresentando um aproveitamento de 97% e 98% na extração do caldo de cana, respectivamente; o sexto passo do processo é a filtração, limpeza e decantação do caldo, para a retirada de impurezas; enquanto que o sétimo passo é a separação do caldo para fabricação de álcool nas destilarias ou para a fabricação de açúcar (ZANCANER e SANTOS, 2013).

O preparo da cana para moagem consiste em um processo de desintegração, visando destruir a resistência da parede dura da cana (casca e nós), romper o maior número de células parenquimatosas que armazenam o caldo, bem como uniformizar o colchão de cana favorecendo a capacidade do aparelho de extração. Tais procedimentos facilitam o trabalho da moenda, reduzindo as perdas inevitáveis de sacarose no bagaço. A quantidade de caldo extraído é função direta da intensidade desse preparo. Assim, os equipamentos preparadores operam com alta velocidade e baixa pressão, sem, no entanto, extrair o caldo. São constituídos pelas facas rotativas (“picadores”) e desfibradores (NOGUEIRA e VENTURINI FILHO, 2005). A Fig. 2.1 descreve os equipamentos envolvidos no processo, de forma esquemática.

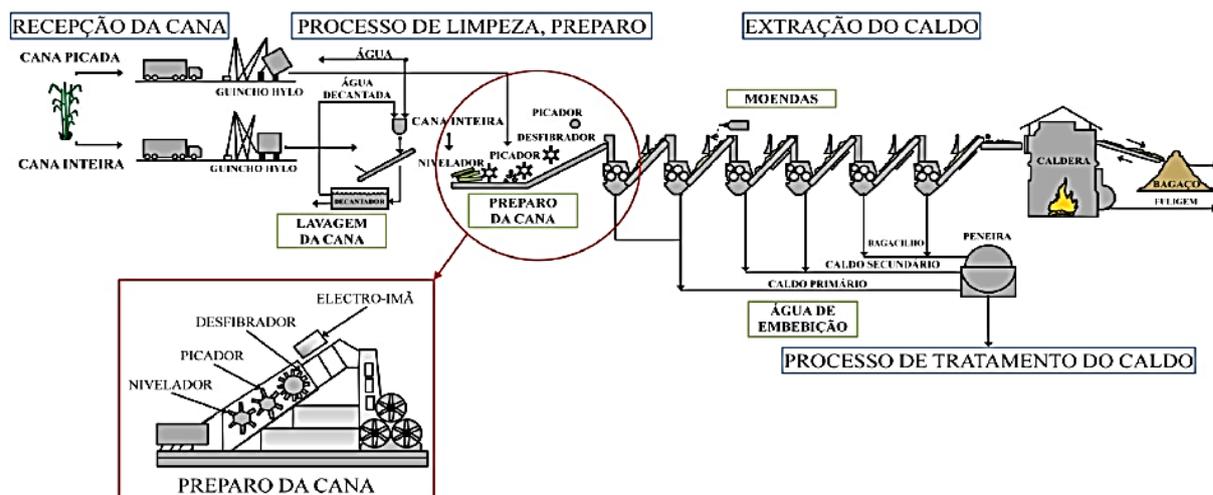


Figura 2. 1 - Esquema dos equipamentos utilizados no processo do preparo do caldo de cana de açúcar (MUNDO DA CANA, 2011)

A etapa de preparo está constituída por dois jogos de facas – dos quais o primeiro é o nivelador e o segundo o picador – que preparam a cana que vai ser enviada ao desfibrador. O picador, Fig. 2.2, é um equipamento rotativo de facas fixas, que opera a uma velocidade periférica de 60 m/s (até 1200 rpm), e tem por finalidade aumentar a densidade da cana, cortando-a em pedaços menores, preparando-a para o trabalho do desfibrador. A velocidade periférica dos desfibradores, de 60 a 90 m/s, chega a fornecer índices de preparo de 80% a 92%. Este índice é uma relação entre o açúcar das células que foram rompidas pelo desfibrador e o açúcar da cana (MUNDO DA CANA, 2011).

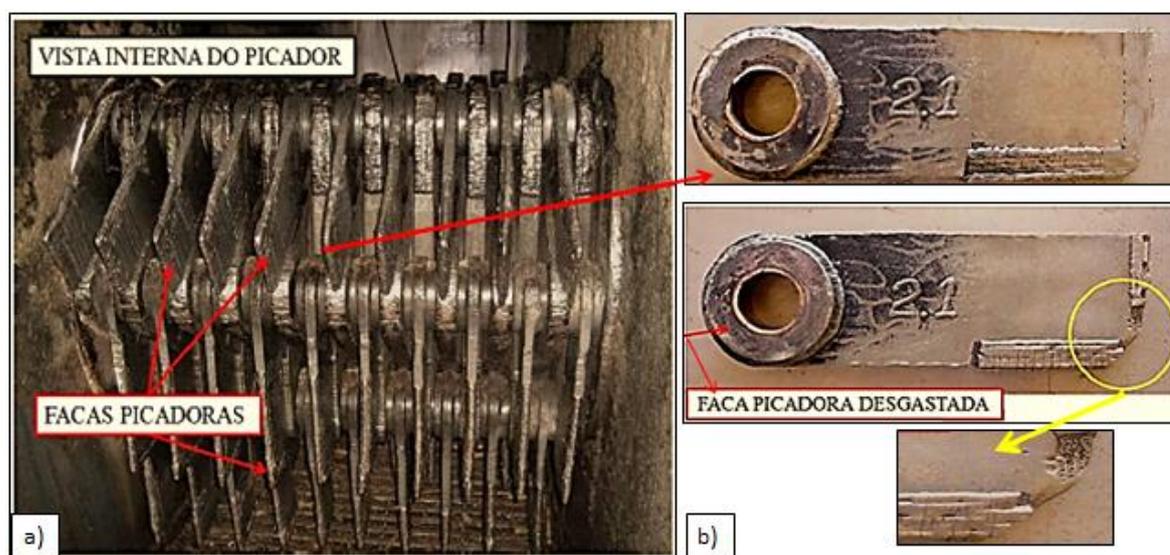


Figura 2. 2 - (a) Vista interna do picador e (b) exemplo de uma faca picadora desgastada após trabalho em campo (LIMA, 2008)

Devido ao atrito com a casca da cana e com outros elementos estranhos ao processo, como pedaços de ferro, madeira, pedras, areia e outros, aliados á alta velocidade de impacto (até 1200 rpm), os componentes dos equipamentos na etapa de preparo da cana sofrem desgaste abrasivo acentuado forçando a realização de paradas mensais para a sua substituição (SANTOS et al, 2005).

Segundo Lima (2008), enquanto a maior parte dos equipamentos pode ser recuperada durante a entressafra (novembro a março, na região centro-sul), as facas picadoras e os martelos desfibradores precisam ser substituídos periodicamente, entre 20 e 30 dias. Um fator que pode levar ao adiantamento da parada prevista é a constatação de desgaste acima do normal, verificada pela redução do fator de extração da sacarose, identificada por análise química do bagaço, depois de extraído o caldo. Conseqüentemente, durante uma eventual

intervenção para substituição das facas picadoras, todo o processo industrial seria interrompido por um período de 8 a 12 horas provocando uma significativa perda de produção (aproximadamente 6000 toneladas de cana por dia ou 250 ton/h).

Para aperfeiçoar a vida útil destes equipamentos e reduzir o número de paradas não programadas para manutenção, engenheiros e técnicos do setor aplicam nas superfícies desses equipamentos revestimentos duros que diminuam a taxa de desgaste, principalmente o desgaste abrasivo (FAGUNDES JÚNIOR et al, 2013).

### **2.3. Soldagem com arame tubular (FCAW - Flux Cored Arc Welding)**

O processo de soldagem com arame-eletrodo tubular, também chamado de FCAW, é um processo de soldagem onde a coalescência entre metais é obtida através de arco elétrico entre o eletrodo contínuo e a peça a ser soldada. A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame podendo ser complementada por um gás de proteção. Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante sua solidificação (BRACARENSE, 2005).

O processo FCAW possui duas variações, na primeira, conhecida como GS-FCAW (Gas Shielded Flux Cored Arc Welding – Arame Tubular com proteção gasosa), o fluxo interno, que pode ser metálico (metal cored), servindo somente para adição de elementos de liga, ou não metálico (flux cored), com a função desoxidante e de introduzir elementos no cordão de solda. O gás de proteção tem a finalidade de proteger o arco elétrico e ionizar a atmosfera, usualmente, dióxido de carbono ou uma mistura de argônio e dióxido de carbono (BRACARENSE, 2005). Um esquema do GS-FCAW está ilustrado na Fig. 2.3.

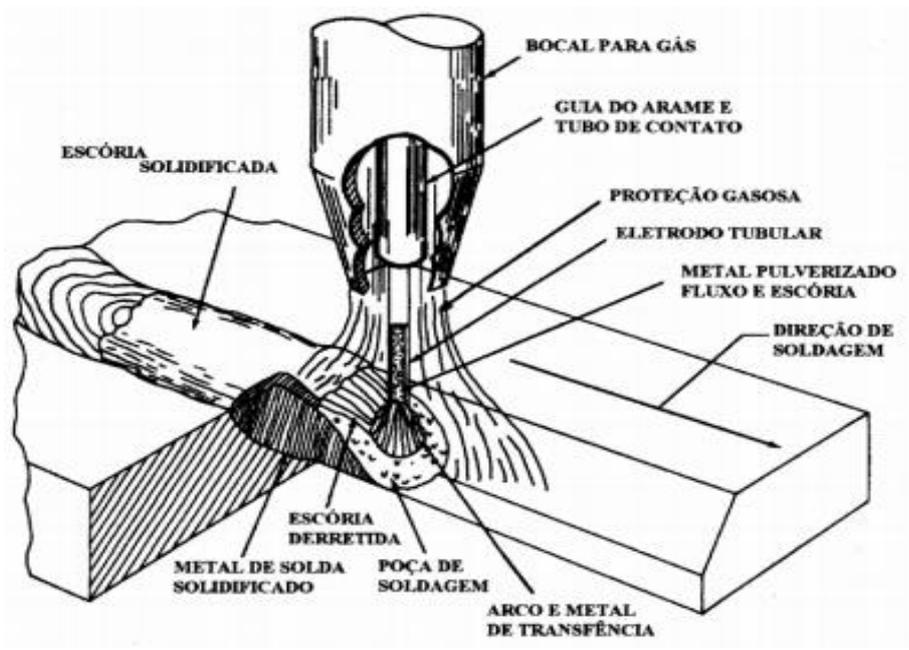


Figura 2. 3 – Processo GS-FCAW (BRACARENSE, 2005)

Na segunda vertente, mostrada na Fig. 2.4, chamada de SS-FCAW (Self Shielded Flux Cored Arc Welding – Arame Tubular auto protegido), a proteção é obtida pelos ingredientes do fluxo que vaporizam e protegem a poça de fusão durante a soldagem (BRACARENSE, 2005).

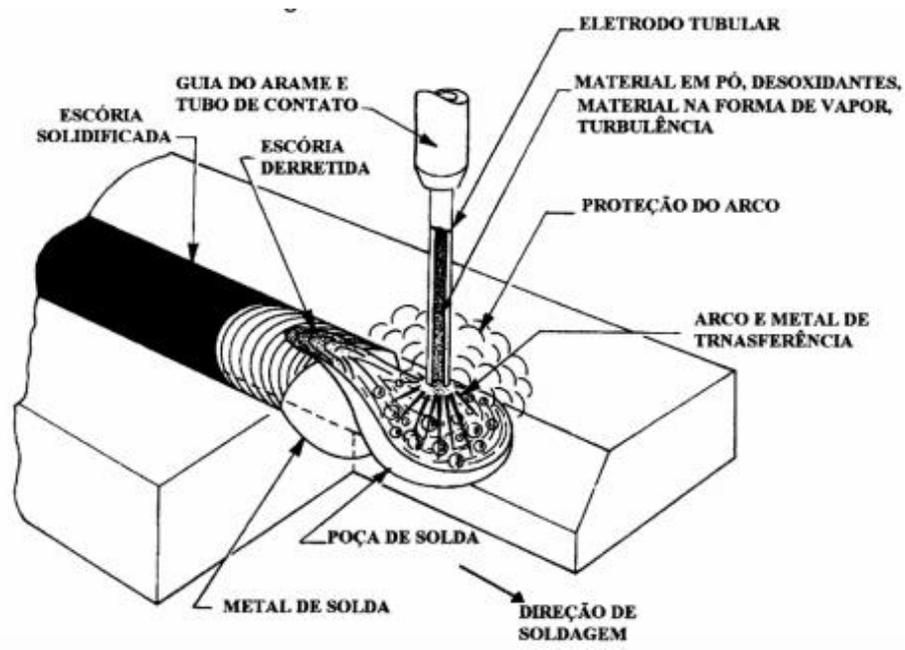


Figura 2. 4 - Processo GS-FCAW (BRACARENSE, 2005)

A vantagem do processo Arame Tubular é obtida pela combinação da produtividade oferecida pela alimentação contínua do arame, dos benefícios metalúrgicos que podem ser obtidos, e da proteção que a escória formada oferece ao metal em solidificação. Esse processo combina características de vários processos de soldagem como o Eletrodo Revestido, o MIG/MAG e o Arco Submerso. O equipamento utilizado na soldagem a arco elétrico com Arame Tubular é similar ao usado no processo de soldagem MIG/MAG (AWS, 2001).

Segundo Machado (1996), a taxa de deposição do processo de soldagem com arame tubular é elevada. Comparando com o processo de soldagem com eletrodo revestido a mesma é cerca de duas vezes maior na posição vertical e seis vezes na plana horizontal, alcançando até 11 kg/h. De acordo com Bracarense et al. (2006), o tempo de soldagem para um quilometro de tubulação de aço carbono é de aproximadamente 175 horas com o processo soldagem com eletrodo revestido, 128 horas com o processo de soldagem MIG/MAG e 112 horas com o processo de soldagem com arame tubular, para tubos com 254 mm (10”) de diâmetro nominal e 9,5 mm de espessura.

Na versão do consumível autoprotetido, a proteção da poça é obtida como resultado da vaporização dos ingredientes do núcleo que levam ao deslocamento do ar e pela composição dos minerais produtores de escória (desoxidantes e desnitrificantes) e carbonatos que a altas temperaturas se decompõem formando o CO<sub>2</sub> necessário para efetivar a proteção. As principais vantagens da utilização de arames autoprotetidos se devem à possibilidade de se obter depósitos com elevado teor de elementos de ligas, à sua elevada produtividade e ao enchimento de juntas irregulares. Por outro lado, as suas maiores restrições referem-se à produção de grande volume de gases e fumos, que requerem eficiente sistema de exaustão, além da aparência irregular dos cordões (MARTÍNEZ e PÉREZ, 2000).

Devido ao aumento da demanda de etanol nos últimos anos, as usinas vêm investindo cada vez mais em processos de revestimento anti-desgaste de melhor desempenho e maiores taxas de deposição. Além dessas características, o processo com arames tubulares tem proporcionado maior uniformidade do revestimento e redução da mão-de-obra, principalmente em processos automatizados de aplicação em camisas de moendas, (SANTOS et al, 2005).

Muitas pesquisas foram publicadas nos últimos anos tratando da aplicação de arames tubulares na indústria em geral. De forma especial alguns autores abordam a utilização desse processo na soldagem de revestimentos protetores, como Santos et al (2005); Kannan e Murugan (2006); Lima (2008); Leite e Marques (2009); García (2011); Colaço e Maranhão (2014); dentre outros.

## 2.4. Soldagem FCAW (Flux Cored Arc Welding) Duplo Arame

Com o nível de desenvolvimento das tecnologias de construção mecânica e da eletrônica, os processos de fabricação tiveram de acompanhar esses desenvolvimentos e especialmente a soldagem a arco sofreu consistentes avanços. Atrelado a esses crescimentos, o mercado consumidor também ficou mais exigente no que diz respeito à velocidade de produção, onde são buscados processos com taxas de deposição mais elevadas, possibilitando a redução do tempo de soldagem e, conseqüentemente, custos globais e a necessidade de inovações aos processos já consolidados nas linhas de produção (CABRAL et. al., 2011).

Neste contexto, conforme defende Motta e Dutra (2005), a soldagem com dois arames eletrodos pode ser utilizada, principalmente com o objetivo de se aumentar a produtividade por intermédio de uma maior taxa de material depositado, uma vez que são empregados dois eletrodos simultaneamente. Essa característica permite imprimir ao processo velocidades de soldagem também superiores.

A soldagem FCAW com dois arames (Duplo Arame) é uma variante do processo FCAW convencional e caracteriza-se pela formação de um par de arcos elétricos entre uma única poça de fusão e dois eletrodos consumíveis continuamente alimentados, Fig. 2.5. Comparativamente à soldagem FCAW convencional, o duplo arame apresenta as seguintes características principais: maior taxa de deposição de material, possibilidade de soldagens com velocidades de deslocamento mais elevadas e o menor aporte térmico sobre a peça, este como consequência da utilização de velocidades de soldagem mais altas (MOTTA E DUTRA, 2005; SCOTTI E PONOMAREV, 2008).

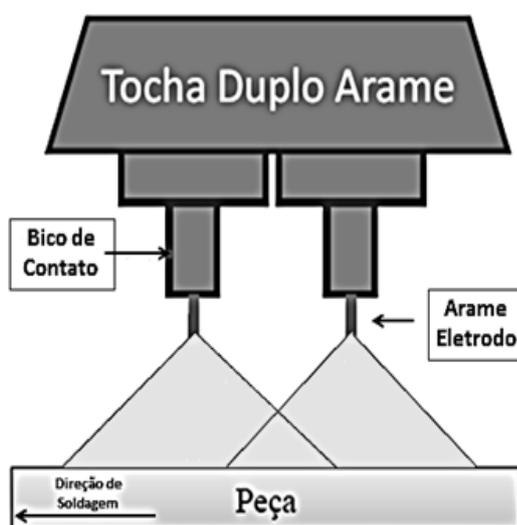


Figura 2. 5 - Processo FCAW Duplo Arame. Adaptado de Caimacam (2014)

Como dois alimentadores de arame-eletrodo são utilizados, pode ser usado diferentes composições químicas de arames e obter velocidades de alimentação distintas. Como duas fontes podem opcionalmente ser usadas para comandar os dois alimentadores, diferentes parâmetros elétricos podem ser impostos sobre cada arame. Também pode variar a disposição (posicionamento), relativa das pontas dos arames em relação à peça, ou seja, disposição em paralelo (“Twin Wire”) ou em série (“Tandem Wire”), conforme a Fig. 2.6 (GROETELAARS, 2005).

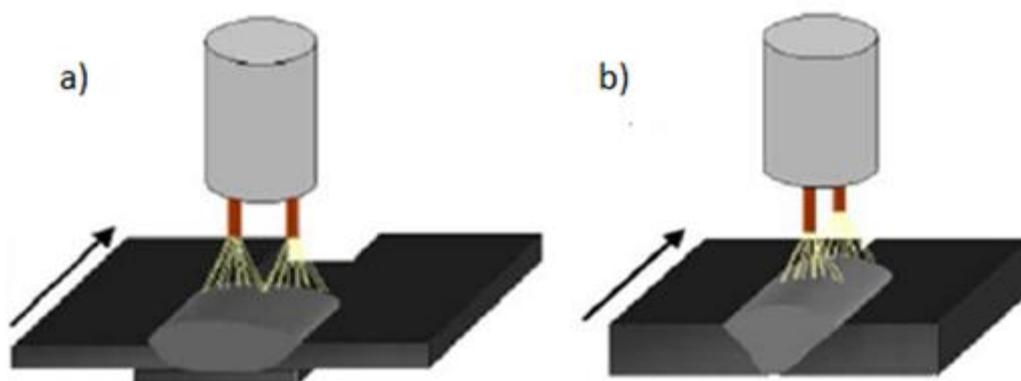


Figura 2. 6 - Exemplo da utilização do processo com duplo arame com disposição em: a) paralelo (“Twin Wire”) e b) série (“Tandem Wire”). Adaptado de Groetelaars (2005)

Além da capacidade de obter altas taxas de deposição e velocidade de soldagem, Groetelaars (2005) cita que o processo duplo arame ainda possibilita algumas outras vantagens como:

- Controlar a geometria do cordão de solda, através do posicionamento da tocha (ângulos), do comprimento de arco e da corrente de cada arame, como uma solução na soldagem de juntas mal ajustadas;
- Utilizar eletrodos com diferentes diâmetros e diferentes composições químicas;
- Alimentar arames com diferentes velocidades e diferentes intensidades de corrente;
- Reduzir o nível de porosidade em altas velocidades devido ao aumento da área da poça de fusão (maior o tempo para liberação dos gases dissolvidos na poça de fusão);
- Extrema versatilidade e ampla faixa de aplicações, excelentes características para robotização.

Um das desvantagens do processo duplo arame é o custo dos consumíveis e acessórios que compõe o sistema FCAW, os aspectos relacionados com a segurança e saúde,

como a emissão de luzes ultravioletas por parte do arco elétrico, e a necessidade de treinamento de pessoal.

## **2.5. Desgaste**

O desgaste é definido como a perda progressiva de massa de uma superfície de um material sólido, em função do movimento relativo entre duas superfícies. Existem pelo menos três maneiras de se classificar o desgaste (SCHUITEK, 2007):

- Pelo vestígio de danos na superfície: fissuras, trincas, sulcamento, lascamento, riscamento, polimentos, cavacos;
- Pelos mecanismos físico-químicos que provocaram a perda do material: adesão, abrasão, fadiga de superfície e oxidação;
- Pelas condições nos quais o desgaste ocorreu: desgaste por deslizamento, desgaste lubrificado ou não lubrificado, em alta temperatura ou baixas temperaturas, dentre outros fatores.

### **2.5.1. Tipos de Desgaste**

Para se obter um melhor entendimento do desgaste é essencial entender e distinguir os mecanismos de desgaste. O desgaste se divide em quatro principais mecanismos, que são os processos de remoção de material das superfícies e que levam à formação das partículas ou resíduos de desgaste (BHUSHAN, 2001):

- Desgaste adesivo – Ocorre quando dois corpos deslizam entre si e fragmentos de uma superfície aderem na outra. Subsequentemente, esses fragmentos podem se soltar e aderir novamente na superfície original ou também formar partículas de desgaste. De um modo geral, esse tipo de desgaste envolve a deformação plástica das superfícies e sub-superfícies, a formação de trinca na sub-superfície e a transferência de material (BANDEIRA, 2012);
- Desgaste abrasivo – Perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras, que são forçadas contra as superfícies durante o processo de movimento relativo entre si (ASTM, 2001);

- Desgaste corrosivo – Corresponde à deterioração de um material, geralmente metálico, por ação física, química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2007);
- Desgaste erosivo – Pode se manifestar quando a superfície do material estiver exposta a escoamento de fluídos, partículas sólidas contidas em líquidos ou em jato de líquidos ou gases (SILVA, 2009);

Nos componentes dos equipamentos do setor sucroalcooleiro, em especial nos de preparo da cana, predomina a ocorrência de desgaste abrasivo, provocado pelo deslizamento de vários materiais na superfície da peça, como sucatas, refugos, o próprio bagaço da cana, areia, terra e outros materiais estranhos, bem como, pela corrosão devido à acidez do caldo da cana (BUCHANAN, SHIPWAY e MCCARTNEY, 2007). Por isso, em sequência dar-se-á maior ênfase à apresentação e discussão do desgaste abrasivo.

#### 2.5.1.1. Desgaste abrasivo

A norma ASTM G40-09 (1992) define o desgaste abrasivo como a perda de massa resultante da interação entre partículas ou asperezas duras, que são forçadas contra uma superfície e se movimentam ao longo dela, provocando danos superficiais intensos e com eles a destruição total ou parcial da peça.

Para Stoeterau (2004), essa forma de desgaste ocorre quando “uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole, provocando uma série de ranhuras nesta superfície”. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas.

Entre uma superfície e outra existe a presença de partículas denominadas asperezas, estas partículas podem ser provenientes de alguma fonte externa ou do próprio material que está em contato, onde o material mais macio tende a perder mais material durante o processo de desgaste (CASTRO, 2014).

O desgaste abrasivo é um dos principais tipos de desgaste, sendo um dos mais intensos e dos mais encontrados na prática, responsável por 50 % das causas de falhas das máquinas ou componentes (EYRE, 1991) apud (VILLABÓN e SINATORA, 2006).

O custo que o desgaste abrasivo representa no produto nacional bruto de uma nação industrializada é estimado entre 1-4% (DAVIS, 2001). O efeito do mesmo é particularmente mais evidente nas áreas industriais tais como a agricultura e a mineração.

#### 2.5.1.1.1. Classificação do Desgaste Abrasivo

Bayer (2004) fez uma classificação do desgaste abrasivo de acordo ao tipo e ao ambiente de contato, tais como abrasão a dois e a três corpos:

- Abrasão entre dois corpos: as partículas abrasivas ou asperezas são animadas de movimento relativo em relação à superfície do material. Marcas e riscos são formados paralelamente à direção de deslocamento destas partículas, conforme ilustrado na Fig. 2.7 (a) KÖNIG et. al. (2007).
- Abrasão entre três corpos: as partículas abrasivas agem como elementos interfaciais entre duas superfícies em movimento relativo. As partículas estão livres na interface, deformando plasticamente as superfícies de contato, conforme apresentado na Fig. 2.7 (b) KÖNIG et. al. (2007).

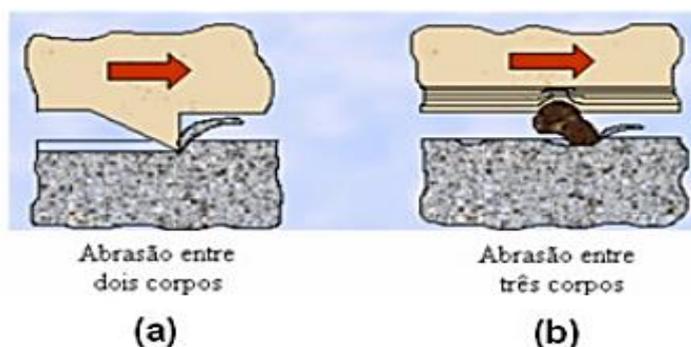


Figura 2. 7 - Demonstração esquematicamente à classificação do desgaste abrasivo: abrasão entre dois corpos (a) e abrasão entre três corpos (b) KÖNIG et. al. (2007)

Budinski (1988) e Davis (2001) classificam o desgaste abrasivo baseados na quantidade do dano exercido sobre a superfície, tais como: Abrasão a baixa tensão, Abrasão a alta tensão, abrasão por arranque e Polimento.

- Abrasão a baixa tensão: É definida como o desgaste que ocorre pelo contato entre as pequenas partículas abrasivas e o metal, levando a um sulcamento da superfície. O critério estabelecido para a abrasão a baixa tensão é que as forças devem ser o suficientemente baixas para evitar o esmagamento do abrasivo. Esse tipo de abrasão ocorre frequentemente na superfície de equipamentos que direta ou indiretamente manuseiam terras, areias, minérios ou carvão, tais como, máquinas agrícolas, equipamentos de escavação, transporte, manuseio de minérios, etc. A Fig 2.8a apresenta este mecanismo de desgaste.

- Abrasão a alta tensão: É o desgaste produzido sobre um nível de tensão elevado que é capaz de esmagar o abrasivo, aumentando a dureza por deformação na superfície. Nesta o abrasivo é forçado a penetrar entre as superfícies de dois metais e, por serem três os elementos envolvidos é também denominada de “abrasão a três corpos”. A Fig. 2.8b apresenta este mecanismo de desgaste.
- Abrasão por arranque: É caracterizada pela ação de impacto que as partículas submetem à superfície do metal, produzindo desta forma, a remoção. Este tipo de desgaste se apresenta em peças como as camisas dos trituradores, martelos de impacto, pulverizadores, etc. a deformação plástica é um dos fatores dominantes neste tipo de abrasão. A Fig. 2.8c apresenta este mecanismo de desgaste.
- O polimento (Fig. 2.8d), é uma forma muito suave de desgaste onde o mecanismo não tem sido claramente identificado, mas envolve desgaste por partículas numa escala muito fina.

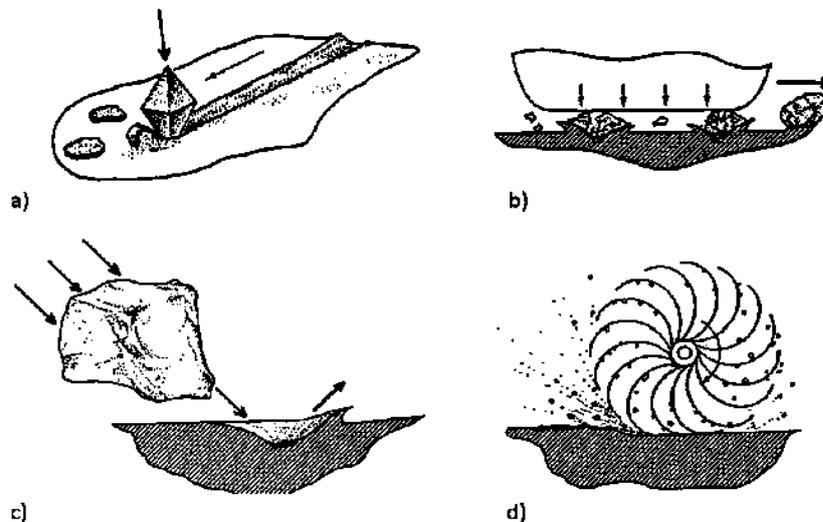


Figura 2. 8 – Ilustração esquemática dos quatro tipos de desgaste. a) abrasão a baixa tensão, b) abrasão a alta tensão, c) abrasão por arranque e d) polimento (BUDINSKI,1988)

#### 2.5.1.1.2. Mecanismos de desgaste abrasivo

No estudo dos fenômenos tribológicos associados à abrasão é importante identificar os micromecanismos de desgaste, os quais definem os processos de interação entre o abrasivo (ou asperidade dura) e a superfície desgastada (HUTCHINGS, 1987). Segundo Davis (2001), os micromecanismos de desgaste abrasivo podem ser dúcteis (microsulcamento e microcorte) ou frágeis (microtrincamento ou lascamento).

- **Microsulcamento:** No mecanismo (Fig. 2.9a e Fig. 2.9b) ocorre a interação entre a partícula e o abrasivo em condições dúcteis, provocando o deslocamento total do volume de material (ou fase), deformado plasticamente para as laterais do sulco e formando saliências. Durante a primeira etapa do microsulcamento não há perda de material efetivo, entretanto pela interação simultânea e sucessiva de várias partículas, as condições de desgaste (carga, tipo de material e abrasivo) podem ocasionar à perda de material.
- **Microcorte:** A perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo (Fig. 2.9c). Se as condições favorecem o microcorte puro o volume de material perdido é igual ao volume do risco produzido.
- **Microtrincamento:** Nesse mecanismo, típico de condições frágeis de desgaste, a interação entre a partícula e o material leva ao destacamento de grandes fragmentos, os quais podem ser maiores que a dimensão do próprio risco, devido à formação e a propagação de trincas durante o evento (Fig. 2.9d).

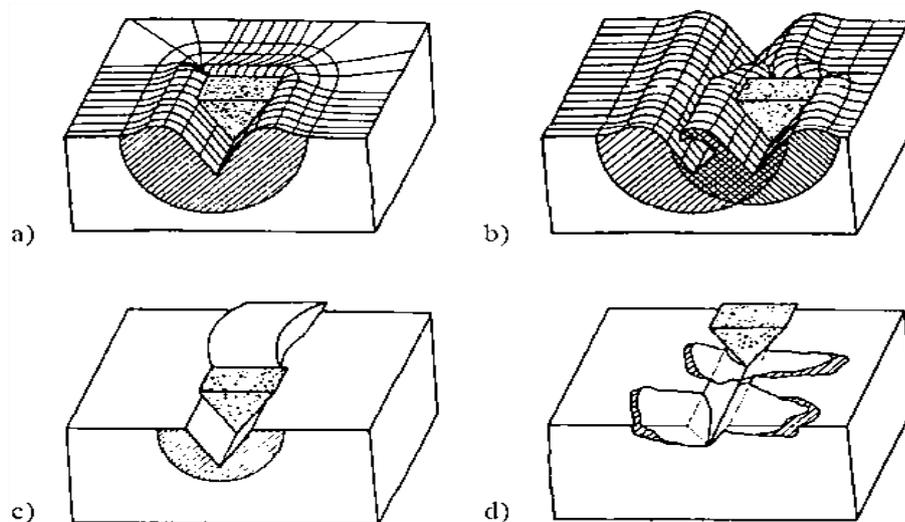


Figura 2. 9 – Ilustração esquemática dos principais micro-mecanismos de desgaste abrasivo: a) e b) microsulcamento, c) microcorte e d) microtrincamento (ZUM GAHR,1998)

### 2.5.2. Avaliação de desgaste

Os ensaios de desgaste são realizados com o intuito de prever o comportamento de um determinado material em serviço. No entanto, existe uma grande dificuldade em reproduzir, laboratorialmente, as condições reais a que o material se encontra sujeito, quando em serviço. Por conseguinte, os resultados obtidos nestes tipos de ensaios constituem, apenas, uma base

qualitativa para a análise do comportamento do material. Dessa forma, para que seja feita uma análise confiável da resistência ao desgaste de um dado material, este deve ser sujeito a ensaios distintos, que simulem mecanismos, também eles, distintos (LAIRD, GUNDLACH e RÖHRIG, 2000).

Especificamente para reproduzir o desgaste abrasivo, existem diversos tipos de ensaios científicos, cujo equipamento utilizado é conhecido como “abrasômetro”. Em geral o desgaste Abrasivo é avaliado via perda de massa, entretanto testes mais recentes utilizam a variação de volume do material desgastado para permitir a comparação com outros materiais (DA SILVA, 2007).

O equipamento para teste abrasivo Roda de Borracha é o mais utilizado para ensaios de abrasão a baixa tensão, cujo procedimento é estabelecido pela norma ASTM G65-00 (2001), Fig. 2.10. O seu princípio de funcionamento consiste em esmerilhar um corpo de prova padronizado, com areia cujo tamanho de grão e a composição são controlados. O abrasivo é introduzido entre o corpo de prova e um anel de borracha de dureza especificada, provocando o riscamento. O desgaste é quantificado via perda de massa pela pesagem dos corpos de prova antes e após o ensaio.

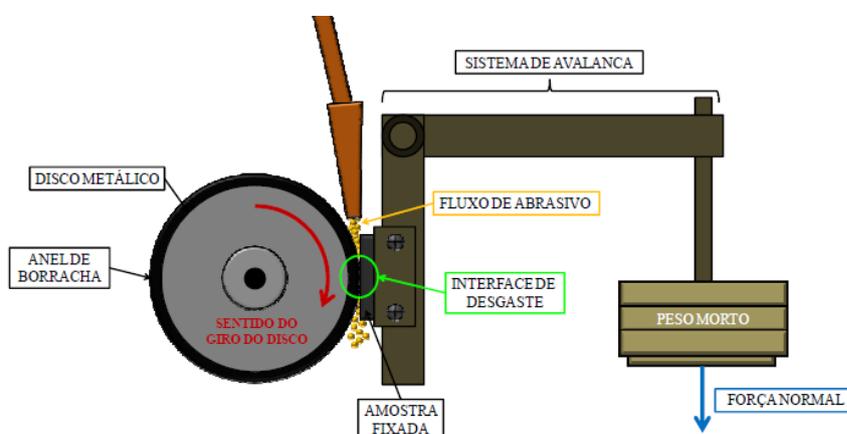


Figura 2. 10 – Ilustração esquemática do funcionamento do Abrasômetro de Roda de Borracha (García, 2011)

## 2.6. Revestimento Duro

Revestimento duro é o processo caracterizado pela produção de uma camada dura e resistente ao desgaste, na superfície de uma peça, por meio da soldagem. O material de deposição pode ser na forma de varetas, arames ou pós, com composição química adequada, para atender as necessidades da solicitação. Durante a soldagem, o material depositado é

fundido juntamente com a material base, ocorrendo, portanto, alguma diluição deste último no material de adição e produzindo a camada do revestimento. Considera-se um bom revestimento, quando a diluição do substrato é mínima, ou seja, apenas o suficiente para produzir a ligação metalúrgica, entre o revestimento e o substrato, mantendo assim, as propriedades de resistência ao desgaste da liga depositada (BATISTA e NASCIMENTO, 2012).

Algumas das técnicas da soldagem por fusão mais utilizada na aplicação de revestimentos são pelos processos Oxiacetilênico, Eletrodo Revestido, MIG/MAG, Arco Submerso e Arames Tubulares. Dentro destes o processo a arco elétrico com eletrodo revestido é o mais usado devido ao baixo custo dos consumíveis e à facilidade de aplicação, enquanto os arames tubulares têm sido preferidos pela alta produtividade aliada à alta qualidade de solda (BUCHELY et al 2005). A Fig. 2.11 mostra facas picadoras de cana-de-açúcar, comumente usadas na indústria sucroalcooleira, recuperadas e revestidas mediante a aplicação de revestimento duro pelo processo de soldagem a arco elétrico.

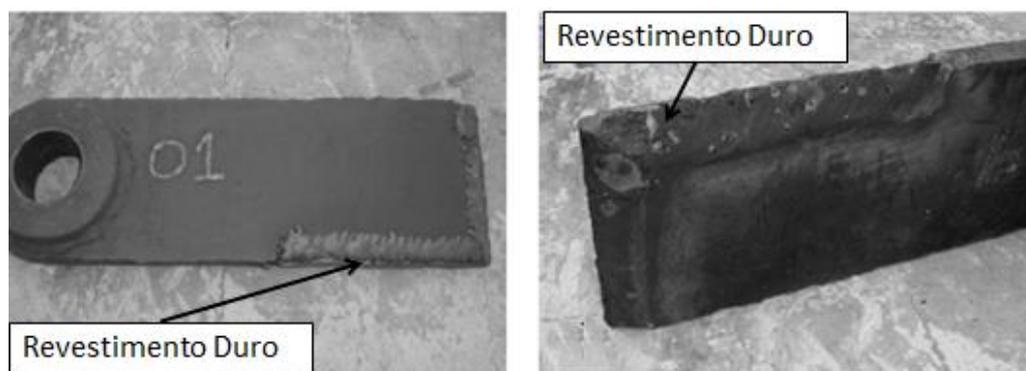


Figura 2. 11 – Facas picadoras recuperadas pela aplicação de revestimento duro (Lima 2008)

Na deposição de revestimentos, o consumível é quase sempre de composição diferente do metal de base e os elementos de liga presentes são balanceados para garantir o efeito desejado. O aço ao carbono é normalmente utilizado como metal de base, cujo elemento em abundância é o ferro. Se houver diluição elevada do metal de base serão prejudicadas as características do revestimento (COLAÇO, 2013).

Segundo AWS (1998), as variáveis fundamentais que afetam a diluição das soldas de revestimento são:

- Corrente: Aumentando a corrente de soldagem (densidade de corrente) aumenta a diluição. O arco se torna mais quente, penetrando mais profundamente fundindo mais metal de base.
- Extensão do Eletrodo: Uma longa extensão de eletrodo diminui a diluição (para processo com eletrodos consumíveis) pelo aumento na taxa de fusão do eletrodo ( $I^2 R$ ), diminuindo assim a corrente para uma fonte de tensão constante. Contrariamente, uma pequena extensão do eletrodo tende a aumentar os níveis de diluição.
- Espaçamento entre Cordões: O pequeno espaçamento entre cordões (maior sobreposição) reduz a diluição porque uma maior quantidade do cordão de solda previamente depositado é refundido e misturado na poça de soldagem, ao mesmo tempo em que uma menor quantidade de metal de base é fundida e incorporada à solda. O maior espaçamento entre cordões (menor sobreposição) aumenta a diluição.
- Oscilação do Eletrodo (tecimento): Maiores amplitudes na oscilação do eletrodo reduzem a diluição. Cordões filetados (sem tecimento) produzem máxima diluição. A frequência da oscilação também afeta a diluição. Como regra, quanto maior a frequência de oscilação, menor a diluição.
- Velocidade de Soldagem: Um aumento na velocidade de soldagem diminui a quantidade de metal de base fundido e aumenta a quantidade de metal de revestimento por unidade de tempo ou distância, diminuindo a diluição. Esta redução da diluição ocorre como resultado da alteração na geometria do cordão e da espessura da camada de revestimento, e pelo fato de que a força do arco atua mais na poça de fusão do que no próprio metal de base.
- Posição de Soldagem e Inclinação do Eletrodo: A posição de soldagem na qual o revestimento é aplicado exerce um importante papel na diluição. Dependendo da posição de soldagem e sua inclinação (considera-se os ângulos de trabalho e ângulo de deslocamento), a gravidade irá favorecer com que a poça de soldagem em relação à atuação do arco esteja: sempre à frente, andando junto ou sempre atrás. Quanto mais a poça esteja à frente ou junto à frente do arco, menor será a penetração no metal de base e conseqüentemente menor será a diluição. Isto porque, a poça fundida recebe bastante energia do arco antes que este atinja o metal de base.

Em termos de seleção de materiais para serem depositados, existem diferentes tipos de metais e ligas disponíveis no mercado para esta aplicação. As ligas usadas para revestimento

duro por soldagem podem ser classificadas de várias formas, e as principais são a composição química e a microestrutura. Segundo Wainer, Brandi e De Mello (1992), não existe uma classificação que envolva a maioria das ligas utilizadas para revestimento duro (a maioria destas são designadas pelos fabricantes), embora, existam algumas classificações baseadas na composição química do metal de adição depositado. Wainer, Brandi e De Mello (1992) desenvolveram uma classificação baseada na composição química, dividindo as ligas ferrosas em cinco classes:

- Classe 1 – Aços de baixa e média liga com 2 a 12% de elementos de liga;
- Classe 2 – Aços de alta liga, incluindo aços rápidos e aços ao manganês;
- Classe 3 – Ligas a base de ferro com 25 a 50% de elementos de liga;
- Classe 4 – Ligas à base de cobalto, níquel e níquel-cromo;
- Classe 5 – Ligas de carbonetos de tungstênio (38 a 60%) em matriz dúctil.

Buchanan, Shipway e McCartney (2007) recomendam que ao escolher uma liga para revestimento duro deve ser considerado a sua soldabilidade, os custos e a compatibilidade metalúrgica. Dentre as diversas ligas desenvolvidas, os revestimentos à base de ferro são os mais populares na indústria sucroalcooleira, devido ao seu custo relativamente baixo e à fácil aplicação. A sua composição é frequentemente de uma estrutura hipoeutética ou hipereutética e a resistência ao desgaste, atribuída a uma microestrutura de carbonetos duros dispersos em uma matriz relativamente macia. As ligas com alto Fe-Cr-C são particularmente atrativas porque os carbonetos podem formar uma grande variedade de microconstituintes, provendo um aumento da resistência à abrasão.

Por outro lado, Corrêa et al (2007) afirma que as ligas Fe-Cr-C são susceptíveis às trincas de solidificação, as quais aliviam as tensões de soldagem, mas, no caso de aplicações onde o componente está sujeito à vibração ou impacto, podem levar à fragmentação do revestimento. Em função disso, se busca incessantemente a obtenção de ligas que apresentem um bom desempenho de resistência ao desgaste e tenacidade.

Para melhorar a tenacidade dessa liga são adicionados elementos como Nb, Ti, V e W, os quais formam carbonetos do tipo MC, que são bem mais duros, porém mais finos que os carbonetos de cromo (ATAMERT E BADESHIA, 1988). Conseguindo-se uma distribuição uniforme e pequeno espaço entre os mesmos, as partículas abrasivas não podem efetivamente

penetrar na matriz de menor dureza, levando a uma melhoria da resistência ao desgaste em combinação com uma maior tenacidade (CORRÊA *et al*, 2007).

Alguns autores como Berns e Fisher (1987), Scandella e Scandella (2004), Burchelly *et al* (2005), Corrêa *et al* (2007), Lima (2008), García (2011) e Colaço e Maranhão (2014) comparam a resistência ao desgaste de revestimentos com ligas FeCrC puras e com adição de elementos metálicos formadores de carbonetos tais como o Ti, Nb, V e W. A adição destes elementos nas ligas de alto teor de cromo melhora as propriedades de resistência ao desgaste devido à inserção na matriz de novos carbonetos do tipo MC (NbC, TiC, VC, ZrC e WC) com durezas superiores ou iguais à dureza dos carbonetos de cromo. O nióbio e o titânio vêm sendo usados mais regularmente por serem os mais efetivos elementos formadores de carbonitretos, produzindo uma precipitação de elevada dureza.

Lima (2008) realizou a avaliação ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar em uma indústria sucroalcooleira. Foram utilizados quatro consumíveis (um eletrodo revestido do tipo FeCrC (chamada de ER1) e três arames tubulares – FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb. A Fig. 2.12 mostra as facas desgastadas após serem utilizadas em uma indústria sucroalcooleira. Verifica-se, além do desgaste por abrasão em todas as facas, a perda de metal por lascamento do revestimento, principalmente nas ferramentas revestidas com os arames FeCrC+Nb. Além disso, alguma perda de metal de base nas faces das facas, na região de contato com a cana (superfície lixada das facas na Fig. 2.10) e também perda de pedaços de revestimento nas extremidades de início da solda, nos dois arames citados.

A perda de massa obtida nesta pesquisa foi dimensionada via pesagem das facas, antes e após o período de trabalho. Pode ser observado que dentre os arames tubulares, que o pior resultado em valores médios (maior desgaste) foi obtido com o revestimento FeCrC+Nb, seguido do FeCrC e, com o melhor resultado (menor desgaste), o revestimento FeCrC+Ti. O eletrodo ER1 apresentou desgaste similar ao revestimento FeCrC+Ti.

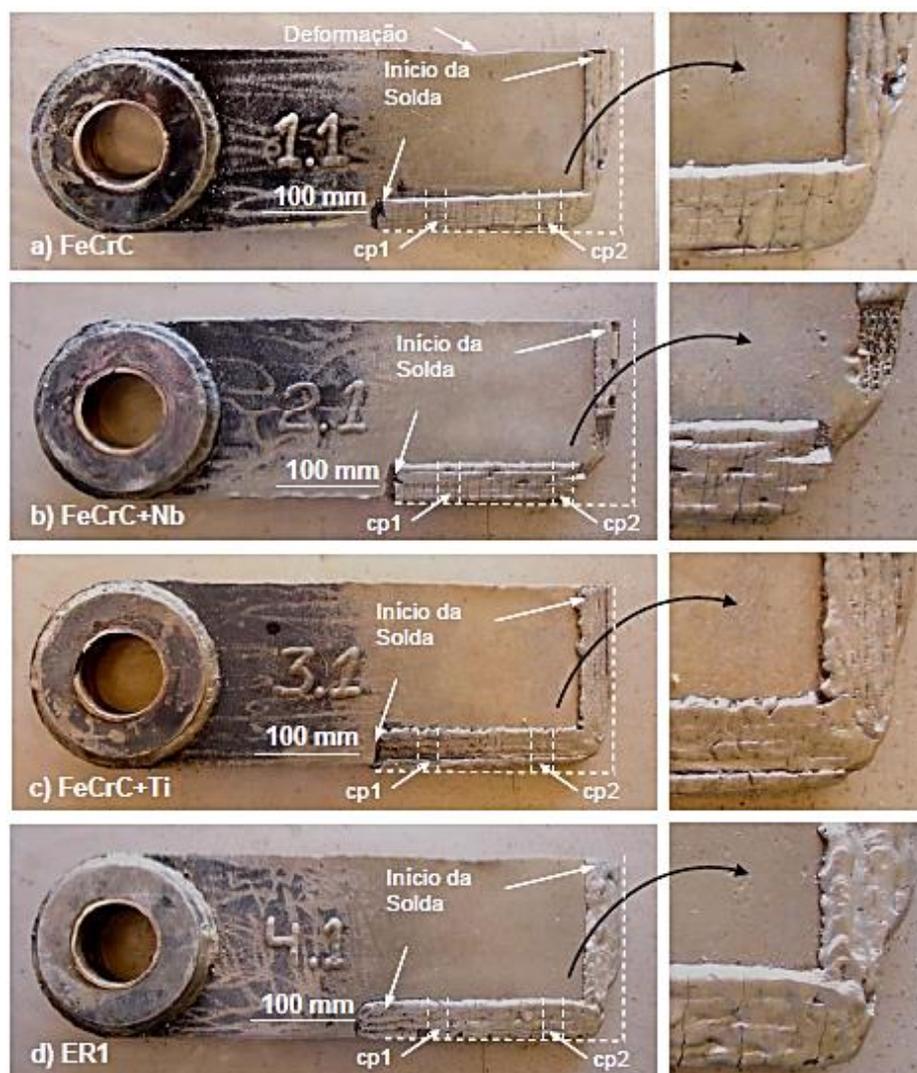


Figura 2. 12 – Facas desgastadas, com detalhe do canto de maior desgaste: arame FeCrC, FeCrC+Nb, FeCrC+Ti e eletrodo revestido ER1 (LIMA, 2008)

Lima (2008) concluiu que o pior resultado do arame FeCrC+Nb, por sua vez, estaria relacionado ao lascamento do revestimento na presença de trincas e sob a ação do impacto com a cana e com a estrutura do picador. Isso contrasta com o melhor resultado do FeCrC+Ti que não apresentou trincas superficiais visíveis a olho nu, antes ou após o trabalho.

Segundo Scotti e Rosa (1997), durante o processo de soldagem podem aparecer trincas devido à fragilidade dos revestimentos duros. Estas não são, necessariamente, indicadores de redução na resistência ao desgaste, podendo até serem favoráveis por reduzirem as tensões internas. Por outro lado, são indesejáveis nos casos de revestimento estanques ou sob esforços dinâmicos que levem à fadiga e, conseqüentemente, ao arrancamento do revestimento.

Para Ribeiro (2004), as trincas superficiais que apareceram nas amostras ensaiadas são típicas de solidificação. Essas trincas surgem para reduzir as tensões residuais devido à contração durante o resfriamento, sendo que essas são afetadas pela composição química do revestimento, nesse caso, revestimentos da classe Fe-C-Cr. As trincas surgidas no revestimento não mostraram influência sobre a perda de volume das amostras, já que os melhores resultados de resistência ao desgaste de abrasão à baixa tensão foram verificados nas amostras que apresentaram as mesmas.

Garcia (2011), por outro lado, observou que a elevada presença de trincas transversais na direção do desgaste, onde as partículas abrasivas podem adentrar e, somadas com a compressão imposta pela roda de borracha, provocam um desgaste mais acentuado na extremidade de saída, podendo ser um fator importante para a diminuição da resistência ao desgaste nas amostras revestidas.

## **2.7. Amanteigamento**

Segundo Lima, Silva e Chilque (2010), amanteigamento é uma camada que se utiliza para interligar materiais dissimilares, por apresentarem diferenças entre seus coeficientes de expansão térmica e pontos de fusão. Além disso, serve para formar uma proteção que irá dificultar a migração de elementos de liga indesejáveis do metal de base para o metal de solda.

Esta técnica garante uma boa união com o metal base, evita trincas a frio induzidas pelo hidrogênio sob o revestimento até mesmo em peças pré-aquecidas, limita o efeito de contaminação do metal de solda devido à diluição no metal de base menos nobre e diminui a propensão a trincas quando se faz necessário o aumento do comprimento do revestimento duro, tanto no metal base como no metal depositado (GIMENES, 2002).

O amanteigamento também é aplicado como absorvedor de tensões em soldagem, a exemplo dos revestimentos duros, cujo material tem alta resistência e baixa ductilidade (Liga homogênea depositada por soldagem, na superfície de um material de menor dureza) (PONTES, 2012).

O amanteigamento pode ser útil de outras formas, por exemplo, mudar a composição do metal de solda formado ao depositar a liga resistente ao desgaste e, ao ter maior ductilidade, permitir que o metal deforme plasticamente sem trincar, com isso, redistribuindo e diminuindo as tensões residuais (BEILER, 2012).

De acordo com Costa (2013), na região da interface entre materiais de uma soldagem por amanteigamento podem surgir falhas, causadas pela diferença da composição química entre os materiais envolvidos, atribuídas a soldagem de materiais dissimilares que apresentam diferença de condutividade e expansão térmica, ocorrendo problemas de fissuração, fatores estes que proporcionam a geração de tensões internas.

O processo de amanteigamento deve possuir, de acordo com Fratari, Schwartzman e Scotti (2009), algumas características em relação ao substrato:

- Compatibilidade química com o substrato (por exemplo, não se consegue amanteigar aço com alumínio ou mesmo sobre cobre puro);
- Composição que combinada com a do substrato não resulte em soldas com susceptibilidade a trincas;
- Alta ductilidade (no caso de se procurar reduzir as tensões geradas pelos passes de união entre dois componentes);
- Baixa diluição, através da seleção de parâmetros (considerando que muitas vezes os custos dos materiais e amanteigamento são superiores ao do substrato).

## **2.8. Microestrutura e Resistência ao desgaste**

A maioria dos materiais empregados em aplicações tribológicas necessita de uma elevada resistência a algum tipo específico de desgaste, dependendo da aplicação a que se destina. Tais materiais, geralmente polifásicos, possuem altas porcentagens de precipitados ou fases dispersas, cuja dureza está na mesma ordem de grandeza ou superior à das partículas abrasivas. As fases destes materiais são os principais responsáveis pelo aumento substancial na resistência ao desgaste, enquanto que a matriz assegura a necessária tenacidade e ligação entre as fases (SHAKELFORD, 1996).

A microestrutura dos revestimentos tem um papel importante no desempenho em relação à resistência ao desgaste, principalmente a microestrutura formada por fases duras ou carbonetos duros. Fatores como composição da liga e do tratamento térmico influenciam na formação de distintos carbonetos, como MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  e  $Cr_2C_3$ , onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos e C carbono (LIMA, 2008).

Segundo Gregory e Bartle (1980), o aumento da dureza não necessariamente aumenta a resistência ao desgaste. Exemplo disso, é a comparação de materiais diferentes com a mesma dureza: um aço de construção tratado termicamente e um revestimento duro

apresentaram perda de massa diferentes sendo menor para o revestimento duro, estando este comportamento relacionado com a microestrutura. Fatores como fase mais dura (Martensita) ou carbonetos duros são preponderantes na microestrutura para a melhoria da resistência ao desgaste em revestimentos. Scotti e Rosa (1997) citam que a dureza dos revestimentos é mais influenciada pela microestrutura, que por sua vez, depende do calor imposto e da composição química. Embora se espere que revestimentos com maior dureza tenham consequentemente maior resistência ao desgaste, observam-se algumas contradições na literatura corrente.

Para Bálamo, Scotti e De Mello (1995), o aporte de energia tem grande influência na morfologia da microestrutura dos revestimentos duros, em particular no tamanho médio da mesma, onde, quanto menor o aporte térmico, consequentemente, maior a velocidade de solidificação, levando ao refinamento da microestrutura.

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

O efeito do teor de carbono e do aporte térmico na microestrutura e no tamanho dos microconstituintes são ilustrados na Fig. 2.13. Observa-se que a Fig. 2.13a e 2.13b são constituídas predominantemente por carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$  em uma matriz eutética de austenita mais carbonetos, enquanto que nas Fig. 2.13c e 2.13d, devido ao menor teor de carbono, a microestrutura é composta por dendritas de austenita em matriz eutética. Verifica-se comparativamente que nas ligas soldadas com menor aporte térmico (Fig. 2.13b e 2.13d), tanto os carbonetos  $M_7C_3$  quanto as dendritas de austenita apresentam maior refino devido à maior velocidade de resfriamento (BÁLAMO, SCOTTI e DE MELLO, 1995).

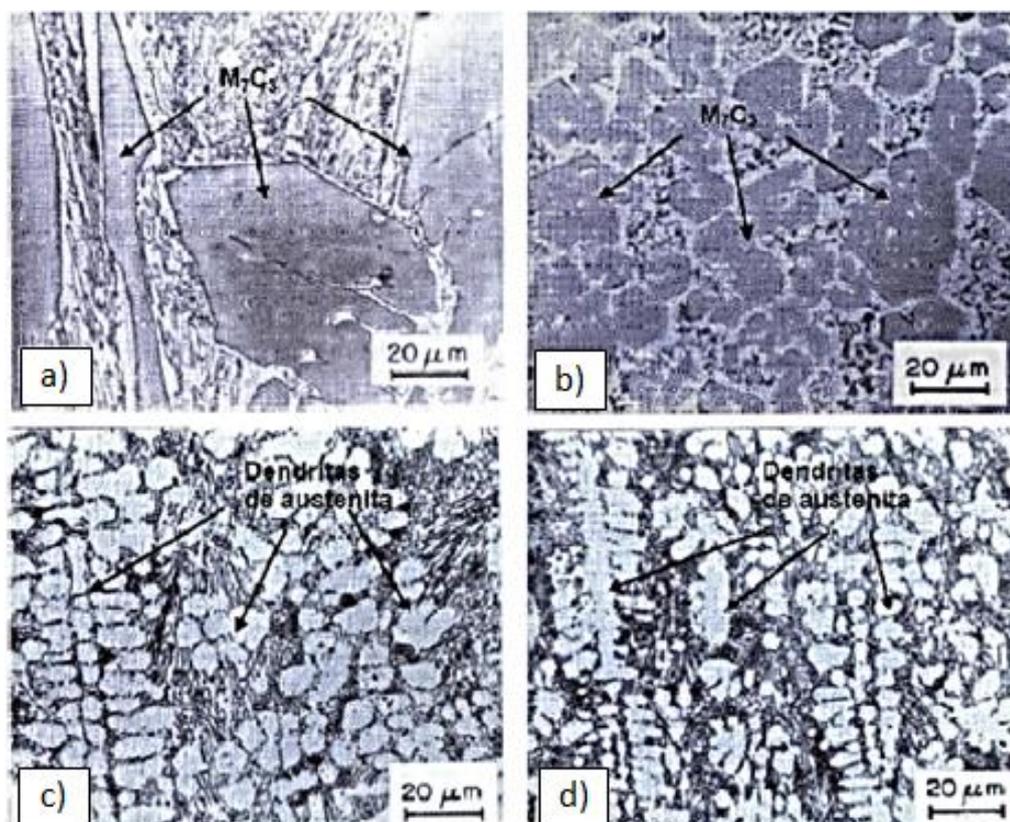


Figura 2. 13 – Microestrutura de revestimento duro liga Fe-Cr-C : a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C (BÁLSAMO, SCOTTI e DE MELLO,1995)

García (2011) utilizou em sua pesquisa dois arames tubulares auto protegidos de 1,6mm de diâmetro de liga FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, como arames energizados. Na adição de arame não energizado usou-se arames tubulares de liga FeCrC e FeCrC+Nb de 1,6 mm de diâmetro e o arame maciço ER308L de 1 mm de diâmetro. A diferença entre os arames tubulares é determinada pelos diferentes teores de carbono, cromo, silício e manganês, além da adição de nióbio, no primeiro, e a adição de titânio e molibdênio, no segundo, como pode ser observado na Tab. 2.1, da composição nominal fornecida pelo fabricante.

A Tab. 2.2 apresenta a faixa de dureza obtida no metal de solda em primeira camada para todas as condições de soldagem. Observa-se que foram os revestimentos com adição de arame não energizado os que apresentaram superioridade na resistência ao desgaste, mas no caso da dureza foram os que tiveram valores menores, não sendo a dureza um parâmetro seguro para avaliar a resistência ao desgaste dos revestimentos.

Tabela 2. 1 - Composição química dos arames-eletrodos fornecida pelo fabricante (GARCIA, 2011)

Consumíveis	Porcentagem em Peso (%)							
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Nb	Ti	V
FeCrC	05	1,5	1,5	27	...	...	...	...
FeCrC+Nb	05	0,5	01	22	...	07	...	...
FeCrC+Ti	1,8	1,2	0,7	6,5	0,8	...	05	0,2
ER308L	0,03	1,0-2,5	0,30-0,65	19,5-22,0	0,75	9,0-11,0	0,03	0,03

Tabela 2. 2 – Dureza dos revestimentos (GARCIA, 2011)

Condições de Consumíveis	Media da Dureza [HRC]	Desvio Padrão
FeCrC+Ti	64,69	2,84
FeCrC+Ti com adição de FeCrC	57,58	1,00
FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	45,90	2,31
FeCrC+Nb	64,10	0,89
FeCrC+Nb com adição de ER308LSi	62,20	1,64

Comparando os resultados de resistência ao desgaste dos revestimentos das ligas FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, obtidos por Lima (2008), com o trabalho de Garcia (2011), que a avaliou a resistência ao desgaste de revestimento obtidos através do processo FCAW com adição de arame não energizado, conforme a Fig. 2.14., pode-se dizer que houve um aumento na resistência média ao desgaste conseguido pela adição de arame não energizado, que provavelmente provocou uma menor diluição no revestimento.

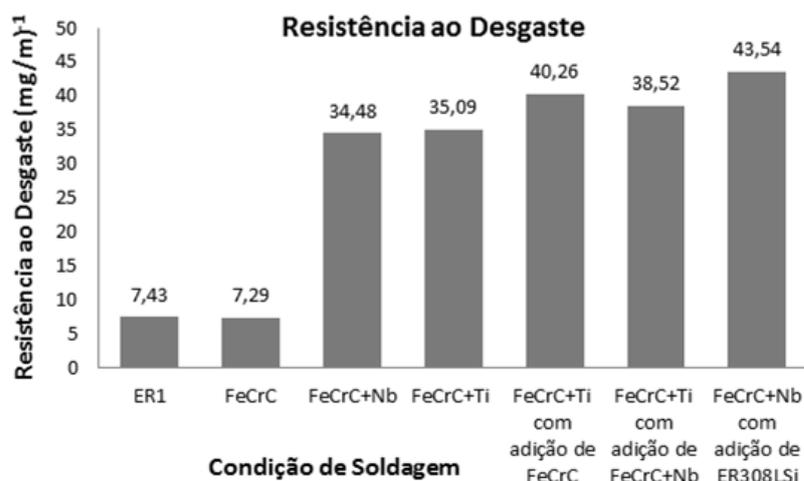


Figura 2. 14 - Comparação da resistência ao desgaste entre diferentes técnicas de soldagem e consumíveis. Adaptado de (LIMA, 2008 e GARCIA, 2011)

### 2.8.1. Microestrutura do arame Liga FeCrC

A Fig. 2.15 ilustra a microestrutura obtida, por microscopia ótica, do arame FeCrC na pesquisa de Lima (2008). Foi observado que próximo da interface com o metal de base (Fig. 2.15a) até próximo à superfície, o revestimento FeCrC apresentou uma microestrutura com crescimento dendrítico, formada por dendritas de austenita em matriz eutética (austenita mais carbonetos). Na superfície do revestimento se formava uma fina camada composta por carbonetos hexagonais primários ( $M_7C_3$ ), sem uma orientação preferencial, imersos em matriz eutética, como ilustrado pela Fig. 2.15b. Estruturas similares são observadas nas Fig. 2.16 e Fig. 2.17, retiradas dos trabalhos de Leite e Marques (2009) e Polido e Gallego (2006).

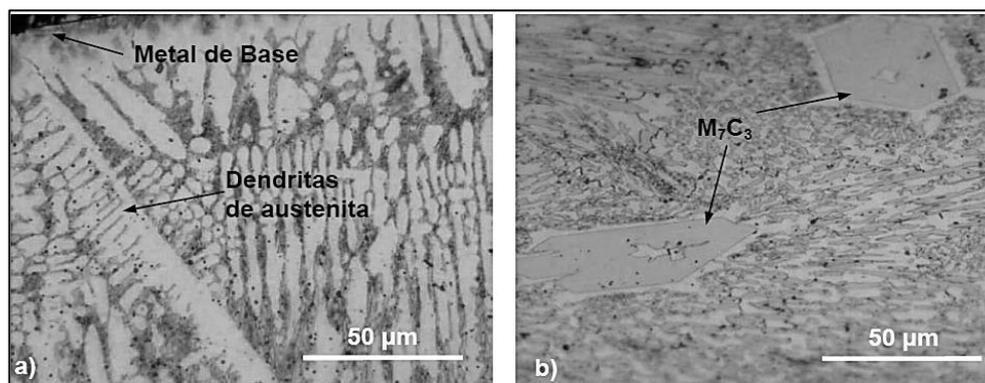


Figura 2. 15 - Microestrutura do arame FeCrC na interface com o MB (a) e na superfície do revestimento (b) (Ataque Nital 2%; aumento de 1000X) (LIMA, 2008)

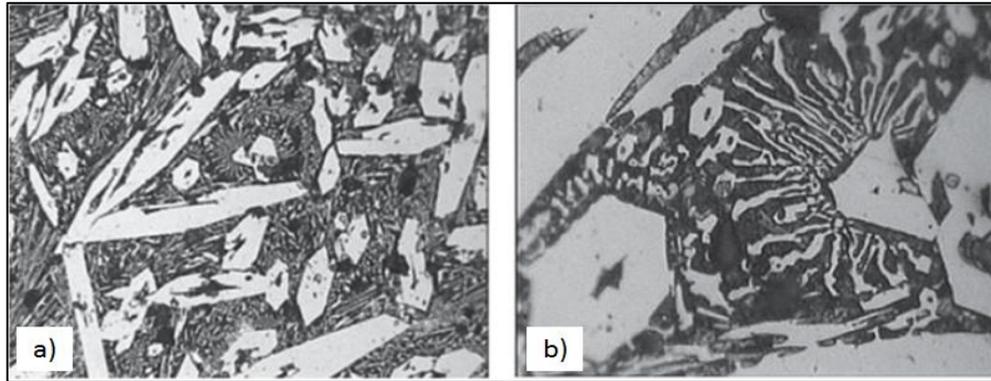


Figura 2. 16 - Microestrutura do arame FeCrC (a) 200x e (b) 1000x. Ataque Nital 2% (LEITE e MARQUES, 2009)

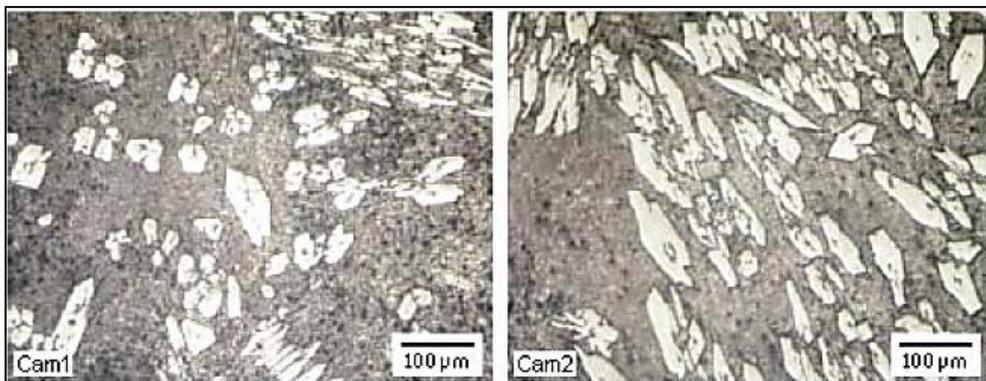


Figura 2. 17 - Microestrutura de revestimento duro Fe-42Cr-5,3C em primeira e segunda camada (Polido e Gallego, 2006)

### 2.8.2. Microestrutura do arame Liga FeCrC+Ti

A Fig. 2.18 ilustra a microestrutura obtida com o arame de FeCrC+Ti no trabalho de Lima (2008) mediante microscopia ótica, onde se observa em todo volume do depósito, uma matriz austenítica-martensítica bastante homogênea, envolvendo carbonetos primários de titânio possuindo grandes dimensões, os quais podem variar de 25  $\mu\text{m}$ , próximo à interface com o metal base, até mais de 150  $\mu\text{m}$  nas regiões próximas à superfície. Na referida figura, as regiões brancas representam austenita retida, enquanto a parte escura representa produtos de decomposição da austenita (martensita ou bainita) com austenita retida entre as agulhas. Este fato foi também observado no trabalho de Garcia (2011) e Wang et al. (2005), conforme as Fig. 2.19 e Fig.2.20, respectivamente.

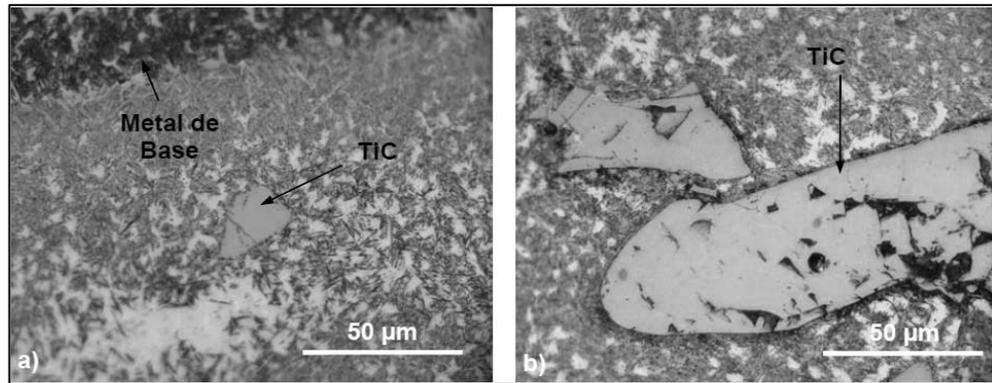


Figura 2. 18 - Microestrutura do arame FeCrC+Ti na interface com o metal de base (a) e na superfície do revestimento (b) (Ataque Nital 2%; aumento de 1000X) (LIMA, 2008)

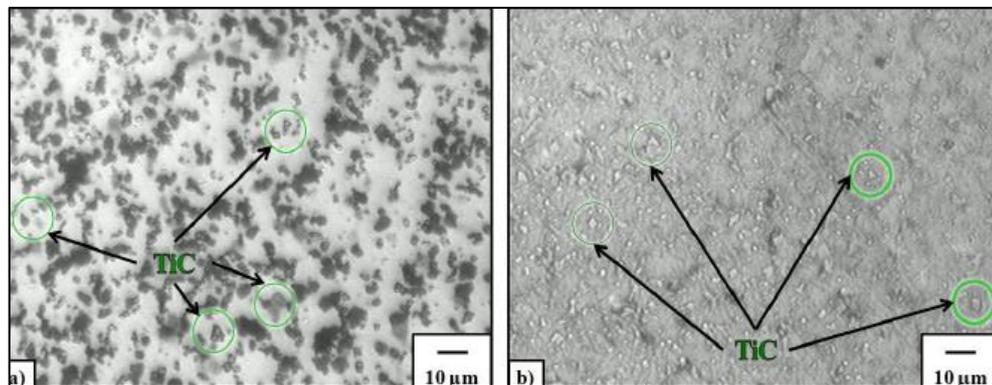


Figura 2. 19 - Microestrutura do revestimento da liga FeCrC+Ti. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s (GARCIA, 2011)

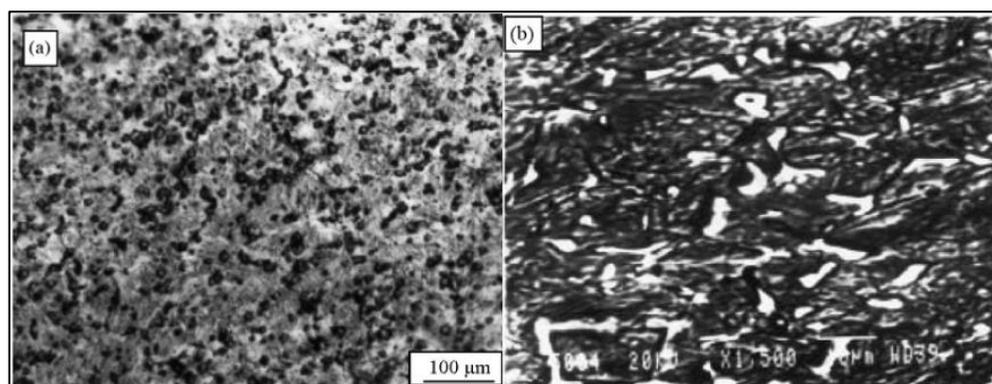


Figura 2. 20 - Distribuição de partículas de TiC na camada de revestimento duro. Imagens de microscopia a) ótica e b) eletrônica de varredura (WANG et al., 2005)

### 2.8.3. Microestrutura do arame Liga FeCrC+Nb

A microestrutura obtida por Lima (2008) para o arame da liga FeCrC+Nb por microscopia ótica é apresentada na Fig. 2.21, mostrando uma formação que se assemelha ao

FeCrC por apresentar estrutura dendrítica na interface com o metal de base (Fig. 2.21a) e carbonetos primários em matriz eutética (Fig. 2.21b), além da presença de carbonetos de nióbio NbC, na forma primária, e/ou em frações mais finas, oriundas de reações mais complexas do sistema quaternário. O mesmo é apresentado nas Fig. 2.22 e Fig.2.23 obtidas nas pesquisas de Garcia (2011) e Leite e Marques (2009), respectivamente.

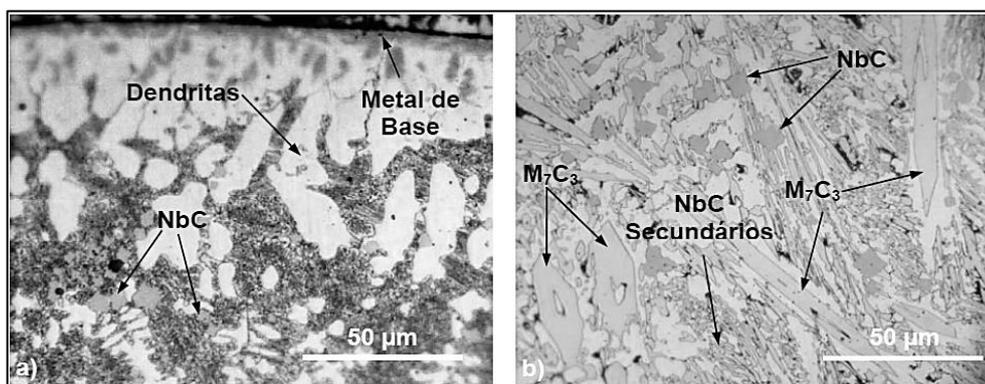


Figura 2. 21 - Microestrutura do arame FeCrC+Nb na interface com o MB (a) e na superfície do revestimento (b) (Ataque Nital 2%; aumento de 1000X) (LIMA, 2008)

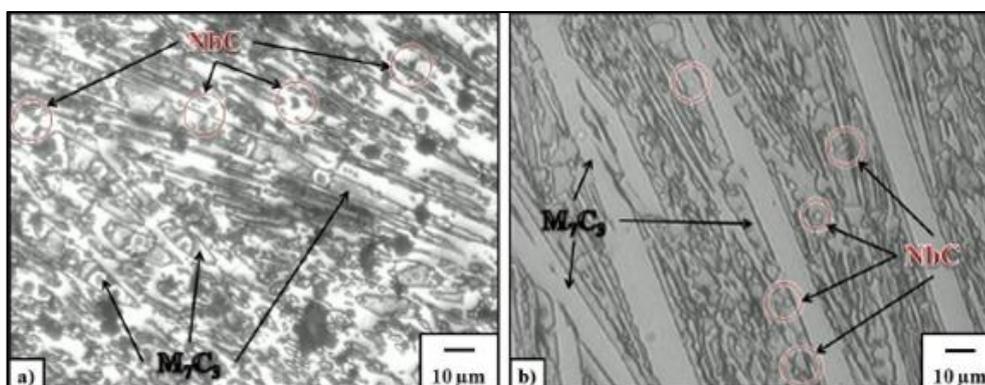


Figura 2. 22 - Microestrutura do revestimento da liga FeCrC+Nb. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s (Garcia, 2011)

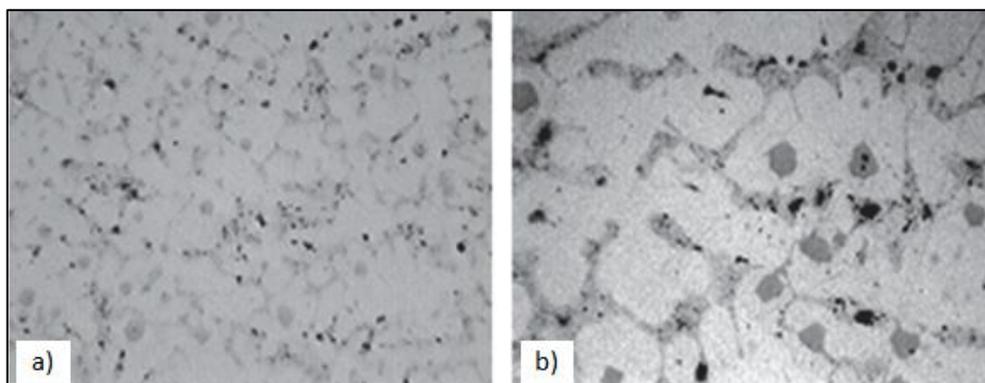


Figura 2. 23 – Microestrutura do revestimento feito com a liga FeCrC+Nb. a) 200x e b) 1000x. Ataque: Nital 2% (LEITE e MARQUES, 2009)

#### 2.8.4. Microestrutura da combinação entre Ligas

A Fig. 2.24 e a Fig. 2.25 apresentam a microestrutura obtida da adição de arame não energizado de FeCrC+Nb e FeCrC na liga de FeCrC+Ti. Observa-se, novamente, nos dois casos a presença de carbonetos de titânio finamente distribuídos pela matriz.

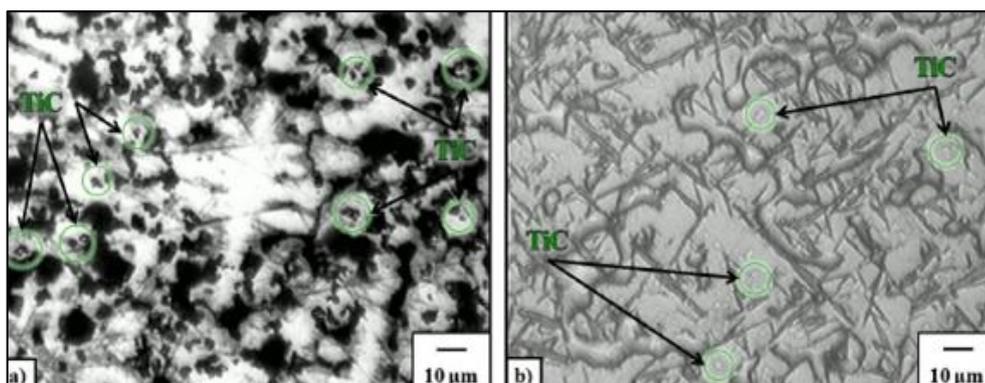


Figura 2. 24 - Microestrutura do revestimento feito com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s (Garcia, 2011)

A microestrutura dos revestimentos da condição de consumível 2 (Fig. 2.24), igual que a microestrutura da liga FeCrC+Ti, não possui carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$ , isto é devido ao baixo teor de cromo na liga FeCrC+Ti e a que na adição de cromo com a adição de arame não energizado de FeCrC não foi suficiente para levar à formação deste tipo de carbonetos. Na Fig. 2.25b, microestrutura dos revestimentos feitos com a condição de consumível 3 (Fig. 2.25), pode-se observar a presença de alguns carbonetos de nióbio com o formato pequeno e alongado.

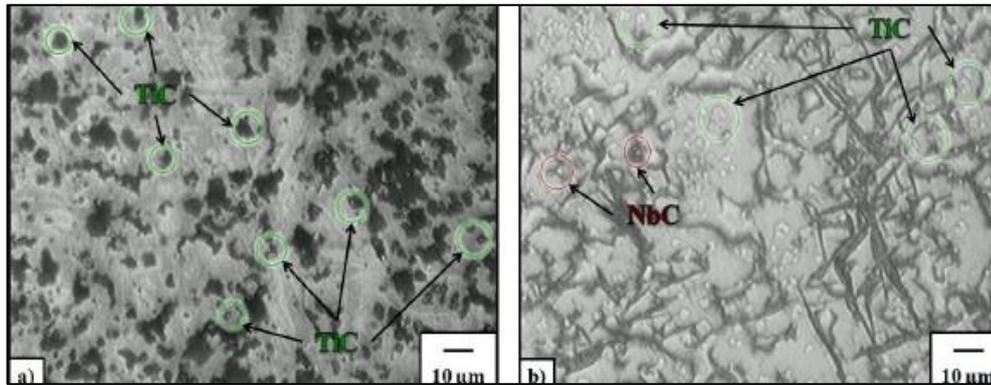


Figura 2. 25 - Microestrutura do revestimento feito com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s (Garcia, 2011)

A microestrutura do revestimento feito com a liga de FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308LSi é mostrada na Fig. 2.26, nela pode-se observar a presença de carbonetos de Nb ao igual que no observado na liga de FeCrC+Nb, mas a distribuição destes carbonetos não se encontra de forma uniforme e em alta quantidade. A matriz destas ligas têm semelhança com a observada por Fan et al (2006) apresentando uma estrutura hipoeutética.

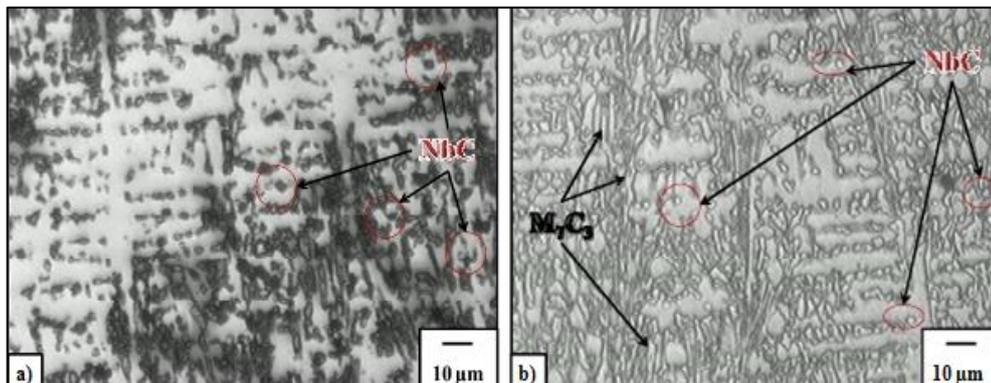


Figura 2. 26 - Microestrutura do revestimento feito com FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308LSi. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s (Garcia, 2011)

# CAPÍTULO III

## MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de facilitar o entendimento e compreensão das atividades desenvolvidas nesta pesquisa serão descritos a seguir os equipamentos, os materiais consumíveis e a metodologia utilizada.

### 3.1. Materiais

#### 3.1.1. Metal de Base

Os testes no laboratório foram realizados utilizando chapas de aço carbono ABNT 1020 com dimensões de 200 x 38,1 x 12,7 mm para os ensaios preliminares e para obtenção dos parâmetros geométricos do cordão de solda (Fig.3.1a). Para aplicação dos revestimentos duros utilizaram-se o mesmo material de dimensões 250 x 50,8 x 12,7 mm dos quais se extraíram os corpos de prova para a avaliação da diluição e do desgaste abrasivo (Fig.3.1b).

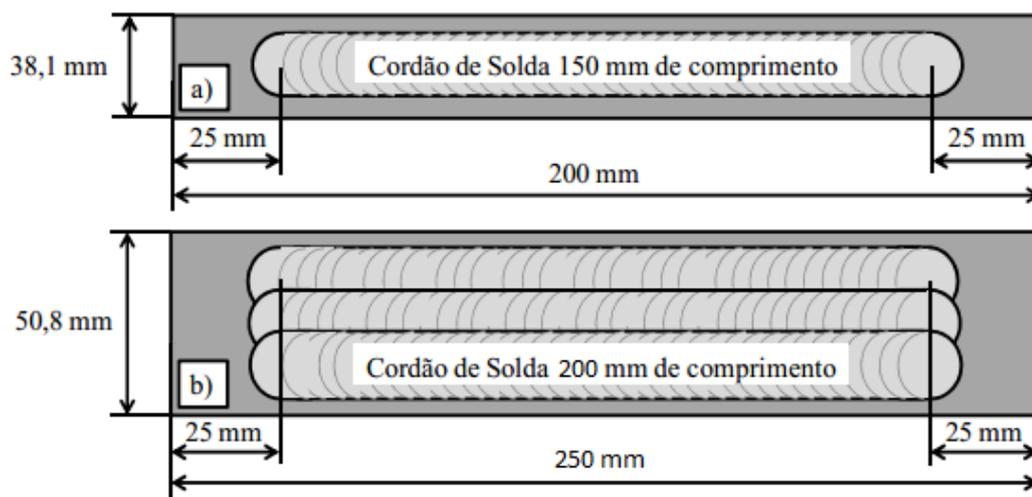


Figura 3. 1 - Dimensões das chapas de teste. a) para os testes preliminares e b) para a confecção dos revestimentos - espessura de 12,7 mm nos dois casos. Adaptado de (García, 2011)

### 3.1.2. Metais de Adição

Baseado em pesquisas anteriores no Laprosolda por Lima (2008) e García (2011) foram escolhidos para o estudo três arames tubulares autoprotégidos de 1,6 mm de diâmetro cuja composição química encontra-se na Tab. 3.1.

Os arames de liga FeCrC têm sido utilizados para a aplicação de revestimentos duros por empresas do setor mineral e sucroalcooleiro. Nesse último, para o revestimento de diversos equipamentos, mas principalmente de facas e martelos desfibradores de cana-de-açúcar. Os outros dois arames são igualmente recomendados para a aplicação citada. A diferença entre os mesmos é determinada pelos diferentes teores de carbono, cromo, silício e manganês, além da adição de nióbio, no segundo, e a adição de titânio e molibdênio, no terceiro, como pode ser vista na composição nominal fornecida pelo fabricante.

Tabela 3. 1 – Composição química dos arames tubulares autoprotégidos fornecida pelo fabricante

Consumíveis	Classificação DIN 8555	Porcentagem em Peso (%)								Dureza após a soldagem de três camadas
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Nb	Ti	V	
FeCrC	DIN 8555 MF 10-GF-65-GR	5,0	1,5	1,5	27	....	....	....	....	....
FeCrC+Nb	DIN 8555 MF 10-GF-65-GRT	5,0	0,5	1,0	22	....	7,0	....	....	63 HRC
FeCrC+Ti	DIN 8555 MF 10-GF-55-GPS	1,8	1,2	0,7	6,5	0,8	....	5,0	0,2	57 HRC

Foi utilizado um arame-eletrodo maciço a base de aço inoxidável 308LSi de 1,2 mm de diâmetro para realizar o processo de amanteigamento da superfície dos corpos de prova visando diminuir ou eliminar as trincas, verificadas nos trabalhos de Lima (2008) e García (2011). A Tab. 3.2 apresenta a composição química básica do arame utilizado para amanteigamento.

Tabela 3. 2 - Composição química do arame maciço fornecida pelo fabricante

Consumível	Tipo	Porcentagem em Peso (%)								
		C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	P	S	Cu
<b>ER308LSi</b>	Aço Inox.	0,03	1,0-2,5	0,30-0,65	19,5-22,0	0,75	9,0-11,0	0,03	0,03	0,75

### 3.2. Equipamentos

Para a realização dos testes foi montada uma bancada de soldagem apresentada na Fig. 3.2. Esta bancada é composta por duas fontes de soldagem eletrônicas, tocha, mesa de soldagem, sistema de aquisição de dados e dois alimentadores de arame. Antes da realização dos testes foram realizadas as calibrações dos equipamentos utilizados.

#### 3.2.1. Fontes de soldagem

As fontes de soldagem utilizadas são eletrônicas e multiprocesso DIGITEC INVERSAL 600, viáveis para usar em vários processos de soldagem (MIG/MAG convencional e pulsado, TIG, Eletrodo revestido e o processo a arco elétrico com Arame tubular). Suas características são:

- Corrente contínua, constante ou pulsada;
- Ajustáveis para tensão constante, corrente constante ou modo misto;
- Indutância ajustável;
- Corrente máxima de 500 A;
- Tensão em vazio de 70 V;
- Na realização dos testes as fontes foram ajustadas no modo MIG/MAG convencional com tensão constante.

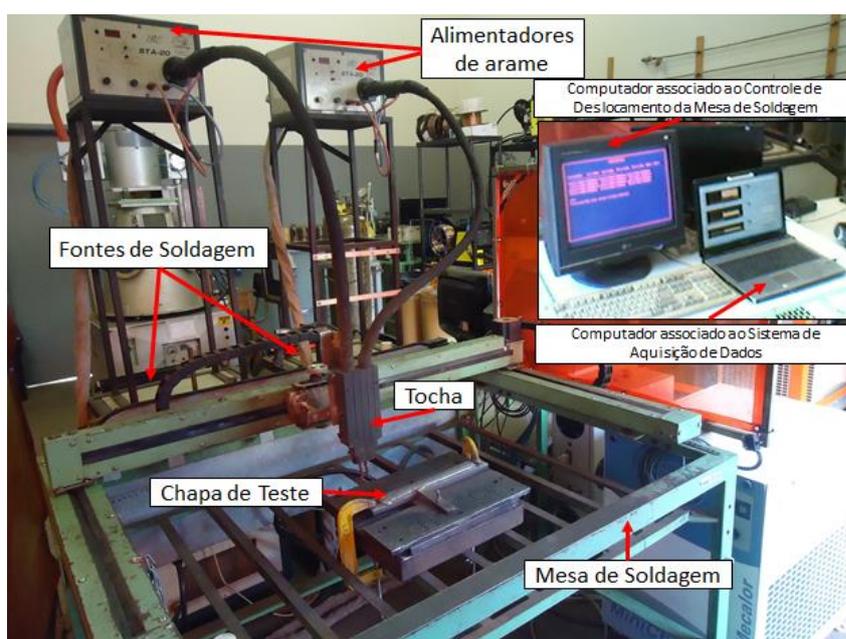


Figura 3. 2 – Bancada de soldagem utilizada

### 3.2.2. Alimentadores de Arame-Eletrodo

Tem como função alimentar o arame-eletrodo até o arco elétrico, está acoplado a fonte de soldagem e possui as seguintes características:

- Velocidade de avanço do arame-eletrodo de 1,0 a 20,0 m/min;
- Admite diâmetros de arame-eletrodo na faixa de 0,60 a 1,60 mm

### 3.2.3. Tocha

Foi utilizada uma tocha especial para o processo duplo arame, reta automática (capacidade até 400A), dois bicos de contato, refrigerada a água, comprimento de 2 metros e dois conduítes de aço para arames de 1,0 a 1,6 mm. Na mesma é possível regular a distância entre os bicos de contato, conforme a Fig. 3.3. Em toda esta pesquisa utilizou-se uma mesma distância entre bicos de 15 mm.

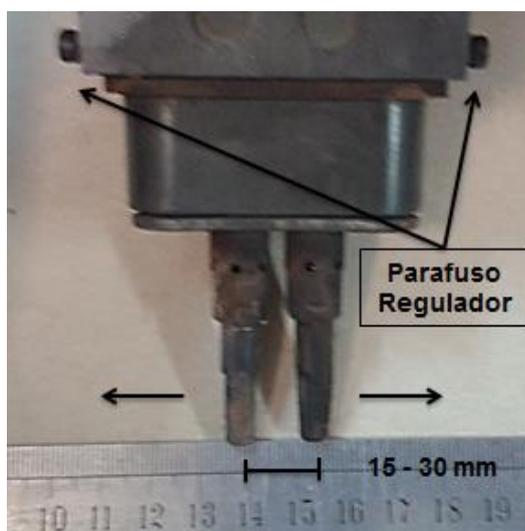


Figura 3. 3 – Tocha de soldagem com regulagem de distancia entre bicos

### 3.2.4. Mesa de Soldagem

A mesa de soldagem é um sistema de deslocamento e posicionamento da tocha de soldagem, suas características são:

- Velocidade de soldagem (deslocamento no eixo x) mínima: 05 mm/s e máxima: 80 mm/s;
- Resolução de 0,1 mm/s para a velocidade e de 0,125 mm na distância.

A mesa foi calibrada antes de iniciar os testes usando um sistema de calibração de velocidade fabricado no LAPROSOLDA. No sistema é usado um cronômetro e três sensores os quais estão posicionados como ilustrado na Fig. 3.4, fazendo contato entre eles ao início e ao final do percurso.

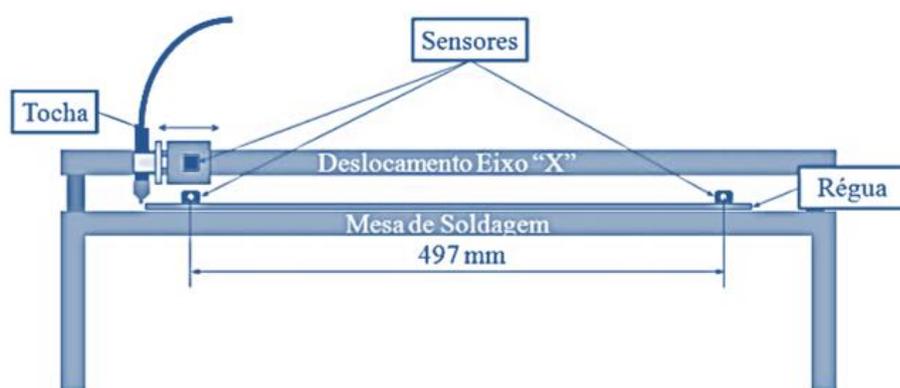


Figura 3. 4 – Esquema de montagem para calibração da mesa de soldagem (García, 2011)

Foram feitos cinco (5) ensaios variando as velocidades de 10 a 50 mm/s. A Fig. 3.5 mostra o gráfico resultante da velocidade de soldagem real versus velocidade de soldagem na mesa.

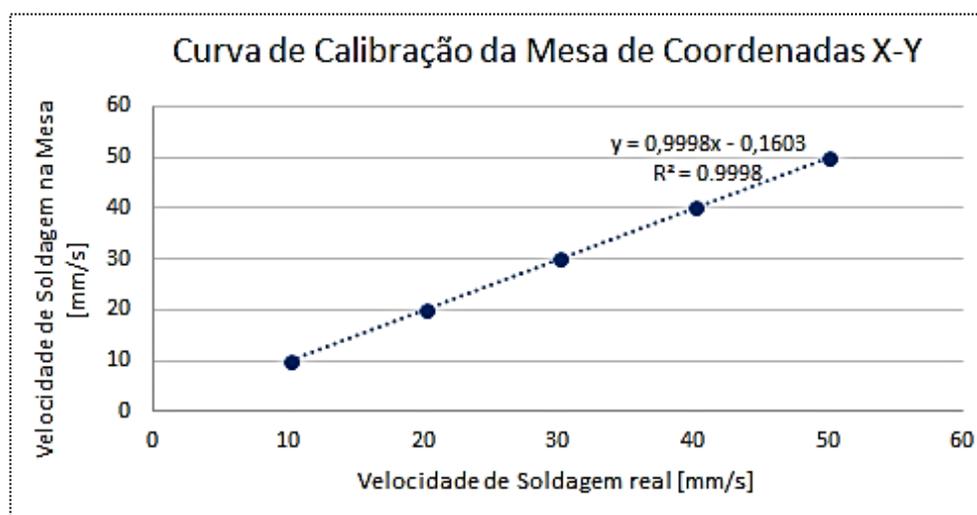


Figura 3. 5 – Curva de calibração da mesa de soldagem

### 3.2.5. Sistema de Aquisição de Dados

É composto por uma placa de aquisição modelo NI USB-6009 com resolução de 13 bits e faixa de medição de  $\pm 10V$ , um condicionador de sinal e um computador com software de aquisição de dados desenvolvido em LabView. Todo sistema de aquisição de dados foi

calibrado antes da realização dos ensaios. Na obtenção dos sinais, empregou-se frequência de aquisição de 5 kHz.

### 3.2.6. Equipamento para Ensaio de Roda de Borracha

Os ensaios de desgaste foram realizados utilizando-se um abrasômetro Roda de Borracha (a seco) construído de acordo com a norma ASTM G65-00. Este equipamento ilustrado no Fig. 3.6 é recomendado para simulação de desgaste abrasivo de baixa tensão. Durante o ensaio se mantiveram as seguintes condições fixas:

- As dimensões das amostras foram de 12,7 x 25 x 60 mm;
- Disco de 12,7 x 228 mm;
- Anel de borracha com dureza de 60 Shore A (espessura de 12,7 mm);
- A areia normal Brasileira No. 100 (0,15 mm);
- Rotação do disco de 200 RPM;
- Tempo de ensaio de 10 min (ensaio tipo B, segundo norma ASTM G65-00);
- Carga de 130 N;
- Distância do ensaio de 1436 m.

O desgaste foi avaliado em função da perda de massa dos corpos de prova, pela comparação entre o peso antes e após o ensaio, através da pesagem em balança eletrônica com resolução de  $10^{-4}$  g. Antes da pesagem as amostras foram cuidadosamente limpas e imersas em acetona utilizando um equipamento de limpeza por ultrassom e, em seguida, secas com ar quente.

O tempo de ensaio foi igual a 15 min. (5 minutos de pré-desgaste e 10 min. de desgaste). Os cinco primeiros minutos interruptos de ensaio de pré-desgaste correspondem ao tempo em que o desgaste do material entra em regime (Lima, 2008). Segundo Costa, Klein e Mello (2001), a taxa de desgaste abrasivo a baixa tensão estabiliza a partir de certo tempo de ensaio e tende a diminuir com o aumento da dureza do material. Por isso, antes da realização dos ensaios de desgaste é necessária a realização do pré-desgaste.

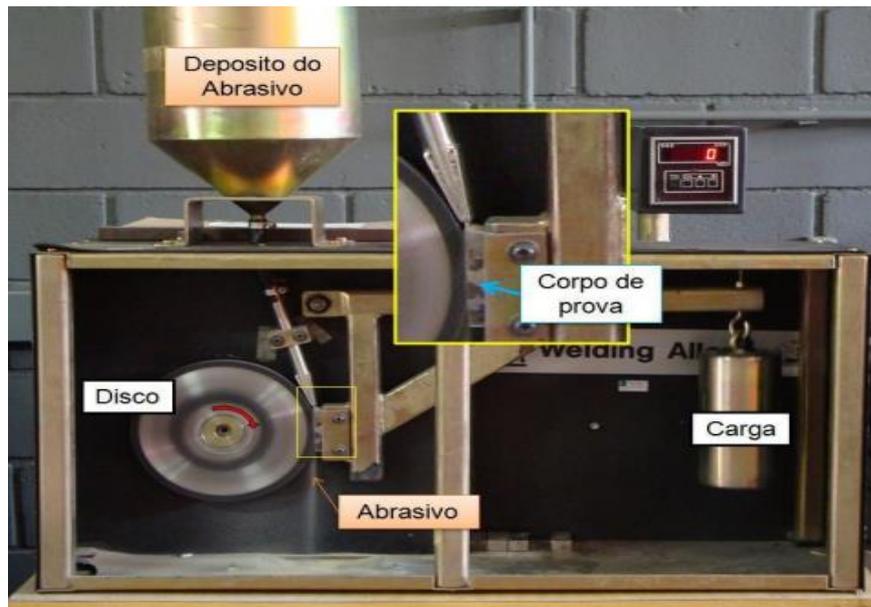


Figura 3. 6 – Abrasômetro Roda de Borracha utilizado para a realização dos ensaios de desgaste

### 3.2.7. Durômetro

Para a medição da dureza Rockwell C foi utilizado um durômetro METROLTEC, Fig. 3.7, com carga de 150 kg e pré-carga de 10 kgf. O durômetro possui pré-carga de 3 kgf e de 10 kgf, capacidade para ajuste de carga de 15, 30, 45, 60, 100 e 150 kgf, penetrador de diamante e padrão de dureza 60-66 HRC.



Figura 3. 7 – Durômetro utilizado

### 3.2.8. Microdurômetro

Para a obtenção da microdureza do material foi utilizado um Microdurômetro HMV SHIMADZU, Fig. 3.8, com carga máxima de 19,61 N e com capacidade de ajuste de carga de 10, 25, 50, 100, 200, 300, 500 e 1000 gramas.

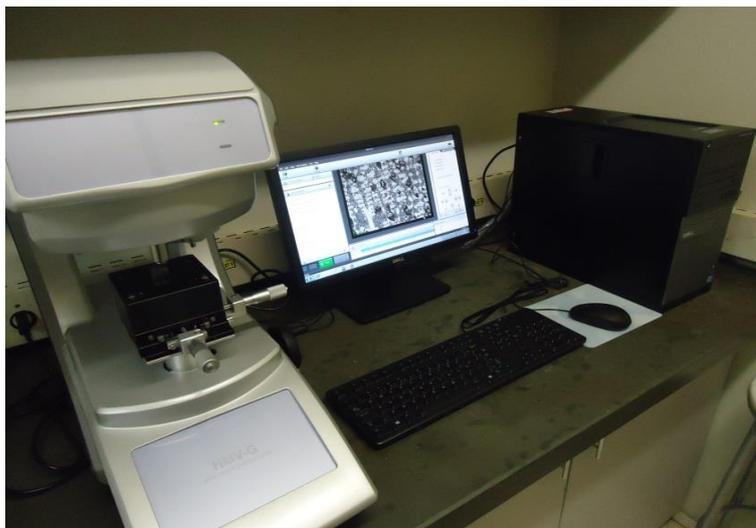


Figura 3. 8 - Microdurômetro utilizado

### 3.2.9. Microscópio Ótico

Um microscópio óptico marca NIKON, modelo ECLIPSE LV100 com aumento máximo de 1500 vezes foi utilizado para obtenção das imagens, mostrado na Fig. 3.9.



Figura 3. 9 - Microscópio utilizado para observar a microestrutura dos corpos de prova

### 3.2.10. Cortadora Metalográfica

No corte das seções transversais e na preparação dos corpos de prova e amostras para o ensaio de desgaste foi utilizada uma cortadora metalográfica CM 70 TECLAGO, Fig. 3.10, com disco de corte AROTEC ref. C.



Figura 3. 10 - Cortadora metalográfica utilizada

### 3.2.11. Retificadora

Para realizar a retificação dos corpos de prova usados no ensaio de desgaste foi utilizada uma retifica marca MELLO, Fig. 3.11, com velocidade de rotação de 3850 rpm. O rebolo usado é da marca CARBORUNDUM, Tipo 6 – Face A, fabricado em óxido de alumínio utilizado para afiação e retificação de ferramentas de aço de alta dureza e sensíveis ao calor.



Figura 3. 11 - Retificadora utilizada

### 3.2.12. Preparação das Amostras

Os corpos de prova foram lixados em uma lixadeira metalográfica marca AROTEC, modelo AROPOL E conforme Fig. 3.12, usando uma sequência de lixas de 120 a 1200. O polimento das amostras foi realizado com alumina de 1  $\mu\text{m}$ , utilizando-se a mesma lixadeira.



Figura 3. 12 - Lixadeira metalográfica utilizada

## 3.3. Metodologia

### 3.3.1. Processo de Soldagem utilizado na aplicação de revestimento

Os revestimentos foram realizados na bancada de soldagem (Fig.3.2) descrita no item 3.3.1, utilizando o processo de soldagem Arame Tubular Duplo Arame, na posição plana com a tocha na vertical formando um ângulo de 90° com a superfície da chapa e temperatura ambiente interpasses. Nos testes, a tocha foi ajustada em posição longitudinal “Tandem Wire”, Fig. 3.13, (ao longo do cordão de solda) na direção da velocidade de soldagem onde os dois arames atuam juntos um frente ao outro.

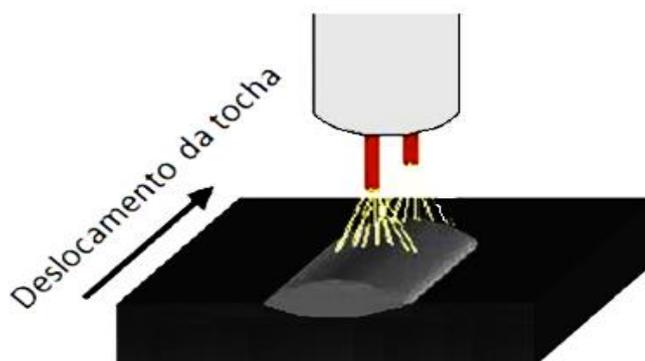


Figura 3. 13 – Disposição “Tandem Wire”

Realizaram-se os primeiros ensaios visando encontrar os melhores parâmetros de soldagem para cada um dos tipos de arames tubulares. Foram utilizados inicialmente (como referência) os parâmetros utilizados por Lima (2008) e García (2011). Os quais foram ajustados para aplicação nesta pesquisa em função da utilização do processo Arame Tubular Duplo Arame. Procurou-se manter constantes os parâmetros de soldagem encontrados com o objetivo de comparar os resultados obtidos entre as diferentes condições. Os ensaios estão apresentados e discutidos no Capítulo IV desta dissertação.

### 3.3.2. Construção dos Corpos de Prova para o Ensaio de Desgaste

Os revestimentos foram realizados nas chapas de aço indicadas no item 3.1, onde em todos os casos, foram feitos três cordões de solda de 200 mm de comprimento e a soldagem do segundo e terceiro cordão de solda foi feita com temperatura interpassa de 25°C. Os corpos de prova para a execução do ensaio de desgaste por roda de borracha foram retirados do meio das chapas revestidas como ilustrado na Fig. 3.14, tendo dimensões (60 x 25 x 12,5 mm) correspondentes às exigidas pela norma ASTM G 65-00. A espessura do revestimento após a retificação ficou entre 2 e 3 mm.

Para a extração se utilizou a cortadora metalográfica descrita no item 3.2.10. Após o corte, os corpos de prova foram retificados utilizando o equipamento descrito no item 3.2.11.

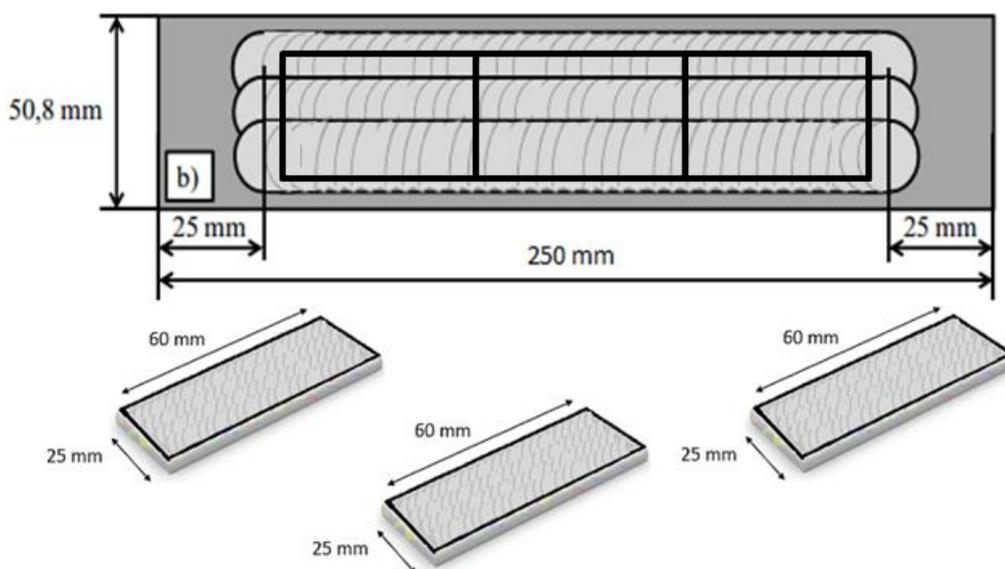


Figura 3. 14 – Extração dos corpos de prova para o ensaio de desgaste

Para a realização do amanteigamento das chapas a fim de diminuir ou eliminar as trincas, foi utilizado um arame-eletrodo maciço a base de aço inoxidável aplicado pelo

processo MIG/MAG convencional, conforme os parâmetros apresentados na Tab. 3.3. e mostrado na Fig. 3.15. Após o amanteigamento a superfície foi nivelada por esmerilhamento.

**Tabela 3. 3** - Parâmetros para amanteigamento dos corpos de prova para ensaio de desgaste

Arame	Diâmetro [mm]	$V_{alim}$ [m/mim]	$V_{sold}$ [mm/s]	$U_r$ [V]	DBCP [mm]	Oscilação da tocha (Hz)	Amplitude de Oscilação (mm)	Gás de Proteção	Vazão de Gás (L/min)
308LSi	1,2	06	05	24	16	1,5	10	Ar + 2%O <sub>2</sub>	12

Onde:  $U_r$ = tensão de referência; DBCP= distância bico de contato-peça.



Figura 3. 15 - Amanteigamento dos corpos de prova para revestimento e posterior ensaio de desgaste

### 3.3.3. Avaliação dos Parâmetros de Desempenho

Nesta seção serão apresentados os métodos de avaliação dos parâmetros de desempenho tais como medição da diluição e dos parâmetros geométricos do cordão de solda e do revestimento.

#### 3.3.3.1. Parâmetros Geométricos do Revestimento

Para a avaliação dos parâmetros geométricos do revestimento tais como largura, reforço, penetração e a área fundida ( $A_f$ ) e de reforço ( $A_r$ ) para se determinar a diluição, ilustradas na Fig. 3.16, as chapas de testes com revestimento foram cortadas a 25 mm das extremidades finais dos corpos de prova. As superfícies transversais obtidas foram retificadas com lixas #80 e #120, atacadas com Nital 10% por 20s e fotografadas com câmera fotográfica digital de alta resolução. Não foi necessário levar este processo até o polimento devido a

grande diferença na composição química entre o material do revestimento e o material do metal de base.

As imagens digitais obtidas foram analisadas com ajuda do programa ImageJ. Este programa permite conhecer os dados do perfil do cordão de solda: área, reforço, penetração e largura. Para a avaliação da penetração nos revestimentos tomou-se o maior valor entre os três cordões de solda.

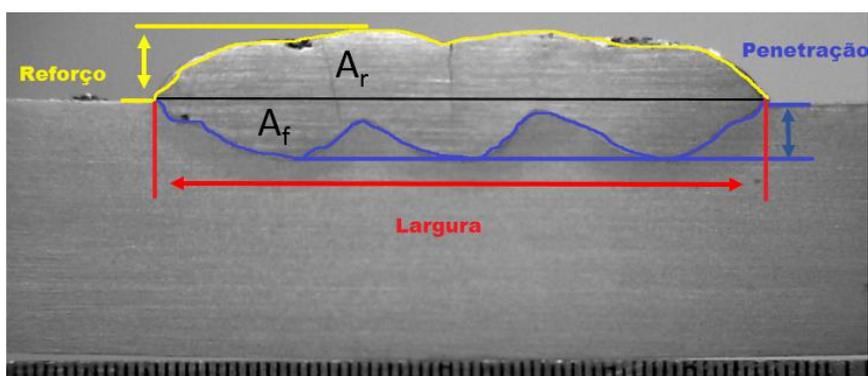


Figura 3. 16 – Preparação para análise macrográfica e ilustração dos parâmetros geométricos dos revestimentos

### 3.3.3.2. Diluição

A avaliação dos níveis de diluição (Dil) foi obtida através da relação entre a área fundida ( $A_f$ ), Fig. 3.16, abaixo da superfície da chapa e a área total do cordão de solda, formada pela soma entre as áreas adicionadas ou de reforço ( $A_r$ ) e fundida, Fig. 3.16, pela utilização da Eq. 3.1.

$$Dil = \frac{A_f}{A_r + A_f} \times 100\% \quad (3.1)$$

### 3.3.3.3. Resistência ao Desgaste

O valor da resistência ao desgaste ( $R_{desgaste}$ ), inverso da taxa de desgaste, foi obtido mediante a Eq. (3.2) com os dados do desgaste ( $Desg_m$ ), perda de massa, e a distância ( $D_{ensaio}$ ) percorrida durante o ensaio igual a 1436 m.

$$R_{desgaste} = \left( \frac{Desg_m}{D_{ensaio}} \right)^{-1} \left[ \frac{mg}{m} \right]^{-1} \quad (3.2)$$

#### 3.3.3.4. Avaliação Microestrutural

Foram extraídas amostras de cada condição utilizada na avaliação do desgaste para análise microestrutural seguindo o mesmo procedimento de corte descrito no item 3.2.10. Estas amostras foram desbastadas com lixas #220, #320, #400, #500, #600, #800, #1200 e polidas com alumina de 01  $\mu\text{m}$ . Posteriormente foram atacadas com reagente Água Régia (100ml HCl + 3ml HNO<sub>3</sub>) por 10s e levadas ao microscópio ótico para revelar os microconstituintes.

### 3.4. Procedimento Experimental

Para o desenvolvimento da pesquisa foi seguido o procedimento descrito a seguir.

#### Primeira Etapa

- Testes preliminares para selecionar os parâmetros de soldagem
- 1. Realizar testes variando os parâmetros de soldagem  $V_{\text{sold}}$ ,  $V_{\text{alim}}$  e Tensão, a partir dos parâmetros encontrados por Lima (2008) e García (2011) para ligas semelhantes.
  - Mediante avaliação visual das características como largura, reforço, presença de discontinuidades e geração de respingos, selecionar o parâmetro que apresentou os melhores resultados.

#### Segunda Etapa

- Preparação e amanteigamento da chapas para ensaio de desgaste
- Realização dos revestimentos para ensaio de desgaste
- 1. Soldagem dos revestimentos utilizando as condições de consumíveis e os parâmetros de soldagem encontrados nas fases anteriores, sobre as chapas com e sem amanteigamento.
- 2. Inspeção visual dos revestimentos e análise das características geométricas.
- 3. Preparação dos corpos de prova para ensaio de desgaste:
  - a) Retirada dos CP das chapas revestidas, conforme norma ASTM G65-00.
  - b) Retificação da superfície dos corpos de prova para obter uma superfície plana na região a ser desgastada.

4. Inspeção visual para verificação de corpos de prova de desgaste.

### **Terceira Etapa**

- Ensaio de desgaste e microestrutura dos revestimentos
1. Realização do ensaio de desgaste com abrasômetro de roda de borracha seguindo a norma ASTM G65-00.
    - a) Pré-desgaste de 5 minutos.
    - b) Pesagem dos corpos de prova.
    - c) Desgaste de 10 minutos.
    - d) Pesagem dos corpos de prova.
    - e) Análise da resistência ao desgaste.
  2. Avaliação da dureza e microdureza dos revestimentos.
  3. Análise microestrutural dos revestimentos.

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos mediante a utilização da metodologia descrita no Capítulo III referentes à avaliação do desgaste e desempenho de cada revestimento. Inicialmente é descrita a etapa de testes preliminares, e posteriormente, a soldagem e extração dos corpos de prova para ensaio de desgaste seguido pela descrição qualitativa da aparência final dos revestimentos e a apresentação dos valores das características geométricas dos mesmos (reforço, penetração, largura, área fundida, área de reforço e diluição). A seguir, são apresentados os resultados experimentais obtidos no ensaio de resistência ao desgaste por abrasão das amostras revestidas, as descrições qualitativas feitas na trilha de desgaste e os resultados de dureza e microdureza dos revestimentos. Por último, são apresentadas as microestruturas dos revestimentos.

### 4.1. Ensaio Preliminares

Para os ensaios preliminares foram utilizadas chapas de aço carbono de dimensões 200 x 38,1 x 12,7 mm, com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem. Utilizou-se como referência os parâmetros obtidos por Lima (2008) para os três arames auto protegidos utilizados pelo autor, FeCrC, FeCrC+Ti e FeCrC+Nb.

A composição química, o fabricante dos arames tubulares e o processo de soldagem desta pesquisa são diferentes dos utilizados na pesquisa de Lima (2008). Desta forma, para buscar uma condição adequada de aplicação de revestimento com o processo FCAW Duplo Arame, os primeiros ensaios foram realizados com a combinação de arames FeCrC e FeCrC+Ti variando os valores de tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldagem, apresentados na Tab. 4.1, obtendo um comprimento do cordão de revestimento de 250 mm. A distância entre os arames se manteve constante em 15 mm, ajuste mínimo possível na tocha duplo arame utilizada, ficando o arame FeCrC na frente (líder) e o FeCrC+Ti atrás (seguidor), com o mesmo diâmetro (1,6 mm) e a mesma velocidade de alimentação.

Tabela 4. 1 - Parâmetros de revestimento utilizados nos ensaios preliminares com a combinação FeCrC e FeCrC+Ti

ENSAIO	CONDIÇÃO	Tensão (V)	V <sub>alim</sub> (m/min)	V <sub>sold</sub> (mm/s)	DBCP (mm)
1	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	28	10	8	25
2	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	30	10	8	25
3	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	32	10	8	25
4	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	32	8	8	25
5	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	32	12	8	25
6	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	32	12	10	25
7	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2)	32	12	12	25

Onde: V<sub>sold</sub>= Velocidade de soldagem; V<sub>alim</sub>= Velocidade de alimentação; DBCP= Distância bico de contato-peça.

Após a aplicação do revestimento (um cordão) realizou-se uma avaliação visual do cordão para selecionar a condição com o melhor aspecto visual (cordão liso, maior largura, melhor molhabilidade e menores níveis de respingo). O melhor resultado foi encontrado no ensaio 7, mostrado na Fig. 4.1.



Figura 4. 1 - Aparência do cordão de revestimento para a condição de ensaio 7

#### 4.2. Revestimentos das chapas de teste

As chapas do ensaio de revestimento, como indicado no item 3.1.1, possuem dimensões de 200 x 50,8 x 12,7 mm, sendo aplicados três cordões de comprimento de 200 mm com passo de 01 mm (da borda de um ao centro do outro) para completar a área a ser revestida. A Tab. 4.2 apresenta as condições de revestimento deste trabalho, mantendo constante a velocidade de soldagem em 12 mm/s, velocidade de alimentação em 12 m/min, DBCP em 25 mm e distancia entre arames de 15 mm para todas as condições. Os valores de corrente informados na Tab. 4.2 são valores médios da aquisição de dados e os valores de

tensão correspondem à condição imposta na fonte de soldagem de 32 V. A condição indicada por (1) corresponde ao arame mestre (o que vai à frente) e a (2) indica o arame escravo (o que fica atrás).

Tabela 4. 2 - Parâmetros de soldagem utilizados no ensaio de desgaste

ENSAIO Nº	CONDIÇÃO	Um 01 (V)	Um 02 (V)	Im 01 (A)	Im 02 (A)
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	31,6	27,7	353,8	350,2
02	FeCrC+Ti (1)-FeCrC+Ti(2)	32,3	31,2	326,6	345
03	FeCrC+Nb (1)-FeCrC+Nb(2)	31,7	31,4	375	373,6
04	FeCrC (1)-FeCrC+Ti(2)	30,6	28,8	393,2	347,5
05	FeCrC (1)-FeCrC+Nb(2)	31,3	31,1	340,5	363,6
06	FeCrC+Ti(1)-FeCrC+Nb(2)	32,3	31,1	319,2	355,9
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) Com AM	31,5	29,1	352	349
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	32,3	31,2	333,5	347,1
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	32,1	30,9	379,8	376,5
10	FeCrC (1) - FeCrC+Ti (2) Com AM	31,8	31,2	344,7	316,2
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	30,9	30,8	357,3	364,7
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	32,3	31,2	347,1	382,8

Onde: Im = Corrente média; Um = tensão média; AM = Amanteigamento. Condição (1) indica que é o arame líder e o (2) indica que é o arame seguidor (o que fica atrás).

Para a avaliação de desgaste, foram revestidas 12 chapas de testes, sendo retirados 3 corpos de prova de cada condição de revestimento. O procedimento desses ensaios e a obtenção dos corpos de prova estão apresentados no item 3.3.2, Fig. 3.14, Capítulo III.

Da Fig. 4.2 a Fig. 4.13 são apresentadas as chapas de testes dos revestimentos realizados com cada condição descrita na Tab. 4.2. Nestas figuras também são indicadas as descontinuidades verificadas através do ensaio visual, ocorrido após limpeza das chapas de testes. Foram visualizadas porosidades superficiais e trincas transversais ao cordão do revestimento.

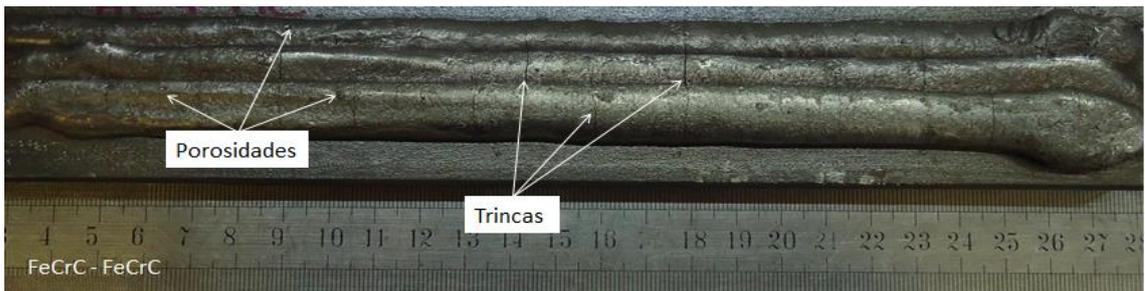


Figura 4. 2 – Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC(2)



Figura 4. 3 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)

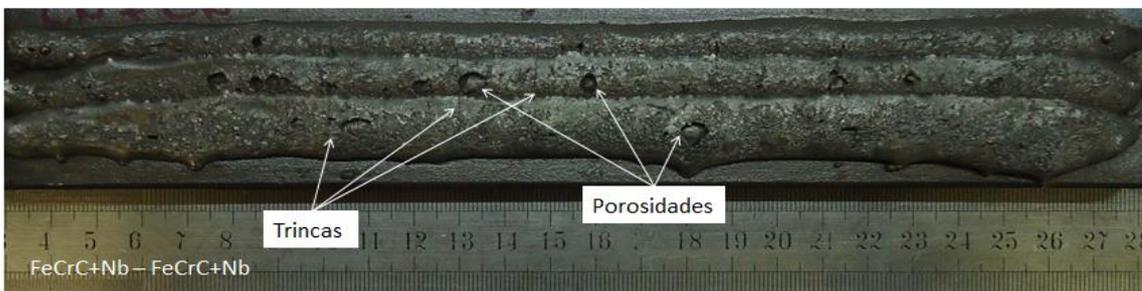


Figura 4. 4 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)

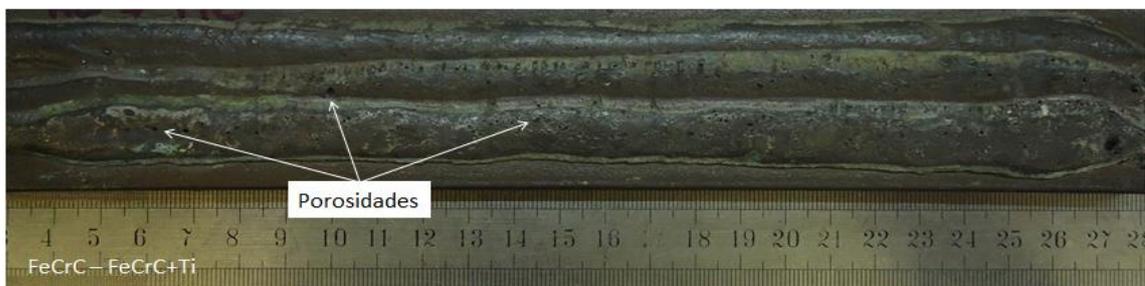


Figura 4. 5 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)

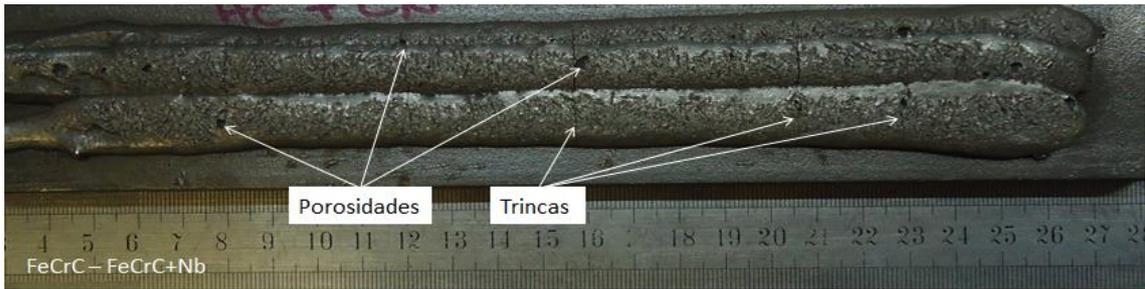


Figura 4. 6 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)

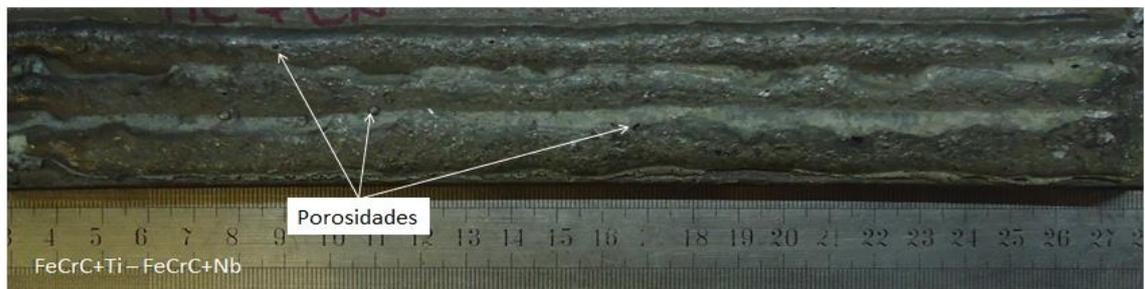


Figura 4. 7 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)

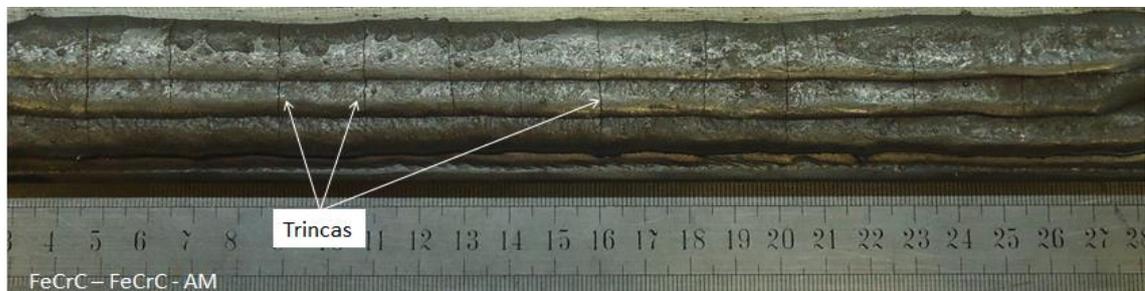


Figura 4. 8 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC(2) com amanteigamento

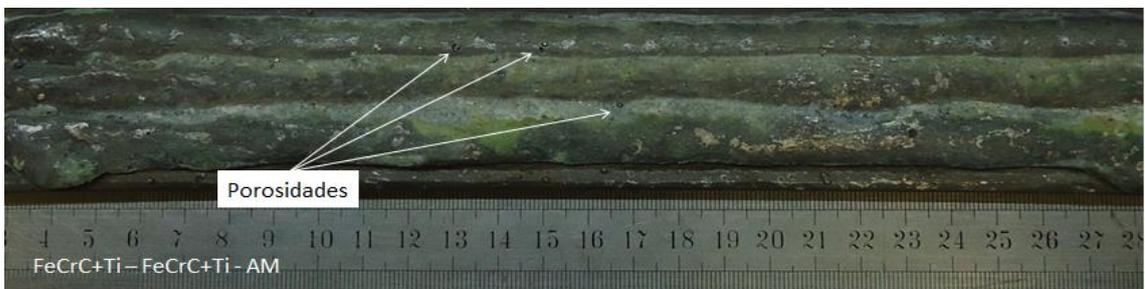


Figura 4. 9 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento

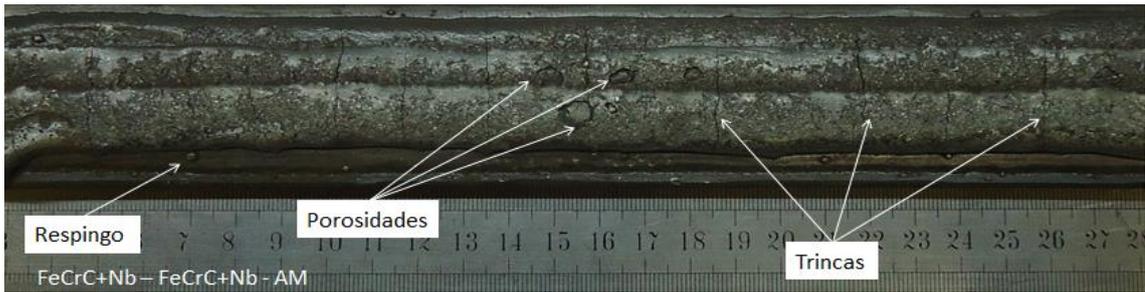


Figura 4. 10 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento



Figura 4. 11 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento

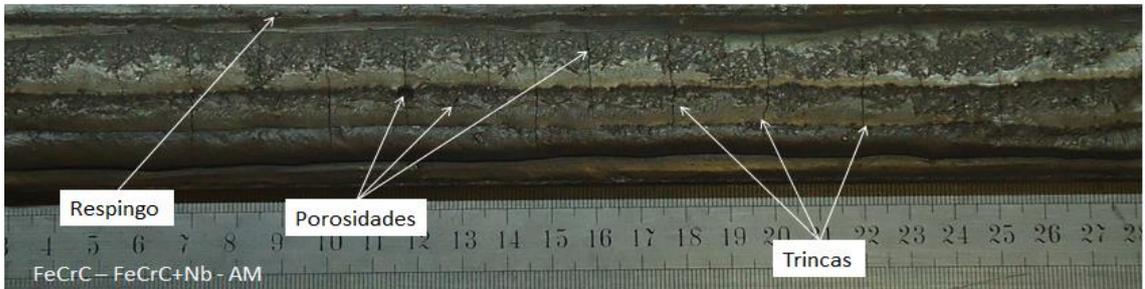


Figura 4. 12 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento



Figura 4. 13 - Detalhe da superfície das chapas revestidas com a combinação FeCrC+Ti (1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento

Nos revestimentos (Fig.4.2 a Fig.4.13) pode-se observar a presença de descontinuidades, prevalecendo porosidades e trincas, transversais ao cordão de solda, especialmente nos revestimentos das condições 1, 9 e 11. As superfícies dos revestimentos 3, 5 e 11 apresentaram porosidades de menor tamanho e em menor quantidade, sem a visualização de trincas superficiais.

Com a ajuda de uma lupa realizou-se a contagem da quantidade de trincas que afloram a superfície e na seção transversal do revestimento, apresentado na Tab. 4.3. As melhores condições de aplicação de revestimento com base nesta análise foram obtidas com as condições 2, 6 e 8.

Tabela 4. 3 – Quantidade (Qt) de trincas verificadas no revestimento de cada combinação de arames tubulares

<b>TESTE</b>	<b>CONDIÇÃO</b>	<b>Qt DE TRINCAS</b>
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	20
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	2
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	15
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	6
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	11
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	2
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) Com Amanteigamento	19
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) Com Amanteigamento	0
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) Com Amanteigamento	15
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) Com Amanteigamento	12
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) Com Amanteigamento	20
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) Com Amanteigamento	8

No teste de hipótese, a significância estatística para a quantidade media de trincas das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,49899$ , permitindo considerar a

quantidade de trincas como estatisticamente igual e não sendo possível estabelecer qualquer relação entre elas, conforme Fig. 4.14.

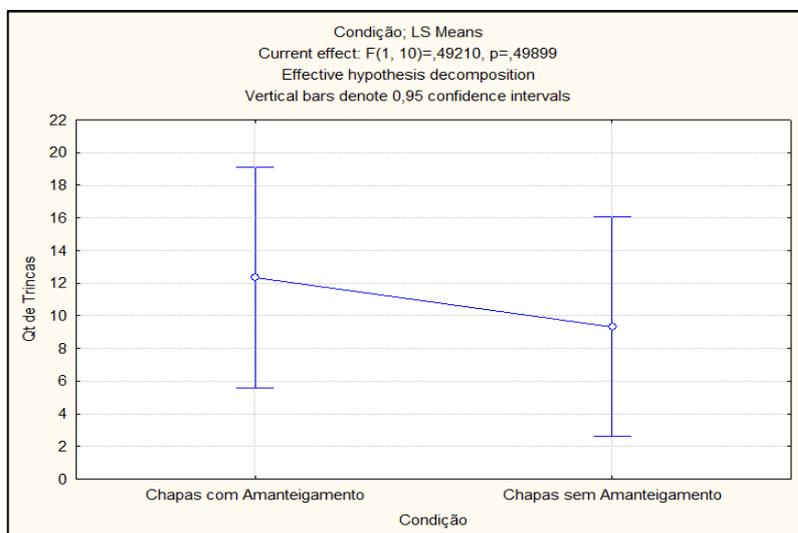


Figura 4. 14 - Comparação feita entre a quantidade de trincas media dos revestimentos com e sem amanteigamento

Durante a confecção dos revestimentos, observou-se que para as condições com adição de nióbio, sem a presença de Titânio, Fig.4.4, Fig. 4.6, Fig. 4.10 e Fig. 4.12, têm um aumento na quantidade de trincas transversais ao cordão de solda. Esse fato se deve a presença do nióbio que, segundo Posch et al. (2006), em teores superiores a 2,5% wt. em ligas de alto teor de cromo (acima 20% wt.) promove a trinca de solidificação.

Na confecção dos revestimentos feitos com as condições 1 e 7 (FeCrC(1) - FeCrC(2), com e sem amanteigamento), Fig.4.2 e Fig. 4.8, verificou-se um aumento na quantidade de trincas após a soldagem do segundo e do terceiro cordão de solda. Esse fato é provavelmente explicado, pelo aumento da tensão residual com a quantidade de material aplicado no revestimento, na presença de um alto teor de Cromo e Carbono.

Nos revestimentos confeccionados com adição de Titânio, Fig.4.3, Fig. 4.5, Fig.4.7, Fig. 4.9, Fig. 4.11 e Fig. 4.13, foi possível observar pouca ou nenhuma ocorrência de trincas no ensaio visual. Esse fato se deve provavelmente devido as diferenças na composição química do revestimento (presença de Titânio), quando comparado com as demais condições com e sem adição de nióbio.

Analisando os revestimentos com e sem a presença de Ti, verificou-se uma quantidade média de 5 trincas com a presença de Ti e sem este elemento obteve-se uma média de 16,7 trincas. Uma possível explicação para este fato, segundo Atamert e Badeshia (1988), é que

com a adição de elementos como Ti, V e W, formadores de carbonetos fortes do tipo MC, que são bem mais duros, porém mais finos que os carbonetos de cromo, conseguem-se uma distribuição uniforme e pequeno espaço entre os mesmos, sendo assim produzida uma matriz mais tenaz. Outra forma, segundo Lima (2008) e García (2011), é pela maior fluidez da poça de fusão de ligas com adição de Ti, promovendo maior molhamento da mesma e alívio das tensões geradas, comparando com as condições sem e com adição de Nb.

No teste de hipótese, a significância estatística para a quantidade média de trincas das condições com a presença de Ti versus sem a presença de Ti, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,00059$ , permitindo considerar a quantidade de trincas como estatisticamente diferente e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da quantidade de trincas com a adição de Ti na liga, conforme Fig. 4.15.

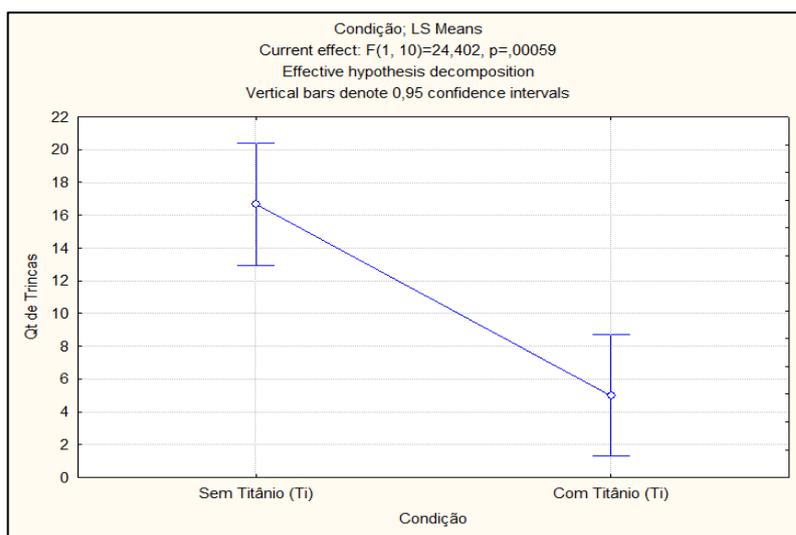


Figura 4. 15 - Comparação feita entre a quantidade de trincas média dos revestimentos com e sem adição de Ti

As Fig. 4.16 e 4.17 ilustram a seção transversal das chapas de teste de cada condição de soldagem da Tab. 4.2, com e sem amanteigamento, permitindo visualizar o aspecto geométrico do revestimento. Verifica-se para todas as condições a presença de descontinuidades como porosidade, inclusões e trincas. Dependendo da aplicação do revestimento, a presença de trinca e porosidades não afeta o nível de resistência ao desgaste, conforme citado por Scotti e Rosa (1997), elas podem ser favoráveis por reduzirem as tensões internas em revestimentos não sujeitos a esforços dinâmicos que levem a fadiga. Entretanto, na aplicação de revestimento nas facas picadoras de cana de açúcar, que sofrem também

cargas cíclicas, conforme observado por Lima (2008), a presença de trincas afeta de forma significativa a resistência ao desgaste abrasivo.

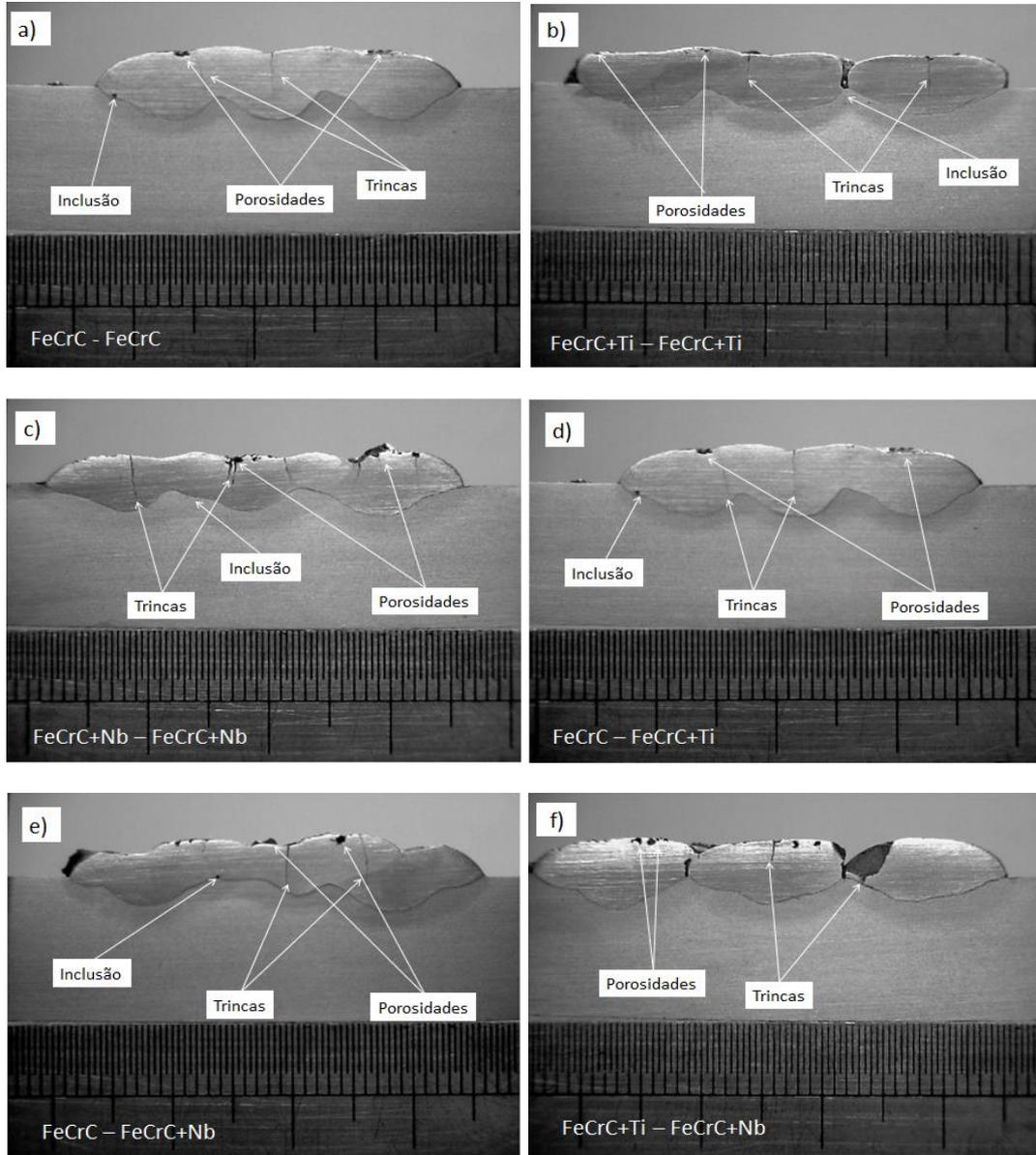


Figura 4. 16 – Seção transversal dos revestimentos sem amanteigamento. a) FeCrC(1) - FeCrC(2); b) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2); c) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2); d) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) e e) FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2); f) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)

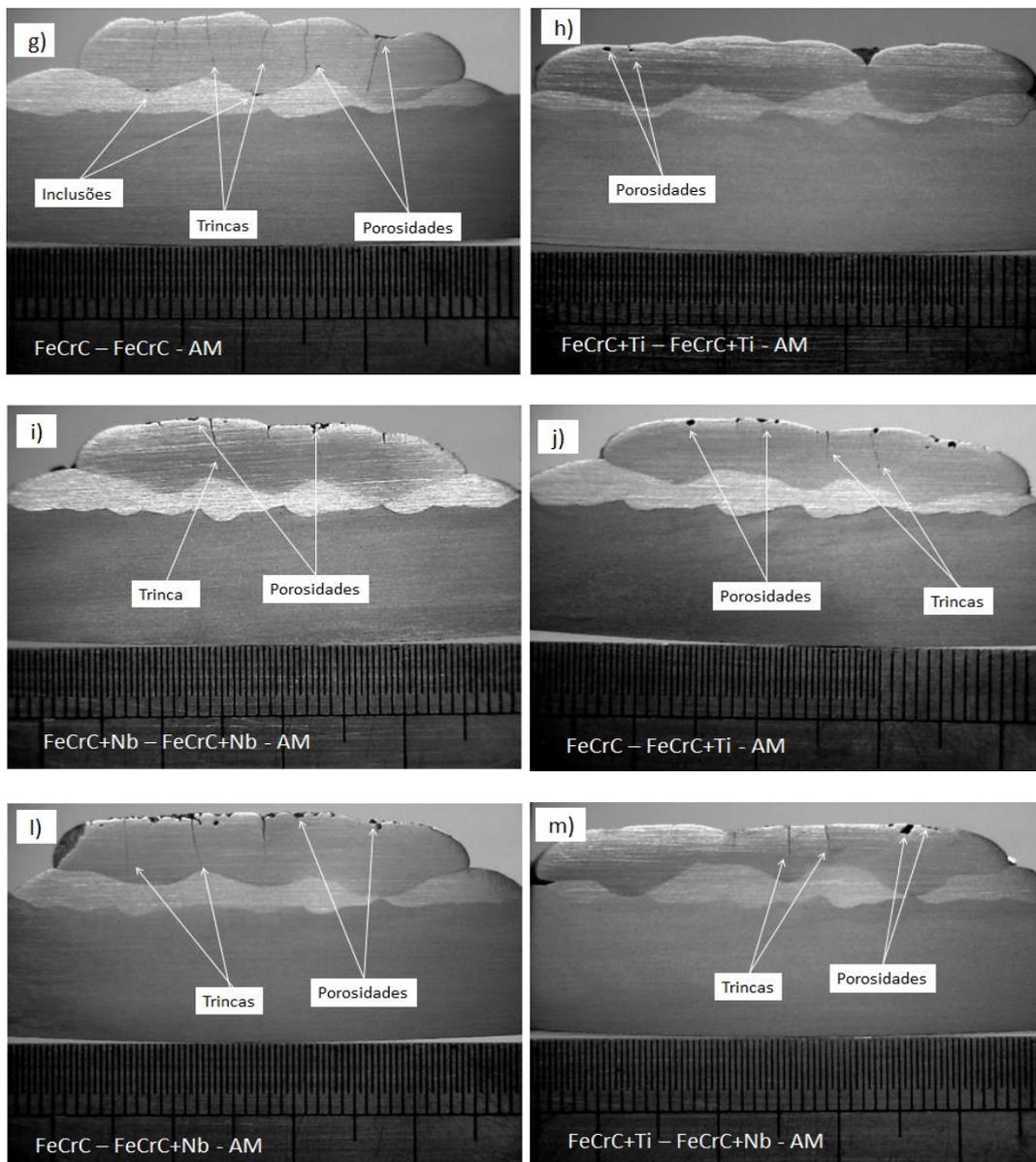


Figura 4. 17 - Seção transversal dos revestimentos com amanteigamento. g) FeCrC (1) - FeCrC(2) com amanteigamento; h) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento; i) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento; j) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento; k) FeCrC (1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento e l) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb (2) com amanteigamento

A Tab. 4.4 apresenta os valores de largura, reforço, penetração, área fundida, área de reforço e diluição dos revestimentos feitos com cada condição de soldagem, avaliados seguindo o procedimento descrito nos itens 3.3.3.2 e 3.3.3.3 do Capítulo III.

Tabela 4. 4 - Características geométricas dos revestimentos

ENSAIO Nº	CONDIÇÃO	Largura (mm)	Reforço (mm)	Penetração (mm)	Área Fundida (mm <sup>2</sup> )	Área de Reforço (mm <sup>2</sup> )	Diluição (%)
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	29,83	2,91	2,85	55,36	76,06	42,12
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	35,56	2,89	2,28	58,87	97,31	37,69
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	34,23	2,63	2,36	51,21	77,61	39,75
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	36,46	3,48	3,8	73,84	92,44	44,41
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	34,12	3,07	2,96	47,57	83,41	36,32
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	39,01	3,54	2,93	63,12	101,33	38,38
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) Com AM	31,5	4,8	2,59	39,73	130,7	23,31
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	41,78	3,72	2,02	48,85	133,61	26,77
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	32,1	4,09	2,38	46,59	115,8	28,69
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	34,78	4,46	1,72	27,66	137,73	16,72
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	34,39	4,83	2,28	44,38	135,46	24,68
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	39,19	3,87	2,26	42,39	118,76	26,30

As Fig. 4.18 e 4.19 mostram os valores da penetração e do reforço apresentados na Tab. 4.4. Observa-se na Fig. 4.18 que o maior valor de penetração foi obtido nos revestimentos feitos com a condição 04 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)) seguindo pelos revestimentos feitos com as condições 5 e 6. O menor valor de penetração foi conseguido nos revestimentos da condição 10 (1,72 mm na condição FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento). Os valores de penetração ficaram muito próximos, não sendo possível determinar uma diferença significativa entre eles.

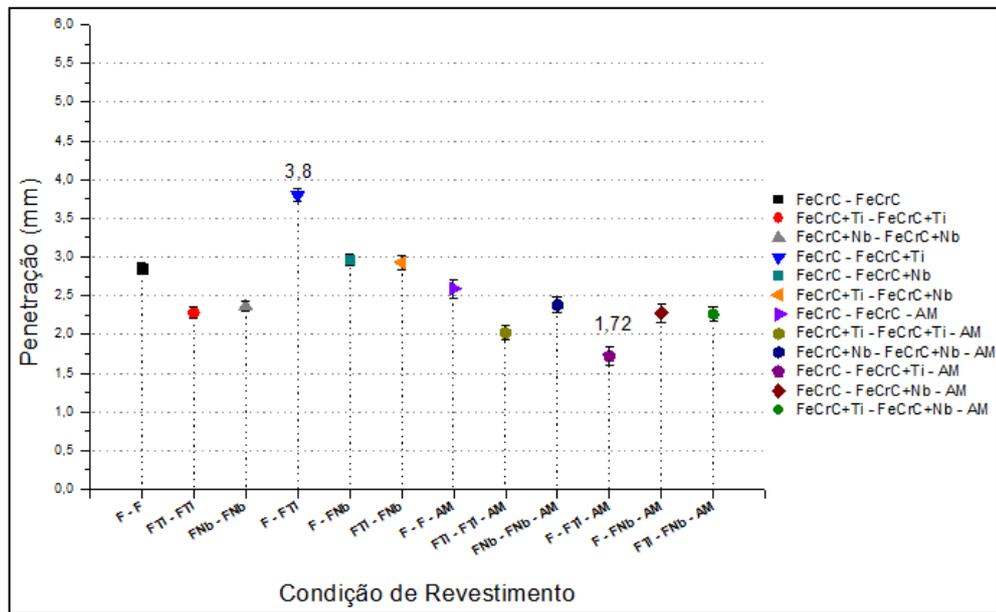


Figura 4. 18 – Valores da penetração dos revestimentos

Quanto ao reforço, foi o revestimento da condição 11 (FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento) o que apresentou o maior valor. O revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) foi o que apresentou menor valor no reforço, sendo muito próximo ao apresentado pelas condições 1 e 2.

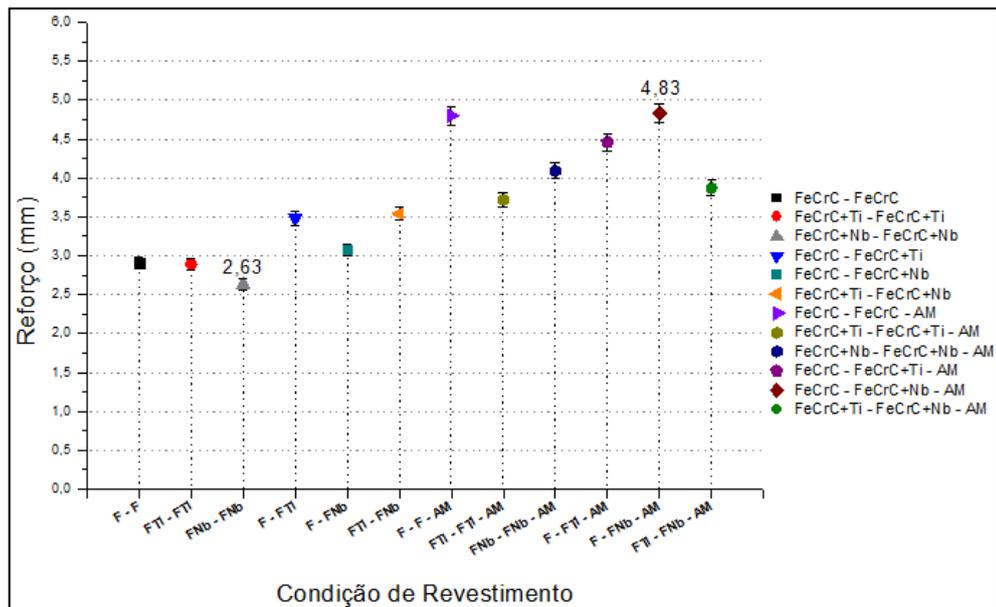


Figura 4. 19 - Valores de reforço dos revestimentos

Em teste de hipótese a significância estatística para a penetração média e reforço médio das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$

(95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,02767$  e  $p=0,00055$  respectivamente, permitindo considerar os valores de penetração e reforço como estatisticamente diferentes e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da penetração para as chapas com amanteigamento e aumento do reforço com o amanteigamento das chapas, conforme Fig. 4.20. e Fig. 4.21. Isso possivelmente ocorreu devido a um efeito geométrico relacionado à camada de amanteigamento e à mudança na espessura do metal de base.

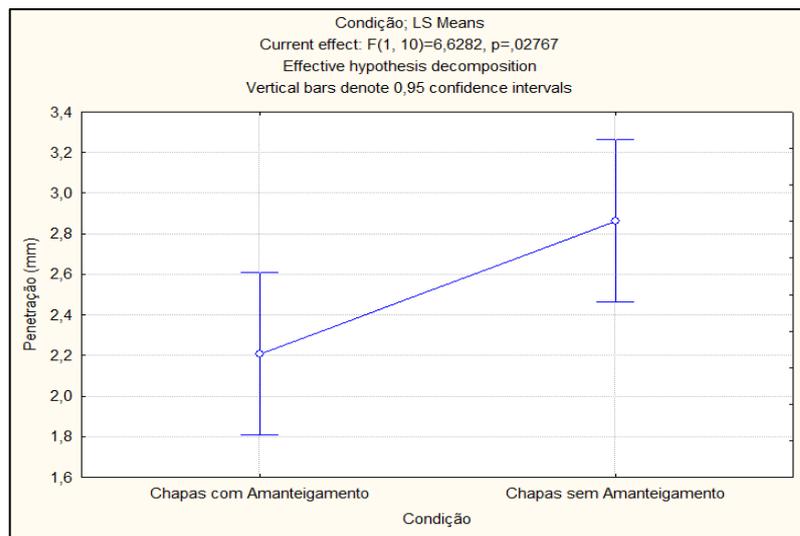


Figura 4. 20 – Comparação feita entre a penetração média dos revestimentos com e sem amanteigamento

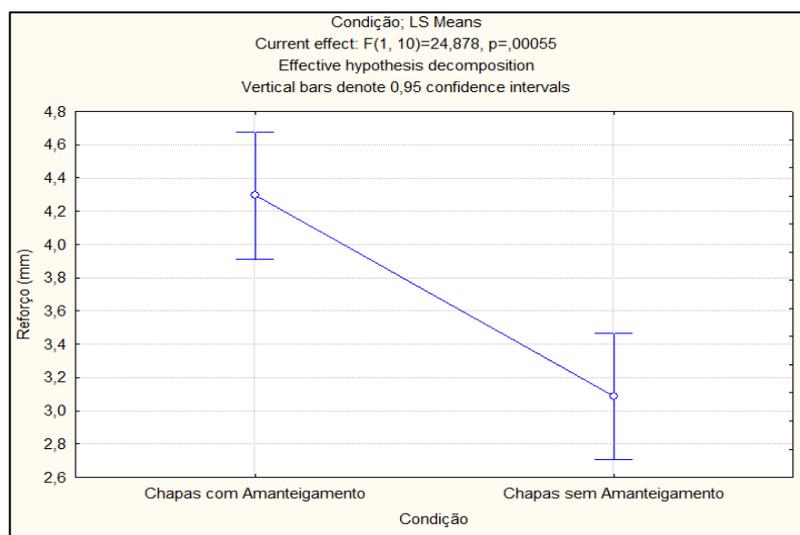


Figura 4. 21 - Comparação feita entre o reforço médio dos revestimentos com e sem amanteigamento

Os valores de desvio padrão foram encontrados utilizando-se a raiz quadrada dos valores encontrados para cada condição, distribuição de Poisson, sendo este um artifício estatístico utilizado quando se possui apenas um ponto na medição.

Quanto à largura, Tab. 4.4 e Fig. 4.22, o revestimento feito com a condição 8 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento) foi o que apresentou o maior valor, seguido pelo revestimento da condição 12 e 6. O menor valor de largura foi apresentado pela condição 1 (FeCrC(1) - FeCrC(2)).

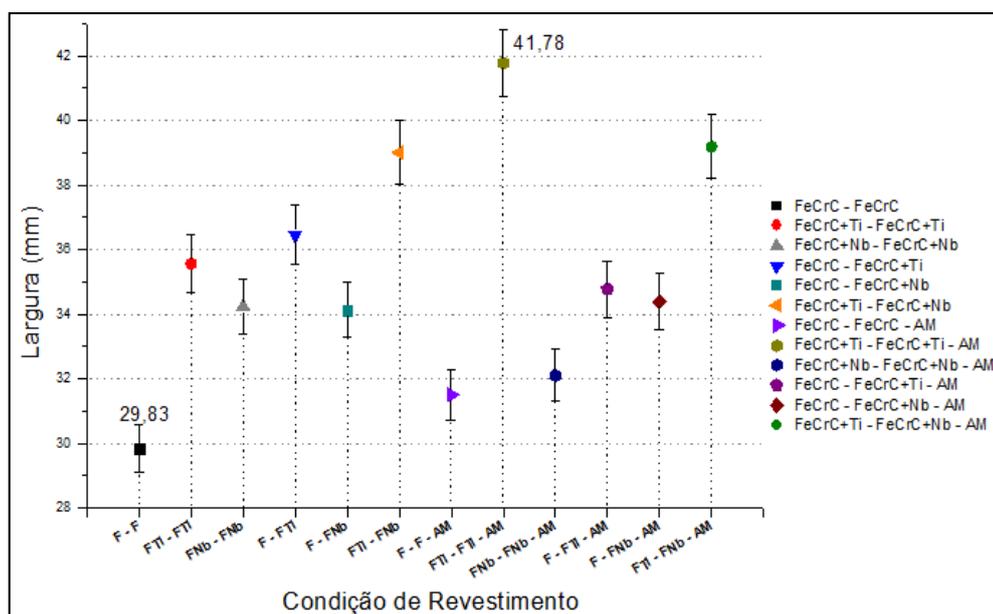


Figura 4. 22 – Largura dos revestimentos com três cordões de solda

No teste de hipótese a significância estatística para a largura média das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,72316$ , permitindo considerar os valores de largura como estatisticamente iguais e não sendo possível estabelecer uma relação entre elas, conforme Fig. 4.23.

A principal diferença da soldagem de revestimento em relação às aplicações convencionais de soldagem (soldagem de união) diz respeito à geometria do cordão de solda. Ao contrário das aplicações convencionais, em que é desejável alta penetração para garantir a resistência da junta soldada, na soldagem de revestimento o perfil geométrico desejado se resume a grandes larguras do cordão, baixos reforços, baixas penetrações e baixos percentuais de diluição. A obtenção deste perfil geométrico característico é importante para que o

processo permita recobrir a maior área possível com o menor número de passes, resultando em economias significativas de materiais e tempo (KEJELIN, 2012).

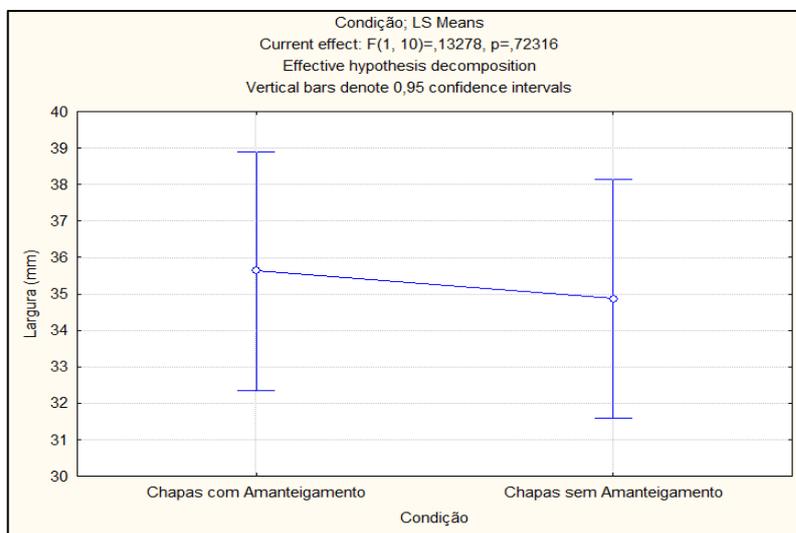


Figura 4. 23 - Comparação feita entre a largura média dos revestimentos com e sem amanteigamento

Lima (2008) realizou revestimentos sem tecimento precisando de 4 e 5 cordões de solda para obter aproximadamente a mesma área revestida com arames de FeCrC+Nb e FeCrC+Ti respectivamente. Nesta pesquisa, os revestimentos precisaram apenas de 3 cordões de solda para preencher a mesma área, diferente do trabalho apresentado por García (2011), que utilizou os mesmos 3 cordões de solda, mas com a aplicação de tecimento. Este fato demonstra que a utilização da técnica FCAW duplo arame é viável para o aumento da produtividade.

A Fig. 4.24 mostra os valores da área fundida obtida nos 12 revestimentos (para cada condição de revestimento). Nesta figura e na Tab. 4.4 é possível observar que o revestimento feito com a condição 10 (FeCrC (1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento) foi o que apresentou menor área fundida (27,66 mm<sup>2</sup>).

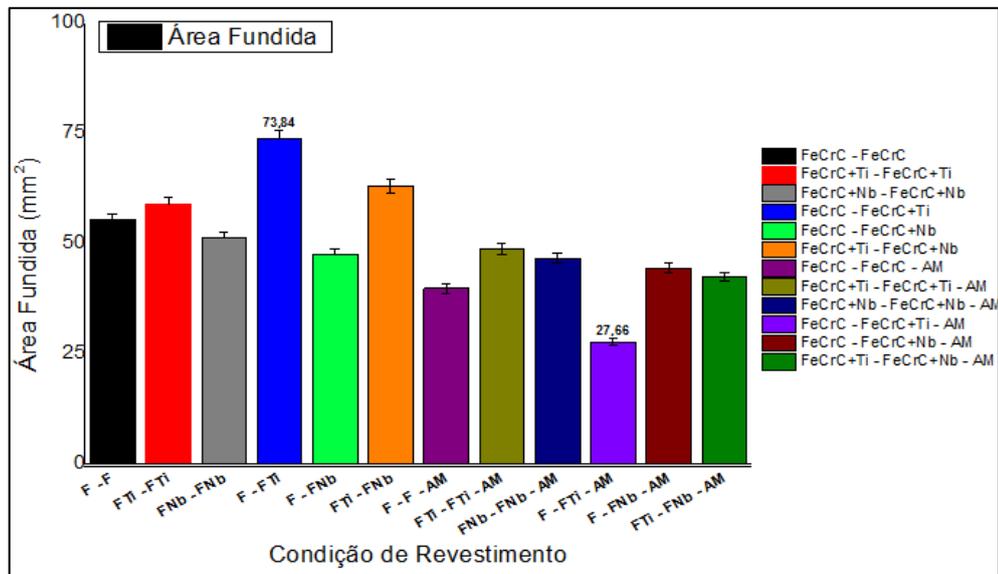


Figura 4. 24 – Área Fundida dos revestimentos feitos com cada condição de soldagem

Em teste de hipótese a significância estatística para a área fundida média das condições com amanteigamento versus sem amanteigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), mostrou-se uma significância estatística de  $p = 0,00363$ , permitindo considerar os valores de área fundida como estatisticamente diferentes e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da área fundida para as chapas com amanteigamento, conforme Fig. 4.25. Este fator pode ser atribuído à diferença de diluição encontrada para as diferentes condições de revestimento desta pesquisa.

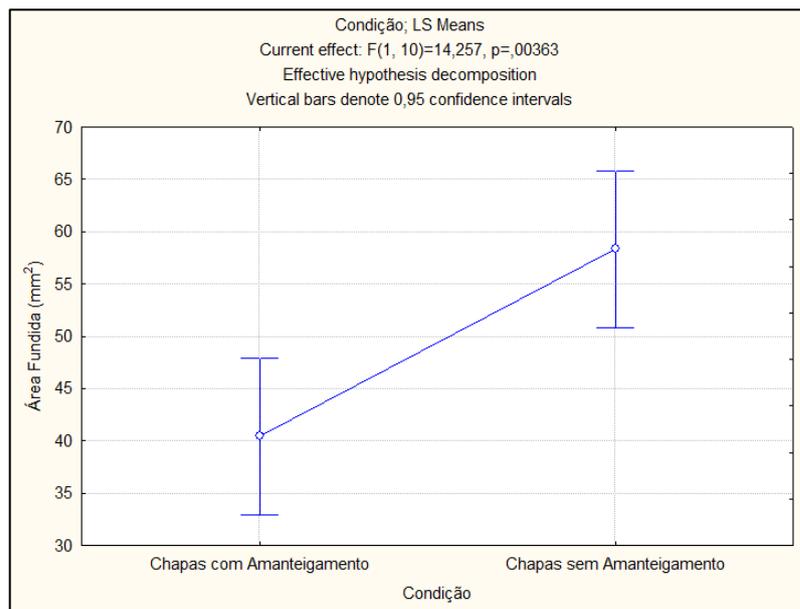


Figura 4. 25 - Comparação feita entre a área fundida média dos revestimentos com e sem amanteigamento

A Fig. 4.26 mostra os valores de diluição obtidos nos revestimentos feitos com cada condição de soldagem, medidas de diluição apresentada na Tab. 4.4. Estes valores de diluição correspondem aos valores encontrados na seção transversal de cada corpo de prova.

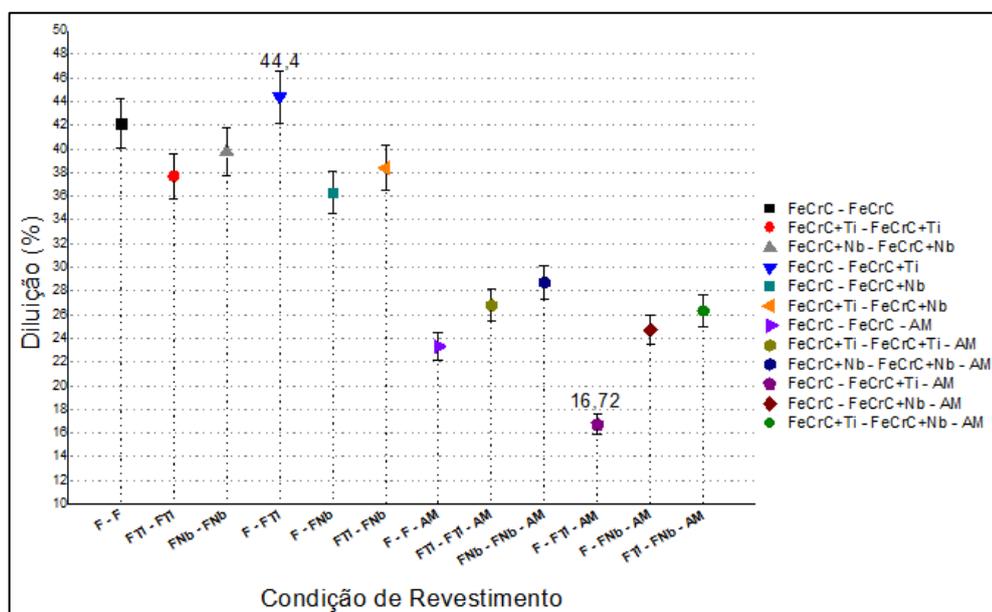


Figura 4. 26 – Diluição dos revestimentos aplicados

Conforme citado por Ibarra et. al. (2001), a avaliação da diluição deve ser considerada nos revestimentos duros por ser um dos parâmetros determinantes na composição química da zona fundida, na dureza e nas propriedades tribológicas dos depósitos. A obtenção deste valor foi mediante a relação entre a área fundida e a área total da solda (área fundida mais a área de reforço – de acordo com a Eq.3.1 do item 3.3.3.2 do Capítulo III). Os valores correspondentes às áreas foram medidos na seção transversal do revestimento (Tab. 4.4) seguindo o procedimento citado no item 3.3.3.1 do Capítulo III.

Os valores de diluição ficaram próximos aos encontrados por Lima (2008), García (2011) e Colaço e Maranhão (2014). Quando comparados os valores da diluição dos revestimentos com e sem amateigamento pode-se observar que em todos os casos os revestimentos sem amateigamento apresentaram valores superiores de diluição. No teste de hipótese a significância estatística para a diluição média das condições com amateigamento versus sem amateigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,00001$ , permitindo considerar a diluição como estatisticamente diferente e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da diluição com o amateigamento da chapa, conforme Fig. 4.27.

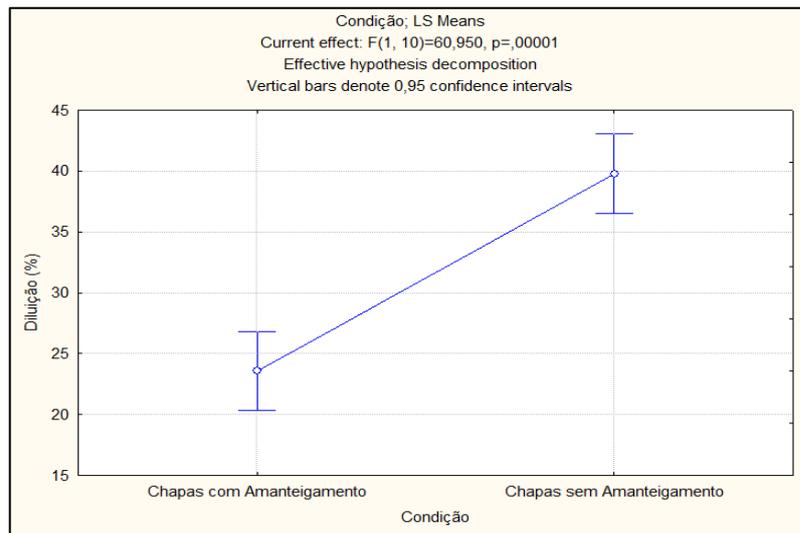


Figura 4. 27 - Comparação feita entre a diluição média dos revestimentos com e sem amanteigamento

Para Palani e Murugan (2006), o nível de diluição depende da diferença entre as composições químicas do metal base e metal de adição, da diluição inerente ao processo de soldagem utilizado (maior ou menor densidade de calor) e da técnica de soldagem (puxando, empurrando, com tecimento, sem tecimento, etc.).

Reis et. al. (2011) afirma que, o calor necessário para aquecer o material seria mais bem representado pela capacidade térmica, que é uma relação direta entre o calor específico e a densidade do material. O aço inoxidável (material utilizado para amanteigar as chapas) dissipa mais rapidamente parte do calor imposto pelo processo de soldagem, ao invés de aproveitá-lo para promover a sua fusão. Por isto, pode-se observar neste trabalho, que chapas com amanteigamento apresentaram revestimentos com menor diluição.

Com relação à espessura da junta para uma mesma condição de soldagem, uma junta de maior espessura permite um escoamento mais fácil do calor por condução. Assim, quanto mais espessa a junta, mais rapidamente esta tenderá a perder calor durante a soldagem (MODENESI et. al., 2012). Caso observado nos revestimentos feitos com amanteigamento, pois este provoca o aumento da espessura da chapa a ser revestida.

Comparando a diluição dos revestimentos, a condição 4 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)) apresentou o maior valor de diluição, fato este explicado, por apresentar o maior valor de corrente e conseqüentemente, maior valor de penetração. O menor valor de diluição foi apresentado pela condição 10 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento).

### 4.3. Avaliação do Desgaste

Foram submetidas três amostras extraídas de cada revestimento feito com cada condição de soldagem da Tab. 4.2 ao ensaio de desgaste em abrasômetro de Roda de Borracha, conforme procedimento apresentado na terceira etapa do item 3.4. e norma ASTM G65-00, por um tempo de 5 minutos ininterruptos para pré-desgaste e em seguida (após limpeza e pesagem) um tempo de 10 minutos de ensaio de desgaste.

Os resultados da perda de massa e da resistência ao desgaste obtido das 3 amostras revestidas com cada condição são apresentados na Tab. 4.5 e seus valores nas Fig. 4.29 e 4.30, conforme mostrado na Eq. 3.2 no capítulo III.

Observa-se, na Fig. 4.28 e na Tab. 4.5 que os revestimentos realizados com a condição 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)) obtiveram o melhor resultado no desgaste em valor médio (menor perda de massa – 21,2 mg), seguidos pelos revestimentos feitos com as condições 6 (25,0 mg ) e 3 (29,2 mg). O pior resultado foi apresentado nos revestimentos da condição 10 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento) (61,1 mg) seguido pelas condições 8 (50,9 mg) e 1 (40,6 mg).

Comparando os resultados desse trabalho com os obtidos por Lima (2008) e García (2011), para as condições que apresentaram melhor desempenho, condição com liga de Nb (42 mg) e condição com liga de Nb mais adição de ER308LSi (33,40 mg), respectivamente, a condição de revestimento 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)) (21,2 mg) apresentou uma diminuição da perda de massa, conseqüentemente um melhor resultado no ensaio de desgaste. Esse efeito provavelmente está associado à variação do tamanho, morfologia de carbonetos e ductilidade da matriz devido à presença do Ti e formação do cordão de solda através do processo FCAW Duplo Arame para a condição sem amanteigamento, contribuindo para a obtenção de diferentes resistências ao desgaste.

Tabela 4. 5 – Dados de massa e desgaste por condição de revestimento

ENSAIO N°	CONDIÇÃO	CP	Desgaste (mg)	Desg <sub>m</sub> (mg)	DP Desg <sub>m</sub>	Tdesg <sub>m</sub> (mg/m)	DP Tdesg	Rdesg <sub>m</sub> (mg/m) <sup>-1</sup>	DP Rdesg <sub>m</sub>
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	01	36,60						
		02	41,40	40,6	2,67	0,0283	0,00	35,37	2,40
		03	43,80						
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	04	18,40						
		05	23,90	21,2	1,87	0,0148	0,00	67,74	1,68
		06	21,30						
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	07	25,70						
		08	34,20	29,2	3,33	0,0203	0,00	49,18	3,00
		09	27,70						
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	10	22,20						
		11	26,00	30,7	8,80	0,0214	0,01	46,78	7,92
		12	43,90						
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	13	35,70						
		14	27,00	29,9	3,89	0,0208	0,00	48,08	3,50
		15	26,90						
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	16	21,10						
		17	30,90	25,0	3,96	0,0174	0,00	57,52	3,56
		18	22,90						
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) Com AM	19	38,00						
		20	21,80	33,4	7,73	0,0233	0,01	42,99	6,96
		21	40,40						
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	22	69,20						
		23	35,50	50,9	12,18	0,0355	0,01	28,19	10,96
		24	48,10						
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	25	31,70						
		26	33,90	36,7	5,20	0,0256	0,01	39,13	4,68
		27	44,50						
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) Com AM	28	66,30						
		29	54,40	61,1	4,49	0,0426	0,00	23,49	4,04
		30	62,70						
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	31	12,70						
		32	43,60	33,9	14,16	0,0236	0,01	42,32	12,74
		33	45,50						
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) Com AM	34	27,20						
		35	31,20	38,9	12,98	0,0271	0,01	36,88	11,68
		36	58,40						

Onde: Desg<sub>m</sub> = Desgaste médio por condição de revestimento; Tdesg<sub>m</sub> = Taxa de desgaste médio por condição de revestimento (desgaste em função da distância percorrida durante o ensaio, 1436m); Rdesg<sub>m</sub> = resistência ao desgaste média por condição de revestimento (inverso da taxa de desgaste); DP = Desvio padrão.

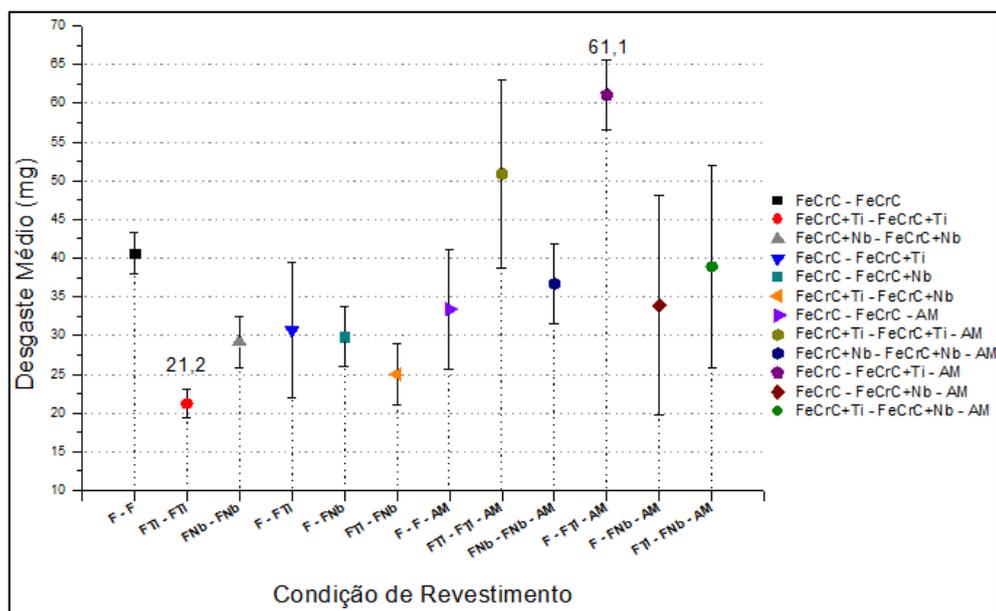


Figura 4. 28 – Desgaste médio (perda de massa) para cada condição de revestimento utilizado

Para valores de desgaste obtidos por García (2011) no ensaio de Roda de Borracha em amostras de aço carbono ABNT 1020 sem revestimento (perda de massa igual a 3148,94 mg), o resultado apresentado neste trabalho demonstra que a aplicação de revestimento duro por FCAW Duplo Arame na condição 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)) (perda de massa igual a 21,2 mg), diminui de forma significativa o desgaste do corpo de prova, e conseqüentemente, apresenta-se como uma excelente alternativa para aumentar a vida útil dos componentes sujeitos ao desgaste abrasivo.

Outra forma de apresentar os resultados de desgaste abrasivo é através da obtenção da resistência ao desgaste, obtida pela relação inversa do desgaste dividido pela distância percorrida durante o ensaio (Eq. 3.2 no Capítulo III). Neste trabalho a distância percorrida em 10 minutos de ensaio foi de 1436 metros. A Fig. 4.29 apresenta este resultado.

Os revestimentos realizados sem amanteigamento da chapa, com exceção da condição 1 (FeCrC(1) - FeCrC(2) (35,37 [mg/m]<sup>-1</sup>)), foram os que apresentaram melhor resistência ao desgaste abrasivo, Fig. 4.30, destacando-se o revestimento da condição 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)) (67,74 [mg/m]<sup>-1</sup>) superando em 140% o revestimento da condição 8 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento) (28,19 [mg/m]<sup>-1</sup>).

As condições de revestimento sem amanteigamento apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo quando comparadas as condições com amanteigamento. Isto demonstra que o amanteigamento não corresponde a uma alternativa viável na melhora da resistência ao desgaste.

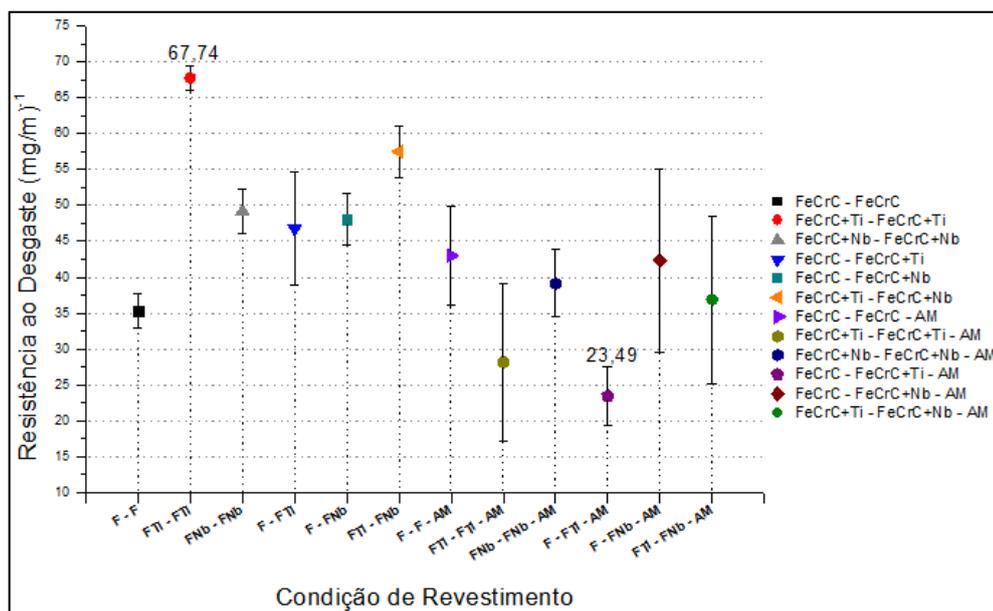


Figura 4. 29 – Análise comparativa de resistência ao desgaste dos revestimentos

No teste de hipótese a significância estatística para a resistência ao desgaste médio das condições com amantejamento versus sem amantejamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), obteve-se uma significância estatística de  $p=0,01974$ , permitindo considerar a resistência ao desgaste como estatisticamente diferente e sendo possível estabelecer uma tendência de diminuição da resistência ao desgaste com o amantejamento da chapa, conforme Fig. 4.30.

Comparando os resultados de resistência ao desgaste dos revestimentos, Fig. 4.29, com o trabalho de Buchely et al (2005), que avaliou a resistência ao desgaste em roda de borracha de ligas de FeCrC com adição de elementos de liga formadores de carbonetos complexos do tipo MC, como Nb, V, Ti, W e outros. Os autores observaram que a resistência ao desgaste variou de 11,2 a 32,3  $[\text{mg}/\text{m}]^{-1}$ . Neste trabalho, a resistência ao desgaste obtida para os revestimentos em camada única, variou de 23,49 a 67,74  $[\text{mg}/\text{m}]^{-1}$ . Com relação aos resultados de Lima (2008) e García (2011), observaram-se resultados próximos, onde se verifica uma variação de resistência ao desgaste de 9,69 a 47,53  $[\text{mg}/\text{m}]^{-1}$  e 27,16 a 43,02  $[\text{mg}/\text{m}]^{-1}$ , respectivamente.

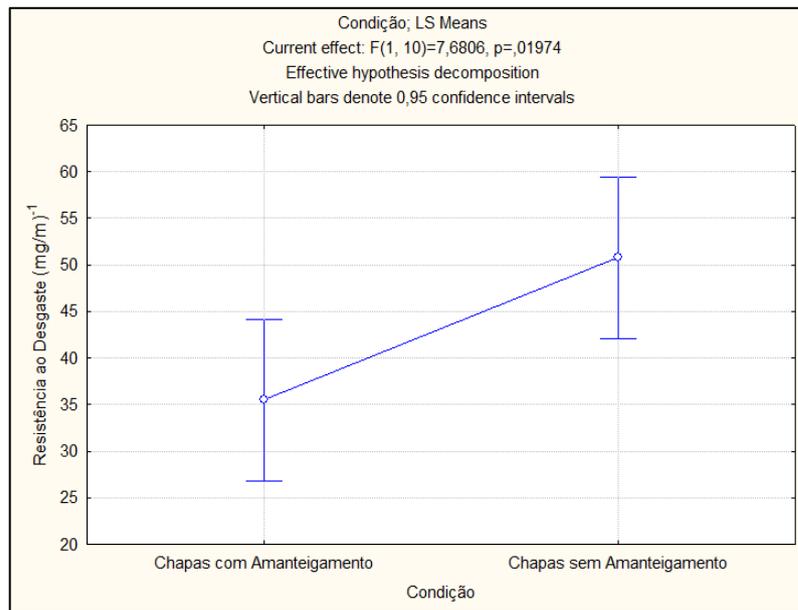


Figura 4. 30 - Comparação feita entre a resistência ao desgaste média dos revestimentos com e sem amanteigamento

As comparações feitas anteriormente mostram que apesar de serem consumíveis diferentes e aplicados com condições distintas, resguarda as devidas proporções, os resultados apresentados neste trabalho estão em acordo com a literatura.

#### 4.3.1. Análise das amostras após ensaio de desgaste.

A Fig. 4.31 ilustra as superfícies de desgaste dos corpos de prova ensaiados, permitindo observar diferentes comportamentos por condição de revestimento. A seta na figura indica o sentido de entrada das partículas abrasivas durante o ensaio.

A diminuição da resistência ao desgaste nas amostras revestidas pode ser atribuída, segundo García (2011), a elevada presença de trincas transversais na direção de desgaste e porosidades onde as partículas abrasivas podem adentrar e, somadas com a compressão imposta pela roda de borracha, provocam um desgaste mais acentuado na extremidade de saída. Entretanto, quando as discontinuidades são significativamente menores, o seu efeito no incremento da perda de massa nos revestimentos parece não ser notável, como se pode observar na Fig. 4.30 para os revestimentos feitos com as condições 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)), 4 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)), 6 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)), 8 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com AM), 10 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com AM) e 12 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com AM).

Na Fig. 4.32, que relaciona a resistência ao desgaste com o número de trincas, não é possível visualizar uma tendência de diminuição da resistência ao desgaste com o aumento do número de trincas.

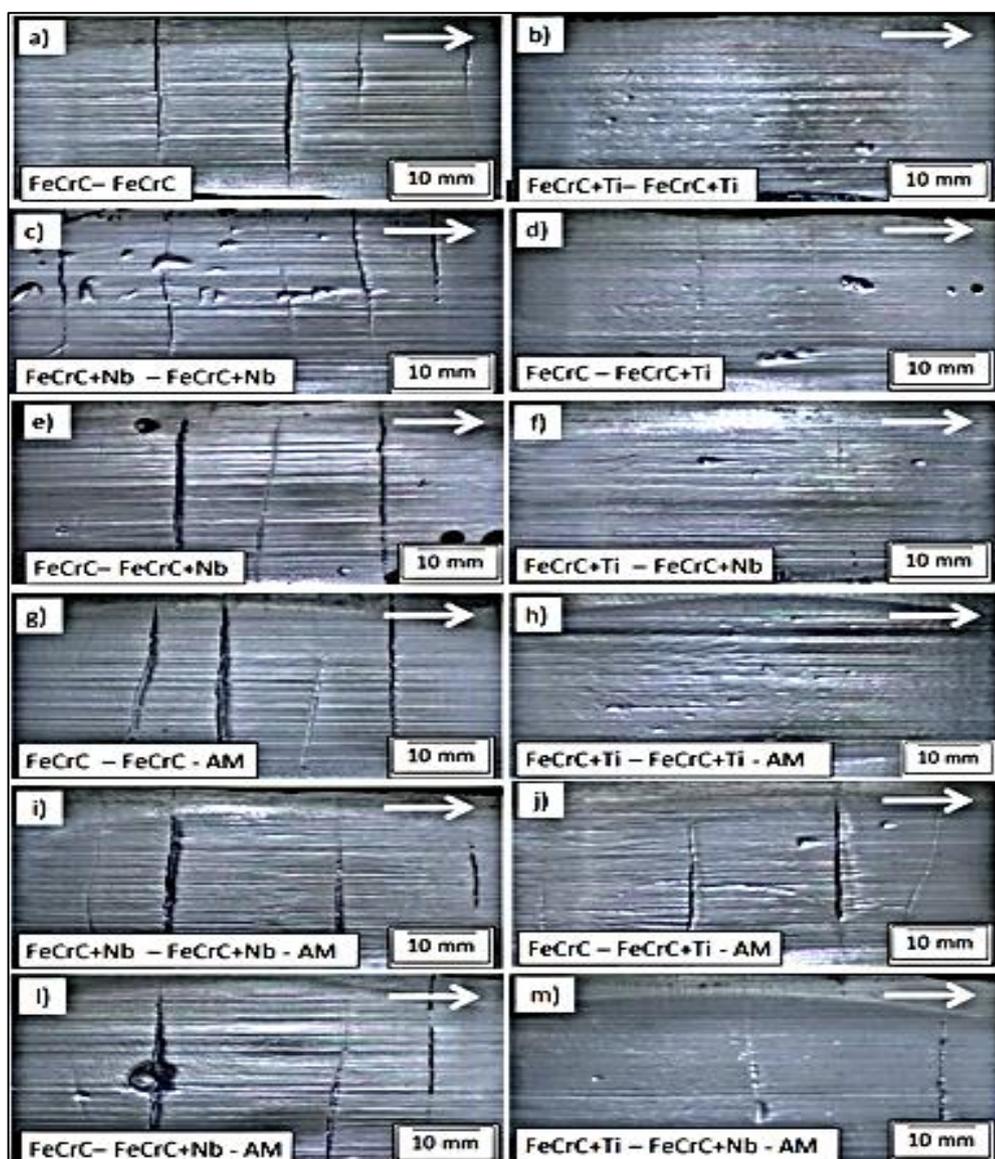


Figura 4. 31 – Imagem de cada revestimento feita após o ensaio de desgaste com abrasômetro de Roda de Borracha. a) FeCrC(1) - FeCrC(2); b) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2); c) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2); d) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2); e) FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2); f) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2); g) FeCrC (1) - FeCrC(2) com amanteigamento; h) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento; i) FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento; j) FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com amanteigamento; k) FeCrC (1) - FeCrC+Nb(2) com amanteigamento e l) FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb (2) com amanteigamento

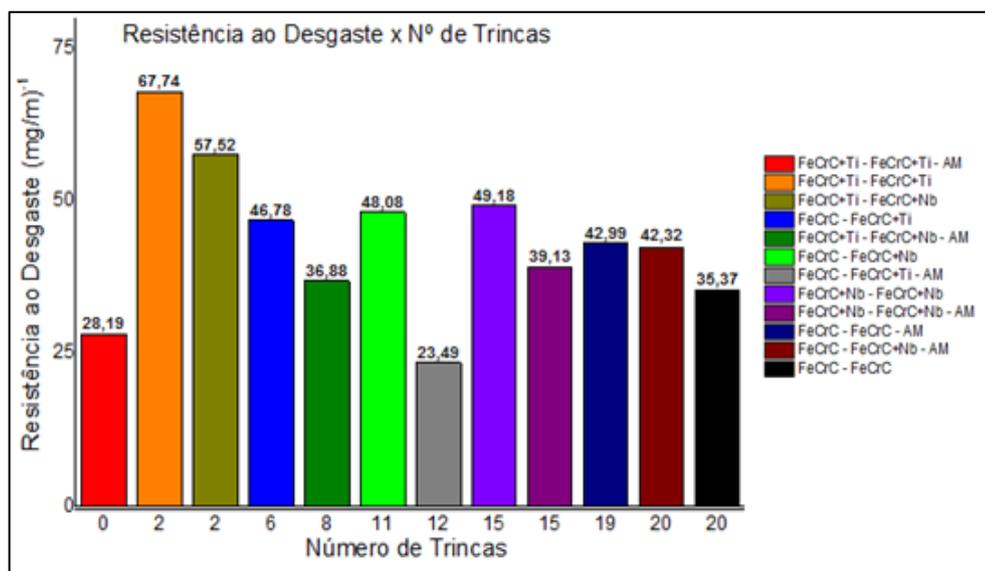


Figura 4. 32 – Comparação entre a resistência ao desgaste e número de trincas no revestimento

#### 4.3.2. Análise da Dureza e Microdureza dos revestimentos

Para análise de dureza foram feitas medidas Rockwell C na superfície retificada de cada revestimento, na região central de cada corpo de prova, próximo à trilha de desgaste. A Tab. 4.6 e a Fig. 4.33 apresenta os valores de dureza dos revestimentos. Pode-se observar que o revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) foi a que apresentou maior média de dureza (60 HRC), seguida pelo revestimento da condição 2 (58 HRC) e 1 (58 HRC). O valor da dureza encontrado para a melhor condição de revestimento foi próximo ao encontrado por Scandella e Scandella (2004) – 61 HRC, Lima (2008) – 61,9 HRC e García (2011) – 64,69 HRC.

Comparando os revestimentos feitos com e sem amanteigamento (Fig. 4.34), pode-se observar uma notável diminuição na dureza dos revestimentos feitos nas condições com amanteigamento, com exceção da condição 10 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento), que apresentou um ligeiro aumento (Fig. 4.33). Os revestimentos feitos com as condições 8 e 12 (36 e 46 HRC respectivamente) foram 40% e 24% menores do que a dureza do revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) (60 HRC).

Tabela 4. 6 – Dureza dos revestimentos

ENSAIO N°	CONDIÇÃO	Dureza do Revestimento [HRC]							Média [HRC]	Desvio Padrão [HRC]
		01	02	Medições			06	07		
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	55,5	59,5	59	58	59	58	59	58	1,25
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	51	55	58	61	60	61	57	58	3,37
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	60	60	59	63	60	57	61	60	1,69
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	47	50	42	47	49,5	45	48	47	2,54
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	53	58	59	59	52,5	58	57	57	2,55
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	50	49,5	45,5	48	50,5	51	45	49	2,24
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento	53	53	56	55,5	54	55	57	55	1,41
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento	36	41	37	35	35	35,5	34	36	2,14
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	54	56	60	56	51	57	57	56	2,59
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento	43	50	52,5	49,5	52	48	46,5	49	3,06
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	46	57	57	58	59	58	58,5	56	4,22
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	45	47	48	48	46	43,5	44	46	1,70

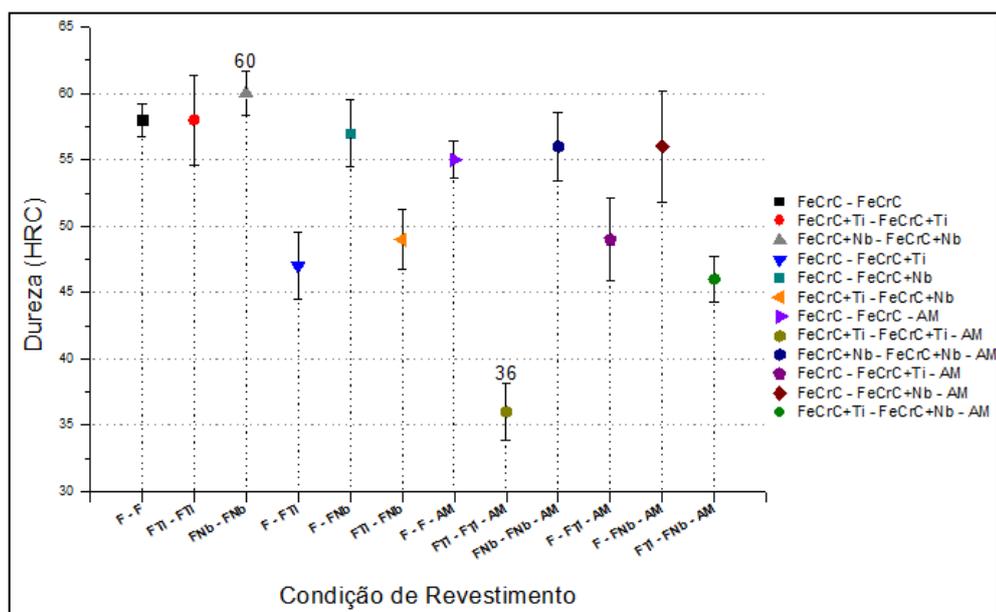


Figura 4. 33 – Dureza dos Revestimentos

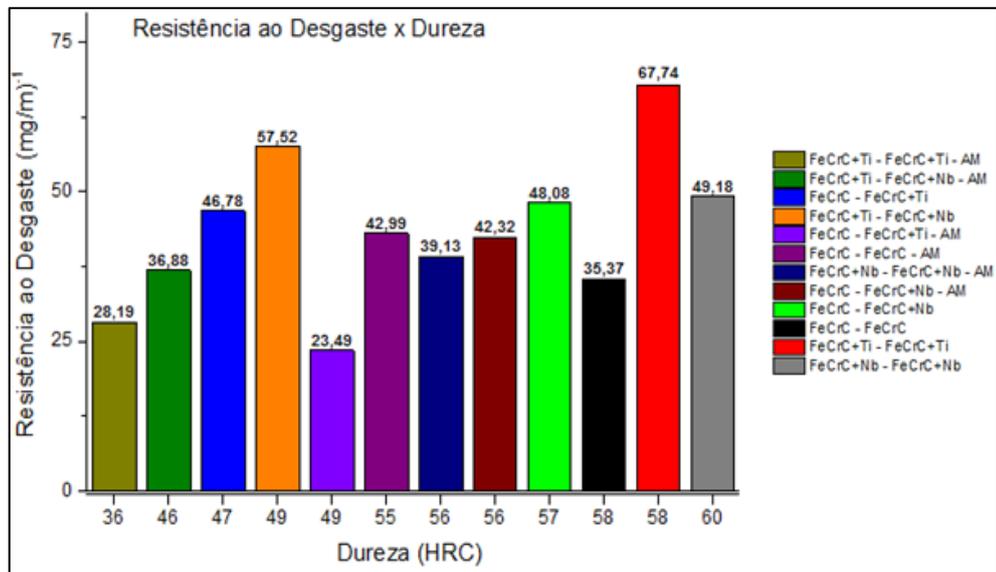


Figura 4. 34 - Comparação entre a resistência ao desgaste e dureza média dos revestimentos

Em teste de hipótese a significância estatística para a dureza média das condições com amateigamento versus sem amateigamento, considerando  $p \leq 0,05$  (95% de confiabilidade), mostrou uma significância estatística de  $p=0,21466$ , permitindo considerar a dureza como estatisticamente igual e não sendo possível estabelecer uma relação entre elas, conforme Fig. 4.35.

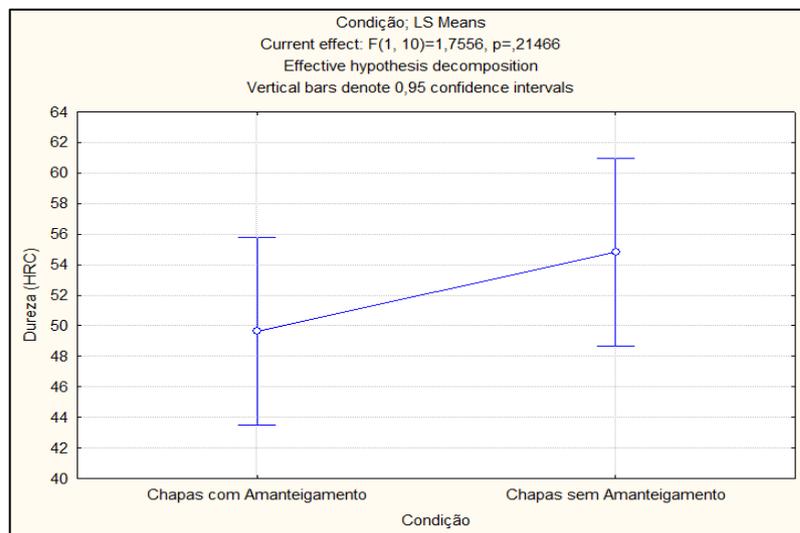


Figura 4. 35 - Comparação feita entre a dureza média dos revestimentos com e sem amateigamento

Observa-se na Fig. 4.34 que foram os revestimentos sem amanteigamento, com exceção da condição 1 (FeCrC(1) - FeCrC(2)), os que apresentaram superioridade na resistência ao desgaste, e no caso da dureza, foram os que obtiveram valores maiores.

Este resultado afirma a observação feita por Corrêa et al (2006), onde após realizar o ensaio de desgaste abrasivo de baixa e alta tensão em diversas ligas do sistema FeCrC encontrou que em algumas ligas de maior dureza se obtém maior resistência ao desgaste, mas em outras, o comportamento pode inclusive ser o oposto. Para Kotecki e Ogborn (1995), após estudar soldas de revestimento duro (com oito microestruturas diferentes) através da medição de dureza e avaliação da resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão, concluíram que a dureza não é um parâmetro seguro para se avaliar a resistência ao desgaste abrasivo à baixa tensão de ligas FeCrC. Estas observações encontradas neste estudo e na literatura reforçam o fato de que a dureza é um parâmetro importante, mas não mais importante quanto à avaliação da resistência ao desgaste abrasivo nos revestimentos.

Para análise de microdureza foram feitas medidas na superfície transversal de cada revestimento, na região central de cada corpo de prova, dentro da zona fundida, buscando indentar na matriz e evitando pegar apenas os carbonetos de elevada dureza. A Tab. 4.7 apresenta os valores de microdureza dos revestimentos. Pode-se observar que o revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) foi a que apresentou maior média de microdureza (755 HV), seguida pelos revestimentos das condições 12 (739 HV) e 9 (687 HV). O valor da microdureza encontrado para a melhor condição de revestimento foi próximo ao encontrado por Lima (2008) – 668 HV e Colaço e Maranhão (2014) – 730 HV.

Segundo Colaço e Maranhão (2014), a microdureza depende de vários fatores como velocidade de resfriamento, temperatura entre passes, preaquecimento, entre outros. Então é possível obter uma faixa de valores diferentes de dureza para um mesmo material ou condição de soldagem. Fato este observado neste trabalho, quando se avalia dureza e microdureza dos revestimentos.

Comparando os revestimentos, pode-se observar na Fig. 4.36 que os revestimentos feitos com as condições 8 e 4 (429 e 509 HV respectivamente) foram 43,18% e 32,58% menores do que a microdureza do revestimento feito com a condição 3 (FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)) (755 HV).

Tabela 4. 7 – Microdureza dos revestimentos

ENSAIO Nº	CONDIÇÃO	Microdureza do Revestimento [HV]									Média [HV]	Desvio Padrão [HV]
		Medições										
		01	02	03	04	05	06	07	08	09		
01	FeCrC(1) - FeCrC(2)	677	607	668	668	630	634	638	673	642	649	20,4
02	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)	660	642	673	696	668	686	686	664	691	674	14,0
03	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2)	710	789	777	710	720	824	730	740	794	755	36,6
04	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2)	560	524	500	524	486	463	503	465	560	509	28,8
05	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2)	664	614	595	626	622	660	630	651	581	627	21,5
06	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2)	577	581	512	498	533	521	595	533	518	541	28,9
07	FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento	677	740	626	677	607	789	595	766	651	681	56,1
08	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento	403	468	489	389	364	420	463	438	427	429	31,6
09	FeCrC+Nb(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	745	705	772	686	647	677	651	638	660	687	36,0
10	FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento	660	638	660	588	584	642	696	705	668	649	31,8
11	FeCrC(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	546	550	588	573	595	647	515	509	556	564	32,4
12	FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento	750	824	750	861	868	761	614	553	673	739	84,1

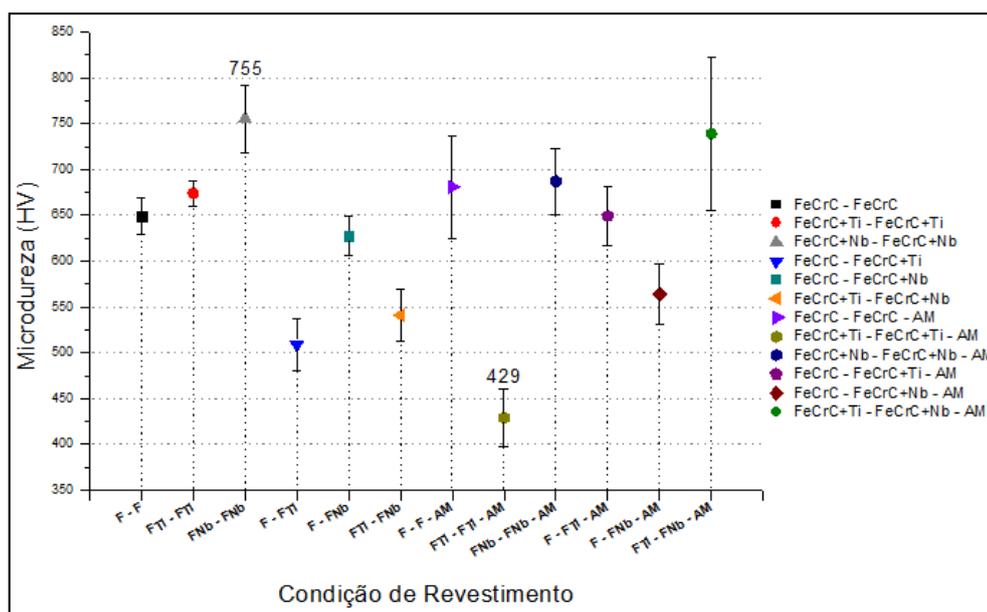


Figura 4. 36 – Microdureza dos revestimentos

#### 4.4. Microestruturas dos Revestimentos

Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas com e sem amanteigamento, para as 12 condições de revestimento, conforme ilustrado pela Fig. 4.37. As amostras de cada condição foram lixadas e polidas, seguindo o procedimento no Capítulo III (Materiais e Métodos). Posteriormente, uma de cada foi atacada com reagente Água Régia (100ml HCl + 3ml HNO<sub>3</sub>) por 10s e levada ao microscópio ótico.

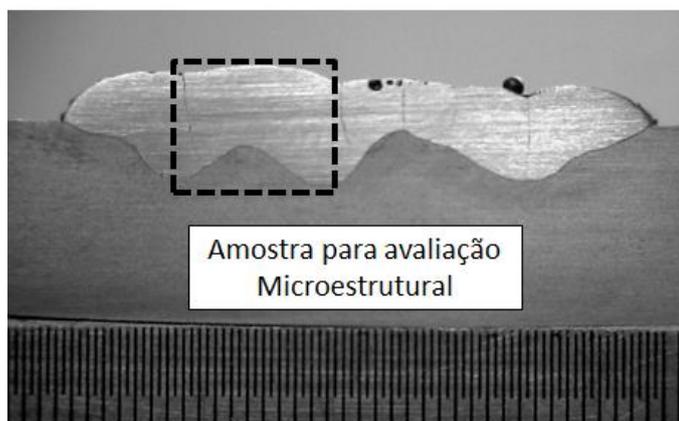


Figura 4. 37 – Extração das amostras para avaliação microestrutural

A Fig. 4.38 ilustra as microestruturas obtidas com as condições 1 e 7 (FeCrC(1) - FeCrC(2) sem amanteigamento e FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento). Observa-se que o revestimento (Fig. 4.38a) apresentou uma microestrutura formada por austenita em uma matriz eutética (austenita mais carbonetos) formando uma camada composta por carbonetos hexagonais primários ( $M_7C_3$ ), sem uma orientação preferencial, imersos na matriz. Este fato também é observado por Lima (2008), onde para a condição com amanteigamento (Fig. 4.38b), a distribuição destes carbonetos se encontra de forma não uniforme e em menor quantidade.

A matriz desta condição (com amanteigamento) tem semelhança com a observada por Fan et al (2006) e García (2011) em ligas de FeCrC com elevados teores de Cr, para forçar a geração de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ , a matriz encontrada no espécime com maior teor de Cr apresenta uma estrutura hipoeutética. Esta comparação é válida, já que ao adicionar o arame eletrodo de aço inoxidável à liga de FeCrC, está acrescentando em proporção de 25%, o teor de cromo na composição do revestimento, além da adição de elementos metálicos como o Ni, P e Cu. Nesta microestrutura pode-se visualizar a presença de dendritas de austenita

observadas também por Bálamo; Scotti; De Mello (1995) em ligas com altos teores de cromo.

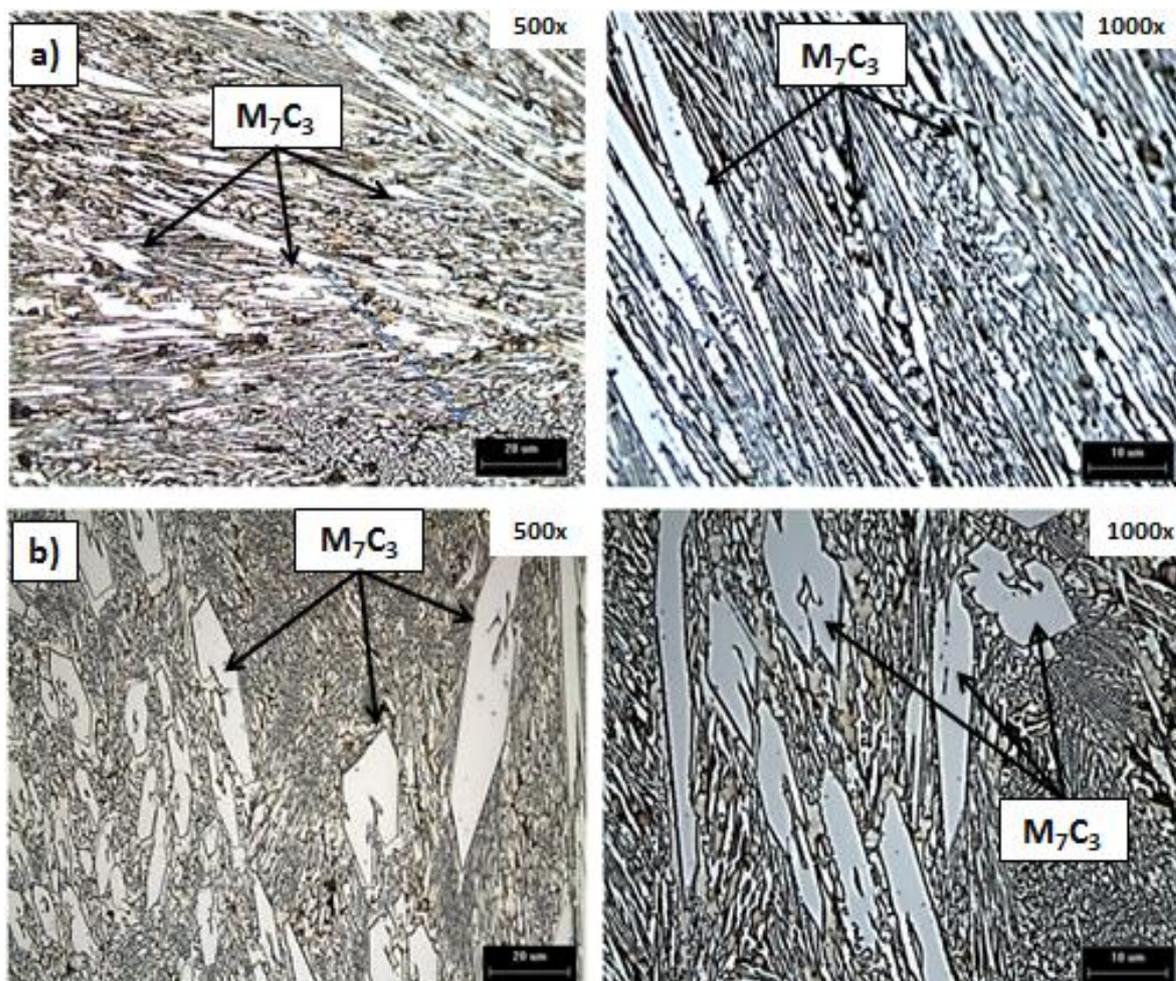


Figura 4. 38 – Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) - FeCrC(2) e b) FeCrC(1) - FeCrC(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Nas microestruturas resultantes das condições de revestimento 2 e 8 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento e FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento), apresentadas na Fig. 4.39, pode-se observar uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio de formatos irregulares e de tamanhos variados. Na microestrutura da Fig.4.39a verifica-se a ausência de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  devido ao baixo teor de cromo presente na liga (aproximadamente 6,5%Cr em peso), pois a formação dos carbonetos de titânio a alta temperatura acontece antes da precipitação dos carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$ . Este fato foi também observado no trabalho de Zhi et al (2008), Lima (2008) e García (2011). Além da

ausência de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  observa-se uma mudança na matriz do revestimento, já que não apresenta mais a estrutura eutética, típica das ligas de FeCrC, mas sim uma matriz austenítica-martensítica homogênea. Este fato também é observado por Lima (2008) e García (2011), onde ao avaliar a microestrutura do revestimento de FeCrC+Ti encontra a mesma matriz com regiões brancas que representam austenita retida, e regiões escuras que representam martensita.

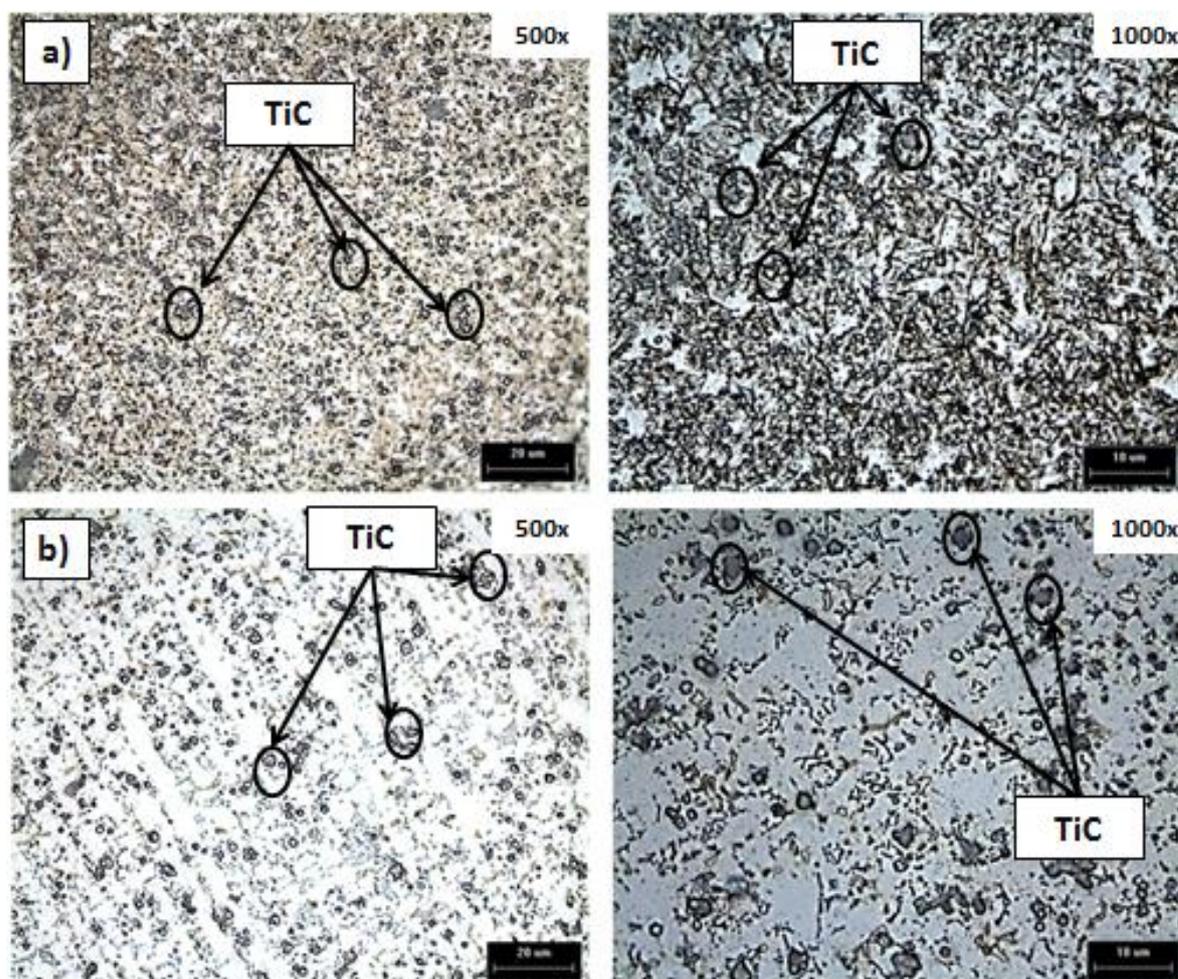


Figura 4. 39 - Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2) e b) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Com relação à condição com amanteigamento (Fig. 4.39b), pode-se observar uma microestrutura similar com menor quantidade de carbonetos de titânio distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos.

O melhor desempenho desta condição estudada neste trabalho com relação à resistência ao desgaste se justifica pela presença de carbonetos de Ti distribuídos em grande quantidade na matriz do revestimento. No trabalho de Lima (2008) e García (2011), o desempenho em laboratório (Roda de Borracha) apresentou uma superioridade da liga FeCrC+Nb sobre a liga FeCrC+Ti, entretanto os autores observaram carbonetos de titânio em menor quantidade e com maiores tamanhos.

A Fig. 4.40 apresenta as microestruturas obtidas com as condições 3 e 9 (FeCrC+Nb(1) – FeCrC+Nb(2) sem amanteigamento e FeCrC+Nb(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento). Observa-se a presença de carbonetos do tipo  $M_7C_3$  e carbonetos de nióbio (NbC), distribuídos aleatoriamente na matriz hipereutética. Zhi et al (2007), Lima (2008) e García (2011) citam que as ligas do sistema FeCrC+Nb apresentam, além de carbonetos de nióbio (NbC) na forma primária e secundária o mesmo tipo de estrutura das ligas contendo apenas FeCrC, ou seja, dendritas de austenita com grande quantidade de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ . Os carbonetos de nióbio (NbC) apresentam formatos semelhantes a geometrias quadradas ou hexagonais (Fig. 4.40a).

Segundo Polido e Gallego (2006), os carbonetos massivos  $(Fe, Cr)_7C_3$  ou  $M_7C_3$  são os primeiros a se formarem na solidificação da poça de fusão rica em ferro, cromo e carbono. A região onde estão precipitados os carbonetos (matriz) é uma mistura de várias fases, compostas principalmente de ferrita, carbonetos secundários do tipo  $M_7C_3$  e carbonetos  $M_{23}C_6$ .

Com relação à condição com amanteigamento (Fig. 4.40b), foi possível observar uma menor quantidade de carbonetos de nióbio (NbC) e do tipo  $M_7C_3$  distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos. A matriz desta condição tem semelhança com a observada por Fan et al (2006) e García (2011), já que ao adicionar o eletrodo de aço inoxidável à liga de FeCrC+Nb, ocorre um aumento do teor de cromo na composição do revestimento, além da adição de outros elementos metálicos (Ni, P e Cu).

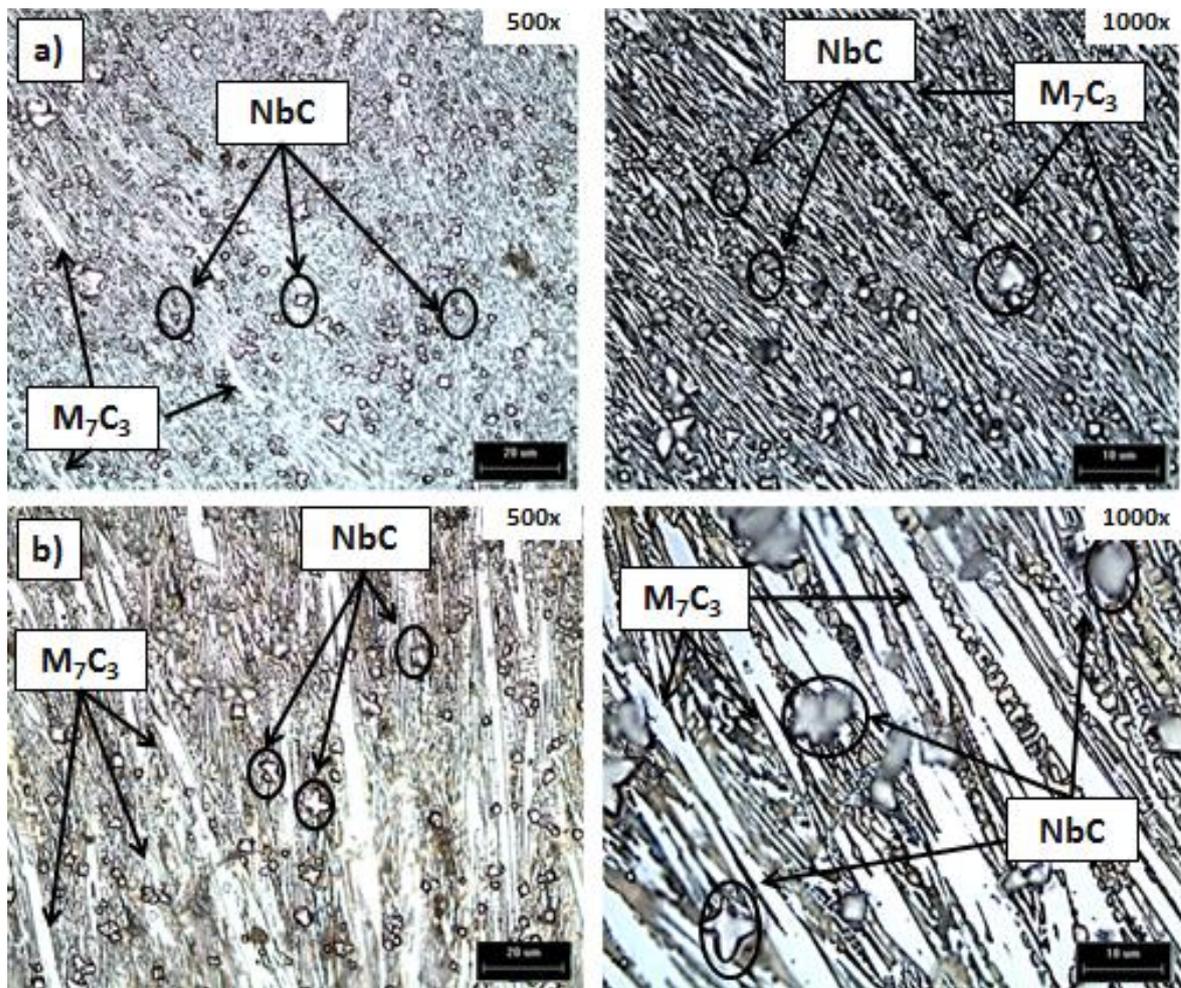


Figura 4. 40 - Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC+Nb(1) – FeCrC+Nb(2) e b) FeCrC+Nb(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Nas microestruturas das condições de revestimento 4 e 10 (FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento e FeCrC(1) - FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento), apresentadas na Fig. 4.41, observa-se novamente a presença de carbonetos de titânio finamente distribuídos pela matriz, mas diferente da condição 2 (FeCrC+Ti(1) - FeCrC+Ti(2)) (Fig.4.39), possui carbonetos primários do tipo  $M_7C_3$  na sua microestrutura. Isto pode ser explicado devido ao aumento do teor de cromo nesta condição proporcionado pelo arame eletrodo da liga FeCrC (numa proporção de 27% wt.), ser suficiente para levar a formação deste tipo de carboneto.

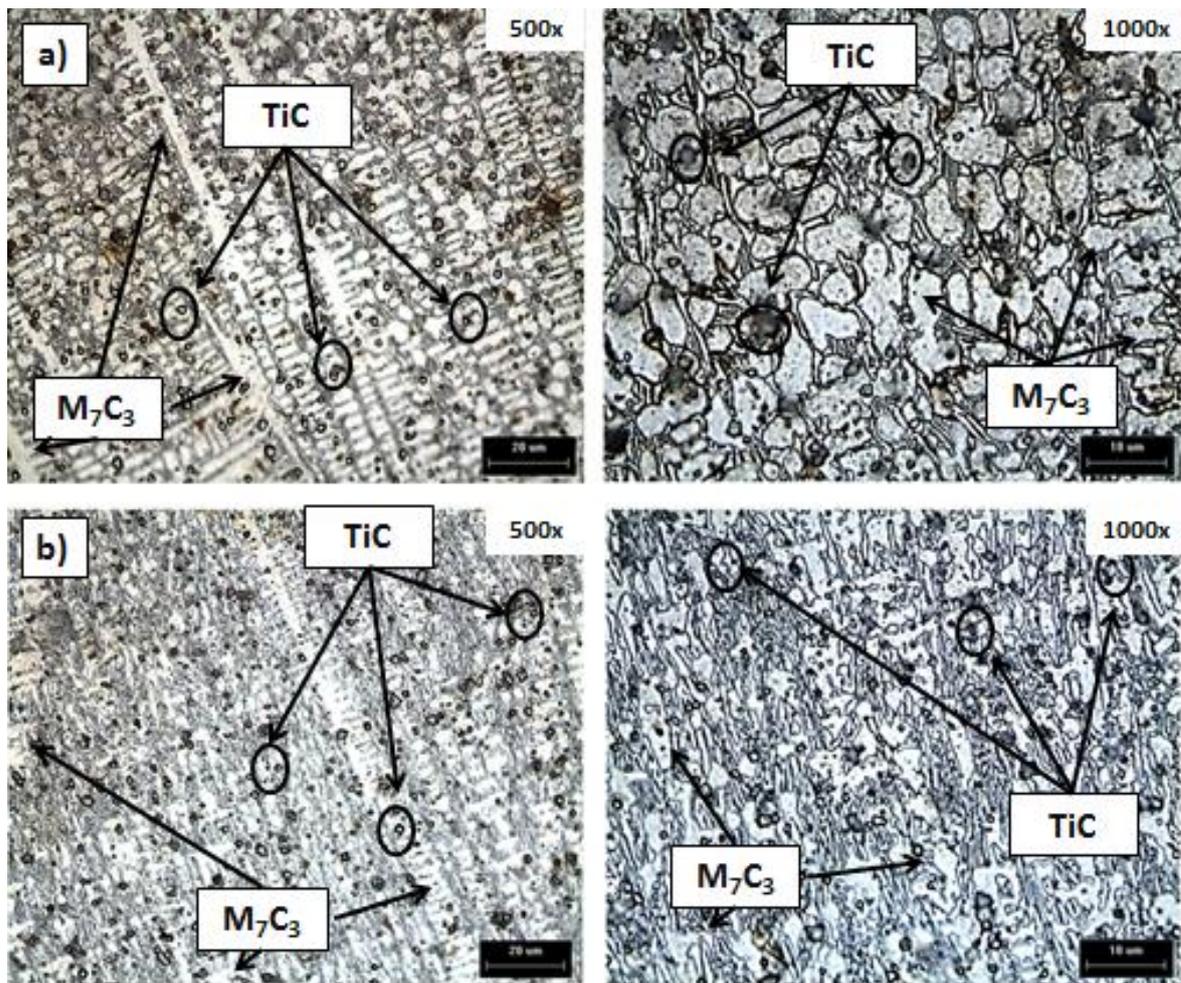


Figura 4. 41 - Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) e b) FeCrC (1) – FeCrC+Ti(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Na Fig. 4.42, as microestruturas dos revestimentos feitos com as condições 5 e 11 (FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) sem amanteigamento e FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento), apresentam novamente a presença de carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> e carbonetos de nióbio (NbC), distribuídos em grande quantidade e aleatoriamente na matriz. Na condição com amanteigamento (Fig. 4.42b) pode-se observar uma microestrutura similar com menor quantidade de carbonetos do tipo M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> distribuídos de forma não uniforme e de maiores tamanhos.

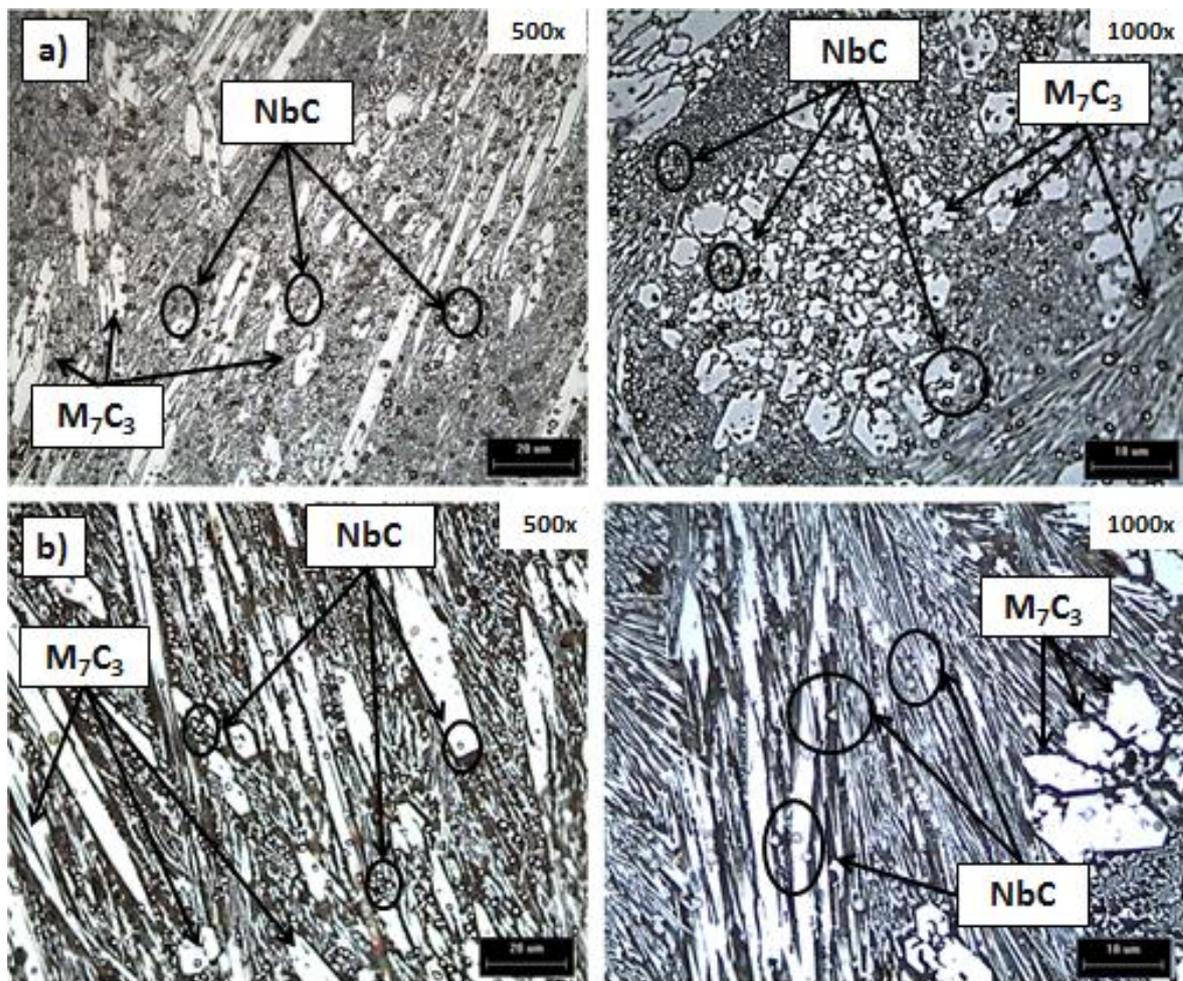


Figura 4. 42 - Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC(1) – FeCrC+Nb(2) e b) FeCrC (1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento. Aumentos de 500x e 1000x respectivamente

A Fig. 4.43 apresenta as microestruturas dos revestimentos feitos com as condições 6 e 12 (FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) sem amanteigamento e FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) com Amanteigamento). Foi possível verificar a presença de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ , carbonetos de titânio (TiC) e carbonetos de nióbio (NbC), onde os dois últimos, finamente distribuídos na matriz do revestimento, sendo os carbonetos de titânio encontrados em maior tamanho que os de nióbio.

Os carbonetos de nióbio são encontrados com o formato pequeno e alongado. Este formato também foi observado por Scandella e Scandella (2004) e García (2011) em ligas com teores de Nb de até 3 wt%. Estes revestimentos, também apresentam uma mudança na matriz quando comparado com os revestimentos da condição 2 (FeCrC+Ti(1) –

FeCrC+Ti(2)), isto devido à adição de novos elementos metálicos, numa proporção maior que 07% wt. , tais como Nb, e o aumento no teor de C, Cr e Si.

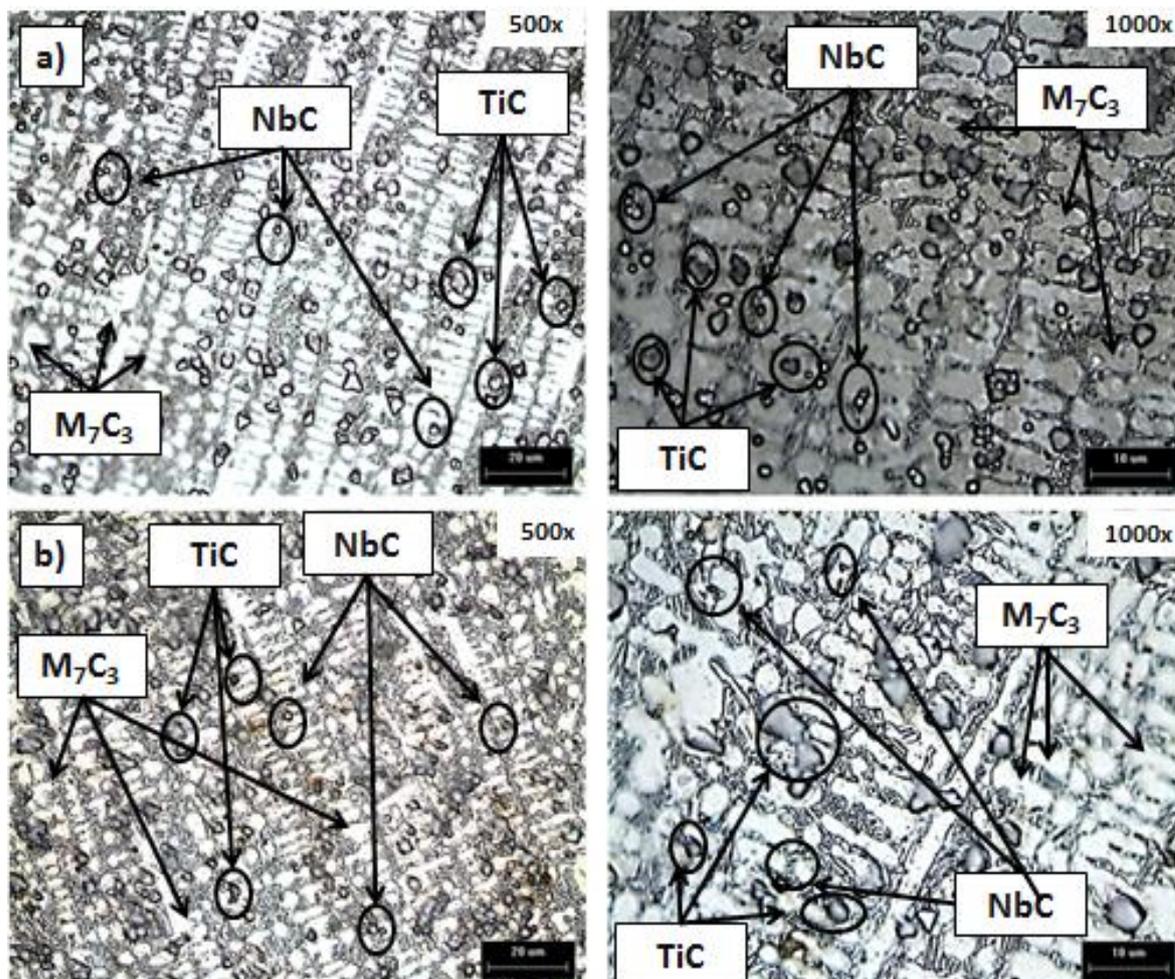


Figura 4. 43 - Microestruturas dos revestimentos feitos com as condições: a) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) e b) FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Nb(2) com Amantegamento. Com aumentos de 500x e 1000x respectivamente

Pela análise dos resultados pode-se dizer que a resposta do material ao desgaste abrasivo depende da presença de discontinuidades, diluição, dureza, microestrutura e morfologia e distribuição dos carbonetos na microestrutura, sendo que não é possível avaliar os mesmos de forma isolada e mostrando que o ensaio roda de borracha é mais confiável na definição da resistência ao desgaste destas ligas.

Para o revestimento que apresentou o melhor resultado de resistência ao desgaste, FeCrC+Ti – FeCrC+Ti, foi observado carbonetos de menor tamanho e em grande quantidade, distribuídos de forma homogenia, aumentando com isto a resistência ao desgaste do

revestimento, evitando que as partículas duras entrem em contato direto com a matriz de menor dureza.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSÕES

As análises dos resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais utilizados neste trabalho tornaram possível chegar as seguintes conclusões.

#### 6.1. Quanto à técnica de soldagem:

- ✓ A técnica de revestimento por FCAW duplo arame não demonstrou eficiência para diminuir a formação de trincas de solidificação.
- ✓ A técnica de revestimento por FCAW duplo arame apresentou resultados semelhantes em termos de resistência ao desgaste quando comparado ao desgaste das ligas aplicadas pelos processos convencionais (aramé tubular) ou com adição de arame não energizado, entretanto, com maior produtividade devido a maior taxa de material depositado.

#### 6.2. Quanto às características geométricas dos revestimentos:

- ✓ Dos revestimentos realizados, a condição FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) apresentou a melhor relação penetração/reforço para revestimentos entre as demais condições (menor penetração e maior reforço). A condição FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2) com amanteigamento mostrou o maior valor de largura.
- ✓ O revestimento realizado com a condição FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) apresentou o maior valor de diluição em comparação as demais condições de soldagem.
- ✓ Os revestimentos realizados com amanteigamento apresentaram menores valores de diluição em comparação aos revestimentos sem amanteigamento.
- ✓ Nos revestimentos confeccionados com adição de Titânio foi possível observar pouca ou nenhuma ocorrência de trincas no ensaio visual.
- ✓ Os revestimentos realizados com amanteigamento apresentaram maior quantidade de trincas em comparação aos revestimentos sem amanteigamento.

### 6.3. Quanto à resistência ao desgaste:

- ✓ A condição de revestimento FeCrC+Ti(1) – FeCrC+Ti(2) sem amanteigamento apresentou, em média, o maior valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio (TiC) de formatos irregulares e de tamanhos variados em uma matriz austenítica-martensítica homogênea.
- ✓ O revestimento realizado com a condição FeCrC(1) – FeCrC+Ti(2) com amanteigamento apresentou o menor valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por carbonetos de titânio (TiC) e carbonetos do tipo  $M_7C_3$  distribuídos em uma matriz eutética austenítica.
- ✓ As condições de revestimento sem amanteigamento apresentaram maior resistência ao desgaste abrasivo e menor quantidade de trincas quando comparadas às condições com amanteigamento. Isto demonstra que o amanteigamento não melhora a resistência ao desgaste.

# CAPÍTULO VII

## TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar ensaios variando os parâmetros de soldagem do duplo arame com o objetivo de diminuir a diluição dos revestimentos. Além disso, procurar também uma melhor condição de posicionamento da tocha (soldar empurrando, puxando e reta) e também outras relações de velocidades de alimentação e posicionamento em relação à chapa entre os dois arames.
2. Fazer a comparação da resistência ao desgaste entre as ligas de FeCrC+Ti e FeCrC+Nb contendo teores de cromo similares com o objetivo de verificar a eficiência na resistência ao desgaste dos elementos Ti e Nb, bem como comparar com revestimentos construídos com teores semelhantes de Ti e Nb.
3. Avaliar os consumíveis utilizados na condição de soldagem de duas ou três camadas de solda, já que as propriedades do revestimento são diferentes nessas condições e, em muitas aplicações deseja-se para maior vida em serviço do equipamento, a utilização de maior espessura de revestimento.
4. Avaliar outro método de ensaio que melhor reproduza o mecanismo de desgaste ocorrido em facas picadoras de cana-de-açúcar, para facilitar desenvolvimentos posteriores, provavelmente pela simulação combinada de abrasão e impacto.

## CAPÍTULO VIII

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES FILHO, M. Para garantir nosso doce. Ano XV, nº161, disponível em [http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/abril2001/pag06abril2001.htm](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/abril2001/pag06abril2001.htm). Abril de 2001. Acesso em: fevereiro de 2013.

ASTM – American Standard for Testing Materials. Annual Book of Standards Volume 03.02, Philadelphia, USA, 2001.

ASTM G40-09. **Standard Terminology Relating to Wear and Erosion**, 1992.

ASTM G65-00. **Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand Rubber Wheel Apparatus**, p. 231-243, 2001.

AWS - WELDING HANDBOOK – MATERIALS AND APLICATIONS – PART 1. v.3 – 8th edition. American Welding Society. Miami, Fl. 1998. 526 p.

ATAMERT, S. and BHADSHIA, H. K. D. H. Microstructure and Stability of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. **Materials Science and Engineering A**, n. 130, p. 101-111, 1988.

AWS. **Welding Handbook – Welding Technology**, American Welding Society, Vol. 1, 9th Edition, Miami, USA, 2001.

BHUSHAN, B.. **Modern tribology handbook**. 01 ed. Boca Raton: CRC Press. 2001. (The mechanics and materials science series)

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

BANDEIRA, A. L.. **Comportamento Do Desgaste E Posterior Corrosão Do Sistema Duplex AISI 4140 Nitretado/CrN Em Bioetanol Combustível**. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2012.

BATISTA, A. L. B.; NASCIMENTO, I. A. **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de maquinas**. SPECTRU. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/metallurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>. Rio de janeiro, 05 de abr..2012.

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

BEILER, D. R.. Influência das condições de processo sobre as descontinuidades e resistência à cavitação de revestimentos soldados sobre aço CA-6NM. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC. 2012.

BERNS, H.; FISCHER, A. Microstructure of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys with Additions of Nb, Ti and, B. *Metallography*, v. 20. p. 401-429, 1987.

BRACARENSE, A.Q. Processo de soldagem com arame tubular – FCAW. Universidade Federal de Minas Gerais, Grupo de Robótica, soldagem e Simulação. Belo Horizonte, 2005.

BRACARENSE, Alexandre Queiroz; SORAGI, Carlos; FELIZARDO, Ivanilza. Parametrização para Soldagem Orbital Robotizada de Tubos com Arame Tubular. **Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. São Paulo, v.2, n.3, p.6- 10. jan. Mar. 2006.

BUCHANAN, V. E.; SHIPWAY, P. H.; MCCARTNEY, D. G. Microstructure and Abrasive Wear Behaviour of Shielded Metal Arc Welding Hardfacings Used in the Sugarcane Industry. **Wear**. P. 1 - 12, 2007.

BUCHELY, M. F.; GUTIERREZ, J. C.; LEÓN, L. M. & TORO, A. The Effect of Microstructure on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys. In: **Tribology International**. v. 259, p. 52 - 61, 2005.

BUDINSKI K.G. **Wear Modes, Surface Engineering for Wear Resistance**. USA: Editora Prentice Hall, P 15-43. 1988.

CABRAL, T. S.; CRUZ JUNIOR, L. P. DA S.; SILVA, F.G.; BRAGA, E. DE M. “**Desenvolvimento e Estudo da Viabilidade de um Injetor de Arame Adicional para o Processo de Soldagem MIG/MAG E FCAW.**” - 6º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO. Caxias do Sul – RS, Brasil. 2011.

CAIMACAM, D. **Avaliação do Uso do Curto-Circuito Controlado (CCC) na Soldagem de Passes de Enchimento pelo Processo MIG/MAG Duplo Arame**. Dissertação de mestrado, universidade federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil. 2014.

CASTRO, I. B.. Comportamento ao Desgaste Microabrasivo de Ligas Ni-Ti. Dissertação de Mestrado -Universidade de Brasília. Faculdade UnB Gama. 2014.

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

COLAÇO, F. H. G. E MARANHO, O. **Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC+Ti**. Soldag. Insp. São Paulo, Vol. 19, nº01, p.058-068, Jan/Mar, 2014.

COLAÇO, F. H. G.. **Avaliação da Perda de Massa de Revestimento Duro Depositado por Soldagem com Arame Tubular de Liga FeCrC+Ti**. Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2013.

CORRÊA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMMAR, R. V. Avaliação de Resistência ao Desgaste de Ligas Fe-Cr-C-Nb-V Desenvolvidas para a Solda de Revestimento Duro para Uso Sob Condições Altamente Abrasivas. **8º Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica – CIBIM 8**, 23 a 25 de outubro, Cusco, Peru, 2007.

CORRÊA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMMAR, R. V. Desenvolvimento e uma Liga Ferrosa para a Solda de Revestimento Duro Reforçada com Carbonetos complexos; **IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. 22 a 25 de agosto. Recife-PE. 2006.

COSTA, E. C da. **Caraterização do Aço SAE 8630 Modificado e Amanteigado com Inconel 625 pelo Processo de Soldagem GMAW**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil. 2013.

COSTA, H.L., KLEIN, A.N. E DE MELLO, J.D.B. Evaluation of Abrasive Wear Resistance of Plasma-Nitrated Carbon Steel. **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**. Uberlândia-MG. 26 a 30 de novembro, 2001.

DA SILVA, W. M. **Desgaste Abrasivo: Simulação via Interações Múltiplas**. Universidade Federal de Uberlândia-MG, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, 163 p. 2007.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; MONTANARI, R.; ANDREOTTI, M. Inter-relação da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, v. 61, n. 2, p. 255-264, 2014.

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

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

FAGUNDES JÚNIOR, J. G.; ROCHA, R. P.; MORAES, M. DE; NASCIMENTO L. H.. **“Microestrutura e Resistência ao Desgaste de Revestimentos Duros Experimentais (Nb-Cr) Depositados por Soldagem GTAW”**. XXXIX CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem-Curitiba, PR, Brasil. 25 de Novembro de 2013.

FAN, C.; CHEN, M.; CHANG, C. e WU, W.; Microstructure change caused by (Cr,Fe)<sub>23</sub>C<sub>6</sub> carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys. **Surface and Coatings Technology**. Vol: 201. Issues: 3 - 4, p. 908-912, 2006.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). FAOSTATS. Disponível em: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx>>Acesso em: 23 jan. 2013.

FRATARI, R. Q.; SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; SCOTTI, A. **Otimização dos Parâmetros de Tecimento para Confecção de Amanteigamento em Chapas de Aço ao Carbono pelo Processo TIG com Arame AWS ER309L**. COBEF Abril/2009, Belo Horizonte – MG, Brasil. 2009.

GARCIA, D. B. C. **Aplicação de revestimento duro utilizando processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis.** Dissertação de mestrado, universidade federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil. 2011.

GENTIL, V.; Corrosão. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora: Rio de Janeiro, 2007.

GIMENES, L.J. FATEC - Manual de Tecnologia de Fabricação e Soldagem, Técnicas de Aplicação de Revestimento Duro por Soldagem, pp. 2-14. 2002.

GREGORY, E. N.; BARTLE, M; Materials for Hardfacing. Weld Surfacing and Hardfacing, **The Welding Institute**, Cambridge, UK, p.11-21, 1980.

GROETELAARS, P. J. “**Influência da Variação de Parâmetros de Soldagem sobre a Transferência Metálica e Perfil do Cordão no Processo MIG/MAG Duplo-Arame**”. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2005.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and wear of engineering material.** CRC Press Inc. Boca Raton. USA. 273 p. 1992.

IBARRA, A. L.; HERRERA, E. A.; GOMEZ, E. C.; BALTAZAR, E. L. **Influencia del Coeficiente de Diluición sobre la Dureza de la Capa Aportada em el Relleno Superficial.** In: 5AS JORNADAS DE INVESTIGACIÓN 2000-2001. Universidade Autónoma de Zacatecas, 25 a 29 de julho de 2001.

KANNAN, T.; MURUGAN, N. Effect of Flux Cored Arc Welding Process Parameters on Duplex Stainless Steel Clad Quality. **Materials Processing Technology.** No 176. 2006. p. 230-239.

KEJELIN, N. Z. Soldagem De Revestimento De Aços Comuns C-Mn Com Superliga A Base De Níquel Inconel 625. Tese de Doutorado. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, SC. 2012.

KONIG, R.G.; OLIVEIRA, C.A.S.; GILAPA, L. C. M<sup>a</sup>. **Estudo do efeito de revestimentos na resistência ao desgaste em matrizes de corte para a conformação a frio de elementos de fixação.** In: VIII CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECÂNICA. Cusco, Peru. 2007.

KOTECKI, D. J.; OGBORN J. S. Abrasion Resistance of Iron Based Hardfacing Alloy. **Welding Journal.** p. 269s – 278s. aug. 1995.

LAIRD G., GUNDLACH R., and RÖHRIG, K., Abrasion-resistant Cast Iron Handbook: American Foundry Society, 2000.

LEITE, R. V. de M.; MARQUES, P. V. Estudo Comparativo da Resistência ao Desgaste Abrasivo do Revestimento de Três Ligas Metálicas Utilizadas na Indústria, Aplicadas por Soldagem com Arames Tubulares. **Soldagem & Inspeção**, v 14, n<sup>o</sup>4, p 329-335, out/dez 2009.

LIMA, Aldemir C. **Estudo da aplicação de revestimento duro por soldagem com arames tubulares quanto à resistência ao desgaste de facas picadoras de cana-de-açúcar.** Tese de doutorado, universidade federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, Brasil.232 p.2008.

LIMA, L. I. L.; SILVA, G. M.; CHILQUE, A.R.A. **Caracterização Microestrutural de Soldas Dissimilares dos Aços ASTM A-508 E AISI 316L.** Inspeção de Soldagem, São Paulo, Vol. 15, nº 2. p. 112-120. Abr./Jun. 2010.

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

MARTÍNEZ, D. M. e PÉREZ, M. R. Evaluación tecnológica de um alambre tubular autoprotegido, confeccionado a partir de matérias primas cubanas. **V Convención y feria Internacionales METANICA.** Havana, Cuba. 17 al 21 julio, 2000.

MILLER, B. Frequently Asked Questions about Hardfacing, **The Fabricator**, 2005.

MODENESI, P. J. ; MARQUES, P. V.; SANTO, D. B. Introdução à metalurgia da soldagem. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG, Belo Horizonte, 2012.

MOTTA, M. F.; DUTRA, J. C.: **Efeitos das Variáveis do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potenciais Isolados nas Características Geométricas do Cordão de Solda.** Soldagem & Inspeção, Vol. 10, Nº. 01, Jan/Mar 2005.

MUNDO DA CANA. <http://www.mundodacana.com.br>. Acessado em 04 de janeiro de 2011.

NOGUEIRA, A. M. P. e VENTURINI FILHO, W. G. **Aguardente de Cana.** Universidade Estadual Paulista – UNESP. Campus de Botucatu. Apostila. 71p. 2005.

PALANI, P. K. e MURUGAN, N. Sensitivity analysis for process parameters in cladding of stainless steel by flux cored arc welding. Journal of Manufacturing Processes, v. 8, n. 2, p. 90-100, 2006.

POLIDO, R. S. e GALLEGGO, J. **Estudo da Microestrutura de Revestimento Duro Aplicado nos Equipamentos da Indústria Sucroalcooleira Sujeito ao Desgaste Abrasivo.** Disponível em: [http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publica/publicado\\_2006/saito\\_cicun\\_Esp\\_2006.pdf](http://www.dem.feis.unesp.br/maprotec/publica/publicado_2006/saito_cicun_Esp_2006.pdf). Acesso em: 08 agosto de 2010.

PONTES, M. K. G. **Estudo Da Compatibilidade Metalúrgica De Juntas Soldadas De Metais Dissimilares Utilizados No Setor De Petróleo E Gás.** UFCG: Campina Grande, 2012.

POSCH, G.; VALLANT, R.; KLAGGES, W.; CERJAK, H. Influence of Niobium on Mechanical Properties and Hot Crack Susceptibility of Nickel-base Cored-wire Metal Type 70/20 and 70/15. In: TANTALUM-NIOBIUM INTERNATIONAL STUDY CENTER GENERAL ASSEMBLY, 47, 2006, Áustria.

REIS, R.P.; COSTA, A.L.G.; SILVEIRA, F.M.; MOTA, P.R.; SOUZA, R.J.; SCOTTI, A. **Influência do Material de Base sobre o Rendimento de Fusão em Soldagem a Arco.** Soldagem & Inspeção, Vol. 16, No. 04, p. 369-376, Out/Dez. 2011.

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

SANTOS, A. S.; FRANCO, A. A.; ALMEIDA, D. M. e PERTICARRARI, M. Soldagem na Indústria Sucroalcooleira. **Revista da Soldagem.** Ano I, n. 7, p. 20-26, 2005.

SCANDELLA, F; SCANDELLA, R. Development of hardfacing material in Fe-Cr-Nb-C system for use under highly abrasive conditions. *Materials Science and Technology.* United kings, v. 20, p 93 – 104, January 2004.

SCHUITEK A.J. Estudo do Comportamento de Desgaste de Materiais Metálicos em Riscamento Circular. São Paulo, 2007.

SCOTTI, A. e ROSA, L. A. A. Influence of Oscillation Parameters on Crack Formation in Automatic Fe-B Hardfacing. **Journal of Materials Processing Technology.** p. 272-280, 1997.

SCOTTI, A., PONOMAREV, V.; Soldagem MIG/MAG, Livro, ArtLiber, 2008.

SHAKELFORD, J F. – **Introduction to Materials Science for Engereers**, 4 Edition, Printice Hall. New Jersey. 550p. 1996.

SHIKIDA, P. F. A.; PEROSA, B. B. Álcool combustível no Brasil e path dependence. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Piracicaba, v.50, n.2, p. 243-262, Abr./Jun., 2012.

SILVA, C.A. **Análise de propriedades mecânicas, tribológicas e metalográficas de material submetido ao processo de erosão/corrosão com sulfetação.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, 2009.

STOETERAU, R. L. **Tribologia**, Universidade Federal de Santa Catarina, apostila, 172 p. 2004.

UNICA. União da indústria de cana de açúcar, [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br). Acesso em 17 de dezembro de 2013.

VELOSO, A. F.; GOMES, A. C. A.; VIELA, P. S. Evolução e tendências do agronegócio da cana-de-açúcar em Minas Gerais. Minas Gerais: FAEMG, 2010.

VILLABÓN. L.R.; SINATORA, A. **Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda-de-borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços.** APAET - Mecânica Experimental, Vol 13, Pg 1-11. 2006.

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

WANG, X. H.; Zou, Z. D.; Qu, S. Y.; Song, S. I.; Microstructure and Wear Properties of Fe-Based Hardfacing Coating Reinforced BY TiC Particles. **Journal of Materials Processing Technology**. v.168, p. 89-94, 2005.

ZANCANER, M. G.; SANTOS T. B. de S.. **Cogeração: Ampliação da Oferta de Energia Elétrica com a Biomassa (Bagaço da Cana-de-Açúcar)**. Revista Diálogos Interdisciplinares, vol. 2, n°.2. Fundação Armando Alvares Penteado, São Paulo, SP, Brasil.2013.

ZHI, H; XING, J.; FU, H.; XIAO, B. Effect of niobium on the as-cast microstructure of hypereutectic high chromium cast iron. **Materials Letters**. N° 62. P 857-860, 2008.

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