

DAYANA BEATRIZ CARMONA GARCÍA

**APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO
UTILIZANDO O PROCESSO ARAME TUBULAR COM
E SEM ADIÇÃO DE ARAME NÃO ENERGIZADO
PARA DIFERENTES TIPOS DE CONSUMÍVEIS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2011

DAYANA BEATRIZ CARMONA GARCÍA

**APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO UTILIZANDO O
PROCESSO ARAME TUBULAR COM E SEM ADIÇÃO DE ARAME
NÃO ENERGIZADO 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 Antônio Ferraresi.

UBERLÂNDIA – MG, BRASIL

2011

A Deus.

*A minha avó por me amar e por fazer tudo o possível
para me tornar na profissional que sou hoje.*

*A o meu tio Elkin por me apoiar no caminho para
alcançar esta nova meta na minha vida*

*E a essas pessoas que me acompanharam neste novo
passo da minha vida, Lizeth e Hernán.*

AGRADECIMENTOS

Ao programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia pela oportunidade da realização deste curso e à FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Valtair A. Ferraresi pela orientação, paciência, ensinamentos, discussões e por a sua confiança. A ele, ao Prof. Louriel Oliveira Vilarinho e ao Prof. Americo Scotti por me inspirar e encaminhar nos processos de soldagem.

Ao Hernán Hernández, á Lizeth Vargas, ao Marcelo Lemos Rossi, ao Thonson Ferreira, ao Hélio Almeda e ao Tércio Cabral pelo seu apoio e ajuda incondicional, pelas suas orientações e respostas assertivas.

À Ângela Maria da Silva Andrade, técnica do Laboratório de Tribologia e Materiais por me orientar e ajudar no relacionado à área metalúrgica.

Ao Marcelo Lemos, ao José Enrique Vargas e ao Diandro por me orientar em quanto ao uso dos equipamentos do LAPROSOLDA.

CARMONA, G. D. **Aplicação de revestimento duro utilizando o processo arame tubular com e sem adição de arame não energizado para diferentes tipos de consumíveis**. 2011. 120 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

O cultivo de cana-de-açúcar é uma das maiores atividades agropecuárias do Brasil proporcionando um forte mercado de produção e exportação de etanol e açúcar. Um dos fatores que afetam os custos do processo da indústria sucroalcooleira é a manutenção dos equipamentos afetados por danos relacionados à perda de metal (massa) por mecanismos de desgaste. Para minimizar as perdas por desgastes são aplicados revestimentos por soldagem com diferentes processos e consumíveis, como a liga FeCrC com ou sem adição de elementos metálicos formadores de carbonetos. A composição química da liga e a técnica de aplicação podem contribuir para o surgimento de descontinuidades, tais como trincas e porosidades, que dependendo da aplicação, podem influenciar no aumento do desgaste. Com isto, o objetivo desta dissertação é estudar a técnica de aplicação e tipos de consumíveis de revestimento duro em chapas de aço carbono utilizando o processo de soldagem por Arame Tubular auto-protegido com e sem adição de arame não energizado, visando melhorias na resistência ao desgaste e diminuindo a ocorrência de trincas de solidificação. Foram utilizados dois arames tubulares auto-protegidos de 1,6 mm 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. O metal de base utilizado foi um aço SAE 1020. A resistência ao desgaste dos revestimentos foi determinada através do ensaio de Roda de Borracha de acordo com a norma ASTM G65-00. Os resultados obtidos mostram que a condição de consumível FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L apresentou a melhor resistência ao desgaste seguido pelas condições de consumível FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC e FeCrC+Nb. Os revestimentos sem adição de arame não energizado (FeCrC+Ti e FeCrC+Nb) apresentaram os menores valores de resistência ao desgaste. Com relação a ocorrência de descontinuidade a liga FeCrC+Ti apresentou resultados satisfatórios.

Palavras chave: *Revestimento duro, arame tubular, desgaste, soldagem FCAW.*

CARMONA, G. D. **Hardfacing application using the FCAW process with and without not-energized wire addition for different kind of consumables**. 2011. 120 f. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

The crop of sugar cane is a major agricultural activity in Brazil, providing a wide international market for ethanol and sugar. One of the factors affecting production costs is the maintenance of equipments affected by damage related to the mass loss of wear mechanisms. To minimize losses by wear mechanisms are used hardfacing deposits with different welding processes and consumables, such as the high chrome content (FeCrC) with and without addition of metal elements, formers of carbides. The alloying chemical composition and application technique can contribute to occurrence of discontinuities like cracks and porosity, which depending of the application may influence in the wear increase. Thus, the main objective of this work is to study the technique for hardfacing application on carbon steel plates, using the FCAW Self-shield welding process with and without addition of not-energized wires looking for improvements in wear resistance and reduce the appearance of discontinuities like cracks and porosities. Commercial self-shield hardfacing wires of FeCrC+Ti and FeCrC+Nb alloys with 1.6 mm of diameter were used like energized wire. In not-energized wire addition were used two commercial self-shield hardfacing wire of FeCrC and FeCrC+Nb alloy wires with 1.6 mm with the commercial self-shield hardfacing wired of FeCrC + Ti alloy like energized wire, and the ER308LSi wire with 1 mm in diameter with the commercial self-shield hardfacing wired of FeCrC + Nb like energized wire. The wear resistance of the hardfacing deposits was determinate using the dry sand rubber wheel test following the ASTM G65-00 code. the results showed that the consumable condition of FeCrC + Nb wire with addition of ER308LSi, presented high wearing resistance, followed by the consumable conditions of FeCrC + Ti with the addition of FeCrC and FeCrC + Nb. Hardfacing deposits without the addition of not-energized wire showed the lowest values of wear resistance. The hardfacing deposits made with the commercial self-shield hardfacing wire of FeCrC+Ti alloy showed satisfactory results in terms of occurrence of discontinuities.

Key words: *Harfacing, Flux Cored Arc Wleding, wear, welding, not-energized wire addition.*

CARMONA, G. D. **Aplicación de recubrimientos duros utilizando el proceso FCAW con y sin adición de alambre no energizado para diferentes tipos de consumibles**. 2011. 120 p. Tesis de Maestría, Universidad Federal de Uberlândia – MG, Brasil.

El cultivo de caña de azúcar es una de las mayores actividades agropecuarias de Brasil proporcionando un fuerte mercado de producción y exportación de etanol y azúcar. Uno de los factores que afectan los costos de producción es el mantenimiento de los equipos afectados por daños relacionados a la pérdida de masa por mecanismos de desgaste. Para minimizar las pérdidas por desgaste son aplicados recubrimientos soldados con diferentes procesos de soldadura e consumibles, como los de composición a base de FeCrC con o sin adición de elementos metálicos formadores de carburos. La composición química de la aleación y la técnica de aplicación puede contribuir al surgimiento de discontinuidades, como grietas y porosidades, que dependiendo de la aplicación, pueden influenciar en el aumento del desgaste. Con esto, el objetivo principal de este trabajo es estudiar la técnica de aplicación de recubrimientos duros en chapas de acero al carbón utilizando el proceso de soldadura FCAW-Self shield con y sin adición de alambre no energizado buscando mejorías en la resistencia al desgaste y disminuir la aparición de discontinuidades como grietas y poros. Se utilizaron como alambres energizados dos alambres tubulares auto-protegidos de aleación de FeCrC+Ti y FeCrC+Nb con 1,6 mm de diámetro. En la adición no energizada se usaron los alambres tubulares de aleación de FeCrC y FeCrC+Nb con 1,6 mm de diámetro, siendo el alambre de aleación de FeCrC+Ti el energizado, e el alambre macizo ER308LSi con 1 mm de diámetro, siendo el alambre tubular de aleación de FeCrC+Nb el energizado. Se utilizó acero SAE 1020 como metal de base. La resistencia al desgaste de los recubrimientos fue determinada a través del ensayo con abrasómetro de rueda de caucho siguiendo la norma ASTM G65-91. Los resultados obtenidos muestran que la condición de consumible FeCrC+Nb con adición de alambre no energizado de ER308LSi presentó elevada resistencia al desgaste seguida por las condiciones de consumible FeCrC+Ti con adición de FeCrC y FeCrC+Nb. Los revestimientos sin adición de alambre no energizado presentaron los menores valores de resistencia al desgaste. Con relación a la presencia de discontinuidades los recubrimientos hechos con el alambre tubular de aleación de FeCrC+Ti fueron los que presentaron resultados satisfactorios.

Palabras clave: *Recubrimientos duros, alambre tubular, desgaste, soldadura.*

LISTA DE FIGURAS

No. de Figura	Descrição da figura	Página
Figura 2.1 –	Distribuição do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil (UNICA, 2011).	6
Figura 2.2 –	Esquema dos equipamentos utilizados no processo do preparo do caldo de cana-de-açúcar (MUNDO DA CANA, 2011).	7
Figura 2.3 –	a) Vista interna do picador de cana-de-açúcar e b) Exemplo de faca picadora desgastada após trabalho em campo (LIMA, 2008).	7
Figura 2.4 –	Esquema de classificação do desgaste (BUDINSKI, 1988).	9
Figura 2.5 –	Situações do desgaste abrasivo (BAYER, 2004).	11
Figura 2.6 –	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).	12
Figura 2.7 –	Ilustração esquemática dos principais micro-mecanismos de desgaste abrasivo: a) e b) microsulcamento, c) microcorte e d) microtrincamento (ZUM GAHR, 1998).	13
Figura 2.8 –	Ilustração esquemática do funcionamento do Abrasômetro de Roda de Borracha	15
Figura 2.9 –	Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas pela aplicação de revestimento duro. (RIBEIRO, 2004)	17
Figura 2.10 –	Facas desgastadas, com detalhe do canto de maior desgaste: arame FeCrC, FeCrC+Nb, FeCrC+Ti e eletrodo revestido ER1 (LIMA e FERRARESI, 2008).	22
Figura 2.11 –	Histograma ilustrando o desgaste das facas por consumíveis realizados em campo. (LIMA e FERRARESI, 2010)	22
Figura 2.12 –	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; DE MELLO, 1995).	25
Figura 2.13 –	Microestrutura da liga FeCrC (LIMA, 2008).	26

Figura 2.14 – Microestrutura da liga FeCrC+Nb (LIMA, 2008).	26
Figura 2.15 – Microestrutura da liga FeCrC+Ti (LIMA, 2008).	27
Figura 2.16 – Microestrutura do revestimento obtido com o eletrodo revestido ER1 (LIMA, 2008).	28
Figura 2.17 – Análise comparativa de resistência ao desgaste por consumível em roda de borra (LIMA, 2008).	28
Figura 2.18 – Desenho esquemático do processo Arame Tubular: a) auto-protegido e b) com proteção gasosa externa (AWS, 1997).	30
Figura 2.19 – Representação esquemática do injetor de arame não energizado acoplado a tocha MIG/MAG. (CRUZ JÚNIOR; FERRARESI; BRAGA, 2009).	32
Figura 2.20 – Disposição dos arames na adição de arame não energizado, a) “Twin wire” ou transversal, b) “Tandem wire” ou longitudinal (SABIO, 2006).	33
Figura 3.1 – Dimensões das chapas de teste. a) para os testes preliminares e b) para a confecção dos revestimentos – Espessura 12,7 mm nos dois casos.	35
Figura 3.2 – Bancada de soldagem LAPROSOLDA.	38
Figura 3.3 – Esquema de montagem para calibração da mesa de soldagem.	39
Figura 3.4 – Curva de calibração da mesa de soldagem.	40
Figura 3.5 – Abrasômetro Roda de Borracha utilizado para a realização dos ensaios de desgaste.	41
Figura 3.6 – Durômetro METROLTEC.	43
Figura 3.7 – Microscópio e Microdurômetro SHIMADZU.	43
Figura 3.8 – Cortadora Metalográfica TECLAGO Ref. CM 70.	44
Figura 3.9 – Polidora Metalográfica Struers Ref. Dap-7.	44
Figura 3.10 – Suporte acoplado ao Bocal da tocha de soldagem utilizado na adição de arame não energizado na disposição “Tandem wire”.	45
Figura 3.11 – Esquema do sistema de deslocamento e tecimento da tocha de soldagem. *A distância tomada com DBCP igual a 30 mm.	46
Figura 3.12 – Extração dos corpos de prova para o ensaio de desgaste.	47
Figura 3.13 – Preparação para análise macrográfica e ilustração dos parâmetros geométricos, a) nos testes preliminares b) Revestimento.	48
Figura 4.1 – Seqüência de imagens da transferência por curto-circuito guiado pelo fluxo com intervalo de 5 ms entre quadros (LIMA, 2008).	53

Figura 4.2 – Aparência dos cordões de solda com três velocidades de soldagem diferentes, 7: 400 mm/min, 10: 300 mm/min, 11: 200 mm/min.	54
Figura 4.3 – Parâmetros dimensionais dos cordões L: largura, R: reforço, P: penetração, A _f : Área fundida, A _r : Área de Reforço.	55
Figura 4.4 – Esquema de tecimento da tocha de soldagem.	56
Figura 4.5 – Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem do, a) arame de liga FeCrC+Ti e b) arame de liga FeCrC+Nb.	57
Figura 4.6 – Aspecto visual dos cordões de solda dos arames de FeCrC+Nb e FeCrC+Ti antes e após o ensaio por líquidos penetrantes.	58
Figura 4.7 – a) Disposição dos cordões de solda para a avaliação por inspeção visual e líquidos penetrantes, b) Exemplo de um dos cordões de solda examinado por líquidos penetrantes.	61
Figura 5.1 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti.	64
Figura 5.2 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC.	64
Figura 5.3 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb.	65
Figura 5.4 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Nb.	65
Figura 5.5 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L.	65
Figura 5.6 – Seção transversal dos revestimentos. a) FeCrC+Ti, b) e c) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC e de FeCrC+Nb respectivamente, d) FeCrC+Nb e e) FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L.	68
Figura 5.7 – Valores médios da Penetração e Reforço dos revestimentos com os seus respectivos desvio padrão.	69
Figura 5.8 – Largura total dos revestimentos com os três cordões de solda.	70
Figura 5.9 – Área Fundida e Área de Reforço dos revestimentos feitos com cada condição de consumível.	70
Figura 5.10 – Corpos de Prova após ensaio com Líquidos Penetrantes: a) Condição de consumível 1 (FeCrC+Ti), b) Condição de consumível 2 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC) e c) Condição de consumível 3 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de	71

FeCrC+Nb).

Figura 5.11 – Corpos de Prova após ensaio com Líquidos Penetrantes: a) Condição de consumível 4 (FeCrC+Nb) e b) Condição de consumível 5 (FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L).	71
Figura 5.12 – Diluição média e desvio padrão dos revestimentos aplicados.	75
Figura 5.13 – Desgaste (perda de massa) para cada condição de consumível utilizado.	78
Figura 5.14 – Análise comparativa de resistência ao desgaste dos revestimentos.	79
Figura 5.15 – Imagens de uma amostra de cada revestimento feitas após o ensaio de desgaste com abrasômetro de Roda de Borracha. a) FeCrC+Ti, b) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC, c) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb, d) FeCrC+Nb e e) FeCrC+Nb com adição de ER308L.	81
Figura 5.16 – Imagens da trilha de desgaste de amostras que apresentam: a) Condição de consumível 1 (FeCrC+Ti), b) Condição de Consumível 2 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC), c) Condição de Consumível 3 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb).	82
Figura 5.17 – Imagens da trilha de desgaste de amostras que apresentam: a) Condição de consumível 4 (FeCrC+Nb), b) Condição de Consumível 5 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de ER308L).	82
Figura 5.18 – Dureza dos Revestimentos.	84
Figura 5.19 – Extração das amostras para avaliação microestrutural.	85
Figura 5.20 – Microestrutura do revestimento da liga FeCrC+Ti. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s.	86
Figura 5.21 – Microestrutura dos revestimentos da liga FeCrC+Nb. a) Ataque com Kalling por 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s.	87
Figura 5.22 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 60° por 10 s.	87
Figura 5.23 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 50° por 10 s.	88
Figura 5.24 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Nb com adição de	89

arame não energizado de ER308L. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 60° por 10 s.

LISTA DE TABELAS

No. de Tabela	Descrição da Tabela	Página
Tabela 2.1 –	Dados dos consumíveis (arames tubulares e eletrodo revestido) (LIMA, 2008).	25
Tabela 3.1 –	Composição química dos arames tubulares auto-protegidos fornecida pelo fabricante.	36
Tabela 3.2 –	Composição química dos arames de adição não energizados.	37
Tabela 4.1 –	Parâmetros para a soldagem das chapas de testes e confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste. $k_s = 20$ e $k_d = 5$ sem oscilação da tocha de soldagem (obtida de Lima (2008)).	52
Tabela 4.2 –	Parâmetros de soldagem utilizados nos testes preliminares com FeCrC+Nb.	53
Tabela 4.3 –	Parâmetros geométricos do cordão de solda para as três condições escolhidas, conforme Tabela 4.2.	54
Tabela 4.4 –	Parâmetros de soldagem utilizados nos testes preliminares com o arame tubular de FeCrC+Ti.	55
Tabela 4.5 –	Parâmetros de soldagem encontrados para cada arame tubular a serem usados nos testes do laboratório como arame anergizado.	57
Tabela 4.6 –	Características Geométricas dos cordões de solda dos arames de FeCrC+Ti e FeCrC+Nb.	59
Tabela 4.7 –	Consumíveis e Parâmetros de soldagem dos testes com adição de arame não energizado. $V_{sold} = 200$ mm/min, $V_{alim} = 8$ mm/min, $A_m = 3^\circ$, $f = 1,6$ Hz	60
Tabela 4.8 –	Quantidade de trincas registradas nos cordões de solda com cada combinação arame tubular com adição de arame não energizado.	61
Tabela 4.9 –	Resultados dos ensaios de desgaste nas amostras de aço 1020.	62
Tabela 5.1 –	Parâmetros de soldagem das chapas de testes para a confecção	64

	dos corpos de prova para ensaio de desgaste.	
Tabela 5.2 –	Características geométricas dos revestimentos.	67
Tabela 5.3 –	Valores de Diluição dos corpos de prova revestidos com as cinco condições de consumíveis.	74
Tabela 5.4. –	Dados de massa e desgaste por condição de consumível.	77
Tabela 5.5 –	Significância Estadística “p” da resistência ao desgaste dos revestimentos.	80
Tabela 5.6 –	Dureza dos Revestimentos.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A_m: Amplitude

ANE: Arame Não Energizado

A_f: Área Fundida

A_r: Área de Reforço

ASTM: American Society for Testing Materials

AWS: American Welding Society

CA: Corrente Alternada

C_d: Constante de Deposição

CP: Corpo(s) de Prova

D: Densidade do Material [g/cm³]

DBCP: Distância Bico-Contato-Peça

D_{ensayo}: Distancia Percorrida Durante o Ensaio

Desg_m: Desgaste médio por Condição de Consumível

Dil: Diluição

dil_{final}: Diluição na Seção Transversal Correspondente à Parte Final do Corpo de Prova

dil_{inicial}: Diluição na Seção Transversal Correspondente à Parte Inicial do Corpo de Prova

DP: Desvio Padrão

D_{pad}: Diâmetro do Disco Padrão (228,6mm)

D_{uso}: Diâmetro do Disco em Uso [mm]

ER: Eletrodo Revestido

f: Frequência

FeCrC: Arame de Liga Ferro-Cromo-Carbono

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

I_m: Corrente Média

k_s : Indutância de Subida

k_d : Indutância de Descida

LP: Líquidos Penetrantes

MIG/MAG: Metal Inert Gas/Metal Active Gas

MC: Carbonetos Onde M Representa um ou Mais Tipos de Átomos Metálicos

NbC: Monocarboneto de Nióbio

OFW: Oxyfuel Gas Welding

P: Passo da Solda (Referente à Soldagem)

p: Significância Estatística em Teste de Hipótese

P_{massa} : Perda de Massa [g]

P_{va} : Perda de Volume Ajustado

PVct: Porcentagem Volumétrica de Carbonetos Totais

P_{vol} : Perda de Volume [mm³]

$R_{desgate}$: Resistência ao Desgaste

R_{desg_m} : Resistência ao Desgaste Média por Condição de Consumível

SAW: Submerged Arc Welding

SMAW: Shielded Metal Arc Welding

T_{desg_m} : Taxa de Desgaste Médio por Condição de Consumível

Ti: Titânio

TiC: Monocarboneto de Titânio

U_m : Tensão Média

U_r : Tensão de Referência

V_{alim} : Velocidade de Alimentação

V_{alim}^2 : Velocidade de Alimentação do Arame não Energizado

V_{sold} : Velocidade de Soldagem

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	– INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II	– REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Equipamentos na indústria sucroalcooleira.....	5
2.2	Desgaste.....	8
2.2.1.	<i>Tipos de desgaste.....</i>	<i>8</i>
2.2.1.1.	<i>Desgaste Abrasivo.....</i>	<i>10</i>
2.2.1.1.1.	<i>Classificação do desgaste abrasivo.....</i>	<i>10</i>
2.2.1.1.2.	<i>Mecanismos de desgaste abrasivo.....</i>	<i>12</i>
2.2.2.	<i>Avaliação de desgaste.....</i>	<i>13</i>
2.3.	Aplicação de revestimentos por soldagem.....	15
2.3.1.	<i>Revestimento Duro.....</i>	<i>16</i>
2.4.	Microestrutura e resistência ao desgaste.....	23
2.5.	Soldagem a Arco Elétrico com Arames Tubulares.....	29
2.5.1.	<i>Classificação do processo.....</i>	<i>29</i>
2.6.	Adição de arame frio.....	31
2.6.1.	<i>Disposição dos arames.....</i>	<i>32</i>
2.6.2.	<i>Características do processo.....</i>	<i>33</i>
CAPITULO III	– MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1.	Materiais.....	35
3.1.1.	<i>Metal Base.....</i>	<i>35</i>
3.2.	Consumíveis.....	36
3.2.1.	<i>Arame tubular.....</i>	<i>36</i>
3.2.2.	<i>Arame de adição não energizado.....</i>	<i>37</i>
3.3.	Equipamentos.....	37
3.3.1.	<i>Bancada de soldagem.....</i>	<i>37</i>
3.3.1.1.	<i>Fonte de soldagem.....</i>	<i>37</i>
3.3.1.2.	<i>Alimentador de arame-eletrodo.....</i>	<i>38</i>
3.3.1.3.	<i>Tocha.....</i>	<i>38</i>

3.3.1.4.	<i>Alimentador de arame-eletrodo não energizado.....</i>	39
3.3.1.5.	<i>Mesa de soldagem.....</i>	39
3.3.1.6.	<i>Sistema de aquisição de dados.....</i>	40
3.3.2.	<i>Equipamento para Ensaio de Roda de Borracha.....</i>	40
3.3.3.	<i>Ensaio por Líquido Penetrante.....</i>	42
3.3.3.1.	<i>Procedimento para a inspeção por Líquidos Penetrantes.....</i>	42
3.3.4.	<i>Durômetro.....</i>	42
3.3.5.	<i>Microscópio e Microdurômetro.....</i>	43
3.3.6.	<i>Cortadora Metalográfica.....</i>	44
3.3.7.	<i>Equipamento de Polimento.....</i>	44
3.3.8.	<i>Retificadora.....</i>	45
3.4.	Metodologia.....	45
3.4.1.	<i>Processo de soldagem.....</i>	45
3.4.2.	<i>Construção dos corpos de prova para o ensaio de desgaste.....</i>	46
3.4.3.	<i>Avaliação dos Parâmetros de Desempenho.....</i>	47
3.4.3.1.	<i>Parâmetros geométricos do cordão de solda e do revestimento.....</i>	47
3.4.3.2.	<i>Diluição.....</i>	48
3.4.3.3.	<i>Resistência ao Desgaste.....</i>	48
3.4.3.4.	<i>Avaliação Microestrutural.....</i>	49
3.5.	<i>Procedimento Experimental</i>	49
CAPÍTULO IV - TESTES PRELIMINARES.....		50
4.1.	Parâmetros de Soldagem.....	50
4.2.	Adição de arame não energizado.....	59
4.3.	Ensaio de desgaste preliminares.....	61
CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DE DESGASTE NO LABORATÓRIO.....		63
5.1.	Soldagem dos corpos de prova e preparação das chapas de teste.....	63
5.2.	Avaliação da diluição.....	73
5.3.	Avaliação do desgaste.....	76
5.3.1.	<i>Análise das amostras após ensaio de Desgaste.....</i>	80
5.3.2.	<i>Análise da dureza do revestimento.....</i>	83
5.4.	Microestruturas dos revestimentos.....	85
CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES.....		90
6.1.	Quanto á técnica de soldagem.....	90

6.2.	Quanto a características geométricas dos revestimentos.....	90
6.3.	Quanto á diluição dos revestimentos.....	90
6.4.	Quanto a Resistência ao Desgaste.....	91
	CAPITULO VII – TRABALHOS FUTUROS.....	92
	CAPÍTULO VIII– REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

CAPITULO I

INTRODUÇÃO

O cultivo de cana-de-açúcar é uma das maiores atividades agropecuárias do Brasil, ocupando cerca de 7 milhões de hectares ou cerca de 2% das terras cultiváveis do país. A alta produtividade de cana-de-açúcar proporciona ao Brasil um forte mercado de produção e exportação de etanol e açúcar, o que faz do mesmo o maior produtor mundial de açúcar, seguido por Índia, Tailândia e Austrália, e o segundo maior produtor de etanol do mundo superado só pelos Estados Unidos (UNICA, 2010).

As etapas da colheita, do transporte e do preparo da cana-de-açúcar representam, dentro do processamento, entre 30 e 50 % dos custos da produção. Nestas etapas, como a do preparo para a moagem, encontra-se diversos fatores que afetam os custos de produção. Um desses fatores é a manutenção dos equipamentos utilizados na extração e processamento da cana-de-açúcar (tais como a mesa alimentadora, os roletes, os mancais, o picador, o desfibrador e as moendas) por danos nos componentes relacionados à perda de material por mecanismos de desgaste. As facas picadoras e os martelos desfibradores precisam ser substituídos, sendo os maiores responsáveis pelas paradas para manutenção (CONDE, 1986).

Para a recuperação dos componentes afetados pela perda de metal (desgaste) durante o ciclo de produção é realizada a aplicação de revestimentos duros por soldagem utilizando-se vários consumíveis, técnicas e processos. A correta seleção destes parâmetros oferece à indústria a transformação de elementos descartáveis em bens de capital recuperável, além de melhoras na eficiência dos equipamentos e no tempo de serviço, diminuição nos custos de produção e redução das paradas para manutenção (LIMA, 2008).

A aplicação de revestimentos duros, além de ser usada para a recuperação dos componentes, é realizada para melhorar a resistência ao desgaste das facas picadoras e dos martelos desfibradores construídos em aço ao carbono. Para a aplicação são usados diferentes processos de soldagem, entre eles o Eletrodo Revestido que é de baixo custo e versatilidade na aplicação da solda, Arco Submerso de custo moderado semi-automático, mas limitado

2 – Introdução

quanto à posição na soldagem e Arame tubular que oferece alta produtividade, versatilidade, custo moderado e alta qualidade na solda, tornando-se favorito na indústria da aplicação de revestimentos (BUCHELY *et al.*, 2005).

Uma técnica que vem ganhando espaço dentro da área de aplicação dos revestimentos de forma geral é a soldagem MIG/MAG com adição de arame não energizado. Segundo Cruz Júnior; Ferraresi; Braga (2009), este processo oferece nos cordões de solda dos revestimentos um excelente aspecto visual e uma convexidade considerada boa além de aumentar a produtividade do mesmo. O processo utiliza o equipamento convencional do processo MIG/MAG além de um segundo alimentador de arame que adiciona o arame não energizado à poça de fusão com ajuda de um suporte ligado à tocha de soldagem. A energia calorífica gerada pelo arco voltaico do arame energizado é utilizada também para fundir o arame não energizado (DA SILVA, 2010).

Quanto à composição química dos consumíveis têm-se realizado diversos trabalhos com o objetivo de avaliar a resistência ao desgaste de diferentes ligas ferro com alto teor de cromo (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. Fiore; Kosel; Fulcher (1983) afirmam que dependendo da composição desta liga e do tratamento térmico recebido podem se apresentar distintos tipos de carbonetos, como MC, M_6C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$ e Cr_2C_3 , onde M representa um ou mais tipos de átomos metálicos.

Alguns autores como Berns e Fisher (1987), Scandella e Scandella (2004), Buchelly *et al* (2005), Corrêa *et al* (2007) e Lima (2008) comparam a resistência ao desgaste de revestimentos realizados com estas 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), estudando a aplicação de revestimento duro em facas picadoras de cana-de-açúcar, verificou que 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 um maior desgaste do que os revestimentos com menor nível de trincas antes de sua utilização. Este fato ocorreu em função do tipo de equipamento

que é utilizado para prender as facas picadoras de cana-de-açúcar, onde ocorre, além do desgaste abrasivo, choque entre a faca e a estrutura do equipamento, fazendo com que ocorra a propagação das trincas por fadiga previamente formadas na soldagem, retirando lascas de revestimento das facas. Com isso, foi possível concluir que a menor quantidade de trincas formadas durante a soldagem apresentou um menor nível de desgaste.

Desta forma, o objetivo principal desta dissertação é estudar a técnica de aplicação de revestimento duro em chapas de aço carbono utilizando o processo de soldagem por Arame Tubular com adição de arame não energizado, visando melhorias na resistência ao desgaste e diminuindo a ocorrência de trincas de solidificação. Com isso, será avaliada a técnica de soldagem (parâmetros de soldagem) de revestimento utilizando o processo de Arame Tubular com adição de arame não energizado, além de determinar a resistência ao desgaste (ensaio de Roda de Borracha) variando a composição química do arame não energizado e seus efeitos sobre a quantidade de trinca no revestimento e finalmente analisar a microestrutura formada com a adição de arame não energizado e a sua possível influência na resistência ao desgaste.

A seguir é apresentada a estrutura do presente trabalho dividido em oito (8) capítulos:

Capítulo II – Revisão bibliográfica: Onde serão apresentadas informações básicas sobre o setor sucroalcooleiro, os equipamentos e ferramentas utilizadas e o desgaste abrasivo apresentado nas mesmas. Será apresentada uma fundamentação teórica alusiva ao desgaste abrasivo seus mecanismos e o ensaio de roda de borracha como método de avaliação de desgaste no laboratório. Além disso, se encontrará uma breve recopilção do estado da arte nos processos de aplicação de revestimentos duros com foco no processo de arame tubular e em uma nova técnica com adição de arame não energizado, os consumíveis utilizados e suas propriedades.

Capítulo III – Materiais e Métodos: Aqui serão descritos, os equipamentos, os materiais, os consumíveis e a metodologia utilizada no processo de soldagem, na preparação dos corpos de prova e na avaliação do desempenho das amostras.

Capítulo IV – Testes Preliminares: Neste capítulo serão apresentados os trabalhos preliminares realizados para o direcionamento da dissertação de mestrado.

Capítulo V – Avaliação de Desgaste no Laboratório: Neste serão apresentados os resultados referentes às características geométricas, avaliação de desgaste, desempenho e microestrutura de cada revestimento.

Capítulo VI – Conclusões: Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões obtidas após o desenvolvimento da pesquisa.

4 – *Introdução*

Capítulo VII – Trabalhos futuros: O serão apresentadas sugestões para estudos posteriores referentes a questões não aprofundadas neste trabalho.

Capítulo VIII – Referências Bibliográficas

CAPITULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas informações básicas sobre o setor sucroalcooleiro e referentes ao desgaste nos equipamentos e ferramentas utilizados nesta indústria, além de apresentar fundamentação teórica referente ao desgaste, com foco no desgaste abrasivo seus mecanismos e métodos de avaliação no laboratório. Em seguida, se faz uma recopilção do estado da arte nos processos de aplicação de revestimentos duros, os consumíveis utilizados suas propriedades (diluição, dureza e microestrutura). Finalmente se faz uma descrição do processo de soldagem com Arame Tubular na aplicação de revestimentos e do processo de adição de arame não energizado na soldagem a arco.

2.1. Equipamentos na indústria sucroalcooleira.

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar ocupando nesta atividade agroeconômica cerca de 2% da sua terra arável, Fig. 2.1. Esta grande expansão do setor sucroalcooleiro se deve ao aumento das exportações de açúcar e etanol, às novas tecnologias Eco-Ambientais no setor automobilístico tais como o desenvolvimento de veículos bi-combustível, a adição de etanol na gasolina e à substituição gradual do diesel pelo biodiesel que requer no processo químico a adição de etanol na proporção de 15%. Com isso, o setor sucroalcooleiro cresceu de forma acentuada, gerando a necessidade de conhecimentos aprofundados de todo o seu processo produtivo, tendo sempre com o objetivo de um aumento na produtividade e qualidade de seus produtos (açúcar e etanol) UNICA (2010).

O processo para a obtenção do caldo da cana-de-açúcar, matéria prima para a fabricação de açúcar e etanol, está dividido nas seguintes etapas (EMBRAPA – CANA-DE-AÇÚCAR, 2011 e UNICA, 2010):

6 – Revisão Bibliográfica

- Transporte, pesagem, descarregamento e estocagem;
- Extração do caldo, alimentação e lavagem de cana;
- Preparo da cana;
- Alimentação da moenda;
- Moagem;
- Embebição;
- Difusão;
- Geração de energia e
- Tratamento primário do caldo.

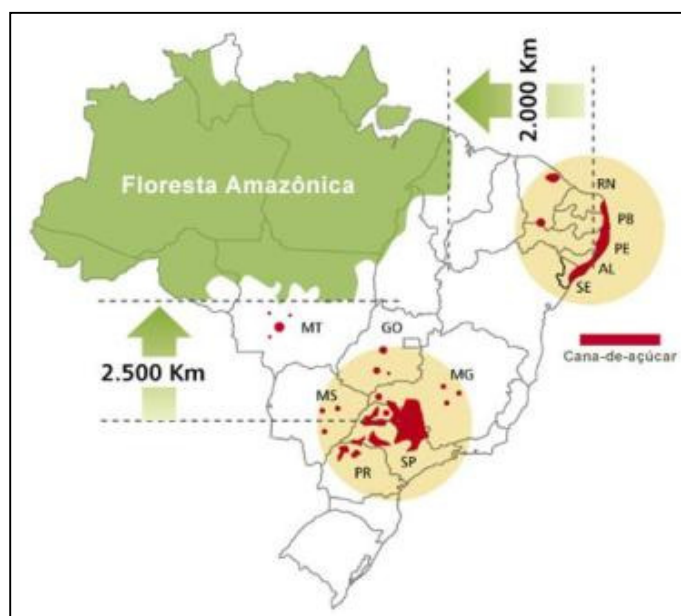


Figura 2.1 – Distribuição do cultivo de cana-de-açúcar no Brasil (UNICA,2011).

A Fig. 2.2 mostra de forma esquemática os processos de recepção, limpeza, preparo, alimentação da moenda, moagem e embebição. A etapa do preparo da cana tem como objetivo aumentar a densidade da cana e a capacidade de moagem facilitando a passagem da mesma pelas moendas. O processo consiste na desintegração da cana-de-açúcar visando romper o maior número de células para liberação do caldo nelas contido além de reacomodar o produto resultante favorecendo o passo à seguinte etapa. A quantidade de caldo extraído é função direta da capacidade desse preparo. (NOGUEIRA; FILHO, 2005 e MUNDO DA CANA, 2011).

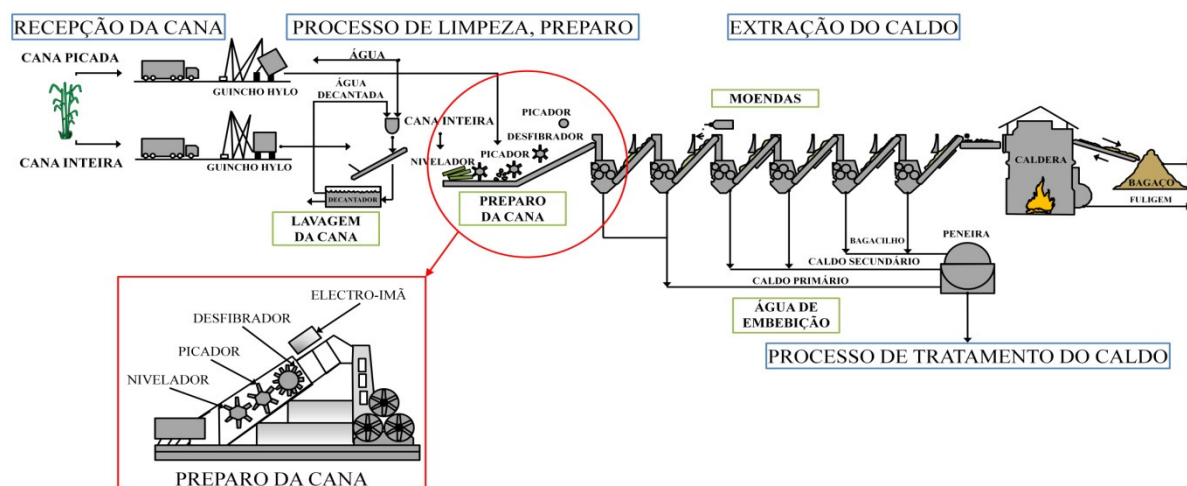


Figura 2.2 – Esquema dos equipamentos utilizados no processo do preparo do caldo de cana-de-açúcar (MUNDO DA CANA, 2011).

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. 2.3, 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 seria uma relação entre o açúcar das células que foram rompidas pelo desfibrador e o açúcar da cana (EMBRAPA – CANA-DE-AÇÚCAR, 2011 E MUNDO DA CANA, 2011).

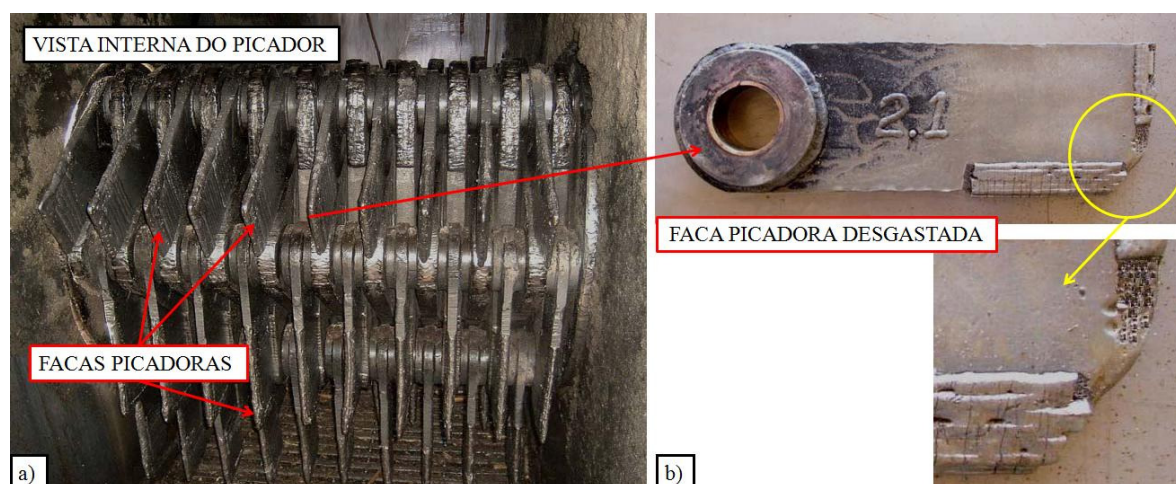


Figura 2.3 – a) Vista interna do picador de cana-de-açúcar e b) Exemplo de faca picadora desgastada após trabalho em campo (LIMA, 2008).

Estes equipamentos – nivelador, picador e desfibrador, Fig. 2.2 – junto com a mesa alimentadora, os roletes, a volandeira e os mancais são considerados críticos em uma usina sucroalcooleira por apresentar desgaste abrasivo. As moendas, também consideradas críticas, apresentam uma mistura entre o desgaste mecânico e o corrosivo, devido à acidez do caldo. E equipamentos tais como a coluna refrigeradora, a coluna de sulfitação, o evaporador, a cozedora, o aquecedor e as tubulações são considerados críticos por apresentar desgaste corrosivo, que é agravado pela erosão provocada por sólidos em suspensão. Em geral, existem muitos parâmetros que contribuem para o desgaste das peças, como o tipo de solo, tipo de colheita, eficiência de lavagem, qualidade da matéria prima, dentre outros (PRISCO, 1993; SANTOS *et al*, 2005).

Devido ao atrito com a casca da cana e com outros elementos estranhos ao processo, como pedaços de ferro, madeira, pedras, areia e outros, aliado à 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). Em função disso, as facas e martelos construídos em aço baixo carbono devem receber uma camada de revestimento duro para prover resistência ao desgaste abrasivo (ESPINOSA, 2004; SANTOS *et al*, 2005).

2.2. Desgaste

A ASTM (1992) define o desgaste como “a deterioração ou dano de uma superfície sólida, geralmente com perda de material, devido ao movimento relativo desta superfície em contato com outra ou com outras substâncias”. Para Bayer (2004), o desgaste é um progressivo dano a uma superfície, causado pelo relativo movimento desta com respeito à outra substância, apresentando ou não perda de material. Outras definições citadas por Dias; Gomes (2003) e Davis (2001) incluem no fenômeno de desgaste o deslocamento de material causado pela presença de partículas sólidas duras em uma ou em duas superfícies que entram em contato em movimento relativo.

2.2.1. Tipos de desgaste.

Para Bayer (2004) há três formas de classificação de desgaste. A primeira delas é em termos da aparência do desgaste, por exemplo, lascamento, polimento, rachadura, etc., a segunda em termos do mecanismo físico que remove o material, por exemplo, adesão,

abrasão, oxidação, etc., e a terceira é em termos das condições que ocorrem, por exemplo, desgaste sob lubrificação, desgaste sem lubrificação, desgaste por deslizamento metal a metal, desgaste por laminação, desgaste metálico a altas temperaturas, etc. Davis (2001) concorda com esta classificação, mas afirma que a abordagem nesta e outras classificações é complicada já que mais de um mecanismo de desgaste pode estar operando ao mesmo tempo e estão-se desenvolvendo baseados somente nas diferentes experiências que tem os autores com o desgaste. Embora nenhuma destas classificações seja universalmente aceita, a maioria apresenta características bastante semelhantes.

Budinski (1988) faz uma classificação do desgaste segundo o tipo de mecanismo, em quatro categorias: abrasão, erosão, adesão ou deslizamento e por fadiga na superfície. A Fig. 2.4 apresenta o esquema de classificação do desgaste.

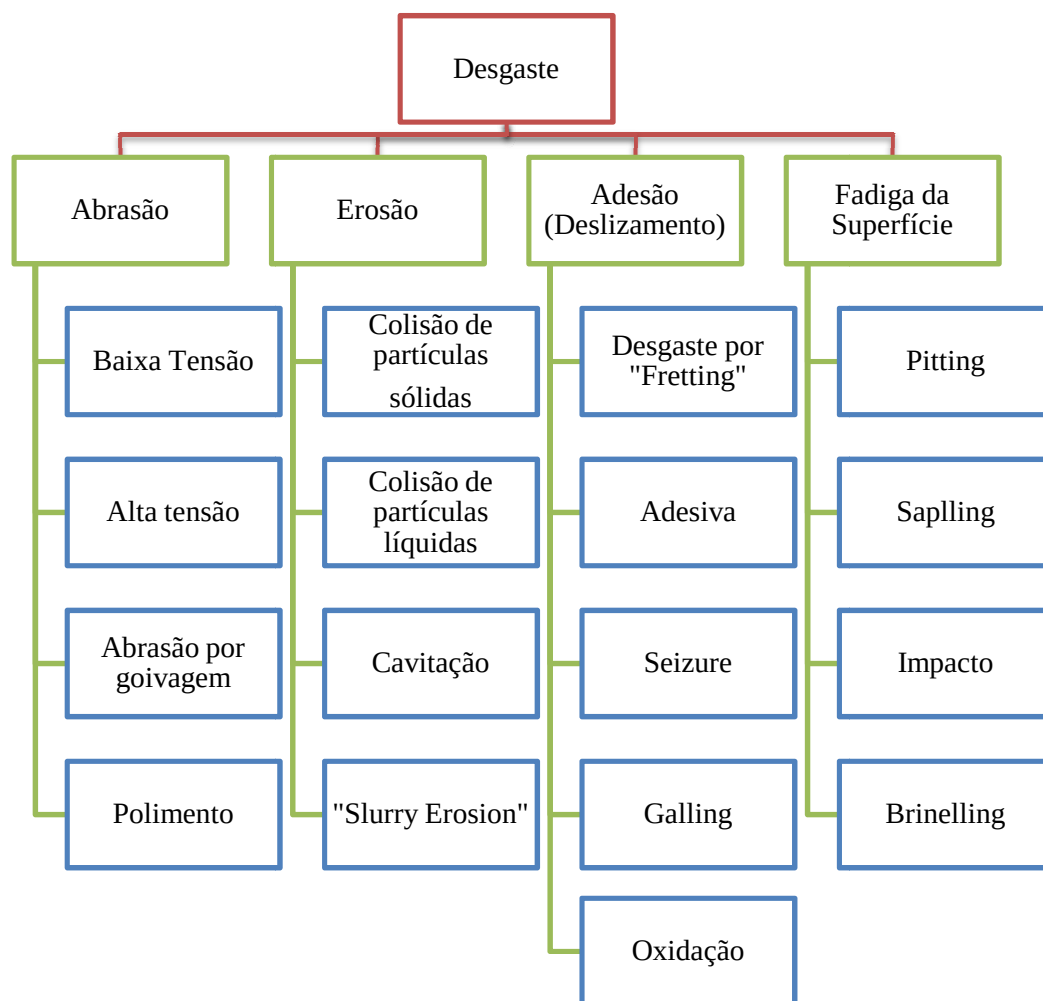


Figura 2.4 – Esquema de classificação do desgaste (BUDINSKI, 1988).

Estes tipos de desgaste podem-se apresentar em processos e ambientes industriais na

seguinte porcentagem de ocorrência (EYRE, 1991):

- Abrasão (50%),
- Adesão (15%),
- Erosão (8%),
- Fricção (8%) e
- Corrosão (5%).

Compreende-se, também, que a resistência à solicitação de desgaste não é propriedade intrínseca de um material, mas sim, característica do sistema ou do equipamento ao qual o componente está ligado mecanicamente e do seu meio operacional (EYRE, 1991).

Nos componentes dos equipamentos do setor sucroalcooleiro, em especial nos de preparo da cana, predomina a ocorrência de desgaste abrasivo, que é de maior interesse deste trabalho. Desta forma, somente esta modalidade de desgaste será apresentada. Informações sobre os outros tipos de desgastes podem ser encontrado nos livros de Davis (2001) e de Bayer (2004).

2.2.1.1. Desgaste Abrasivo.

A norma ASTM G40-09 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. Este tipo de desgaste é frequentemente causado por partículas não metálicas, embora existam algumas metálicas com a capacidade de causar abrasão.

O custo que o desgaste abrasivo representa no 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.

2.2.1.1.1. 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 corpos e abrasão a três corpos, como ilustrado na Fig. 2.5. A abrasão a dois corpos acontece quando o desgaste é causado pelas protuberâncias ou pelas partículas que estão coladas a uma das superfícies, por exemplo, retificado e polimento, a três corpos é quando as partículas não estão unidas, mas estão entre as duas superfícies.

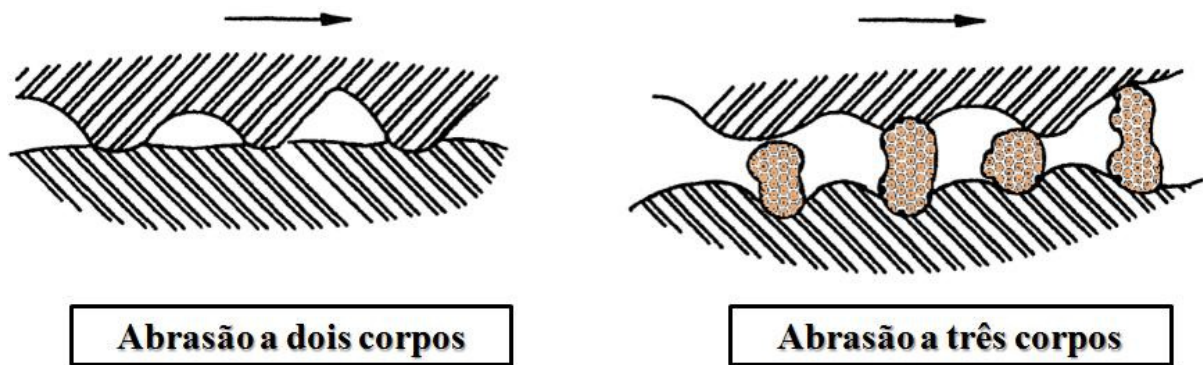


Figura 2.5 – Situações do desgaste abrasivo (BAYER, 2004).

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. 2.6a 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. 2.6b 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. 2.6c apresenta este mecanismo de desgaste.
- ◆ **O polimento (Fig. 2.6d),** é uma forma muito suave de desgaste onde o mecanismo não tem sido claramente identificado, mas envolve desgaste por partículas numa escala muito fina.

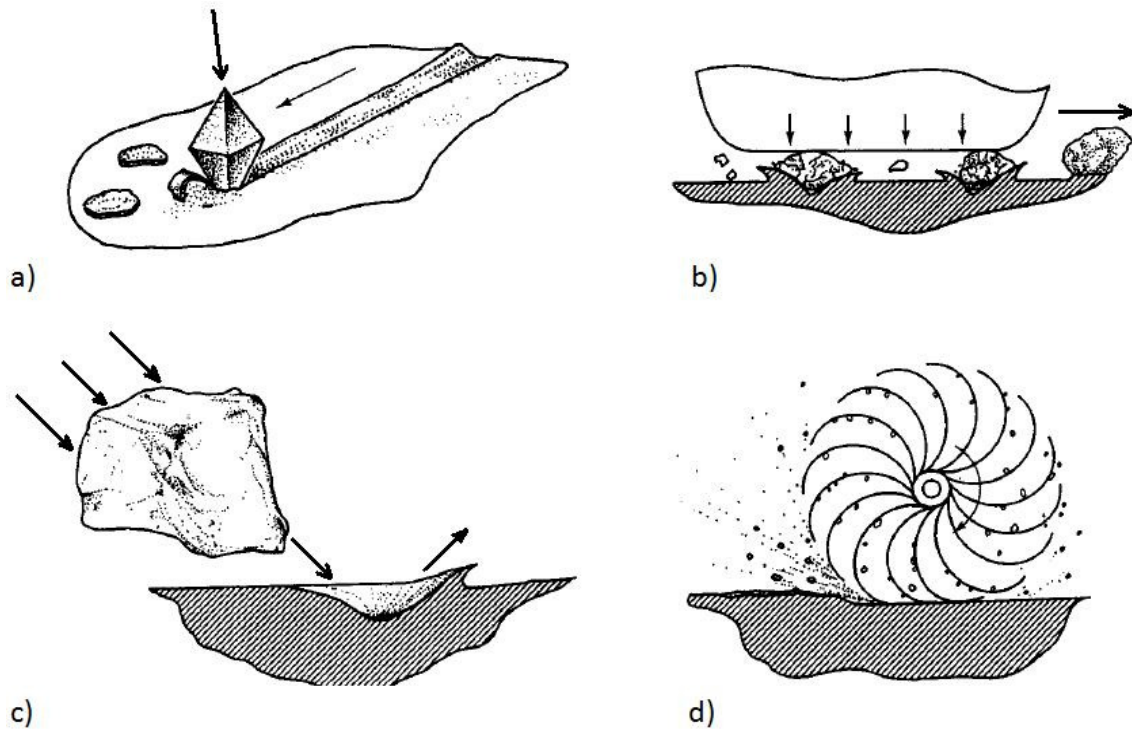


Figura 2.6 – Ilustração esquemática dos quatro tipos de desgaste, a) abrasão a baixa tensão, b) abrasão a alta tensão, c) abrasão por arranque e d) polimento (BUDINSKI,1988).

2.2.1.1.2. Mecanismos de desgaste abrasivo

No estudo dos fenômenos tribológicos associados à abrasão é importante identificar os micro mecanismos de desgaste, os quais definem os processos de interação entre o abrasivo (ou asperidade dura) e a superfície desgastada (HUTCHINGS, 1987). Segundo Eyre (1991) e Davis (2001), os micromecanismos de desgaste abrasivo podem ser dúcteis (microsulcamento e microcorte) ou frágeis (microtrincamento ou lascamanento).

- Microsulcamento: No mecanismo (Fig. 2.7a e Fig. 2.7b) 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 levar à perda de material
- Microcorte: A perda de massa ocorre devido ao corte do material pelo abrasivo (Fig. 2.7c). 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. 2.7d).

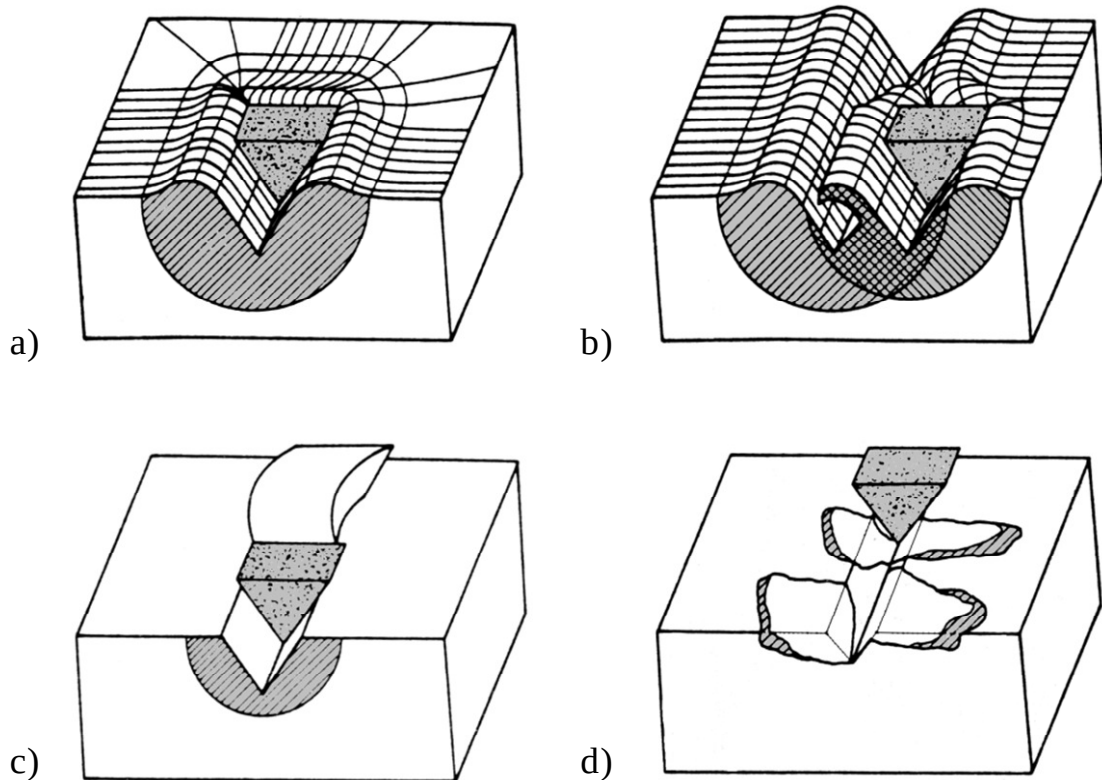


Figura 2.7 – Ilustração esquemática dos principais micro-mecanismos de desgaste abrasivo: a) e b) microsulcamento, c) microcorte e d) microtrincamento (ZUM GAHR,1998).

2.2.2. Avaliação de desgaste.

Dada a multiplicidade de fatores que intervêm nos processos de desgaste, é difícil prever com um único ensaio o comportamento em serviço de um material. O que normalmente se faz é analisar a influência das variáveis mais significativas do fenômeno e planejar em laboratório o ensaio ou ensaios mais representativos em cada caso particular. Nos materiais submetidos a desgaste abrasivo, é comum que se avalie seu desempenho em função do tempo de serviço (medido em horas, dias, meses, etc), em termos de custos efetivos. Sem dúvida, é possível separar e avaliar mediante ensaios de laboratórios, a medida do desgaste, a taxa de desgaste ou o mecanismo de desgaste. Isso também pode ser feito através da criação de condições similares de operação ou também diretamente em serviço (EYRE, 1991).

Os ensaios de laboratório usualmente se realizam para estudar os mecanismos de desgaste, desenvolver melhorias nos materiais e para selecionar materiais para as condições de serviço. Noble (1984) afirma que existe uma grande dificuldade na comparação dos

resultados experimentais obtidos em trabalhos de pesquisa de resistência ao desgaste, devido à variação dos métodos e difícil controle de certos fatores de ensaios. Considerando especificamente o desgaste abrasivo, a complexidade do fenômeno ainda não viabilizou a determinação de um único ensaio universal.

Muitos ensaios foram idealizados e desenvolvidos visando a simulação das condições de desgaste, alguns dos quais são normalizados e têm rígidos procedimentos de execução, como o Britador de Mandíbulas para ensaios de abrasão por arranque, a Roda de Borracha para ensaios de abrasão de baixa tensão e o Pino sobre Disco para ensaios de abrasão de alta tensão (NOBLE , 1984).

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. Alguns abrasômetros possuem sensores que medem a força de atrito associada à abrasão (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. 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 (ASTM G 65-00, 2001).

Nesse equipamento, um motor de corrente contínua aciona o contra-corpo, que consiste de um disco metálico recoberto por um anel de borracha (estireno-butadieno) de dureza 60 Shore, Fig. 2.8. A amostra é fixada a um sistema de alavanca que permite a aplicação de uma força normal à amostra via peso morto, enquanto o fluxo de abrasivo escoar por gravidade através de um tubo até a interface de desgaste, permitindo somente a presença de abrasivo novo durante a realização do ensaio de desgaste. A configuração deste sistema, que permite a aplicação de alta carga e utilização de um contra-corpo com baixa dureza, promove o deslizamento das partículas abrasivas na interface de desgaste. Os eventos resultantes da movimentação das partículas abrasivas apresentam um forte direcionamento de acordo com o movimento do contra-corpo (ASTM G 65-00, 2001).

O desgaste é quantificado via perda de massa pela pesagem dos corpos de prova antes e após o ensaio. Devido à grande diferença entre a densidade dos materiais, para possibilitar a comparação entre esses, torna-se necessário converter a perda de massa para perda de volume,

em milímetros cúbicos (ASTM G 65-00, 2001), o que pode ser feito pelo uso da Eq. 2.1 e da Eq. 2.2.

$$P_{VOL} = \frac{P_{massa}}{\delta} \cdot 1000 \quad (2.1)$$

$$P_{va} = P_{vol} \cdot \frac{D_{pad}}{D_{uso}} \quad (2.2)$$

P_{vol} = Perda de volume [mm^3]

P_{massa} = Perda de massa [g]

D = Densidade do material [g/cm^3]

P_{va} = Perda de volume ajustado

D_{pad} = Diâmetro do disco padrão (228,6mm)

D_{uso} = Diâmetro do disco em uso [mm]

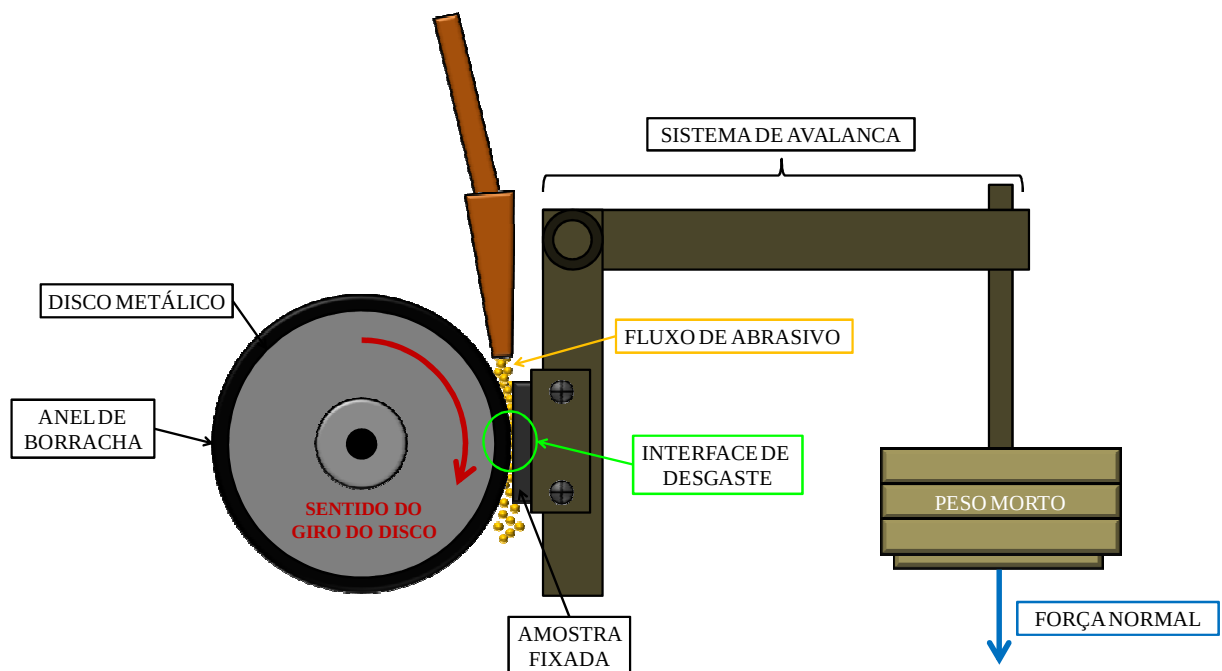


Figura 2.8 – Ilustração esquemática do funcionamento do Abrasômetro de Roda de Borracha.

2.3. Aplicação de revestimentos por soldagem

As operações de revestimento são definidas como a deposição de metal sobre a superfície de um metal base, com o propósito de prover as propriedades desejadas para

condições de serviço. Existem várias categorias de revestimentos que são utilizadas de acordo com as propriedades que se desejem obter, tais como (CONDE, 1986):

- Revestimento de aços inoxidáveis (“cladding”) – o objetivo é obter na superfície uma proteção contra a corrosão;
- Revestimento de reconstrução (“build-up”) – o objetivo é restaurar as dimensões originais de uma peça;
- Amanteigamento (“buttering”) – aplicação de um ou mais passes de solda em uma face da junta
- Revestimento duro (hardfacing”) – objetivo é aumentar a resistência ao desgaste. Como o objetivo deste trabalho está relacionado a revestimento duro, segue abaixo maiores detalhes sobre esta técnica.

2.3.1. *Revestimento Duro.*

Jeffus (2002) faz uma definição geral onde descreve o revestimento duro ou “hardfacing” como um processo de obtenção de propriedades ou dimensões desejadas mediante a aplicação de uma camada de metal de certa composição sobre uma superfície, uma borda ou um metal base de outra composição para lograr que a superfície tratada fique altamente resistente ao desgaste. Outra definição em termos de soldagem é citada por Hutchings (1992), onde se refere ao revestimento duro como uma liga homogeneamente depositada por um processo de soldagem na superfície de um material que requer um aumento em algumas das suas propriedades, geralmente na dureza e na resistência ao desgaste, sem levar a uma perda significativa de outras das suas características ou propriedades como a ductilidade e tenacidade do substrato.

Atualmente existem varias técnicas para a aplicação dos revestimentos duros, algumas delas consistem na aplicação de uma camada de metal duro mediante a soldagem por fusão. Em outras, nenhum material é aderido, mas a superfície do material muda pela submissão da peça a tratamentos térmicos ou pelo contato com outros materiais via tratamento termoquímico JEFFUS (2002).

Algumas das técnicas da soldagem por fusão mais utilizada são soldagens pelo processo Oxiacetilênico, Eletrodo Revestido, MIG/MAG, Arco Submerso e Arames Tubulares. Dentro de estes 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).

Jeffus (2002) e Conde (1986) afirmam que o revestimento duro é aplicado em

superfícies que vão experimentar algum tipo de desgaste, como desgaste por abrasão, erosão, cavitação ou impacto. Por esta razão é necessário conhecer a composição química do material a ser utilizado e também o tipo de desgaste esperado. A Fig. 2.9 mostra quatro facas picadoras de cana-de-açúcar, comumente usadas na indústria sucroalcooleira, desgastadas e recuperadas mediante a aplicação de revestimento duro pelo processo de soldagem a arco elétrico.

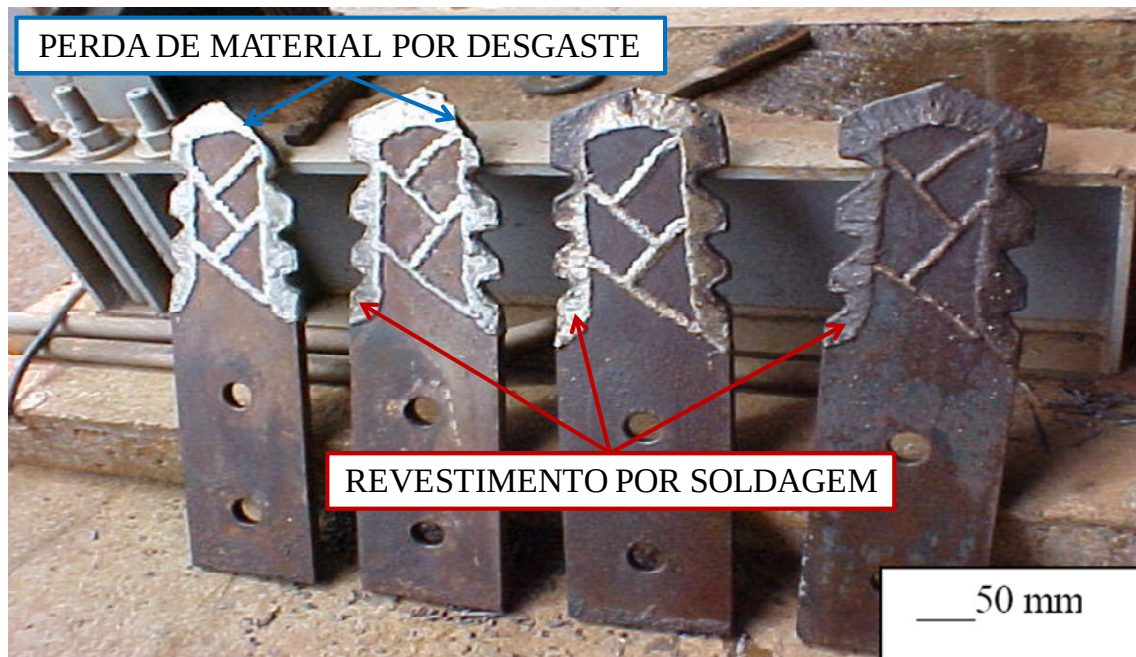


Figura 2.9 – Facas desfibradoras desgastadas e recuperadas pela aplicação de revestimento duro. (RIBEIRO, 2004)

Diversos autores têm sido unânimes em afirmar a importância da diluição na soldagem de revestimento duro. Segundo Conde (1986) é desejável baixa diluição para não influenciar fortemente a composição e as propriedades do revestimento, pois quando isso ocorre (baixa diluição), a composição final do depósito é mais próxima da composição do metal de adição utilizado e, portanto, as propriedades mais próximas do valor desejado.

Do ponto de vista metalúrgico, a composição e as propriedades do revestimento são fortemente influenciadas pela diluição obtida. De acordo com essa influência a diluição, que se obterá com cada processo de soldagem, deverá ser considerada a fim de selecionar a combinação mais conveniente entre o metal de adição e o processo requerido para uma dada aplicação. As variáveis do processo de soldagem que mais afetam a diluição serão discutidas a seguir (CONDE, 1986):

- a) *Corrente*: O uso de corrente contínua e polaridade direta (eletrodo negativo) proporciona menor penetração e, em consequência, menor diluição que com polaridade inversa (eletrodo positivo);
- b) *Diâmetro do eletrodo*: Com eletrodo de menor diâmetro se utiliza menor corrente e, portanto, se obtém menor diluição;
- c) *Comprimento do eletrodo (“Stickout”)*: Nos processos com eletrodos consumíveis, um maior comprimento do eletrodo produz menor diluição, porque aumenta a quantidade fundida do eletrodo ($I^2 \cdot R$) e a energia do arco é aplicada de forma difusa sobre o metal base.
- d) *Espaçamento entre os cordões*: Cordões mais superpostos tendem a reduzir a diluição, pois os cordões realizados anteriormente fundirão antes do metal base e, principalmente, entrará na composição do último cordão de solda.
- e) *Oscilação do eletrodo*: A regra é que uma maior oscilação e uma maior frequência de oscilação levam à redução da diluição; os melhores resultados são obtidos com a oscilação sem movimento pendular, com velocidade constante;
- f) *Velocidade de soldagem*: Uma baixa velocidade de soldagem determina uma baixa quantidade de metal base fundido, com relação à quantidade de metal de adição favorecendo a diluição.
- g) *Posição de soldagem e inclinação da peça*: Considerando uma soldagem com velocidade de deslocamento constante, a diluição decrescerá para as seguintes posições de soldagem, em ordem: vertical ascendente, horizontal, inclinada ascendente, plana e inclinada descendente;
- h) *Inclinação do eletrodo (ângulo de avanço)*: A inclinação do eletrodo para frente, na direção de soldagem (empurrando a poça) produz, geralmente, cordões mais planos, mais largos e com menor penetração;
- i) *Proteção do arco*: O meio protetor gasoso ou através de fluxo tem um efeito significativo na diluição, em ordem decrescente: hélio (mais alto), dióxido de carbono, argônio, fluxo granular sem elementos de liga e, com a menor diluição, o fluxo granular com elementos de liga;
- j) *Metal de adição*: A adição extra de metal de solda pode reduzir muito a diluição. Este pode ser adicionado em forma de pós, arames, fitas ou fluxos;
- k) *Processo de soldagem*: Os processos de soldagem utilizados na aplicação de revestimentos apresentam diferentes níveis de diluição. O processo de soldagem a Arco Submerso apresenta o maior valor de diluição (10 – 40%), seguido, em ordem

decrecente pelos processos Arames tubulares e Eletrodos revestidos (10 – 30%), Oxi-acetilênico (< 5%) e metalização a plasma ou a chama, sem diluição.

Em termos da seleção do material para ser depositado, existem diferentes tipos de metais e ligas disponíveis no mercado para esta aplicação. Muitos destes materiais podem ser depositados por qualquer método convencional de soldagem a arco ou por gás, manual ou automático. Aço ou ligas especiais para revestimentos devem ser usadas quando a superfície demande elevada resistência ao desgaste duro ou abrasivo. No caso em que a superfície esteja destinada a suportar desgaste corrosivo ou por atrito, é recomendável o uso de bronze ou algum tipo de liga resistente à corrosão (CONDE, 1986).

Muitos dos metais utilizados para os revestimentos duros têm uma base de ferro, níquel, cobre ou cobalto. Outros elementos podem ser adicionados como o carbono, o cromo, manganês, nitrogênio, silício, titânio e vanádio, alguns destes elementos de liga tem a tendência à formação de carbonetos (CONDE, 1986).

A maioria das ligas para resistir ao desgaste é produzida por consumíveis depositados por soldagem para serem utilizados em situações críticas. A faixa de dureza para estes materiais se encontra normalmente entre 40 e 60 HRC (CONDE, 1986). Segundo Wainer; Brandi; De Mello (1991), não existe uma classificação que envolva a maioria das ligas utilizadas para revestimento duro (a maioria destas são designadas pelos fabricantes), embora, existem algumas classificações baseadas na composição química do metal de adição depositado. Wainer; Brandi; De Mello (1991) citam 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 dútil.

Por sua vez, Gregory (1980) apresenta uma classificação das ligas de revestimento em quatro grupos: as ligas à base de ferro com menos de 20% de elementos de liga, as com mais de 20%, as ligas à base níquel e/ou cobalto e o quarto grupo, formado pelas ligas que contêm carbonetos de tungstênio. As ligas de aço martensítico são as mais usadas e são caracterizadas pelo baixo custo e largo intervalo de propriedades, dependendo da composição. Elas contêm, além do carbono, quantidades variáveis de Cr, Mo, Ni e pequenas adições de W e V, além de Mn e Si, como elementos desoxidantes. As principais especificações dos materiais a serem

depositados podem ser obtidas em AWS-A 5.4, 5.6, 5.7, 5.11 e 5.22.

Segundo Gregory (1980), as ligas de ferro fundido austeníticas e martensíticas de alto cromo são frequentemente referidas como ligas à base de carbonetos de cromo. Contém cerca de 30% de Cr e a microestrutura consiste de carbonetos de cromo numa matriz austenítica ou martensítica, ou uma mistura destas, dependendo da composição. Além disso, W, Mo ou V podem ser adicionados para aumentar a dureza a quente e a resistência à abrasão. Estas ligas são disponíveis na forma de varetas fundidas ou em tubos de aço extrudados contendo partículas de carbeto no interior do arame.

Buchanan (2007) cita que ao escolher uma liga para revestimento duro deve-se levar em conta 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 micro-constituintes, provendo um aumento da resistência à abrasão. Entretanto, Corrêa et al (2006) afirmam 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.

A aplicação das ligas da série Fe-Cr-C para revestir componentes expostos a certo nível de impacto é limitada, devido à presença de grandes carbonetos de cromo duros e frágeis. À medida que os carbonetos são removidos da matriz durante o processo de desgaste, a perda de material da superfície se torna mais intensa. Para melhorar a tenacidade dessa liga são adicionados elementos como Nb, Ti, V e W, os quais formam carbonetos fortes do tipo MC, que são bem mais duros, porém mais finos que os carbonetos de cromo (ATAMERT; BADESHIA, 1988).

Lima e Ferraresi (2009) apresentam 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. 2.10 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, verifica-se 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 desta pesquisa foi dimensionada via pesagem das facas, antes e após o período de trabalho. A Fig. 2.11 apresenta a perda de peso médio ($Desg_m$) das três facas revestidas com cada consumível e do ER1. Verifica-se que, dentre os arames tubulares, que o melhor resultado em valores médios (menor desgaste) foi obtido com o revestimento FeCrC+Nb, seguido do FeCrC e, com o maior desgaste, o revestimento FeCrC+Ti. O eletrodo ER1 apresentou desgaste similar ao revestimento FeCrC+Ti.

Lima e Ferraresi (2009) comentam que o maior desgaste do FeCrC+Nb ocorreu devido à fratura e lascamento de parte do revestimento, principalmente na região mais solicitada, pois quando o desgaste vence a camada de revestimento protetor e atinge o metal de base, a taxa de desgaste tende a aumentar progressivamente, devido à menor resistência deste. Com isso, a redução de volume da faca progride mais rapidamente. Entre os eletrodos utilizados, as facas com aplicação de FeCrC+Nb apresentaram antes de sua utilização uma maior quantidade de trincas em suas superfícies (trinca de solidificação). Uma provável causa do lascamento de partes de revestimentos frágeis, em região de muitas trincas pode, além do impacto normal com a cana e outros objetos, também estar relacionada com o impacto da faca sobre a própria estrutura do picador. Esses impactos ocorrem durante a partida (aceleração), durante a parada do equipamento (desaceleração) ou após o choque das facas, tanto com a cana, quanto com materiais duros durante o trabalho, pelo fato de as ferramentas girarem livres sobre os eixos. Os choques na região oposta ao gume, aliado ao impacto com a cana e outros objetos estranhos na região frontal (região do gume), tais como areia e metais, podem ser responsáveis pela propagação de trincas, pelo aumento do seu número e, consequentemente, pelos destacamentos de partes do revestimento.

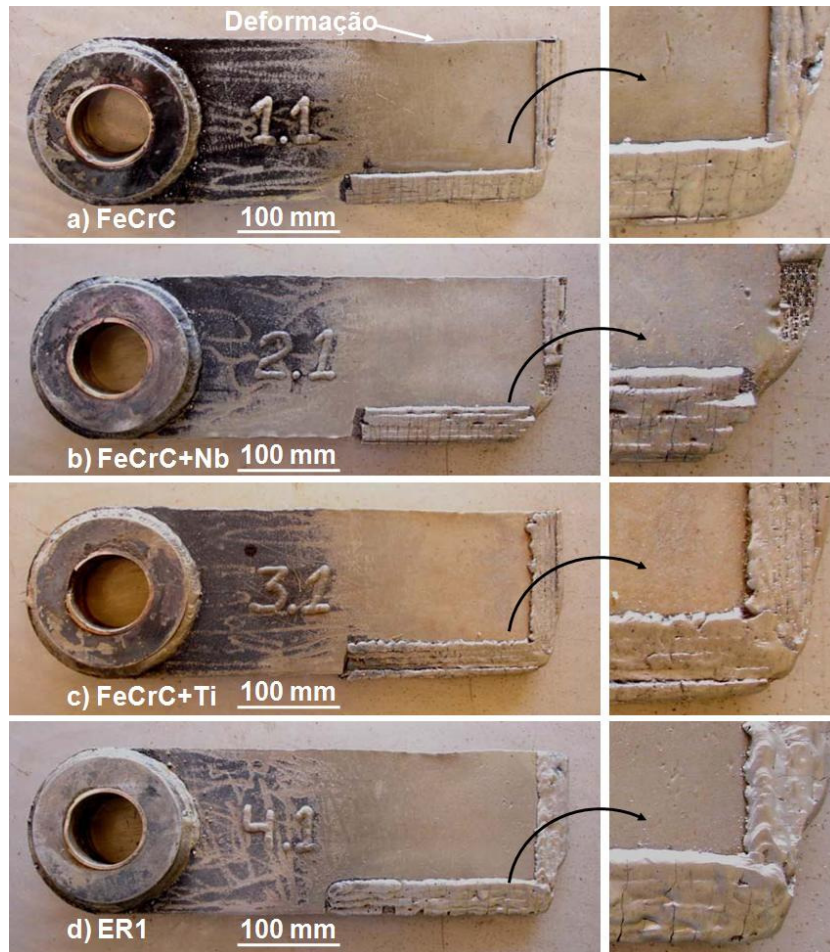


Figura 2.10 – Facas desgastadas, com detalhe do canto de maior desgaste: arame FeCrC, FeCrC+Nb, FeCrC+Ti e eletrodo revestido ER1 (LIMA e FERRARESI, 2009).

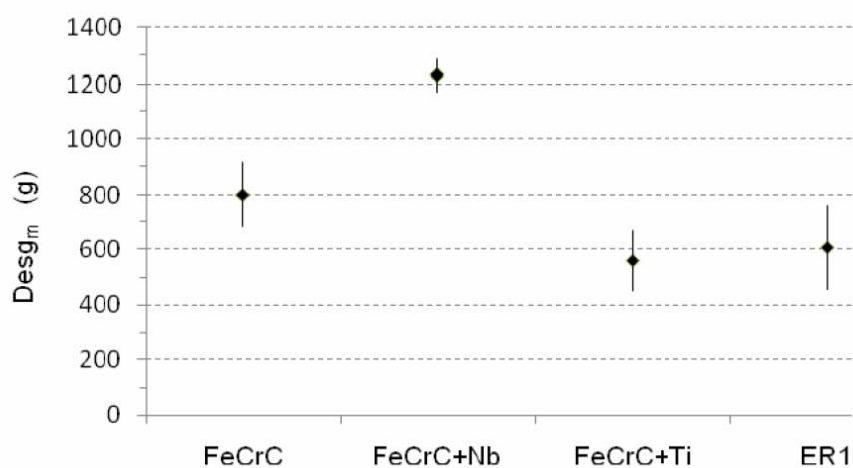


Figura 2.11 – Histograma ilustrando o desgaste das facas por consumíveis realizados em campo. (LIMA e FERRARESI, 2009)

Lima e Ferraresi (2009) concluíram 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 revestimentos estanques ou sob esforços dinâmicos que levem à fadiga e, conseqüentemente, ao arrancamento do revestimento.

Corrêa *et al* (2006) afirmam 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.

Lima e Ferraresi (2009) comentam que a soldagem com condições que minimizem a geração de trincas ou dificultem a sua propagação possa melhorar o desempenho dos arames mais afetados por lascamentos. Os autores sugerem que trabalhos posteriores busquem a otimização de técnicas e de parâmetros de soldagem que minimizem a geração de trincas e, dessa forma, avaliar o desempenho desses arames em campo.

2.4. Microestrutura e resistência ao desgaste

Existem muitos trabalhos disponíveis na literatura, abordando o efeito da microestrutura na resistência ao desgaste. A maioria dos autores é unânime em afirmar que a microestrutura dos revestimentos tem papel preponderante no seu desempenho em termos de resistência ao desgaste.

Fiore *et al* (1983) afirmam que as ligas de ferro fundido branco ao alto cromo possuem inúmeras vantagens em aplicações de desgaste abrasivo, pois suas composições podem ser ajustadas para que elas contenham quantidades moderadas de cromo. Dessa forma produzem, na solidificação, microestrutura rica em carbonetos de cromo massivos e uma matriz austenítica. Os carbonetos afetam as propriedades mecânicas dos materiais. Dependendo da composição da liga e do tratamento térmico recebido podem se apresentar distintos tipos de carbonetos, como MC, M₆C, M₇C₃, M₂₃C₆ e Cr₂C₃, onde M representa um ou mais tipos de

átomos metálicos. A fração em volume de carbonetos é um dos mais importantes parâmetros microestruturais que afetam a resistência ao desgaste abrasivo. Conde (1986) ressalta que o tamanho e a distribuição dos carbonetos na matriz apresentam um aspecto fundamental, ou seja, a maior quantidade e homogeneidade aliada ao menor tamanho resultam em maior resistência ao desgaste.

Fiore *et al* (1983) comenta que embora o alto nível de dureza dos carbonetos de cromo, M_7C_3 , contribua para a resistência ao desgaste, os carbonetos são frágeis e o grau pelo qual eles são suportados pela matriz pode definir o seu desempenho durante a abrasão.

Paranhos (1998) comenta que dureza tem sido relacionada equivocadamente com a resistência ao desgaste abrasivo. Os ensaios de dureza realizados são quase estáticos e as durezas obtidas não se correlacionam muito bem com o desgaste sob condições em que a superfície metálica é atingida por partículas em velocidades relativamente elevadas. Segundo Scotti e Rosa (1997), 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 conseqüentemente maior resistência ao desgaste, observam-se algumas contradições na literatura corrente.

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

Segundo Bálsamo; Scotti ; De Mello (1995) o aporte de energia tem grande influência na morfologia da microestrutura dos revestimentos duros, em particular no tamanho médio da mesma, quando o menor aporte térmico e, conseqüentemente, a maior velocidade de solidificação levam ao refinamento da microestrutura.

A Fig. 2.12 ilustra o efeito do teor de carbono e do aporte térmico na microestrutura e no tamanho dos micro-constituintes. Observa-se que a Fig. 2.12a e 2.12b são constituídas predominantemente por carbonetos primários do tipo M_7C_3 em uma matriz eutética de austenita mais carboneto, enquanto que nas Fig. 2.12c e 2.12d, 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. 2.12b e 2.12d), tanto os carbonetos M_7C_3 quanto as dendritas de austenita apresentam maior refino devido à maior velocidade de resfriamento (BÁLSAMO; SCOTTI; DE MELLO, 1995).

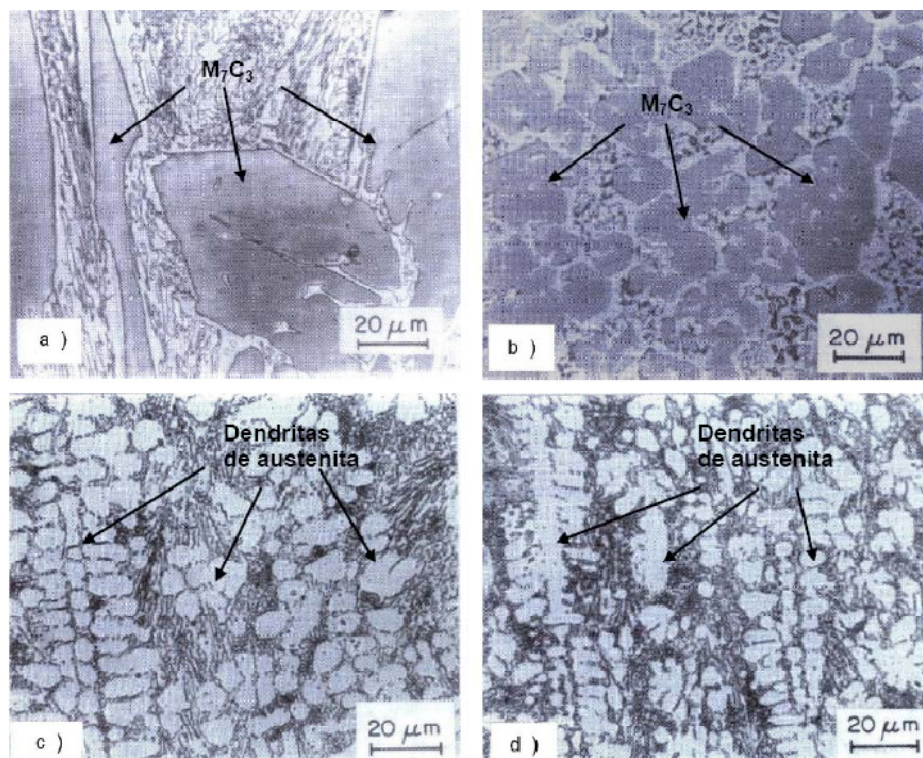


Figura 2.12 – Microestrutura de revestimento duro liga Fe-Cr-C: a) liga 30Cr5,5C; b) liga 30Cr5,5C; c) liga 30Cr1,7C; d) liga 30Cr1,7C (BÁLSAMO,; SCOTTI; DE MELLO,1995).

Lima (2008) utilizou em sua pesquisa três arames tubulares auto-protégidos de 1,6 mm de diâmetro. Estes arames tubulares da liga FeCrC diferem entre si pelos teores de ferro, cromo, carbono, silício e manganês, além da adição de Nb em uma liga e da adição de Ti e Mo em outra. A Tab. 2.1 apresenta a faixa de dureza a ser obtida pelo metal de solda em primeira camada, bem como, a composição típica dos arames, cujos dados foram obtidos do fabricante.

Tabela 2.1 – Dados dos consumíveis (arames tubulares e eletrodo revestido) (LIMA, 2008).

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

A Fig. 2.13 ilustra a microestrutura obtida com o arame FeCrC por microscopia. Observa-se que próximo à interface com o metal de base (Fig. 2.13a) o revestimento FeCrC apresentou uma microestrutura com crescimento dendrítico (dureza média de 393 HV_{0,01}). No

interior do revestimento (Fig. 2.13b) nas regiões mais próximas à superfície do cordão de solda se observam carbonetos primários (M_7C_3), com dureza variando de 1051-1756 $HV_{0,01}$ (média 1510 $HV_{0,01}$), imersos em matriz eutética (austenita mais carbonetos) com dureza média de 668 $HV_{0,01}$.

A microestrutura do revestimento FeCrC+Nb é apresentada na Fig. 2.14, mostrando uma formação que se assemelha ao revestimento FeCrC (Fig. 2.13a) para a região próxima ao metal de base (Fig. 2.14a), ou seja, microestrutura com crescimento dendrítico na interface com o metal de base, menos evidente que o FeCrC. A Fig. 2.14b mostra carbonetos primários (M_7C_3), com dureza variando de 1168-1452 $HV_{0,01}$ (média de 1356 $HV_{0,01}$), imersos em matriz com dureza média de 650 $HV_{0,01}$. Observa-se também a presença em todo o volume do revestimento (da interface do metal de base até a superfície) de pequenos carbonetos de nióbio (5 a 10 μm) finamente distribuídos na matriz. Esses carbonetos apresentam geometria diversa de forma similar ao obtido por Buchely et al. (2005). A sua dureza varia de 1027-1514 $HV_{0,01}$ (média de 1207 $HV_{0,01}$), inferior ao obtido na literatura, em torno de 2400 HV BUCHELY et al (2005).

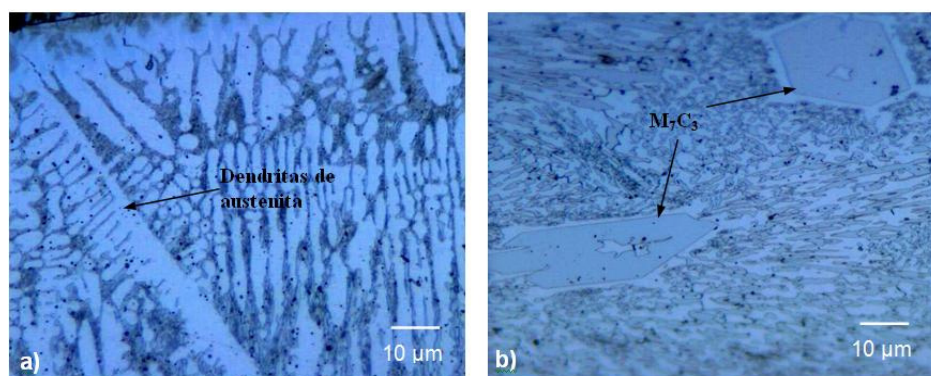


Figura 2.13 – Microestrutura da liga FeCrC (LIMA, 2008).

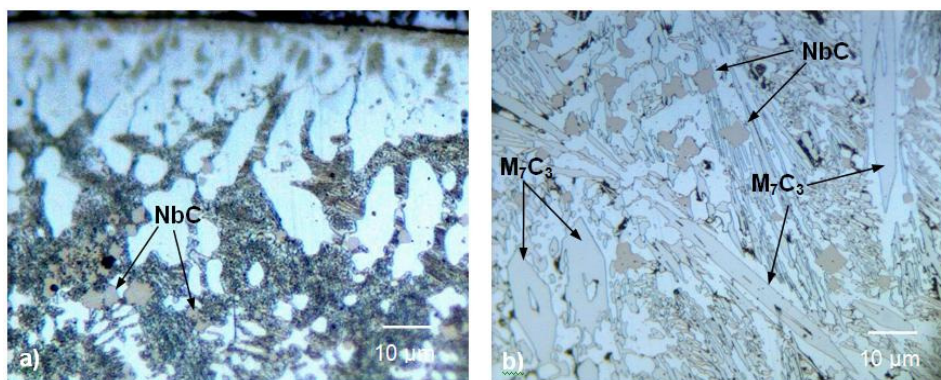


Figura 2.14 – Microestrutura da liga FeCrC+Nb (LIMA, 2008).

A Fig. 2.15 subdividida em Fig. 2.15a e Fig. 2.15b apresenta a microestrutura do revestimento FeCrC+Ti, onde observa-se em todo volume do depósito uma matriz bastante homogênea (parte escura), com dureza variando de 627 a 681 HV_{0,01} (média de 654 HV_{0,01}) envolvendo carbonetos primários (carbonetos de titânio) de grandes dimensões, os quais podem variar de 25 μm , próximo à interface com o metal base, até mais de 150 μm nas regiões próximas à superfície do cordão de solda. A dureza dos carbonetos de titânio variou de 2050 a 2970 HV_{0,01} (média de 2570 HV_{0,01}), apresentaram dureza inferior ao obtido por Berns e Fisher (1987), em torno de 3000 HV_{0,01}.

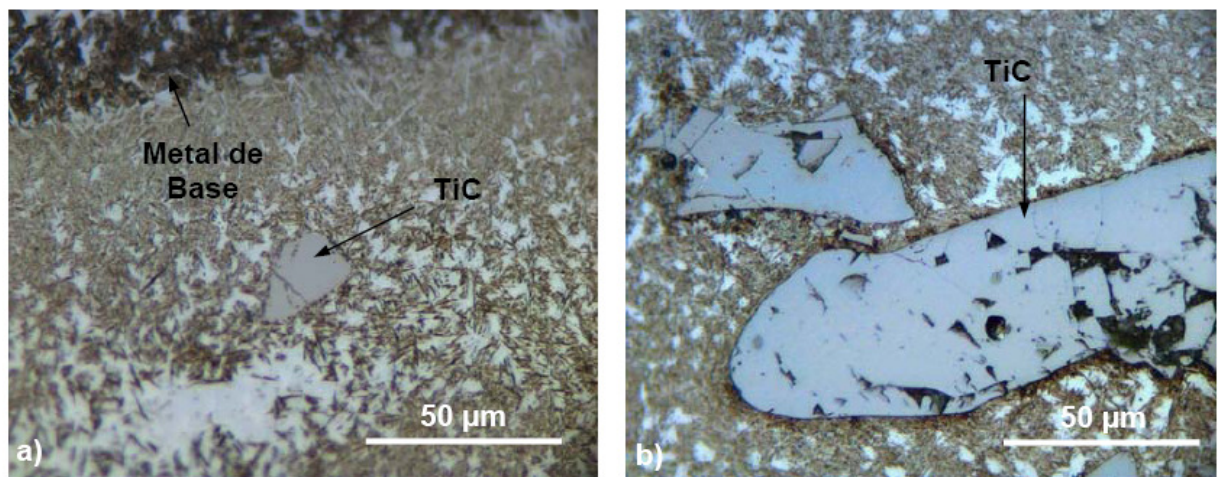


Figura 2.15 – Microestrutura da liga FeCrC+Ti (LIMA, 2008).

A Fig. 2.16 apresenta a microestrutura do revestimento efetuado com o eletrodo ER1, onde se observa, na região da interface com o metal base, Fig. 2.16a, uma microestrutura predominantemente eutética, com uma distribuição de carbonetos do tipo M_7C_3 finamente dispersos na matriz. À medida que se aproxima do centro do revestimento, em direção à superfície, observa-se um aumento do tamanho dos carbonetos, com a presença de grandes e massivos carbonetos primários (Fig. 2.16b), com dimensões que podem chegar a 50 μm (diagonal do hexágono) por 200 μm (comprimento) e dureza variando de 1050-1350 HV_{0,01}. O tamanho desses carbonetos é superior ao observado no revestimento FeCrC e +Nb, mas a sua dureza é inferior. A dureza da matriz varia de 498-782 HV_{0,01} (média de 660 HV_{0,01}). Em volta dos carbonetos massivos M_7C_3 observa-se ainda uma grande quantidade de carbonetos finos uniformemente distribuídos na matriz.

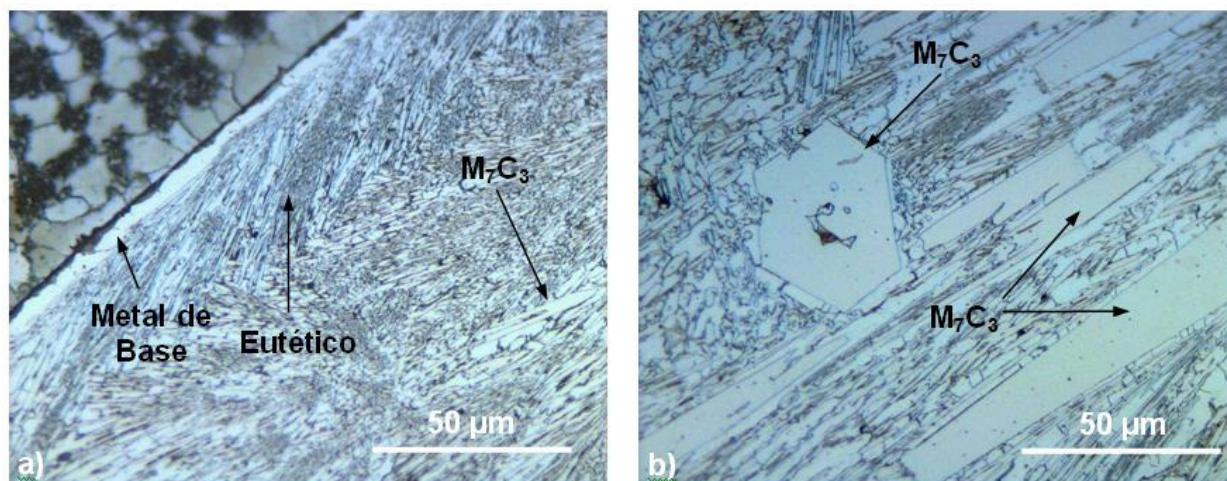
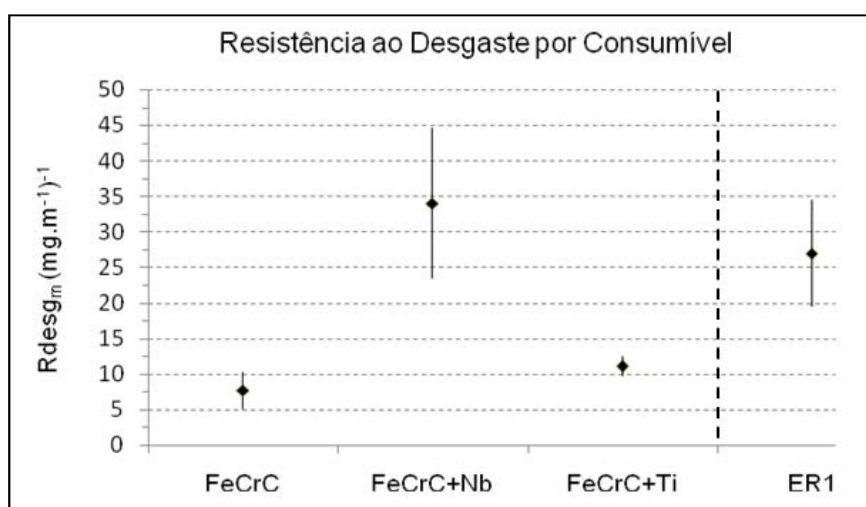


Figura 2.16 – Microestrutura do revestimento obtido com o eletrodo revestido ER1 (LIMA, 2008).

Com esses materiais Lima (2008) realizou ensaios em roda de borracha, para uma melhor visualização dos resultados a Fig. 2.17 ilustra a resistência ao desgaste médio por consumível. Observa-se que dentre os arames tubulares, o melhor resultado foi obtido pelo arame FeCrC+Nb, seguido do FeCrC+Ti e, com o pior resultado, o arame FeCrC, apesar de os dois últimos serem estatisticamente iguais em teste de hipótese. O eletrodo revestido de FeCrC (chamado de ER1) proporcionou o segundo melhor resultado geral, dentre todos os consumíveis, com média de perda de massa 26% superior ao arame FeCrC+Nb, mas pela sobreposição do desvio padrão, com resultado estatisticamente similar a este.



Onde, R_{desg_m} : Média da Resistência ao Desgaste [$mg \cdot m^{-1}$]

Figura 2.17 – Análise comparativa de resistência ao desgaste por consumível em roda de borra (LIMA, 2008).

Lima (2008) cita que o menor desempenho em termos de resistência ao desgaste da liga FeCrC se deve provavelmente à menor dureza do revestimento devido à sua microestrutura hipoeutética (dentrinas de austenita em matriz eutética) de menores propriedades de resistência ao desgaste. Por outro lado, a maior resistência ao desgaste da liga FeCrC+Nb está relacionada com a maior dureza do revestimento e à sua microestrutura hipereutética, formada por carbonetos primários de cromo (M_7C_3) e monocarbonetos de nióbio (NbC) em matriz eutética, sendo esses últimos finamente distribuídos.

O desempenho da liga FeCrC+Ti, inferior ao FeCrC+Nb foi justificada por Lima (2008) pela presença de grandes carbonetos TiC intercalados por pequenos e duros carbonetos TiC fortemente incrustados e finamente distribuídos na matriz austenítica-martensítica e com menor valor de PVCt. O eletrodo ER1 teve resistência ao desgaste pouco inferior ao arame FeCrC+Nb, pois, apesar da microestrutura formada por carbonetos de Cr primários em matriz eutética, os carbonetos M_7C_3 apresentaram tamanho superior ao da outra liga, além de porcentagem volumétrica inferior, o que segundo a literatura justifica o melhor desempenho do FeCrC+Nb que apresentava ainda fina distribuição de carbonetos NbC.

2.5. Soldagem a Arco Elétrico com Arames Tubulares

A soldagem a arco elétrico com Arame Tubular é um processo de soldagem que usa a energia de um arco para a fusão de um arame alimentado continuamente e a fusão do metal base (geração da poça de fusão). O processo utiliza um fluxo, contido no arame, como gás de proteção, mas o processo permite utilizar gás de proteção subministrado de uma fonte externa. O que diferencia este processo com outros de soldagem a arco é o encerramento dos ingredientes do fluxo dentro de um arame que está sendo continuamente alimentado (AWS, 1997).

O Arame Tubular é um eletrodo tubular que contém uma camada superficial de metal e um núcleo de vários metais em pó. Durante a soldagem é gerada uma extensa camada de escória sobre a face externa no cordão de solda.

2.5.1. Classificação do processo com Arame Tubular

O processo de soldagem com Arame Tubular classifica-se em dois tipos que diferem na forma em que ocorre a proteção da poça de fusão da contaminação atmosférica. Os tipos são:

auto-protegido, Fig. 2.18a , ou com proteção gasosa externa, Fig. 2.18b, no primeiro a poça de fusão é protegida pela decomposição a vaporização do núcleo graças ao calor gerado pelo arco e no segundo a proteção é efetuada em conjunto com outro gás adicionado de um fonte externa. Nos dois métodos o Arame Tubular prove uma camada de escoria para proteger o metal que está solidificando, AWS (1997).

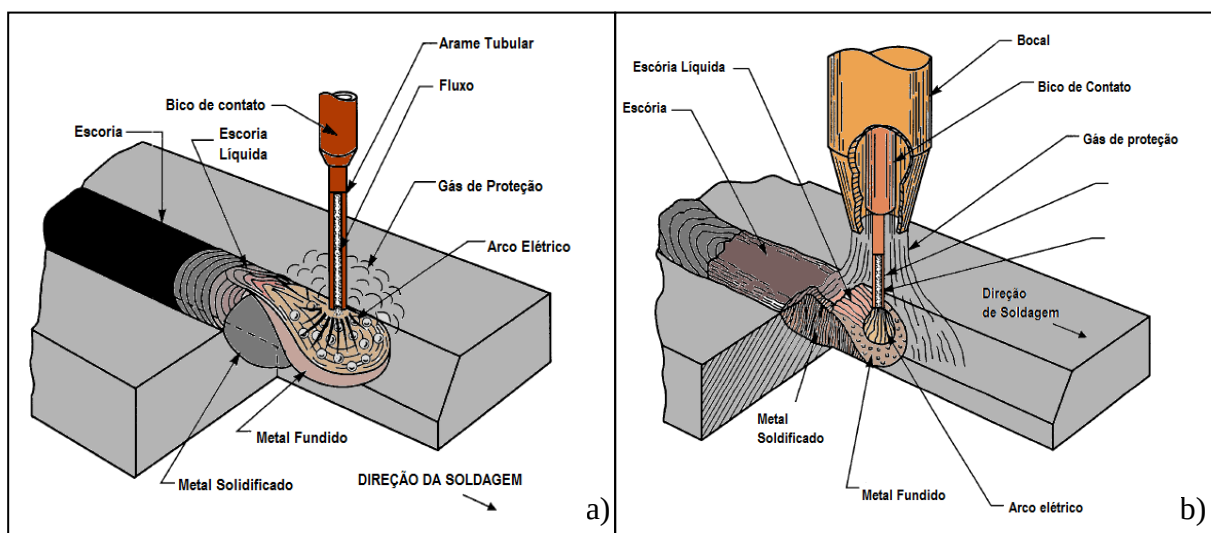


Figura 2.18 – Desenho esquemático do processo Arame Tubular: a) auto-protegido e b) com proteção gasosa externa (AWS, 1997).

No modo auto-protegido, Fig. 2.18a, a proteção é obtida da vaporização dos elementos misturados no fluxo, esse vapor desloca o ar, e a escória produzida cobre a gotas em transferência o que protege a sua vez a poça fundida durante a soldagem. A produção de elementos como o CO_2 e a introdução de agentes desoxidantes e desnitrificantes provenientes dos ingredientes do fluxo justo na superfície da poça de fusão explicam porque os arames auto-protegidos podem tolerar fortes correntes de ar ao contrario dos processos com gás de proteção externo, por isto este processo de soldagem é amplamente utilizado em campo.

Quando é utilizado gás de proteção externo (Fig. 2.18b), usualmente dióxido de carbono ou misturas de argônio e dióxido de carbono, a poça de fusão é protegida do ar atmosférico pela formação de uma capa protetora ao redor do arco e sobre a poça. Os arames utilizados neste processo são formulados com a finalidade de prover desoxidantes para se combinar com pequenas quantidades de oxigênio que se encontra no gás de proteção.

A vantagem do processo Arame Tubular é obtida pela combinação da produtividade oferecida pela alimentação continua do arame, dos benefícios metalúrgicos que podem ser obtidos, e da proteção que a escória formada oferece ao metal em solidificação. Este 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 a arco com proteção gasosa (MIG/MAG) (AWS, 1997).

Segundo Martínez e Pérez (2000), na soldagem com proteção gasosa o gás promove uma barreira de isolamento para proteger o eletrodo, o arco elétrico e o poça de fusão do ar circundante, podendo ser inerte (argônio, hélio), ativo (dióxido de carbono, hidrogênio) ou misturas desses. Na versão de soldagem auto-protegida, 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 CO₂ necessário para efetivar a proteção.

As principais vantagens da utilização de arames auto-protegidos se devem à possibilidade de se obter depósitos com elevado teor de elementos de ligas e a baixo custo, 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).

Diversos trabalhos têm sido publicados 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 Martins Filho (1995); Hernandez (1997); Ignoto e Baldomir (2003); Santos *et al* (2005); Kannan e Murugan (2006); Sapate e Ramarao (2006); Aloraier, Ibrahim, Thomson (2006); dentre outros.

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).

2.6. Adição de arame não energizado

A idéia da adição de arame frio em processos como o MIG/MAG, Arco Submerso, e Arame Tubular surgiu da necessidade das indústrias de aumentar a produtividade aumentando

a taxa de deposição e sem elevar os custos de investimento. O processo se caracteriza por ser uma soldagem de duplo arame, onde um dos arames consumíveis é energizado e o outro arame consumível é não energizado e fundido na poça de fusão pelo arame energizado (SÁBIO, 2006).

A Fig. 2.19 ilustra a representação esquemática de uma tocha de soldagem MIG/MAG reta com o injetor de arame não energizado acoplado a sua extremidade. Este esquema foi utilizado no trabalho de Cruz Júnior; Ferraresi; Braga (2009).

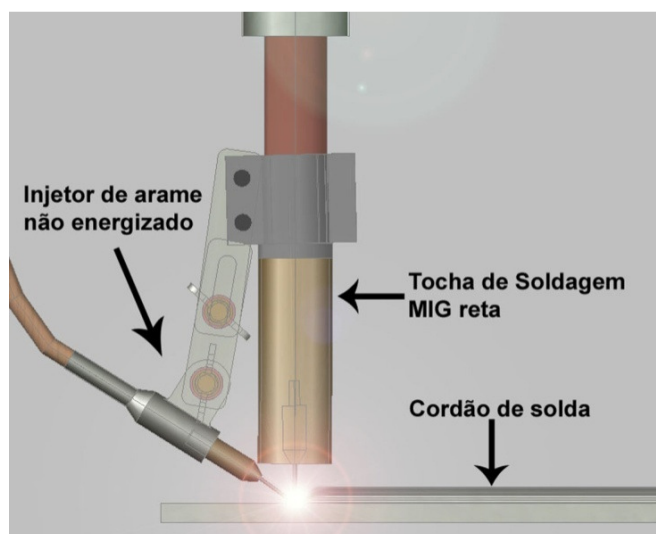


Figura 2.19 – Representação esquemática do injetor de arame não energizado acoplado a tocha MIG/MAG. (CRUZ JÚNIOR; FERRARESI; BRAGA, 2009).

Esta nova técnica de soldagem utiliza apenas um equipamento convencional (uma fonte de tensão constante com alimentador de arame). A alimentação do arame não energizado é realizada através de um segundo cabeçote e um sistema (injetor de arame) acoplado à extremidade da tocha de soldagem a fim de conduzi-lo a região do arco elétrico, este cabeçote, ao igual que o do arame energizado, permite o controle da entrada e saída do arame e dos valores de velocidade e alimentação do arame.

2.6.1. Disposição dos arames:

A técnica permite a disposição do arame não energizado em duas posições, “Twin Wire” “Tandem Wire” (SABIO, 2006).

A disposição “Twin Wire” ou posicionamento transversal, Fig. 2.20a, se refere ao arranjo dos arames lado a lado numa posição transversal ao sentido de deslocamento da tocha (Gonzáles, 1999; Michie, 1999), esta posição é vantajosa para a soldagem de revestimentos e

juntas de topo. Gonzáles (1999) observou que após a soldagem de revestimentos com a disposição “Twin Wire” os depósitos de solda apresentavam valores de diluição e penetração baixos, características que são desejáveis neste tipo de soldas.

Na disposição “Tandem Wire” ou posicionamento longitudinal, Fig. 2.20b, os arames se encontram dispostos na posição longitudinal ao longo do cordão de solda fazendo com que os dois arames estejam em cooperação posicionados um em frente ao outro na direção da velocidade de soldagem (GONZÁLES, 1999; MOTTA, 2002).

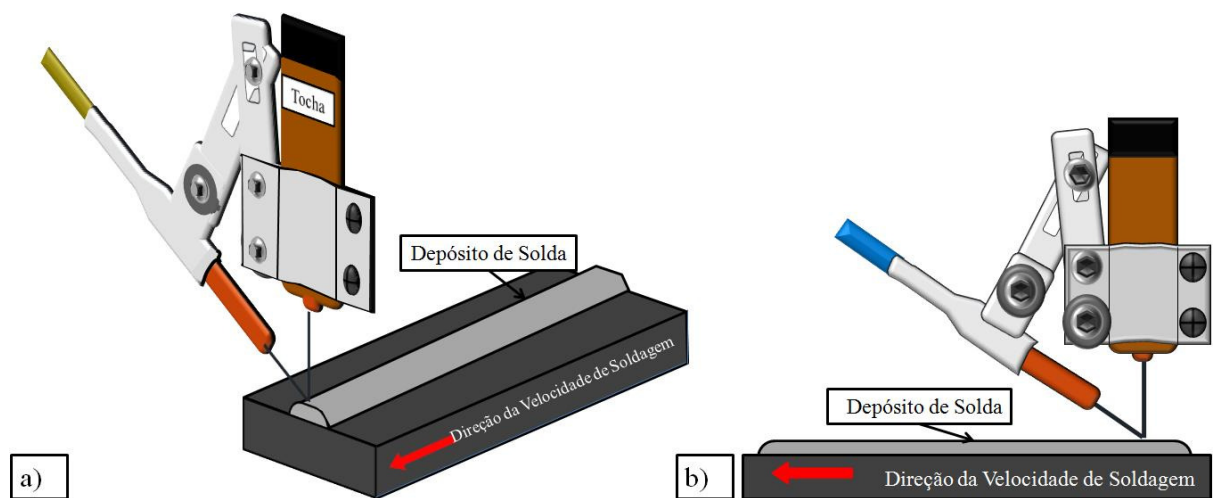


Figura 2.20 – Disposição dos arames na adição de arame não energizado, a) “Twin wire” ou transversal, b) “Tandem wire” ou longitudinal (SABIO, 2006).

2.6.2. Características do processo

Com esta técnica de adição de arame não energizado e a disposição longitudinal entre os arames Cruz Júnior; Ferraresi; Braga (2009) obtiveram resultados para deposição de arame do processo MIG/MAG (revestimento de aço inoxidável), onde a melhor relação entre a velocidade do arame energizado e do arame não energizado é de 1/3, isto é, para uma condição de arame energizado de 6m/min a condição do arame não energizado é de 2m/min. Também observaram que a qualidade da solda do revestimento melhorava dando como resultado um cordão com excelente aspecto visual e uma convexidade considerada boa.

Sabio (2006) na sua pesquisa da variabilidade operacional do processo MIG/MAG com adição de arame frio chegou à conclusão de que a técnica com adição de arame não energizado demonstrou melhor produção quando comparada com o processo convencional, indicado bom desempenho no aumento das taxas de fusão e de deposição. Comprovou também que o processo com a técnica de adição de arame não energizado provê menor

diluição na solda, característica desejada que na soldagem dos revestimentos, além de um aspecto superficial nos depósitos satisfatório.

Ferreira (2010) após fazer um estudo comparativo entre o processo Arame Tubular e Arame Tubular com adição de arame frio quanto à taxa de deposição e a aparência superficial do cordão de solda, chegou-se a conclusão de que os depósitos com adição de arame frio apresentavam uma melhor regularidade na largura e reforço do cordão.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de facilitar o entendimento e compreensão das atividades desenvolvidas nesta pesquisa, bem como permitir que outros pesquisadores possam repetir integralmente os testes e experimentos realizados, serão descritos a seguir, os equipamentos, os materiais, os consumíveis e a metodologia utilizada.

3.1. Materiais

3.1.1. Metal Base

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

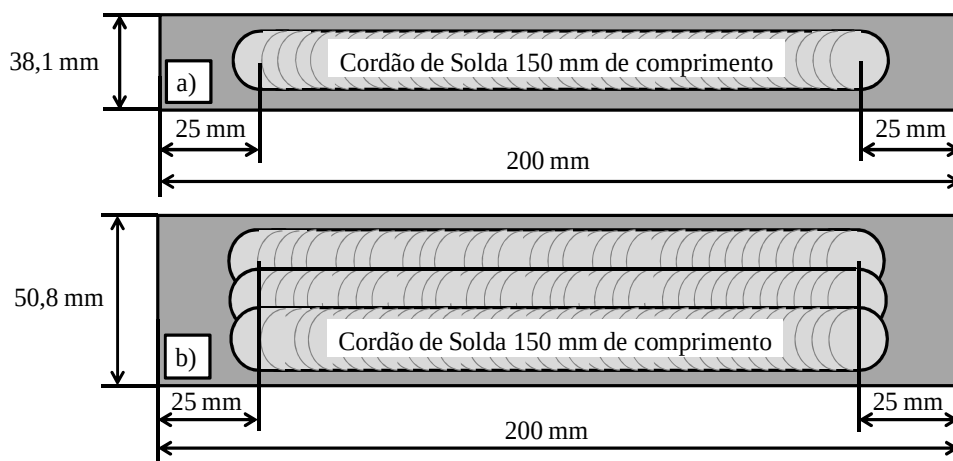


Figura 3.1 – Dimensões das chapas de teste. a) para os testes preliminares e b) para a confecção dos revestimentos – Espessura 12,7 mm nos dois casos.

3.2. Consumíveis

3.2.1. Arame tubular

Baseados numa pesquisa anterior realizada no LAPROSOLDA por Lima (2008) foram escolhidos para o estudo dois arames tubulares auto-protégidos de 1,6 mm de diâmetro cuja composição química encontra-se na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Composição química dos arames tubulares auto-protégidos fornecida pelo fabricante.

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

A diferença entre os arames 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 composição nominal fornecida pelo fabricante.

3.2.2. Arame de adição não energizado

Na etapa experimental foram utilizados cinco arames maciços de 1 mm de diâmetro para adição não energizada na poça de fusão visando diminuir ou eliminar as trincas, verificadas no trabalho de Lima (2008) e aumentar a produtividade no processo. Foi utilizado também o arame tubular FeCrC como metal de adição não energizado. A Tab. 3.2 apresenta a composição química básica dos arames utilizados na adição não energizada. A composição química do arame de FeCrC+Nb, que também foi usado como arame não energizado, encontra-se na Tab. 3.1.

Tabela 3.2 – Composição química dos arames utilizados na adição não energizada.

Arame	Tipo	Composição %									
		C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	Cu	Outros
ER70S6	Aço comum	0.06-0.15	0.15	0.15	0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	0.025	0.035	0.50	V: 0.03
ER308L	Aço Inox	0,03	19,5-22,0	9,0-11,0	0,75	1,0-2,5	0,30-0,65	0,03	0,03	0,75	--
ER309LSi	Aço Inox	0,03	23,0-25,0	12,0-14,0	0,75	1,0-2,5	0,65-1,00	0,03	0,03	0,75	--
ER316	Aço Inox	0,03	19,5-22,0	9,0-11,0	0,75	1,0-2,5	0,30-0,65	0,03	0,03	0,75	--
ER430Nb	Aço Inox	0,03	17,0-19,0	0,6	0,75	0,6	0,5	0,03	0,03	0,75	N: 0,03 Nb(Cb)+Ta: 8C~1,20
FeCrC	MF 10-GF-65-GR	5,0	27,0	--	--	1,5	1,5	--	--	--	--

3.3. Equipamentos

3.3.1. Bancada de soldagem.

Para a realização dos testes foi montada uma bancada de soldagem apresentada na Fig. 3.2. Esta bancada é composta por uma fonte de soldagem eletrônica, 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. Detalhes dos principais equipamentos:

3.3.1.1. Fonte de soldagem: A fonte de soldagem utilizada é eletrônica e multiprocesso, viável 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;
- Ajustável para tensão constante, corrente constante ou modo misto;

- Indutância ajustável;
- Corrente máxima de 600 A;
- Tensão em vazio de 64 V;
- Na realização dos testes a fonte foi ajustada em modo MIG/MAG convencional com tensão constante.

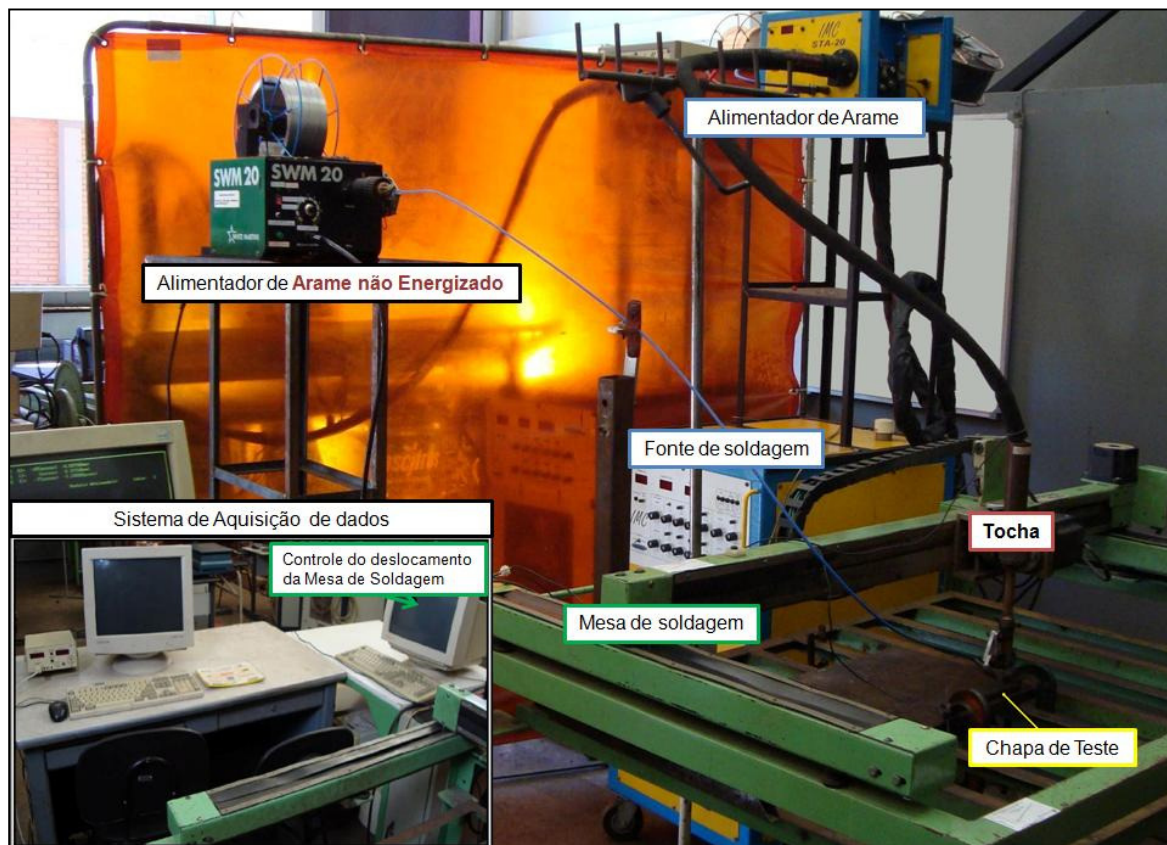


Figura 3.2 – Bancada de soldagem LAPROSOLDA.

3.3.1.2. *Alimentador de arame-eletrodo*: Tem como função alimentar o arame-eletrodo até o arco, está acoplado à fonte de soldagem e possui as seguintes características:

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

3.3.1.3. *Tocha*: Foi utilizada uma tocha reta automática (capacidade até 400 A), refrigerada a água, comprimento de 2 metros e conduíte de aço para arame de 1 e 1,6 mm.

3.3.1.4. *Alimentador de arame-eletrodo não energizado:* O alimentador de arame usado foi o modelo SWM 20 da White Martins e modificado no LAPROSOLDA, as características deste equipamento são:

- Alimentação 220 V CA – 50/60 Hz;
- Velocidade de avanço na faixa de 1,00 a 10,0 m/min;
- Diâmetros de arame de 0,60 até 1,60 mm;
- Acople à tocha de soldagem;
- Possui roletes de tração para permitir a alimentação contínua do arame-eletrodo bobinado.

3.3.1.5. *Mesa de soldagem:* A mesa de soldagem é um sistema de deslocamento e posicionamento da tocha de soldagem com opção de tecimento, suas características são:

- Velocidade de soldagem (deslocamento no eixo X) mínima: 5 mm/s e máxima: 60 mm/s;
- Resolução de 0,1 mm/s para a velocidade, de 0,125 mm na distância e de 0,1° no ângulo do tecimento.

A mesa de soldagem foi calibrada antes de iniciar os testes usando um sistema de calibração de velocidade fabricada pelo LAPROSOLDA. No sistema é usado um cronômetro e três sensores os quais estão posicionados como ilustrado na Fig. 3.3, fazendo contato entre eles ao início e ao final do percorrido.

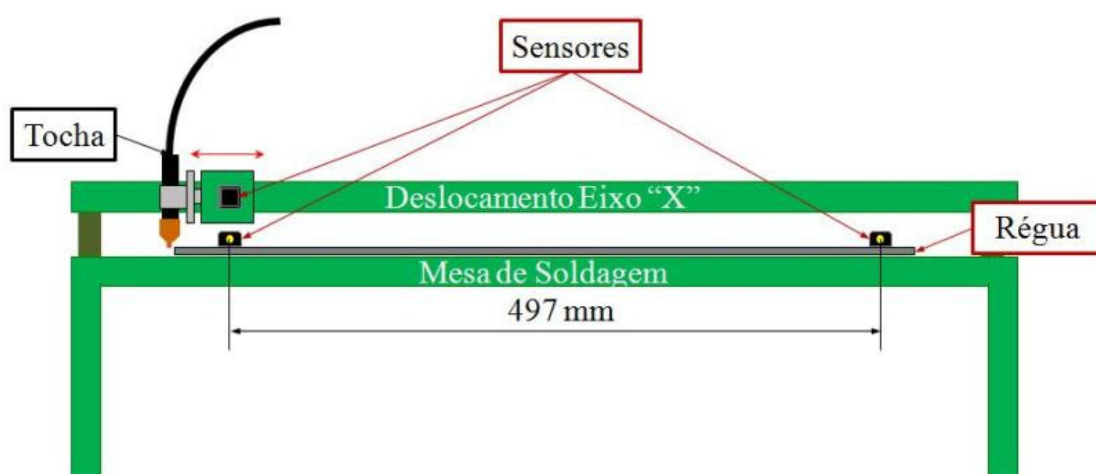


Figura 3.3 – Esquema de montagem para calibração da mesa de soldagem.

Foram feitos quatro (4) ensaios variando as velocidades de 5 mm/s a 60 mm/s, com passo de 5 mm/s. A Fig. 3.4 mostra o gráfico resultante de velocidade de soldagem real versus velocidade de soldagem na mesa.

A Eq. (3.1) é a utilizada para encontrar a velocidade de soldagem que deve ser colocada na mesa (valor “x”) para atingir a velocidade desejada em mm/s (valor “y”).

$$y = -0,001x^2 + 1,0121x + 0,1458 \quad (3.1)$$

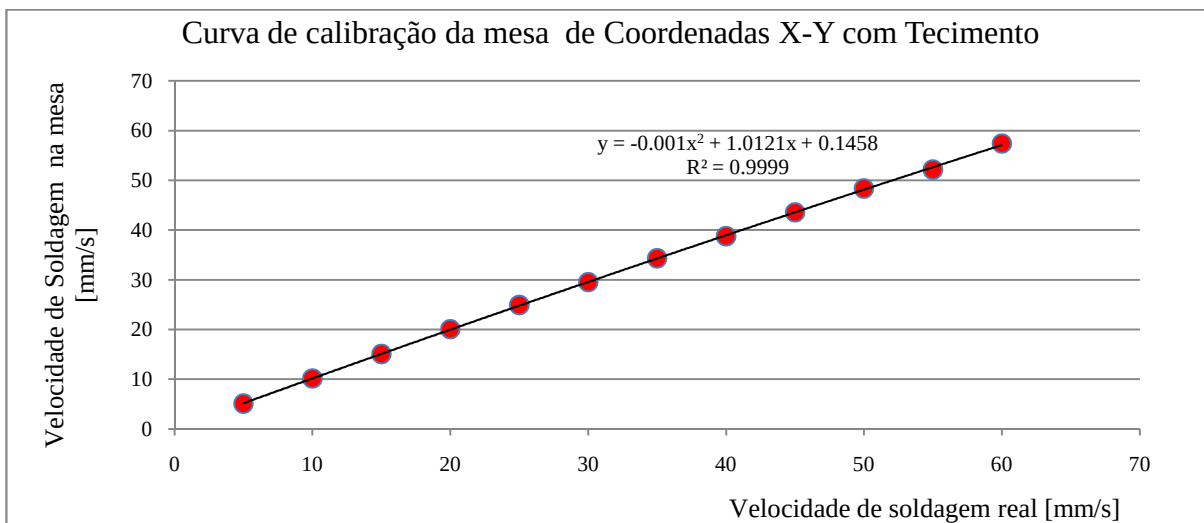


Figura 3.4 – Curva de calibração da mesa de soldagem.

3.3.1.6. Sistema de aquisição de dados: É composto por uma placa de aquisição de dados modelo NI USB-6009 com resolução de 14 bits e faixa de medição de ± 10 V, um condicionador de sinal e um computador com o software de aquisição de dados desenvolvido em Labview. Todo o sistema de aquisição de dados foi calibrado antes da realização dos ensaios.

3.3.2. 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 65-00, este equipamento, ilustrado na Fig. 3.5 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 65 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 ASTM 65-00);
- ✓ Carga de 120 N;
- ✓ Distância do ensaio de 1436 m.

O desgaste foi avaliado em função da perda de peso 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 imersas em acetona utilizando um equipamento de limpeza por ultra-som e, em seguida, secas com ar quente.

O tempo de ensaio foi igual a 15 min. (5 minutos de pré-desgaste e 10 min. 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 De 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.

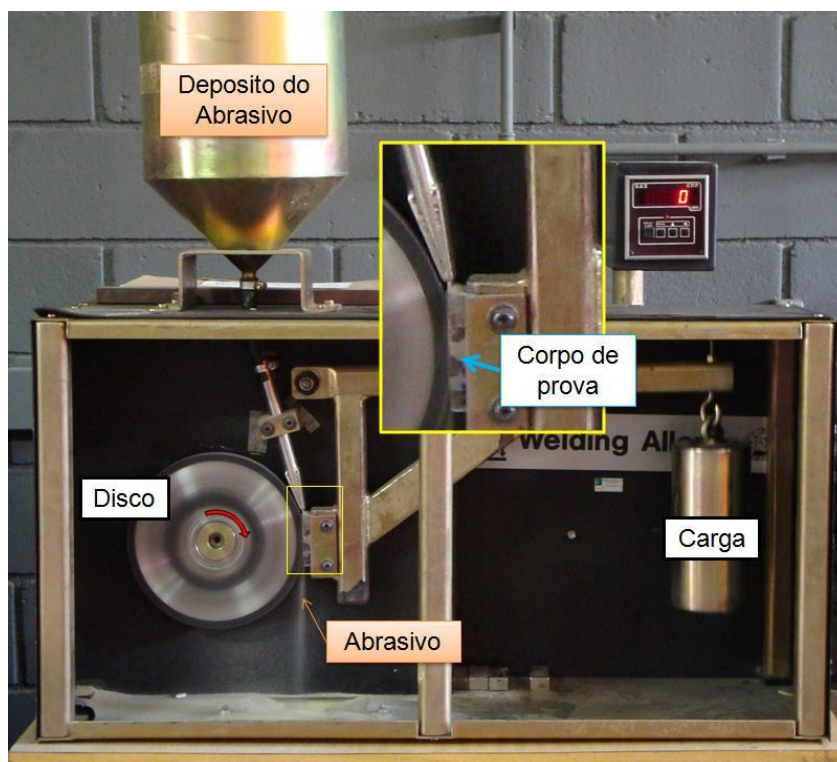


Figura 3.5 – Abrasômetro Roda de Borracha utilizado para a realização dos ensaios de desgaste.

3.3.3. *Ensaio por Líquidos Penetrantes*

Para a observação das trincas nos corpos de prova, além da inspeção visual foi utilizado o ensaio por líquido penetrante, o material para a detecção de descontinuidades superficiais com este método consiste em:

- Removedor METAL·CHECK E-59
- Penetrante Visível Lavável a Água METAL·CHECK VP-30
- Revelador Não Aquoso METAL·CHECK D-70.

O Ensaio por Líquidos Penetrantes foi realizado seguindo o procedimento citado por Andreucci (2008) baseado no Código ASME Sec. V Artigo 6, conforme descrito abaixo.

3.3.3.1. *Procedimento para a inspeção por Líquidos Penetrantes*

- Preparação da superfície

Já que a peça deve estar isenta de resíduos, sujeiras, óleo, graxa e qualquer outro contaminante que possa obstruir as aberturas a serem detectadas foi levada a cabo a limpeza utilizando um solvente. Neste caso, deu-se suficiente tempo para que o solvente se evapore das descontinuidades, pois sua presença pode prejudicar o teste.

- Aplicação do penetrante.

Foi aplicado na superfície um penetrante visível lavável a água em spray. O tempo de penetração, necessário para que o penetrante entre dentro das descontinuidades, foi de 7 minutos, de acordo com o recomendado pela norma para inspeção de soldadura nos aços.

- Remoção do excesso de penetrante

A remoção do excesso de penetrante foi feita mediante lavagem a água. Após esta lavagem a peça foi secada utilizando-se ar comprimido.

- Revelação

O revelador aplicado foi o Revelador não Aquoso em spray.

- Secagem e inspeção

Após o tempo de secagem foi efetuada a inspeção. Esta inspeção se realizou utilizando luz natural.

3.3.4. *Durômetro*

Para a medição de dureza Rockell C foi utilizado um durômetro METROLTEC, Fig. 3.6 utilizando a carga de 150 kg e pré-carga de 10 kgf. O durômetro possui pré-carga de 3 kgf

e de 10kgf, capacidade para ajuste de carga de 15, 30, 45, 60, 100 e 150 kgf , penetrador de diamante e padrão de dureza 60-66 HRC.

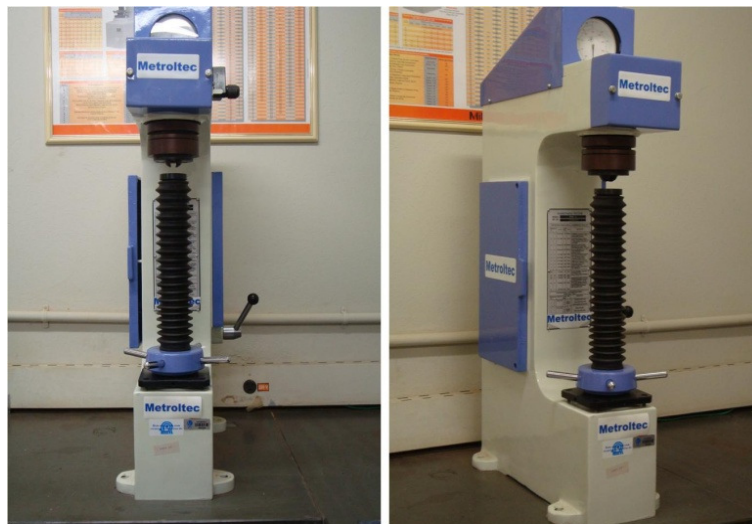


Figura 3.6 – Durômetro METROLTEC.

3.3.5. *Microscópio e Microdurômetro*

Para a obtenção da dureza do material foi utilizado um microdurômetro HMV SHIMADZU, Fig. 3.7, com carga máxima de 19,61 N com capacidade de ajuste de carga automático de 98,07 - 245,2 - 490,3 - 980,7mN e 1,96 - 2,942 - 4,903 - 9,807 e 19,61 N. As imagens para a avaliação metalográfica foram obtidas do mesmo microscópio ótico do microdurômetro (aumentos de 10X e 40X) com ajuda do programa HMV-WIN.

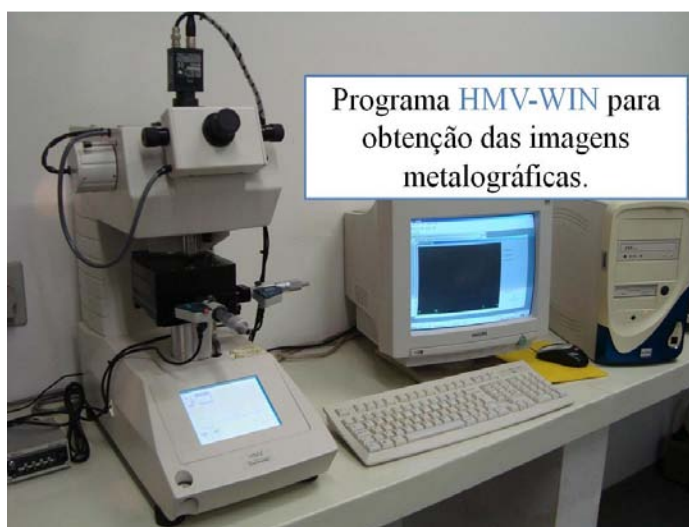


Figura 3.7 – Microscópio e Microdurômetro SHIMADZU

3.3.6. *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. 3.8, com discos de corte AROTEC ref. C.



Figura 3.8 – Cortadora Metalográfica TECLAGO Ref. CM 70.

3.3.7. *Equipamento de Polimento*

Para o polimento das amostras metalográficas foi utilizada uma polidora Struers Ref. Dap – 7 (Fig. 3.9), panos para polimento da Struers Ref. DP-Pan e DP-Mol, álcool como refrigerante e pasta de diamante de 1 μm , 3 μm e 6 μm .



Figura 3.9 – Polidora Metalográfica Struers Ref. Dap-7.

3.3.8. Retificadora

Para realizar a retificação dos corpos de prova usados no ensaio de desgaste foi utilizada uma retífica marca MELLO com velocidade 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.

3.4. Metodologia

3.4.1. Processo de soldagem

As soldas foram realizadas na bancada de soldagem (Fig. 3.2) descrita no Item 3.3.1, utilizando os processos de soldagem com Arame Tubular convencional e Arame Tubular com adição de arame não energizado, posição plana com a tocha na vertical formando um ângulo de 90° com a superfície da chapa. Nos testes com adição de arame não energizado, o suporte foi acoplado à tocha em disposição longitudinal “Tandem Wire”, Fig. 3.10, (ao longo do cordão de solda) na direção da velocidade de soldagem onde os dois arames atuam juntos um frente ao outro. O arame adicionado forma um ângulo de 32° com a horizontal. Este ângulo foi a melhor disposição para a montagem do suporte na tocha.

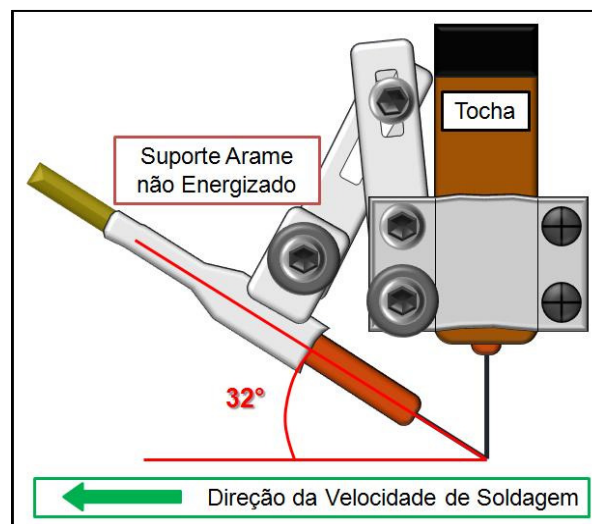


Figura 3.10 – Suporte acoplado ao Bocal da tocha de soldagem utilizado na adição de arame não energizado na disposição “Tandem”.

Realizaram-se os primeiros testes sem a adição de arame não energizado visando encontrar os melhores parâmetros de soldagem para cada um dos tipos de arames tubulares.

Foram utilizados inicialmente (como referência) os parâmetros de soldagem utilizados por Lima (2008). Os quais foram ajustados para a aplicação nesta pesquisa em função do tecimento utilizado durante a soldagem. A Fig. 3.11 mostra o esquema do sistema de tecimento da tocha utilizado.

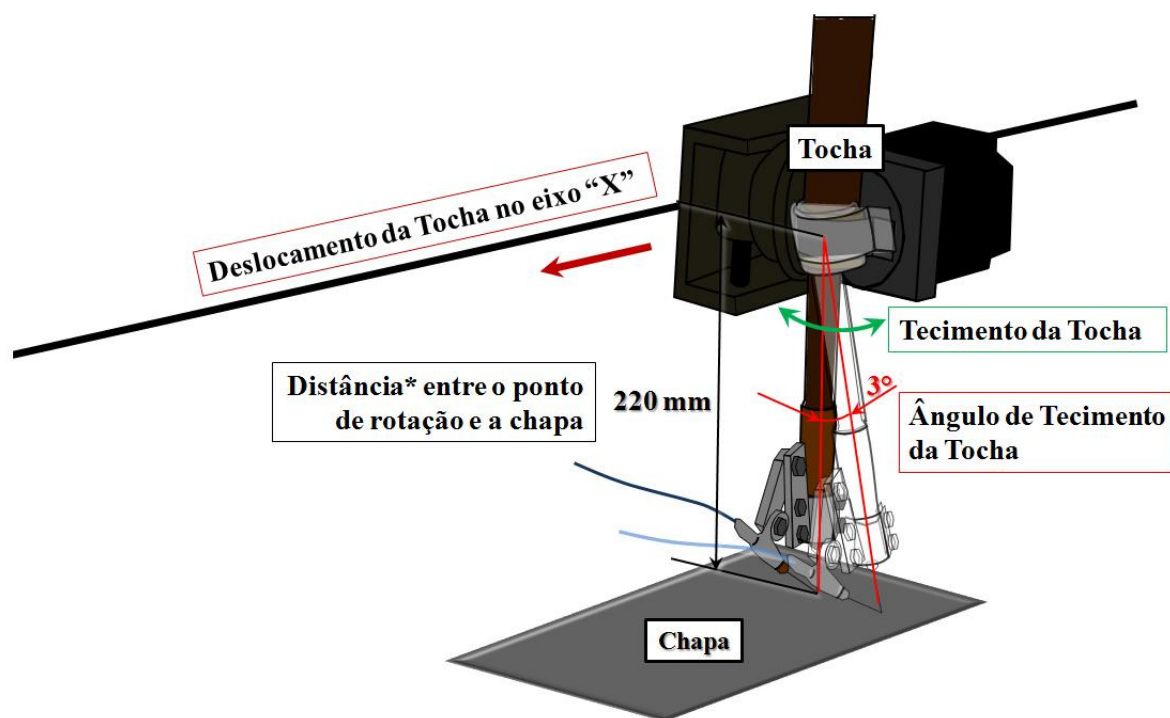


Figura 3.11 – Esquema do sistema de deslocamento e tecimento da tocha de soldagem. *A distância tomada com distância bico de contato peça igual a 30 mm.

Foram também realizados ensaios para a obtenção de uma condição de soldagem adequada utilizando arames tubulares e/ou maciços como arame não energizado.

Durante a realização dos testes sem adição de arame procurou-se manter uma relação constante entre a velocidade (quantidade total) de arame alimentado com a velocidade de soldagem com o objetivo de manter constante a quantidade de metal depositado por comprimento de solda. Este referencial foi a constante de deposição (C_d) igual a 32. Os ensaios estão apresentados e discutidos no Capítulo IV desta dissertação.

3.4.2. *Construção dos corpos de prova para o ensaio de desgaste*

Os revestimentos foram realizados nas chapas de aço indicadas no Item 3.1, em todos os casos foram feitos três cordões de soldagem de 150 mm de comprimento, a soldagem do segundo e terceiro cordão de solda foi feita com temperatura de interpasse de 25°C medida

utilizando um pirômetro digital. 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 Figura 3.12, as dimensões dos corpos de prova (75 x 25 x 12,5 mm) correspondem às exigidas pela norma ASTM G 65-00. A espessura do revestimento após a retifica ficou entre 3 e 4 mm.

Para a extração se utilizou a cortadora metalográfica descrita no Item 3.3.5. Após os corpos de prova foram retificados utilizando o equipamento descrito no Item 3.3.7.

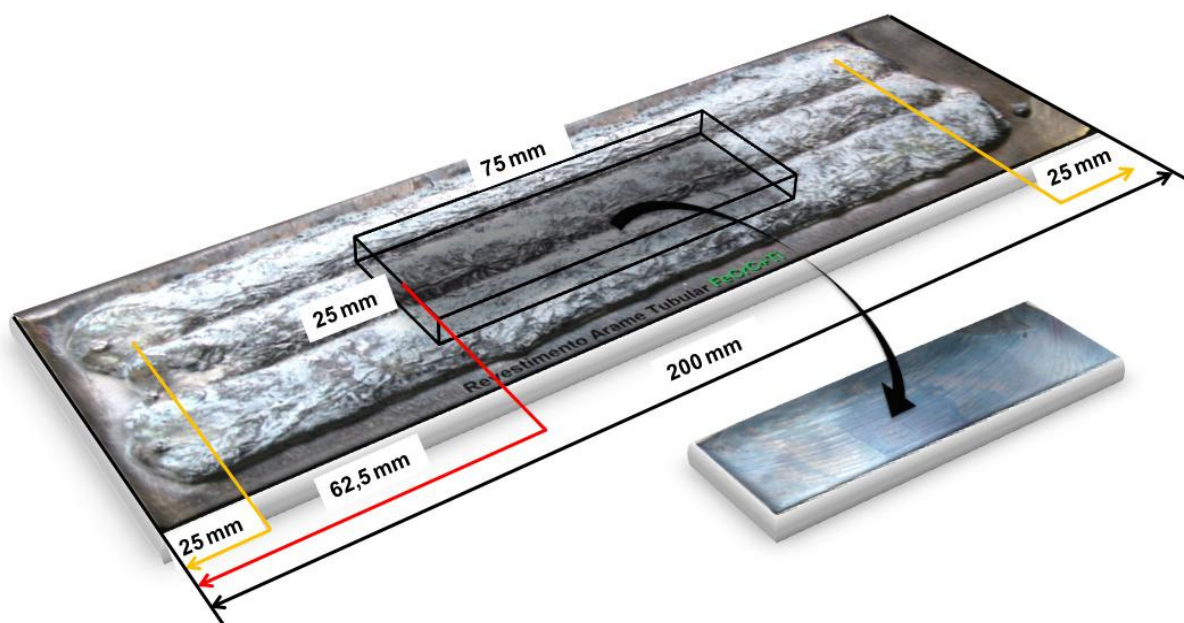


Figura 3.12 – Extração dos corpos de prova para o ensaio de desgaste.

3.4.3. 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.

3.4.3.1. Parâmetros geométricos do cordão de solda e do revestimento.

Para a avaliação dos parâmetros geométricos do cordão de solda tais como largura, reforço, penetração e a área fundida (A_f) e de reforço (A_r) para se determinar a diluição, ilustradas na Fig. 3.13, as chapas de teste foram cortadas a 100 mm do início do cordão de solda para os ensaios preliminares e no caso dos revestimentos a 65 mm das extremidades finais das chapas de teste. As superfícies transversais obtidas foram retificadas com lixa #80 atacadas com Nital 2% por 30 s e fotografadas com câmera fotográfica digital. Não foi

necessário levar este processo até o polimento devido à grande diferença na composição química entre o material do revestimento e o material do metal base.

As imagens digitais obtidas foram analisadas com ajuda do programa ImageJ. Este programa permite conhecer os dados do perfil do cordão de solda: áreas; reforço, penetração; largura.

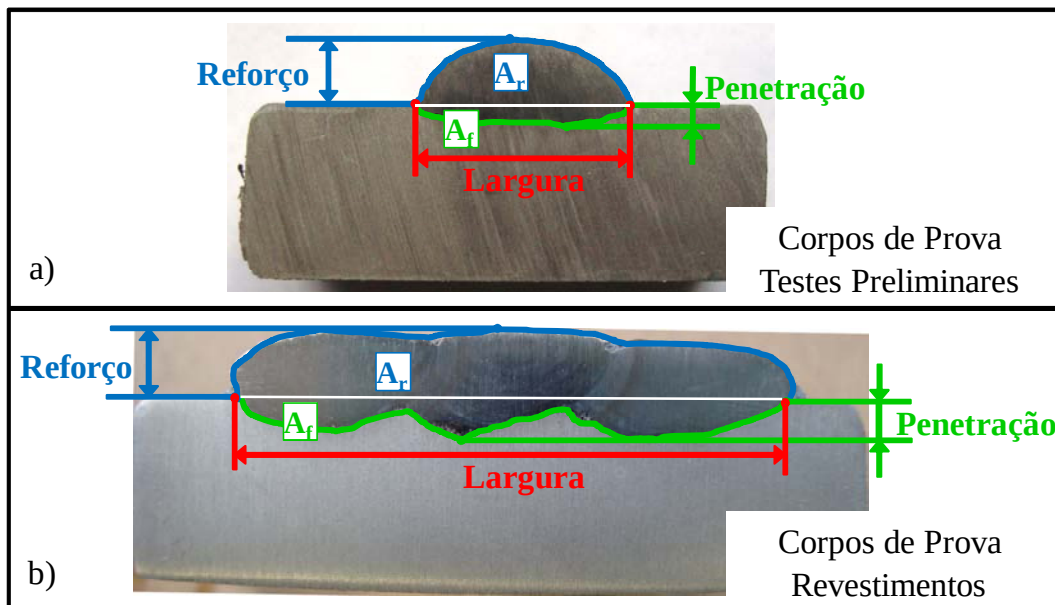


Figura 3.13 – Preparação para análise macrográfica e ilustração dos parâmetros geométricos, a) nos testes preliminares b) Revestimento.

Para a avaliação da penetração nos revestimentos tomou-se o maior valor entre os três cordões de solda.

3.4.3.2. *Diluição.*

A avaliação dos níveis de diluição (Dil) foi obtida através da relação entre a área fundida (A_f), Fig. 3.13, abaixo da superfície da chapa e a área total do cordão de solda, formada pela soma entre as áreas adicionada ou de reforço (A_r) e fundida, Fig. 3.13, pela utilização da Eq. 3.2.

$$Dil = \frac{A_f}{A_r + A_f} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.4.3.3. *Resistência ao Desgaste*

O valor da resistência ao desgaste (R_{desgaste}), inverso da taxa de desgaste, foi obtida mediante a Eq. (3.3) com os dados do desgaste (Desg_m), perda de massa, e a distância (D_{ensayo}) percorrida durante o ensaio igual a 1436 m.

$$R_{\text{desgaste}} = \left(\frac{\text{Desg}_m}{D_{\text{ensayo}}} \right)^{-1} [\text{mg/m}]^{-1} \quad (3.3)$$

3.4.3.4. Avaliação Microestrutural

Foram extraídas amostras de cada condição de consumível utilizada na avaliação do desgaste para análise microestrutural seguindo o mesmo procedimento descrito para as chapas dos testes preliminares (Item 3.4.1). Estas amostras foram embutidas, desbastadas com lixa #320 seguida da #220 e pastas de diamante de 6 μm e 3 μm e polidas com pasta de diamante de 1 μm . Posteriormente foram atacadas com reagente Nital 2% por 10s e levadas ao microscópio ótico para revelar os micro-constituintes. Para a revelação de carbonetos foram utilizados os mesmos procedimentos de preparação e dois tipos de ataque químico: com o reagente Kalling por 10s e com o reagente Murakami a uma temperatura de 60° por 10s.

3.5. Procedimento Experimental

Para o desenvolvimento da pesquisa foi seguido o procedimentos descrito a seguir:

Primeira Fase:

- **Testes Preliminares para selecionar os Parâmetros de Soldagem do arame tubular de FeCrC+Nb:**
 1. Realizar testes variando os parâmetros de soldagem V_{sold} , V_{alim} e Tensão, a partir dos parâmetros encontrados por Lima (2008) para uma liga semelhante.
 - Mediante avaliação visual das características como largura, reforço, presença de descontinuidades e geração de respingos, fazer uma pré-seleção dos parâmetros que apresentaram melhores resultados.
 2. Realizar a soldagem com os parâmetros pré-selecionados e escolher mediante análise das características geométricas (largura, penetração, reforço, área fundida, área de reforço e diluição) o parâmetro de soldagem que mais se aproximou das características desejadas nos revestimentos ($\downarrow$ diluição, $\downarrow$ penetração, $\uparrow$ largura e $\uparrow$ reforço).

➤ **Testes Preliminares para selecionar os Parâmetros de Soldagem do arame tubular de FeCrC+Ti:**

1. Realizar testes com as mesmas condições de soldagem do arame FeCrC+Nb variou a DBCP para obter aproximadamente a mesma corrente de soldagem e resultados satisfatório quanto as características geométricas do cordão de solda.

Segunda Fase:

➤ **Testes variando parâmetros de Tecimento:**

1. Realizar testes variar os parâmetros de tecimento tais como amplitude, frequência do tecimento e paradas laterais na soldagem com os parâmetros escolhidos para os dois arames.
2. Selecionar mediante avaliação visual do aspecto da solda os parâmetros que apresentam melhor resultado (↑ largura, ↑ reforço e linearidade no cordão).

Terceira Fase:

➤ **Testes adicionando arame não energizado:**

1. Testes variando a V_{alim} do arame não energizado até obter a melhor condição de soldagem, isto é estabilidade durante a soldagem e o melhor posicionamento entre arame não energizado e poça de fusão.
2. Inspeção visual e de Líquido Penetrante dos cordões de solda que apresentaram melhores resultados no item acima.
3. Escolher as condições de consumível e velocidade do arame não energizado que apresentaram melhores resultados quanto a menor quantidade de trincas de solidificação.

Quarta Fase:

➤ **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 (com e sem adição de arame não energizado).
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.

- c. Inspeção visual e de Líquido Penetrante para verificação de descontinuidades nos corpos de prova de desgaste.
- 4. 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.
- 5. Avaliação da dureza dos revestimentos.
- 6. Análise microestrutural dos revestimentos.

CAPÍTULO IV

TESTES PRELIMINARES

Neste capítulo serão apresentados os trabalhos preliminares realizados para o direcionamento da dissertação de mestrado, quanto à determinação mais adequada dos parâmetros de soldagem (corrente, tensão, velocidade de soldagem, velocidade de alimentação do arame não energizado e ângulo de oscilação da tocha) para os consumíveis utilizados. Foram também realizados desgastes do metal de base para obter conhecimento do equipamento e ter um parâmetro de referência para os outros ensaios com revestimento.

4.1. Parâmetros de Soldagem

Para os testes preliminares foram utilizadas chapas de aço carbono de dimensões 200 x 38,1 x 12,7 mm, como descritas no Item 3.1, com o objetivo de encontrar os melhores parâmetros de soldagem, isto é, obter uma maior largura, baixa diluição e penetração do cordão depositado em passe único. Utilizou-se como referência os parâmetros obtidos por Lima (2008), Tab. 4.1, para os dois arames tubulares auto-protégidos utilizados neste trabalho, FeCrC+Nb e FeCrC+Ti.

Tabela 4.1 – Parâmetros para a soldagem das chapas de testes e confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste. $k_s = 20$ e $k_d = 5$ sem oscilação da tocha (obtida de Lima (2008)).

Arame	Diâmetro [mm]	V_{alim} [m/min]	V_{sold} [cm/min]	U_r [V]	DBCP [mm]	I_m [A]
FeCrC+Nb	1,6	10	50	28	30	270,4
FeCrC+Ti	1,6	10	50	28	32	269,3

Onde: I_m = corrente média; U_r = tensão de referência; DBCP= distância bico de contato-peça; k_s = Indutância de subida; k_d = Indutância de descida.

Os parâmetros na Tab. 4.1 apresentam uma condição de transferência metálica por curto-circuito guiado pelo fluxo interno do arme eletrodo, como mostrado no trabalho de Lima (2008). Para um melhor entendimento deste tipo de transferência a Fig. 4.1 mostra uma sequência de fotos ilustrando esta forma de transferência, obtida para o arame eletrodo FeCrC+Nb com os parâmetros de soldagem apresentada na Tab. 4.1.

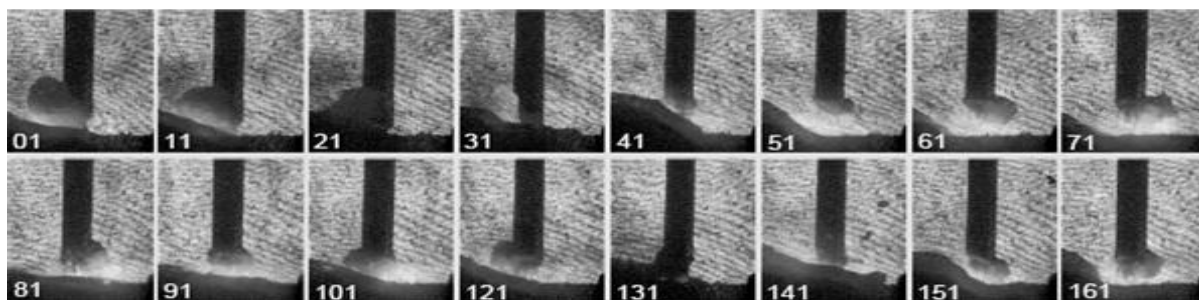


Figura 4.1. – Sequência de imagens da transferência por curto-circuito guiado pelo fluxo com intervalo de 5 ms entre quadros (LIMA, 2008).

A composição química e o fabricante dos arames tubulares desta pesquisa são diferentes dos utilizados na pesquisa de Lima (2008). Desta forma, para buscar uma condição próxima a apresentada na Tab. 4.1 sem oscilação transversal da tocha, os primeiros testes foram realizados com o arame FeCrC+Nb variando os valores de tensão, de indutância, da velocidade de alimentação e da velocidade de soldagem (Tab. 4.2) deixando o comprimento dos cordões de solda de 150 mm.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes preliminares com FeCrC+Nb.

Teste #	Arame tubular	V_{sold} [mm/min]	V_{alim} [m/min]	Tensão [V]	k_s	k_d	DBCP [mm]
1	FeCrC+Nb	500	10	28	7	1	30
2	FeCrC+Nb	450	10	28	5	1	30
3	FeCrC+Nb	450	10	26	7	1	30
4	FeCrC+Nb	450	10	27	7	1	30
5	FeCrC+Nb	450	9	27	7	1	30
6	FeCrC+Nb	400	10	28	7	1	30
7	FeCrC+Nb	400	8	28	7	1	30
8	FeCrC+Nb	350	8	28	7	1	30
9	FeCrC+Nb	350	7	26	7	1	30
10	FeCrC+Nb	300	8	28	7	1	30
11	FeCrC+Nb	200	8	28	7	1	30

Onde: V_{sold} : Velocidade de soldagem; V_{alim} : Velocidade de alimentação; k_s : Indutância de subida; k_d : Indutância de descida; DBCP: Distância bico de contato-peça.

Após a soldagem realizou-se uma avaliação visual do cordão de solda e foram escolhidos os três cordões que apresentaram o melhor aspecto visual (cordão liso e com menores níveis de respingo) para uma análise do aspecto dimensional do cordão. Os melhores resultados foram os testes 7, 10 e 11 da Tab. 4.2 que estão mostrados na Fig. 4.2. Estes cordões foram cortados em duas seções transversais (no meio e no final do cordão), lixados e atacados com Nital 2%. A Tab. 4.3 mostra os valores médios dos parâmetros dimensionais dos cordões (largura, reforço, penetração e diluição (Fig. 4.3)).

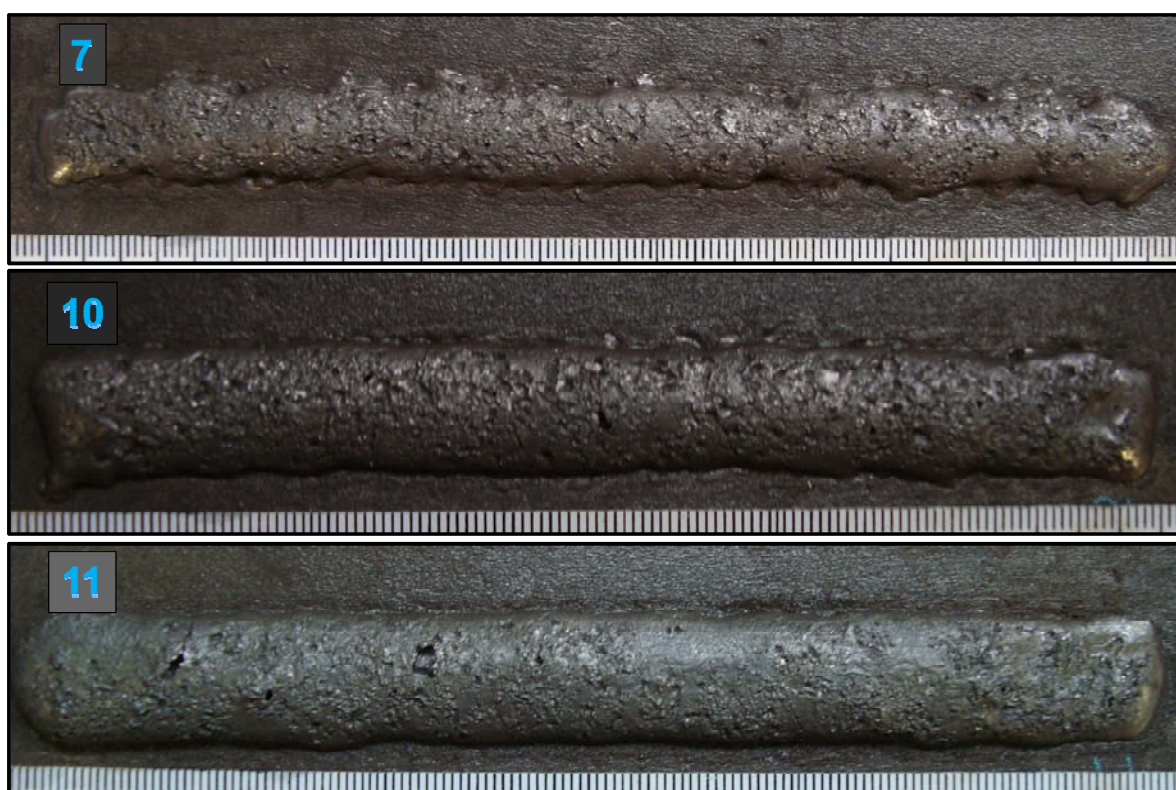


Figura 4.2 – Aparência dos cordões de solda com três velocidades de soldagem diferentes, 7: 400 mm/min, 10: 300 mm/min, 11: 200 mm/min.

Tabela 4.3 – Parâmetros geométricos do cordão de solda para as três condições escolhidas, conforme Tabela 4.2, $V_{\text{alim}} = 8\text{m/min}$ e Tensão = 28V.

Teste No,	V_{sol} [mm/min]	I_m [A]	Reforço [mm]	Largura [mm]	Penetração [mm]	A_f [mm ²]	A_r [mm ²]	Diluição [%]
7	400	260	2,92	10,12	1,16	12,94	7,11	35,45
10	300	284	3,47	13,31	1,68	42,30	19,26	31,25
11	200	298	4,35	14,98	1,69	52,23	19,23	26,94

Onde: I_m : Corrente Média, V_{sold} : Velocidade de soldagem; A_f : Área de Reforço; A_r : Área fundida.

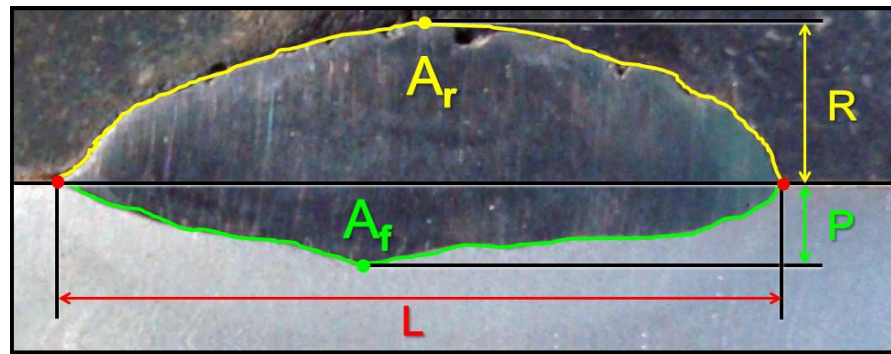


Figura 4.3 – Parâmetros dimensionais dos cordões L: largura, R: reforço, P: penetração, A_f : Área fundida, A_r : Área de Reforço.

Observa-se na Tab. 4.3 que o valor da diluição diminuiu com a diminuição da velocidade de soldagem, de 35,45% com $V_{sol} = 400$ mm/min a 31,25% com $V_{sol} = 300$ mm/min e de 31,25% a 26,94% com $V_{sold} = 200$ mm/min. Isto é possível devido ao aumento da quantidade de metal depositado (Área de reforço), onde o arco fica concentrado sobre a região de metal depositado. Vários autores como Conde (1986), Kannan e Murugan (2006), citam que nos revestimentos é desejável baixa diluição para diminuir a influencia da composição do substrato nas propriedades do mesmo. Com isto, foram escolhidos os parâmetros de soldagem correspondentes ao teste No. 11 (Tab. 4.2) por apresentar menor diluição no arame de liga FeCrC+Nb, e ter as características geométricas desejadas tais como maior largura, maior reforço além de verificar visualmente uma menor quantidade de respingo gerada durante o processo.

Foram também realizados ensaios preliminares com o arame FeCrC+Ti variando a velocidade de soldagem, a velocidade de alimentação e a tensão, tendo como base os parâmetros achados por Lima (2008) para estes dois arames (Tab. 4.1). A Tab. 4.4 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nesta etapa.

Tabela 4.4 – Parâmetros de soldagem utilizados nos testes preliminares com FeCrC+Ti.

Teste #	Arame tubular	V_{sold} [mm/min]	V_{alim} [m/min]	Tensão de referencia [V]	k_s	k_d	DBCP [mm]
1	FeCrC+Ti	500	10	28	7	1	32
2	FeCrC+Ti	200	8	28	7	2	30
3	FeCrC+Ti	200	8	28	7	1	28

Onde: V_{sold} : Velocidade de soldagem; V_{alim} : Velocidade de alimentação; k_s : Indutância de subida; k_d : Indutância de descida; DBCP: Distancia Bico-Contato-Peça.

Analizando visualmente os cordões de solda obtidos com os parâmetros da Tab. 4.4, observou-se que os melhores resultados com base no aspecto do cordão de solda foram os testes com velocidade de soldagem de 200 mm/min e velocidade de alimentação de 8 mm/min (ensaio 3 da Tab. 4.4).

Após ter conseguido os parâmetros de soldagem para cada arame procedeu-se realizar os testes fazendo tecimento, Fig. 4.4. Após dez ensaios de soldagem variando a amplitude e frequência de oscilação da tocha (entre 2,5° e 3° cada um grau e 1,2Hz e 1,7Hz cada 0,1Hz), além de experimentar com e sem tempos de paradas laterais, percebeu-se que a melhor condição para os dois arames foi um ângulo de oscilação da tocha em 3 graus e uma frequência de 1,6Hz, passo de 13 mm e sem tempos de paradas laterais.

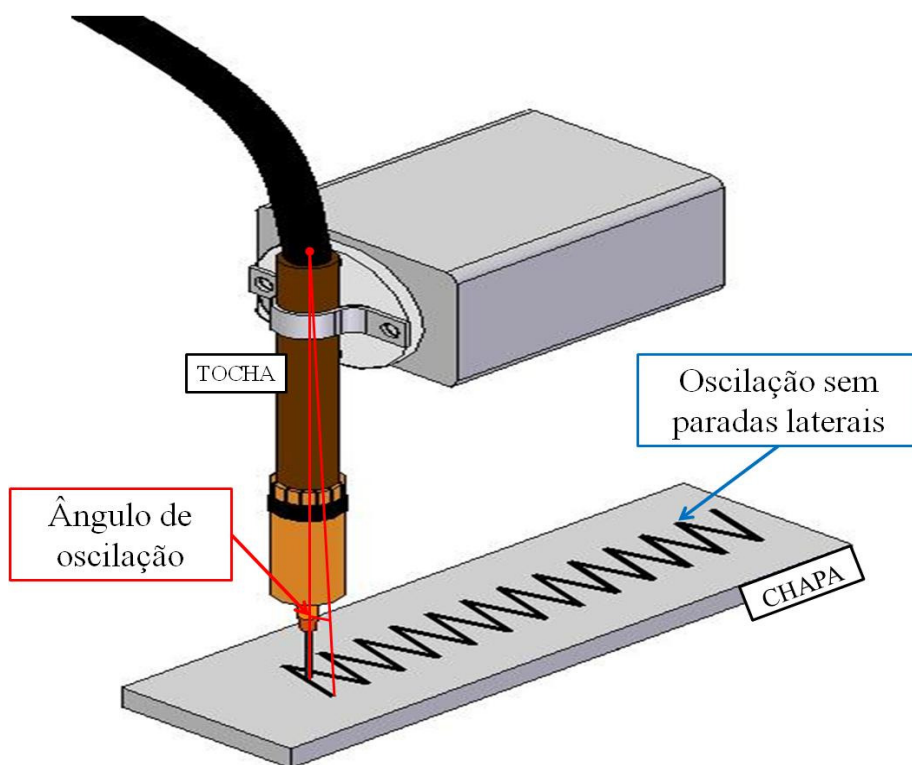


Figura 4.4 – Esquema de tecimento da tocha de soldagem.

A Tab. 4.5 apresenta os parâmetros de soldagem que serão utilizados com os dois arames tubulares quando utilizados como arame energizado na soldagem dos revestimentos. Os valores de corrente informados na Tab. 4.5 são valores médios obtidos da aquisição de dados e os valores de tensão correspondem à condição imposta na fonte de soldagem.

Tabela 4.5 – Parâmetros de soldagem encontrados para cada arame tubular a serem usados nos testes do laboratório como arame energizado.

Arame	V_{sold} [mm/min]	V_{alim} [m/min]	I_m [A]	I_{rms} [A]	Tensão de referência [V]	DBCP [mm]	A_m [°]	f [Hz]
FeCrC+Nb	200	8	291	303	28	30	3	1,6
FeCrC+Ti	200	8	260	269	28	28	3	1,6

Onde: I_m : Corrente média, I_{rms} : corrente RMS, V_{sold} : Velocidade de soldagem; V_{alim} : Velocidade de alimentação A_m : Amplitude em graus; f: frequência da oscilação; k_s : Indutância de subida; k_d : Indutância de descida; DBCP: Distancia bico-contato-peça.

A Fig. 4.5 apresenta os oscilogramas de corrente adquiridos na soldagem de um cordão de solda realizados com os arames de FeCrC+Ti (Fig. 4.5a) e de FeCrC+Nb (Fig. 4.5b) e os parâmetros de soldagem apresentados na Tab. 4.5.

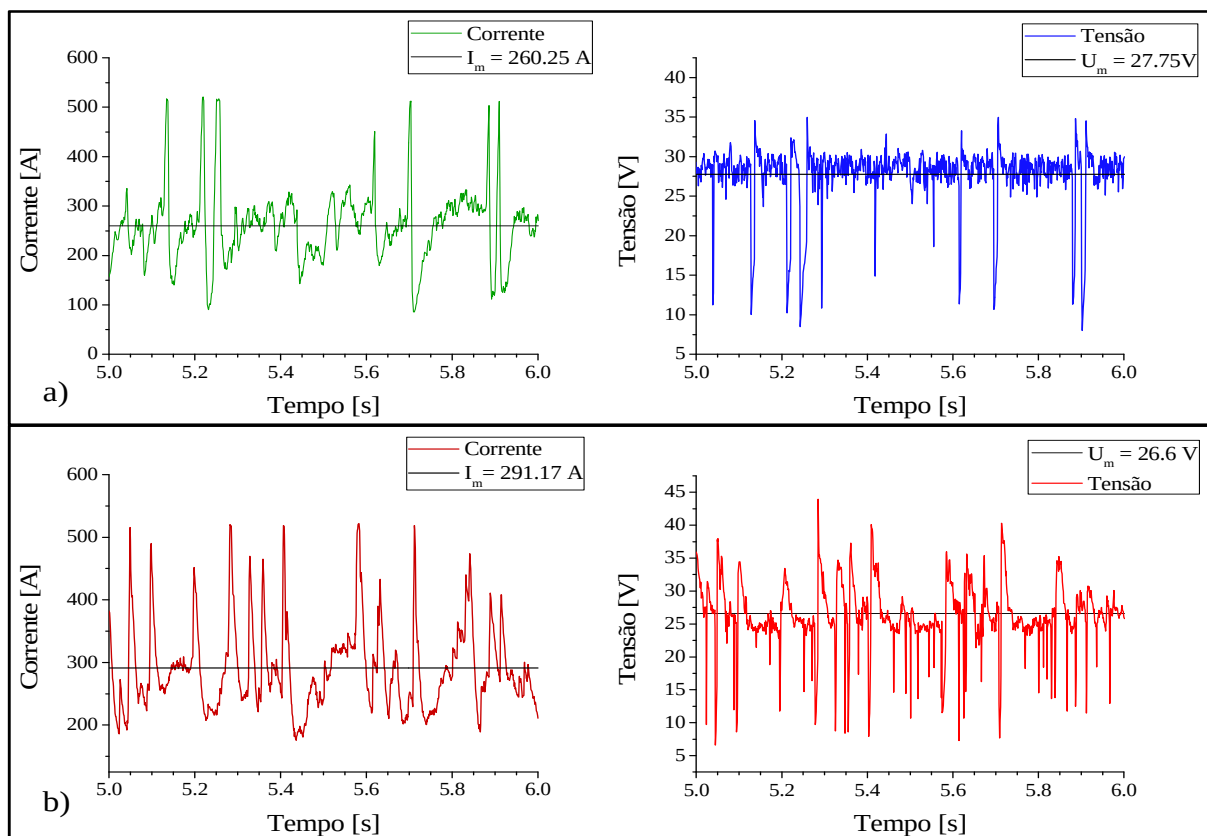


Figura 4.5 – Oscilogramas de corrente e tensão de soldagem de, a) arame de liga FeCrC+Ti e b) arame de liga FeCrC+Nb.

Pode-se observar que apesar de ter sido usado parâmetros de soldagem semelhantes como a Tensão, V_{alim} , e V_{sold} , os oscilogramas têm características bem distintas como valores

de corrente média e frequência de curtos-circuitos diferentes. Na Fig. 4.5b observa-se que os sinais de soldagem do arame tubular de FeCrC+Nb produziram oscilogramas mais uniformes, demonstrando uma soldagem mais estável.

Após a soldagem foi realizada a inspeção nos cordões de solda por líquido penetrante, conforme procedimento apresentado no Item 3.3.3 do Capítulo III. A Fig. 4.6 apresenta o aspecto visual dos cordões onde se observa a presença de trincas transversais na liga de FeCrC+Nb. Porosidades também são observadas no arame de liga FeCrC+Nb e de liga FeCrC+Ti.

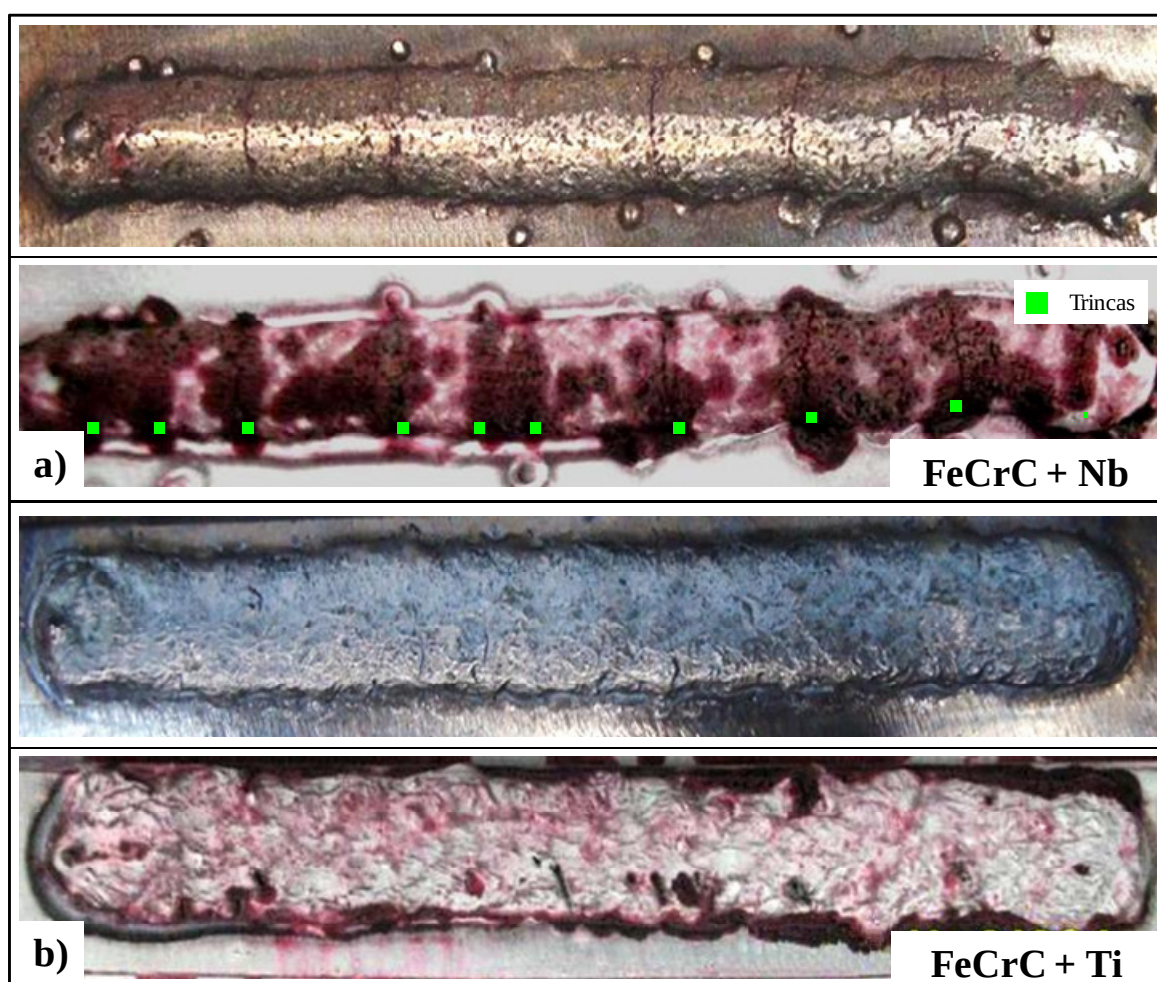


Figura 4.6 – Aspecto visual dos cordões de solda dos arames de FeCrC+Nb e FeCrC+Ti antes e após o ensaio por líquidos penetrantes, a) FeCrC+Nb e b) FeCrC+Ti.

A Tab. 4.6 apresenta os dados das características geométricas dos cordões de solda dos dois arames. Pode-se observar que os valores das características geométricas do arame de liga FeCrC+Nb mudaram quando aplicado o cordão de solda utilizando tecimento.

Tabela 4.6 – Características geométricas dos cordões de solda dos arames de FeCrC+Ti e FeCrC+Nb.

Consumível	Reforço [mm]	Penetração [mm]	Largura [mm]	A _f [mm ²]	A _r [mm ²]	Diluição [%]
FeCrC+Ti	3,99	2,25	17,38	31,26	51,56	37,74
FeCrC+Nb	4,64	1,47	16,89	17,95	56,64	24,06

Onde: A_f: Área fundida e A_r: Área de Reforço.

Na Tab. 4.6 é possível avistar uma diminuição na penetração de 1,69 mm (Teste No. 11 Tab. 4.3) a 1,47 mm ao igual que a área fundida e a Diluição do cordão de solda (de 19,23 mm² a 17,95 mm² e de 26,94% a 24,06% respectivamente). Isto demonstra que a utilização da técnica de tecimento na aplicação da soldagem de revestimentos é efetiva, pois se consegue características melhores em termo de largura e diluição para a aplicação de revestimento. Segundo a literatura (Conde, 1986, Kannan e Murugan, 2006) é desejável baixa diluição nos revestimentos para não se ter influencia do metal de base nas propriedades do revestimento.

4.2. Adição de arame não energizado

Durante a escolha dos parâmetros de soldagem verificou-se a presença de trincas no arame tubular FeCrC+Nb com um passe de soldagem. Desta forma, procurando diminuir a ocorrência destas trincas além de aumentar a produtividade do processo foram realizados diferentes testes com adição de arame não energizado com composições químicas diferentes. Para a adição do arame não energizada foram utilizados quatro tipos de arames maciços de aço inoxidável e um de aço comum e os arames tubulares de liga FeCrC e FeCrC+Nb. A Tab. 4.7 mostra os parâmetros de soldagem e os consumíveis utilizados.

A velocidade de alimentação do arame não energizado foi inicialmente ajustada em 2,5 m/min, conforme indicação no trabalho de Cruz Junior, Ferraresi e Braga (2009), que cita que a melhor condição de velocidade do arame não energizado é aproximadamente 1/3 da velocidade do arame energizado. Entretanto, esta condição não foi viável para os arames tubulares utilizados na adição de arame não energizado, devido à grande instabilidade do arco, não sendo possível a soldagem de forma adequada. Com isso, passou-se a realizar testes variando em 0,1 m/min desde 2,5 até 0,5 m/min a velocidade de alimentação do arame não energizado até obter uma condição mais estável do arco e consequentemente do cordão de solda, sendo a Valim= 1m/min a que apresentou melhores resultados. A condição de

soldagem do Teste No. 8 foi levada em conta por apresentar no cordão de solda, após inspeção visual, diminuição no número de trincas presentes no arame tubular de liga FeCrC+Nb.

Tabela 4.7 – Consumíveis e Parâmetros de soldagem dos testes com adição de arame não energizado. $V_{\text{sold}} = 200 \text{ mm/min}$, $V_{\text{alim}} = 8 \text{ m/min}$, $A_m = 3^\circ$, $f = 1,6 \text{ Hz}$

Teste No.	V_{alim}^2 [m/min]	Tensão [V]	k_s	k_d	DBCP	Arame Tubular	Adição de:
1	---	28	7	1	28	FeCrC+Ti	---
2	1	28	7	1	28	FeCrC+Ti	FeCrC
3	1	28	7	1	28	FeCrC+Ti	FeCrC+Nb
4	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	---
5	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER70S6
6	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER430Nb
7	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER309LSi
8	2	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER308L
9	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER308L
10	1	28	7	1	30	FeCrC+Nb	ER316

Onde, V_{sold} : Velocidade de Soldagem, V_{alim} : Velocidade de alimentação, V_{alim}^2 : Velocidade de alimentação do arame não energizado, k_s : Indutância de subida, k_d : Indutância de descida, DBCP: Distância Bico-Contato-Peça, A_m : Amplitude do tecimento, f : Frequência do tecimento; --- Não aplica,

Após a soldagem, os corpos de prova foram avaliados mediante inspeção visual e líquidos penetrantes, esta avaliação foi realizada em um comprimento de 100 mm, região central do cordão, conforme mostrado na Fig. 4.7. Os resultados da contagem do número de trincas após ensaio de líquidos penetrantes são apresentados na Tab. 4.8. O arame tubular FeCrC+Nb apresentou trincas com e sem a adição do arame não energizado. Entretanto, observou-se uma quantidade menor de trincas com a adição dos arames não energizados, A melhor condição foi com adição do arame não energizado ER308L (Teste No. 8), condição esta que será analisada em ensaio de desgaste abrasivo com roda de borracha,

No caso do arame tubular FeCrC+Ti e deste com adição de arame não energizado não foi encontrada nenhuma trinca nas condições de ensaios utilizadas. Desta forma os testes 1, 2 e 3 serão analisados em ensaios de desgaste abrasivo.

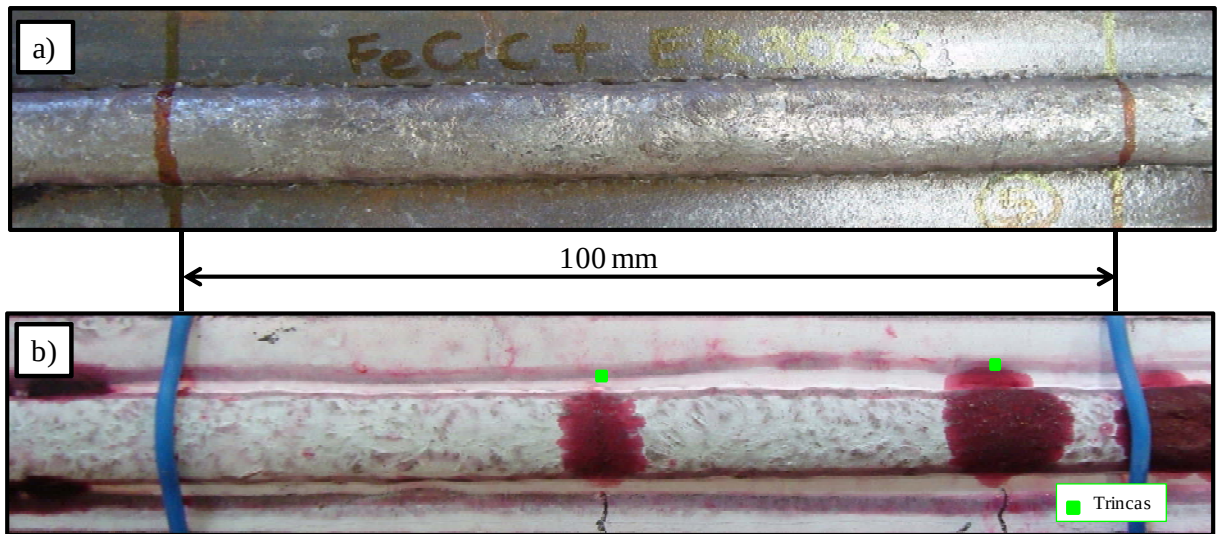


Figura 4,7 – a) Disposição dos cordões de solda para a avaliação por inspeção visual e líquidos penetrantes, b) Exemplo de um dos cordões de solda examinado por líquidos penetrantes.

Tabela 4,8 – Quantidade de trincas registradas nos cordões de solda com cada combinação arame tubular com adição de arame não energizado.

Teste No,	Arame Tubular	Adição	No, de Trincas
1	FeCrC+Ti	:::	0
2	FeCrC+Ti	FeCrC	0
3	FeCrC+Ti	FeCrC+Nb	0
4	FeCrC+Nb	:::	9
5	FeCrC+Nb	ER70S6	7
6	FeCrC+Nb	ER430Nb	5
7	FeCrC+Nb	ER309LSi	7
8	FeCrC+Nb	ER308L	2
9	FeCrC+Nb	ER308L	7
10	FeCrC+Nb	ER316	6

4.3. Ensaios de desgaste preliminares

Foram realizados testes em 5 amostras de aço sem revestimento procurando com isso obter conhecimento do equipamento de desgaste e avaliar a mudança que o revestimento irá exercer sob o mesmo. As dimensões das amostras (75 x 25 x 12,7mm) correspondiam às recomendações da norma ASTM G65-00. Foi efetuado um pré-desgaste de 2 min onde o material entrará em regime permitindo nos próximos 10 minutos de ensaio uma continuidade

nos ensaios e nos valores de desgaste. A Tab. 4.9 mostra os resultados de desgaste das 5 amostras.

Tabela 4,9 – Resultados dos ensaios de desgaste nas amostras de aço 1020.

C,P #	Peso das amostras [g]		Desgaste [mg]	Média de Desgaste [mg]	DP Desgaste
	Após Pré-desgaste	Após Desgaste			
1	192,1588	188,9149	3243,9000	3148,94	269,64
2	190,7275	187,1732	3554,3000		
3	193,0915	190,1698	2921,7000		
4	193,3137	190,4208	2892,9000		
5	193,0201	189,8882	3131,9000		

Onde, CP: Corpo de Prova, DP: Desvio Padrão.

Pode se observar nos resultados apresentados na Tab. 4.9 valores de perda de massa muito grande quando comparados com os valores de perda de massa dos revestimentos apresentados na literatura (LIMA, 2008; BUCHELY et al, 2005) que são em média menores a 100 mg.

Estes valores de desgaste do metal base serão comparados com os valores obtidos nos revestimentos realizados no presente estudo.

CAPÍTULO V

AValiação DE DESGASTE NO LABORATÓRIO

Neste capítulo são apresentados os resultados conseguidos mediante a utilização da metodologia descrita no Capítulo III referentes à avaliação de desgaste e desempenho de cada revestimento. Inicialmente é descrita a soldagem e extração dos corpos de prova para o 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 dos revestimentos. Por ultimo, são apresentadas as microestruturas dos revestimentos

5.1. Soldagem dos corpos de prova e preparação das chapas de teste.

As chapas de testes 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 150 mm com passo de 13 mm (entre os centros do cordão) para completar a área a ser revestida. A Tab. 5.1 apresenta as condições de soldagem, mantendo constante às seguintes variáveis de soldagem: velocidade de soldagem ($V_{\text{sold}} = 200 \text{ mm/min}$); amplitude de tecimento ($A_m = 3 \text{ graus}$); frequência de tecimento ($f = 1,6 \text{ Hz}$); indutância de subida ($k_s = 7$) e indutância de descida ($k_d = 1$). Os valores de corrente informados na Tab. 5.1 são valores médios obtidos da aquisição de dados e os de tensão correspondem à condição imposta na fonte de soldagem.

Para avaliação de desgaste foram soldados 25 corpos de prova, sendo cinco corpos de prova para cada condição de consumível. O procedimento desses ensaios e a obtenção dos corpos de prova estão apresentados no Item 3.4.2, Fig. 3.12, do Capítulo III.

Tabela 5.1 - Parâmetros de soldagem das chapas de testes para a confecção dos corpos de prova para ensaio de desgaste.

Condição de consumível	Arame Tubular	Adição	V_{alim} [m/min]	V_{alim}^2 [m/min]	Tensão de referencia [V]	I_m [A]	I_{rms} [A]	DBCP [mm]
1	FeCrC+Ti	:::	8	:::	28	260	269	28
2	FeCrC+Ti	FeCrC	8	1	28	261	265	28
3	FeCrC+Ti	FeCrC+Nb	8	1	28	250	252	28
4	FeCrC+Nb	:::	8	:::	28	291	303	30
5	FeCrC+Nb	ER308L	8	2	28	289	293	30

Onde: I_m : Corrente Média, Valim: Velocidade de alimentação, V_{alim}^2 : Velocidade de alimentação do arame não energizado, DBCP: Distância Bico de Contato-Peça.

Da Fig. 5.1 a Fig. 5.5 mostram-se os revestimentos feitos com cada condição de consumível descrita na Tab. 5.1. Nestas figuras foram também indicadas as discontinuidades verificadas através do ensaio visual, ocorrido após a limpeza dos corpos de prova.



Figura 5.1 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti



Figura 5.2 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC.



Figura 5.3 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb.

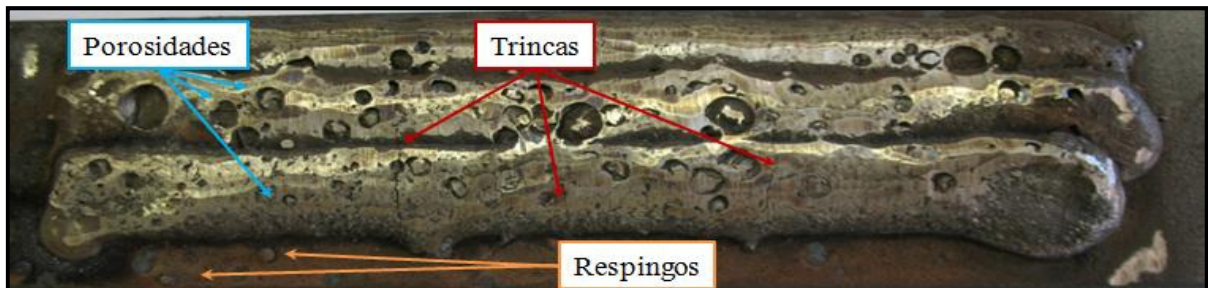


Figura 5.4 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas com FeCrC+Nb.

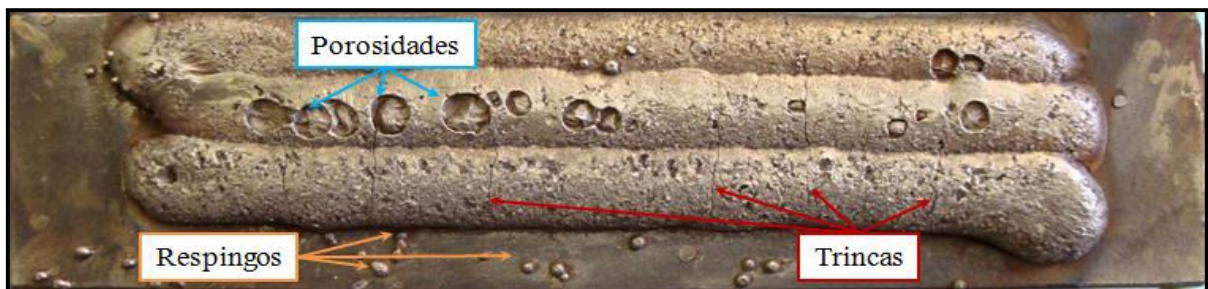


Figura 5.5 – Detalhe da Superfície das chapas revestidas FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L.

Nos revestimentos (Fig. 5.1 a Fig. 5.5) pode-se observar a presença de discontinuidades, prevalecendo as porosidades e as trincas, transversais ao cordão de solda, especialmente nos revestimentos da liga de FeCrC+Nb e nos revestimentos feitos com FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L. As superfícies dos revestimentos de FeCrC+Ti e da sua mistura com as ligas de FeCrC e FeCrC+Nb apresentaram porosidades de menor tamanho e em menor quantidade, sem a visualização de trincas superficiais

Durante a confecção dos revestimentos da liga de FeCrC+Nb (condição de consumível 4 na Tab. 5.1) e da liga FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L

(condição de consumível 5) observou-se a presença de trincas transversais ao cordão de solda, fenômeno que já tinha sido observado na soldagem de um só cordão (Item 4.2 do capítulo IV). Este fato se deve a presença de nióbio que, segundo Posch et al. (2006), em teores superiores ao 2,5%wt. em ligas de alto teor de cromo (aproximadamente 20%wt.) promove a trinca de solidificação.

Na confecção dos revestimentos feitos com a condição de consumível 5 (Tab. 5.1), Fig. 5.5, observou-se um aumento na quantidade de trincas após a soldagem do segundo e do terceiro cordão. Depois da soldagem do primeiro cordão de solda do revestimento foram verificadas (em ensaio visual) duas trincas, concordando com a quantidade de trincas encontradas nos testes preliminares. Na soldagem do segundo cordão foi verificada a presença de 4 trincas que se propagavam até o primeiro cordão. Na soldagem do ultimo cordão de solda do revestimento foi possível observar 6 trincas, que também se propagavam para o cordão da solda anterior. Este fato é provavelmente devido ao aumento da tensão residual com a quantidade de cordão aplicado no revestimento com a presença de nióbio.

Nos revestimentos com arame tubular FeCrC+Ti como arame energizado (condição de consumível 1, 2 e 3), Fig. 5.1, Fig. 5.2 e Fig. 5.3 respectivamente, não foi percebido a presença de trincas no ensaio visual. Este fato se deve provavelmente as diferenças na composição química do revestimento, menores teores de Cromo e Carbono e a presença de Molibdênio e Titânio, quando comparado com o da liga de nióbio.

A Fig. 5.6 ilustra a seção transversal das chapas de teste de cada condição de consumível da Tab. 5.1, permitindo visualizar o aspecto geométrico do revestimento. Verifica-se para todas as condições de consumíveis a presença de descontinuidades como porosidades e inclusões. Dependendo da aplicação do revestimento a presença da trinca como a porosidade 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 à fadiga. Entretanto, na aplicação de revestimento nas facas picadoras de cana-de-açúcar, que sofre também cargas cíclicas, conforme observado por Lima (2008), a presença de trincas afeta de forma significativa a resistência ao desgaste abrasivo.

A Tab. 5.2 apresenta os valores de penetração, reforço, largura, área fundida e área de reforço dos revestimentos feitos com cada condição de consumível, avaliados seguindo o procedimento descrito no Item 3.4.3.1 do Capítulo III.

Tabela 5.2 – Características geométricas dos revestimentos.

Condição de Consumível	Penetração [mm]	Média da Penetração [mm]	DP Penetração	Reforço [mm]	Média do Reforço [mm]	DP Reforço	Largura [mm]	Média da Largura [mm]	DP Largura	Área Fundida [mm ²]	Média Área Fundida [mm ²]	DP Área Fundida	Área de Reforço [mm ²]	Média Área de Reforço [mm ²]	DP Área de Reforço
1	2,75	2,86	0,28	4,56	4,69	0,27	32,22	37,92	3,22	68,19	68,66	1,47	158,32	158,04	2,42
	2,59			5,13			39,73			67,44			160,67		
	3,32			4,64			39,80			68,56			159,44		
	2,88			4,42			39,24			71,19			157,48		
	2,75			4,70			38,62			67,91			154,27		
2	2,04	2,40	0,23	4,55	4,84	0,21	42,00	42,60	1,73	55,74	60,90	5,64	170,13	171,05	2,02
	2,32			4,74			42,11			69,93			170,41		
	2,60			4,85			43,46			60,17			170,75		
	2,46			5,00			40,41			56,74			174,56		
	2,56			5,06			45,00			61,94			169,40		
3	1,99	2,01	0,35	4,88	4,79	0,08	40,33	40,63	1,58	42,22	40,57	7,84	172,43	168,14	4,82
	1,74			4,87			38,73			51,07			169,77		
	2,51			4,72			42,54			29,77			160,72		
	2,20			4,76			41,94			42,64			166,09		
	1,64			4,73			39,64			37,13			171,70		
4	2,04	1,92	0,22	6,51	5,44	0,77	40,14	41,32	1,01	56,09	56,79	3,90	181,13	178,29	3,67
	2,10			4,76			42,87			63,06			173,62		
	1,92			5,95			40,83			57,59			177,26		
	2,00			4,74			41,31			53,68			176,65		
	1,54			5,25			41,43			53,51			182,80		
5	2,71	2,74	0,23	6,84	6,63	0,28	38,10	38,21	2,04	45,65	50,68	10,57	197,93	201,66	5,92
	2,55			6,87			36,54			62,30			211,93		
	2,69			6,80			36,31			58,25			201,48		
	3,15			6,35			38,71			35,58			198,10		
	2,62			6,30			41,38			51,65			198,86		

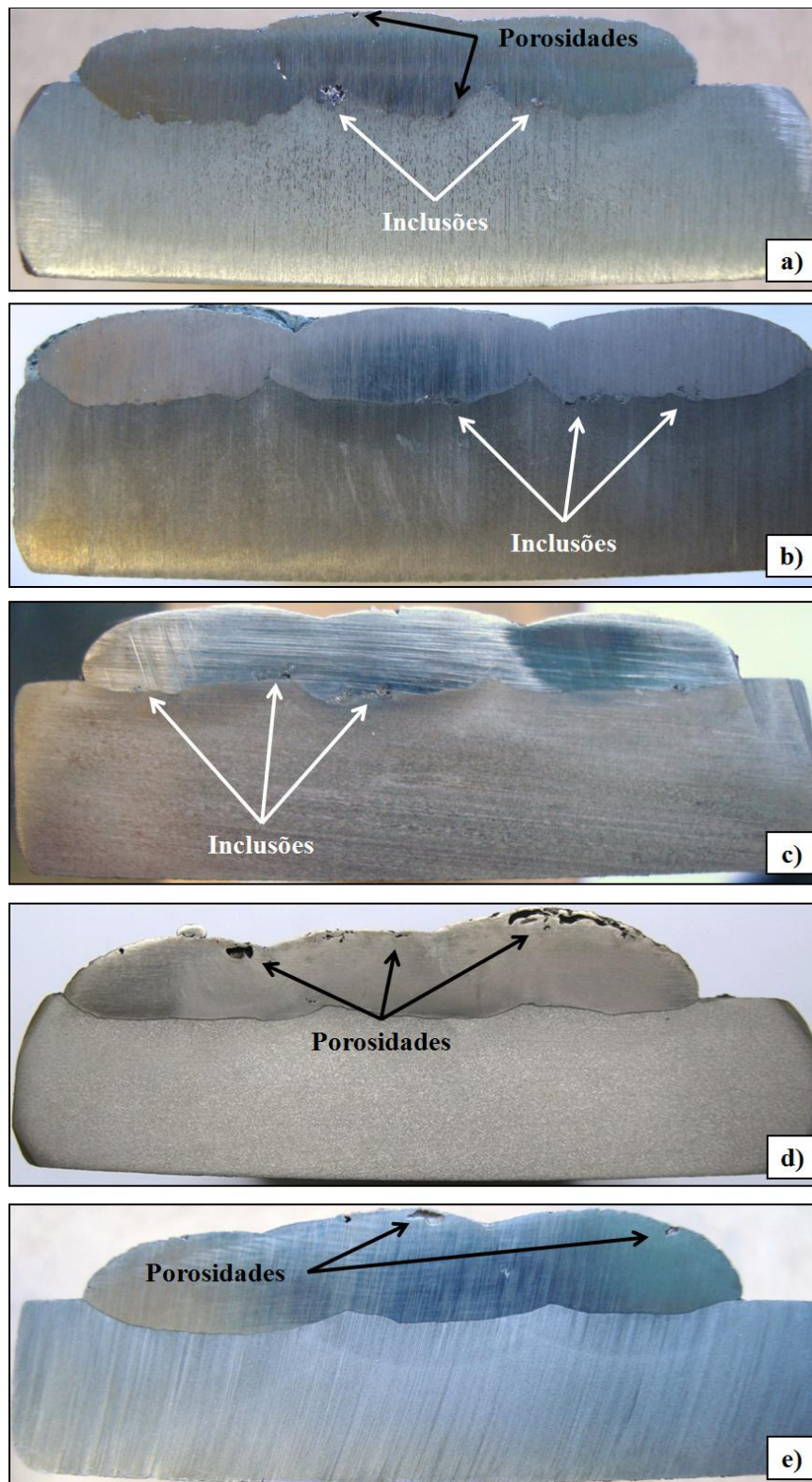


Figura 5.6 – Seção transversal dos revestimentos. a) FeCrC+Ti, b) e c) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC e de FeCrC+Nb respectivamente, d) FeCrC+Nb e e) FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L.

A Fig. 5.7 mostra os valores médios da penetração e o reforço apresentados na Tab. 5.2, nesta pode-se observar que o maior valor em média da penetração foi obtido nos revestimentos feitos com a liga FeCrC+Ti (condição de consumível 1 da Tab. 5.1) seguido pelos revestimentos feitos com a condição de consumível 5.

O menor valor de penetração em média foi o conseguido nos revestimentos da condição de consumível 4, ainda estes valores eram muito próximos entre eles.

Quanto ao reforço, foram os revestimentos da condição de consumível 5 os que apresentaram maior média. Os revestimentos feitos com a condição de consumível 1 foram os que apresentaram menor média no reforço sendo muito próximo ao apresentado pelas condições de consumível 2 e 3.

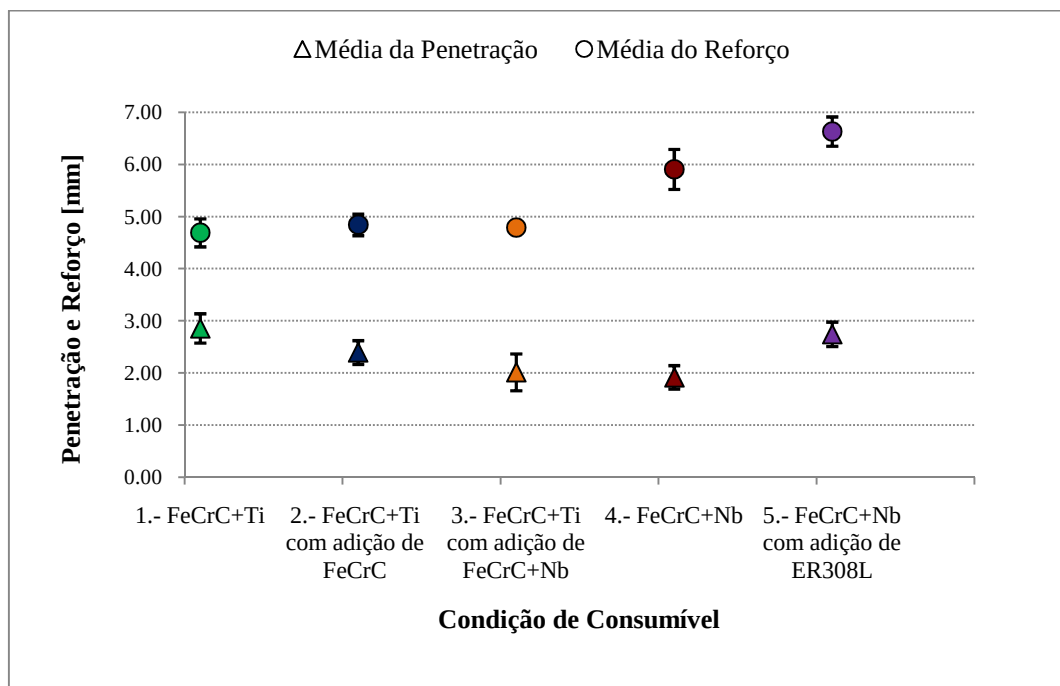


Figura 5.7 – Valores médios da Penetração e Reforço dos revestimentos com os seus respectivos desvio padrão.

Quanto a largura, Tab. 5.2 e Fig. 5.8 o revestimento feito com a condição de consumível 2 foi o que apresentou o maior valor em média, seguido pelo revestimento da condição 3. O menor valor de largura foi o apresentado pela condição de consumível 1.

Lima (2008) realizou revestimento sem tecimento precisando de 4 e 5 cordões de solda para obter a mesma área revestida com os arames de FeCrC+Nb e FeCrC+Ti respectivamente, nesta pesquisa, os revestimentos precisaram apenas de 3 cordões de solda para preencher a

mesma área, este fato demonstra que a utilização da técnica do tecimento é um parâmetro viável para o aumento da produtividade.

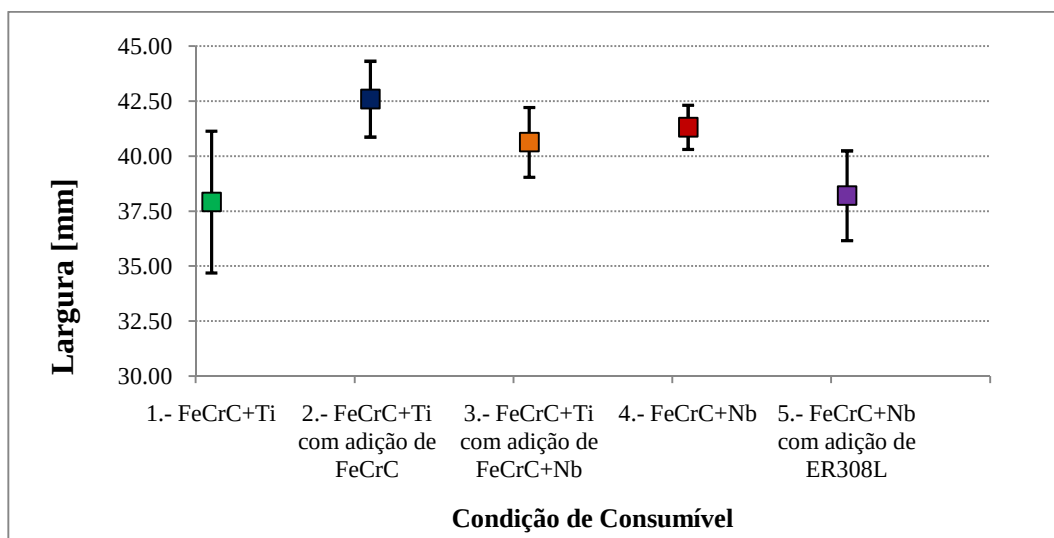


Figura 5.8 – Largura total dos revestimentos com os três cordões de solda.

A Fig. 5.9 mostra os valores médios da área fundida e da área de reforço obtidas nos 25 revestimentos (cinco por cada condição de consumível). Na Fig. 5.9 e na Tab. 5.2 é possível observar que o revestimento feito com a condição de consumível 5 foi o que apresentou maior média de área de reforço ($201,66 \text{ mm}^2$). Entretanto, a velocidade de alimentação dos arames foram maiores que os outros ensaios.

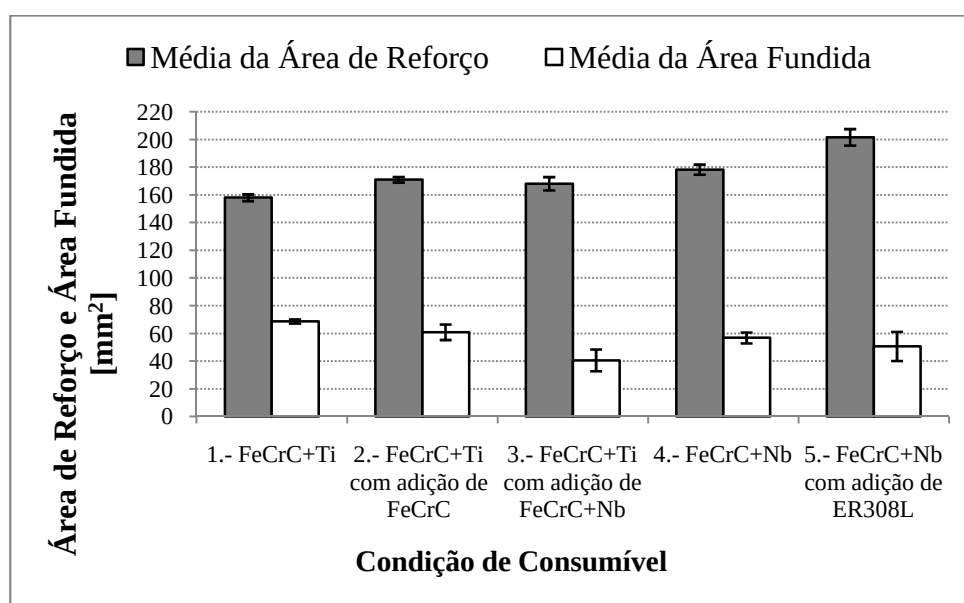


Figura 5.9 – Área Fundida e Área de Reforço dos revestimentos feitos com cada condição de consumível.

Os revestimentos feitos com as condições de consumível 2, 3 e 5 que correspondem aos da adição de arame não energizado apresentaram valores diferenciados de área de reforço quando comparados com as condições de consumível sem adição de arame. Em todos os casos a área de reforço (e o reforço) aumento, isto devido ao material que esta sendo adicionado na poça de fusão, mantendo a mesma velocidade de soldagem.

Após a soldagem dos revestimentos foram extraídos corpos de prova para a realização do ensaio de desgaste seguindo o procedimento descrito no Item 3.4.2. Os corpos de prova resultantes foram submetidos ao ensaio de Líquidos Penetrantes para detalhar a quantidade de descontinuidades presentes em cada um deles. A Fig. 5.10 mostra (como exemplo) o resultado de três dos corpos de provas submetidos ao ensaio de Líquidos Penetrantes.

A Fig. 5.10 apresenta as imagens dos corpos de prova das condições de consumível 1, 2 e 3 após a inspeção com líquidos penetrantes.

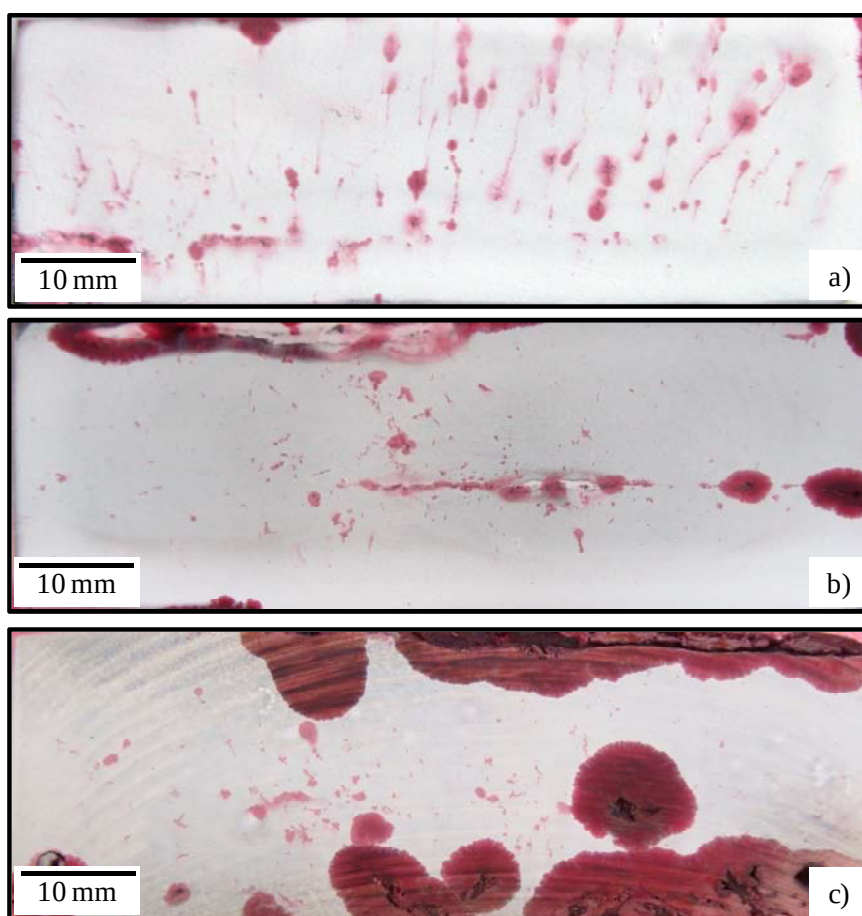


Figura 5.10 – Corpos de Prova após ensaio com Líquidos Penetrantes: a) Condição de consumível 1 (FeCrC+Ti), b) Condição de consumível 2 (FeCrC+Ti com adição de arame não

energizado de FeCrC) e c) Condição de consumível 3 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb).

Na Fig. 5.10a pode-se observar o corpo de prova do revestimento FeCrC+Ti com presença de poros e trincas de menor tamanho. Este fato, a ocorrência de pequenas trincas, ocorreu em todos os cinco corpos de prova da condição de consumível 1 e pode-se dever às tensões geradas após o retificado. Na Fig. 5.10b encontra-se um dos corpos de prova revestidos com a condição de consumível 2 onde a ocorrência de trincas é menor sem presença de porosidades. É importante citar que estas descontinuidades não foram observadas através do ensaio visual dos corpos de prova como revestido (Fig. 5.1 e Fig. 5.2).

A condição de consumível 3 onde foi adicionado arame tubular de liga FeCrC+Nb no arame tubular FeCrC+Ti foi possível observar a presença de porosidades de maior tamanho com ausência das pequenas trincas observadas nas condições de consumível 1 e 2.

A Fig. 5.11 mostra os corpos de prova das condições de consumível 4 e 5 após ensaio com líquidos penetrantes.

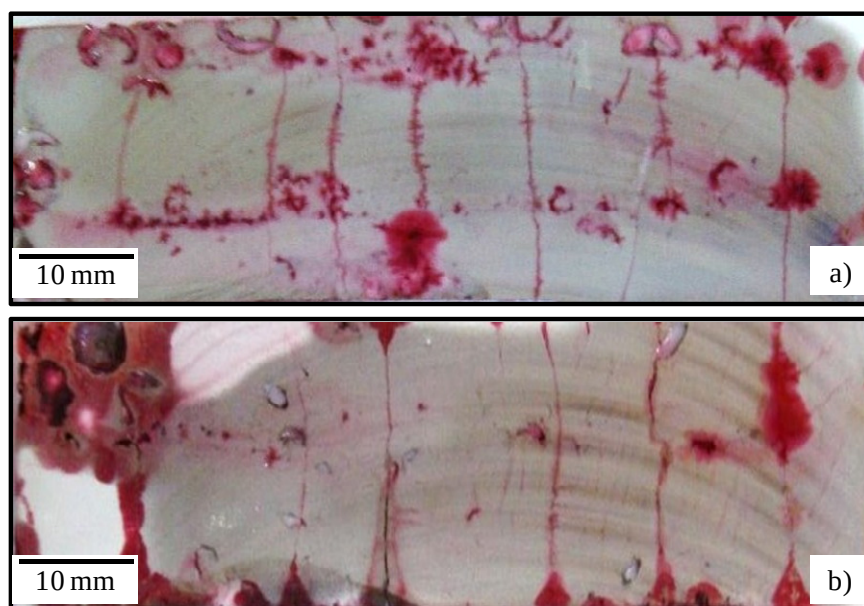


Figura 5.11 – Corpos de Prova após ensaio com Líquidos Penetrantes: a) Condição de consumível 4 e b) Condição de consumível 5.

Observa-se na Fig. 5.11a a presença de trincas transversais ao cordão de solda da liga FeCrC+Nb, além de porosidades, isto também foi observado na análise visual do cordão

como soldado. A presença de trincas e porosidades também foi observada na condição de consumível 5 (FeCrC+Nb com ER308L), Fig. 5.11b.

Lima (2008) cita que a presença de trincas no revestimento das facas picadoras de cana-de-açúcar, que sofrem desgaste abrasivo e cargas dinâmicas, pode favorecer o destacamento de partes do revestimento, aumentando a taxa de desgaste nas condições de trabalho em campo. Desta forma, com base apenas na análise visual e de líquidos penetrantes, a melhor condição para esta aplicação é a condição de consumível 3 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado FeCrC+Nb).

5.2. Avaliação da diluição

Conforme citado por Ibarra (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 área de reforço – Eq. 3.2 do Item 3.4.3.2 do Capítulo III –, os valores correspondentes às áreas foram medidos na seção transversal do revestimento (Tab. 5.2) seguindo o procedimento citado no Item 3.4.3.2 Capítulo III.

A Tab. 5.3 apresenta os valores de diluição média e do desvio padrão obtidos nos revestimentos feitos com cada condição de consumível apresentado na Tab. 5.1. Estes valores de diluição correspondem aos valores das seções transversais iniciais e finais de cada corpo de prova.

Para uma melhor visualização dos resultados da Tab. 5.3, a Fig. 5.12 mostra os valores médios da diluição por cada condição de revestimento. Para as condições de consumível 1 (FeCrC+Ti) e 4 (FeCrC+Nb) (soldados com as mesmas velocidade de fusão do arame eletrodo, isto é, mesma taxa de deposição ao longo do comprimento do cordão) verifica-se uma maior diluição para o arame tubular FeCrC+Ti (de 24,15% do arame FeCrC+Nb para 30,29% do arame FeCrC+Ti). Os valores de diluição ficaram próximos ao encontrado no trabalho de Lima (2008), onde a diluição do arame FeCrC+Ti também foi maior que a liga com Nb. Este fato foi atribuído por Lima (2008) a maior fluidez da poça de fusão com a liga de Ti.

Tabela 5.3 – Valores de Diluição dos corpos de prova revestidos com as cinco condições de consumíveis.

Condição de Consumível	C.P. #	Dil.Inicial	Media Dil.Inicial	DP Dil.Inicial	Dil.Final	Media Dil.Final	DP Dil.Final	Diluição	DP
		[%]			[%]			[%]	
1 FeCrC+Ti	1,1	30,18	30,63	0,96	30,02	29,95	1,79	30,29	0,59
	1,2	32,24			26,91				
	1,3	29,76			30,40				
	1,4	30,72			31,54				
	1,5	30,27			30,86				
2 FeCrC+Ti adição FeCrC	2,1	25,40	25,37	3,25	23,95	26,97	1,78	26,17	1,92
	2,2	29,79			28,40				
	2,3	25,24			26,83				
	2,4	20,63			27,93				
	2,5	25,76			27,75				
3 FeCrC+Ti adição FeCrC+Nb	3,1	22,03	19,48	1,90	17,27	19,16	5,31	19,32	2,80
	3,2	18,37			27,81				
	3,3	17,65			13,68				
	3,4	20,97			19,89				
	3,5	18,38			17,16				
4 FeCrC+Nb	4,1	22,45	24,44	2,30	24,80	23,85	1,15	24,15	1,54
	4,2	28,03			25,21				
	4,3	25,35			23,70				
	4,4	23,52			23,10				
	4,5	22,85			22,44				
5 FeCrC+Nb adição ER308L	5,1	19,40	21,10	1,79	18,10	18,31	5,35	19,70	3,05
	5,2	24,10			19,40				
	5,3	20,99			24,07				
	5,4	20,12			9,60				
	5,5	20,87			20,36				

Onde, C.P: Corpo de prova, Dil. Inicial; diluição na seção transversal correspondente à parte inicial do corpo de prova, Dil. Final: diluição na seção transversal correspondente à parte final do corpo de prova, DP: Desvio padrão.

Em teste de hipótese a significância estatística para a diluição do arame tubular de FeCrC+Ti versus FeCrC+Nb, considerando $p \leq 0,05$ (95% de confiabilidade), obteve uma significância estatística de $p = 0,000032$, permitindo considerar a diluição como estatisticamente diferentes. Este fato foi também observado no trabalho de Lima (2008).

No caso dos revestimentos feitos com adição de arame não energizado FeCrC+Ti (condição de revestimento 2 e 3 da Tab. 5.1) encontrou-se uma diminuição nos valores da diluição quando comparados com a condição de consumível 1 (FeCrC+Ti sem adição de

arame não energizado). A condição de consumível 2 e 3 ficaram com diluições iguais a 26,17% e 19,32% respectivamente, e foram 13,60% e 36,51% menores do que a diluição apresentada na condição de consumível 1. A sua significância estadística em teste de hipótese, quando comparados entre eles, foi de $p = 0,001966$ permitindo considerá-los estatisticamente diferentes.

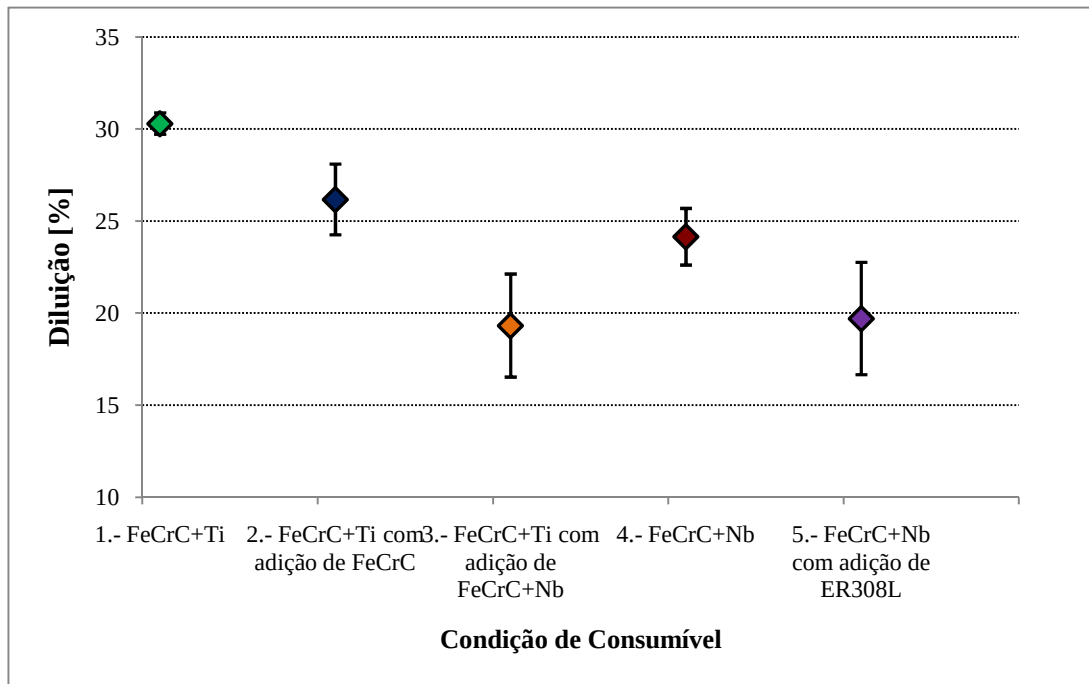


Figura 5.12 – Diluição média e desvio padrão dos revestimentos aplicados.

A condição de consumível 5 que corresponde à adição de arame não energizado de ER308L no arame de FeCrC+Nb, cujo valor de diluição foi de 19,70%, foi 18,41% inferior do que a diluição apresentada pelo arame de FeCrC+Nb sem adição de arame não energizado. Não foi realizado o teste de hipótese devido às condições de velocidade de alimentação dos arames e diâmetros ser diferentes das outras condições.

Comparando a diluição do revestimento Tab. 5.3 com a diluição de um cordão de solda feito com a mesma condição de consumível (Item 4.1, Tab. 4.6), verifica-se que a diluição de um cordão com mesmos parâmetros de soldagem é aproximadamente 19,75% maior que a diluição do revestimento. Esta superioridade na diluição de um cordão de solda comparada com a do revestimento é devida à sobreposição dos cordões na soldagem do revestimento, onde o primeiro e o segundo cordão soldado experimentam uma re-fusão tirando parte do calor aportado no metal base.

Quando comparados os valores da diluição dos revestimentos com e sem adição de arame não energizado pode-se observar que em todos os casos os revestimentos sem adição de arame não energizado apresentaram valores superiores de diluição, 24,145% para FeCrC+Nb e 30,289% para FeCrC+Ti, enquanto os valores com adição de arame não energizado eram de 19,701% para o revestimento de FeCrC+Nb com adição de ER308L e de 26,168% e 19,321% para os revestimentos de FeCrC+Ti com adição de FeCrC e FeCrC+Nb respectivamente. Estes valores concordam com o observado por Sábio (2007), onde a diluição apresentada na condição com arame não energizado apresentaram valores menores que os sem adição. Isto se deve à diminuição da penetração que foi afetada significativamente devido à injeção de arame não energizado no arco elétrico resfriando a poça de fusão diminuindo a área fundida.

5.3. Avaliação do desgaste

Foram submetidas 5 amostras extraídas de cada revestimento feito com cada condição de consumível da Tab. 5.1 ao ensaio de desgaste em Abrasômetro de Roda de Borracha, conforme procedimento apresentado no Item 3.4.3.3 e norma ASTM G65-00, por um tempo de 5 minutos ininterruptos para o pré-desgaste e em seguida (após limpeza e a pesagem) um tempo de 10 minutos de ensaio de desgaste.

Os resultados da perda massa e da resistência ao desgaste obtido das 5 amostras revestidas com cada condição de consumível são apresentados na Tab. 5.4 e seus valores médios na Fig. 5.13.

Observa-se, na Fig. 5.13 e na Tab. 5.4, que os revestimentos realizados com arame tubular da liga de FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L obtiveram o melhor resultado no desgaste em valor médio (menor perda de massa – 33,40 mg), seguidos pelos revestimentos feitos com a liga de FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC (39,14 mg) e de FeCrC+Nb (38,82 mg). O pior resultado foi apresentado nos revestimentos de FeCrC+Nb (44,96 mg) seguido pela liga de FeCrC+Ti (42,36 mg). Os resultados dessa pesquisa estão semelhantes aos obtidos por Scandella (2004) para materiais de adição de composição química também semelhante ao utilizado neste trabalho.

Tabela 5.4. – Dados de massa e desgaste por condição de consumível.

Condição de Consumível	C.P #	Desgaste [mg]	Media Desgaste [mg]	DP Desgaste	Tdesg _m [mg/m]	DP Tdesg	Rdesg _m [mg/m] ⁻¹	DP Rdesg _m
1-. FeCrC+Ti	1,1	29,60	42,36	8,00	0,03	0,01	35,09	7,93
	1,2	43,30						
	1,3	49,40						
	1,4	48,70						
	1,5	40,80						
2-. FeCrC+Ti adição FeCrC	2,1	26,70	39,14	14,05	0,03	0,01	40,26	12,83
	2,2	43,30						
	2,3	27,50						
	2,4	37,20						
	2,5	61,00						
3-. FeCrC+Ti adição FeCrC+Nb	3,1	47,60	38,82	8,12	0,03	0,01	38,52	9,31
	3,2	38,90						
	3,3	44,60						
	3,4	26,70						
	3,5	36,30						
4-. FeCrC+Nb	4,1	53,40	44,96	5,38	0,03	0,00	32,28	3,58
	4,2	41,10						
	4,3	40,50						
	4,4	47,10						
	4,5	42,70						
5-. FeCrC+Nb com adição de ER308LSi	5,1	39,80	33,40	4,29	0,02	0,00	43,54	5,32
	5,2	28,80						
	5,3	31,20						
	5,4	31,80						
	5,5	35,40						

Onde: Desg_m= Desgaste médio por consumível e misturas; Tdesg_m= Taxa de desgaste médio por consumível e misturas (desgaste em função da distância percorrida durante o ensaio, 1436 m); Rdesg_m= Resistência ao desgaste média por consumível e mistura (inverso da taxa de desgaste).

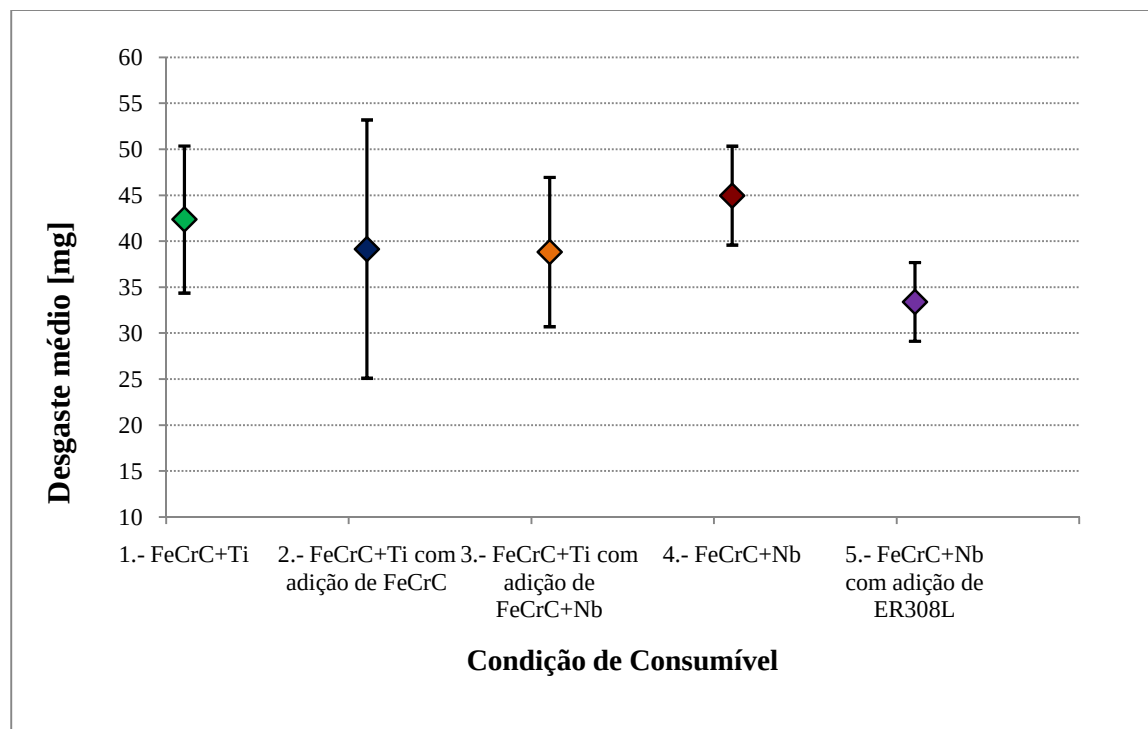


Figura 5.13 – Desgaste (perda de massa) para cada condição de consumível utilizado.

Comparando os resultados desse trabalho com o obtido por Lima (2008), que avaliou a resistência ao desgaste abrasivo em uma camada das ligas FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, obteve para a liga com Nb uma perda de massa de 42,2 mg e para a liga com Ti a perda foi de 129,5 mg. O resultado deste trabalho está semelhante com relação à liga com Nb, que ficou em 44,96 mg. Entretanto, para a liga com Ti o resultado desse trabalho foi bem menor, ficando em 42,36 mg. Essa diferença pode estar relacionada à composição química do arame FeCrC+Ti, com diferenças nos teores de Mn (1,2% em peso neste trabalho contra 0,84% no trabalho de Lima (2008)), de Mo (0,8% contra 1,5%), de Cr (6,5% contra 7,5%) e de Ti (5,0% contra 5,26%). Este fato pode contribuir para obter tamanhos e morfologia diferentes de carbonetos formados no cordão de solda, contribuindo para a obtenção de diferentes resistências ao desgaste.

Os valores de desgaste obtidos (Fig. 5.13) demonstram que a aplicação de revestimentos duros diminui em mais do 300% o desgaste apresentado em amostras de aço sem revestimento (3148.94 mg).

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. 3.5 no Capítulo III). Neste trabalho a distância percorrida em 10 minutos de ensaio foi de 1436 metros. A Fig. 5.14 apresenta este resultado.

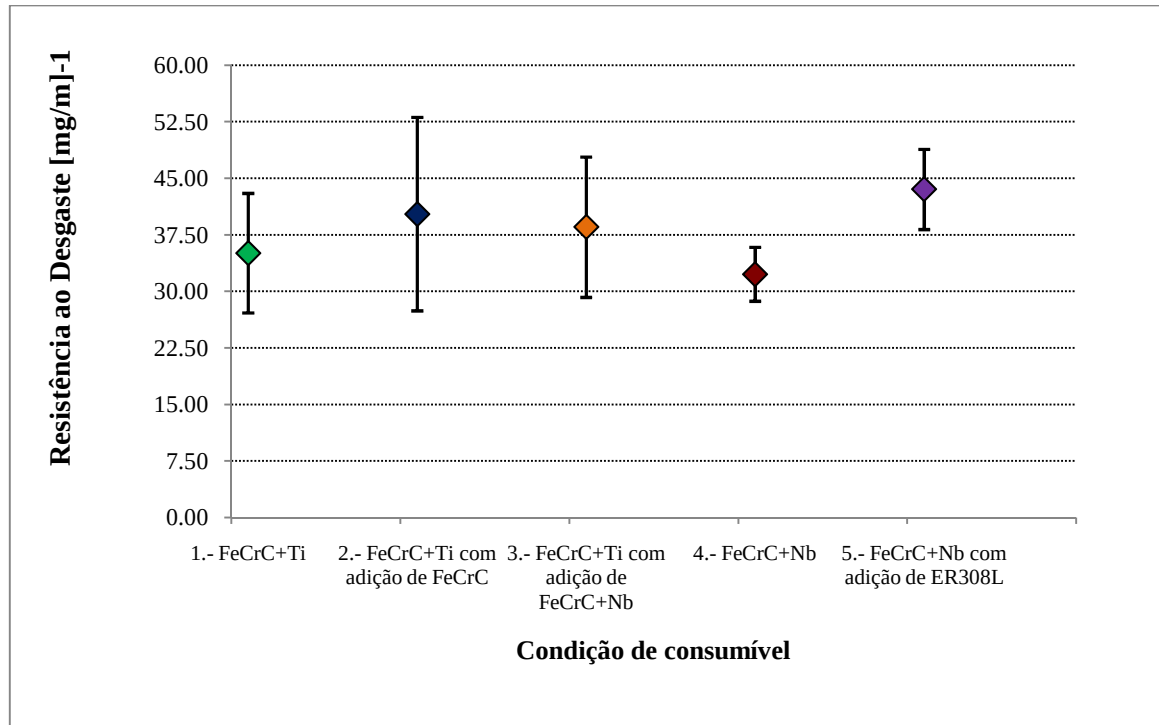


Figura 5.14 - Análise comparativa de resistência ao desgaste dos revestimentos.

Os revestimentos realizados com a adição de arame não energizado foram os que apresentaram melhor resistência ao desgaste abrasivo, Fig. 5.14, destacando-se o revestimento de FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L ($43.538 \text{ [m/mg]}^{-1}$) superando em 34,87% ao revestimento de FeCrC+Nb sem adição de arame não energizado.

A resistência ao desgaste dos revestimentos de FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb e FeCrC ($38.525 \text{ [m/mg]}^{-1}$ e $40.262 \text{ [m/mg]}^{-1}$ respectivamente) superaram ao arame de FeCrC+Ti em 8,93% e 12,86% respectivamente. Este aumento na resistência ao desgaste, em valores médios, deve-se provavelmente a menor diluição obtida com arame não energizado. Ensaio com outras condições de soldagem com o objetivo de diminuir a diluição devem ser considerados em uma proposta de trabalhos futuros.

Quando compara a resistência média ao desgaste de cada condição de consumível em teste de hipótese, Tab. 5.5, observou-se que para todos os casos ou combinações o valor de p superava o nível de significância do 5% ($p= 0,05$), permitindo considerar a resistência ao desgaste de cada condição como estatisticamente igual entre eles. A exceção foi apresentada na condição de consumível 4 (FeCrC+Nb) versus a condição de consumível 5 (FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L) onde o nível de significância foi de $p= 0,0044$ o que as faz considerar como estatisticamente diferentes.

Tabela 5.5 – Significância Estadística “p” da resistência ao desgaste dos revestimentos.

Condição de Consumível		p
Grupo 1	Grupo 2	
1.- FeCrC+Ti	2.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC	0,4479
1.- FeCrC+Ti	3.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	0,5470
1.- FeCrC+Ti	4.- FeCrC+Nb	0,4915
1.- FeCrC+Ti	5.- FeCrC+Nb com adição de ER308L	0,0832
2.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC	3.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	0,7913
2.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC	4.- FeCrC+Nb	0,2062
2.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC	5.- FeCrC+Nb com adição de ER308L	0,6332
3.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	4.- FeCrC+Nb	0,1990
3.- FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	5.- FeCrC+Nb com adição de ER308L	0,3262
4.- FeCrC+Nb	5.- FeCrC+Nb com adição de ER308L	0,0044

Comparando os resultados de resistência ao desgaste dos revestimentos de FeCrC+Nb e FeCrC+Ti, Fig 5.14, 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 o Nb, V, Ti, W e outros. Os autores observaram que a resistência ao desgaste variou de 11,2 a 32,3 (mg/m)⁻¹. Neste trabalho, a resistência ao desgaste obtida para os revestimentos em camada única, variou de 27,16 (mg/m)⁻¹ a 43,02 (mg/m)⁻¹. Com relação aos resultados de Lima (2008) para as duas ligas analisadas observam-se resultados também semelhantes, onde se verifica uma variação de resistência ao desgaste de 9,69 a 47,53 (mg/m)⁻¹.

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

5.3.1. Análise das amostras após ensaio de Desgaste.

A Fig. 5.15 ilustra as superfícies de desgaste dos corpos de prova ensaiados, permitindo observar diferentes comportamentos por consumível. A seta na figura indica o sentido de entrada das partículas abrasivas durante o ensaio. A Fig. 5.16 mostra uma ampliação da região de desgaste.

Observa-se que os corpos de prova dos revestimentos feitos de FeCrC+Ti e FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC (Fig. 5.15a e Fig. 5.15b) apresentaram micro-trincas visíveis com pequenas quantidades de porosidades. Para a condição FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb (Fig. 5.15c) não apresentaram micro trincas,

conforme verificado no Item 5.1 deste capítulo, e que os revestimentos feitos com FeCrC+Nb e FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L (Fig. 5.15d e Fig. 5.15e) têm trincas perpendiculares ao cordão, além de porosidade.

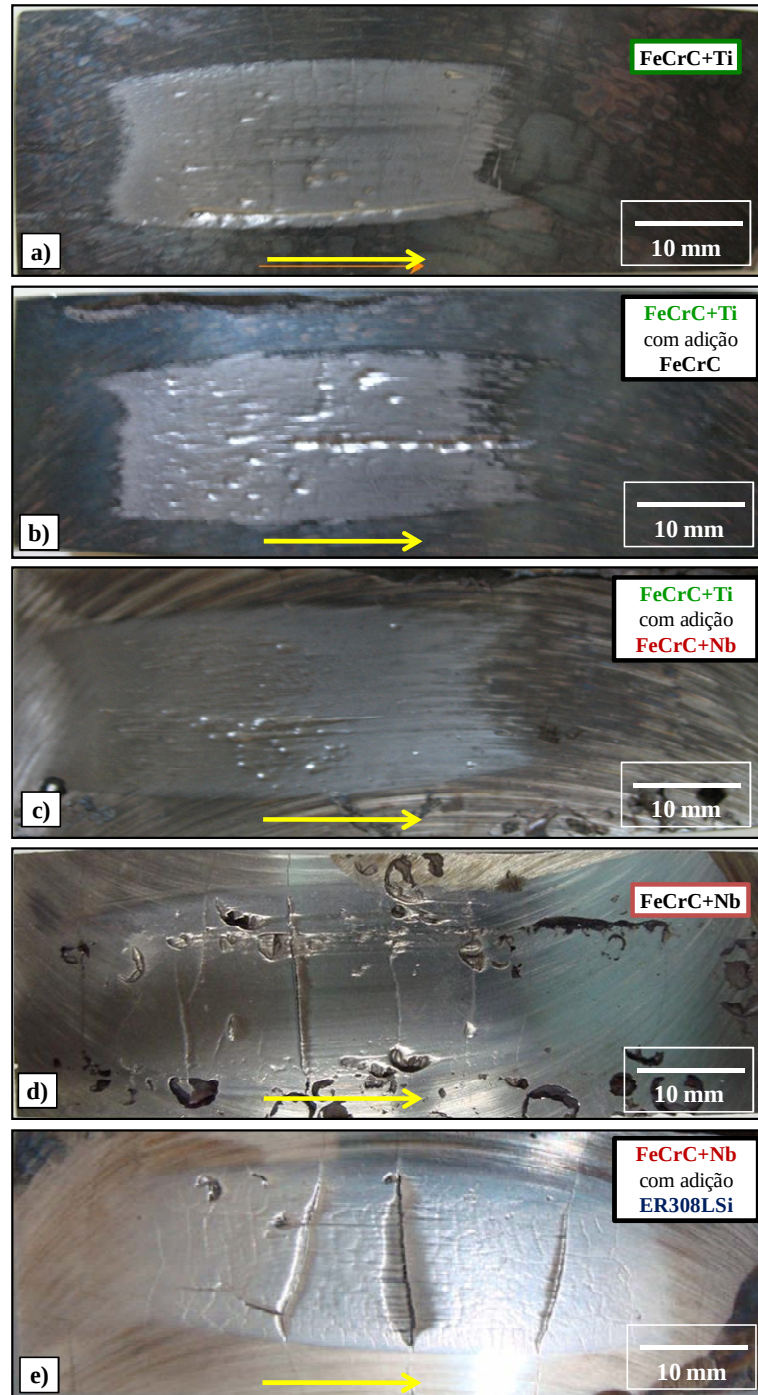


Figura 5.15 – Imagens de uma amostra de cada revestimento feitas após o ensaio de desgaste com abrasômetro de Roda de Borracha. a) FeCrC+Ti, b) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC, c) FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb, d) FeCrC+Nb e e) FeCrC+Nb com adição de ER308LSi.

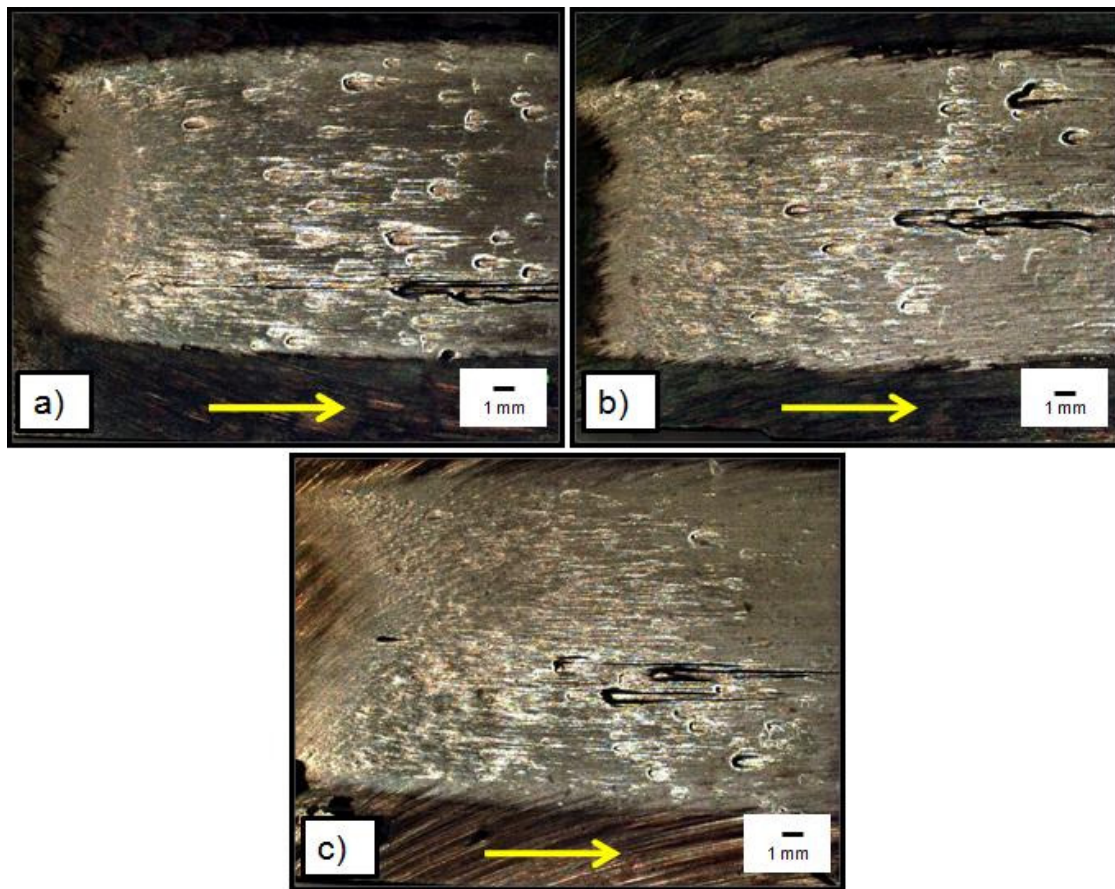


Figura 5.16 – Imagens da trilha de desgaste de amostras que apresentam: a) Condição de consumível 1 (FeCrC+Ti), b) Condição de Consumível 2 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC), c) Condição de Consumível 3 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb).

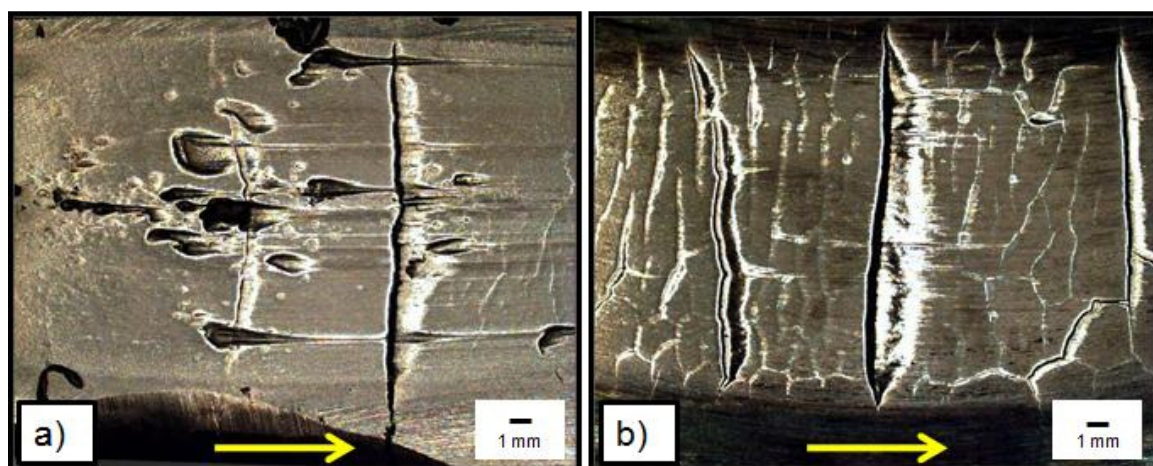


Figura 5.17 – Imagens da trilha de desgaste de amostras que apresentam: a) Condição de consumível 4 (FeCrC+Nb), b) Condição de Consumível 5 (FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de ER308L).

A diminuição da resistência ao desgaste nas amostras revestidas com FeCrC+Nb quando comparado com as outras condições de consumível pode ser atribuída à elevada presença de trincas transversais na direção de desgaste e porosidades onde as partículas abrasivas podem-se adentrar e, somadas com a compressão imposta pelo disco de borracha provocam um desgaste mais acentuado na extremidade de saída. Este fenômeno pode ser observado na Fig. 5.15d e na Fig. 5.17a, onde a trilha deixada pelas partículas abrasivas no sentido de deslocamento na extremidade de cada descontinuidade, indicado pela seta amarela nas figuras, é mais acentuada. Entretanto, quando as descontinuidades são significativamente menores, o seu efeito no incremento da perda de massa nos revestimentos parece não ser notável, como se pode observar na Fig. 5.16 para os revestimentos feitos com as condições de consumível 1, 2 e 3.

5.3.2. *Análise da dureza do revestimento.*

Para análise de dureza foram feitas medidas de dureza Rockwell C na superfície retificada de cada revestimento, na região final de cada corpo de prova, próximo à trilha de desgaste. A Tab. 5.6 apresenta os valores da dureza dos revestimentos. Pode-se avistar que o revestimento feito com a condição de consumível 1 foi o que apresentou maior média de dureza (64,69 HRC), seguido pelo revestimento da liga FeCrC+Nb (64,10 HRC), o valor da dureza do revestimento da liga de FeCrC+Nb foi próximo ao achado por Lima (2008) – 61,9 HRC - e Scandella (2004) – 61 HRC.

Tabela 5.6 – Dureza dos Revestimentos.

Condição de Consumível		Dureza do Revestimento [HRC]					Média da Dureza [HRC]	DP Dureza
		CP	CP	CP	CP	CP		
		1	2	3	4	5		
1	FeCrC+Ti	64,0	66,5	60,5	64,4	68,0	64,69	2,84
2	FeCrC+Ti com adição de FeCrC	58,0	56,5	58,5	56,5	58,5	57,58	1,00
3	FeCrC+Ti com adição de FeCrC+Nb	42,5	46,0	49,0	46,0	46,0	45,90	2,31
4	FeCrC+Nb	64,5	64,5	64,5	62,5	64,5	64,10	0,89
5	FeCrC+Nb com adição de ER308L	60,0	61,5	62,5	64,5	62,5	62,20	1,64

Onde, C.P: Corpo de Prova, DP: Desvio Padrão.

Para os revestimentos feitos com adição de arame não energizado pode-se observar uma notável diminuição na dureza do revestimento quando comparado com aquele em que não foi

adicionado arame, Fig. 5.18. Os revestimentos feitos com as condições de consumível 2 e 3 que (57,58 HRC e 45,90 HV respectivamente) foram 10,99% e 29,05% menores do que a dureza do revestimento feito com FeCrC+Ti sem adição de arame não energizado. No caso dos revestimentos feitos com FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L a dureza (62,20 HRC) foi 2,96% inferior do que a dureza apresentada no revestimento de FeCrC+Nb sem adição de arame não energizado.

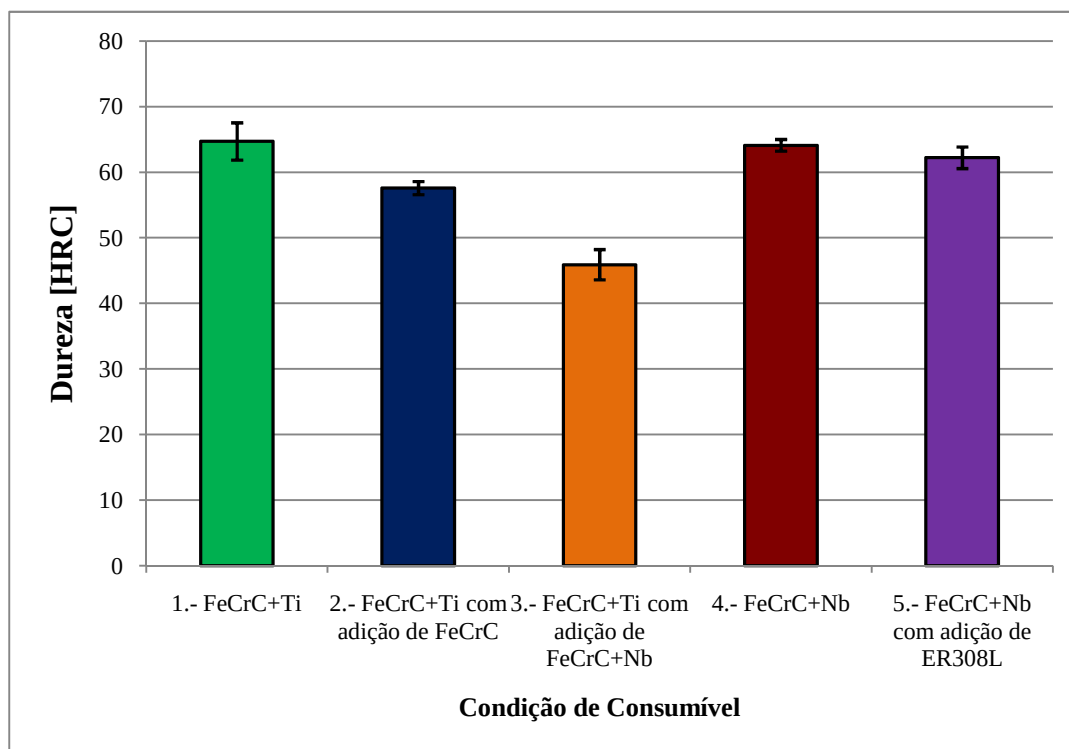


Figura 5.18 – Dureza dos Revestimentos.

Observa-se na Fig. 5.14 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. Este resultado afirma a observação feita por Kotecki e Ogborn (1995), que após estudar soldas de revestimento duro (com oito microestruturas diferentes) através da medição de dureza e avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de 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. Isto também é observado por Corrêa et al (2006) onde após realizar o ensaio de desgaste abrasivo de baixa e de 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 oposto. Estas observações encontradas neste estudo e na literatura reforçam o

fato de que a dureza é um parâmetro importante, mas não o mais importante em quanto à avaliação da resistência ao desgaste abrasivo nos revestimentos duros.

5.4. Microestruturas dos revestimentos

Para a avaliação microestrutural foram extraídas amostras das chapas soldadas com os cinco consumíveis, conforme ilustrado pela Fig. 5.19. As amostras de cada consumível foram embutidas, lixadas e polidas, seguindo o procedimento no Capítulo III (Materiais e Métodos). Posteriormente, uma de cada foi atacada com reagente Murakami a 60° C por 10s e com reagente Kalling por 10s e levadas ao microscópio ótico.

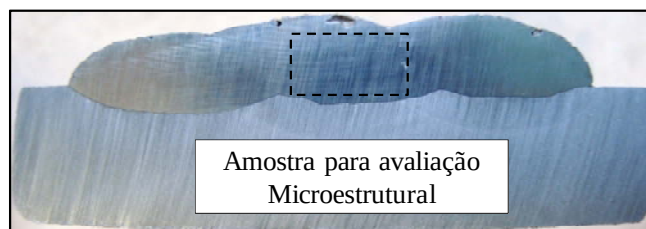


Figura 5.19. Extração das amostras para avaliação microestrutural.

A Fig. 5.20 ilustra a microestrutura obtida com o arame de FeCrC+Ti mediante microscopia ótica, onde observa-se uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio (de cor preto na Fig. 5.20a no ataque com Kalling e de cor cinza-prata na Fig. 5.20b no ataque com Murakami 60°) de formatos irregulares e de tamanhos variando entre 1 a 8 μm (a medição dos carbonetos foi feita utilizando o software de análise de imagem ImageJ). Na microestrutura verifica-se a ausência de carbonetos do tipo M_7C_3 devido ao baixo teor de cromo presente na liga (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). Além da ausência de carbonetos do tipo M_7C_3 observou-se uma mudança na matriz do revestimento, já que não apresentava mais a estrutura eutética, típica das ligas de FeCrC, mas sim uma matriz austenítica-martensítica homogênea. Este fato também é observado por Lima (2008), 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.

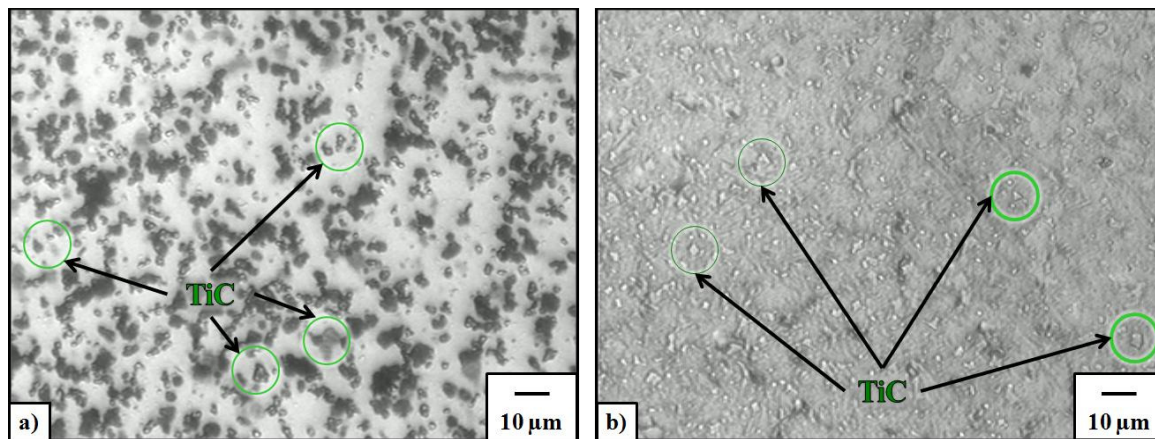


Figura 5.20 – Microestrutura do revestimento da liga FeCrC+Ti. a) Ataque com Kalling 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s.

A microestrutura resultante do revestimento construído com a liga de FeCrC+Nb é apresentada na Fig. 5.21, pode-se observar a presença de carbonetos do tipo M_7C_3 e de carbonetos de nióbio NbC - de cor preto na Fig. 5.20a no ataque com Kalling e de cor cinza-prata na Fig. 5.21b no ataque cm Murakami 60°- com tamanhos de 2 a 10 μm , distribuídos aleatoriamente na matriz hipereutética. Hernandez (1997), Zhi et al. (2007). e Lima (2008) citam que as ligas do sistema FeCrC+Nb apresentam, além de carbonetos de nióbio (NbC) na forma primária e secundária, o mesmo tipo de microestrutura 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. 5.20).

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, composta principalmente de ferrita, carbonetos secundários do tipo M_7C_3 e carbonetos $M_{23}C_6$.

O desempenho semelhante das ligas estudadas neste trabalho com relação à resistência ao desgaste se justifica pela presença de pequenos carbonetos distribuída na matriz, independente do tipo de liga utilizado. No trabalho de Lima (2008), 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 muito maiores que os carbonetos de nióbio.

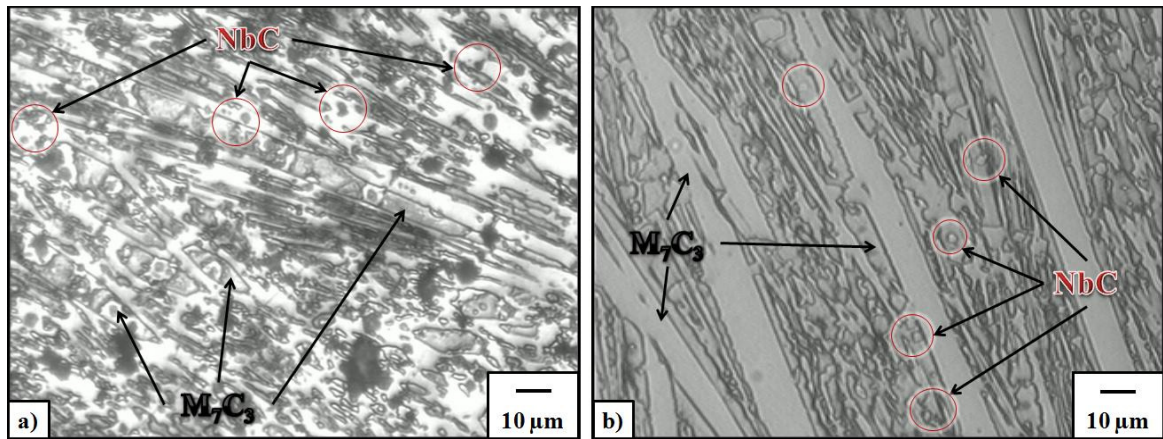


Figura 5.21 – Microestrutura dos revestimentos da liga FeCrC+Nb. a) Ataque com Kalling por 10s e b) Ataque com Murakami 60° por 10s.

A Fig. 5.22 e a Fig. 5.23 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. A microestrutura dos revestimentos da condição de consumível 2 (Fig. 5.22), ao 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 (6,5 % wt.) e a que na adição de cromo com a adição de arame não energizado de FeCrC (numa proporção do 13,13%) não foi suficiente para levar à formação deste tipo de carbonetos.

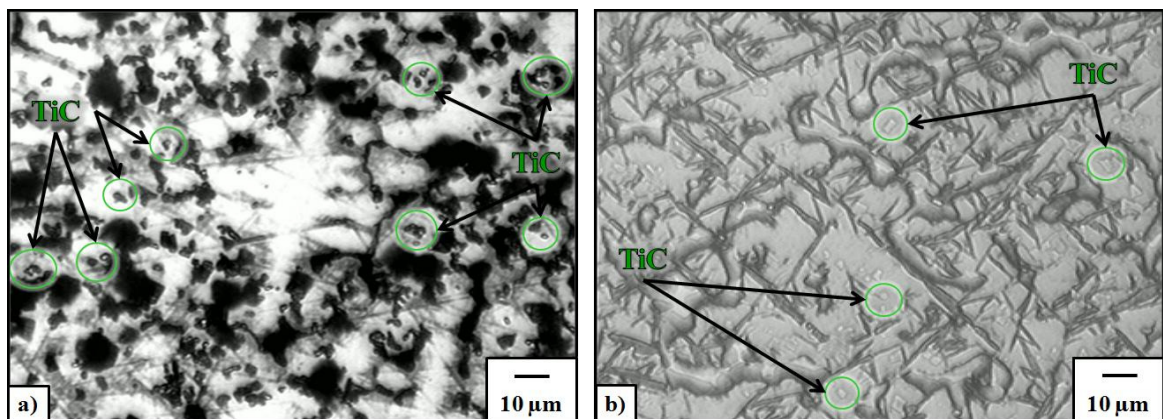


Figura 5.22 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 60° por 10 s.

Na Fig 5.23b, microestrutura dos revestimentos feitos com a condição de consumível 3, pode-se observar a presença de alguns carbonetos de nióbio com o formato pequeno e

alongado. Este formato nos carbonetos de nióbio também foi observado por Scandella e Scandella (2004) em ligas com teores de Nb de até 3 wt-%. Estes revestimentos, também apresentaram uma mudança na matriz quando comparadas com os revestimentos de FeCrC+Ti sem adição de arame não energizado. Esta mudança na matriz pode ser devida à adição de novos elementos metálicos, numa proporção do 13,13%, tais como Nb e o aumento no teor de C, Cr e Si.

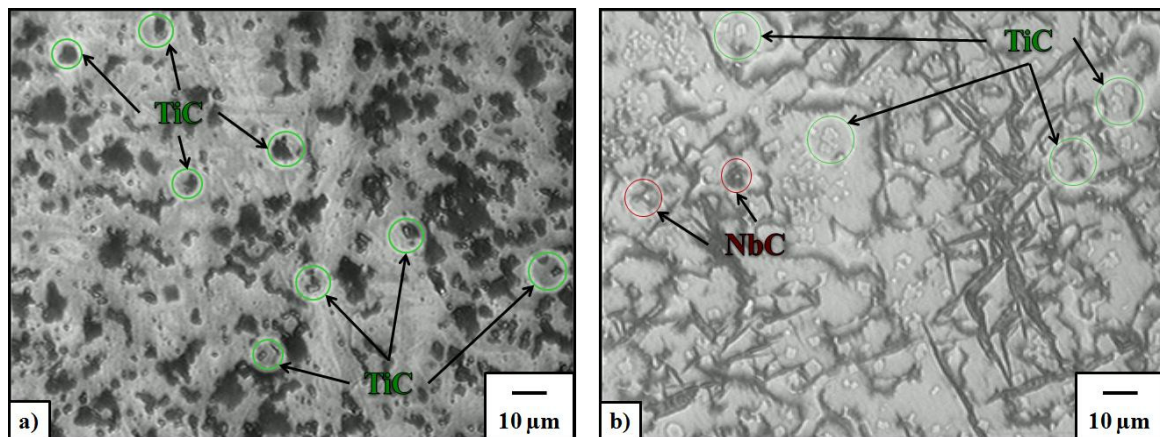


Figura 5.23 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 50° por 10 s.

A microestrutura do revestimento feito com a liga de FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L é mostrada na Fig. 5.24, 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) em ligas de FeCrC com adição de ferrita e elevados teores de Cr, para forçar a geração de carbonetos do tipo M_7C_3 , a matriz encontrada no espécime com maior adição em teor de Cr apresenta uma estrutura hipoeutética. Esta comparação é válida, já que ao adicionar o eletrodo de aço inoxidável á liga de FeCrC+Nb, está-se 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 também a presença de dendritas de austenita observadas também por Bálsamo; Scotti; De Mello (1995) em ligas com altos teores de cromo.

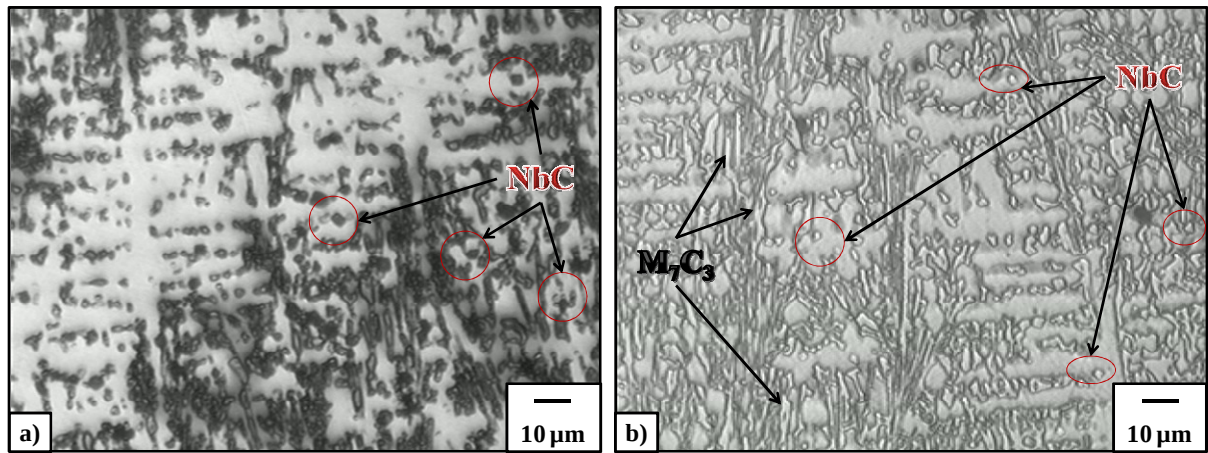


Figura 5.24 – Microestrutura dos revestimentos feitos com FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L. a) Atacado com Kalling por 10s e b) atacado com Murakami 60° por 10 s.

CAPITULO VI

CONCLUSÕES

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

6.1. Quanto á técnica de soldagem:

- ✧ A aplicação do revestimento utilizando o tecimento aumentou a largura dos cordões de solda, quando comparado com sem tecimento.
- ✧ A técnica de revestimento com adição de arame não energizado e tecimento da tocha não demonstraram eficiência para diminuir a formação de trinca de solidificação.
- ✧ A técnica de revestimento com adição de arame não energizado e tecimento da tocha apresentaram melhores resultados em termo de resistência ao desgaste das ligas de FeCrC+Ti e FeCrC+Nb.

6.2. Quanto às características geométricas dos revestimentos:

- ✧ Nos revestimentos realizados sem adição de arame não energizado, a liga de FeCrC+Ti apresentou, em valores médios, maior penetração e menor reforço quando comparado com a liga de FeCrC+Nb e a menor largura quando comparados com os demais revestimentos.
- ✧ Nos revestimentos realizados com a liga de FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC apresentaram, em valores médios, maior penetração e reforço quando comparados com os revestimentos de FeCrC+Ti com adição de arame não energizado de FeCrC+Nb, em geral apresentaram a maior média de largura.

6.3. Quanto à diluição dos revestimentos:

- ✧ Os revestimentos realizados com o arame de liga FeCrC+Ti apresentaram maior diluição em comparação com os da liga de FeCrC+Nb, sendo este o menor valor, em média, em comparação com as demais condições de consumíveis.

- Os três revestimentos nos quais foi adicionado arame não energizado na poça de fusão apresentaram, em média, valores de diluição menores do que os revestimentos sem adição de arame não energizado.

6.4. Quanto a Resistência ao Desgaste:

- A condição de soldagem FeCrC+Nb com adição de arame não energizado de ER308L apresentou, em média, o maior valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por carbonetos de nióbio (NbC) de pequenas dimensões em uma matriz hipereutética com a presença de dendritas de austenita.
- O revestimento realizado com o arame de FeCrC+Nb apresentou o menor valor de resistência ao desgaste. A microestrutura é composta por carbonetos do tipo M_7C_3 e carbonetos de nióbio (NbC) numa matriz eutética de austenita.
- O revestimento realizado com o arame de FeCrC+Ti apresentou praticamente a mesma resistência ao desgaste quando comparado com os revestimentos feitos com a liga FeCrC+Nb. A microestrutura apresentou uma distribuição uniforme de carbonetos de titânio (TiC) numa matriz austenítica-martensítica e ausência de carbonetos do tipo M_7C_3 .
- As condições de soldagem do arame FeCrC+Ti com adições de arame não energizado de FeCrC e o outro com adição FeCrC+Nb apresentaram maior resistência ao desgaste quando comparada com a resistência ao desgaste da liga FeCrC+Ti sem adição de arame não energizado (condição de soldagem 1). Isto demonstra que a adição de arame não energizado melhora a resistência ao desgaste.

CAPITULO VII

TRABALHOS FUTUROS

1. Realizar ensaios variando os parâmetros de soldagem do arame energizado bem como do arame não energizada com o objetivo de diminuir a diluição. Além disso, procurar também uma melhor condição de posicionamento da tocha (soldar empurrando, puxando e reta) e também buscar outras condições de introdução do arame não energizado na poça de fusão.
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 revestimento construído com teores semelhantes de Ti e Nb
3. Fazer um estudo mais detalhado dos fatores que afetam a estabilidade do arco no processo da soldagem com arame tubular e adição de arame não energizado com o objetivo de aumentar a quantidade de metal do aram não energizado na poça de soldagem.
4. Realizar ensaios com arame maciço não energizado com proteção gasosa (utilizar várias composições de gás de proteção), tendo como objetivo evitar a presença de porosidades nos revestimentos e melhorar a relação entre a quantidade de arame energizado e não energizado, isto é, aumentar a quantidade de metal depositado do arame não energizado.
5. Fazer um estudo mais aprofundado da microestrutura dos revestimentos obtidos com a adição de arame não energizado, principalmente com relação ao tipo, quantidade e distribuição dos carbonetos formados no revestimento, relacionar estes fatores a resistência ao desgaste abrasivo.

6. Realizar revestimento com duas camadas, sendo a primeira construída de um material mais dúctil, por exemplo de aço inoxidável austenítico, e em seguida construir a segunda camada com revestimento duro, do tipo FeCrC+Nb com o objetivo de diminuir a quantidade de trincas de solidificação. Apesar do aumento do custo de fabricação, esta metodologia poderá ser de grande valia em equipamentos que sofrem cargas cíclicas, além do desgaste abrasivo.
7. Realizar ensaios de desgaste abrasivo com diferentes temperaturas de revestimento (preaquecimento). Acredita-se que com o monitoramento da temperatura de aplicação de cada cordão possa obter uma condição que minimize a quantidade de trincas.

CAPITULO VIII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREUCCI, RI. **Líquidos Penetrantes**. Abende, 2008. p. 67.

ALORAIER, A; IBRAHIM, R; THOMSON, P. FCAW Process to Avoid the Use of Post Weld Heat Treatment. **International Journal of Presssure Vessels and Piping**. No 83, p. 394-398, 2006.

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

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 Aparatus**, p. 231-243, 2001

AWS. **Welding Handbook – Welding Technology**, American Welding Society, Vol. 1, 8th Edition, Miami, USA, 1991. p. 350-383.

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

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

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.

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, 1988. p 15-43,

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

CORRÊA, E. O.; ALCÂNTARA, N. G.; TECCO, D. G.; KUMMAR, R. V. Desenvolvimento de 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, 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.

CRUZ Jr, Luiz P.; FERRARESI, Valtair A.; BRAGA, Eduardo de M. Parâmetros Otimizados para Revestimento de Chapas de Aço Carbono pelo Processo MIG-DWOA com Arame ER 308LSI. In: **XXV COLSOLDA – Congresso Nacional de Soldagem**. 26 a 29 de Outubro, 2009, Piracicaba-SP, Brasil.

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

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

DIAS, M. F; MARTINS & GOMES, S.I. NOVAES. Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo a Baixa Tensão de Revestimento soldados por Arco Submerso. **2do Congresso Brasileiro de engenharia de Fabricação**. 2003.

EMBRAPA. Agencia de Informação Embapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) – Cana-de-açúcar. <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/Abertura.html>. Acessado em 10 de Janeiro de 2011.

ESPINOSA, R. G.; AGUILA, J. G. N.; CABRERA, T. L. HYACINTH R. R. e GONZÁLES, L. C. Análisis de la falla por Fadiga de las Cuchillas Picadoras de Caña del CAI “Ciudad Caracas”. **9na. Convención Internacional de las Industrias Metalúrgicas, Mecânicas y del Reciclaje - METANICA**. Havana, Cuba. 19 de julio, 2004.

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

FAN, C.; CHEN, M.; CHANG, C. e WU, W.; Microstructure change caused by (Cr,Fe)₂₃C₆ carbides in high chromium Fe–Cr–C hardfacing alloys. **Surface and Coatings Technology**. Vol: 201. Issues: 3 - 4, p. 908-912, 2006.

FERREIRA, E. B; DA SILVA, P.; ROCHA, D.; MENDOÇA, E.; DA SILVA, F., BRAGA, E. Estudo Comparativo da Taxa de Deposição e a Sanidade Superficial do Cordão de Solda Entre os Processos de Soldagem FCAW e FCAW-CW. **62ª Reunião Anual da SBPC**. Natal – RN. 23 a 30 de 2010.

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

GONZÁLES, A. M, DUTRA, J. C. Análise e Desenvolvimento do Processo MIG/MAG Duplo Arame com Potencial Único. **XXV ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM**. Belo Horizonte – MG. 8 a 10 de Setembro 1999.

GREGORY, E. N. Surfacing by Welding. **The Welding Institute Research Bulletin**. p. 9-13. Jan. 1980.

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

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.; GÓMEZ, E. C.; BALTAZAR, E. L. Influencia del coeficiente de dilución sobre la dureza de la capa aportada en el relleno superficial. **In: 5as JORNADAS DE INVESTIGACIÓN 2000 – 2001**. Universidad Autónoma de Zacatecas, 25 a 29 de julho de 2001, Trabalho No: TI/UI-22/101. <http://www.uaz.edu.mx/cippublicaciones/CD%20Jornadas%202000%20-%202001/Ingenieria/TI22.htm>.

IGNOTO, V.; BALDOMIR L. A. Evaluación de Procedimientos de Soldadura de Revestimientos Duros Aplicados por el Processo FCAW com Transferência Metálica Pulsada. **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF**. Uberlândia - MG. 18-21 de maio, 2003.

JEFFUS, F. Larry. **Welding: Principles and Applications**. 5. Ed. Editora THOMSON Delmar Learning. USA. 904 p. 2002.

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

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

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

LINS, Clarissa; SAVEDRA, Rafael. Sustentabilidade Corporativa No Setor Sucroalcooleiro Brasileiro. **Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável**. Agosto 2007.

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

MARTINS FILHO, A. S. **Soldagem de Revestimentos com Arame Tubular**. Universidade Federal de São Carlos. Dissertação de Mestrado. 93 p. 1995.

MICHIE, K., BLACKMAN S. & OGUNBIYI T. E. B. “Twin-Wire GMAW: Process Characteristics and Applications”, **Welding journal**, AWS Vol. 78, nº5, 1999.

MOTTA, M. F. **Aplicação do Processo MIG/MAG Pulsado com Duplo Arame e Potenciais Isolados em Soldagem de Revestimento**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, UFSC, Florianópolis, 2002.

MUNDO DA CANA. <http://www.mundodacana.com>. Acessado 4 de janeiro de 2011.

NOBLE, D. N. Factors Wich affect Abrasive Wear Resistance of Hardfacing Weld Deposits. A Review of the Literature. **The Welding Institute**, 26 p. out. 1984.

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

PARANHOS, R. P. R.; MELLO, R. S. T.; PAYÃO FILHO, J. C. Influência dos Parâmetros de Soldagem com Arco Submerso Empregando Fluxo Ligado e Arame de Aço-C nas

Características de Revestimento de Ligas Fe-Cr-C Resistentes ao Desgaste Abrasivo. **XXIV Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, XI Congresso Latino-Americano e V Ibero-Americano de Soldagem**. Fortaleza – CE. 20 - 23 de set. 1998.

POLIDO, R. S. e GALLEGOS, 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. Acesso em: 08 agosto de 2010.

POSCH, G.; VALLANT, R.; KLAGGES, W.; CERJAK, H. Influence of niobium on mechanical properties and hot crack susceptibility of Nickel-base cored-wire weld metal type 70/20 and 70/15. In: **TANTALUM-NIOBIUM INTERNATIONAL STUDY CENTER GENERAL ASSEMBLY**, 47, 2006, Áustria. https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=44905&pCurrPk=27719.

PRISCO, M. Revestimentos Protetores contra Desgaste. Soldagem de Manutenção. **ABS – ABRAMAN**. p. 231-284, 1993.

RAMALO, José P. Revestimento por Soldagem. **Coleção Tecnológica SENAI – Soldagem**. São Paulo – Brazil. 1997.

RIBEIRO, R. **Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Revestimentos Soldados do Tipo Fe-Cr-C Usados na Indústria Sucroalcooleira**. Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Dissertação de Mestrado. 118 p. 2004.

SÁBIO, Alberto D. **Estudo da Viabilidade Operacional do Processo de Soldagem MAG com Alimentação Adicional de Arame Frio**. Universidade Federal do Pará, Belém - PA, Brasil. 126 p. 2007.

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.

SAPATE, S. G. & RAMARAO, A. V. Erosive Wear Behaviour of Weld Hardfacing High Chromium Cast Irons: Effect of Erodent Particles. **Tribology International**. v. 39, p. 206-212, 2006.

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 Kingdom, v. 20, p 93 – 104, January 2004.

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.

ÚNICA. União da Indústria da Cana de Açúcar, www.unica.com.br. Acesso em 20 de dezembro de 2010.

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

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.