

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA – CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Dissertação de Mestrado

CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE
MICRO ABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA PARA ANÁLISE DO
DESGASTE EM REVESTIMENTO DURO APLICADO POR SOLDAGEM

Daniel Lucas de Oliveira

Ilha Solteira - SP

2015

Daniel Lucas de Oliveira

CONSTRUÇÃO DE UM EQUIPAMENTO DE ENSAIO DE DESGASTE
MICRO ABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA FIXA PARA ANÁLISE DO
DESGASTE EM REVESTIMENTO DURO APLICADO POR SOLDAGEM.

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Conhecimento: Materiais e Processos de Fabricação

Prof. Dr. Vicente Afonso Ventrella

Orientador

Prof. Dr. Juno Gallego

Co-orientador

Ilha Solteira - SP

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

O48c Oliveira, Daniel Lucas.
Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem / Daniel Lucas Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 20015
84 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Materiais e Processo de Fabricação, 2015

Orientador: Vicente Afonso Ventrella
Co-orientador: Juno Gallego
Inclui bibliografia

1. Soldagem. 2. Revestimentos. 3. Desgaste abrasivo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa para análise do desgaste em revestimento duro aplicado por soldagem

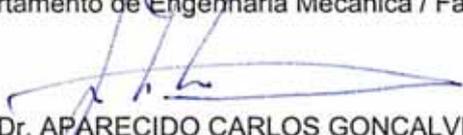
AUTOR: DANIEL LUCAS DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. JUNO GALLEGÓ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica ,
Área: MECANICA DOS SÓLIDOS, pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. VICENTE AFONSO VENTRELLA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. APARECIDO CARLOS GONCALVES
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. RICARDO CURY IBRAHIM
Departamento de Engenharia Mecatrônica / Escola Politécnica da USP

Data da realização: 27 de fevereiro de 2015.

Dedico

A minha esposa Aline Emy Takiy de Oliveira, pelo apoio, carinho e compreensão ao longo desta caminhada.

RESUMO

O estudo do comportamento de materiais, metálicos e não metálicos, sob a ação de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa, tem sido reconhecido como um meio viável para avaliação não destrutiva em superfícies com revestimento duro aplicado por soldagem, sendo a soldagem uma forma rápida para recuperação e manutenção de corpos moedores na mineração e na indústria sucro-alcooleira. Com foco neste cenário, o trabalho em questão, tem o objetivo de projetar e construir uma máquina de ensaio micro abrasivo por esfera rotativa fixa em condições de “força normal constante” e “pressão constante”. Como corpos-de-prova, foram utilizadas chapas de aço carbono ASTM A36 de 12,5 mm de espessura e eletrodo revestido da liga Fe-Cr-C com Ø4,0 mm aplicando o revestimento em uma, duas e três camadas. Para o processo de desgaste foi inserido entre a esfera de aço AISI 52100 e o corpo de prova uma pasta abrasiva preparada com carbetto de silício preto com tamanho médio de 5 µm por partícula e água destilada. Nos ensaios realizados, em todos os casos, na análise por microscopia óptica das crateras revelaram somente a presença de desgaste abrasivo por “riscamento” e a diluição mostrou-se influente na formação da microestrutura do revestimento e uma correlação entre a dureza e resistência ao desgaste.

Palavras-chave: Soldagem. Desgaste abrasivo. Desgaste por micro abrasão. Revestimento duro. Micro estrutura.

ABSTRACT

The study of the behavior of materials, metallic and non-metallic, under the action of micro abrasive wear by rotating sphere, has been recognized as a viable means for nondestructive evaluation on surfaces with hard coating applied by welding. Welding is a quick way to recovery and maintenance in mining and ethanol industry. Focusing in this scenario, the work in question aims to design and build a micro abrasive testing machine with a fixed rotating sphere in a position to "constant normal force" and "constant pressure". ASTM A36 mild steel with 12.5 mm thick were used as testing specimen materials and coated electrode of Fe-Cr-C alloy with $\varnothing 4.0$ mm applying the coating once, twice three layers. Between the AISI 52100 steel ball and specimen was placed abrasive slurry of silicon carbide with an average size of 5 μm per particle and distilled water. In the tests performed, in all cases, the analysis by optical microscopy of craters only revealed the presence of abrasive wear by "grooving abrasion " and dilution proved to be influential in the formation of the coating microstructure and a correlation between hardness and wear resistance.

Keywords: Welding. Abrasive wear. Wear micro abrasion. Hardfacing. Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de desgaste que ocorrem em máquinas industriais.	19
Figura 2 – Rodete de moenda de cana. a) Desgastado; b) Recuperado.....	22
Figura 3 – Diluição medida na seção transversal.	23
Figura 4 – Equipamento de roda de borracha e areia seca para ensaios abrasivos.....	28
Figura 5 - Princípio do desgaste abrasivo por riscamento (a) - (b) Desgaste abrasivo por rolamento.....	29
Figura 6 – Marcas de (a) desgaste abrasivo por riscamento e (b) desgaste abrasivo por rolamento.....	29
Figura 7 – Desgaste abrasivo misto: atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e riscamento.....	30
Figura 8 – Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste por esfera rotativa livre.....	32
Figura 9 – Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre. Força normal (Fes) em função do peso da esfera e do ângulo ($\theta 1$).....	32
Figura 10 – Esquema de aplicação da força normal no equipamento de esfera fixa.....	33
Figura 11 – Modelo de equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa – Modelo TE 66 SLIN, disponível no mercado.	33
Figura 12 – Máquina de desgaste projetada e desenvolvida.	34
Figura 13 – Profundidade de penetração da esfera – h ; Diâmetro da Cratera- d . (a) esquema de desgaste com esfera; (b) esquema da cratera gerada pelo desgaste.....	34
Figura 14 – Diferentes estágios de formação de uma cratera de desgaste, com as respectivas distâncias de deslizamento e revoluções da esfera de ensaio.	37
Figura 15 – Partículas abrasivas de SiC.	40
Figura 16 – Equipamento de micro desgaste por esfera rotativa para os ensaios abrasivos. ...	41
Figura 17 – Detalhe da esfera de aço durante o ensaio de desgaste.	41
Figura 18 – Detalhe da soldagem da amostra.....	42
Figura 19 - Detalhe das amostras depois do corte e retifica.....	42
Figura 20 - Amostras: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) três camadas de revestimento.....	43

Figura 21 - Riscador de amostras.	45
Figura 22 – Remoção dos componentes para limpeza e avaliação.....	45
Figura 23 – Primeiro projeto da máquina de micro-desgaste.	46
Figura 24 – Configuração final do 1º Protótipo.	46
Figura 25 – Crateras feitas com a 1º configuração do equipamento. (a) 15 minutos, 300 rpm; (b) 10 minutos, 300 rpm.	47
Figura 26 – Alteração do conjunto de porta amostra para aumentar a rigidez.....	48
Figura 27 – Configuração atual da Máquina de micro-desgaste.	48
Figura 28 - Crateras de desgaste feitas com o equipamento alterado.....	48
Figura 29 – Correções feitas no equipamento: contra porca.	49
Figura 30 – Novo porta amostra.	50
Figura 31 – Ensaios feitos com a máquina ajustada.	50
Figura 32 – a) Macrografia representativa da secção transversal do revestimento com 1 camada; b) Macrografia para calculo da diluição.....	51
Figura 33 – (a) - Definição camadas de revestimento; (b) Determinação das áreas envolvidas no calculo da diluição em duas camadas com o auxilio do programa Autodesk Inventor 2012.	52
Figura 34 – (a) – Definição das três camadas de revestimento; (b) Determinação das áreas envolvidas no calculo da diluição com o auxilio do programa Autodesk Inventor 2012.	52
Figura 35 – Marca de penetração do indentador.	54
Figura 36 – Microdurómetro Vickers.....	54
Figura 37 - Medidas da microdureza partindo da superfície do revestimento ao metal base com diferentes camadas. a) 1 camada de revestimento. b) 2 camadas de revestimento. c) 3 camadas de revestimento. d) Comparativo da microdureza das 3 amostras.	55
Figura 38 – Crateras de desgaste, em função da distância de deslizamento, para uma camada de revestimento.....	58
Figura 39 – Volume das crateras para uma camada de revestimento.....	60
Figura 40 – Taxa de desgaste para uma camada de revestimento.	61
Figura 41 - Crateras de desgaste, em função da distância de deslizamento, para duas camadas de revestimento.....	62
Figura 42 – Volume das crateras para duas camadas de revestimento.....	63
Figura 43 - Taxa de desgaste para duas camadas de revestimento.....	64

Figura 44 - Crateras de desgaste, em função da distância de deslizamento, para três camadas de revestimento.....	65
Figura 45 – Volume das crateras para três camadas de revestimento.	66
Figura 46 - Taxa de desgaste para três camadas de revestimento.	67
Figura 47 – Diferentes estágios de formação das crateras com o tempo de ensaio.....	68
Figura 48 – Taxa de desgaste pela distancia nas amostras com uma, duas e três camadas.....	69
Figura 49 – Cratera de desgaste obtida nos ensaios em “macro escala”.....	70
Figura 50 – Cratera de desgaste em “micro escala”. (a) riscamento com S=598,45 m; (b) riscamento com S=119,7 m.	71
Figura 51 - Trincas superficiais: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) três camadas.	72
Figura 52 – Trincas superficiais: (a) uma camada;(b) duas camadas; (c) três camadas.....	72
Figura 53 - Trincas superficiais na primeira camada de revestimento.	73
Figura 54 – Morfologia prismática típica encontrada em revestimento de cromo.....	74
Figura 55 - Microestrutura dos revestimentos mostrados no MEV. a) Região próxima à linha de solda. b) Região do primeiro passe do cordão. c) Região do segundo passe do cordão. d) Região do terceiro passe do cordão. e) Região próxima a superfície 1000X. f) Região próxima a superfície na terceira camada 500X. f) Região próxima a superfície na terceira camada 500X..	75
Figura 56 – Crescimento do carboneto na terceira camada.....	76
Figura 57 – Composição química das amostras com: a) uma camada; b) duas camadas; c) três camadas de revestimento de cromo.....	77
Figura 58 – Análise da composição química na face do carboneto na amostra com três camadas.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – composição química de metal de base.....	39
Tabela 2 – Propriedades mecânicas nominais do metal de base.	39
Tabela 3 – Composição química, dureza do eletrodo.....	39
Tabela 4 – Controle de temperatura entre passes na soldagem das camadas de revestimento.	43
Tabela 5 – Taxa de diluição das amostras com 1,2 e 3 camadas.....	53
Tabela 6 – Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios.....	57
Tabela 7 – Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 1 Camada.....	59
Tabela 8 – Volume das Crateras para Revestimento com 1 Camada.....	59
Tabela 9 – Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 1 Camada.....	60
Tabela 10 – Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 2 Camadas.....	63
Tabela 11 – Volume das Crateras para Revestimento com 2 Camadas.	63
Tabela 12 – Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 2 Camadas.....	64
Tabela 13 – Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 3 Camadas.....	66
Tabela 14 – Volume das Crateras para Revestimento com 3 Camadas.	66
Tabela 15 – Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 3 Camadas.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Computer Aided Design
ZF	Zona fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
A_t	Área total da cratera de desgaste
A_r	Área com atuação por rolamento
A_g	Área do desgaste abrasivo por riscamento
C	Carbono
Cr	Cromo
d	Diâmetro
δ	Coefficiente de diluição ou, simplesmente, diluição
FeCl	Cloreto de ferro
Fe-Cr-C	Ferro-cromo-carbono
h	Profundidade
HCl	Ácido clorídrico
k	Coefficiente de desgaste
M_3C	Carboneto
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Força normal
n_{ESF}	Valores de rotação da esfera
Q	Taxa de desgaste
S	Distância de deslizamento
Si	Silício
SiC	Carbeto de silício
V	Volume
v_t	Velocidade tangencial periférica da esfera
Zn	Zinco

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Objetivo Geral	16
2	Desgaste	17
2.1	Síntese Histórica	17
2.2	Tipos de Desgaste	18
2.3	Soldagem de Revestimento	21
2.4	Diluição	22
2.5	Influência dos Elementos de Liga de Revestimentos.....	24
2.6	Seleção de uma Liga de Revestimento	25
2.7	Soldagem por Eletrodo revestido.....	26
3	Desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa	28
3.1	Princípio do ensaio	28
3.2	Modos de desgaste abrasivo	29
3.3	Configurações de equipamentos	31
3.4	Grandezas Geométricas	34
3.5	Regime Permanente de Desgaste.....	38
4	Materiais e Métodos	39
4.1	Materiais	39
4.1.1	Metal de base.....	39
4.1.2	<i>Metal de adição</i>	39
4.1.3	<i>Abrasivo</i>	40
4.2	<i>Equipamentos</i>	40
4.2.1	<i>Fonte de Energia</i>	40
4.2.2	<i>Equipamento para Ensaio de Desgaste</i>	40
4.2.3	<i>Soldagem das Amostras</i>	41
4.3	Métodos.....	42
4.4	Projeto e construção de um equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo por Esfera Rotativa Fixa.....	45
5	Resultados e Discussões	51
5.1	Corte e Usinagem das Amostras	42

5.2	Soldagem dos revestimentos	42
5.3	Análise metalográfica da Diluição	51
5.4	Variação da Micro Dureza no Cordão de Solda	53
5.2	Ensaio de Micro-Desgaste	57
5.3	Modos de Desgaste Abrasivo e Regime Permanente de Desgaste.....	70
5.4	Trincas Superficiais	72
6	Conclusões.....	79
	Referências	80

1 INTRODUÇÃO

Tribologia advém do grego “tribo – esfregar, atritar” e “logos – estudo”. Na língua portuguesa, uma possível tradução é: “A ciência dos mecanismos de atrito, lubrificação e desgaste de interação de superfícies que estão em movimento relativo”. Em um vocabulário mais simples, “Tribologia” pode ser interpretada como a ciência que estuda “atrito”, “desgaste” e “lubrificação” (GAHR, 1987 citado por DETTOGNI, 2010).

“Desgaste” pode ser definido como: “o dano em uma superfície sólida envolvendo perda progressiva de massa, devido ao contato e ao movimento relativo entre a superfície e outro material (ou materiais)” (COZZA, 2006).

“Soldagem” pode ser definida como: “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando na junta a continuidade das propriedades físicas e químicas.” ou “Processo de união localizada entre materiais metálicos ou não, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada com ou sem a utilização de pressão ou material de adição” (MARQUES et al. 2005).

Um dos problemas que mais aflige engenheiros e técnicos nas indústrias é como prolongar a vida útil de componentes em máquinas e equipamentos expostos a abrasão, sendo que, uma parada repentina leva ao prejuízo e sua manutenção inesperada pode apresentar um custo muito elevado para as empresas. O setor de manutenção das indústrias tem lutado contra o desgaste, visando aumentar o tempo entre paradas de manutenção ou reduzir as trocas de componentes. A possibilidade de reconstruir esses componentes ou prepará-los para suportar melhor as condições de trabalho em aplicações que exijam grandes solicitações ou fenômenos complexos de desgaste é constantemente estudada e novas técnicas são propostas, sempre no sentido de aumentar a vida útil e reduzir custos. Uma das técnicas mais empregadas é a aplicação de revestimentos anti-desgaste, podendo esta ser feita por soldagem ou metalização entre outros processos disponíveis, com excelentes resultados e permitindo, em muitos casos, alcançar tempos de vida superiores ao de peças novas. (MONTEIRO ; CUNHA, 1993 citado por RIBEIRO, 2004).

No campo das soldas de manutenção, podemos classificá-las em soldas de manutenção corretiva, preventiva e preditiva. No caso de solda de manutenção

corretiva, o serviço é realizado após a peça ter sido retirada de trabalho pelo excessivo desgaste que sofreu. Já na soldagem de manutenção preventiva, aplica-se um revestimento na peça nova, melhorando a região que sofrerá desgaste, cujas características quanto aos desgastes são superiores às do metal base. Finalmente, nas soldas de manutenção preditivas, não se espera que a peça saia do trabalho após o desgaste total, mas durante o trabalho, faz-se um revestimento por solda, evitando deste modo a parada do equipamento.

Nas Usinas Sucro Alcooleiras, a soldagem de revestimento anti-desgaste é aplicada em componentes como rolo de moenda, eixo de moenda, facas e martelos desfibradores, exaustores, rodetes e bagaceiras. Nas indústrias mineradoras, o principal fator de desgaste é abrasão combinado com choque e/ou pressão. Neste segmento industrial os serviços de soldagem são executados em peças de grandes dimensões e envolvendo significativas quantidades de material de soldagem. As principais aplicações são nos equipamentos como moinho de minério de ferro, caçambas, escavadeiras, carregadeiras sobre rodas e esteiras e britadores. No setor frigorífico a soldagem de revestimento é aplicado nos raspadores de digestores e paredes internas dos moinhos de ossos.

De forma geral, soldagem de revestimento é um processo que vem de encontro com a necessidade das indústrias no sentido de superar problemas, contudo, há a necessidade de otimização dos parâmetros de soldagem para cada processo, tais como a escolha correta do consumível, corrente, voltagem, velocidade de soldagem e aporte térmico. Definido esses parâmetros é possível obter um revestimento com a maior resistência ao desgaste do que uma peça nova.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal a construção de um dispositivo simulador de desgaste, para realização dos ensaios e a verificação da resistência ao desgaste em revestimentos duros aplicados por soldagem.

Serão utilizadas nesse equipamento amostras revestidas com eletrodo da liga ferro-cromo-carbono (Fe-Cr-C) com a aplicação em uma, duas e três camadas, a fim de obter em qual situação acontece a melhor resistência ao desgaste, simulando o que acontece no setor industrial como mineradoras e usinas sucroalcooleiras.

2 DESGASTE

2.1 Síntese Histórica

Mikail Lomonosov, membro da Academia Científica de Moscou, com o objetivo de estudar a abrasão de metais, minerais e vidros, realizou um dos primeiros ensaios de desgaste abrasivo entre 1745 e 1765. Basicamente, seu equipamento era formado por um rebolo de diâmetro de 460 mm que, em movimento de rotação, permanecia em contato com um corpo de prova ao qual a aplicação da força normal era realizada por meio de um sistema de peso morto. O rebolo gerava uma marca no corpo-de-prova e, a partir desta, analisava-se o comportamento ao desgaste (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1997).

O ensaio sofreu algumas modificações realizadas por Johan August Brinell que, além de substituir o rebolo por um disco de aço de 100 mm de diâmetro, inseriu partículas de quartzo entre a amostra e o disco.

Haworth (1948) realizou o primeiro ensaio de desgaste abrasivo utilizando uma roda de borracha que girava em contato com a superfície do corpo-de-prova junto com abrasivo na interface, permitindo realizar ensaios a seco ou a úmido com alta confiabilidade de resultados (HAWORTH, 1948 citado por VILLABÓN; SINATORA, 2006).

O ensaio de desgaste abrasivo, aplicado em filmes finos, teve um progresso significativo quando Kassman et al. (1991) desenvolveram um equipamento com configuração denominada “*dimple grinder*”, em que o corpo de prova, ao qual a força é aplicada, permanece submerso em uma pasta abrasiva durante o ensaio.

Rutherford e Hutchings (1996) introduziram o “ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa” e, embora o mesmo tenha sido projetado para o setor produtivo para medição da espessura de revestimentos, atualmente é aplicado em pesquisas envolvendo materiais metálicos e não metálicos.

2.2 Tipos de Desgaste

Em geral, o desgaste está presente em situações em que há contato e movimento. Em alguns casos, o mesmo possui vantagens e desvantagens. Cita-se como desvantagem o desgaste sofrido por uma ferramenta de corte. Por outro lado, o desgaste que a mesma gera no material a ser usinado torna-se uma vantagem, assim como as operações de lixamento e polimento. Mas de um modo geral, o desgaste é visto como o “vilão da história”.

Sempre que duas superfícies se movimentarem, uma em relação à outra ocorrerá o desgaste, sendo que este pode ser definido como prejuízo mecânico a uma ou duas superfícies, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Em muitos casos leva a um aumento contínuo da folga entre as partes que se movimentam ou a uma indesejável liberdade de movimento e perda de precisão (DETTOGNI, 2010).

Para Bayer (2004) o desgaste não se limita apenas a perda de materiais de uma superfície, pode ser definido também pelo movimento do material sem a perda de massa, ou seja, alterações na geometria ou dimensão como resultado de uma deformação plástica.

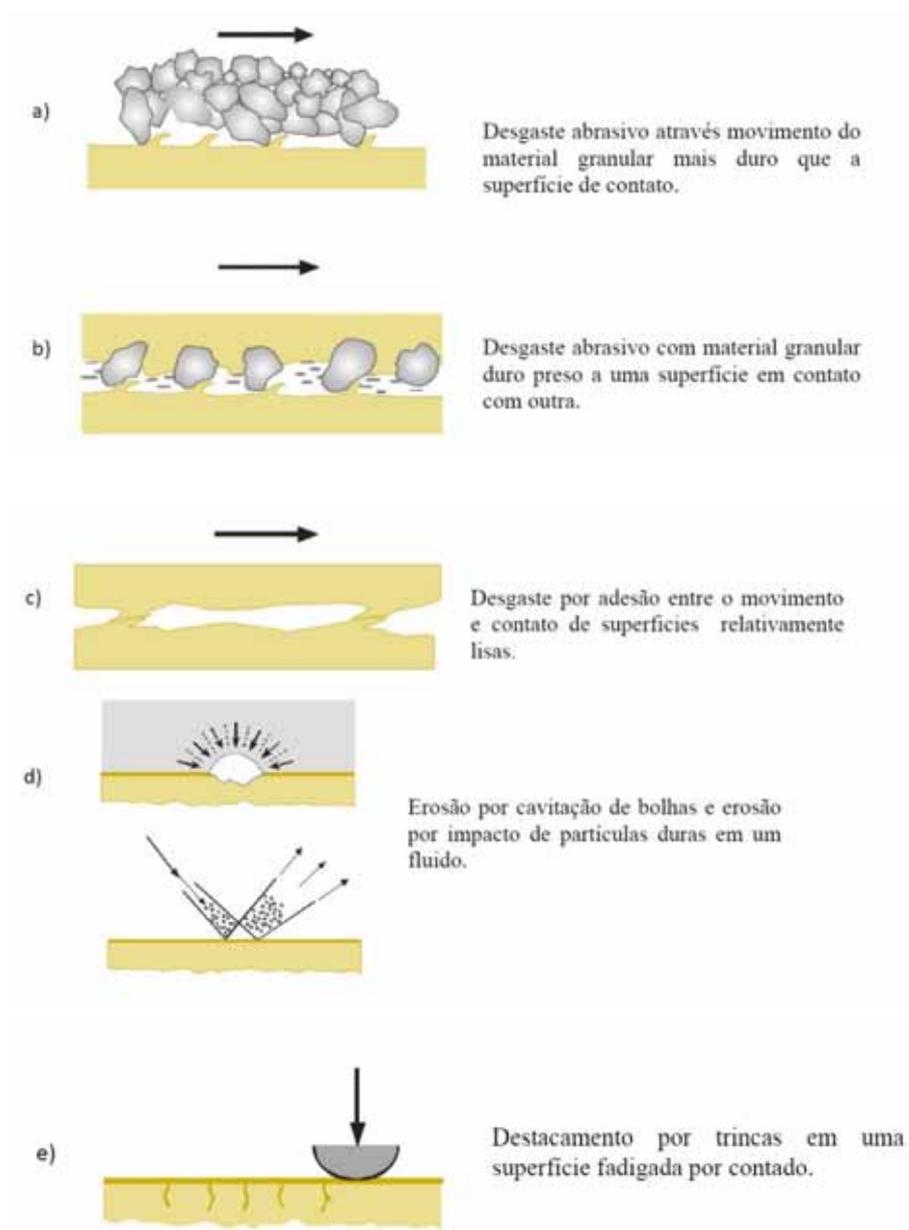
Um método de reduzir a fricção e, conseqüentemente, o desgaste é a lubrificação das superfícies. Ainda assim, mesmo que um lubrificante artificial não seja adicionado ao sistema, componentes da atmosfera, especialmente oxigênio e vapor de água, têm um importante efeito e precisam ser considerados em qualquer estudo da interação de superfícies (ALVES, 2014).

A complexidade do desgaste pode ser melhor entendida conhecendo as variáveis envolvidas no processo, como: dureza, tenacidade, ductilidade, módulo de elasticidade, tensão de escoamento, propriedades relativas à fadiga, estrutura e composição das superfícies em contato, geometria e pressão de contato, temperatura, coeficiente de atrito, acabamento superficial, lubrificantes e contaminantes (STOETERAU, 2004).

O desgaste por abrasão é um fenômeno que ocorre quando partículas duras deslizam ou são forçadas contra uma superfície metálica em relação à qual estão em movimento, provocando por deslocamento ou amassamento a perda de massa das peças. De todos os diferentes tipos de desgaste, o desgaste abrasivo é o que ocorre em mais de 50% dos casos, sendo considerado como o mais severo e o mais encontrado na indústria em geral (EYRE, 1991 citado por VILLABÓN; SINATORA, 2006).

Os principais mecanismos de desgaste são: abrasão, adesão, erosão, fadiga, impacto e corrosão, sendo esquematicamente representados na figura 1.

Figura 1 - Tipos de desgaste que ocorrem em máquinas industriais.



Fonte: (GEE et al., 2002).

No desgaste por reação triboquímica a remoção de material ou degradação das propriedades mecânicas é devida a ação química ou eletroquímica de meios agressivos,

ou remoção de material facilitada pela reação química. Pode ser dividida em: corrosão em meio aquoso, oxidação, corrosão em meios orgânicos e corrosão em metais líquidos.

Em relação ao tipo de abrasão, há vários mecanismos de desgaste por abrasão descritos na literatura, como, abrasão por goivagem, abrasão a alta tensão e abrasão a baixa tensão (riscamento).

No desgaste por goivagem partículas abrasivas grosseiras e de grandes dimensões, principalmente dotadas de regiões pontiagudas cortantes, com dureza maior do que a parte metálica que está sendo desgastada, são impactadas com pressões e repetitivas vezes contra o componente, causando o corte da superfície desgastada pelo abrasivo produzindo grandes sulcos e ranhuras visíveis a olho nu.

A abrasão a alta tensão, o desgaste ocorre entre partículas abrasivas e metal, ocasionando a prensagem da partícula abrasiva. Isso ocorre na presença de partículas duras em uma matriz dútil. A abrasão a baixa tensão, o desgaste ocorre com o deslizamento de partículas livres sobre a superfície do componente. Como as tensões são baixas, não ocorre o tritramento do abrasivo e o material é removido da superfície por microusinagem. Tipicamente, a abrasão a baixa tensão ocorre na superfície de componentes de equipamentos que manuseiam terra, areia e minérios que vão “riscando” a superfície conforme o uso da peça (DETTOGNI, 2010).

Dentro do conceito de desgaste abrasivo está o desgaste micro-abrasivo, que pode ser estudado através de ensaios de desgaste por micro abrasão. O “ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa” é um teste que consiste no desgaste gerado em um corpo de prova, por uma esfera e por partículas abrasivas.

Através do tamanho médio das partículas abrasivas é possível diferenciar o “desgaste abrasivo” e “desgaste micro-abrasivo”. O “desgaste micro-abrasivo” ocorre com participação de partículas abrasivas com tamanho médio na ordem de micrometro. Partículas abrasivas com tamanho médio entre 3 e 6 μm , aproximadamente, são utilizadas em ensaios de desgaste micro-abrasivo. Já o “desgaste abrasivo” é gerado por partículas abrasivas maiores, entre 50 e 250 μm (COZZA, 2011).

Nos materiais ferrosos a relação entre a resistência ao desgaste e a dureza não é simples. O aumento no teor de carbono faz a resistência ao desgaste aumentar. A resistência ao desgaste geralmente aumenta conforme a microestrutura é mudada de ferrita para perlita, desta para bainita e finalmente para martensita, desde que seja

acompanhada de aumento de dureza. Entretanto, para um mesmo valor de dureza, a estrutura bainítica tem maior resistência ao desgaste do que a martensítica.

Os carbonetos parecem ser particularmente importantes na resistência à abrasão, principalmente em materiais como os aços e ferros fundidos brancos e ligados ao cromo (Cr). A influência desses materiais está relacionada com sua dureza, tamanho e distribuição. Carbonetos duros aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que os grosseiros reduzem a resistência. Estruturas deformadas por trabalho a frio, não aumentam a resistência ao desgaste, enquanto que o aumento da dureza pelo refinamento dos grãos age favorável (SERNA, 2008).

2.3 Soldagem de Revestimento

A soldagem de revestimento é um processo no qual uma liga é depositada na superfície de um metal de base, ou para colocá-la nas dimensões originais ou para obter alguma propriedade desejada tal como, resistência ao desgaste, impacto, corrosão, etc. A soldagem de revestimento é, portanto, um processo de fabricação alternativo onde se consegue conciliar propriedades diferentes, e muitas vezes opostas entre si, no núcleo e na superfície do material, tornando-se possível, por exemplo, obter um componente com características estruturais dúcteis no seu núcleo e alta resistência à abrasão na superfície.

A taxa de deposição e diluição são os fatores que mais afetam as propriedades do revestimento. Estes fatores são dependentes das variáveis do processo que controlam o potencial de soldagem, isto é, tensão, corrente elétrica, velocidade de soldagem, etc. Para alta produtividade é importante que se tenha uma alta taxa de depósito com baixa diluição e penetração uniforme.

A aplicação da soldagem de revestimento necessita estar bem definida, pois a altura do cordão de solda não pode ser excessiva, que implique na perda acentuada de material do revestimento. Há que se conciliar uma penetração do cordão, de tal forma que não produza uma zona afetada pelo calor muito larga e com regiões de alta dureza, bem como baixa diluição para não mudar as características do revestimento (RIBEIRO, 2004).

A figura 2 mostra um rodete de moenda de cana utilizado na indústria sucroalcooleira, desgastado e revestido com ligas de revestimento duro pelo processo de soldagem a arco elétrico.

Figura 2 – Rodete de moenda de cana. a) Desgastado; b) Recuperado.



(a)



(b)

Fonte: Empresa Marco Botteon, Birigui - SP

2.4 Diluição

Diluição da solda é a modificação da composição química do metal de adição, causada pela parcela de metal de base que sofreu fusão e passou a compor a zona fundida. Sendo dada pela porcentagem de metal de base que participa na formação do cordão de solda e sua medição, geralmente, é obtida manualmente utilizando softwares de desenho ou processamento e análise de imagens (PEDROSA et al.,2010).

As propriedades mecânicas do revestimento dependem das variações na composição química, as quais derivam da diluição com o metal de base durante a soldagem. A participação do metal de base na composição química do metal de solda ocorre sempre nos processos de soldagem por fusão, pois esta é a única forma de assegurar que haja a continuidade no conjunto soldado.

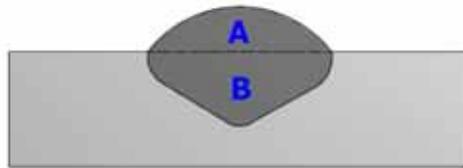
A diluição depende do tipo de junta, tipo de processo e parâmetros utilizados. Pode variar desde poucos percentuais, indicado para soldagem em revestimentos, até a soldagem autógena (sem adição de consumível), sendo o seu valor usual na faixa de 20 a 40% para processos de soldagem por fusão convencional. Deve-se lembrar de que a resistência ao desgaste e outras propriedades desejáveis do revestimento geralmente se degradam quando a diluição aumenta.

A diluição se inicia nas partes mais quentes da poça de fusão, localizadas logo abaixo do arco, o metal de adição é misturado, sob intensa agitação, ao metal de base fundido. Na parte posterior da poça, a temperatura cai e ocorre a solidificação. Nas regiões superaquecidas ocorre uma intensa interação do metal fundido com os gases e escórias presentes na região do arco. Estas interações envolvem a absorção de gases, e redução de óxidos, transferência de oxigênio para o metal, transferência de elementos de liga e impurezas do metal fundido para a escória, ou vice-versa, e a volatilização de alguns elementos como Zn (zinco), C (carbono), Cr e Al (alumínio).

A composição química final da ZF (zona fundida) depende da intensidade destas interações, das composições químicas do metal de base e de adição e da participação relativa destes na formação da ZF. Esta participação relativa é conhecida como “coeficiente de diluição” ou simplesmente como “diluição” (δ), como definida na equação (1) e figura 3:

$$\delta = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (1)$$

Figura 3 – Diluição medida na seção transversal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A diluição também tem influência sobre a fração volumétrica de carbonetos formado no revestimento. Resultados obtidos por Edwards et al. (1983), mostraram que a diluição do metal de base reduz o teor de C e Cr nos revestimentos de ligas de ferro austenítico de alto cromo, diminuindo a fração volumétrica dos carbonetos. No caso de uma diluição baixa, encontraram uma grande fração volumétrica de carbonetos do tipo M_3C , em ligas a base de carboneto de titânio, carbonetos estes não encontrados para altos valores de diluição.

2.5 Influência dos Elementos de Liga de Revestimentos

Desde os tempos em que se descobriu que as propriedades dos metais puros poderiam ser melhoradas adicionando-se outros elementos, os aços ligados tornaram-se mais conhecidos. Na realidade os metais que são soldados raramente estão no estado puro e suas propriedades podem ser melhoradas pela adição de pequenas quantidades de elementos de liga, em que os mais comuns e seus efeitos nas propriedades dos aços são os seguintes:

- Carbono (C): o carbono é o elemento mais eficaz, mais empregado e de menor custo para aumentar a dureza e a resistência dos aços. Uma liga contendo até 2,0% de carbono em combinação com o ferro é denominada aço, enquanto que a combinação com o teor de carbono acima de 2,0% é conhecida como ferro fundido.
- Manganês (Mn): o manganês em teores de até 1,0% está normalmente presente em todos os aços de baixa liga como agente desoxidante. O manganês também aumenta a resistência a tração e a temperabilidade do aço.
- Molibdênio (Mo): possui grande afinidade com o carbono formando carbonetos puros e mistos conforme o teor de carbono e sempre junto com outros elementos de liga. A velocidade de transformação perlítica dos aços ao Molibdênio é baixa, enquanto que a de transformação bainítica é alta, tendo forte tendência a formação de bainita quando resfriado ao ar. Seu emprego principal consiste na fabricação de ferramentas a quente, pois os carbonetos de Molibdênio aumentam a resistência dos aços.
- Silício (Si): tem a função de agente desoxidante mais em quantidades excessivas reduz a ductilidade. É usado nos consumíveis de soldagem para aumentar a fluidez do metal de solda.
- Cromo (Cr): é o elemento de liga que aumenta a dureza dos aços. Aumenta a resistência a corrosão e a resistência a altas temperaturas sendo o principal elemento de liga nos aços inoxidáveis.

Na soldagem de revestimentos duros, a grande maioria dos consumíveis é à base de ferro (Fe). Essas ligas podem conter, em sua composição, diferentes teores de

elementos como Carbono, Manganês, Cromo, Molibdênio, Tungstênio, Vanádio e Nióbio. Baseada na composição química as ligas são divididas em cinco classes (MONTEIRO ; CUNHA 1993 citado por RIBEIRO, 2004):

- **Ligas a base de CrNi** – indicadas para aplicação de reconstrução de peças metálicas, oferecendo boa resistência superficial na compressão metal-metal.
- **Ligas a base de Fe com NiMo** – indicados para uniões de aços de baixa e média liga, recuperação de moinhos, misturadores e partes de máquinas expostas ao desgaste por minérios.
- **Ligas do tipo aço ferramenta** – são empregadas como proteção anti-desgaste de aços ferramentas que trabalham a frio e a quente.
- **Ligas do tipo FeCrC** – indicadas para serviços onde há necessidade de alta resistência a abrasão e altas temperaturas com depósito de metal de solda com grande concentração de carbonetos de cromo.
- **Ligas do tipo CCrCo** – indicados para proteção ao desgaste, corrosão, oxidação a quente, altas temperaturas e ciclagem térmica.

2.6 Seleção de uma Liga de Revestimento

A seleção de uma liga de revestimento depende do processo de desgaste encontrado. Sendo elas classificadas em 4 grupos:

1º grupo – ligas a base de ferro que contêm menos de 20% de adição de elementos de liga.

2º grupo – ligas a base de ferro que contêm mais de 20% de adição de elementos de liga.

3º grupo – ligas não ferrosas que são subdivididas em ligas a base de níquel e ligas a base de cobalto.

4º grupo – ligas a base de carbonetos de vanádio e tungstênio empregadas em condições extremamente abrasivas

Normalmente, antes de proceder à escolha de um metal de adição para uma determinada aplicação, deve-se adotar procedimentos a serem seguidos para evitar seleções de metais de adição que não atendam ao tipo de aplicação necessário. Alguns procedimentos são recomendados para auxiliar na escolha correta do metal de adição:

- Identificar o metal base antes de proceder o reparo ou recuperação, quando possível.
- Observar as condições superficiais, verificar a existência de trincas e se a peça necessita de reconstituição antes da aplicação do revestimento duro.
- Selecionar o processo de soldagem mais adequado para a aplicação do revestimento.
- Realizar ensaios experimentais, principalmente em aplicações críticas.

2.7 Soldagem por Eletrodo Revestido

No processo de soldagem com eletrodo revestido, um arame coberto é fundido sobre a peça de trabalho pelo calor de um arco elétrico que é estabelecido entre o eletrodo e a peça e, geralmente a polaridade do eletrodo é reversa (ânodo positivo). O processo é realizado manualmente e a fonte de soldagem é comumente de "corrente constante" para prevenir mudanças da tensão durante a soldagem manual. O calor gerado pelo arco funde ambos, o metal de base e o eletrodo e causa a transferência do metal líquido, na forma de gotas da ponta do eletrodo para a poça de fusão. Vários fenômenos físico-químicos, metalúrgicos e elétricos ocorrem na zona do arco, os quais são decisivos na morfologia, nas propriedades mecânicas e na microestrutura da solda. Interações metal/escória na poça da solda e aquecimento do eletrodo devido ao efeito Joule, e também devido ao calor conduzido do arco, são alguns destes fenômenos.

A fabricação de eletrodos revestidos para a indústria moderna se torna cada vez mais complicada, à medida que a faixa de aplicações se amplia e cada aplicação requer consideração especial. O revestimento do eletrodo é geralmente compactado em torno de um arame por meio de prensas extrusoras com grande capacidade de pressão. O

material do arame do núcleo do eletrodo para eletrodos de baixa liga, como no caso do aço API, é na maioria dos casos, o aço de baixo carbono. Para aços de alta liga, um arame com composição química similar à do metal de base é mais usado. A primeira característica mais importante para o fluxo que será utilizado como revestimento é a sua extrudabilidade em torno do arame do núcleo. Ele deve aderir tenazmente ao arame e não se deteriorar ou se decompor de maneira prematura com o calor vindo da poça de fusão durante a soldagem.

O processo possui a maior flexibilidade entre todos os processos de soldagem, pois pode ser usado em todas as posições (plana, vertical, horizontal, etc) como praticamente todas as espessuras do metal base (solda multi-passe) e em áreas de acesso limitado, o que representa uma vantagem muito importante para a soldagem de tubulações, as quais são realizadas no campo e em todas as posições. Além disso, o processo é menos sensível a correntes de ar do que o processo de solda a arco de proteção gasosa (MIG/MAG).

3 DESGASTE MICRO-ABRASIVO POR ESFERA ROTATIVA

3.1 Princípio do ensaio

Uma das principais funções dos revestimentos é melhorar a resistência ao desgaste e, assim, a durabilidade dos componentes de máquinas e ferramentas. Para isso, diversas técnicas e ensaios são necessários para determinar qual o melhor tipo de revestimento para um determinado tipo de desgaste.

Técnicas tradicionais como *pin-on-disc* e disco de borracha com areia seca, figura 4, têm sido utilizadas com sucesso, mas para revestimentos duros e finos, pode haver certas dificuldades na execução dos testes. Isso está relacionado ao fato de que a espessura do revestimento restringe o volume ou a profundidade do material que pode ser removido antes da perfuração do revestimento.

Figura 4 – Equipamento de roda de borracha e areia seca para ensaios abrasivos.



Fonte: Laboratório de soldagem da FEIS/UNESP.

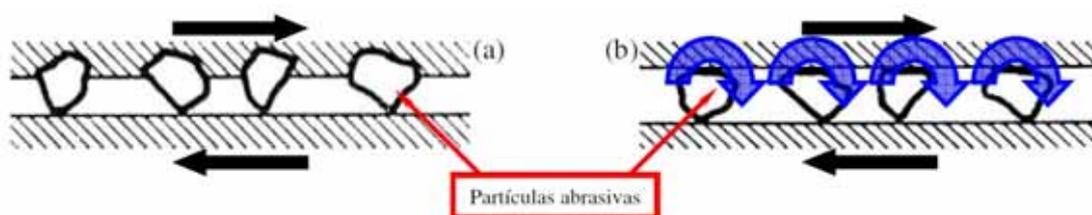
Atualmente, o desgaste abrasivo vem sendo estudado por uma nova configuração de equipamento denominado “máquina de desgaste micro-abrasivo”. No idioma inglês, o mesmo equipamento é denominado “*micro abrasive wear testing machine*”. Onde o contato entre uma esfera (em movimento de rotação) e um corpo de prova gera calotas

esféricas, ou, também conhecidas, crateras de desgaste. Através das análises dessas crateras, é possível prever, ou estimar, o comportamento ao desgaste de um material em condições reais de trabalho.

3.2 Modos de desgaste abrasivo

Nos ensaios de micro-desgaste, três modos de desgaste por abrasão podem ser encontrados: o “riscamento” (*grooving abrasion*), que ocorre quando as partículas abrasivas deslizam sobre a superfície do corpo-de-prova, e o “rolamento” (*rolling abrasion*), o qual é observado quando as partículas abrasivas rolam sobre o mesmo como na figura 5 e o modo misto sendo o “riscamento + rolamento”.

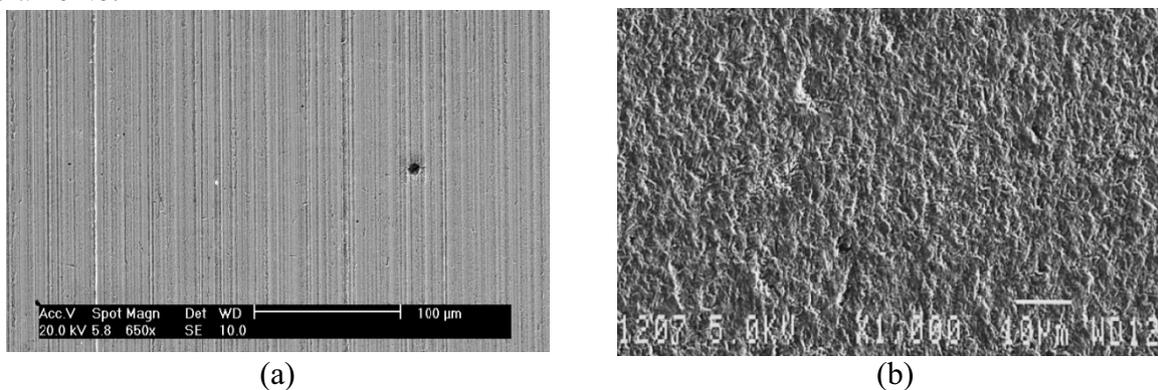
Figura 5 - Princípio do desgaste abrasivo por riscamento (a) - (b) Desgaste abrasivo por rolamento.



Fonte: (COZZA, 2011)

Cozza (2011) mostra que as classificações “riscamento”, “rolamento” e “misto” se baseiam nas marcas de desgaste geradas pelas partículas abrasivas no corpo-de-prova, figura 6.

Figura 6 – Marcas de (a) desgaste abrasivo por riscamento e (b) desgaste abrasivo por rolamento.

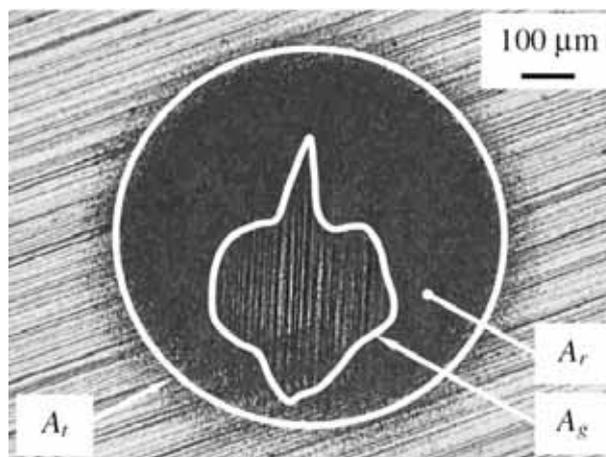


Fonte: (COZZA, 2011)

As figuras 6a e 6b exibem separadamente as atuações dos modos de desgaste abrasivo por “riscamento” e “rolamento”, respectivamente. Conforme as condições de ensaio, os dois modos podem ocorrer simultaneamente gerando o modo “misto” de desgaste.

A figura 7 mostra um exemplo deste fenômeno, onde A_t é a área total da cratera de desgaste, A_r é a área com atuação por rolamento e A_g é a área do desgaste abrasivo por riscamento. Os índices "t", "r", "g" fazem referência aos termos “total”, “rolling” e “grooving” respectivamente (COZZA; 2011).

Figura 7 – Desgaste abrasivo misto: atuação simultânea de desgaste abrasivo por rolamento e riscamento.



Fonte: (COZZA, 2011)

Conforme as condições de ensaio pode ter a transição entre os dois modos, rolamento para riscamento ou riscamento para rolamento. Para altas concentrações de pasta abrasiva, prevalece o desgaste abrasivo por rolamento e, para altas forças normais, predomina o desgaste abrasivo por riscamento.

Há um grande interesse nesta técnica de ensaio de abrasão de revestimentos que tem gerado vários sistemas de ensaios com diferentes configurações de equipamentos. Dentre as razões que chamam a atenção para esta técnica estão:

- O sistema de teste é relativamente barato para comprar ou fabricar.
- Pode ser transformado em um sistema de ensaio no local, ou seja, o teste pode ser feito em campo em vez de o componente ter que ir ao laboratório.

- O sistema de teste parece simples tornando-se atraente.
- As amostras de teste podem ter tamanho reduzido devido área de desgaste ser pequena.
- O sistema de teste pode ser usado para medição de espessura.

Em contra partida alguns fatores que podem afetar as medições e os resultados estão:

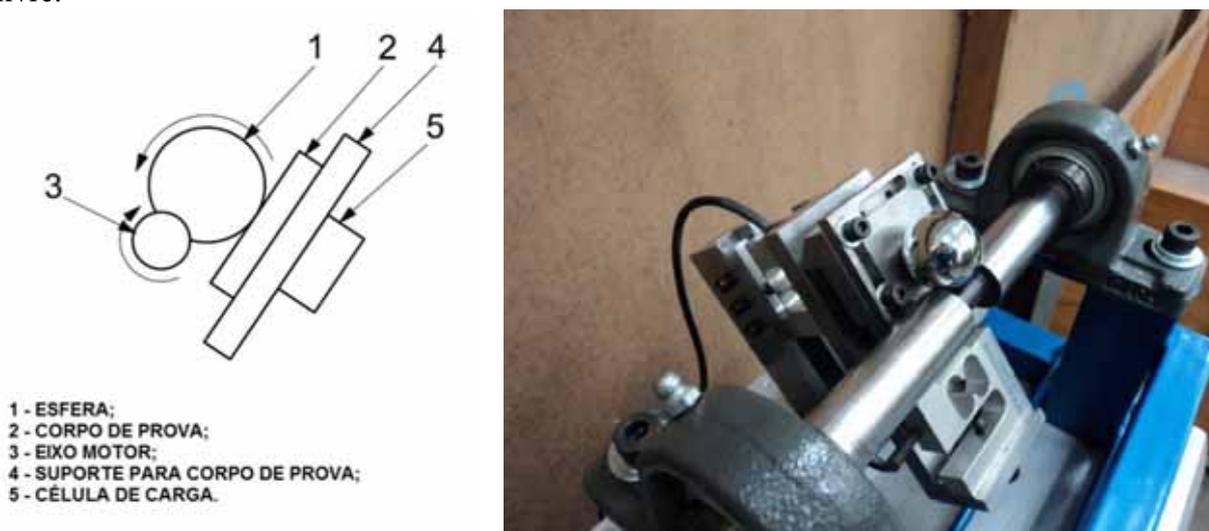
- Dificuldade na resolução das bordas das crateras de desgaste de acordo com a espessura do revestimento.
- Qual o método para medição do tamanho e profundidade da cratera de desgaste.
- Contaminação do abrasivo por partículas que vão de desprendendo das amostras.
- A teoria para análise dos resultados pode não ser apropriada para todos os materiais e condições de teste.

3.3 Configurações de equipamentos.

Existem duas configurações básicas de equipamento para realização de ensaios de desgaste micro-abrasivo: equipamento por esfera rotativa livre e o equipamento por esfera rotativa fixa.

Na configuração esfera livre, figura 8, a rotação da esfera ocorre devido à rotação (em sentido oposto) do eixo-motor e a força normal é definida em função do peso da esfera e da inclinação θ do corpo de prova, sendo diretamente proporcional ao peso da esfera e inversamente proporcional à inclinação θ .

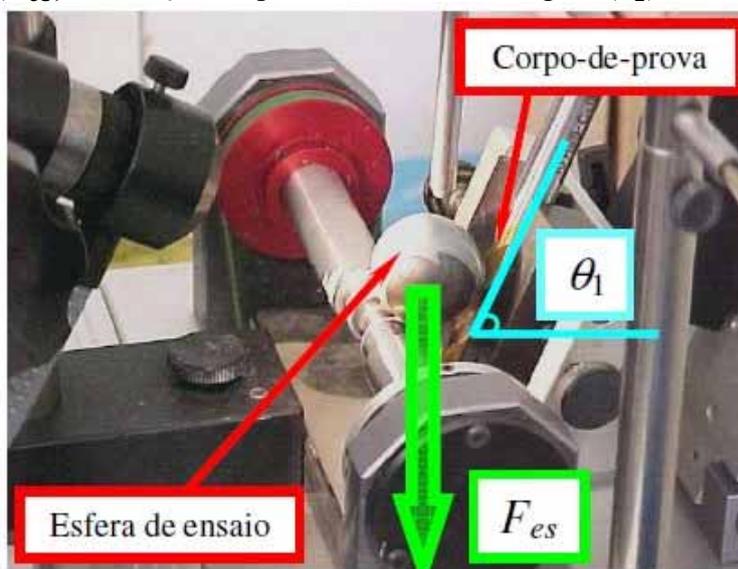
Figura 8 – Representação esquemática do princípio do ensaio de desgaste por esfera rotativa livre.



Fonte: (SUZUKI, 2013)

Quanto maior o diâmetro da esfera e menor o ângulo θ_1 , figura 9, maior a força normal atuante sobre o corpo-de-prova e vice-versa.

Figura 9 – Equipamento de ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa livre. Força normal (F_{es}) em função do peso da esfera e do ângulo (θ_1).

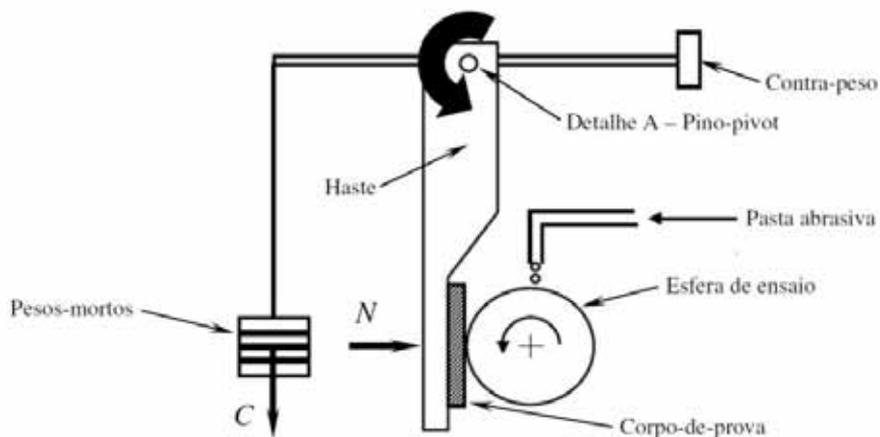


Fonte: (COZZA, 2006)

Na configuração de equipamentos por esfera-fixa, a força normal é aplicada pelo sistema de “peso-morto”, como pode ser observado na figura 10. O corpo-de-prova é fixo em uma haste, que é livre para girar em torno do “pino-pivot”. Quando a carga C é aplicada, pela inserção dos “pesos-mortos”, a haste tende a rotacionar em torno do

“pino-pivot”, provocando o contato entre o corpo-de prova e a esfera e a atuação da força normal. A função do contrapeso é equilibrar o sistema para a condição de $C = 0$ e $N = 0$.

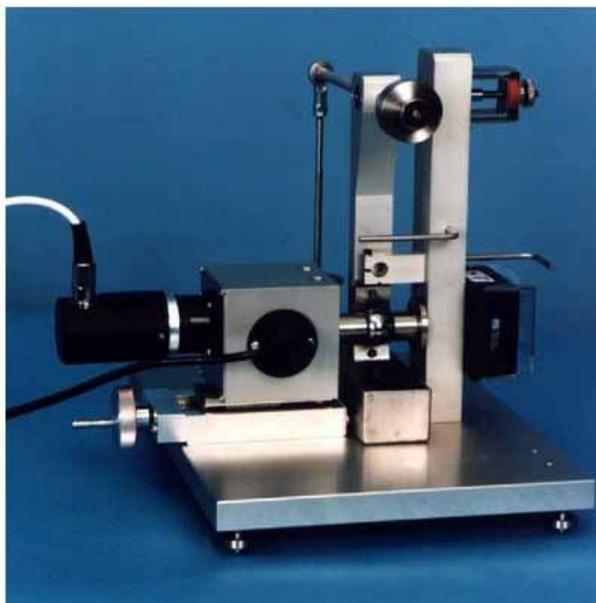
Figura 10 – Esquema de aplicação da força normal no equipamento de esfera fixa.



Fonte: (COZZA, 2011).

A figura 11 mostra um equipamento de configuração esfera-fixa disponível comercialmente pela empresa Phoenix Tribology Ltd – Inglaterra.

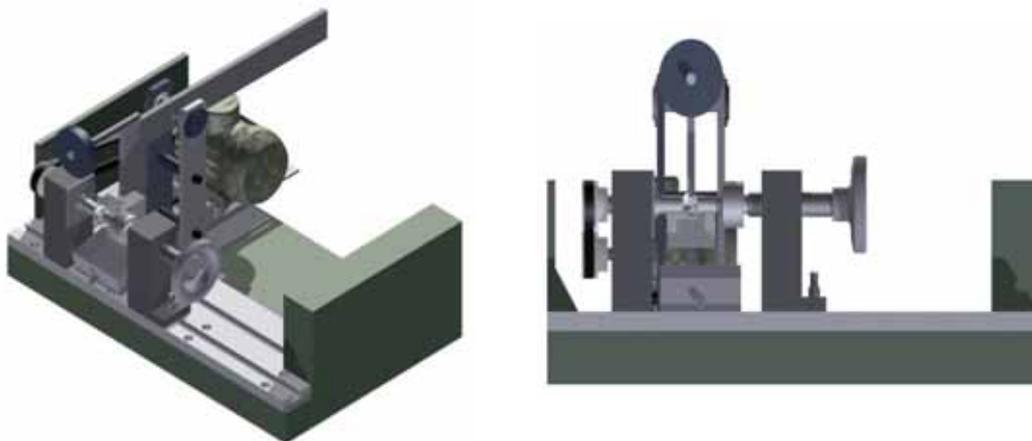
Figura 11 – Modelo de equipamento para ensaio de desgaste micro-abrasivo por esfera rotativa – Modelo TE 66 SLIN, disponível no mercado.



Fonte: PHOENIX TRIBOLOGY Ltd - INGLATERRA

Para realização deste trabalho, foi projetado e construído um equipamento “Máquina de Ensaio de Desgaste Micro Abrasivo por Esfera Fixa”, figura 12.

Figura 12 – Máquina de desgaste projetada e desenvolvida.

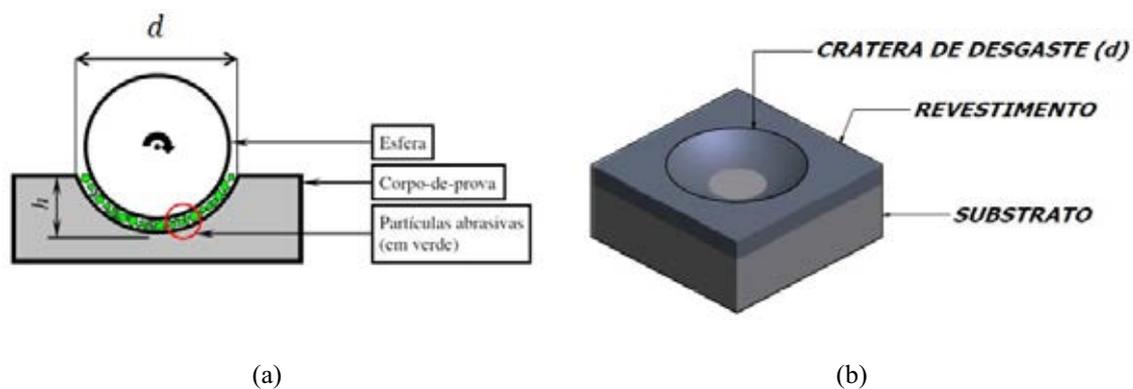


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 Grandezas Geométricas.

Em uma cratera de desgaste, são analisadas três grandezas geométricas: diâmetro (d), profundidade (h) e o volume (material removido) (V), figura 13.

Figura 13 – Profundidade de penetração da esfera – h ; Diâmetro da Cratera- d . (a) esquema de desgaste com esfera; (b) esquema da cratera gerada pelo desgaste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O diâmetro da cratera de desgaste, d , pode ser medido por meio de microscopia óptica, “PC scanners” e até mesmo softwares de CAD (Computer Aided Design).

A profundidade (h) e o volume da cratera de desgaste (V) podem ser calculados em função de d , pelas equações (2) e (3), respectivamente conforme a norma ISO 26424:2008.

$$h = \frac{d^2}{8R} \quad \text{para } d \ll R \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi d^4}{64R} \quad \text{para } d \ll R \quad (3)$$

Sendo R , o raio da esfera de ensaio.

Alguns parâmetros que podem ser utilizados para diferenciar “desgaste abrasivo” de “desgaste micro-abrasivo” são a taxa de desgaste (Q), o coeficiente de desgaste (k) e o tamanho médio das partículas abrasivas envolvidas no processo de desgaste.

Em outras palavras, pode-se dizer que os ensaios de desgaste do tipo “esfera rotativa” geram “desgaste micro abrasivo” e os tipos “roda de borracha” e “pino-sobre-disco” geram desgaste abrasivo (VILLABÓN; SINATORA, 2006).

A relação entre o volume da cratera de desgaste e a carga normal, (N), gera a equação de Archard, equação (4) para o desgaste abrasivo.

$$V = kSN \quad (4)$$

sendo k o coeficiente de desgaste, S a distância de deslizamento e N a força normal. Para isso temos a equação (5):

$$k = \frac{\pi d^4}{64RSN} \quad (5)$$

O coeficiente de desgaste também pode ser calculado pela equação (6):

$$k = \frac{V}{SN} \quad (6)$$

A taxa de desgaste gerada pelas partículas abrasivas atuantes no sistema também é definida pela equação de Archard, equação (7):

$$Q = k.N \quad (7)$$

Substituindo a equação (6) na equação (7), a taxa de desgaste pode ser calculada pela equação (8)

$$Q = \frac{V}{S} \quad (8)$$

O tempo de ensaio pode ser definido pelo quociente da velocidade tangencial periférica da esfera de ensaio (v_t) pela distância de deslizamento como mostra a equação (9):

$$t = \frac{S}{v_t} \quad (9)$$

Porém, v_t pode ser escrito como $v_t = 2\pi n_{ESF} R$. Logo, o tempo na equação (9) pode ser calculado pela equação (10):

$$t = \frac{S}{2\pi n_{ESF} R} \quad (10)$$

sendo n_{ESF} os valores de rotação da esfera. Com isso, t fica em função de S , n_{ESF} e R .

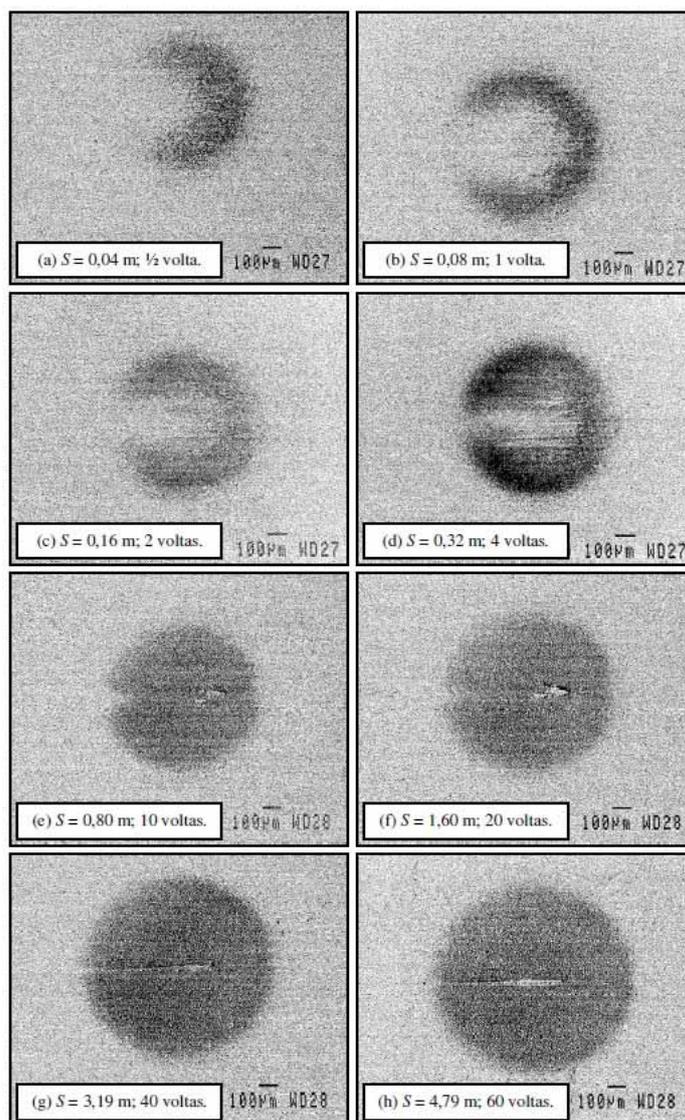
Cozza (2011) cita a relação da distância de deslizamento com o tempo de ensaio, destacando os parâmetros relativamente importantes em estudos voltados ao desgaste micro-abrasivo gerado por esfera rotativa. Assim, pode-se conhecer o comportamento de V , Q e k , e saber se o Regime Permanente de Desgaste foi obtido ou não.

Caso a distância de deslizamento definida para o ensaio seja relativamente baixa, a cratera de desgaste poderá apresentar em sua borda, um aspecto difuso. Isso pode ser um indício de que o ensaio não alcançou o regime permanente de desgaste.

Cozza (2011) relata que conforme a distância de deslizamento aumenta, a definição da cratera torna-se mais evidente conforme a figura 14. Para estes resultados, os ensaios foram realizados em um corpo de prova de alumínio comercialmente puro,

com uma esfera de aço AISI 52100 e sob a ação de $N = 0,25N$. O material abrasivo foi o carbetto de silício (SiC), com tamanho médio da partícula de $4,25 \mu\text{m}$, a uma concentração de $0,75 \frac{g_{SiC}}{cm^3_{H2O-Destilada}}$.

Figura 14 – Diferentes estágios de formação de uma cratera de desgaste, com as respectivas distâncias de deslizamento e revoluções da esfera de ensaio.



Fonte: (COZZA, 2011).

3.5 Regime Permanente de Desgaste

Regime Permanente de Desgaste ocorre quando, a taxa de desgaste (Q) ou coeficiente de desgaste (k), permanece constante ao longo do tempo, não existindo uma distância de deslizamento, ou um tempo de ensaio padrão, para qual processo de desgaste atinja o regime permanente. Isso depende principalmente dos materiais do corpo-de-prova e da esfera de ensaio.

Fatores como a força normal, dureza, forma e tamanho médio das partículas abrasivas, concentração da pasta abrasiva e sua vazão entre o corpo de prova e a esfera podem influenciar na obtenção do Regime Permanente de Desgaste. No trabalho de Trezona et al. (1999), o desgaste entrou em regime permanente a partir de 8 metros, com uma esfera de 25,4 mm de diâmetro, rotação de 37,6 rpm e $N=0,25$ N.

Outra maneira de verificar se o regime permanente de desgaste foi alcançado é através das análises dos gráficos do volume de desgaste em função do tempo de ensaio [$V = f(t)$], ou do volume de desgaste em função da distância de deslizamento $V = f(S)$. Caso o volume de desgaste apresente variação linear com o tempo de ensaio ou com a distancia de deslizamento, pode-se dizer que o regime permanente de desgaste foi alcançado (COZZA et al., 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 – Materiais

4.1.1 – Metal de base

O metal base utilizado para soldagem dos revestimentos duros foi o aço carbono conforme a especificação ASTM A-36 do fabricante ArcelorMittal com as seguintes dimensões: 200 mm de comprimento, 80 mm de largura e 12,5 mm de espessura, conforme as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – composição química de metal de base.

Composição Química (% em massa)					
C	Mn	P	S	Si	Cu
0,25	0,80 - 1,20	0,040	0,050	0,40	0,20

Tabela 2 - Propriedades mecânicas nominais do metal de base.

Propriedades Mecânicas fornecidas pelo fabricante	
Limite de Escoamento	250 Mpa
Limite de Ruptura	400 – 500 Mpa
Dureza Rockwell	10 HRc

4.1.2 Metal de adição

Como metal de adição foi utilizado o eletrodo revestido do tipo Fe-Cr-C, cuja denominação comercial, diâmetro, composição química típica e a dureza do revestimento estão prescritos na tabela 3. A composição química bem como as propriedades mecânicas apresentadas são valores característicos fornecidos pelo fabricante.

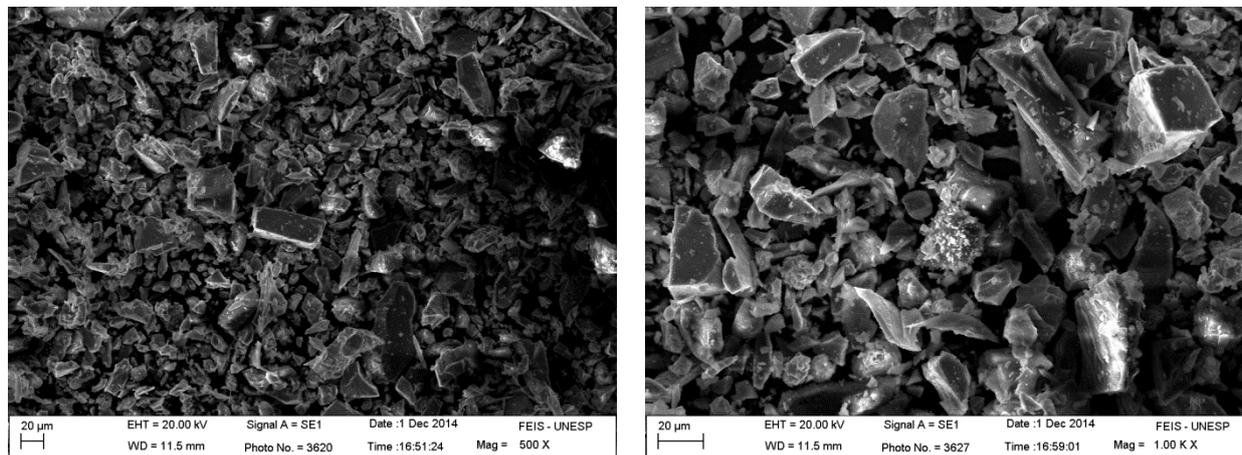
Tabela 3 – Composição química, dureza do eletrodo.

Consumível: Eletrodo Revestido Duro UTP LEDURIT 710 Ø 4,0 mm		
Análise Química do Metal Depositado (%)		
C	Cr	Mn
3,5	30,0	4,0
Dureza do Deposito de Solda: 62 HRc		

4.1.3 Abrasivo

Como material abrasivo foi utilizado carbeto de silício preto e água destilada na concentração de $0,35 \text{ g/cm}^3$. A figura 15 mostra uma micrografia eletrônica de varredura do pó abrasivo utilizado.

Figura 15 – Partículas abrasivas de SiC.



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 – Equipamentos

4.2.1 Fonte de Energia

A fonte de energia empregada para o processo de soldagem foi uma fonte retificadora do tipo tensão constante, modelo TRR 3410S NMR, da Bambozzi, com corrente máxima de 400 A.

4.2.2 Equipamento para Ensaio de Desgaste

Para os ensaios de micro desgaste à pressão constante, foi utilizado o equipamento de micro desgaste por esfera rotativa, projetado e construído no Laboratório de Soldagem do Departamento de Engenharia Mecânica da FEIS/Unesp, conforme ilustrado na figura 16. Para a elaboração deste equipamento seguiu-se como base a norma ISO 26424-2008 e o guia de boas práticas “*Ball cratering or Micro-Abrasion Wear Testing of Coatings*”.

Figura 16 – Equipamento de micro desgaste por esfera rotativa para os ensaios abrasivos.



Fonte: Elaborado pelo autor

A esfera utilizada é a AISI 52100, na condição “temperado e revenido” com diâmetro de 25,4 mm (uma polegada) conforme mostrado em detalhe na figura 17.

Figura 17 – Detalhe da esfera de aço durante o ensaio de desgaste.



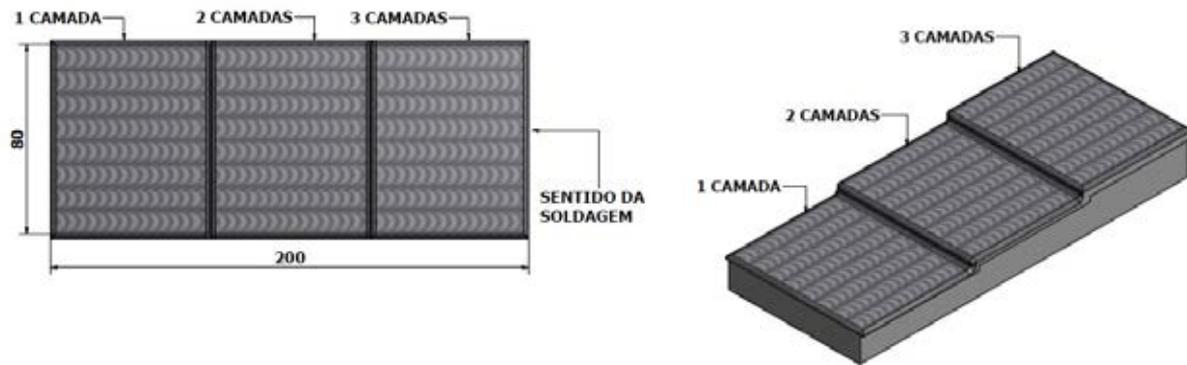
Fonte: Elaborado pelo autor

4.2.3 Soldagem das Amostras

Para realização das camadas de revestimento, inicialmente foram feitos cordões longitudinalmente ao seu comprimento, sobre a face de 12,5 mm, um cordão em cada borda, sendo preenchida em seguida toda a amostra. Antes de iniciar a soldagem de um novo cordão, realizou-se a escovação do cordão anterior para a eliminação dos pós de óxidos, fuligem e carepa.

A figura 18 mostra o esquema representativo da deposição dos cordões de revestimento no corpo de prova.

Figura 18 – Detalhe da soldagem da amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Corte e Usinagem das Amostras

As amostras foram cortadas em uma máquina de corte tipo *CUT-OFF*, com refrigeração à água, utilizando disco abrasivo de alta rotação (3600 rpm). Os corpos de prova, para o ensaio de desgaste, foram usinados diretamente numa retifica plana magnética (FERDIMAT FRP 300) com rebolo abrasivo, figura 19.

Figura 19 - Detalhe das amostras depois do corte e retifica.



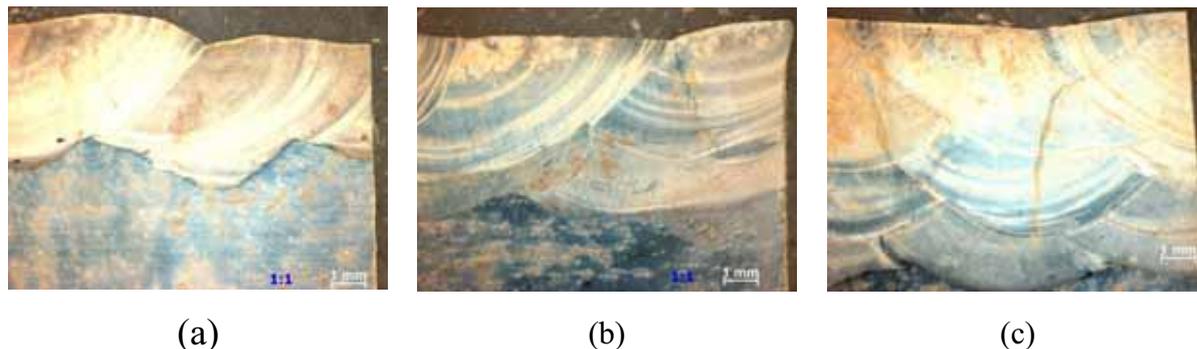
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.5 Aplicação do revestimento

Para a soldagem do revestimento duro em uma, duas e três camadas o controle de corrente, tensão, velocidade de soldagem e temperatura foram feitos de forma manual, na empresa Marco Botteon da cidade de Birigui – SP, com ajuda de um alicate amperímetro, um cronômetro e um termômetro digital.

A corrente adotada para soldagem de revestimento, teve base nos valores recomendados pelo fabricante, que estabelece para o eletrodo de bitola 4,0 mm, uma corrente entre 110 a 140 A. Para realização das camadas de revestimento fez-se um pré-aquecimento no metal de base e, logo após, foram feitos os cordões conforme ilustrados na figura 20 e na tabela 4 abaixo.

Figura 20 - Amostras: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) três camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 4 - Controle de temperatura entre passes na soldagem das camadas de revestimento.

Controle de temperatura entre passes na soldagem do revestimento			
Consumível: Eletrodo Revestido Duro UTP LEDURIT 710 Ø 4,0 mm			
Metal Base: Chapa Aço Carbono ASTM A36 – 200 X 80 X 12,5 mm			
Amperagem da Fonte: 130A			
Pré-aquecimento: 65 °C			
Passe	Tempo (segundos)	Temperatura (°C)	Tempo de Resfriamento (Minutos)
1°	53	120	
2°	53	234	
3°	53	405	
4°	53	417	
5°	53	431	
6°	53	504	
7°	53	537	

Tabela 4 continua ...

8°	53	588	
9°	53	630	10
10°	53	406	
11°	53	462	
12°	53	517	15
13°	53	309	
14°	53	425	Manta térmica de fibra cerâmica
		146	85

4.2.6 Preparação da Análise Metalográfica

As amostras foram cortadas transversalmente e lixadas com lixas 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, na sequência foram polidas com abrasivo de alumina e atacadas por 15 segundos com reagente de mistura de ácidos utilizados para ferro fundido de alto cromo [90 ml de álcool etílico, 5 ml de HCl (ácido clorídrico), 2,5 g de FeCl (cloreto de ferro), 5 g de ácido pícrico]. Esse processo é necessário para revelar a profundidade de penetração do cordão no metal de base, ZTA (zona termicamente afetada) e a taxa de diluição.

4.3 Métodos

Para que os objetivos desse trabalho fossem alcançados fez-se necessário o cumprimento de uma série de etapas:

- Planejamento experimental: especificação de parâmetros como corrente, velocidade de soldagem, controle da temperatura durante a soldagem, geometria do cordão de solda e diluição em uma, duas e três camadas de revestimento, projeto e construção do equipamento para o ensaio de desgaste micro abrasivo.
- Preparação e realização dos experimentos: com os parâmetros definidos, realizaram-se alguns experimentos para verificação do comportamento do equipamento construído.

4.4 Projeto e construção de um equipamento de Ensaio de Desgaste Micro-Abrasivo.

Foi realizado, inicialmente, um estudo sobre a configuração do equipamento que atenderia as necessidades da pesquisa e reaproveitasse os materiais já disponíveis no laboratório como o riscador na figura 21.

Figura 21 - Riscador de amostras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para melhor aproveitamento das peças disponíveis, optou-se pela configuração “esfera rotativa fixa” e na sequência o equipamento antigo foi desmontado, figura 22, para a avaliação das partes.

Figura 22 – Remoção dos componentes para limpeza e avaliação.

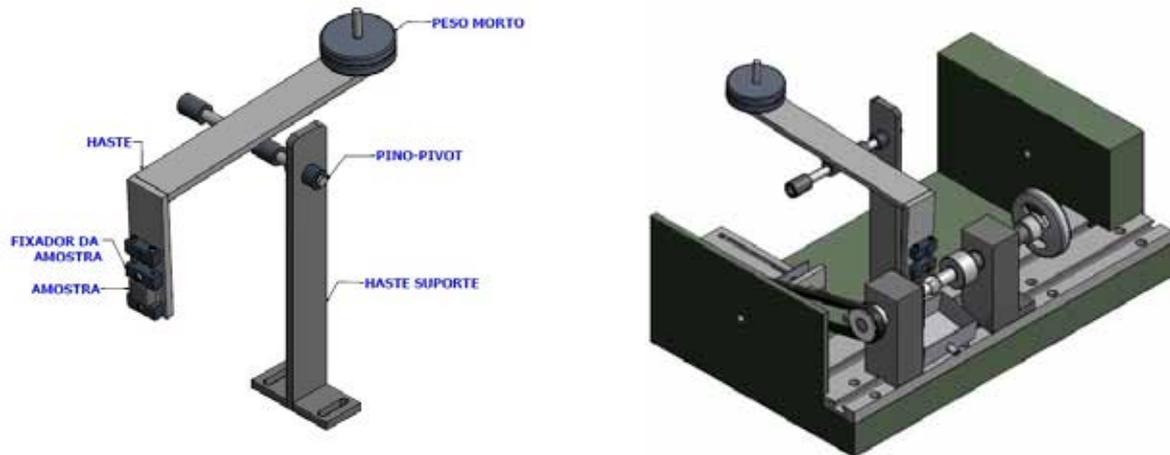


Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as peças retiradas do equipamento antigo, os únicos componentes que se reaproveitaram foram a base, o motor e a guia. Com estas dimensões e auxílio do

programa *Autodesk Inventor 2012*, iniciou-se o modelamento do primeiro protótipo para máquina de micro-desgaste, mostrado na figura 23.

Figura 23 – Primeiro projeto da máquina de micro-desgaste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o protótipo virtual finalizado o próximo passo foi o levantamento dos valores da matéria prima, componentes e usinagem das peças. Os blocos e os eixos para fixação da esfera foram usinados no GPU da FEIS/Unesp. Feito a usinagem, iniciou-se a montagem do primeiro protótipo, figura 24.

Figura 24 – Configuração final do 1º Protótipo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para esta configuração de equipamento foram realizados dois ensaios em um corpo de prova ASTM A-36 de 30 x 25 x 12,5 mm, mesmo material usado como metal

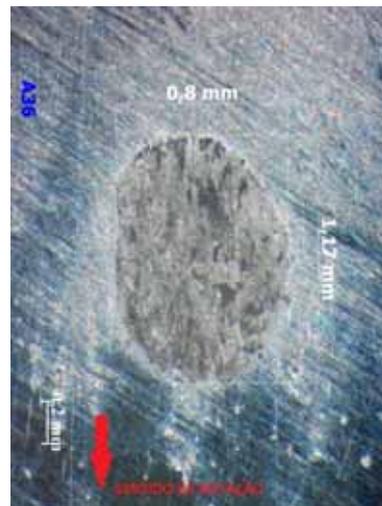
base das amostras, apenas para avaliar o comportamento do equipamento durante os ensaios.

Os ensaios mostraram que o sistema precisava de alguns reajustes, sendo o principal deles melhorar a rigidez do acionamento e o desalinhamento dos eixos que prendiam a esfera. A figura 25 mostra as crateras feitas inicialmente com esta configuração do equipamento com uma carga de 3 N .

Figura 25 – Crateras feitas com a 1º configuração do equipamento. (a) 15 minutos, 300 rpm; (b) 10 minutos, 300 rpm.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Embora o equipamento estivesse fornecendo resultados, outros ajustes seriam necessários para melhorar as análises como um contra peso para equilibrar o sistema e o motor reaproveitado não tinha torque suficiente para transmissão e “patinava” varias vezes nos ensaios. Isso levou a novas discussões sobre a configuração do equipamento e decidiu-se por realizar um aprimoramento no mesmo.

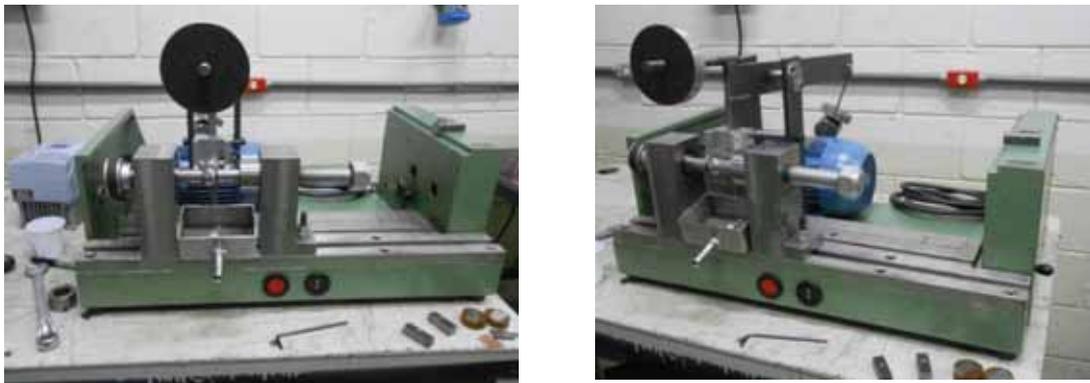
Um novo conjunto foi projetado e incorporado ao protótipo virtual. O sistema de fixação dos corpos de prova foi projetado e o motor, reaproveitado do riscador de amostras, foi substituído por um motor maior de 0,5 cv. Resultando na configuração das figuras 26 e 27:

Figura 26 – Alteração do conjunto de porta amostra para aumentar a rigidez.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27 – Configuração atual da Máquina de micro-desgaste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mesmo com essas alterações feitas no equipamento as crateras de desgaste ainda continuavam saindo com a borda difusa e com o formato oval, figura 28.

Figura 28 - Crateras de desgaste feitas com o equipamento alterado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi então que observamos que a medida que a esfera girava em contato com o corpo-de-prova um dos eixos que a fixava ia se soltando, perdendo contato e fazendo-a girar de forma irregular, patinando e não formando as “trilhas” de contato. A área e contato das amostras não estavam perpendiculares com a esfera devido ao formado com que foi usinado o porta amostra.

Esses problemas foram corrigidos com uma contra porca, figura 29, na rosca em um dos eixos, um terceiro rolamento foi acrescentado no primeiro bloco para retirar uma folga que fazia vibrar a transmissão da correia/eixo, um novo porta amostra foi usinado, figura 30, e cada amostra tiveram duas laterais retificadas para manter o paralelismo.

Para evitar a oxidação as peça foram galvanizadas, com exceção dos eixos que prendem a esfera, e um tacômetro magnético foi acrescentado para contar o numero correto de voltas e verificar se rotação do inversor era a mesma da esfera.

Figura 29 – Correções feitas no equipamento: contra porca.



Fonte: Elaborado pelo autor.

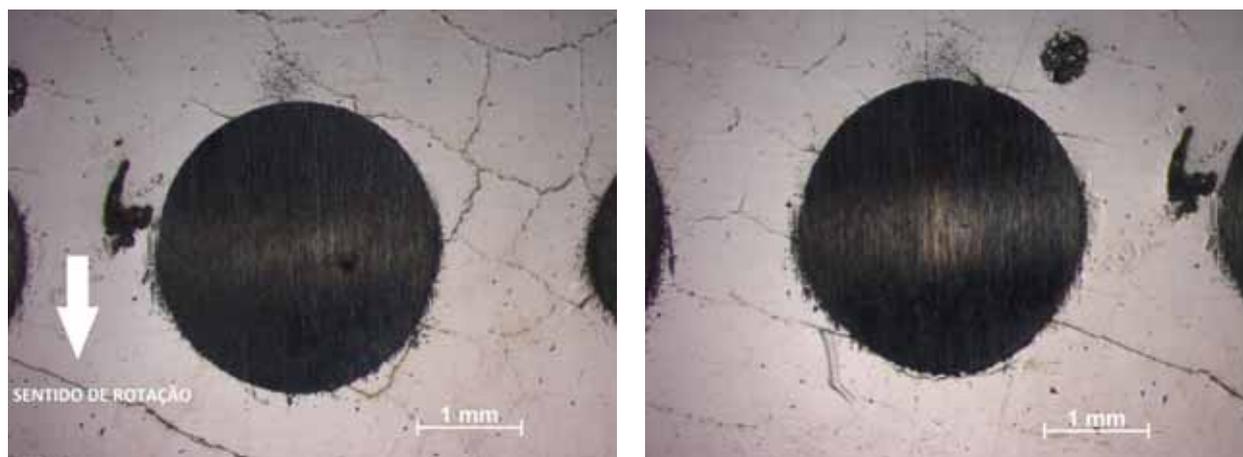
Figura 30 – Novo porta amostra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas alterações deram bons resultados, como mostra a figura 31, e a máquina de micro-desgaste por esfera rotativa fixa estava pronta para funcionar.

Figura 31 – Ensaio feitos com a máquina ajustada.



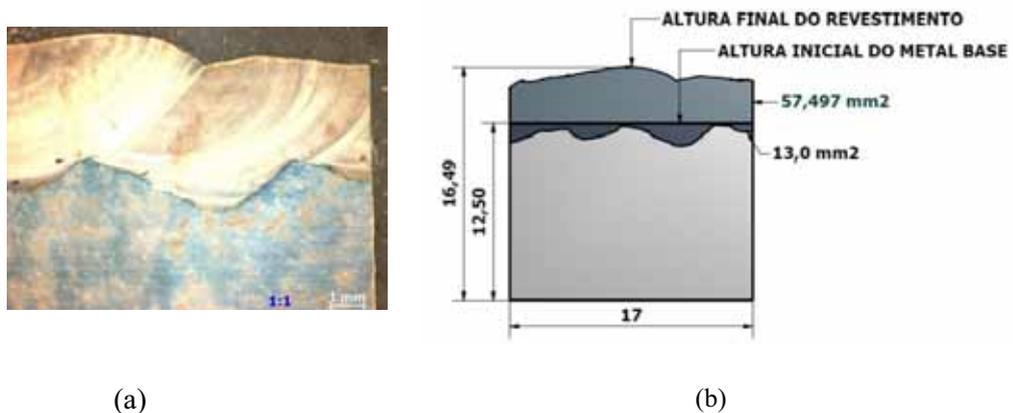
Fonte: Elaborado pelo autor

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise Metalográfica da Diluição

Através de análises metalográficas da seção transversal dos cordões de solda, foram realizadas as medidas das alturas das camadas de revestimento para cálculo da taxa de diluição. A figura 32 (a), mostra a macrografia do revestimento com uma camada. A figura 32 (b) representa a macrografia para o cálculo da taxa de diluição.

Figura 32 – a) Macrografia representativa da seção transversal do revestimento com 1 camada; b) Macrografia para cálculo da diluição.



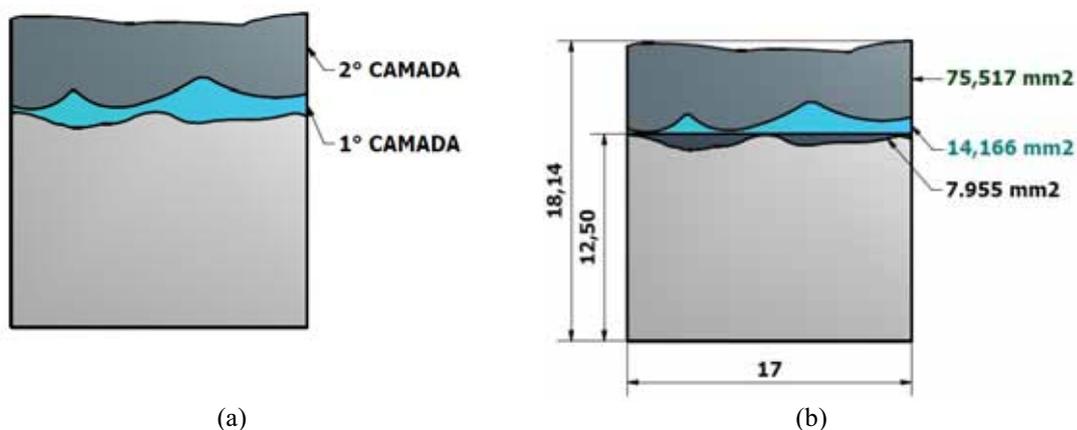
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo da taxa de diluição com uma camada, utilizamos a equação (1) em que:

$$\delta = \frac{13}{57,497 + 13} \times 100 = 18,44\%$$

Para o cálculo da taxa de diluição com duas camadas utilizamos a mesma a equação (1) como mostra a figura 33.

Figura 33 – (a) - Definição camadas de revestimento; (b) Determinação das áreas envolvidas no cálculo da diluição em duas camadas com o auxílio do programa Autodesk Inventor 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Calculo da diluição da primeira camada:

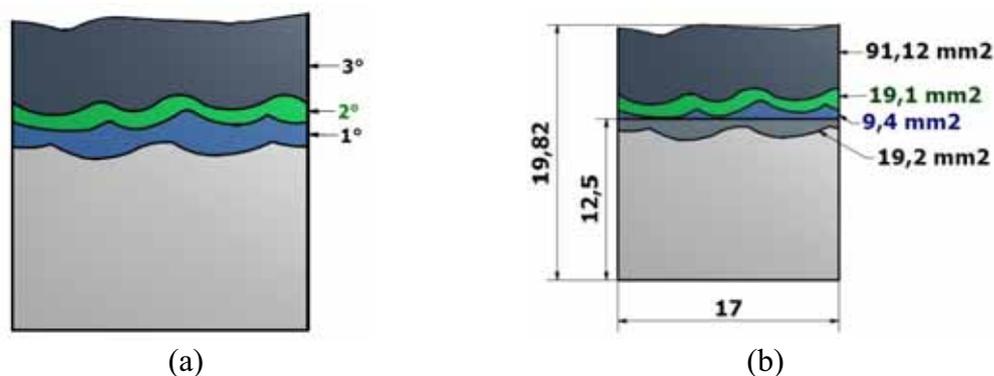
$$\delta = \frac{7,955}{14,166 + 7,955} \times 100 = 36\%$$

Para o calculo da diluição para segunda camada aplicada sobre a primeira temos:

$$\delta = \frac{14,166}{75,517 + 14,166} \times 100 = 15,8\%$$

O calculo da diluição da terceira camada de revestimento segue o mesmo principio representado na figura 34.

Figura 34 – (a) – Definição das três camadas de revestimento; (b) Determinação das áreas envolvidas no calculo da diluição com o auxílio do programa Autodesk Inventor 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Calculo da diluição da primeira camada:

$$\delta = \frac{19,2}{9,4 + 19,2} \times 100 = 67,13\%$$

Para o calculo da diluição para segunda camada aplicada sobre a primeira temos:

$$\delta = \frac{9,4}{19,1 + 9,4} \times 100 = 33\%$$

Para o calculo da diluição da terceira camada aplicada sobre a segunda temos:

$$\delta = \frac{19,1}{91,12 + 19,1} \times 100 = 17,32\%$$

Comparando a taxa de diluição das amostras, na tabela 5, é possível analisar que conforme aumenta o numero de camadas diminui a taxa de diluição, ou seja, a participação do metal base, na soldagem por fusão, vai diminuindo de acordo com a quantidade de material depositado.

Tabela 5 – Taxa de diluição das amostras contendo 1,2 e 3 camadas.

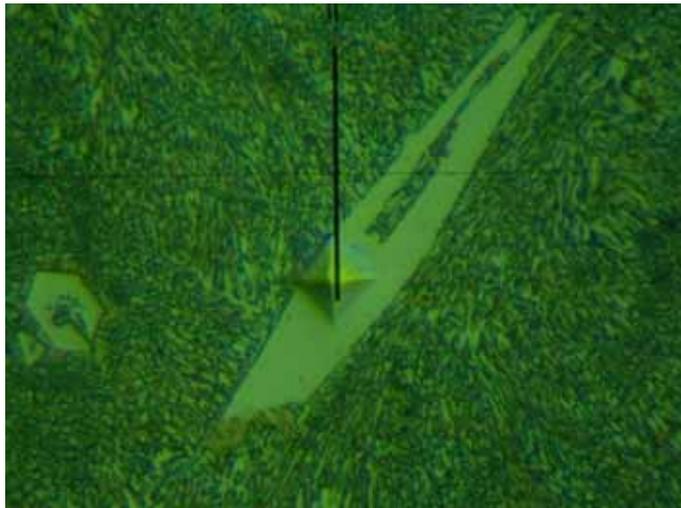
Diluição (δ)%	1 Camada	2 Camadas	3 Camadas
	18,44	15,8	17,32

5.2 Variação da Micro Dureza no Cordão de Solda

A dureza de um material pode definir-se como traduzindo a resistência à penetração da sua superfície. A dureza pode definir outras propriedades mecânicas relevantes no material e, sendo assim, há diversos métodos que obedecem todos ao mesmo principio segundo o qual é aplicada uma carga determinada a um penetrador bastante duro que entra em contato com o a superfície do material a testar como ilustra a figura 35.

As dimensões da marca de penetração (identação) deixada na superfície são medidas e quanto menor for a identação maior será a dureza do material.

Figura 35 – Marca de penetração do indentador.



Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio de um ultramicrodurômetro digital (SHIMADZU), modelo DUH 211S, figura 36, foram determinadas medidas equivalentes de microdureza Vickers HV*. A medida HV* é determinada a partir da dureza sob carregamento máximo e considerando o indentador Vickers com geometria ideal. A carga máxima utilizada para os ensaios foi 1N (100,6 gf), mantida durante 5 segundos. Para levantamento da variação de microdureza nos cordões de solda, as medidas foram feitas com um espaçamento de 0,2 mm, até atingirem o metal base. Para fins estatísticos foram feitas o cálculo da média baseado numa série de três medições.

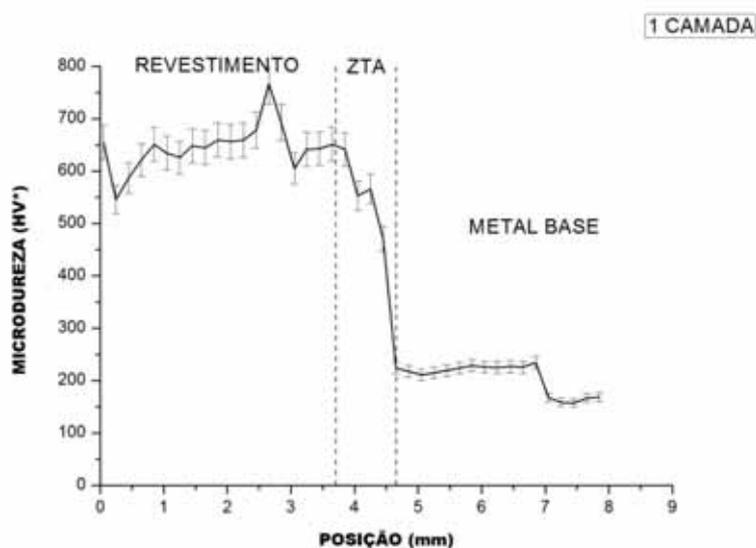
Figura 36 – Microdurómetro Vickers.



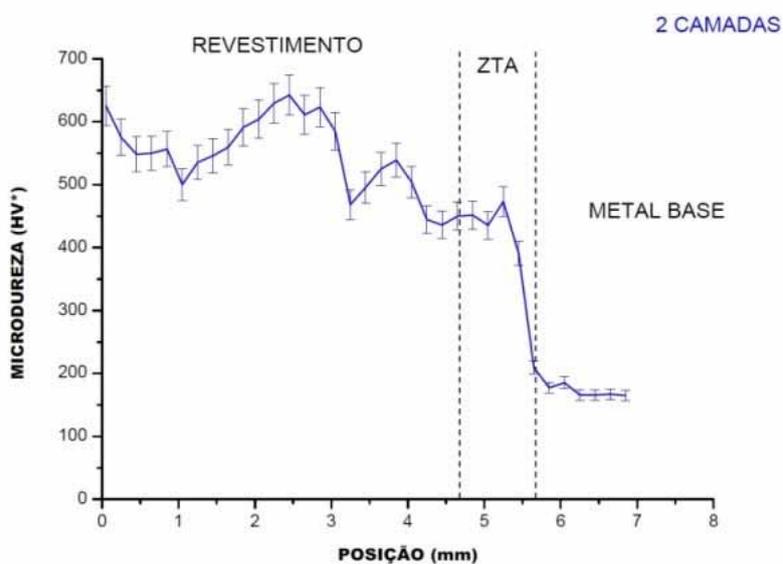
Fonte: Laboratório de Usinagem FEIS/UNESP.

Os gráficos apresentados pela figura 37 mostram os resultados dos ensaios de microdureza realizados nas amostras do material. Conforme esperado, a dureza superficial das amostras aumentou consideravelmente quando comparado a dureza da matriz. A variação da dureza mostrada nos gráficos foi resultado das regiões com maior e menor concentração de carbonetos de cromo (CrC) que o indentador penetrou.

Figura 37 - Medidas da microdureza partindo da superfície do revestimento ao metal base com diferentes camadas. a) 1 camada de revestimento. b) 2 camadas de revestimento. c) 3 camadas de revestimento. d) Comparativo da microdureza das 3 amostras.

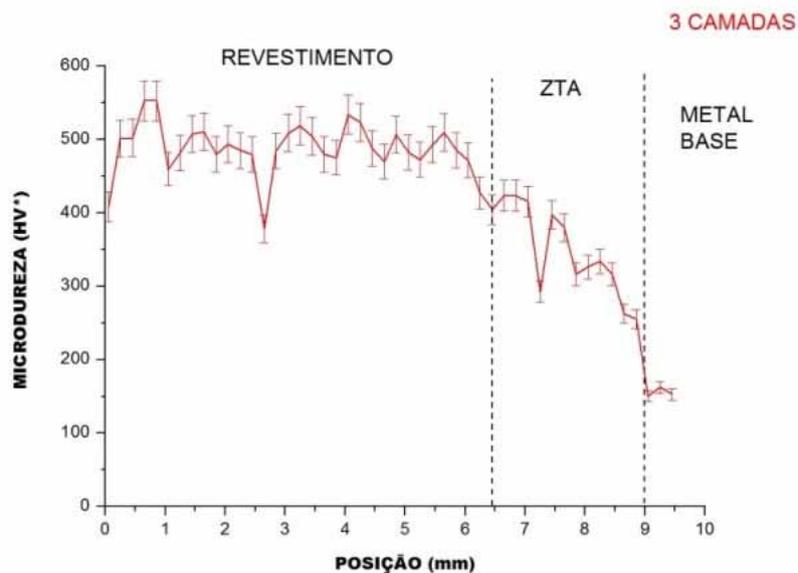


(a)

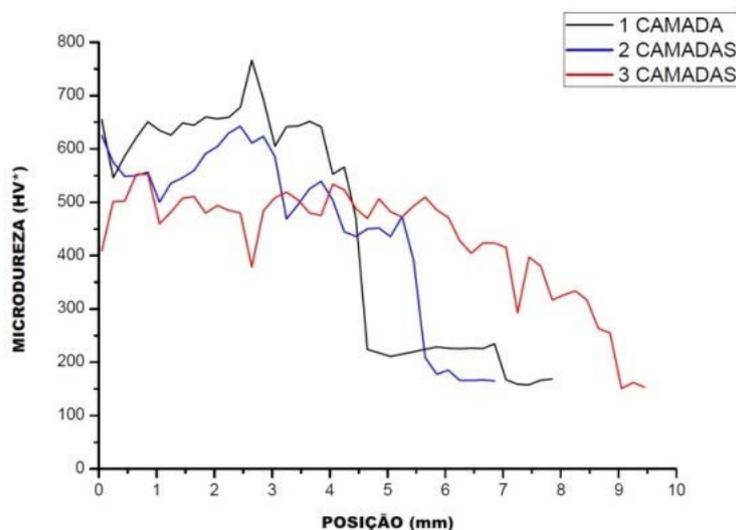


(b)

Figura 37 continua ...



(c)



(d)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os gráficos da figura 37 mostram que a diferença na taxa de diluição podem afetar a microdureza do revestimento onde as amostras com apenas uma camada apresentam uma dureza maior que as amostras onde foram depositadas duas e três camadas do mesmo material.

Conforme informativo do fabricante do consumível, este material possui características de baixa diluição com o metal de base, apresentando dureza e resistência a abrasão elevada já no primeiro passe (UTP; 2005). No cálculo da diluição das amostras, a amostra onde foi depositado apenas uma camada de revestimento teve uma

taxa de diluição de 18,44%. Este valor pode ser considerado baixo comparado a diluições com outros tipos de eletrodos como o celulósico 6010 e o rutilico 6013 onde a taxa de diluição pode chegar a 67% (ESAB; 2005).

5.3 Ensaio de Micro-Desgaste

Foram estabelecidas cinco condições iguais de ensaio para as amostras com uma, duas e três camadas. Os cálculos foram feitos através das dimensões das calotas esféricas geradas nas amostras. As dimensões analisadas foram diâmetro (d), volume (V) e a taxa de desgaste (Q). Na tabela 6 estão os valores dos parâmetros definidos para os ensaios.

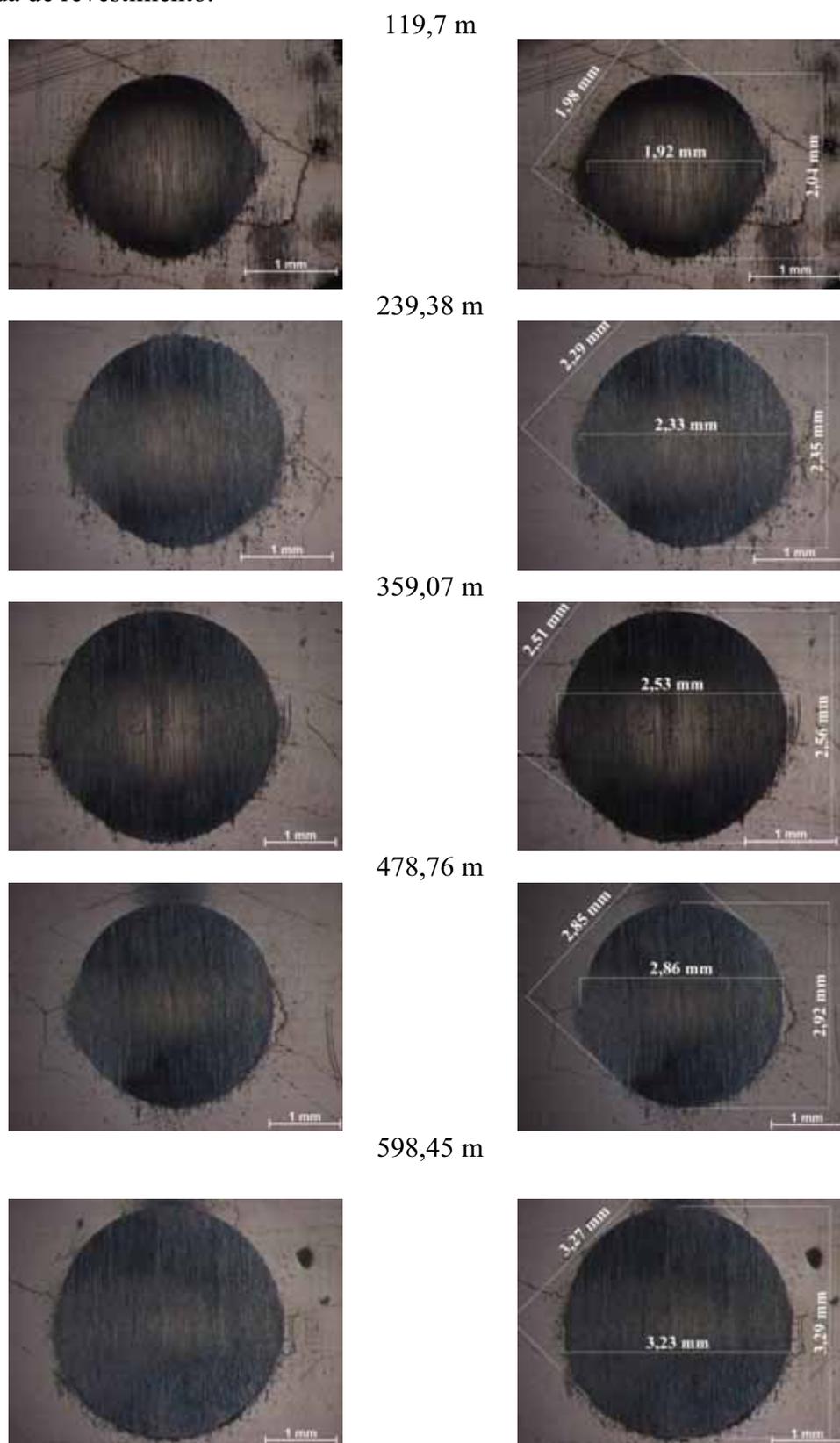
Tabela 6 – Valores dos parâmetros estabelecidos para os ensaios.

Tempo de ensaio [s]	300	600	900	1200	1500
Força Normal [N]	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Rotação da esfera [rpm]	300	300	300	300	300
Distância de deslizamento [m]	119,7	239,38	359,07	478,76	598,45
Gotejamento do abrasivo	1 gota/5 s				
Numero de repetições	6	6	6	6	6

Todos os ensaios foram feitos sem paradas intermediárias, apenas para trocar as amostras e mudar a banda de rolagem da esfera. A concentração da pasta abrasiva ficou em $0,35 \text{ g/cm}^3$ e a forma de gotejamento foi manual, por meio de um conta-gotas.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por micro-abrasão, em uma camada, são expressos na figura 38 em função da distancia de deslizamento.

Figura 38 – Crateras de desgaste, em função da distância de deslizamento, para uma camada de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando as equações (3) e (8) para cálculo do volume e taxa de desgaste, foi feito a média das medidas do diâmetro em três pontos das crateras conforme a tabela 7:

Tabela 7 - Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 1 Camada.

Ensaio	1	2	3	4	5
Distancia de deslizamento (m)	119,70	239,38	359,07	478,76	598,45
Diâmetro das crateras linha 1	1,98 mm	2,37 mm	2,61 mm	2,79 mm	3,31 mm
Diâmetro das crateras linha 2	1,89 mm	2,35 mm	2,55 mm	2,88 mm	3,0 mm
Diâmetro das crateras linha 3	2,02 mm	2,30 mm	2,64 mm	2,92 mm	3,26 mm
Média	1,96 mm	2,34 mm	2,60 mm	2,86 mm	3,19 mm

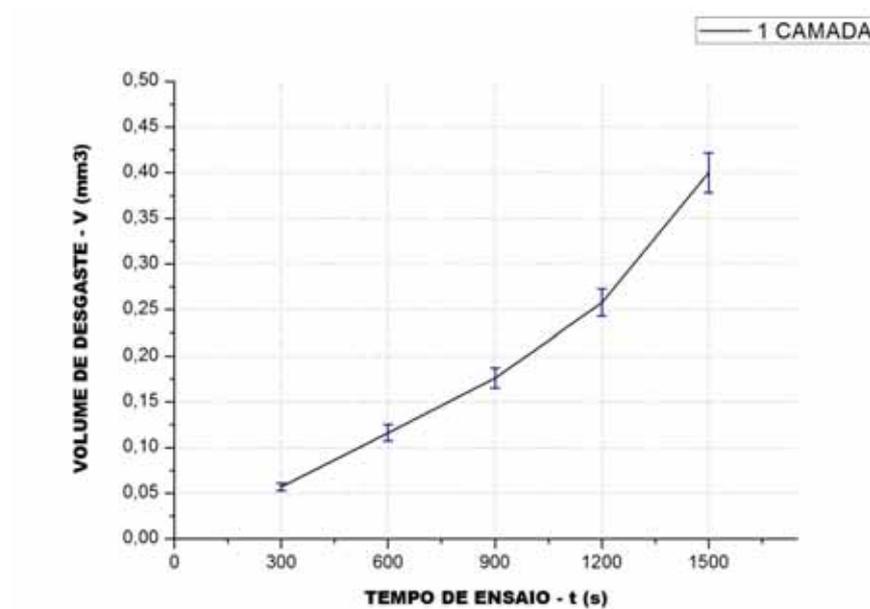
Com base na média das crateras obtivemos a média do volume para cada distancia de deslizamento, tabela 8.

Tabela 8 - Volume das Crateras para Revestimento com 1 Camada.

Ensaio	1	2	3	4	5
V (mm^3)	0,059	0,122	0,179	0,234	0,464
	0,049	0,118	0,163	0,266	0,313
	0,064	0,108	0,187	0,281	0,436
Média	0,057	0,116	0,176	0,258	0,400

Com esses valores obtivemos o gráfico do volume de desgaste para a amostra com uma camada de revestimento, figura 39.

Figura 39 – Volume das crateras para uma camada de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

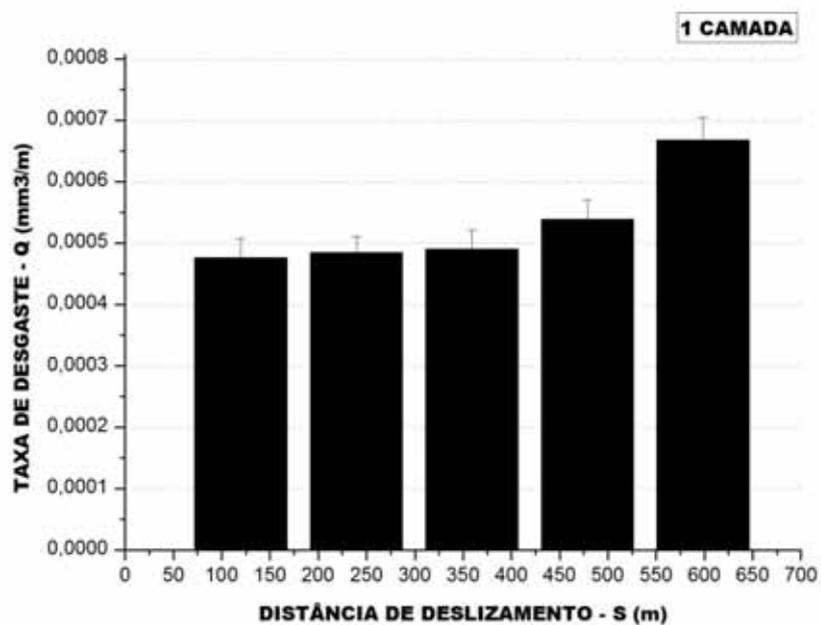
Com o cálculo do volume temos os valores da taxa de desgaste na tabela 9.

Tabela 9 - Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 1 Camada.

Distancia S (m)	119,70	239,38	359,07	478,76	598,45
$Q \left(\frac{mm^3}{m} \right)$	$492,9 \cdot 10^{-6}$	$451,16 \cdot 10^{-6}$	$498,5 \cdot 10^{-6}$	$488,76 \cdot 10^{-6}$	$775,33 \cdot 10^{-6}$
	$409,35 \cdot 10^{-6}$	$467,87 \cdot 10^{-6}$	$440,0 \cdot 10^{-6}$	$555,6 \cdot 10^{-6}$	$523,0 \cdot 10^{-6}$
	$543,67 \cdot 10^{-6}$	$559,78 \cdot 10^{-6}$	$520,78 \cdot 10^{-6}$	$587,0 \cdot 10^{-6}$	$728,54 \cdot 10^{-6}$
Média	$476,19 \cdot 10^{-6}$	$484,58 \cdot 10^{-6}$	$490,15 \cdot 10^{-6}$	$539,0 \cdot 10^{-6}$	$668,40 \cdot 10^{-6}$

Com esses valores obtivemos o gráfico da taxa de desgaste para a amostra com uma camada de revestimento, figura 40.

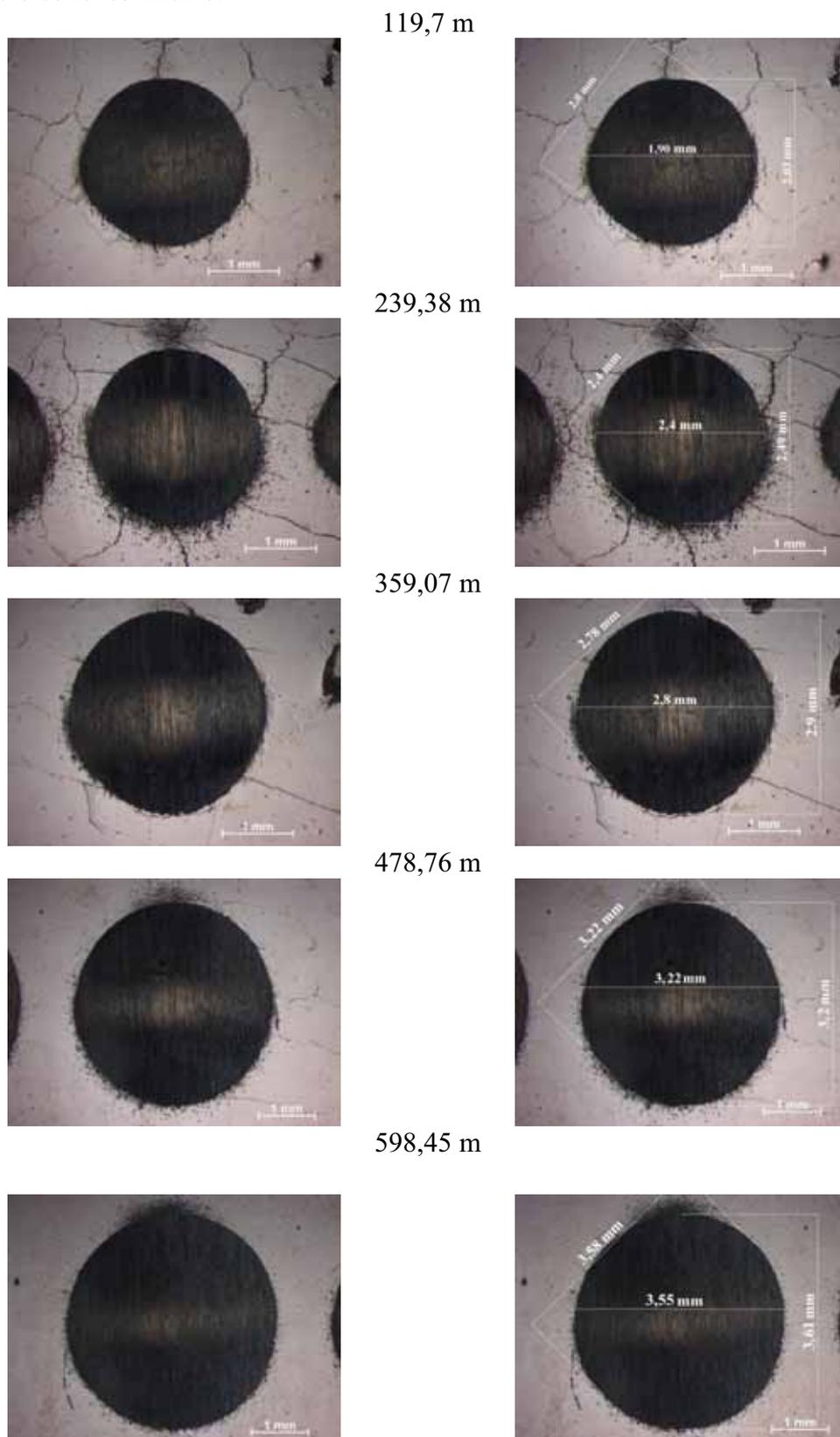
Figura 40 – Taxa de desgaste para uma camada de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por micro-abrasão, em duas camadas, são expressos na figura 41 em função da distancia de deslizamento.

Figura 41 - Crateras de desgaste, em função da distância de deslizamento, para duas camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O cálculo do volume e taxa de desgaste das crateras em duas camadas, foi feito uma média das medidas em três pontos do diâmetro das crateras, conforme a tabela 10:

Tabela 10 - Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 2 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
Distancia de deslizamento (m)	119,70	239,38	359,07	478,76	598,45
Diâmetro das crateras linha 1	2,11 mm	2,43 mm	2,83 mm	2,98 mm	3,56 mm
Diâmetro das crateras linha 2	2,05 mm	2,47 mm	2,78 mm	3,21 mm	3,40 mm
Diâmetro das crateras linha 3	1,97 mm	2,51 mm	2,74 mm	3,14 mm	3,58 mm
Média	2,04 mm	2,47 mm	2,78 mm	3,11 mm	3,51 mm

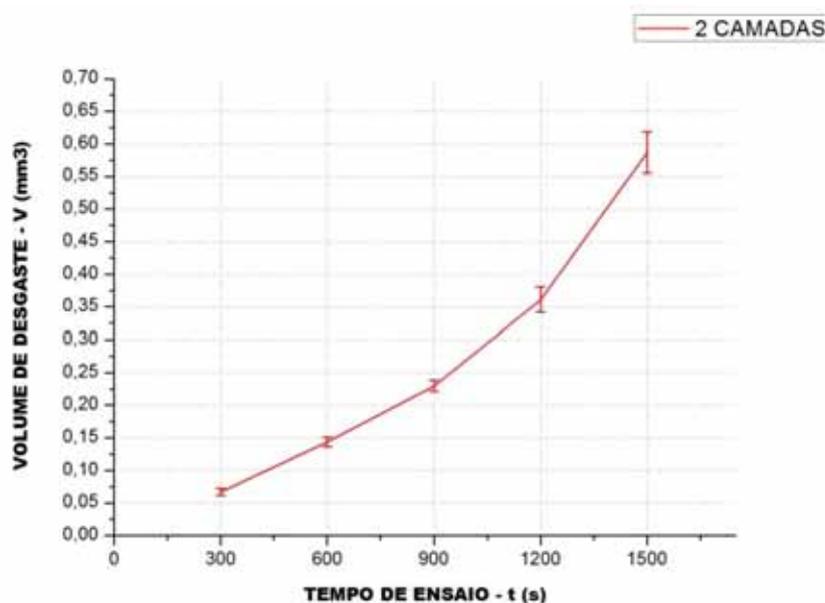
Com base na média das crateras obtivemos a média do volume para cada distancia de deslizamento, tabela 11.

Tabela 11 - Volume das Crateras para Revestimento com 2 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
$V \text{ (mm}^3\text{)}$	0,076	0,134	0,248	0,305	0,620
	0,068	0,143	0,231	0,410	0,516
	0,058	0,153	0,218	0,375	0,635
Média	0,067	0,144	0,230	0,361	0,587

Com esses valores obtivemos o gráfico do volume de desgaste para a amostra com duas camadas de revestimento, figura 42.

Figura 42 – Volume das crateras para duas camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

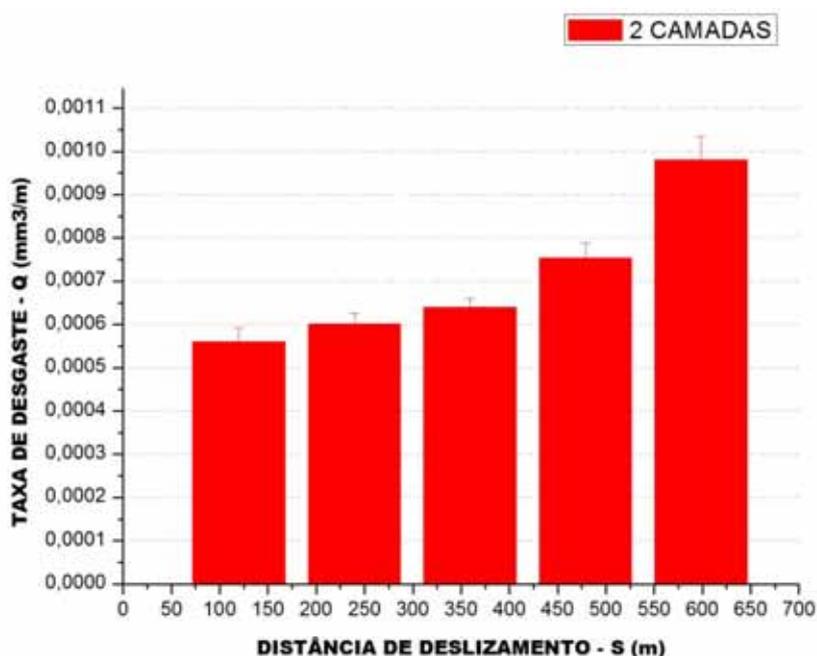
Com o cálculo do volume temos os valores da taxa de desgaste na tabela 12.

Tabela 12 - Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 2 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
$Q \left(\frac{mm^3}{m} \right)$	$634,92 \cdot 10^{-6}$	$559,78 \cdot 10^{-6}$	$690,67 \cdot 10^{-6}$	$637,0 \cdot 10^{-6}$	$1,036 \cdot 10^{-3}$
	$568,0 \cdot 10^{-6}$	$597,37 \cdot 10^{-6}$	$643,32 \cdot 10^{-6}$	$856,37 \cdot 10^{-6}$	$862,22 \cdot 10^{-6}$
	$484,54 \cdot 10^{-6}$	$639,15 \cdot 10^{-6}$	$607,12 \cdot 10^{-6}$	$783,27 \cdot 10^{-6}$	$1,061 \cdot 10^{-3}$
Média	$559,73 \cdot 10^{-6}$	$601,5 \cdot 10^{-6}$	$640,5 \cdot 10^{-6}$	$754,0 \cdot 10^{-6}$	$980,86 \cdot 10^{-6}$

Com esses valores obtivemos o gráfico da taxa de desgaste para a amostra com duas camadas de revestimento, figura 43.

Figura 43 - Taxa de desgaste para duas camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos nos ensaios de desgaste por micro-abrasão em três camadas estão na figura 44, em função da distancia de deslizamento.

Para o cálculo do volume das crateras em três camadas, foi obtida uma média das medidas em três pontos do diâmetro das crateras, conforme a tabela 13:

Tabela 13 - Diâmetro médio das crateras para Revestimento com 3 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
Distancia de deslizamento (m)	119,70	239,38	359,07	478,76	598,45
Diâmetro das crateras linha 1	1,58 mm	2,05 mm	2,55 mm	3,15 mm	3,20 mm
Diâmetro das crateras linha 2	1,39 mm	2,20 mm	2,58 mm	2,90 mm	3,23 mm
Diâmetro das crateras linha 3	1,63 mm	2,45 mm	2,59 mm	3,02 mm	3,25 mm
Média	1,53 mm	2,23 mm	2,57 mm	3,02 mm	3,23 mm

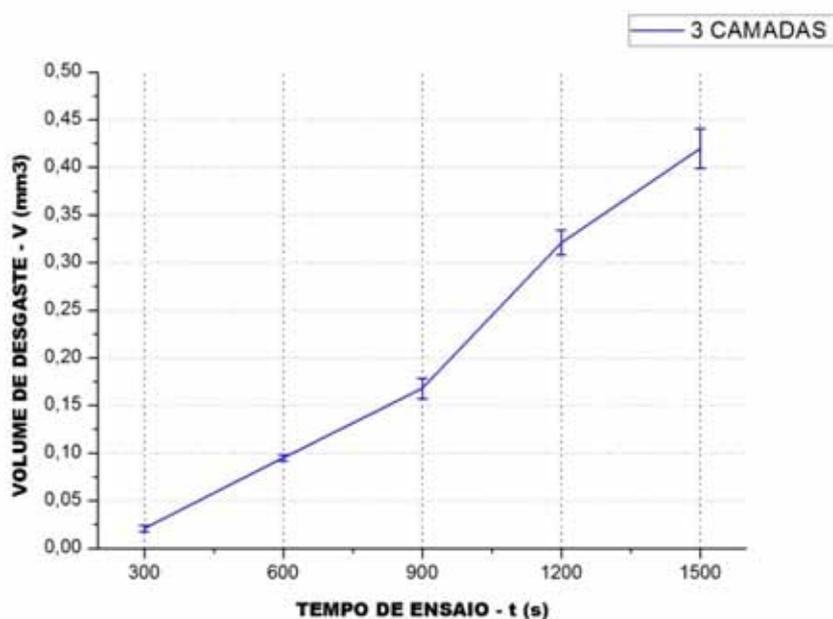
Com base no diâmetro das crateras obtivemos o volume para cada distancia de deslizamento, tabela 14.

Tabela 14 - Volume das Crateras para Revestimento com 3 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
V (mm^3)	0,024	0,068	0,163	0,380	0,405
	0,014	0,09	0,171	0,273	0,420
	0,027	0,139	0,173	0,321	0,431
Média	0,021	0,095	0,168	0,321	0,420

Com os valores da tabela 13 obtivemos o gráfico do volume de desgaste para a amostra com três camadas de revestimento, figura 45.

Figura 45 – Volume das crateras para três camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

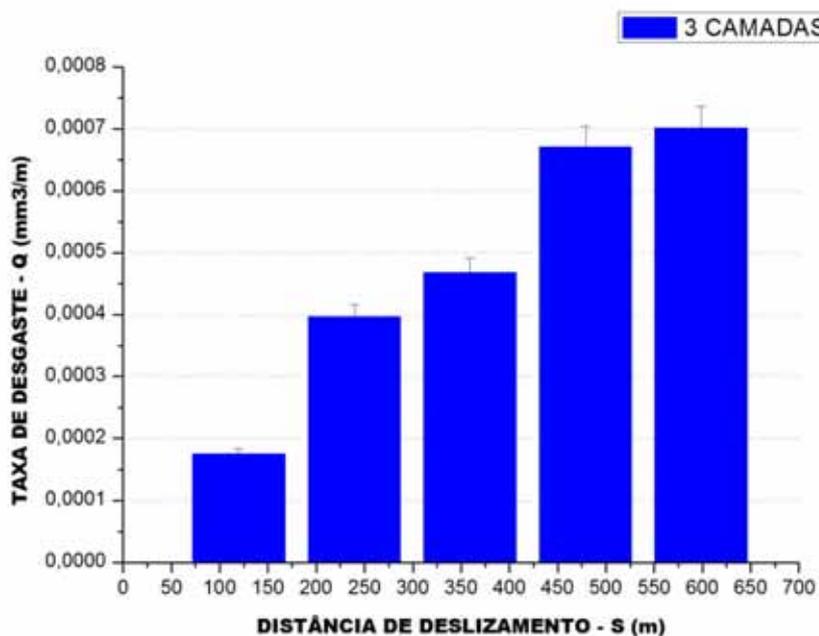
Através do volume temos os valores da taxa de desgaste na tabela 15.

Tabela 15 - Taxa de Desgaste das Crateras para Revestimento com 3 Camadas.

Ensaio	1	2	3	4	5
$Q \left(\frac{mm^3}{m} \right)$	$200,5 \cdot 10^{-6}$	$284 \cdot 10^{-6}$	$454 \cdot 10^{-6}$	$793,71 \cdot 10^{-6}$	$676,74 \cdot 10^{-6}$
	$116,95 \cdot 10^{-6}$	$376 \cdot 10^{-6}$	$476,23 \cdot 10^{-6}$	$570,22 \cdot 10^{-6}$	$701,81 \cdot 10^{-6}$
	$225,56 \cdot 10^{-6}$	$580,66 \cdot 10^{-6}$	$481,8 \cdot 10^{-6}$	$670,4 \cdot 10^{-6}$	$720,19 \cdot 10^{-6}$
Média	$175,44 \cdot 10^{-6}$	$396,85 \cdot 10^{-6}$	$467,87 \cdot 10^{-6}$	$670,4 \cdot 10^{-6}$	$701,81 \cdot 10^{-6}$

Com os valores da tabela 15, obtivemos o gráfico da taxa de desgaste para a amostra com três camadas de revestimento, figura 46.

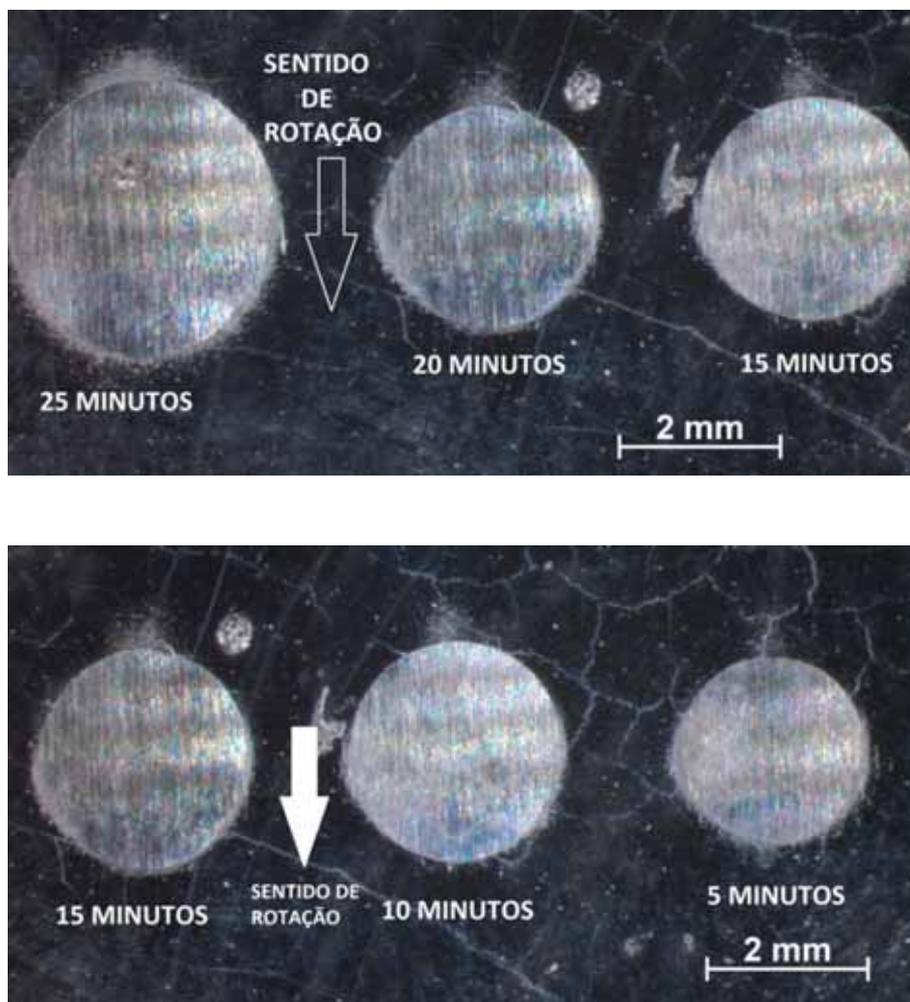
Figura 46 - Taxa de desgaste para três camadas de revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando as crateras de desgaste nas condições determinadas para os ensaios, na terceira camada, temos a figura 47.

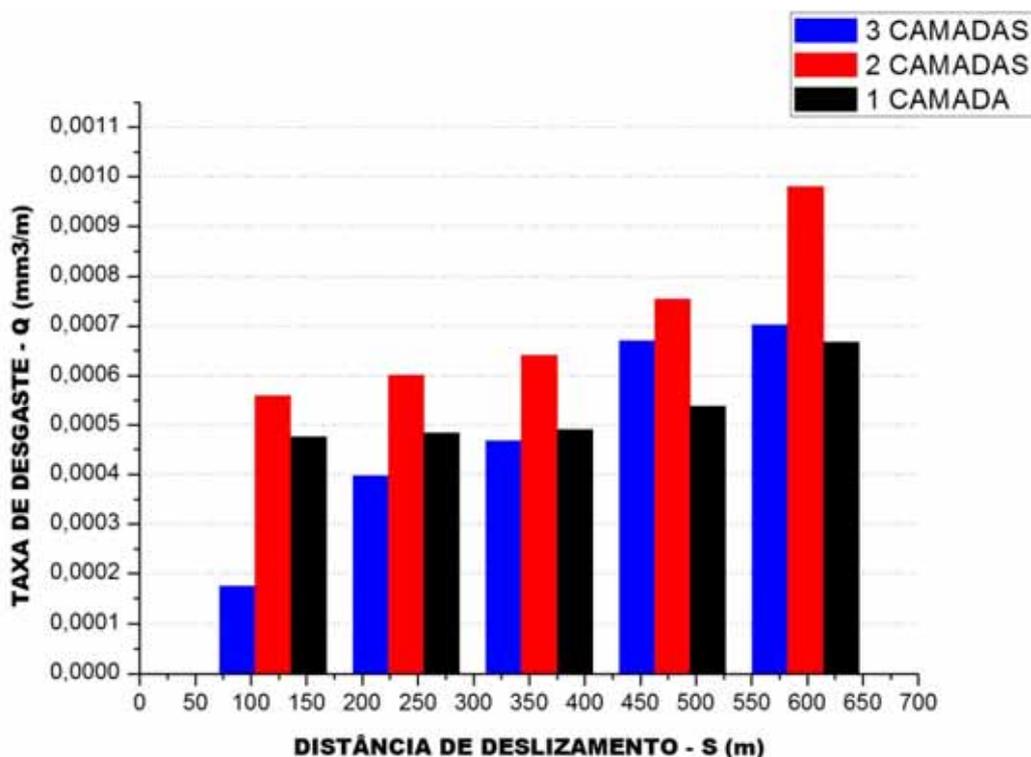
Figura 47 – Diferentes estágios de formação das crateras com o tempo de ensaio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando a taxa de desgaste nas amostras com uma, duas e três camadas temos o gráfico na figura 48.

Figura 48 – Taxa de desgaste pela distancia nas amostras com uma, duas e três camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do gráfico da figura 49, podemos verificar que ao longo dos ensaios a amostra que teve a maior taxa de desgaste foi a com duas, uma camada e em terceiro a amostra com três camadas de revestimento.

Podemos notar que para o tempo 300 segundos (119,7m) a amostra com duas camadas teve a maior taxa de desgaste. Para o tempo de 600 segundos (239,38m) a maior taxa foi a amostra com uma camada. Para 900 segundos (478,7), as amostras com uma e três camadas ficaram quase no mesmo patamar e no tempo de 1200 e 1500 a amostra com duas camadas volta a ter a maior taxa de desgaste.

Esses resultados mostram que a dureza não é o indicativo mais adequado para se prever a resistência ao desgaste abrasivo. Fujimura *et al* (1988), demonstram que a dureza acima de 600 HV, a taxa de desgaste não aumenta necessariamente com o valor da dureza Vickers. Os ensaios de dureza convencionais são quase-estáticos, diferentes das condições onde a superfície metálica é atingida por partículas abrasivas em

velocidades relativamente elevadas, sendo assim, o melhor indicador para a resistência ao desgaste seria a microestrutura.

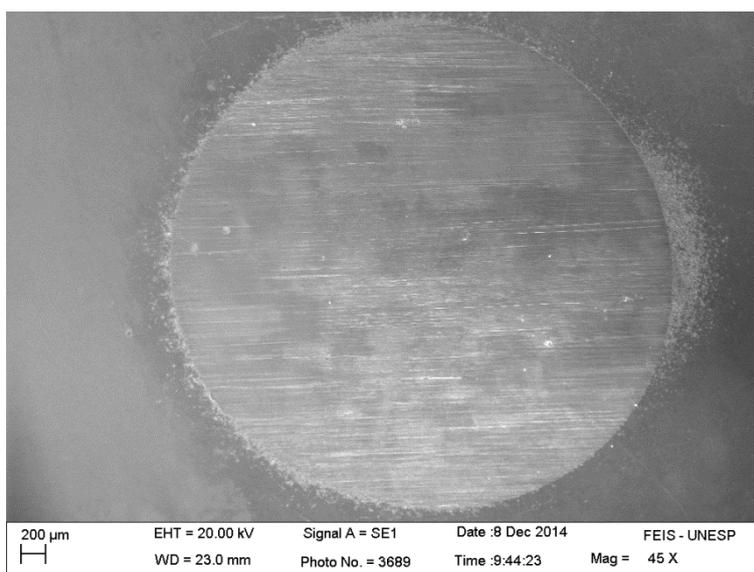
As crateras de desgaste geradas nos ensaios, apresentam similaridades com os resultados apresentados na literatura que tendiam a uma circunferência. Quanto a os valores dos diâmetros das crateras exibidas nas figuras 38, 41,44 e 47, pode-se dizer que o equipamento está proporcionando resultados reprodutíveis (TREZONA; HUTCHINGS, 1999; COZZA, 2011).

5.4 Modos de Desgaste Abrasivo e Regime Permanente de Desgaste

Análises conduzidas por microscopia óptica das crateras de desgaste obtidas neste trabalho indicaram que o modo de desgaste abrasivo, “riscamento”, ocorreu em todas as calotas esféricas. Observações mais detalhadas foram realizadas com o auxílio de imagens adquiridas por MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) onde observasse a ocorrência deste modo de desgaste.

A figura 49 apresenta uma imagem adquirida por MEV de uma cratera de desgaste, em que somente desgaste abrasivo é visível (“macro-escala”).

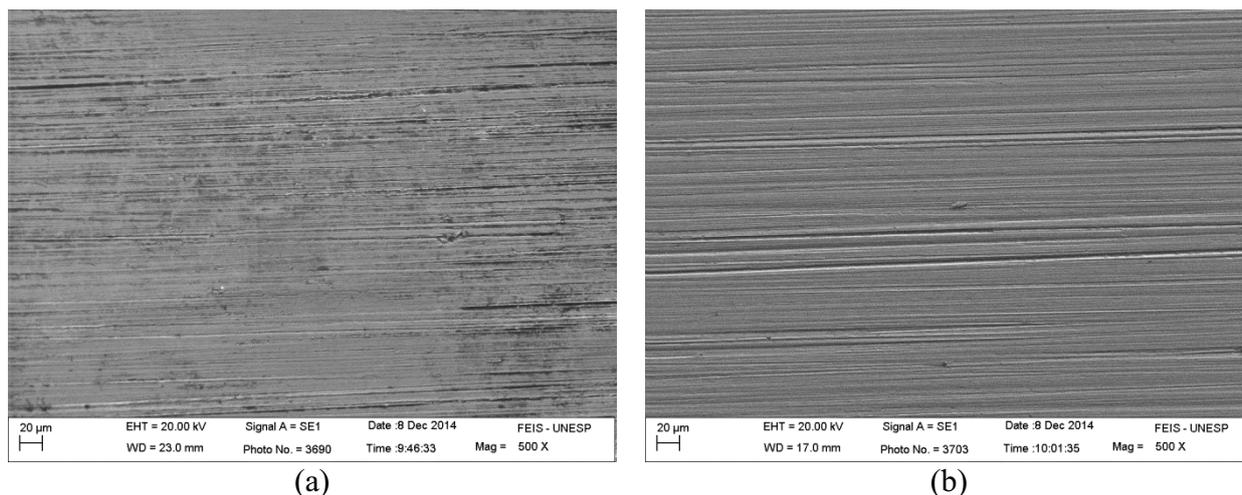
Figura 49 – Cratera de desgaste obtida nos ensaios em “macro escala”.



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura 50 mostra as crateras de desgaste para $S = 598,45 \text{ m}$ e $S = 119,7 \text{ m}$, em que é possível notar a ocorrência de desgaste abrasivo por riscamento.

Figura 50 – Cratera de desgaste em “micro escala”. (a) riscamento com $S=598,45 \text{ m}$; (b) riscamento com $S=119,7 \text{ m}$.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Trezona (1999), citado por Cozza (2006), para elevadas concentrações de pasta abrasiva e baixas forças normais, há o predomínio do desgaste abrasivo por rolamento e para elevadas forças normais e baixas concentrações de pasta abrasiva, há o domínio do desgaste abrasivo por riscamento. Neste trabalho foi utilizada uma força normal de $4,9 \text{ N}$ (devido ao tipo de material e espessura do revestimento) onde foi observado desgaste abrasivo por riscamento, figura 50.

A distância de deslizamento entre a esfera e o corpo-de-prova apresenta influência fundamental para que o desgaste atinja, ou não, o regime permanente de desgaste. Além disso, a distância de deslizamento pode definir a completa formação da calota esférica. Caso a distância de deslizamento definida no ensaio for baixa, a cratera poderá apresentar uma má formação em sua borda, indicando que o ensaio não atingiu o regime permanente de desgaste.

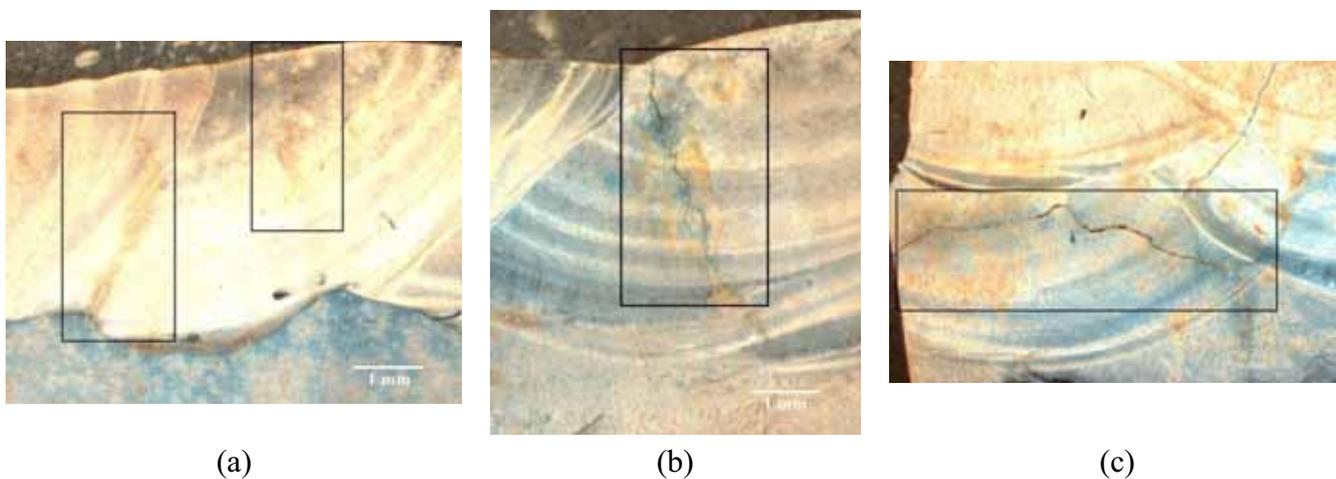
Nos ensaios realizados, neste trabalho, podemos considerar que todos atingiram o regime permanente de desgaste pela nítida formação das bordas das calotas, figura 49, e

pela relação linear apresentado entre o volume de desgaste (V) e o tempo de ensaio (t), gráficos das figuras 39,42 e 45.

5.5 Trincas Superficiais

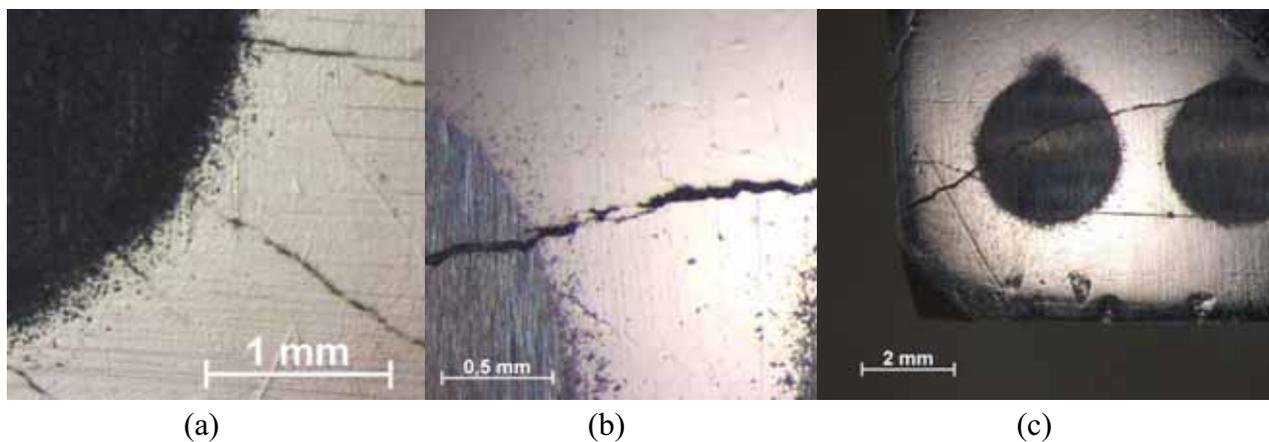
De forma geral todas as amostras obtidas com a corrente de 130A apresentaram trincas superficiais, sendo que na terceira camada as trincas foram ainda maiores, figuras 51 e 52.

Figura 51 - Trincas superficiais: (a) uma camada; (b) duas camadas; (c) três camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52 – Trincas superficiais: (a) uma camada;(b) duas camadas; (c) três camadas.



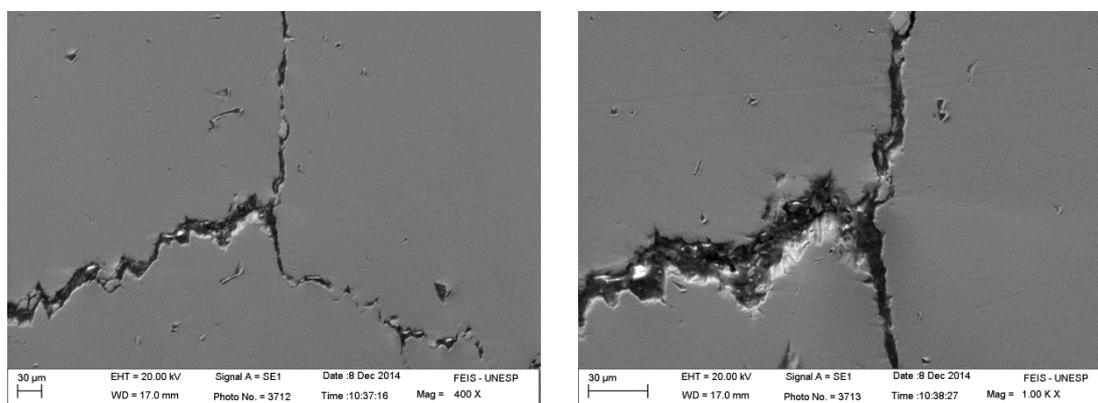
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em caso de materiais muito duros, como carbonetos de cromo, não devem ser aplicados mais que duas camadas para prevenir trincas excessivas. Os carbonetos de cromo estão projetados para trincar como uma forma de alívio de tensões e recomenda-se que a primeira camada seja depositada com uma velocidade de soldagem alta para conseguir uma grande quantidade de trincas pequenas ao invés de poucas trincas maiores (KOTECKI, 1995).

Uma das melhores hipóteses para o surgimento de trincas nas amostras, já que logo após a soldagem as amostras foram envolvidas em manta térmica, é a de Martins Filho (1995) que atribuiu as trincas no revestimento de Fe-Cr-C de baixa liga, à baixa ductilidade na fase martensítica e a presença de fileiras de carbonetos de cromo nos contornos de grão da austenita, indicando que durante o resfriamento do metal de solda as tensões de contração e as ligações entre os carbonetos de cromo promovem um trincamento intergranular.

No presente trabalho, as trincas superficiais das amostras, figura 53, são típicas do resfriamento logo após o passe de soldagem e surgem para reduzir as tensões residuais afetadas pela composição química do revestimento Fe-Cr-C. As trincas surgidas nos revestimentos não prejudicaram os ensaios ou comprometeram a formação das crateras de desgaste, sendo que, a amostra que apresentou a maior quantidade de trincas, terceira camada, apresentou a menor taxa de desgaste devido a grande formação de carbonetos de cromo.

Figura 53 - Trincas superficiais na primeira camada de revestimento.



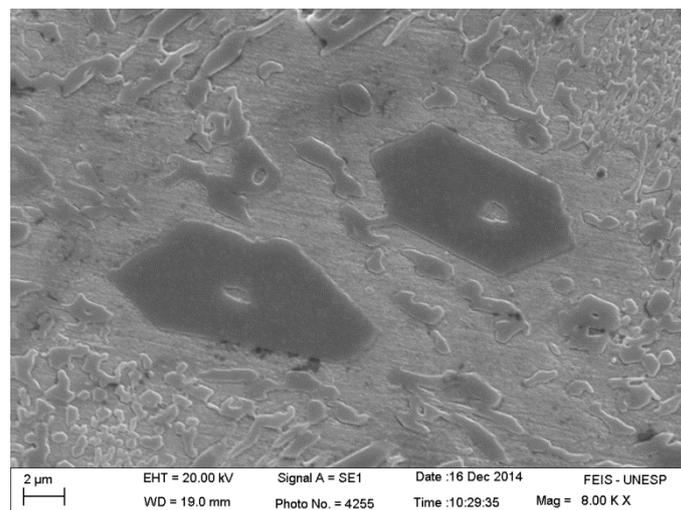
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 Análise Microestrutural

O ataque metalográfico permitiu revelar a microestrutura do metal de solda das amostras analisadas compostas por partículas envoltas em uma matriz. Tais partículas são facilmente identificadas pela sua forma prismática e encontram-se normalmente agrupadas em feixes paralelos e apresentam um aspecto metálico de coloração mais clara no microscópio óptico e escura no MEV, estando envoltos numa matriz de coloração diferente revelada pelo ataque químico.

Os carbonetos de cromo que se formaram tem grande tendência à concentração de tensões devido a sua morfologia prismática poligonal, o que pode limitar seu papel na resistência ao desgaste abrasivo, figura 54.

Figura 54 – Morfologia prismática típica encontrada em revestimento de cromo.

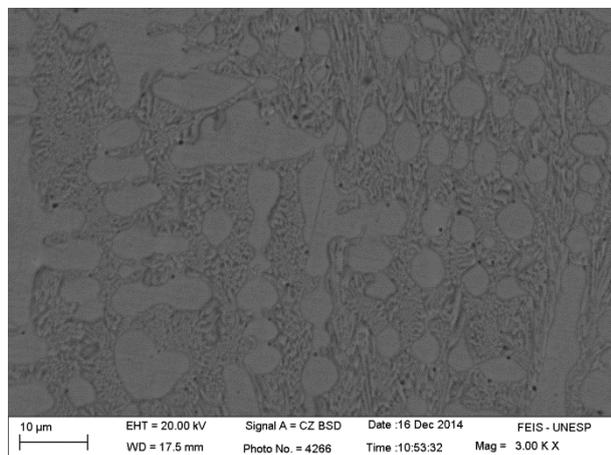


Fonte: Elaborado pelo autor.

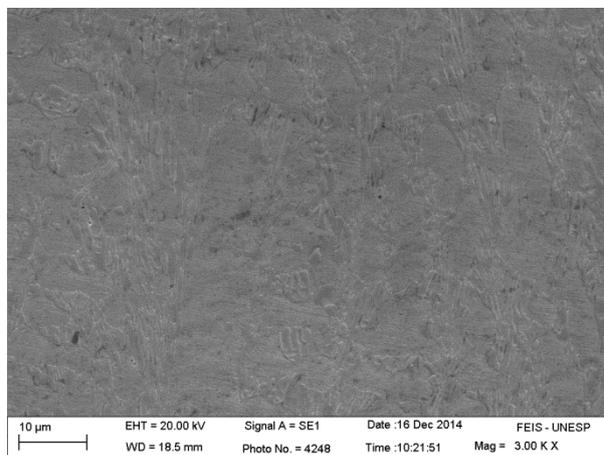
A figura 55 apresenta microestrutura em regiões diferentes da superfície, centro e linha de solda. Observa-se que as partículas de CrC a medida que se aproxima do centro do revestimento há um crescimento no tamanho dos carbonetos com a presença de grandes e massivos carbonetos. Durante a soldagem, o metal de base atua como um cadinho suportando a poça de fusão. Nessas regiões a solidificação do metal líquido é mais acelerada quando comparada as demais zonas da poça de fusão, assim a reação foi interrompida quando a temperatura atingiu valores onde a formação de carboneto não é mais possível. Enquanto isso na região central da poça de fusão onde o resfriamento é mais lento a reação do carbono com o cromo acontece por um intervalo de tempo maior,

favorecendo a formação de partículas mais grosseiras de carbonetos (LIMA *et al*, 2009).

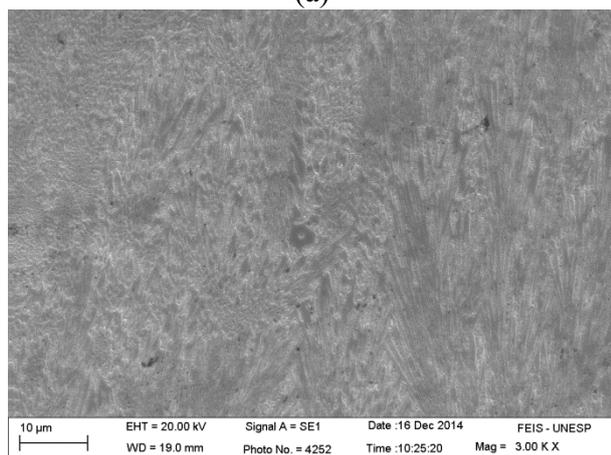
Figura 55 - Microestrutura dos revestimentos mostrados no MEV. a) Região próxima à linha de solda. b) Região do primeiro passe do cordão. c) Região do segundo passe do cordão. d) Região do terceiro passe do cordão. e) Região próxima a superfície 1000X. f) Região próxima a superfície na terceira camada 500X.



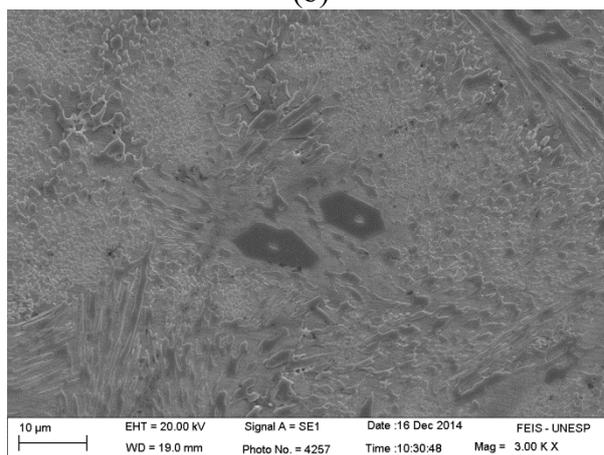
(a)



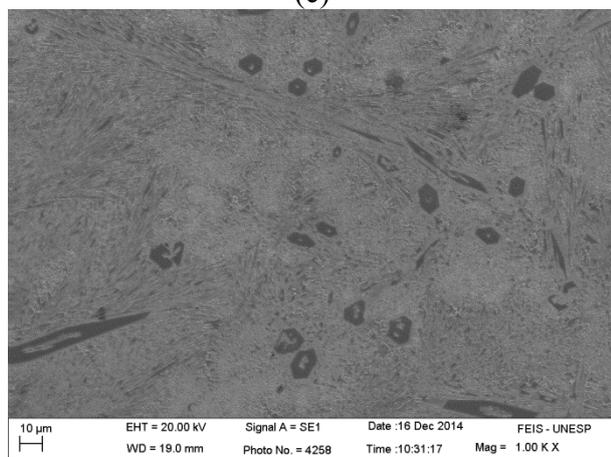
(b)



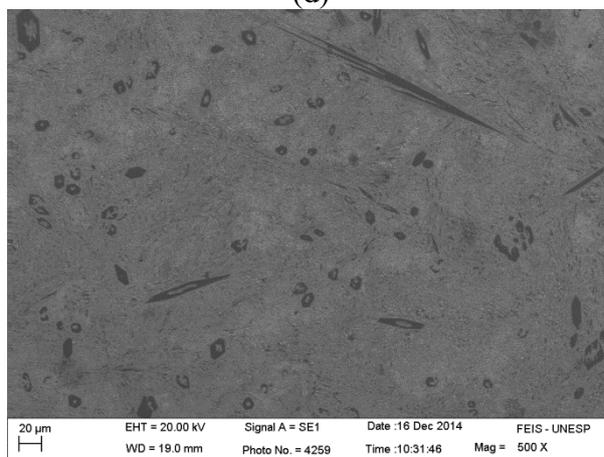
(c)



(d)



(e)

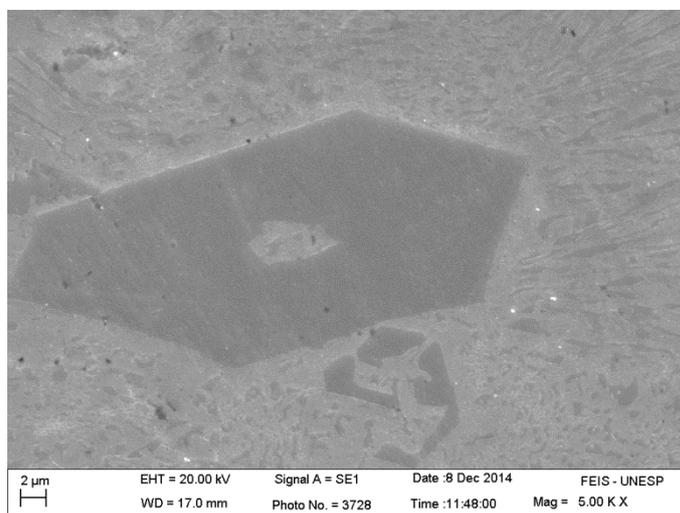


(f)

Fonte: Elaborado pelo autor.

O uso de menores ampliações nas observações possibilitou constatar que as partículas estavam principalmente localizadas em regiões interdendríticas, onde a segregação de elementos químicos como o cromo favoreceu a nucleação e crescimento dos respectivos carbonetos. Este crescimento resulta muitas vezes em cristais com o comprimento de centenas de micrometros, sendo afetado pelo processo de soldagem de forma que uma parcela dessas partículas tenha seu eixo de crescimento numa orientação quase paralela à superfície do revestimento tendo uma menor interação com a matriz. Isso pode gerar maior facilidade da partícula se desacoplar da matriz e acelerar o processo de desgaste, figura 56.

Figura 56 – Crescimento do carboneto na terceira camada.



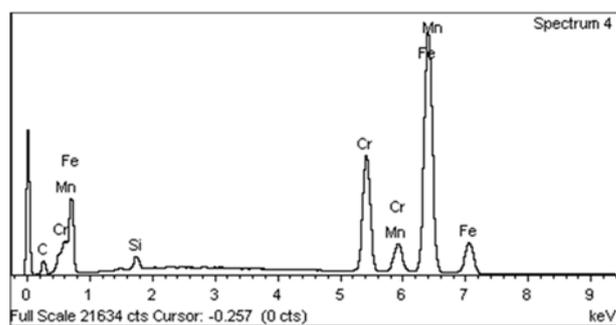
Fonte: Elaborado pelo autor.

A composição química foi determinada por EDS onde foi analisada a variação do teor de cromo em cada amostra. A figura 57 exemplifica a porcentagem de Cr:C nas amostras com uma, duas e três camadas.

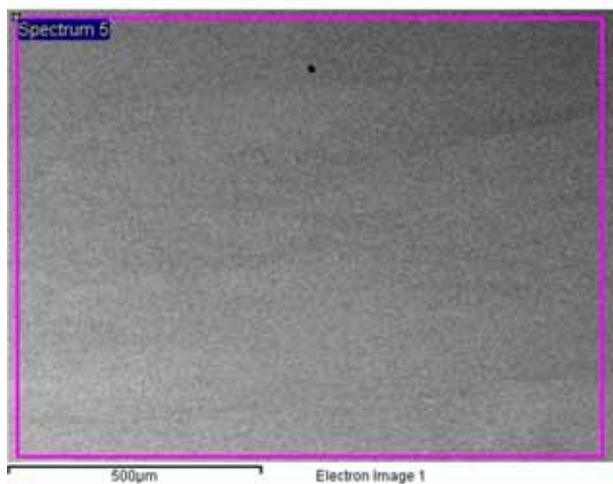
Figura 57 – Composição química das amostras com: a) uma camada; b) duas camadas; c) três camadas de revestimento de cromo.



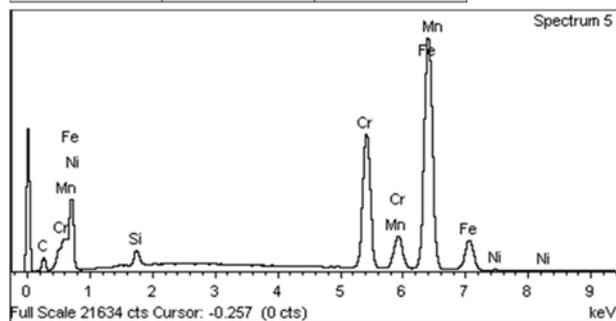
ELEMENTO	MASSA (%)	ATÔMICO (%)
C	7.94	28.07
Si	1.05	1.59
Cr	19.80	16.16
Mn	3.76	2.9
Fe	67.46	51.28
TOTAL	100	100



(a)

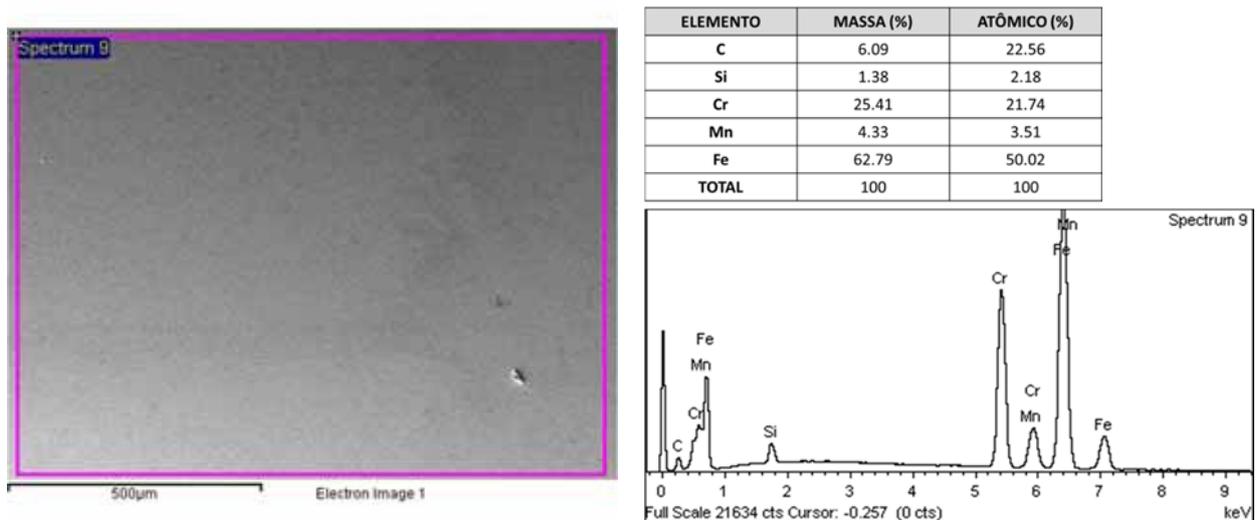


ELEMENTO	MASSA (%)	ATÔMICO (%)
C	7.20	25.90
Si	1.22	1.88
Cr	22.99	19.10
Mn	4.08	3.21
Fe	64.24	49.70
TOTAL	100	100



(b)

Figura 57 continua...

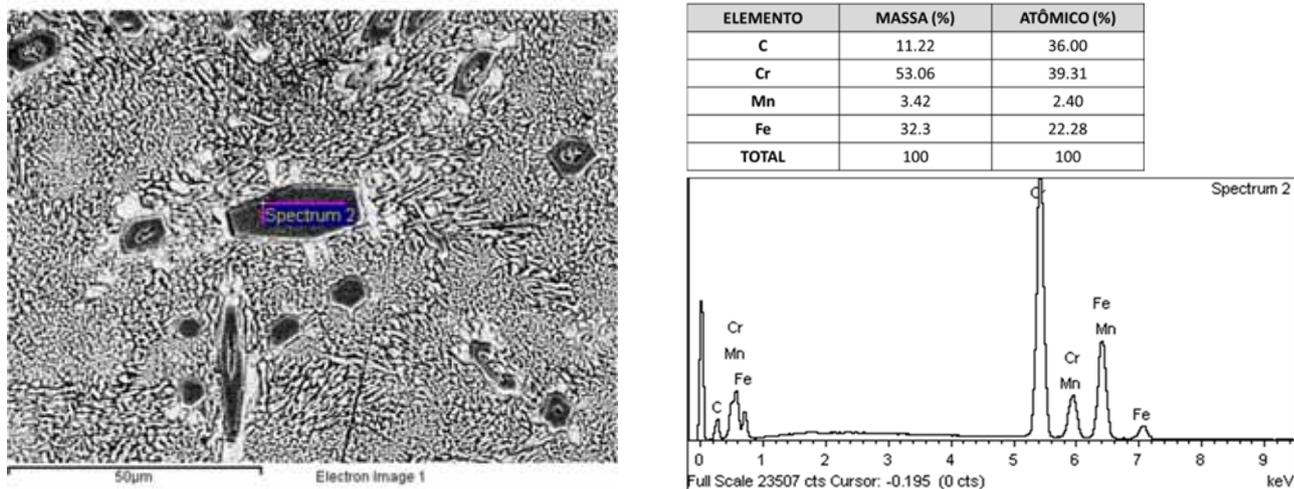


(c)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise por EDS também foi realizada na superfície do carboneto para comparação da porcentagem de cromo em relação a matriz, figura 58.

Figura 58 – Análise da composição química na face do carboneto na amostra com três camadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o projeto e construção de um equipamento de ensaio de desgaste micro abrasivo por esfera rotativa fixa que, embora ainda sejam necessárias algumas melhorias, comportou-se de maneira estável gerando resultados satisfatórios.

Além da análise teórica, os resultados dos ensaios foram comparados com os encontrados na literatura, onde foi possível observar uma concordância entre eles. Comparado a outros métodos, como o de esfera livre, em que a ação da força normal está baseada no próprio peso da esfera. A configuração esfera fixa é possível a aplicação de um aumento de carga através de “peso morto”.

As análises de imagens conduzidas por Microscopia Óptica das crateras de desgaste revelaram somente a presença de desgaste abrasivo por riscamento. Fato ocorrido devido à carga e a concentração do abrasivo adotados para realização dos ensaios. No decorrer dos ensaios não foi observado nenhuma excentricidade na esfera utilizada. A cada troca de amostra a esfera era girada para se obter uma nova área de contato nas amostras.

A resistência ao desgaste micro abrasivo variou com a microestrutura e a dureza dos revestimentos, bem como o numero de camadas depositadas. A deposição de uma segunda camada aumentou a dureza do revestimento pela redução da diluição química do metal de solda. Entretanto, a dureza do revestimento não apresenta uma relação direta com a resistência á abrasão, não sendo o melhor indicador para a perda de volume, sendo a amostra com duas camadas apresentando a maior taxa de desgaste.

Na análise microestrutural ocorreu um aumento da fração volumétrica dos carbonetos primários, conforme se aumentou o numero de camadas de revestimento. Com o aumento do teor de cromo e carbonetos maiores, a taxa de desgaste decaiu consideravelmente na terceira camada apresentando melhor desempenho nos ensaios de 300, 600, 900 segundos.

A amostra com uma camada onde a fração volumétrica foi menor, a taxa de desgaste teve pouca variação ao longo do tempo, comprovando ser economicamente eficiente contra o desgaste abrasivo já que a dureza em sua superfície pode ser até 600 vezes maior que a matriz.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO

Durante a execução dos ensaios, algumas ideias surgiram para futuros trabalhos:

- a) Automação do equipamento;
- b) Utilização de técnicas mais avançadas para medição das bordas das crateras de desgaste;
- c) Estudar a influencia do desgaste da esfera na formação das crateras de desgaste;
- d) Taxa de desgaste utilizando outros tipos de abrasivos além do mencionado neste trabalho;
- e) A influência da dureza das partículas abrasivas em relação ao tipo de desgaste, “rolamento” e “riscamento”.

REFERÊNCIAS

- ALVES, F. R. **Desenvolvimento de um tribômetro, tipo cilindro sob disco, para ensaios tribológicos em formulações com óleos vegetais**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111082/000799236.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 22 mar. 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM G40 Standard **Terminology relating to wear and erosion**. West Conshohocken: ASTM, 1996. (ASTM G40).
- BHADESHIA, H. K. D. H.; ATAMERT, S. Microstruture and stability of Fe-Cr-C hardfacing alloys. **Materials Science Engineering, A**, Cambridge, v. 130, n. 1, p. 1990.
- COZZA, R. C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. 2011. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 18 out. 2013.
- COZZA, R. C. **Estudo de comportamento de coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaios de desgaste micro abrasivo**. 2006. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br>>. Acesso em: 25 fev. 2014.
- DETTOGNI, M. A. **Principais mecanismos de desgaste e avaliação de diferentes ligas para corpos moedores**. 2010. 59 f. Monografia (Especialista em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- ESAB. **Apostila eletrodos revestido ok**. 2005. Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev1_apostilaeletrodo_srevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 27 mar. 2015.
- FILDES, J. M; MEYERS, S. J; KILAPARTI, R.; SCHLEPP, E. Improved ball crater micro-abrasion test based on a ball on tree disk configuration. **Wear**, Lausanne, n. 274-275, p. 414-422, 2012.
- FUJIMURA, H.; KAMITO, Y. ;NOTOMI, A. ; KINOSHITA, M. **Development of hard overlay welding for high wear resistance**. Yokohama: Mitsubishi Heavy Industries Ltda, Jul. 1988.
- GEE, M. G. et al. Ball cratering or micro-abrasion wear testing of coatings. **Measurement Good Practice Guide**, n. 57, 2002. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/publications/ball-cratering-or-micro-abrasion-wear-testing-of-coatings>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

- HUTCHINGS, I. M. Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: a unified approach. **Tribology International**, Surrey, v. 31 p. 5-15, 1998.
- INTERNATIONAL STANDART ORGANITION – ISO. **26424 -2008**:. Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics) – Determination of the abrasion resistance of coatings by a micro-scale abrasion test. Disponível em: <<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26424:ed-1:v1:en>>. Acesso em: 27 mar. 2015.
- KASSMAN, A. et al. A new test method for the intrinsic abrasion resistance of thin coatings. **Surface and Coatings Technology**, Lausanne, v. 50, p. 75-84, 1991.
- KOTECKI, D. J., OGBORN, J. S. Abrasion resistance of iron-based harfacing alloys. **Welding Journal**, Miami, v. 74, n. 8, p. 269-s-278-s, 1995.
- LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da resistência ao desgaste de revestimento duro aplicado por soldagem em facas picadoras de cana-de-açúcar. **Soldagem Inspeção**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 94-102, 2010.
- LIMA, A. C.; FERRARESI, V. A. Análise da microestrutura e da resistência ao desgaste de revestimento duro utilizado pela indústria sucroalcooleira. **Soldagem Inspeção**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 140-150, 2009.
- MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos de tecnologia**. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005. 363 p.
- MARTINS FILHO, A. **Soldagem de revestimentos com arame tubular**. 1995. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 1995.
- PRIYAN, M. S.; HARIHARAN, P. Abrasive wear modes in ball-cratering test conducted on fe₇₃si₁₅ni₁₀cr₂ alloy deposited specimen. **Tribology in Industry**, Kragujevac, v. 36, n. 1, p. 97-106, 2014.
- PEDROSA, P.; CAVALCANTE, T. S.; ALBUQUERQUE, V. H. C. Sistema computacional para determinação da taxa de diluição em soldadura. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Lisboa, v. 18, p. 55-61, 2010.
- RIBEIRO, R. **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-Cr-C utilizados na industria sucroalcooleira**. 2004. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004
- RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. A micro-abrasive wear test with particular application to coated systems. **Surface e Coatings Technology**, Lausanne, v. 79, p. 231-239, 1996.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. Theory and application of a micro-scale abrasive wear test. **Journal of Testing and Evaluation**, Philadelphia, v. 25, p. 250-260, 1997.

RUTHERFORD, K. L.; TREZONA, R. I. The abrasive and erosive wear of polymeric paint films. **Wear**, Lausanne, v. 203/204, p. 325-334, 1997.

SERVIÇO NACIONAL DA INDÚSTRIA (São Paulo) – SENAI. **Soldagem**. São Paulo: Senai, 1997.

SERNA, M. M. **Quantificação e identificação de carbonetos no aço ferramenta AISI/SAE M2**. 2008. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2008.

TREZONA, R. I.; HUTCHINGS, I. M. Three-body abrasive wear testing of soft materials. **Wear**, Lausanne, v. 233/235, p. 209-221, 1999.

UTP LEDURIT 710. 2005. Disponível em: <
<http://www.bohlersoldabrasil.com.br/pesquisa/pt/pdf/separatas/UTP%20LEDURIT%20710.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2015.

VILLABÓN, L.; SINATORA, A. Construção e instrumentação de abrasômetro do tipo roda de borracha para o estudo do comportamento tribológico de aços. **Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões**, Lisboa, v. 13, p. 1-11, 2006.