

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**VINICIUS CUNHA PELUCHI**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A  
PLASMA EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 ATRAVÉS ENSAIOS DE  
MICROABRASÃO**

**VITÓRIA  
2012**

**VINICIUS CUNHA PELUCHI**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A  
PLASMA EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 ATRAVÉS ENSAIOS DE  
MICROABRASÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Departamento de  
Engenharia Mecânica do Centro  
Tecnológico da Universidade Federal do  
Espírito Santo, como requisito parcial  
para obtenção do grau de Engenheiro  
Mecânico.

Orientador: Antônio César Bozzi, Doutor.

VITÓRIA

2012

PELUCHI, Vinicius Cunha.

Avaliação dos Efeitos de Tratamentos Superficiais a Plasma em Aço Inoxidável AISI 316 por Ensaio de Microabrasão / Vinicius Cunha Peluchi – 2012.  
77f.

Orientador: Antônio César Bozzi, Doutor.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Aço AISI 316. 2. Nitretação a plasma. 3. Carbonetação a plasma. 4 PAPVD. 5. Sistemas dúplex. 6. Microabrasão. I. PELUCHI, Vinicius Cunha. II. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica III. Avaliação dos efeitos de tratamentos superficiais a plasma em aço inoxidável AISI 316 através de ensaios de microabrasão.

**VINICIUS CUNHA PELUCHI**

**AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DE TRATAMENTOS SUPERFICIAIS A  
PLASMA EM AÇO INOXIDÁVEL AISI 316 ATRAVÉS ENSAIOS DE  
MICROABRASÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 13 de julho de 2012.

COMISSÃO EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Antônio César Bozzi  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Orientador

---

Prof. Dr. Flávio José da Silva  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Examinador

---

Prof. Dr. Adonias Franco  
INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que é minha base, por estar sempre iluminando minha mente e colocando as pessoas certas nos meus caminhos.

A Agência Nacional do Petróleo, que me possibilitou participar como aluno de iniciação científica do Programa Institucional da Universidade Federal do Espírito Santo em Petróleo e Gás – PRH29.

Ao professor Dr. Antônio César Bozzi, por ter me orientado, e ter se mostrado sempre disposto a ajudar e transmitir seus conhecimentos.

Aos meus pais, pelo seu amor, por terem me direcionado aos estudos e me oferecidos suporte para alcançar os meus objetivos.

Aos meus irmãos e amigos, pela amizade, convívio e todo o incentivo.

Aos meus amigos de curso e companheiros de iniciação científica Cláudio Vill Lovati e Laís Dias Barbosa, pelas experiências trocadas, pela disposição em ajudar.

Aos professores Carlos Alberto Leyva e Washington Martins, pelo conhecimento transmitido na etapa inicial dos meus experimentos.

## RESUMO

Tratamentos de difusão a plasma e de deposição de recobrimentos por PAPVD (*Plasma Assisted Physical Vapor Deposition*) foram aplicados na superfície do aço inoxidável AISI 316 visando melhorar suas propriedades e tribológicas. Os efeitos destes tratamentos foram investigados para cinco diferentes sistemas: aço AISI 316 sem tratamento, aço carbonetado, aço carbonetado e nitretado (sequencial), aço carbonetado e revestido com (Cr,Al)N (dúplex carbonetado) e aço carbonetado, nitretado e revestido com (Cr,Al)N (dúplex sequencial). Os sistemas foram submetidos a ensaios de microabrasão na configuração esfera fixa em um equipamento Plint TE66, utilizando-se uma esfera de 25,4 mm de diâmetro de aço AISI 52100 como contra-corpo e carga de 0,5 N. Como abrasivo foi utilizada uma lama contendo SiC. A distância total deslizada foi de 129,6 m. Os volumes de desgaste foram avaliados através de microscopia óptica e também da análise de topografia tridimensional. Análises posteriores foram conduzidas com a utilização de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para caracterizar os micromecanismos de desgaste. Os resultados dos ensaios indicaram um comportamento muito superior dos sistemas dúplex em relação aos demais. O sistema dúplex sequencial apresentou melhores resultados que o dúplex carbonetado. A comparação entre os sistemas tratados apenas por difusão a plasma mostrou um desempenho melhor do sistema carbonetado. Os quatro sistemas obtiveram melhor desempenho que o substrato de aço AISI 316.

**Palavras-Chave:** Aço AISI 316; Nitretação a plasma; Carbonetação a plasma; PAPVD; Sistemas dúplex; Microabrasão.

## ABSTRACT

Plasma diffusion and Plasma Assisted Physical Vapor Deposition (PAPVD) coating have been performed on AISI austenitic stainless steel in attempt to improve tribological properties. In order to evaluate its response to these treatments, five different systems were investigated: AISI 316 steel, carburized AISI 316 steel, carburized and nitrited AISI 316 steel (sequential), PAPVD (Cr, AL)N coating on carburized AISI 316 steel (duplex carburized), PAPVD (Cr, AL)N on carburized and nitrited AISI 316 steel (duplex sequential). Micro-abrasion tests were carried out on these systems using a Plint TE66 tribômeter in a fixed-ball design and a AISI 52100 sphere ( 25,4 mm diameter) as counter-body, and 0,5 N as normal load. As abrasive, was used a slurry containing SiC. The total slip distance was 129,6 m. Wear loss was evaluated by optical microscopy and three-dimensional topography analysis. Wear micromechanisms were investigated by scanning electron microscopy (SEM). Tests results showed much higher performance of duplex systems in relation to others. The duplex sequential system showed better results than the duplex carburized. When comparing systems treated by plasma diffusion (non-duplex), the carburized showed better performance. All systems were better than AISI 316 steel.

**Keywords:** AISI 316 Steel; plasma nitriding; plasma carburization; PAPVD; duplex systems; Microabrasion.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferenças entre (a) abrasão a dois corpos; (b) abrasão a três corpos. ...	17
Figura 2: Representação esquemática de diferentes interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies de materiais dúcteis. ....	19
Figura 3: Arranjo esquemático do ensaio de microabrasão em configuração de esfera fixa mostrando (a) Equipamento de ensaio (b) Detalhe da interface esfera amostra.....	22
Figura 4: Medição dos diâmetros (a) interno e (b) externo da cratera em um sistema recoberto. ....	23
Figura 5: Exemplo da utilização da equação de Archard modificada para obtenção dos coeficientes de desgaste $k_s$ e $k_c$ em aço AISI 316 carbonetado e recoberto por (Cr, Al)N.....	25
Figura 6: Desgaste microabrasivo de aço ferramenta em solução de SiC: Mapa de mecanismo de desgaste.....	26
Figura 7: Fotomicrografias características de superfícies desgastadas pelos mecanismos de: a) riscamento; b) indentação; c) misto dos dois mecanismos.....	26
Figura 8: Ensaio de microabrasão do tipo esfera fixa sobre aço ferramenta em solução de SiC: influência da velocidade de desgaste. ....	27
Figura 9: Resultados de microdureza Vickers superficial (HV) sob várias cargas. ...	38
Figura 10: Plint TE66 Micro-Scale abrasion Tester .....	40
Figura 11: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Substrato. ....	43
Figura 12: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Substrato. ....	44
Figura 13: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções - substrato ....	45
Figura 14: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções - substrato.....	45
Figura 15: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Sistema Carbonetado.....	47
Figura 16: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Sistema Carbonetado. ....	48



Figura 17: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema carbonetado.....	49
Figura 18: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema carbonetado. ....	49
Figura 19: Análise de regressão, sistema dúplex carbonetado, série 3.....	52
Figura 20: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema dúplex carbonetado. ....	52
Figura 21: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema dúplex carbonetado.....	53
Figura 22: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Sistema Sequencial.....	55
Figura 23: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Sistema Sequencial. ....	55
Figura 24: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema sequencial. ....	56
Figura 25: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema sequencial. ....	56
Figura 26: Análise de regressão, sistema dúplex sequencial, série 3. ....	59
Figura 27: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema dúplex sequencial.....	60
Figura 28: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema dúplex sequencial.....	60
Figura 29: Fotomicrografias características das crateras após 1650 rev.: a)Substrato; b) Carbonetado. ....	62
Figura 30: Fotomicrografias características das crateras após 1650 rev.: c) Dúplex Carbonetado; d) Dúplex Sequencial.....	62
Figura 31: Fotomicrografia com detalhes das regiões de saída (1) e entrada (3) da lama abrasiva e a da região central (2) de uma cratera referente ao sistema sequencial após 1650 revoluções.....	63
Figura 32: Fotomicrografia do centro da cratera referente ao sistema sequencial. .	64
Figura 33: Fotomicrografias das crateras após 1650 revoluções: a)Substrato; b)Carbonetado; c) Dúplex Carbonetado; d) Sequencial; e) Dúplex Sequencial. ....	65
Figura 34: Comparação entre os volumes desgastados obtidos por perfilometria 3D e os calculados a partir dos diâmetros das crateras. ....	66

Figura 35: Microdureza Vickers superficial das amostras.....	67
Figura 36: Comparação dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das crateras para os sistemas não recobertos. ....	70
Figura 37: Comparação entre $K_s$ e $K_c$ para os sistemas recobertos.....	70
Figura 38: Comparação dos coeficientes de desgaste obtidos por perfilometria 3D dos sistemas em estudo. ....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Sistemas estudados.....	36
Tabela 2: Detalhes da produção dos sistemas .....	37
Tabela 3: Microdureza Vickers (HV).....	38
Tabela 4: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o Substrato. ....	42
Tabela 5: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Substrato. ....	43
Tabela 6: Valores obtidos por perfilometria 3D – Substrato. ....	46
Tabela 7: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema carbonetado. ....	46
Tabela 8: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Carbonetado.....	47
Tabela 9: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Carbonetado. ....	49
Tabela 10: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema dúplex carbonetado.....	50
Tabela 11: Resultados dos volumes médios desgastados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Carbonetado.....	51
Tabela 12: Resultados dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Carbonetado.....	51
Tabela 13: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Dúplex Carbonetado. ...	53
Tabela 14: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema sequencial .....	54
Tabela 15: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Sequencial.....	54
Tabela 16: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Sequencial. ....	57
Tabela 17: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema dúplex sequencial.....	58
Tabela 18: Resultados dos volumes desgastados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Sequencial.....	58
Tabela 19: Resultados dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das calotas – Sistema Dúplex Sequencial. ....	59

Tabela 20: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Dúplex Sequencial. ....	61
Tabela 21: Resultados de volume total desgastado calculado e medido para todos os sistemas estudados. ....	66
Tabela 22: Resultados de coeficiente de desgaste para os sistemas não recobertos. ....	69
Tabela 23: Resultados de coeficiente de desgaste para os sistemas recorbetos. ....	69

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS**

CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CFC	Cúbica de Face Centrada
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
PVD	Physical Vapor Deposition
PAPVD	Plasma Assisted Physical Vapor Deposition

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1	TRIBOLOGIA .....	16
3.1.1	<b>Desgaste Abrasivo .....</b>	<b>17</b>
3.1.1.1	Desgaste abrasivo por deformação plástica.....	18
3.1.1.2	Desgaste abrasivo por fratura frágil.....	20
3.2	ENSAIO DE MICROABRASÃO .....	21
3.2.1	<b>Descrição do Ensaio .....</b>	<b>21</b>
3.2.2	<b>Seleção das Condições de Ensaio.....</b>	<b>25</b>
3.3	AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316 .....	28
3.4	TRATAMENTOS SUPERFICIAIS.....	29
3.4.1	<b>Processo de nitretação a plasma.....</b>	<b>29</b>
3.4.2	<b>Processo de carbonetação a plasma.....</b>	<b>30</b>
3.4.3	<b>Processo sequencial a plasma.....</b>	<b>31</b>
3.4.4	<b>Processo de deposição física de vapor assistido por plasma .....</b>	<b>32</b>
3.4.5	<b>Recobrimento de (Cr, Al)N.....</b>	<b>33</b>
3.4.6	<b>Sistemas Dúplex.....</b>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>36</b>
4.1	SISTEMAS ESTUDADOS .....	36
4.1.1	<b>Medidas de dureza superficial dos sistemas .....</b>	<b>37</b>
4.2	ENSAIOS DE MICROABRASÃO .....	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
5.1	AVALIAÇÃO DOS VOLUMES DESGASTADOS E COEFICIENTES DE DESGASTE DOS SISTEMAS.....	42
5.1.1	<b>Substrato de aço inoxidável austenítico AISI 316 .....</b>	<b>42</b>
5.1.2	<b>Sistema Carbonetado a Plasma .....</b>	<b>46</b>
5.1.3	<b>Sistema dúplex carbonetado.....</b>	<b>50</b>

<b>5.1.4 Sistema sequencial .....</b>	<b>53</b>
<b>5.1.5 Sistema dúplex sequencial.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2 AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR MICROSCOPIA</b>	
ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	62
<b>5.3 DISCUSSÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DESGASTE .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3.1 Comparação dos Volumes Desgastados dos Sistemas .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3.2 Comparação dos Coeficientes de desgaste dos Sistemas .....</b>	<b>69</b>
 <b>6 CONCLUSÕES .....</b>	 <b>72</b>
 <b>7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....</b>	 <b>74</b>
 <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	 <b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços Inoxidáveis austeníticos são largamente utilizados como materiais resistentes à corrosão em diversos setores das indústrias do petróleo, química, de alimentos, entre outras. No entanto, em aplicações onde também se exige alta resistência ao desgaste e baixo atrito estes aços não são recomendados, principalmente devido à sua baixa dureza. Neste contexto, estudos que visem aliar melhores propriedades tribológicas à já excelente resistência a corrosão destes aços em meios agressivos, podem trazer grandes benefícios para vida útil dos equipamentos que os utilizem. Por esta razão, técnicas de engenharia de superfície para a melhoria destas propriedades têm sido desenvolvidas, dentre elas se destacam os processos de endurecimento superficial a plasma (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

A engenharia de superfície, com a utilização da tecnologia de plasma, inclui, basicamente, dois processos de modificação mediante a mudanças de composição química superficial: processos de difusão e a deposição de recobrimentos. Na tentativa de se utilizar ambos os processos, vários componentes têm sido modificados por processos de difusão a plasma e posteriormente revestidos com uma camada de outro material de forma a se obter um melhor desempenho. Uma especial atenção tem sido dada ao desempenho de tais conjugados, denominados sistemas/conjugados dúplex (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Um dos principais desafios encontrados pelos fabricantes dos sistemas revestidos é a avaliação de suas propriedades mecânicas e tribológicas em determinadas aplicações, e, portanto, a previsão de seu desempenho e vida útil (RICKARD et al., 1997). Neste contexto, os ensaios de microabrasão por esfera rotativa têm alcançado grande aplicação em pesquisas, pela capacidade que oferecem em analisar o comportamento ao desgaste microabrasivo dos materiais e recobrimentos.

Neste trabalho, ensaios de microabrasão em configuração de esfera fixa foram conduzidos sobre o aço inoxidável AISI 316 submetido a diferentes processos de modificação superficial a plasma, com o intuito de avaliar os efeitos destes tratamentos sobre o desempenho do aço no que se refere ao desgaste.



## **2 OBJETIVOS**

Avaliar por meio de ensaios de microabrasão o comportamento tribológico do aço inoxidável AISI 316 submetido a tratamentos dúplex de carbonetação ou carbonetação e nitretação a plasma e recobrimentos de (Cr, AL)N por PAPVD.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 TRIBOLOGIA

A palavra tribologia deriva da palavra grega *tribos*, que significa atrito (HUTCHINGS, 1992). Neste sentido, sua tradução literal seria a ciência que estuda o atrito. Esta definição, no entanto, é demasiadamente modesta.

Tribologia é definida como a ciência e tecnologia das interações entre as superfícies em movimento relativo e que envolve o estudo das relações entre atrito, desgaste e lubrificação Hutchings (1992). É uma ciência multidisciplinar na qual engenheiros, cientistas dos materiais, físicos, químicos entre outros profissionais estão envolvidos (ZUM-GAHR, 1987). O principal objetivo da tribologia é analisar e compreender os mecanismos que envolvem atrito e desgaste e deste modo obter ferramentas para controlá-los.

O atrito pode ser definido como a resistência percebida por um corpo quando se move sobre outro Hutchings (1992), enquanto o desgaste como a remoção de material de superfícies sólidas decorrente de uma ação mecânica (RABINOWICZ, 1995). Deste modo, o desgaste é um fenômeno que pode se manifestar em decorrência do movimento relativo entre dois ou mais corpos no qual material é retirado de uma das superfícies destes corpos. É importante compreender que o atrito e o desgaste não são propriedades intrínsecas do material, mas que dependem de uma série de fatores que envolvem o tribosistema (ZUM-GAHR, 1987), como da dureza dos materiais ou partículas, da carga aplicada entre as superfícies, da velocidade relativa entre elas, da distância deslizada, dentre outras.

Enquanto o estudo científico do atrito remonta a mais de trezentos anos atrás e o da lubrificação a mais de um século, o estudo de desgaste tem recebido a mesma atenção somente há cerca de setenta anos. Grandes avanços no sentido de se compreender os mecanismos de desgaste foram alcançados, sobretudo com o uso generalizado da microscopia eletrônica e outras ferramentas de microanálises (HUTCHINGS, 1992).

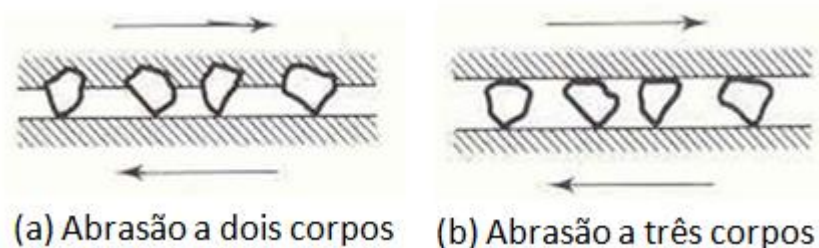
Na maioria das situações nas quais uma superfície se mover sobre outra o desgaste irá ocorrer, resultando em danos para uma ou para ambas as superfícies e geralmente envolvendo uma progressiva perda de material (HUTCHINGS, 1992). Neste sentido, diversos componentes de engenharia têm seu desempenho influenciado por este fenômeno, o que ressalta a importância de seu estudo. Em algumas situações, perdas relativamente pequenas de material podem ser suficientes para acarretar a falha completa de uma grande e complexa estrutura.

De acordo com as características que envolvem o processo, os modos segundo os quais o desgaste pode se manifestar recebem diferentes classificações. Na subseção seguinte será abordado um destes modos: o desgaste abrasivo.

### 3.1.1 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo é aquele no qual material é removido ou deslocado de uma superfície pela ação de partículas duras ou de protuberâncias presentes em um contra-corpo que é forçado e que desliza sobre esta superfície. Geralmente, é feita uma distinção entre abrasão a dois corpos e a três corpos. No primeiro caso a abrasão é provocada por partículas abrasivas fixas em uma contra-superfície enquanto no segundo, o desgaste ocorre quando existem partículas de alta dureza presentes entre duas superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS, 1992). As taxas de desgaste devido à abrasão a dois corpos são geralmente superiores às apresentadas na abrasão a três corpos. A Figura 1 ilustra os dois casos.

Figura 1: Diferenças entre (a) abrasão a dois corpos; (b) abrasão a três corpos.



Fonte: Hutchings (1992).

As partículas responsáveis pela abrasão podem ser intrínsecas de uma determinada aplicação, como é o caso de ferramentas utilizadas para preparar o solo em atividades agrícolas, as quais inevitavelmente entram em contato com partículas duras ou em tubulações que transportam fluidos contendo areia em atividades de mineração Hutchings (1992). Em outras situações, elas podem ser originadas pela entrada de impurezas no sistema, ou pelo destacamento de partículas duras do próprio material.

As taxas do desgaste por abrasão dependem, dentre outros fatores, das características destas partículas tais como: dureza, formato e tamanho. Seja:

$H_a$  = dureza da partícula abrasiva;

$H_s$  = dureza da superfície;

Se  $H_a / H_s > 1.25$  haverá deformação plástica na superfície.

Sob condições nas quais  $H_a/H_s < 1.2$  a abrasão é denominada suave (*soft*), enquanto em situações nas quais  $H_a / H_s > 1.2$  ela é denominada severa (*hard*).

No que se refere ao formato e tamanho das partículas, em geral partículas mais angulares (com formato irregular) e com maiores dimensões conduzem a taxas de desgaste mais acentuadas.

Os mecanismos do desgaste abrasivo podem envolver fluxo plástico ou fratura frágil. Em algumas situações o fluxo plástico pode ocorrer sozinho, mas geralmente ambos ocorrem simultaneamente (HUTCHINGS, 1992).

### 3.1.1.1 Desgaste abrasivo por deformação plástica

Em materiais dúcteis, o mecanismo de remoção de material que caracteriza o desgaste abrasivo envolve a deformação plástica. Seja  $W$  a carga normal aplicada em uma partícula que desliza sobre uma superfície de dureza  $H$ , o volume total de material removido ( $V$ ) por unidade de distância deslizada ( $S$ ), é dado pela equação 3.1, frequentemente chamada de equação de Archard:

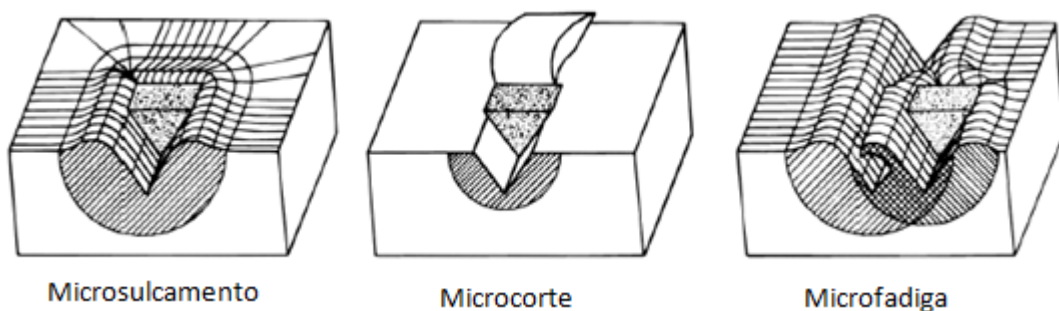
$$Q = \frac{V}{S} = \frac{KW}{H} \quad (3.1)$$

Nesta equação,  $K$  é um coeficiente adimensional que pode ser utilizado como um indicativo da severidade do desgaste e depende da fração de material deslocado efetivamente removido e da geometria das partículas abrasivas. Em algumas situações é mais conveniente a utilização do coeficiente dimensional de desgaste  $k$  ( $k = K/H$ ), cuja unidade usual é  $\text{mm}^3/\text{Nm}$ .

De acordo com a equação 3.1 o volume de material removido pelo desgaste é diretamente proporcional à distância deslizada e a carga normal aplicada. Na condição de que não haja transições de desgaste, este comportamento é geralmente observado na prática. A mesma equação sugere que a taxa de desgaste seja inversamente proporcional a dureza da superfície desgastada, o que nem sempre é observado (HUTCHINGS, 1992).

As partículas abrasivas podem incidir sob diferentes ângulos de ataque sobre a superfície de um material dúctil. A Figura 2 ilustra diferentes modos de interação física entre a partícula e a superfície.

Figura 2: Representação esquemática de diferentes interações físicas entre as partículas abrasivas e as superfícies de materiais dúcteis.



Fonte: Zum Gahr (1987).

O microsulcamento ocorre quando a partícula abrasiva desliza sobre a superfície sob baixos ângulos de ataque. Neste tipo de interação, durante o deslizamento da partícula o material não é removido, mas continuamente deslocado para as regiões adjacentes ao sulco que está sendo formado. O desgaste, entretanto, resulta da passagem de sucessivas partículas que submetem o material a deformações cíclicas

e provocam seu desprendimento por microfadiga. Para ângulos de ataque maiores (acima de um valor crítico), a partícula abrasiva promove a remoção de material da superfície por microcorte em um processo similar ao que ocorre durante uma operação de torneamento (ZUN-GAHR, 1987).

### 3.1.1.2 Desgaste abrasivo por fratura frágil

Em materiais frágeis, o mecanismo de desgaste característico baseia-se na formação e propagação de trincas laterais. Essas trincas são formadas quando a carga normal aplicada  $W$  excede um valor crítico  $W^*$  o qual depende da tenacidade a fratura ( $K_{Ic}$ ) e da dureza da superfície ( $H$ ), conforme demonstra a equação 3.2 (HUTCHINGS, 1992).

$$W^* \propto (Kc/H)^3 Kc \quad (3.2)$$

Quanto maior a dureza e a tenacidade a fratura da superfície, menor a taxa de desgaste, sendo que dependência em relação à tenacidade geralmente é mais forte do que a em relação à dureza. A equação 3.3 reflete este fato (HUTCHINGS, 1992).

$$Q = \alpha_5 \frac{W^{\frac{5}{4}} d^{\frac{1}{2}}}{A^{\frac{1}{4}} K c^{\frac{3}{4}} H^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

Onde  $Q$  é a taxa de desgaste,  $\alpha_5$  é uma constante que depende do material,  $W$  é a carga aplicada por cada partícula,  $d$  é a dimensão das partículas,  $A$  é a área de contato de  $N$  partículas,  $Kc$  é a tenacidade a fratura e  $H$  é a dureza da superfície.

## 3.2 ENSAIO DE MICROABRASÃO

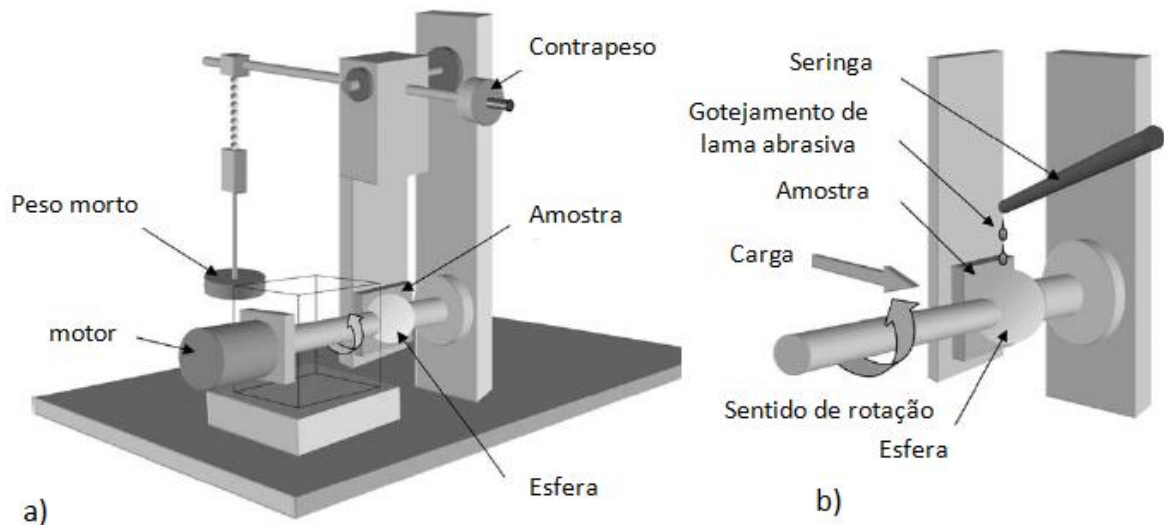
### 3.2.1 Descrição do Ensaio

O uso de recobrimentos resistentes ao desgaste tem se tornando cada vez mais comum em diferentes componentes de engenharia. No entanto, um dos principais desafios encontrados pelos fabricantes destes revestimentos e também por seus usuários é a avaliação de suas propriedades mecânicas e tribológicas em determinadas aplicações, e, portanto, a previsão do seu desempenho e vida útil.

O ensaio por esfera rotativa, também conhecido como ensaio de microabrasão, é uma técnica que tem conquistado grande aplicação em virtude da sua capacidade em analisar o comportamento ao desgaste dos materiais revestidos e superfícies de engenharia (GEE et al., 2003; RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996; LOREY et al., 2005).

O princípio deste ensaio baseia-se na rotação de uma esfera de aço sobre a superfície da amostra, aplicando-se uma carga normal e mantendo-se a interface entre os dois corpos continuamente alimentada com o gotejamento de uma lama abrasiva (LLANES LEYVA, 2011). O equipamento de ensaios pode ser encontrado nas configurações de esfera livre e de esfera fixa. A configuração de esfera fixa apresenta certas vantagens sobre a de esfera livre, dentre as quais: (i) a carga normal pode ser facilmente controlada e pode ser variada ao longo de um grande intervalo; (ii) devido ao fato da esfera ser fixa, sua velocidade de deslizamento é mantida constante (STACHOWIAK et al., 2006). A Figura 3 ilustra o ensaio de microabrasão em configuração de esfera fixa.

Figura 3: Arranjo esquemático do ensaio de microabrasão em configuração de esfera fixa mostrando (a) Equipamento de ensaio (b) Detalhe da interface esfera amostra.



Fonte: Adachi e Hutchings (2003).

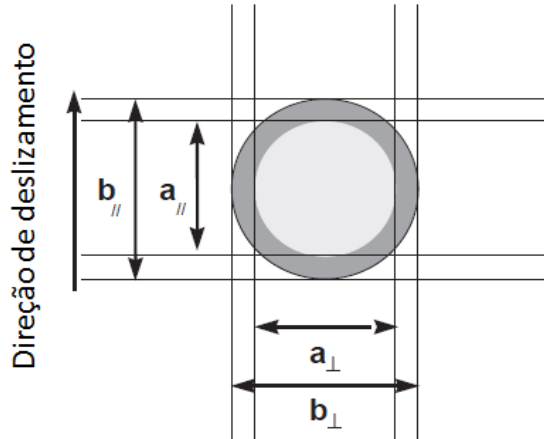
Conforme se observa no arranjo esquemático, a amostra é posicionada verticalmente e a força de pressão entre a esfera e a superfície deriva de um sistema de peso morto e alavanca giratória. O gotejamento da lama abrasiva é realizado por um sistema de bombeamento à parte.

O desgaste abrasivo resulta do aprisionamento ou rolamento de partículas duras e angulosas entre as superfícies em movimento relativo, gerando uma cratera sobre a superfície testada. No caso de superfícies recobertas, a medição dos diâmetros da impressão gerada pela esfera pode ser utilizada na determinação da espessura do recobrimento e dos coeficientes de desgaste do recobrimento e do substrato (LLANES LEYVA, 2011).

Após o ensaio, o volume desgastado pode ser medido com o auxílio de perfilometria tridimensional ou calculado com base nos diâmetros das crateras geradas, admitindo-se a hipótese de que estas reproduzem uma região esférica. Para este cálculo, é realizada a medição das dimensões da cratera nas direções paralela e perpendicular ao sentido de rotação da esfera (LLANES LEYVA, 2011), conforme indicado na Figura 4, que ilustra uma cratera característica de sistemas recobertos. Como valores de diâmetro interno (a) e externo (b) da cratera são utilizadas as médias das duas medições, nas duas direções.



Figura 4: Medição dos diâmetros (a) interno e (b) externo da cratera em um sistema recoberto.



Fonte: Leroy et al. (2005).

Para um material não recoberto, o coeficiente de desgaste  $k$  pode ser obtido a partir da Equação 3.4 (equação de Archard), que estabelece uma relação entre o volume desgastado ( $V$ ), a carga normal aplicada ( $W$ ) e a distância deslizada ( $S = 2\pi R \cdot n^{\circ}rev$ ) (RUTHERFORD; HUTCHINGS, 1996).

$$S \cdot W = \frac{V}{k} \approx \frac{1}{k} \left( \frac{\pi b^4}{64R} \right) \quad (3.4)$$

Onde  $V = (\pi b^4/64R)$ ,  $b$  é o diâmetro da cratera e  $R$  o raio da esfera, sendo  $b \ll R$ .

Para materiais recobertos, devem ser considerados os volumes desgastados do substrato ( $V_s$ ) e do recobrimento ( $V_c$ ), que podem ser obtidos pelas Equações 3.5 e 3.6, respectivamente. O volume total é obtido pelo somatório dos dois volumes (Equação 3.7).

$$V_s = \frac{\pi a^4}{64R} \quad (3.5)$$

$$V_c = \frac{\pi t}{4} (a^2 + 4Rt) \quad (3.6)$$

$$V_t = V_s + V_c \quad (3.7)$$

Na Equação 3.5,  $a$  é o diâmetro interno da cratera e  $t$  é a espessura do recobrimento, que pode ser obtida por medição direta na seção transversal das amostras através de equipamentos apropriados (MEV ou outros) ou calculada com base nos diâmetros médios da cratera de desgaste (Figura 4) através da Equação 3.8:

$$t = [R^2 - \left(\frac{a}{2}\right)^2]^{\frac{1}{2}} - [R^2 - \left(\frac{b}{2}\right)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Se  $V_c/V_t < 0.5$ , a Equação 3.4 pode ser transformada na equação de Archard modificada para um sistema de substrato mais recobrimento (LLANES LEYVA, 2011), resultando na Equação 3.9:

$$\frac{S.W}{b^4} = \left(\frac{k_s - k_c}{k_s \cdot k_c}\right) \left(\frac{\pi t}{4b^2} - \frac{\pi R t^2}{b^4}\right) + \left(\frac{1}{k_s}\right) \left(\frac{\pi}{64R}\right) \quad (3.9)$$

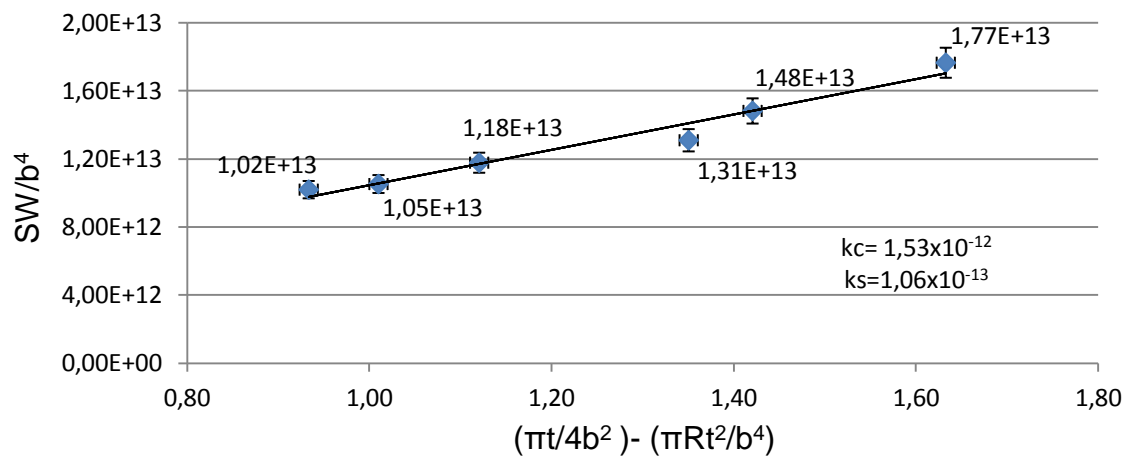
Uma vez obtido o valor da espessura do recobrimento (Equação 3.8), os coeficientes de desgaste do substrato ( $k_s$ ) e do recobrimento ( $k_c$ ) podem ser obtidos de um gráfico linear da Equação 3.9, plotando-se  $SW/b^4$  versus  $(\pi t/4b^2 - \pi R t^2/b^4)$ :  $k_s$  é obtido do intercepto da reta gerada com o eixo das ordenadas ( $c$ ) e  $k_c$  é obtido de sua inclinação ( $m$ ), a partir das Equações 3.10 e 3.11 respectivamente (LLANES LEYVA, 2011).

$$k_s = \frac{\pi}{64Rc} \quad (3.10)$$

$$k_c = \frac{k_s}{1 + k_s \cdot m} \quad (3.11)$$

A Figura 5 ilustra a utilização deste procedimento para obtenção de  $k_s$  e  $k_c$  em um aço inoxidável AISI 316 carbonetado e recoberto por (Cr, Al)N.

Figura 5: Exemplo da utilização da equação de Archard modificada para obtenção dos coeficientes de desgaste  $k_s$  e  $k_c$  em aço AISI 316 carbonetado e recoberto por (Cr, Al)N.



Fonte: o autor.

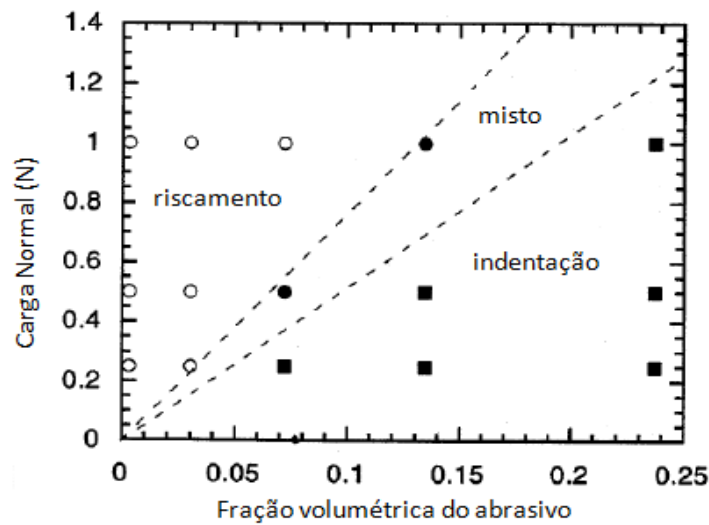
### 3.2.2 Seleção das Condições de Ensaio

Durante a etapa de seleção das condições do ensaio de microabrasão, alguns dos principais parâmetros a serem considerados são: a carga normal aplicada, a distância deslizada (contabilizada pelo número de rotações da esfera), as características do material abrasivo e a velocidade de rotação da esfera.

Quando a pesquisa de desgaste tem foco no estudo tribológico de uma aplicação específica, a seleção das condições de ensaio está dirigida a reproduzir em laboratório o mecanismo de desgaste característico da situação prática (STACK, 2003). Segundo Bose e Wood (2005), para que o ensaio microabrasivo seja utilizado com objetivo de avaliar a resistência ao desgaste de um determinado sistema, é essencial assegurar que um único mecanismo de desgaste atue durante os experimentos. Os mecanismos de desgaste usualmente observados nas superfícies das crateras produzidas durante os ensaios de microabrasão são: o riscamento (*grooving wear*) e a indentação (*rolling wear*).

Estudos têm sido direcionados no sentido de se desenvolver modelos teóricos e mapas de mecanismo de desgaste que determinem sob quais circunstâncias cada mecanismo de desgaste irá se manifestar. A Figura 6 mostra um mapa de mecanismo de desgaste em função da concentração do fluido abrasivo e da carga normal aplicada para um aço ferramenta.

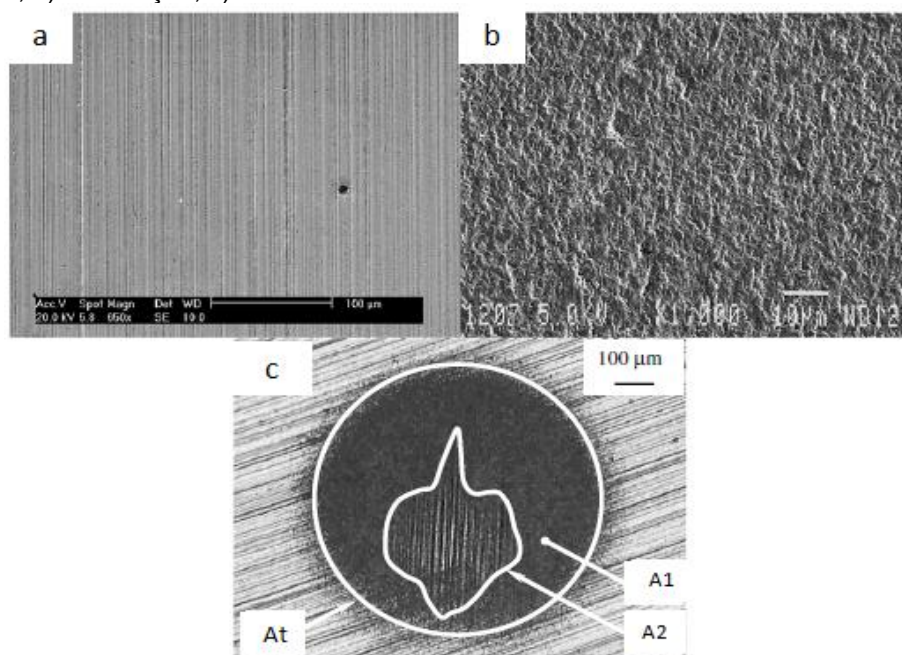
Figura 6: Desgaste microabrasivo de aço ferramenta em solução de SiC: Mapa de mecanismo de desgaste.



Fonte: Trezona et al. (1999).

Alguns autores (TREZONA, 1999; GEE, 2003) referenciam em seus trabalhos que com o aumento da carga normal e com a redução da concentração da lama abrasiva há uma tendência de mudança do mecanismo de indentação para o de riscamento. Este comportamento pode ser observado na Figura 6. A Figura 7 apresenta fotomicrografias características de superfícies desgastadas por cada um destes micromecanismos de desgaste.

Figura 7: Fotomicrografias características de superfícies desgastadas pelos mecanismos de: a) riscamento; b) indentação; c) misto dos dois mecanismos.

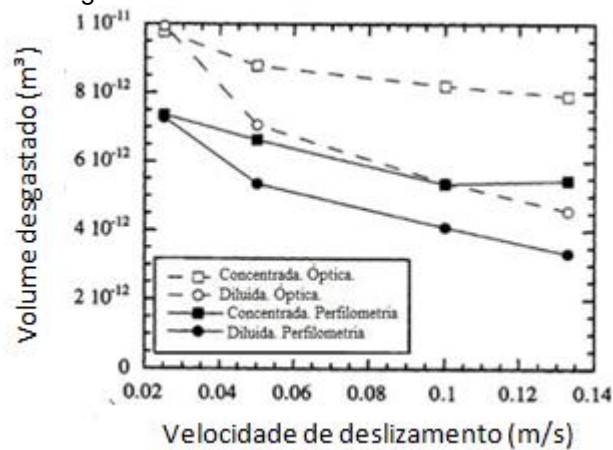


Fonte: Cozza et al. (2011).

Na Figura 7c, a área total da cratera  $A_t$  está dividida em uma área onde predomina a indentação ( $A_1$ ) e outra onde pode ser observado o riscamento ( $A_2$ ).

A Figura 8 mostra que para equipamentos de ensaio do tipo esfera fixa, o volume desgastado para uma dada distância deslizada é bastante independente da velocidade de deslizamento, mas aumenta um pouco para velocidades muito baixas. Nesta mesma figura, também pode ser notado que o volume desgastado é menor quando medido por perfilometria 3D do quando calculado com base nos diâmetros das calotas (microscopia óptica).

Figura 8: Ensaio de microabrasão do tipo esfera fixa sobre aço ferramenta em solução de SiC: influência da velocidade de desgaste.



Fonte: Trezona et al. (1999).

### 3.3 AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO AISI 316

Os aços inoxidáveis são ligas ferrosas altamente resistentes a corrosão em uma grande variedade de ambientes, especialmente o atmosférico. Esta resistência se deve principalmente a adição de cromo em teor igual ou superior a 11% em peso nessas ligas, pois na presença de oxigênio, este elemento se oxida e forma uma camada superficial muito fina, aderente e protetora de óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). A resistência a corrosão também pode ser melhorada com a adição de outros elementos como o níquel e o molibdênio (CALLISTER, 2007).

Segundo Callister (2007) e Comineli (2008), os aços inoxidáveis podem ser divididos em três classes principais com base na fase constituinte predominante em sua microestrutura: martensíticos, ferríticos e austeníticos. Os aços inoxidáveis martensíticos são capazes de serem tratados termicamente de tal modo que a martensita é seu microconstituente principal; os ferríticos são os compostos da fase ferrita- $\alpha$  (CCC); os austeníticos são os que possuem elementos de liga que estendem o campo da fase austenita até a temperatura ambiente.

Das classes de aços inoxidáveis, os austeníticos são os mais resistentes a corrosão devido aos seus altos teores de cromo e também das adições de níquel (CALLISTER, 2007). O aço AISI 316 é um tipo aço inoxidável austenítico cuja principal peculiaridade é a adição de molibdênio em teores entre 2 a 3%, o que lhe confere maior resistência a corrosão por pites (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Os aços inoxidáveis são largamente usados como materiais resistentes à corrosão em vários setores das indústrias do petróleo, química, de alimentos, entre outras. No entanto, em aplicações onde também se exige alta resistência ao desgaste e baixo atrito esses aços não são recomendados, principalmente devido à sua baixa dureza. Por esta razão, técnicas de engenharia de superfície para a melhoria destas propriedades têm sido desenvolvidas, dentre elas se destacam os processos de endurecimento superficial a plasma.

### 3.4 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

#### 3.4.1 Processo de nitretação a plasma

Os aços inoxidáveis austeníticos, por apresentarem estrutura cúbica de face centrada (CFC) na temperatura ambiente, não são passíveis de tratamento térmico de endurecimento. Para esta família de aços, os tratamentos superficiais, como o de nitretação são uma opção viável quando o intuito é melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas de suas superfícies. Contudo, estes aços não podem ser nitretados em temperaturas superiores a 550°C, pois suas propriedades de resistência a corrosão seriam severamente prejudicadas devido à intensa precipitação de carbonetos de cromo na zona de difusão durante o ciclo de nitretação (LARISCH; BRUSKY; SPIES, 1999; LIANG, W. et al., 2000). Neste contexto, o processo de nitretação a plasma se mostra uma técnica apropriada, pois permite a introdução de nitrogênio no aço em temperaturas abaixo de 450°C (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

A nitretação a plasma (ou iônica) é um processo termoquímico ativado por plasma, cujo princípio se baseia na natureza energética de uma descarga incandescente (plasma de baixa pressão) para obtenção de uma camada superficial de elevada dureza. Este processo já adquiriu uma grande aceitação na área industrial, em aplicações diversas, para aumento de resistência ao desgaste, à fadiga e à corrosão (LARISCH; BRUSKY; SPIES, 1999; AMIRI; MORADSHAHI, 2007).

Durante o processo, uma fase metaestável muito dura (até 1500 HV) e resistente a corrosão é formada na superfície do aço (MENTHE; Rie, 1999; PICARD et al., 2001). Esta fase é algumas vezes chamada de austenita expandida, fase  $\gamma_N$ , fase S, fase  $\epsilon'$  ou fase m, e consiste de nitrogênio supersaturado em solução sólida (austenita), além do limite de solubilidade convencional, com uma rede cristalina expandida. A metaestabilidade, isto é, a supersaturação de nitrogênio sem precipitação de nitretos de Cr, esta associada à baixa mobilidade do cromo em temperaturas inferiores a 450°C e a forte interação Cr-N (WILLIAMSON; OZTURK, 1994).

Um equipamento típico de nitretação a plasma é constituído basicamente de um sistema de vácuo, uma fonte de potência e um reator. O sistema de vácuo é responsável pela manutenção de pressões que podem variar de 1 a 10 mbar durante o processo. A fonte de potência possui uma saída D.C e introduz tensões de operação da ordem 200 a 1000V e uma corrente capaz de fornecer energia à peça para que ela seja aquecida até a temperatura adequada. No reator estão dois eletrodos: o catodo é o porta amostras e o anodo é a parede da câmara. Ainda no reator devem existir saídas para medida da pressão, temperaturas e outras variáveis desejadas para o melhor controle do processo (OLIVEIRA JUNIOR, 2011; ALVES JUNIOR, [20--?]).

Inicialmente, sob condições de baixa pressão, aplica-se uma diferença de potencial entre os eletrodos e então o gás nitretante (tipicamente uma mistura de  $N_2$  e  $H_2$ ) é introduzido no reator. Para pressões baixas, a descarga possui um brilho de cor rósea de pequena intensidade que é característico do material do catodo e do gás. Na medida em que se aumenta a pressão, este brilho vai ficando mais intenso e mais localizado em torno do catodo, até que se atinja uma condição de descarga propícia à nitretação. Nestas condições o plasma já está revestindo completamente o catodo e a peça a ser nitretada (ALVES JUNIOR, [20--?]). Os íons deste plasma estão sendo acelerados para a superfície do catodo onde diversos efeitos ocorrem, dentre eles o aquecimento da peça devido ao bombardeamento pelos íons (EDENHOFER, 1974). A temperatura da peça é então controlada pela corrente até o valor desejado. A partir daí é contado o tempo de duração do processo. Após este tempo, a fonte é desligada e a peça é deixada resfriar naturalmente.

#### **3.4.2 Processo de carbonetação a plasma**

De maneira semelhante ao descrito para o tratamento de nitretação, os aços inoxidáveis austeníticos não podem ser carbonetados pelos processos convencionais, pois as altas temperaturas empregadas nestes processos são favoráveis a precipitação de carbonetos de cromo e o conseqüente empobrecimento



das suas propriedades de resistência a corrosão. Para estes aços, a carbonetação a plasma é mais adequada, pois pode ser conduzida em temperaturas menores.

Devido ao seu maior tamanho atômico, o carbono é muito menos solúvel na austenita do que o nitrogênio. Entretanto, o carbono se difunde com maior facilidade do que o nitrogênio, o que resulta em camadas mais espessas para a carbonetação do que para nitretação (BLAWERT et al., 2001; BLAWERT et al., 2000). A maior taxa de difusão do carbono na austenita se deve a menor energia de interação entre o carbono e o cromo (C-Cr) do que entre nitrogênio e o cromo (N-Cr).

O fato da camada modificada por carbono ser mais espessa do que a modificada por nitrogênio faz com que esta seja mais conveniente para suportar cargas relativamente mais altas. No entanto, a dureza da camada carbonetada é menor do que a dureza da camada nitretada (BLAWERT et al., 2001; TSUJIKAWA, 2005). Este fato se explica porque embora o carbono ocupe as mesmas posições intersticiais da rede que o nitrogênio, a supersaturação do carbono em solução sólida é muito menor, conseqüentemente, a expansão da rede é menor (OLIVEIRA JUNIOR, 2001).

### **3.4.3 Processo sequencial a plasma**

Apesar do processo de nitretação a plasma melhorar as propriedades mecânicas e tribológicas das superfícies dos aços, devido às baixas temperaturas empregadas neste tratamento as camadas endurecidas são muito finas e uma queda brusca de dureza é observada entre a fronteira da camada nitretada e o substrato do material. Para processos de carbonetação plasma, esta queda de dureza se manifesta de maneira mais gradativa.

Recentemente começou a ser investigada a possibilidade de introdução de ambos os elementos (C e N) em um mesmo substrato de aço inoxidável austenítico. Alguns pesquisadores mostraram que um tratamento de nitretação quando realizado em seguida a um de carbonetação pode empurrar a camada carbonetada para uma região mais profunda da superfície (TSUJIKAWA et al., 2005). Segundo Tsujikawa e outros (2005), esta combinação de carbonetação e posterior nitretação quando

realizada sobre o aço inoxidável AISI 316 pode resultar em uma camada superficial dupla e espessa, com um perfil de dureza que decrescesse suavemente em direção ao núcleo do substrato. O tratamento a plasma de carbonetação seguido por nitretação (ou vice-versa) é chamado de processo sequencial a plasma.

#### **3.4.4 Processo de deposição física de vapor assistido por plasma**

A terminologia PVD (Physical Vapor Deposition – Deposição Física de Vapor) é utilizada na designação genérica das tecnologias de deposição de recobrimentos que envolvem a atomização ou a vaporização de um material, de uma fonte sólida, e a deposição deste sobre um substrato de forma a se obter um recobrimento. Para que a deposição ocorra é necessário aumentar a energia das espécies a serem depositadas, o que na maioria dos processos ocorre por meio da ionização e aceleração dos íons em direção ao substrato (OLIVEIRA JUNIOR, 2011). As principais etapas dos processos de deposição são:

- Vaporização do material que formará o filme;
- Transporte do material vaporizado até a superfície do substrato;
- Crescimento do filme sobre a superfície do substrato.

A deposição por PVD é um processo atomístico e extremamente dependente do material a ser depositado, da morfologia e reatividade superficial do substrato, do processo de preparação superficial, dos parâmetros de deposição, entre outros. Dentre as tecnologias de deposição física de vapor podem-se distinguir três grupos, de acordo com o processo de atomização/vaporização: PVD por evaporação, PVD por *sputtering* e PVD assistido por plasma (HOLMBERG; MATHEWS, 1994).

Embora o processo de PVD por evaporação já fosse conhecido há mais de cem anos, somente em 1938 a deposição física de vapor assistida por plasma (PAPVD) foi patenteada e, apenas nas últimas duas décadas esta tecnologia despertou grande interesse como método de obtenção de recobrimentos tribológicos. Este recente interesse pode ser atribuído ao completo domínio de tal tecnologia nos dias atuais, que além de proporcionar a deposição de materiais cerâmicos a baixas temperaturas, também permite a deposição de ligas, compostos e fases

metaestáveis que são dificilmente conseguidas por outros processos, bem como o controle da morfologia do filme e o de sua orientação cristalográfica preferencial (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Os sistemas PAPVD comerciais utilizam as mesmas fontes de vapor de outros processos PVD, entretanto, as amostras ficam imersas no plasma, de forma a possibilitar o controle do nível de ionização e otimizar a deposição do filme (BELL; DONG; SUN, 1998). Os sistemas comerciais de PAPVD são classificados de acordo com a fonte de vapor empregada. Basicamente, três sistemas se destacam: Sistemas de evaporação por feixe de elétrons, sistemas de evaporação a arco e sistemas *sputtering*.

#### **3.4.5 Recobrimento de (Cr, Al)N**

Revestimentos como TiN, CrN e HfN (nitretos de metais de transição) possuem excelentes propriedades mecânicas e químicas e por isto são convenientes para aplicações que exijam resistência ao desgaste e resistência à corrosão. Inicialmente, o nitreto de cromo foi um tipo de revestimento muito usado, devido à sua combinação de dureza e excelentes propriedades de desgaste com a resistência à corrosão (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Para melhorar a eficiência mecânica e tribológica deste revestimento, componentes ternários incluindo outros metais, tais como, Al, V, Nb e Cu têm sido explorados (ULRICH et al., 2003; LUGSCHEIDER et al., 2003). A incorporação de Al na composição do filme, por exemplo, produz melhorias nas propriedades mecânicas (aumento da dureza e redução no módulo de Young) e um aumento na resistência térmica contra a oxidação em comparação ao CrN (MOLLER et al., 1999). A incorporação de metais como o Al e o Ti também melhora a resistência à corrosão de filmes de CrN.

Os recobrimentos (Cr, Al)N contêm o elemento mais efetivo na resistência à oxidação (Al) e o mais efetivo na resistência à corrosão a quente (Cr). Assim, eles fornecem excelente proteção de diferentes tipos de corrosão e podem ser usados em um largo intervalo de temperatura. Além disso, estes recobrimentos formam

complexos óxidos de Al e Cr que eventualmente impedem a difusão do oxigênio no volume (*bulk*) do material (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

### 3.4.6 Sistemas Dúplex

O termo “recobrimentos dúplex” apareceu no começo dos anos 90, mas o conceito foi introduzido em 1979 por Brainard e Weelerm, que verificaram que a adesão de recobrimentos duros de TiC, depositados por *sputtering*, poderia ser melhorada com a introdução de nitrogênio antes da deposição. Kohonen e Sirvio (1982) demonstraram pela primeira vez que era possível realizar um tratamento de nitretação em um equipamento de PAPVD, a baixa pressão. A partir de então, vários pesquisadores passaram a realizar a nitretação a plasma em baixa pressão visando a produção de recobrimentos dúplex, que são caracterizados por uma camada modificada seguida pela deposição de um recobrimento duro (HE; CHEN; DAVISON, 2005). Hoje em dia a terminologia mais utilizada é a de conjugados dúplex, devido ao fato de não se tratar de recobrimentos com dupla camada.

O fator crítico na produção de conjugados dúplex é a adesão do revestimento à camada modificada. Sun e Bell (1991) foram os primeiros pesquisadores a identificar o problema de formação da *black layer* (camada preta). Segundo eles, esta camada se posiciona entre o recobrimento e a camada de compostos (*compound layer*) e é constituída principalmente de ferrita ( $Fe\alpha$ ) que se origina da decomposição da camada de nitretos de Fe ( $Fe_4N$  e  $Fe_{2-3}N$ ) durante o processo de deposição dos recobrimentos por PVD. Os principais mecanismos apontados como responsáveis por esta decomposição da camada nitretada, foram o bombardeamento iônico e a temperatura de deposição. A presença da camada preta no conjugado dúplex fez com que o mesmo apresentasse baixa capacidade de suporte de carga e baixa resistência ao desgaste em testes de deslizamento.

A prática usual tem sido remover a camada de nitretos antes da deposição do recobrimento ou evitar sua formação durante a etapa de nitretação por meio do controle adequado dos parâmetros de processo, pois sua formação ou

posteriormente decomposição, levaria o conjugado dúplex a exibir uma baixa adesão na interface recobrimento/camada nitretada (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

Apesar dos tratamentos dúplex serem utilizados com sucesso em várias atividades produtivas, ainda existem questões a serem esclarecidas, como por exemplo, o efeito de amaciamento do substrato causado pelas elevadas temperaturas durante o processo de tratamento dúplex. Para He e outros (2005), este efeito tem maior influência em determinar a dureza superficial dos sistemas dúplex do que a formação da camada preta. O amaciamento do substrato também parece ser um fator significativo para a adesão de filmes, demonstrando que para se obter um tratamento dúplex bem sucedido é importante evitá-lo. Desta forma, processos em baixas temperaturas são vantajosos, pois evitam tal amaciamento.

## 4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 4.1 SISTEMAS ESTUDADOS

Neste trabalho foram estudados cinco diferentes sistemas, conforme sintetizado pela Tabela 1.

Tabela 1: Sistemas estudados.

Sistema	Nome	Descrição
Sistema 1	Substrato	Aço Austenítico AISI 316
Sistema 2	Carbonetado	Aço AISI 316 Carbonetado a Plasma
Sistema 3	Dúplex Carbonetado	Aço AISI Carbonetado a Plasma seguido de recobrimento de (Cr, Al)N
Sistema 4	Sequencial	Aço AISI 316 sequencial (carbonetado + nitretado) a plasma
Sistema 5	Dúplex Sequencial	Aço AISI 316 sequencial a plasma seguido de recobrimento de (Cr, Al)N

Fonte: Oliveira Junior (2011).

O estudo destes sistemas possibilitou a comparação entre os processos de modificação superficial a plasma de carbonetação e carbonetação + nitretação (sequencial) na melhoria das propriedades tribológicas do aço AISI 316. Além disso, o efeito do recobrimento (Cr, Al)N foi avaliado.

Todos os sistemas descritos na Tabela 1 foram produzidos na TECVAC Ltd., Inglaterra. As amostras não foram submetidas a tratamento térmico após os processos de difusão a plasma e revestimento por PAPVD. Na Tabela 2 são apresentados alguns parâmetros relativos ao processo de produção.

Tabela 2: Detalhes da produção dos sistemas

Sistemas	Descrição da Produção
Substrato	Aço inoxidável austenítico AISI 316
Carbonetado	Carbonetação a plasma em configuração triodo a 475°C por 4 horas
Dúplex carbonetado	Carbonetação a plasma em configuração triodo a 475°C por 4 horas, seguida de recobrimento de (Cr, Al)N (2,5 µm – nominal)
Sequencial	Carbonetação a plasma em configuração triodo a 475°C por 2 horas, seguida de nitretação a plasma em configuração triodo a 450°C por 2 horas
Dúplex sequencial	Carbonetação a plasma em configuração triodo a 475°C por 2 horas, seguida de nitretação a plasma em configuração triodo a 450°C por 2 horas e posterior deposição de recobrimento de (Cr, Al)N (2,5 µm – nominal)

Fonte: Adaptada de Oliveira Junior (2011).

A modificação superficial a plasma foi realizada na configuração triodo e a deposição dos recobrimentos foi feita por PAPVD. As etapas do processo de produção dos filmes de (Cr, Al)N consistiram inicialmente de uma etapa de aquecimento do substrato modificado em plasma de argônio a 403°C por cinco minutos, posteriormente houve a deposição de uma camada intermediária (*interlayer*) de Cr por cinco minutos a 405°C e, finalmente, deposição de recobrimento de (Cr,Al)N a 405°C por 100 minutos.

As amostras em estudo foram caracterizadas quanto à dureza superficial por Oliveira Junior (2001) em trabalho anterior de doutorado. Estes resultados serão importantes para posteriores análises dos ensaios de microabrasão e serão apresentados a seguir.

#### 4.1.1 Medidas de dureza superficial dos sistemas

Os resultados de microdureza Vickers da superfície das amostras estão apresentados na Tabela 3. A Figura 9 apresenta estes dados em forma de gráfico, e

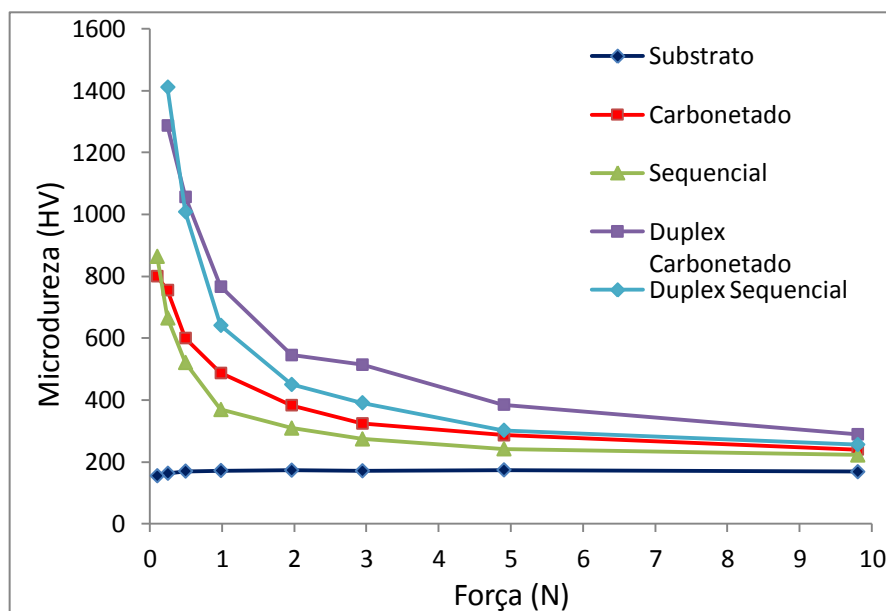
permite uma comparação entre as durezas do substrato de aço inoxidável AISI 316 e dos demais sistemas estudados.

Tabela 3: Microdureza Vickers (HV).

Força (N)	Substrato	Carbonetado	Duplex Carbonetado	Sequencial	Duplex Sequencial
9,8	168 ± 3	240 ± 3	289 ± 11	222 ± 5	256 ± 10
4,9	174 ± 9	286 ± 15	385 ± 29	242 ± 7	302 ± 14
2,94	171 ± 9	324 ± 9	514 ± 32	274 ± 18	391 ± 29
1,96	173 ± 11	383 ± 22	545 ± 27	309 ± 16	450 ± 34
0,98	172 ± 11	487 ± 54	766 ± 72	369 ± 31	641 ± 59
0,49	170 ± 10	600 ± 77	1056 ± 62	521 ± 58	1008 ± 88
0,245	163 ± 10	755 ± 57	1287 ± 252	665 ± 60	1411 ± 114
0,098	155 ± 11	800 ± 132	-	864 ± 96	-

Fonte: Oliveira Junior (2011).

Figura 9: Resultados de microdureza Vickers superficial (HV) sob várias cargas.



Fonte: Oliveira Junior (2011).

Pela Figura 9 pode-se concluir que tanto o processo de carbonetação a plasma como o processo sequencial (carbonetação + nitretação) ocasionou um significativo aumento da dureza do substrato. Este aumento é decorrente da formação da austenita expandida, como discutido anteriormente. O sistema carbonetado



apresentou maior dureza que o sequencial, exceto em baixas cargas, onde ocorre pequena penetração. No entanto, como se pode ver na Tabela 3, as incertezas nas medidas em baixa carga são relativamente grandes. Portanto, não se pode afirmar estatisticamente se sob carga de 0,245 N ou 0,098 N a dureza do sistema sequencial é maior.

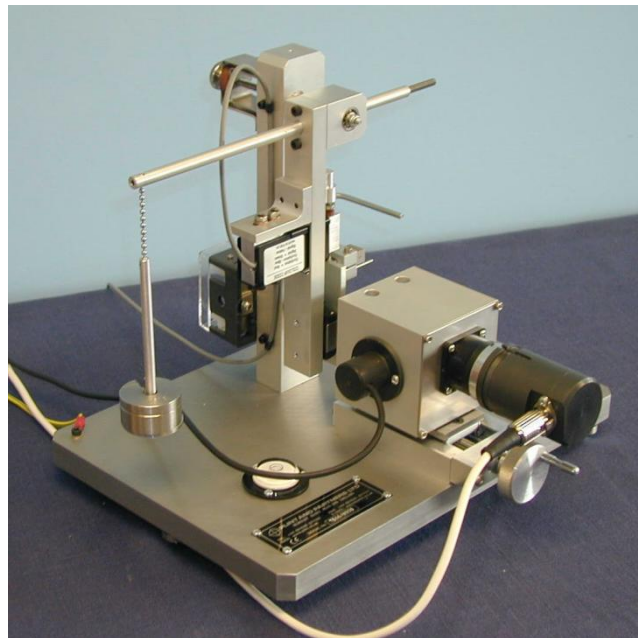
Ao se depositar o revestimento sobre o substrato modificado pelos processos a plasma ganha-se um aumento de dureza em relação aos sistemas tratados e um significativo aumento em relação ao substrato não tratado. Os sistemas dúplex se comportam de forma análoga aos respectivos sistemas tratados, isto é, a dureza do dúplex carbonetado é maior que a dureza do dúplex sequencial, exceto em menores cargas, onde se tem pouca penetração, exatamente como ocorre entre o sistema carbonetado e sequencial. Este fato reflete a influência da superfície modificada a plasma que serviu de base para a deposição do revestimento.

Considerando a maior força aplicada, (9,8N), foi calculado a contribuição de cada tipo de tratamento de superfície para o aumento de dureza superficial dos sistemas. O processo de carbonetação levou a um aumento de 43% na dureza em relação ao substrato, o dúplex carbonetado gerou um aumento de 72%, o tratamento sequencial gerou 32% e o dúplex sequencial 52%. Fazendo a comparação entre os sistemas dúplex e os respectivos sistemas tratados (dúplex carbonetado *versus* carbonetado e dúplex seqüencial *versus* sequencial), pode-se afirmar que a dureza do sistema dúplex carbonetado sofreu um aumento de 20% e o dúplex sequencial teve um aumento de 15%. A ausência de valores de dureza para os dois sistemas dúplex sob carga de 0,098 N é decorrente da limitação do microscópio óptico em medir a impressão. A impressão deixada na superfície para este nível de carga foi praticamente imperceptível.

## 4.2 ENSAIOS DE MICROABRASÃO

O comportamento em desgaste dos materiais foi investigado por ensaios de microabrasão (esfera rotativa) em um equipamento Plint TE66 (Figura 10), utilizando-se uma esfera de aço AISI 52100 com 25,4 mm de diâmetro como contra-corpo e uma carga de 0,5 N. Como abrasivo foi utilizada uma lama contendo SiC ( $< 10\mu\text{m}$ ) em concentração de 0,35g/ml de água destilada. A velocidade de rotação da esfera foi ajustada em 80rpm.

Figura 10: Plint TE66 Micro-Scale abrasion Tester



Fonte: Phoenix Tribology.

Antes de cada ensaio, foi realizado um condicionamento da esfera mediante agitação desta em uma solução abrasiva (areia sílica em água) por 5 minutos, bem como a limpeza das amostras por ultra-som durante 10 minutos.

Ao todo foram ensaiadas cinco amostras, cada uma correspondendo a um dos sistemas descritos na seção 4. Em cada amostra foram realizadas três séries de ensaios, conduzidas em 11 intervalos de 150 revoluções da esfera (1650 revoluções por calota). O volume desgastado foi avaliado com base nos diâmetros das crateras registrados por microscopia óptica e também através de medição direta por perfilometria tridimensional de contato, utilizando-se o perfilômetro Taylor-Hobson Talysurf CLI 1000.

Para os sistemas não recobertos em estudo o coeficiente de desgaste ( $k$ ) foi determinado pelo modelo de Archard conforme Equação 3.4. Para os sistemas dúplex, a espessura do recobrimento foi obtida através da Equação 3.8 com base nos diâmetros interno e externo medidos nas crateras produzidas. Análises de regressão foram realizadas para determinar os coeficientes de desgaste do recobrimento ( $k_c$ ) e do substrato ( $k_s$ ) utilizando Microsoft Excel; a adequação dos modelos foi avaliada com o coeficiente de correlação  $R^2$ . Para todos os sistemas, os micromecanismos desgaste foram investigados por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AVALIAÇÃO DOS VOLUMES DESGASTADOS E COEFICIENTES DE DESGASTE DOS SISTEMAS

#### 5.1.1 Substrato de aço inoxidável austenítico AISI 316

A Tabela 4 mostra os valores obtidos por microscopia óptica para os diâmetros das crateras de desgaste nos ensaios de microabrasão sobre o substrato.

Tabela 4: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o Substrato.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada $S$ (m)	Diâmetro da Cratera Série 1 ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro da Cratera Série 2 ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro da Cratera Série 3 ( $\mu\text{m}$ )
150	11,8	1481	1424	1429
300	23,6	1652	1619	1634
450	35,3	1790	1760	1773
600	47,1	1886	1860	1872
750	58,9	1977	1928	1955
900	70,7	2043	2005	2017
1050	82,5	2107	2077	2085
1200	94,3	2178	2145	2156
1350	106,0	2237	2202	2205
1500	117,8	2295	2246	2267
1650	129,6	2343	2297	2301

Fonte: o autor.

Na Tabela 5 são apresentados os valores médios<sup>1</sup> do coeficiente de desgaste e do volume desgastado total calculados conforme as Equações 3.4 e 3.5, respectivamente, bem como os desvios padrões relativos a cada valor.

<sup>1</sup> Média aritmética dos valores obtidos nas três séries de ensaios.

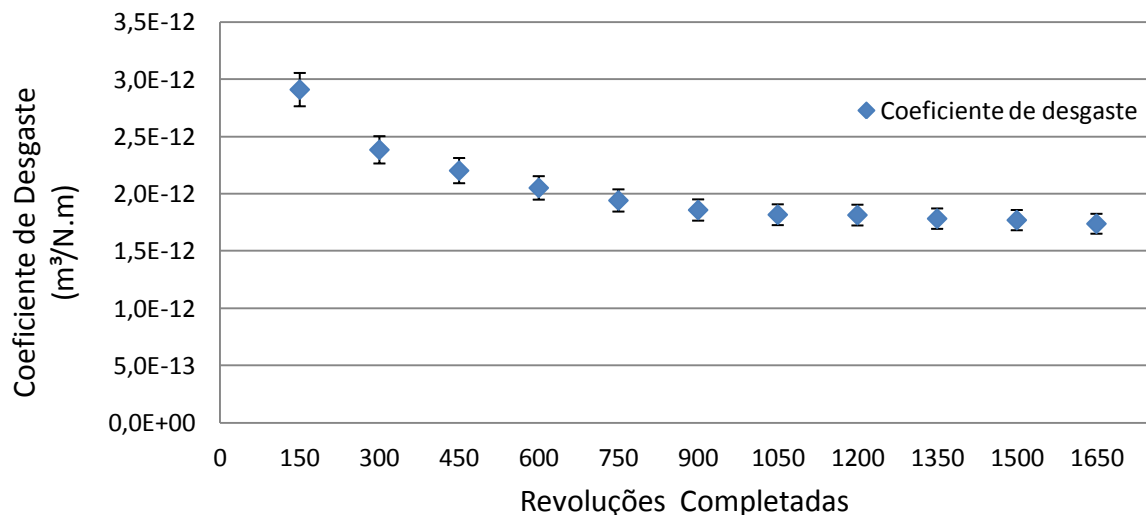
Tabela 5: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Substrato.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada $S(m)$	Média do Volume Desgastado Total $V_t(mm^3)$	Desvio Padrão do Volume Desgastado Total $(mm^3)$	Média do Coeficiente de Desgaste $k(m^3/N.m)$	Desvio Padrão do Coeficiente de Desgaste $(m^3/N.m)$
150	11,8	$1,7 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,9 \times 10^{-12}$	$2,6 \times 10^{-13}$
300	23,6	$2,8 \times 10^{-2}$	$1,5 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-12}$	$9,8 \times 10^{-14}$
450	35,3	$3,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-12}$	$7,5 \times 10^{-14}$
600	47,1	$4,8 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-12}$	$5,7 \times 10^{-14}$
750	58,9	$5,7 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-12}$	$9,7 \times 10^{-14}$
900	70,7	$6,6 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-12}$	$7,2 \times 10^{-14}$
1050	82,5	$7,5 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$5,0 \times 10^{-14}$
1200	94,3	$8,5 \times 10^{-2}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$5,6 \times 10^{-14}$
1350	106,0	$9,5 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$6,2 \times 10^{-14}$
1500	117,8	$1,0 \times 10^{-1}$	$4,5 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$7,6 \times 10^{-14}$
1650	129,6	$1,1 \times 10^{-1}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$7,9 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

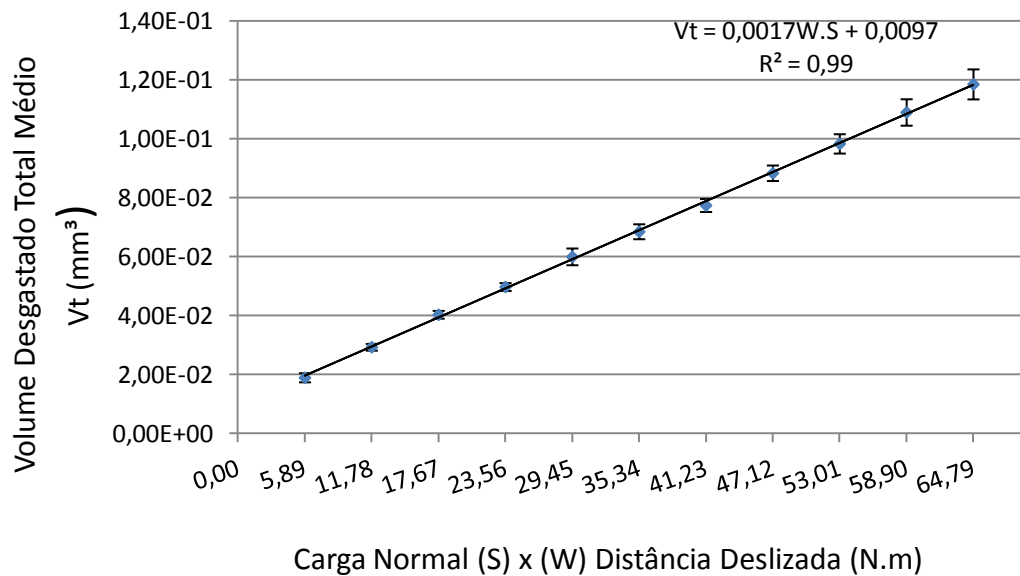
As Figuras 11 e 12 ilustram respectivamente a evolução do coeficiente de desgaste médio em relação ao número de revoluções completadas pela esfera e a variação do volume total desgastado médio com o produto da carga normal pela distância deslizada.

Figura 11: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Substrato.



Fonte: O autor.

Figura 12: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Substrato.



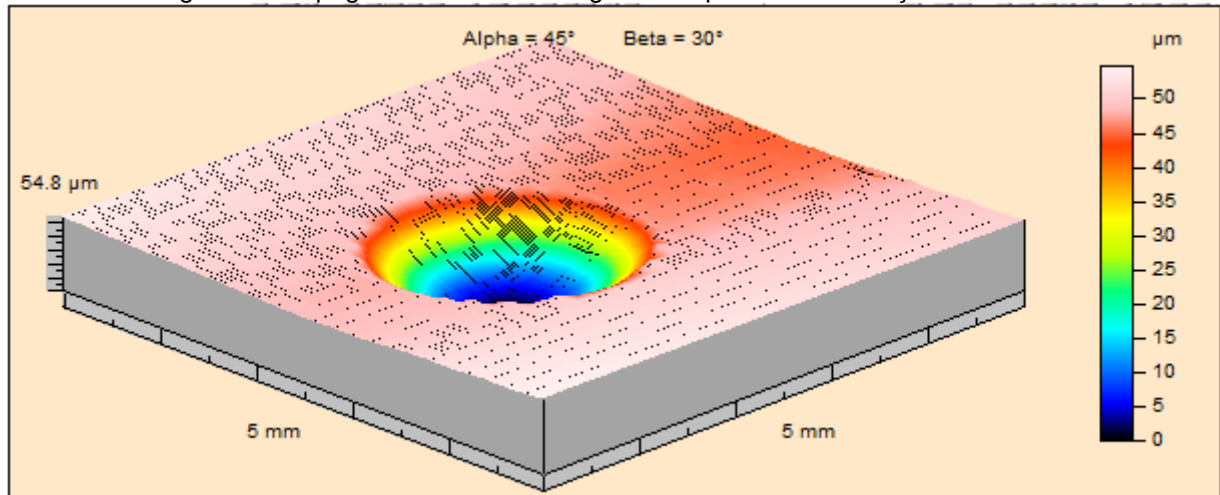
Fonte: o autor.

A análise dos resultados indica que as condições experimentais adotadas permitiram alcançar um regime permanente de ensaio, com a estabilização do coeficiente de desgaste nos últimos intervalos de rotação da esfera, conforme pode ser observado na Figura 11. O coeficiente de variação<sup>2</sup> do coeficiente de desgaste dos quatro últimos pontos de experimentais resultou em  $Cv = 1,8\%$ . A Figura 12 mostra que houve uma variação linear do volume total desgastado em relação ao produto da carga normal pela distância deslizada. Este resultado reforça a validade da utilização da Equação de Archard ( $V = k.SW$ ) para o cálculo do coeficiente de desgaste. Após 1650 revoluções, o volume total desgastado calculado com base nos diâmetros das crateras resultou em  $V_t = 0,11 \text{ mm}^3$ . O coeficiente de desgaste adotado como uma média dos valores referentes aos quatro últimos pontos experimentais resultou em  $k = 1,8 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Nm}$ .

<sup>2</sup> O coeficiente de variação é igual ao desvio-padrão dividido pela média:  $Cv = \sigma/\mu$ .

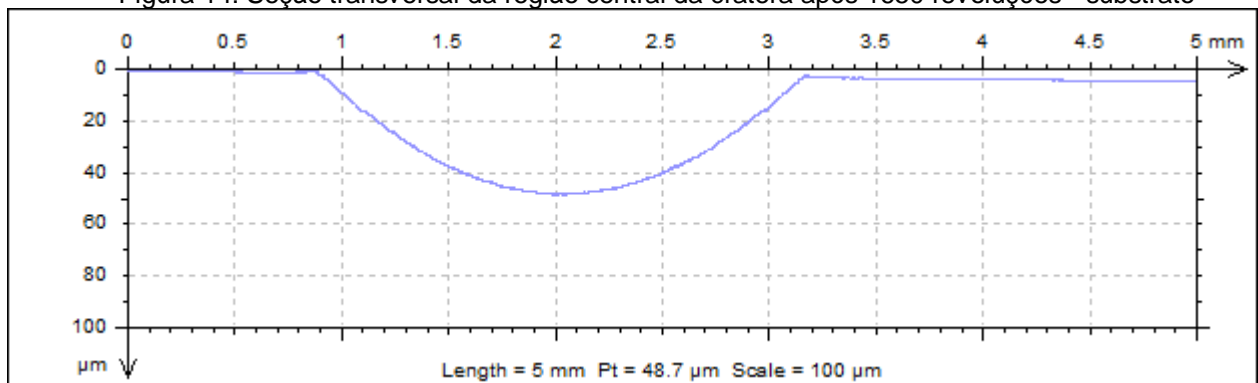
Nas Figuras 13 e 14 são apresentados resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para uma cratera desgastada após 1650 revoluções.

Figura 13: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções - substrato



Fonte: o autor.

Figura 14: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções - substrato



Fonte: o autor

Na Tabela 6 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para os volumes totais das crateras desgastadas referentes às três séries de ensaios após 1650 revoluções, e os respectivos coeficientes de desgaste calculados conforme a Equação 3.4. O valor médio do coeficiente de desgaste obtido por perfilometria 3D de contato resultou em  $k = 1,9 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N.m}$ , para um volume desgastado total médio  $V_t = 0,09 \text{ mm}^3$ .

Tabela 6: Valores obtidos por perfilometria 3D – Substrato.

Série de Ensaio	Revoluções Completadas	Volume Total Desgastado (mm <sup>3</sup> )	Coefficiente de Desgaste (m <sup>3</sup> /N.m)
1	1650	0,095	$1,5 \times 10^{-12}$
2	1650	0,086	$1,3 \times 10^{-12}$
3	1650	0,089	$1,4 \times 10^{-12}$
Média		0,09	$1,9 \times 10^{-12}$
Desvio		0,01	$6,9 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

### 5.1.2 Sistema Carbonetado a Plasma

A Tabela 7 mostra os valores obtidos por microscopia óptica para os diâmetros das crateras de desgaste nos ensaios de microabrasão sobre o aço inoxidável AISI 316 carbonetado a plasma.

Tabela 7: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema carbonetado.

Número de Revoluções	Distância Deslizada <i>S</i> (m)	Diâmetro da Cratera Série 1 (μm)	Diâmetro da Cratera Série 2 (μm)	Diâmetro da Cratera Série 3 (μm)
150	11,8	1366	1346	1299
300	23,6	1588	1557	1492
450	35,3	1731	1674	1645
600	47,1	1827	1761	1725
750	58,9	1921	1854	1820
900	70,7	1986	1934	1906
1050	82,5	2074	1995	1959
1200	94,3	2126	2057	2028
1350	106,0	2167	2119	2085
1500	117,8	2237	2156	2141
1650	129,6	2275	2221	2187

Fonte: o autor.

Na Tabela 8 são apresentados os valores médios do coeficiente de desgaste e do volume desgastado total calculados conforme as Equações 3.4 e 3.5, respectivamente, bem como os desvios padrões relativos a cada valor.



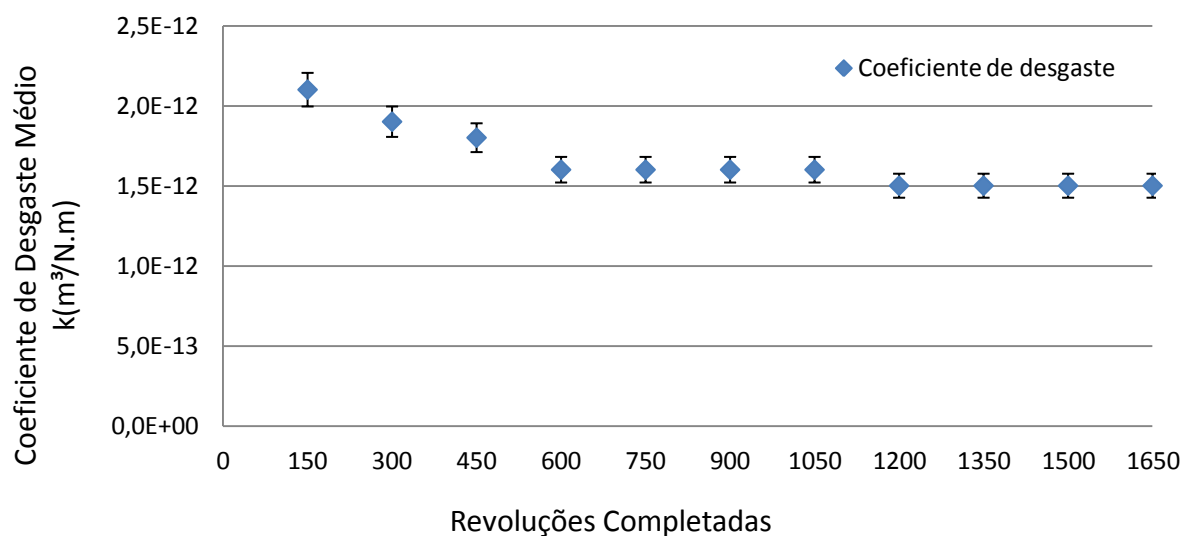
Tabela 8: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Carbonetado.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada $S(m)$	Média do Volume Desgastado Total ( $mm^3$ )	Desvio Padrão do Volume Desgastado Total ( $mm^3$ )	Média do Coeficiente de Desgaste ( $m^3/N.m$ )	Desvio Padrão do Coeficiente de Desgaste ( $m^3/N.m$ )
150	11,8	$1,3 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$2,1 \times 10^{-12}$	$2,2 \times 10^{-13}$
300	23,6	$2,3 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-12}$	$2,4 \times 10^{-13}$
450	35,3	$3,2 \times 10^{-2}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-13}$
600	47,1	$3,9 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-13}$
750	58,9	$4,8 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$1,8 \times 10^{-13}$
900	70,7	$5,6 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$1,3 \times 10^{-13}$
1050	82,5	$6,4 \times 10^{-2}$	$7,6 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$1,9 \times 10^{-13}$
1200	94,3	$7,2 \times 10^{-2}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-13}$
1350	106,0	$8,0 \times 10^{-2}$	$6,3 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-13}$
1500	117,8	$8,9 \times 10^{-2}$	$8,6 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-13}$
1650	129,6	$9,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-13}$

Fonte: o autor.

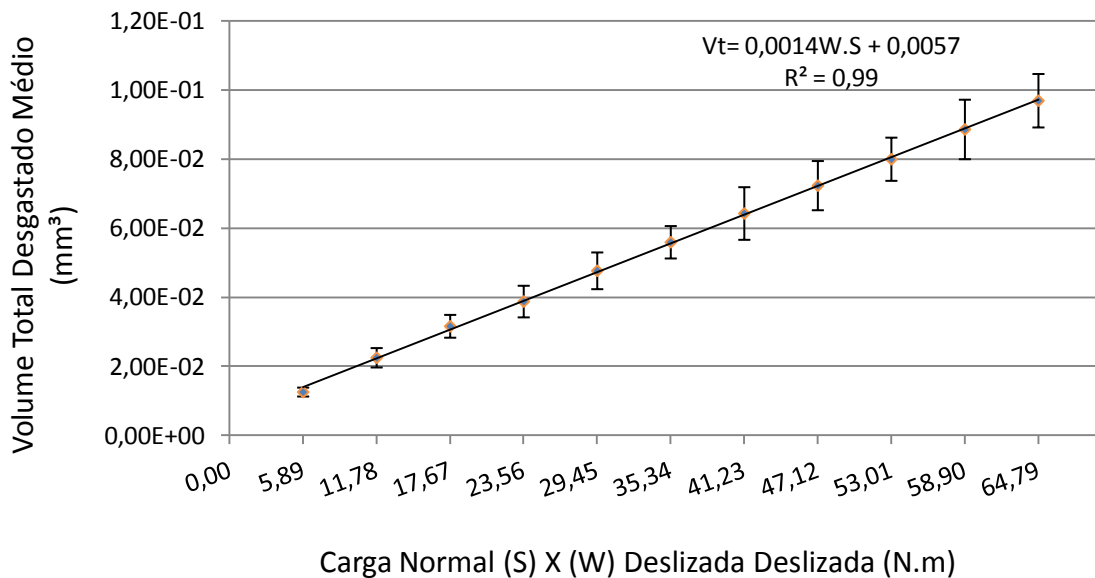
As Figuras 15 e 16 ilustram respectivamente a evolução do coeficiente de desgaste médio em relação ao número de revoluções completadas pela esfera e a variação do volume total desgastado médio com o produto da carga normal pela distância deslizada.

Figura 15: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Sistema Carbonetado.



Fonte: o autor.

Figura 16: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Sistema Carbonetado.

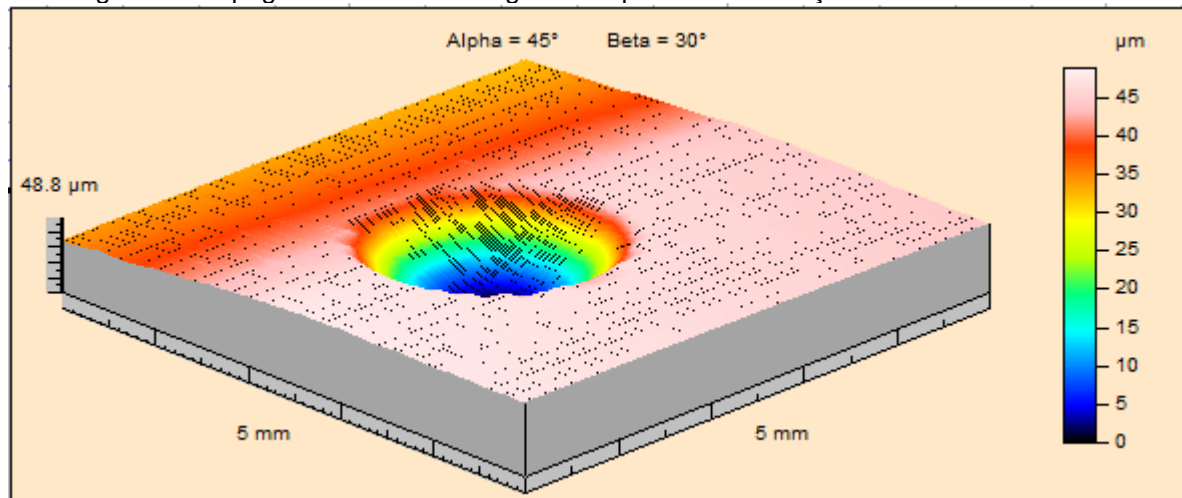


Fonte: o autor.

A análise dos resultados indica que as condições experimentais adotadas permitiram alcançar um regime permanente de ensaio, com a estabilização do coeficiente de desgaste nos últimos intervalos de rotação da esfera, conforme pode ser observado na Figura 15. O coeficiente de variação do coeficiente de desgaste dos quatro últimos pontos de experimentais resultou em  $Cv = 1,15\%$ . A Figura 16 mostra que houve uma variação linear do volume total desgastado em relação ao produto da carga normal pela distância deslizada. Este resultado reforça a validade da utilização da Equação de Archard ( $V = k.SW$ ) para o cálculo do coeficiente de desgaste. Após 1650 revoluções, o volume total desgastado calculado com base nos diâmetros das crateras resultou em  $Vt = 0,1\text{mm}^3$ . O coeficiente de desgaste adotado como uma média dos valores referentes aos quatro últimos pontos experimentais resultou em  $k = 1,5 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Nm}$ .

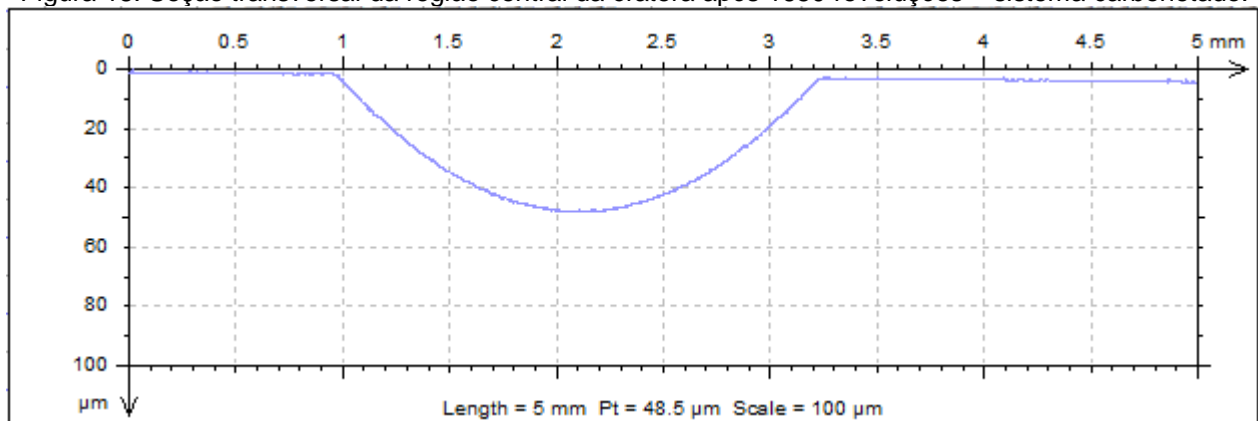
Nas Figuras 17 e 18 são apresentados resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para uma calota desgastada após 1650 revoluções. Na Tabela 9 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria 3D de contato para os volumes totais das crateras desgastadas referentes às três séries de ensaios após 1650 revoluções, e os respectivos coeficientes de desgaste calculados conforme a Equação 3.4.

Figura 17: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema carbonetado.



Fonte: o autor.

Figura 18: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema carbonetado.



Fonte: o autor.

Tabela 9: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Carbonetado.

Série de Ensaio	Revoluções Completadas	Volume Total Desgastado (mm <sup>3</sup> )	Coefficiente de Desgaste (m <sup>3</sup> /N.m)
1	1650	0,09	$1,4 \times 10^{-12}$
2	1650	0,08	$1,2 \times 10^{-12}$
3	1650	0,07	$1,1 \times 10^{-12}$
Média		0,08	$1,2 \times 10^{-12}$
Desvio		0,01	$1,3 \times 10^{-13}$

Fonte: o autor.

O valor médio do coeficiente de desgaste obtido por perfilometria 3D de contato resultou em  $k = 1,2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N.m}$ , para um volume desgastado total médio  $V_t = 0,08 \text{ mm}^3$ .

### 5.1.3 Sistema dúplex carbonetado

A Tabela 10 mostra os valores obtidos por microscopia óptica para os diâmetros internos e externos (a e b conforme Figura 4) das crateras de desgaste nos ensaios de microabrasão sobre o sistema dúplex carbonetado.

Tabela 10: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema dúplex carbonetado.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada (m)	a-Diâmetro Interno da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 1	b-Diâmetro externo da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 1	a-Diâmetro Interno da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 2	b-Diâmetro externo da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 2	a-Diâmetro Interno da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 3	b-Diâmetro externo da cratera ( $\mu\text{m}$ ) Série 3
150	11,8	-	-	280	573	261	540
300	23,6	513	709	553	737	560	715
450	35,3	732	919	740	875	-	-
600	47,1	891	1076	902	1073	915	1069
750	58,9	1070	1213	994	1136	1066	1210
900	70,7	1173	1302	1111	1243	1204	1341
1050	82,5	1297	1427	1199	1332	1308	1432
1200	94,3	1396	1516	1300	1414	1397	1514
1350	106,0	1477	1597	1391	1498	1486	1584
1500	117,8	1578	1686	1449	1550	1558	1655
1650	129,6	1665	1763	1527	1648	1639	1732

Fonte: o autor.

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios<sup>3</sup> dos volumes desgastados no substrato ( $V_s$ ), no recobrimento ( $V_c$ ) e total ( $V_t$ ) calculados conforme as equações 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente.

<sup>3</sup> Média aritmética dos valores obtidos nas três séries.

Tabela 11: Resultados dos volumes médios desgastados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Carbonetado.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada $S(m)$	Média do Volume Desgastado no substrato $V_s (mm^3)$	Média do Volume Desgastado no recobrimento $V_c (mm^3)$	Média do Volume Desgastado Total $(V_s + V_c) V_t (mm^3)$	Desvio Padrão do Volume Desgastado Total $(mm^3)$
150	11,8	$2,1 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-4}$	$3,8 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-5}$
300	23,6	$3,4 \times 10^{-4}$	$7,2 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-3}$	$8,9 \times 10^{-5}$
450	35,3	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$
600	47,1	$2,6 \times 10^{-3}$	$2,6 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-3}$	$6,7 \times 10^{-5}$
750	58,9	$4,7 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-3}$
900	70,7	$7,2 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-3}$	$1,1 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-3}$
1050	82,5	$1,0 \times 10^{-2}$	$4,8 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-3}$
1200	94,3	$1,4 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-3}$
1350	106,0	$1,8 \times 10^{-2}$	$5,8 \times 10^{-3}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-3}$
1500	117,8	$2,2 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^{-3}$	$2,8 \times 10^{-2}$	$4,7 \times 10^{-3}$
1650	129,6	$2,7 \times 10^{-2}$	$7,5 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$

Fonte: o autor.

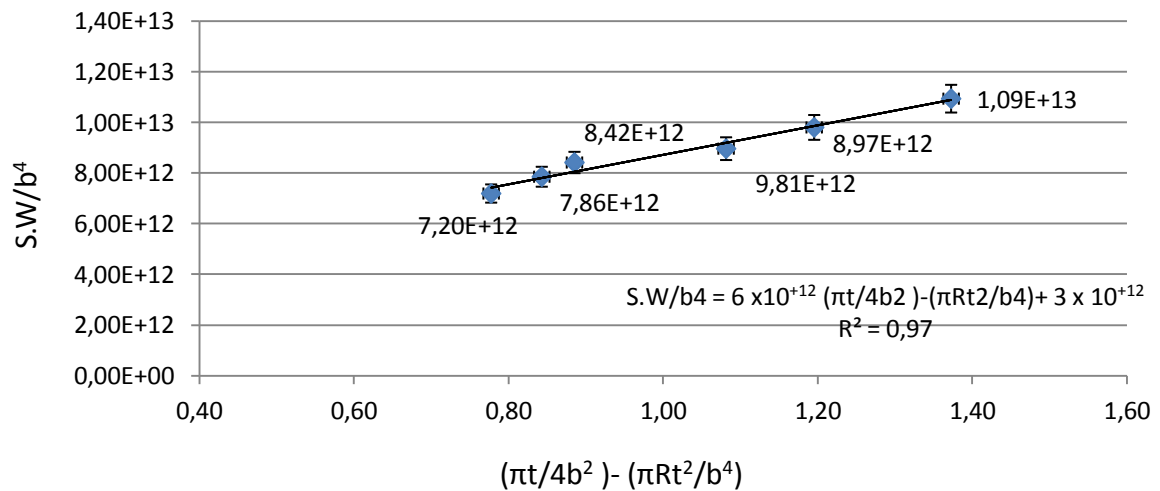
Na Tabela 12 são apresentados os valores calculados para a espessura do recobrimento (Equação 3.8) e para os coeficientes de desgaste do substrato (Equação 3.10) e do recobrimento (Equação 3.11). Os valores de intercepto e inclinação também apresentados na tabela, foram obtidos mediante a análise de regressão conforme a Equação 3.9. A análise de regressão resultante da série de ensaio 3 está ilustrada pela Figura 19.

Tabela 12: Resultados dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Carbonetado.

Série de Ensaio	Intercepto (c)	Inclinação (m)	Espessura do Recobrimento $t (\mu m)$	Coeficiente de desgaste do substrato $K_s (m^3/N.m)$	Coeficiente de desgaste do recobrimento $K_c (m^3/N.m)$
1	$1,45 \times 10^{+12}$	$9,58 \times 10^{+12}$	3,5	$2,7 \times 10^{-12}$	$1,0 \times 10^{-13}$
2	$2,57 \times 10^{+12}$	$8,81 \times 10^{+12}$	3,3	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,1 \times 10^{-13}$
3	$2,93 \times 10^{+12}$	$5,79 \times 10^{+12}$	3,2	$1,3 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-13}$
Média			3,3	$1,9 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-13}$
Desvio			0,1	$3,4 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

Figura 19: Análise de regressão, sistema dúplex carbonetado, série 3.

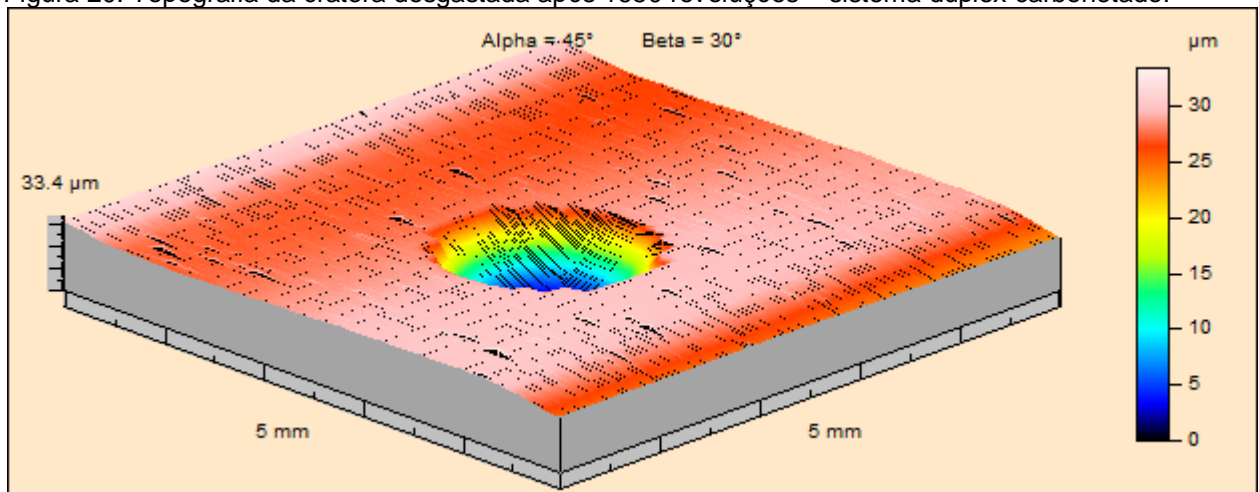


Fonte: o autor.

Os valores médios calculados para os coeficientes de desgaste resultaram em  $K_s = 1,9 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N.m}$  no substrato e  $K_c = 1,2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N.m}$  no recobrimento. A espessura do recobrimento obtida foi  $t = 3,3 \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ . Após 1650 revoluções a média do volume total desgastado resultou em  $V_t = 0,03 \text{ mm}^3$ . O coeficiente de desgaste médio do conjugado, se calculado como  $k = V_t/WS$ , resulta em  $k = 5,3 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{Nm}$ .

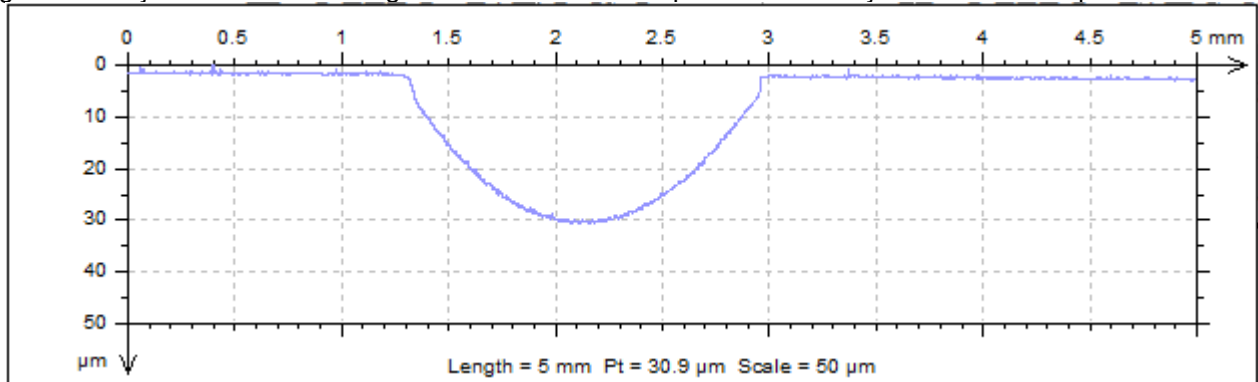
Nas Figuras 20 e 21 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para uma calota desgastada após 1650 revoluções.

Figura 20: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema dúplex carbonetado.



Fonte: o autor.

Figura 21: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema dúplex carbonetado.



Fonte: o autor.

Na Tabela 13 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para os volumes totais das crateras desgastadas referentes às três séries de ensaios após 1650 revoluções, e os respectivos coeficientes de desgaste calculados conforme a Equação 4.1.

Tabela 13: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Dúplex Carbonetado.

Série de Ensaio	Revoluções Completadas	Volume Total Desgastado (mm <sup>3</sup> )	Coeficiente de Desgaste (m <sup>3</sup> /N.m)
1	1650	0,04	$5,7 \times 10^{-13}$
2	1650	0,03	$4,5 \times 10^{-13}$
3	1650	0,03	$5,3 \times 10^{-13}$
Média		0,03	$5,2 \times 10^{-13}$
Desvio		0,004	$6,4 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

O valor do coeficiente de desgaste médio do conjugado obtido por perfilometria 3D de contato resultou em  $k = 5,2 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N.m}$ , para um volume desgastado total médio  $V_t = 0,03 \text{ mm}^3$ .

#### 5.1.4 Sistema sequencial

A Tabela 14 mostra os valores obtidos por microscopia óptica para os diâmetros das crateras de desgaste nos ensaios de microabrasão sobre o aço inoxidável AISI 316 nitretado e carbonetado.

Tabela 14: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema sequencial

Número de Revoluções	Distância Deslizada (m)	Diâmetro da Cratera Série 1 ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro da Cratera Série 2 ( $\mu\text{m}$ )	Diâmetro da Cratera Série 3 ( $\mu\text{m}$ )
150	11,8	1342	1366	1375
300	23,6	1561	1580	1588
450	35,3	1683	1701	1708
600	47,1	1803	1817	1822
750	58,9	1898	1909	1906
900	70,7	1973	1988	1987
1050	82,5	2034	2053	2049
1200	94,3	2098	2128	2117
1350	106,0	2159	2190	2171
1500	117,8	2218	2234	2229
1650	129,6	2261	2297	2275

Fonte: o autor.

Na Tabela 15 são apresentados os valores médios do coeficiente de desgaste e do volume desgastado total calculados conforme as Equações 3.4 e 3.5, respectivamente, bem como os desvios padrões relativos a cada valor.

Tabela 15: Resultados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Sequencial.

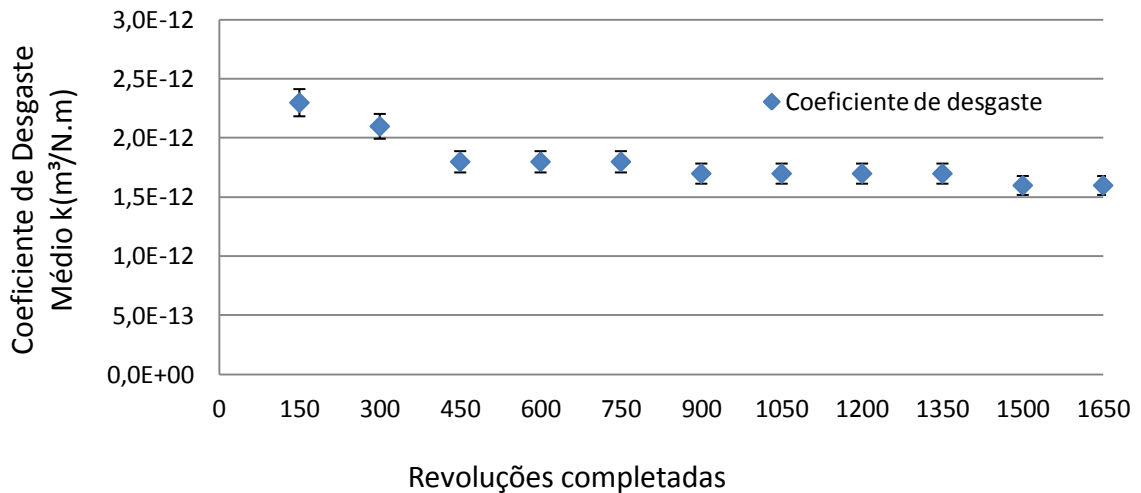
Revoluções Completadas	Distância Deslizada $S(\text{m})$	Média do Volume Desgastado Total ( $\text{mm}^3$ )	Desvio Padrão do Volume Desgastado Total ( $\text{mm}^3$ )	Média do Coeficiente de Desgaste ( $\text{m}^3/\text{N.m}$ )	Desvio Padrão do Coeficiente de Desgaste ( $\text{m}^3/\text{N.m}$ )
150	11,8	$1,4 \times 10^{-2}$	$6,8 \times 10^{-4}$	$2,3 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-13}$
300	23,6	$2,4 \times 10^{-2}$	$8,5 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-12}$	$7,2 \times 10^{-14}$
450	35,3	$3,3 \times 10^{-2}$	$9,9 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$5,6 \times 10^{-14}$
600	47,1	$4,3 \times 10^{-2}$	$9,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$3,9 \times 10^{-14}$
750	58,9	$5,2 \times 10^{-2}$	$6,2 \times 10^{-4}$	$1,8 \times 10^{-12}$	$2,1 \times 10^{-14}$
900	70,7	$6,1 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$2,9 \times 10^{-14}$
1050	82,5	$6,9 \times 10^{-2}$	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$3,2 \times 10^{-14}$
1200	94,3	$7,9 \times 10^{-2}$	$2,2 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$4,8 \times 10^{-14}$
1350	106,0	$8,8 \times 10^{-2}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-12}$	$4,8 \times 10^{-14}$
1500	117,8	$9,7 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$2,4 \times 10^{-14}$
1650	129,6	$1,1 \times 10^{-1}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$1,6 \times 10^{-12}$	$5,2 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.



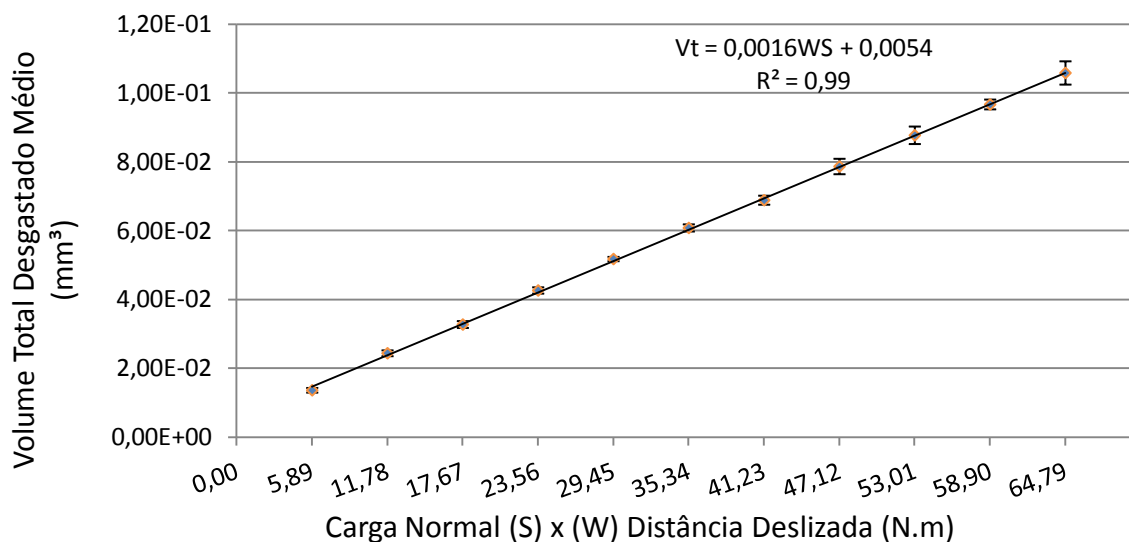
As Figuras 22 e 23 ilustram respectivamente a evolução do coeficiente de desgaste médio em relação ao número de revoluções completadas pela esfera e a variação do volume total desgastado médio com o produto da carga normal pela distância deslizada.

Figura 22: Evolução do coeficiente de desgaste médio com o número de revoluções da esfera – Sistema Sequencial.



Fonte: o autor.

Figura 23: Variação do volume desgastado total médio com o produto da carga normal pela distância deslizada – Sistema Sequencial.



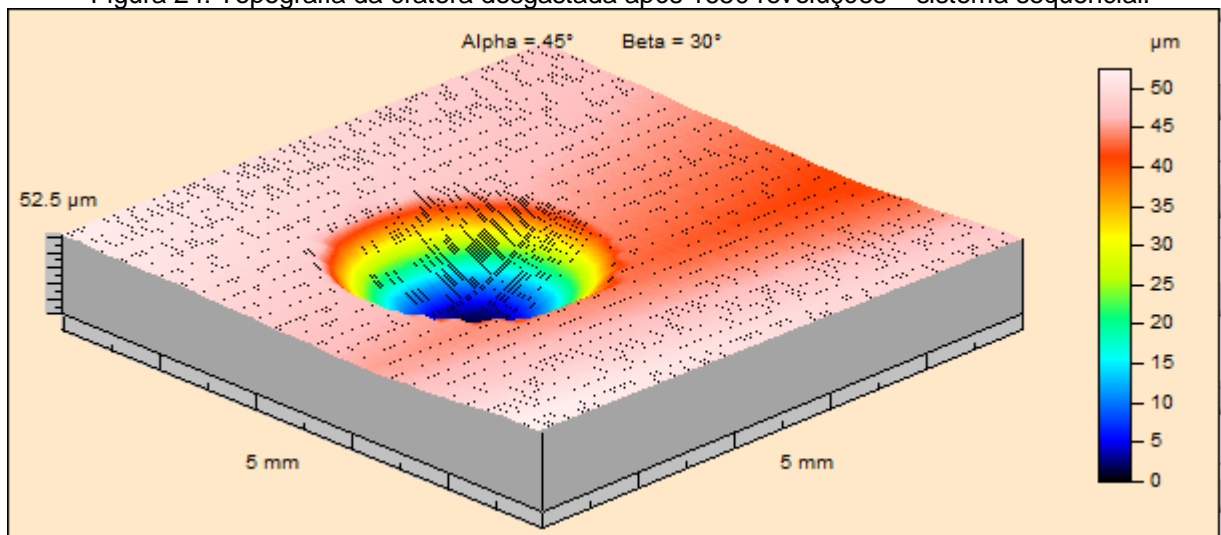
Fonte: o autor.

A análise dos resultados indica que as condições experimentais adotadas permitiram alcançar um regime permanente de ensaio, com a estabilização do coeficiente de desgaste nos últimos intervalos de rotação da esfera, conforme pode ser observado

na Figura 22. O coeficiente de variação do coeficiente de desgaste dos quatro últimos pontos experimentais resultou em  $Cv = 0,93\%$ . A Figura 23 mostra que houve uma variação linear do volume total desgastado em relação ao produto da carga normal pela distância deslizada. Este resultado reforça a validade da utilização da Equação de Archard ( $V = k \cdot SW$ ) para o cálculo do coeficiente de desgaste. Após 1650 revoluções, o volume total desgastado calculado com base nos diâmetros das crateras resultou em  $Vt = 0,11 \text{ mm}^3$ . O coeficiente de desgaste adotado como uma média dos valores referentes aos quatro últimos pontos experimentais resultou em  $k = 1,7 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{Nm}$ .

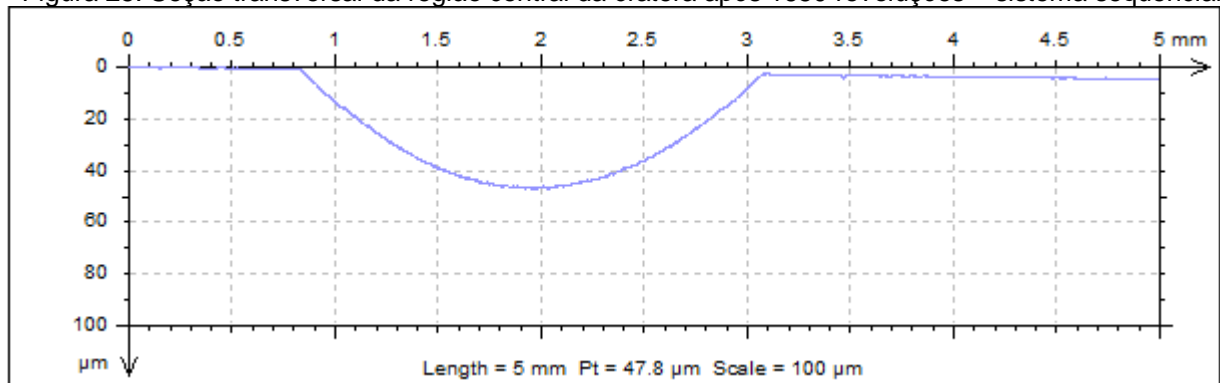
Nas Figuras 24 e 25 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria 3D de contato para uma calota desgastada após 1650 revoluções.

Figura 24: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema sequencial.



Fonte: o autor.

Figura 25: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema sequencial.



Fonte: o autor.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para os volumes totais das crateras desgastadas referentes às três séries de ensaios após 1650 revoluções, e os respectivos coeficientes de desgaste.

Tabela 16: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Sequencial.

Série de Ensaio	Revoluções Completadas	Volume Total Desgastado (mm <sup>3</sup> )	Coeficiente de Desgaste (m <sup>3</sup> /N.m)
1	1650	0,08	$1,3 \times 10^{-12}$
2	1650	0,09	$1,3 \times 10^{-12}$
3	1650	0,08	$1,3 \times 10^{-12}$
Média		0,08	$1,3 \times 10^{-12}$
Desvio		0,003	$4,8 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

O valor médio do coeficiente de desgaste obtido por perfilometria 3D de contato resultou em  $k = 1,3 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{N.m}$ , para um volume desgastado total médio  $V_t = 0,08 \text{ mm}^3$ .

### 5.1.5 Sistema dúplex sequencial

A Tabela 17 mostra os valores obtidos por microscopia óptica para os diâmetros internos e externos das crateras de desgaste nos ensaios de microabrasão sobre o sistema dúplex sequencial. Na Tabela 18 são apresentados os valores médios dos volumes desgastados no substrato ( $V_s$ ), no recobrimento ( $V_c$ ) e total ( $V_t$ ) calculados conforme as equações 3.5, 3.6 e 3.7 respectivamente.

Tabela 17: Valores medidos nos ensaios de desgaste microabrasivo sobre o sistema dúplex sequencial.

Número de Rotações	Distância Deslizada (m)	a-Diâmetro Interno da cratera (µm) Série 1	b-Diâmetro externo da cratera (µm) Série 1	a-Diâmetro Interno da cratera (µm) Série 2	b-Diâmetro externo da cratera (µm) Série 2	a-Diâmetro Interno da cratera (µm) Série 3	b-Diâmetro externo da cratera (µm) Série 3
150	11,8	426	467	265	559	147	471
300	23,6	633	662	416	639	312	594
450	35,3	774	793	574	809	551	822
600	47,1	932	1047	764	925	717	930
750	58,9	932	1097	900	1074	845	1020
900	70,7	1041	1191	1027	1177	976	1130
1050	82,5	1130	1270	1123	1257	1095	1230
1200	94,3	1258	1398	1229	1360	1224	1350
1350	106,0	1362	1481	1311	1438	1331	1443
1500	117,8	1466	1590	1407	1516	1386	1499
1650	129,6	1524	1644	1463	1576	1446	1558

Fonte: o autor.

Tabela 18: Resultados dos volumes desgastados calculados com base nos diâmetros das crateras – Sistema Dúplex Sequencial.

Revoluções Completadas	Distância Deslizada S(m)	Média do Volume Desgastado no substrato $V_s$ (mm <sup>3</sup> )	Média do Volume Desgastado no recobrimento $V_c$ (mm <sup>3</sup> )	Média do Volume Desgastado Total ( $V_s + V_c$ ) $V_t$ (mm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão do Volume Desgastado Total (mm <sup>3</sup> )
150	11,8	$5,0 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-4}$	$2,6 \times 10^{-4}$	$1,1 \times 10^{-4}$
300	23,6	$2,6 \times 10^{-4}$	$3,7 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$	$1,3 \times 10^{-4}$
450	35,3	$7,3 \times 10^{-4}$	$9,5 \times 10^{-4}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-4}$
600	47,1	$1,9 \times 10^{-3}$	$1,7 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-3}$
750	58,9	$2,5 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$7,4 \times 10^{-4}$
900	70,7	$4,2 \times 10^{-3}$	$3,1 \times 10^{-3}$	$7,3 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-4}$
1050	82,5	$6,1 \times 10^{-3}$	$3,6 \times 10^{-3}$	$9,7 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-4}$
1200	94,3	$9,2 \times 10^{-3}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-2}$	$1,1 \times 10^{-3}$
1350	106,0	$1,3 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$1,8 \times 10^{-2}$	$1,2 \times 10^{-3}$
1500	117,8	$1,6 \times 10^{-2}$	$5,9 \times 10^{-3}$	$2,2 \times 10^{-2}$	$2,8 \times 10^{-3}$
1650	129,6	$1,9 \times 10^{-2}$	$6,6 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-3}$

Fonte: o autor.

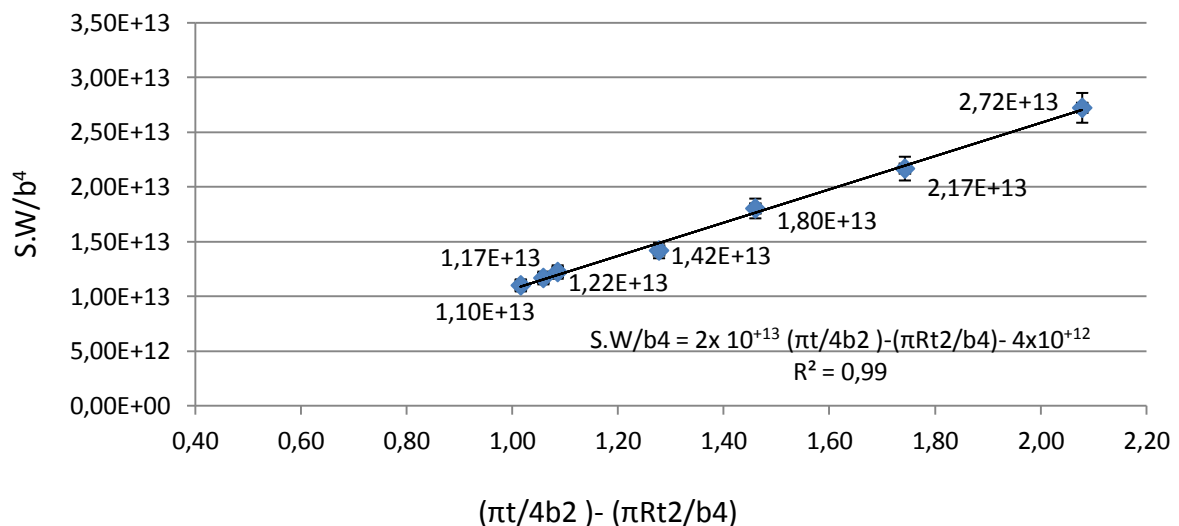
Na Tabela 19 são apresentados os valores calculados para a espessura do recobrimento e para os coeficientes de desgaste no substrato e no recobrimento. Os valores de intercepto e inclinação também apresentados na tabela, foram obtidos mediante a análise de regressão conforme a Equação 3.9. A análise de regressão resultante da série de ensaio 3 está ilustrada pela Figura 26.

Tabela 19: Resultados dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das calotas – Sistema Dúplex Sequencial.

Série de Ensaio	Intercepto (c)	Inclinação (m)	Espessura do Recobrimento $t$ ( $\mu\text{m}$ )	Coeficiente de desgaste do substrato $K_s$ ( $\text{m}^3/\text{N.m}$ )	Coeficiente de desgaste do recobrimento $K_c$ ( $\text{m}^3/\text{N.m}$ )
1	$5,07 \times 10^{+12}$	$1,36 \times 10^{+13}$	3,4	$7,7 \times 10^{-13}$	$6,7 \times 10^{-14}$
2	$6,93 \times 10^{+12}$	$1,19 \times 10^{+13}$	3,4	$5,7 \times 10^{-13}$	$7,3 \times 10^{-14}$
3	$4,47 \times 10^{+12}$	$1,52 \times 10^{+13}$	3,3	$8,8 \times 10^{-13}$	$6,1 \times 10^{-14}$
Média			3,3	$7,4 \times 10^{-13}$	$6,7 \times 10^{-14}$
Desvio			0,06	$1,6 \times 10^{-13}$	$5,9 \times 10^{-15}$

Fonte: o autor.

Figura 26: Análise de regressão, sistema dúplex sequencial, série 3.



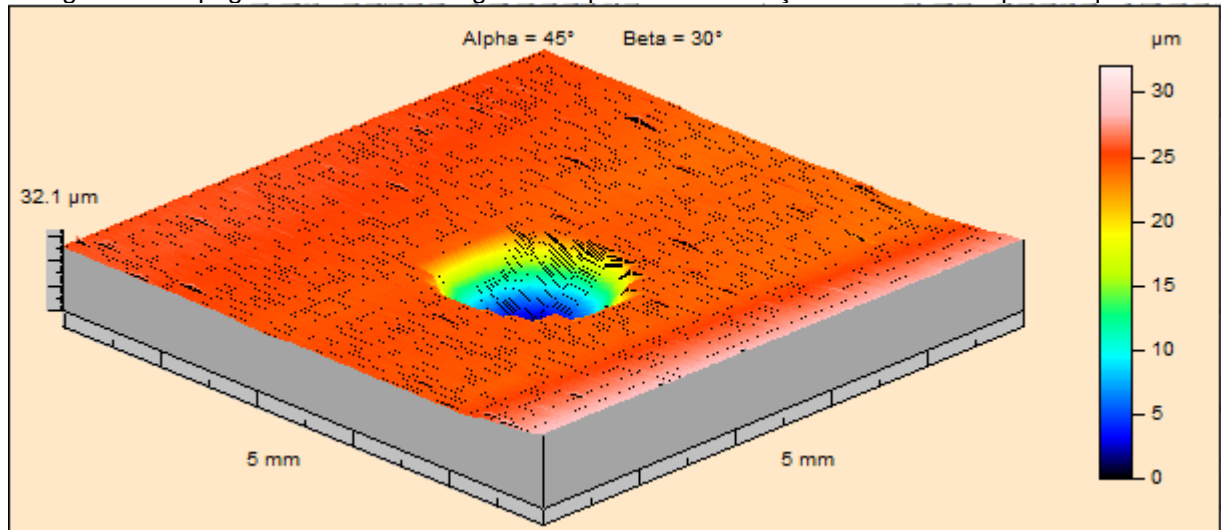
Fonte: o autor.

Os valores médios calculados para os coeficientes de desgaste resultaram em  $K_s = 7,4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N.m}$  no substrato e  $K_c = 6,1 \times 10^{-14} \text{ m}^3/\text{N.m}$  no recobrimento. Foi obtida uma espessura do recobrimento de  $t = 3,3 \pm 0,06 \mu\text{m}$ . Após 1650 revoluções a média do volume total desgastado resultou em  $Vt = 0,03 \text{ mm}^3$ . O coeficiente de

desgaste do conjugado, se calculado como  $k = Vt/WS$ , resulta em  $k = 3,9 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N.m}$ .

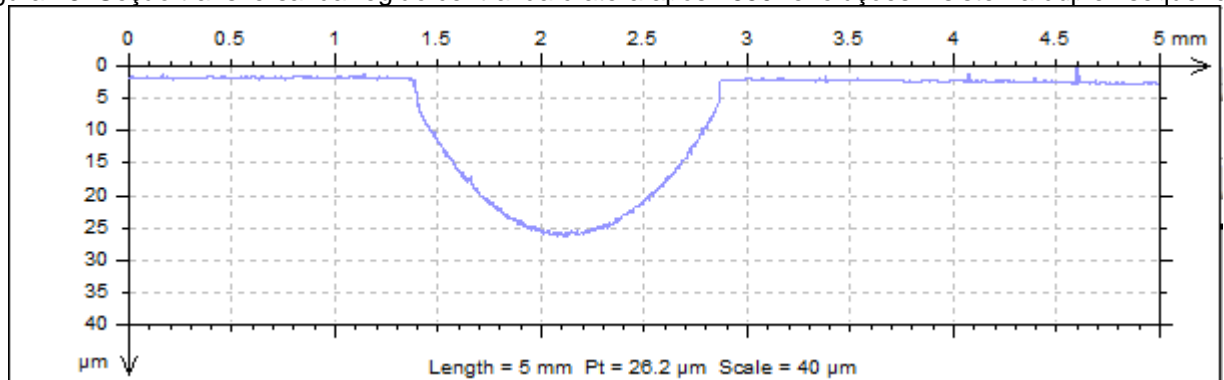
Nas Figuras 27 e 28 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria 3D de contato para uma calota desgastada após 1650 revoluções.

Figura 27: Topografia da cratera desgastada após 1650 revoluções – sistema dúplex sequencial.



Fonte: o autor.

Figura 28: Seção transversal da região central da cratera após 1650 revoluções – sistema dúplex sequencial.



Fonte: o autor.

Na Tabela 20 são apresentados os resultados obtidos por perfilometria tridimensional de contato para os volumes totais das crateras desgastadas referentes às três séries de ensaios após 1650 revoluções, e os respectivos coeficientes de desgaste calculados conforme a Equação 3.4. O valor médio do coeficiente de desgaste obtido por perfilometria 3D de contato resultou em  $k = 3,9 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{N.m}$ , para um volume desgastado total médio  $Vt = 0,03 \text{ mm}^3$ .

Tabela 20: Valores obtidos por perfilometria 3D – Sistema Dúplex Sequencial.

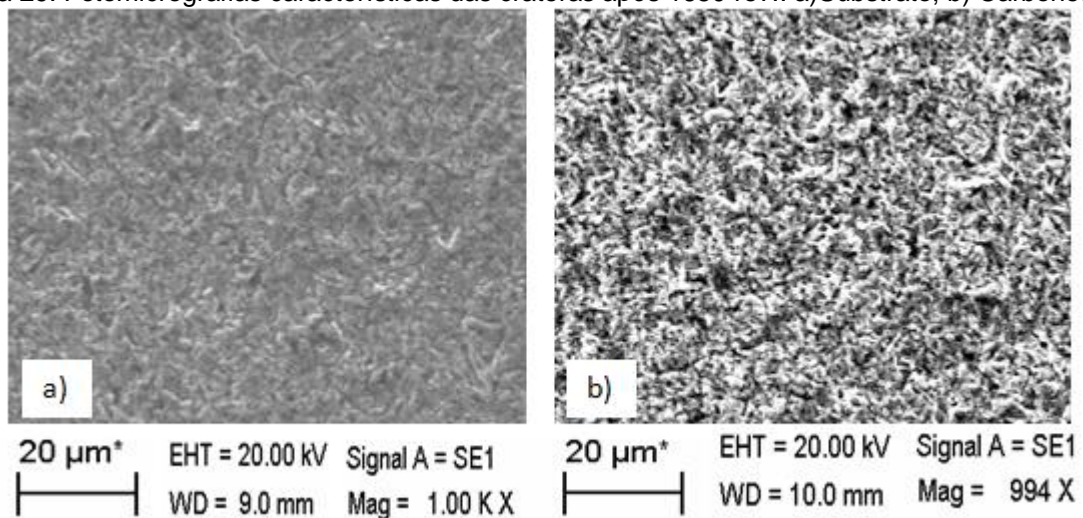
Série de Ensaio	Revoluções Completadas	Volume Total Desgastado (mm³)	Coefficiente de Desgaste (m³/N.m)
1	1650	0,03	$4,3 \times 10^{-13}$
2	1650	0,02	$3,7 \times 10^{-13}$
3	1650	0,02	$3,6 \times 10^{-13}$
Média		0,03	$3,7 \times 10^{-13}$
Desvio		0,003	$4,2 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

## 5.2 AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS DE DESGASTE POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

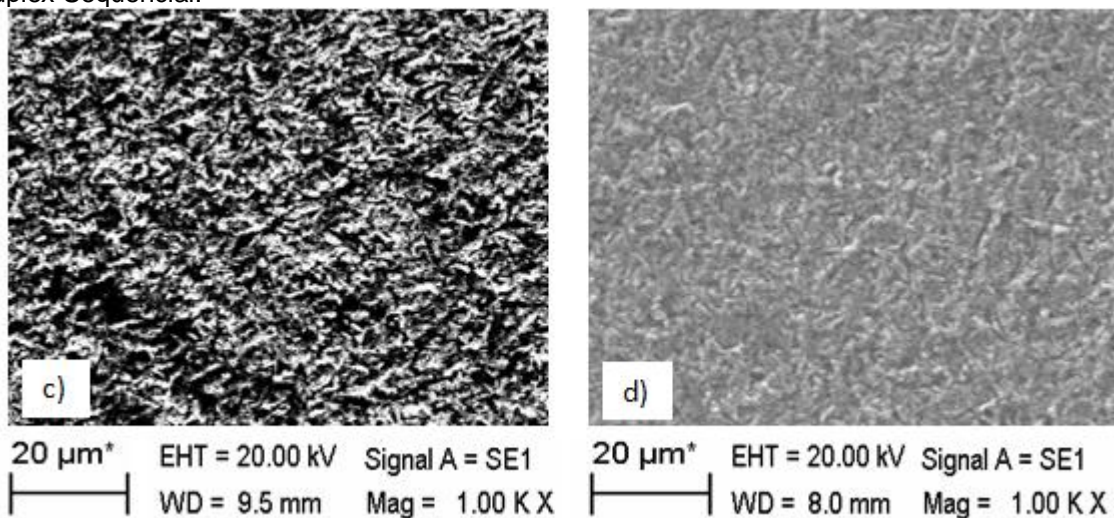
Os mecanismos de desgaste das amostras foram investigados por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As Figuras 29 e 30 mostram fotomicrografias características das crateras desgastadas para os sistemas carbonetado, dúplex carbonetado, dúplex sequencial e substrato.

Figura 29: Fotomicrografias características das crateras após 1650 rev.: a) Substrato; b) Carbonetado.



Fonte: o autor (MEV no modo imagem de elétrons secundários)

Figura 30: Fotomicrografias características das crateras após 1650 rev.: c) Dúplex Carbonetado; d) Dúplex Sequencial.



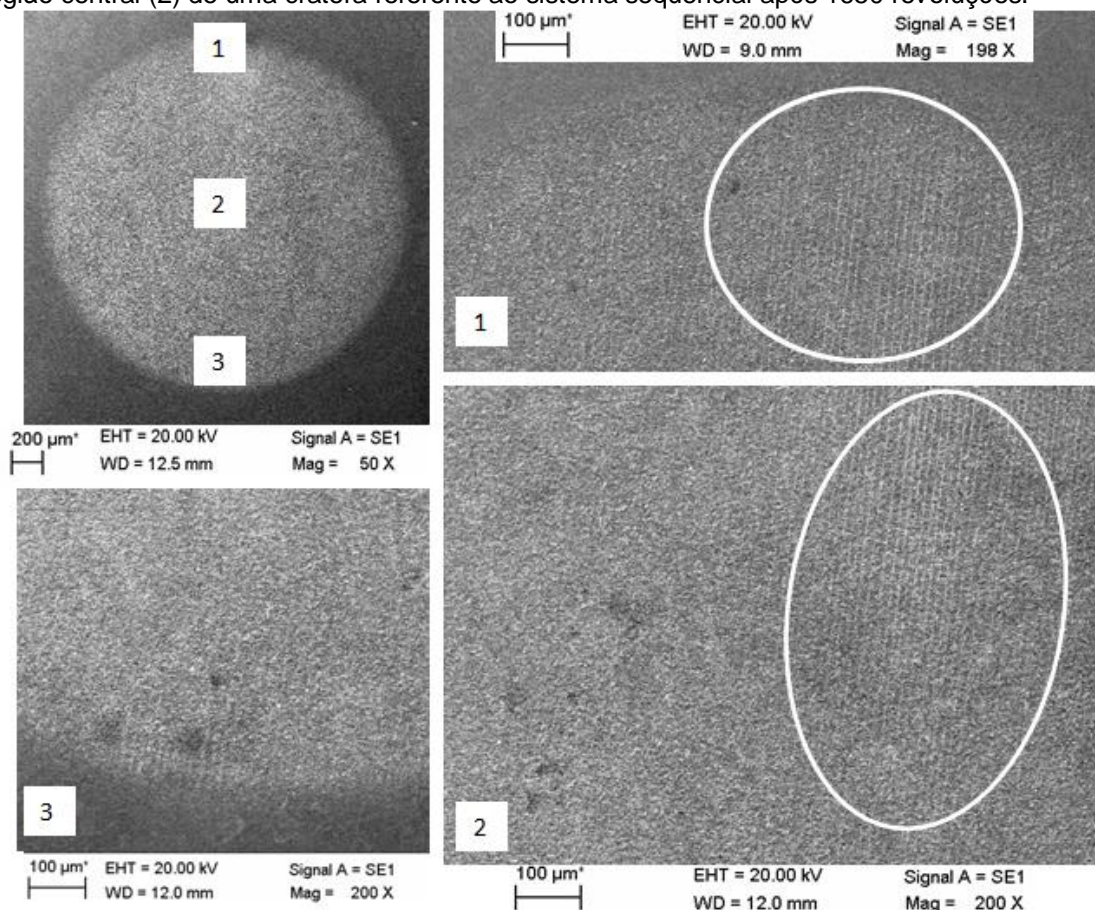
Fonte: o autor (MEV no modo imagem de elétrons secundários).



Para os sistemas apresentados pelas Figuras 29 e 30, a análise das fotomicrografias indica que o mecanismo de desgaste predominante foi o de indentação (*rolling abrasion*). Este mecanismo resulta do rolamento das partículas abrasivas na região de contato (sem aderir ao contra-corpo esférico) produzindo uma região altamente deformada por múltiplas indentações, sem direção preferencial evidente.

A Figura 31 apresenta fotomicrografias referentes ao sistema sequencial, com detalhes das regiões do centro da cratera e das regiões de entrada e saída da lama abrasiva durante o movimento giratório da esfera.

Figura 31: Fotomicrografia com detalhes das regiões de saída (1) e entrada (3) da lama abrasiva e a da região central (2) de uma cratera referente ao sistema sequencial após 1650 revoluções.

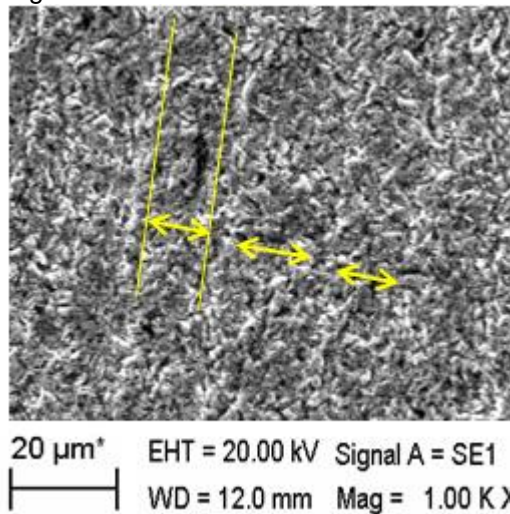


Fonte: o autor (MEV no modo imagem de elétrons secundários).

Na Figura 31 as trilhas de desgaste características do mecanismo de riscamento são visíveis nas áreas circuladas. Nas regiões a esquerda dos círculos, estas trilhas cedem lugar a uma região multiplamente indentada.

A Figura 32 apresenta uma fotomicrografia do centro da cratera referente ao sistema sequencial (região 2 da Figura 31) sob maior ampliação. Nesta Figura é possível observar a presença simultânea de áreas com múltiplas indentações e trilhas características do mecanismo de riscamento. As setas amarelas delimitam as regiões dos sulcos formados. Estas observações indicam que para o sistema sequencial houve a ocorrência do mecanismo de desgaste misto. A Figura 7c (seção 3.2.2) ilustra uma situação semelhante.

Figura 32: Fotomicrografia do centro da cratera referente ao sistema sequencial.

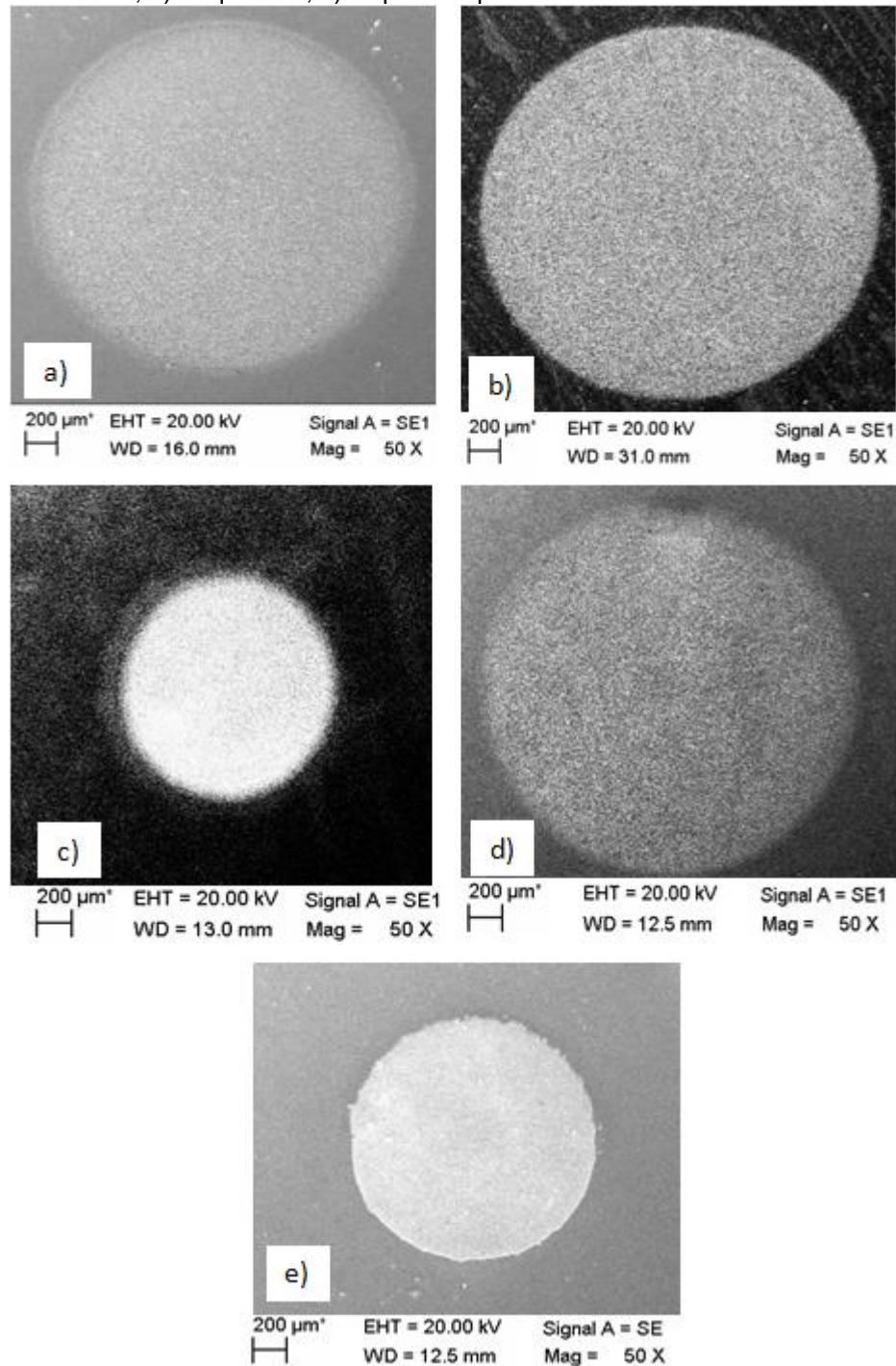


Fonte: o autor (MEV no modo imagem de elétrons secundários).

O mecanismo de riscamento geralmente se manifesta em situações de altas cargas e baixas concentrações de abrasivo, conforme anteriormente definido na seção 3.2.2. Considerando-se que os parâmetros de ensaio utilizados para todos os sistemas foram os mesmos, é possível que esta diferenciação entre os mecanismos de desgaste apresentados pelo sistema sequencial e os demais sistemas seja consequência de pequenas variações apresentadas pelo sistema bombeamento da lama abrasiva durante dos ensaios. No decorrer dos ensaios, a lama abrasiva era mantida sobre constante agitação dentro de um recipiente, para que a concentração da solução fosse mantida homogênea. Em alguns momentos, no entanto, o sistema de agitação era interrompido, possibilitando um decréscimo na concentração do líquido contido na região superior do recipiente devido à decantação do abrasivo no fundo do frasco.

A Figura 33 mostra fotomicrografias com menor ampliação, para uma visão mais geral das crateras após 1650 revoluções.

Figura 33: Fotomicrografias das crateras após 1650 revoluções: a) Substrato; b) Carbonetado; c) Dúplex Carbonetado; d) Sequencial; e) Dúplex Sequencial.



Fonte: o autor (MEV modo imagem de elétrons secundários).

### 5.3 DISCUSSÃO COMPARATIVA DOS RESULTADOS DE DESGASTE

#### 5.3.1 Comparação dos Volumes Desgastados dos Sistemas

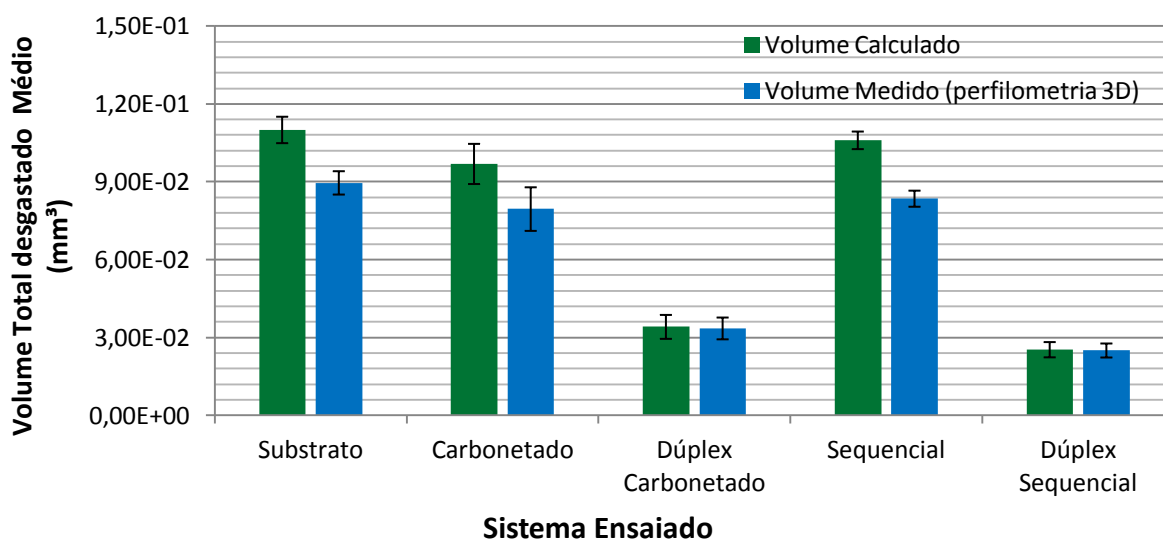
A Tabela 21 resume os resultados de volume total desgastado médio obtido para todos os sistemas estudados. São apresentados tanto os valores calculados com base no diâmetro das crateras como os medidos por perfilometria 3D de contato. A Figura 34 apresenta graficamente uma comparação entre estes resultados.

Tabela 21: Resultados de volume total desgastado calculado e medido para todos os sistemas estudados.

Sistema Estudado	Valores Calculados (diâmetro das crateras)		Valores Medidos (perfilometria 3D)		Diferença (%) $\left(\frac{V_{tm} - V_{tc}}{V_{tm}}\right) \times 100$
	Média do Volume Total Desgastado $V_{tc}$ (mm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão do $V_{tc}$ (mm <sup>3</sup> )	Média do Volume Total Desgastado $V_{tm}$ (mm <sup>3</sup> )	Desvio Padrão do $V_{tm}$ (mm <sup>3</sup> )	
Substrato	$11,0 \times 10^{-2}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$9,0 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-3}$	18,6
Carbonetado	$9,7 \times 10^{-2}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$8,0 \times 10^{-2}$	$8,4 \times 10^{-3}$	18,0
Dúplex Carbonetado	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,6 \times 10^{-3}$	$3,4 \times 10^{-2}$	$4,2 \times 10^{-3}$	1,8
Sequencial	$10,6 \times 10^{-2}$	$3,4 \times 10^{-3}$	$8,4 \times 10^{-2}$	$3,1 \times 10^{-3}$	21,0
Dúplex Sequencial	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,9 \times 10^{-3}$	$2,5 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-3}$	1,2

Fonte: o autor.

Figura 34: Comparação entre os volumes desgastados obtidos por perfilometria 3D e os calculados a partir dos diâmetros das crateras.

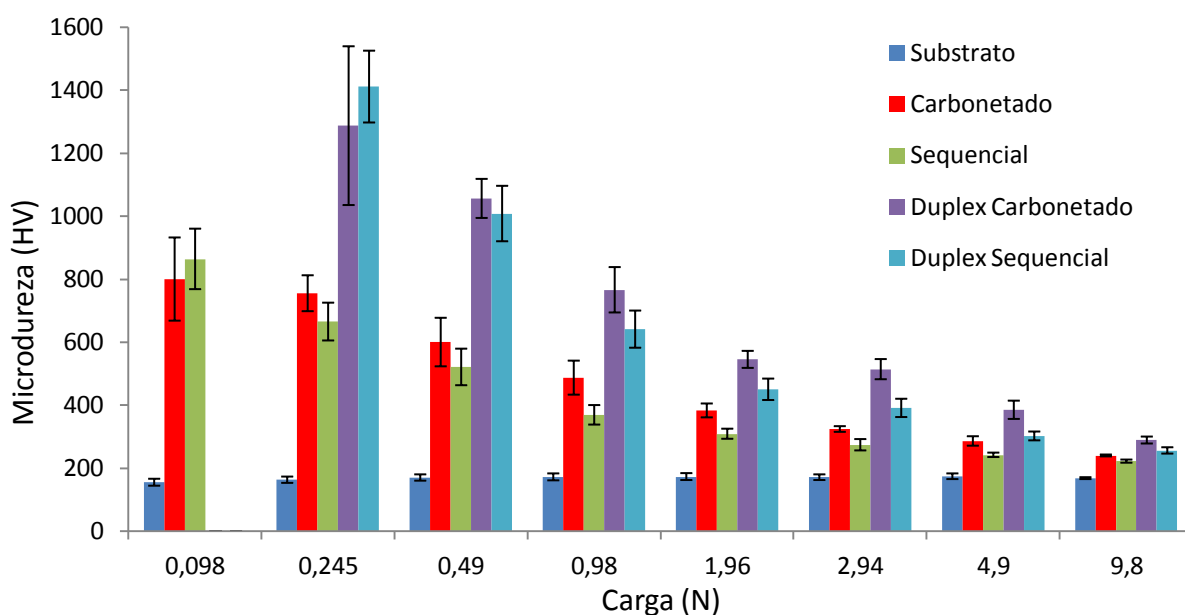


Fonte: o autor.

A análise dos resultados apresentados pela Tabela 21 e pela Figura 34 indica um comportamento muito superior dos sistemas dúplex em relação aos outros sistemas. O sistema dúplex sequencial apresentou melhor desempenho que o dúplex carbonetado. A comparação entre os sistemas apenas tratados por difusão a plasma indica um comportamento melhor do sistema carbonetado em relação ao sequencial. Os quatro sistemas modificados apresentaram melhor desempenho que o substrato de aço Inox AISI 316.

A Figura 35 apresenta novamente os resultados obtidos para microdureza Vickers da superfície das amostras com o intuito de que estes resultados sejam comparados com os obtidos para volume total desgastado médio.

Figura 35: Microdureza Vickers superficial das amostras.



Fonte: o autor.

Como mostra a Figura 34, tanto na comparação entre os valores calculados como entre os medidos por perfilometria 3D, o sistema carbonetado apresentou menores volumes desgastados que o sistema seqüencial. Este comportamento mantém boa correlação com o apresentado pela Figura 35, na qual observa-se que em geral o sistema carbonetado apresentou maiores valores de dureza superficial que o sistema sequencial, exceto para a carga de 0,98 N. Em relação aos sistemas recobertos, a Figura 34 mostra que os volumes desgastados médios apresentados pelo sistema dúplex sequencial foram menores que os desgastados no sistema dúplex carbonetado. Já a Figura 35 mostra que o sistema dúplex carbonetado



apresentou maiores valores de dureza superficial que o sistemas dúplex sequencial, exceto para a carga de 0,245 N.

Os resultados da Tabela 21 e da Figura 34 também mostram que os valores de volume desgastado medido por perfilometria 3D são geralmente menores que aqueles calculados com base nos diâmetros das crateras. Esta diferença entre os dois métodos já havia sido reportada anteriormente por Trezona e outros (1999) quando estudavam materiais duros, conforme comentado anteriormente na seção 3.2.2 (Figura 8).

A superfície que delimita o interior da cratera desgastada não é perfeitamente esférica, sendo afetada pelos mecanismos de desgaste atuantes e pela rugosidade resultante. O volume desgastado medido por perfilometria 3D inclui este fator, pois é medido de maneira direta e não baseada no calculo indireto. Estes mesmos efeitos não são levados em consideração pelo modelo geométrico para o cálculo do volume desgastado. Outro fator a ser considerado é que o método de cálculo do volume baseado nos diâmetros das crateras está sujeito a erros diversos provenientes da definição imperfeita das crateras, da interferência do operador, do ajuste do equipamento de iluminação e da calibração do software de análise das imagens. Embora a perfilometria 3D tenha suas próprias fontes de erros inerentes a qualquer técnica, ela pode em princípio fornecer resultados mais precisos.

Conforme pode ser observado na Figura 34, a diferença entre os volumes obtidos pelos dois métodos diminui quando considerados os sistemas dúplex. Ou seja, esta diferença diminui para menores volumes desgastados. O comportamento é diferente quando considerados os materiais menos duros, como o substrato, onde a diferença entre os valores se torna mais significativa.

Baseado nestas considerações, pode-se afirmar que a técnica de perfilometria 3D deve ser preferida para medição do volume desgastado, especialmente em materiais menos duros. Quando utilizado o cálculo indireto do volume desgastado com base nos diâmetros das crateras, deve ser lembrada a influência da topografia interna da cratera e outras variáveis que envolvem esta técnica e afetam a precisão da medição. Entretanto, a perfilometria 3D de contato não consegue avaliar quanto do volume desgastado ocorreu no recobrimento e quanto no substrato; apenas o

volume total ( $V_t$ ) pode ser medido. Ela permite calcular apenas a taxa de desgaste do conjugado, ou o “coeficiente de desgaste do conjugado” referido ao volume total desgastado. A perfilometria 3D não permite nos sistemas recobertos a avaliação independente dos coeficientes de desgaste do recobrimento ( $K_c$ ) e do substrato ( $K_s$ ).

### 5.3.2 Comparação dos Coeficientes de desgaste dos Sistemas

As Tabelas 22 e 23 sintetizam os resultados obtidos para coeficientes de desgaste relativos aos sistemas não recobertos e recobertos, respectivamente.

Tabela 22: Resultados de coeficiente de desgaste para os sistemas não recobertos.

		Valores obtidos com base nos diâmetros das calotas		Valores obtidos por perfilometria 3D	
Sistema Estudado		Coeficiente de Desgaste ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )	Desvio ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )	Coeficiente de Desgaste ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )	Desvio ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )
Substrato	Média	$1,8 \times 10^{-12}$	$3,1 \times 10^{-14}$	$1,4 \times 10^{-12}$	$6,9 \times 10^{-14}$
Carbonetado	Média	$1,5 \times 10^{-12}$	$1,7 \times 10^{-14}$	$1,2 \times 10^{-12}$	$5,3 \times 10^{-14}$
Sequencial	Média	$1,7 \times 10^{-12}$	$1,5 \times 10^{-14}$	$1,3 \times 10^{-12}$	$4,6 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

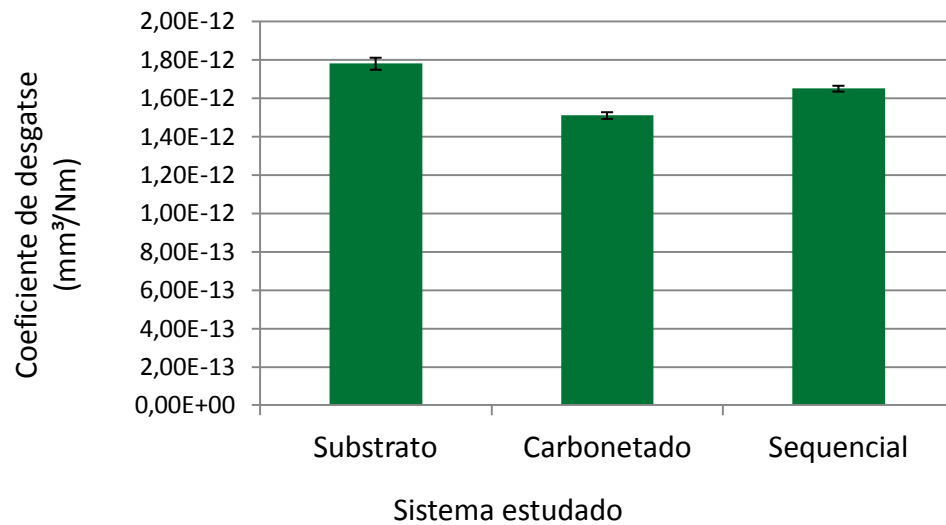
Tabela 23: Resultados de coeficiente de desgaste para os sistemas recobertos.

		Valores obtidos com base nos diâmetros das Calotas		Valores obtidos por perfilometria 3D
Sistema Estudado		$K_s$ (substrato) $\text{m}^3/\text{N.m}$	$K_c$ (recobrimento) $\text{m}^3/\text{N.m}$	Coeficiente de Desgaste do conjugado ( $\text{m}^3/\text{Nm}$ )
Duplex	Média	$1,9 \times 10^{-12}$	$1,2 \times 10^{-13}$	$5,2 \times 10^{-13}$
Carbonetado	Desvio	$3,4 \times 10^{-13}$	$2,9 \times 10^{-14}$	$6,4 \times 10^{-14}$
Duplex	Média	$7,4 \times 10^{-13}$	$6,7 \times 10^{-14}$	$3,9 \times 10^{-13}$
Sequencial	Desvio	$1,6 \times 10^{-13}$	$5,9 \times 10^{-15}$	$4,2 \times 10^{-14}$

Fonte: o autor.

A Figura 36 apresenta uma comparação entre os coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das calotas para os sistemas não recobertos.

Figura 36: Comparação dos coeficientes de desgaste calculados com base nos diâmetros das crateras para os sistemas não recobertos.

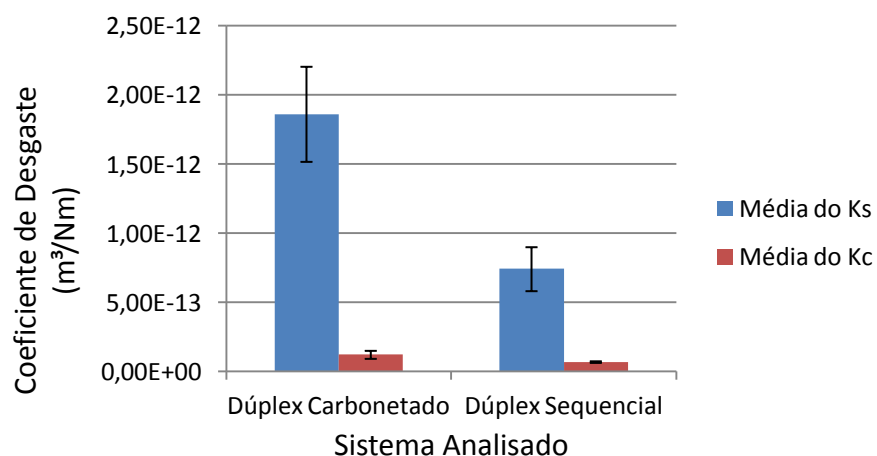


Fonte: o autor.

A análise da figura indica um comportamento melhor do sistema carbonetado em relação ao sistema sequencial. Ambos os sistemas modificados apresentaram melhor comportamento que o substrato de aço AISI 316.

A Figura 37 apresenta uma comparação entre os coeficientes de desgaste do substrato e do recobrimento obtidos para os sistemas recobertos e apresentados pela Tabela 23.

Figura 37: Comparação entre  $K_s$  e  $K_c$  para os sistemas recobertos.



Fonte: o autor.

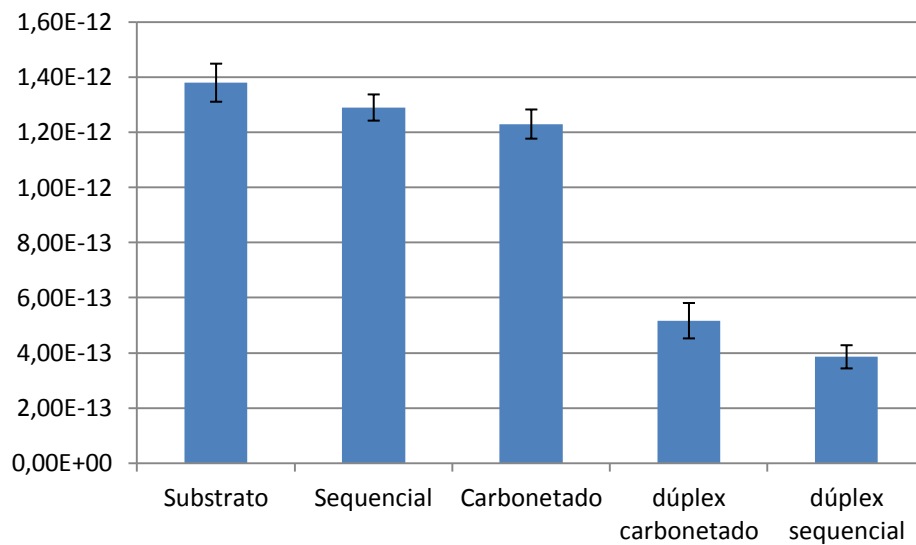
Conforme pode ser observado, os coeficientes de desgaste dos substratos foram muito superiores aos apresentados pelos recobrimentos em ambos os sistemas



recobertos. Uma comparação entre os valores de  $K_s$  e  $K_c$  apresentados pelos dois sistemas, mostra um desempenho melhor (menores valores) do sistema dúplex sequencial em relação ao dúplex carbonetado.

A Figura 38 compara os resultados obtidos para os sistemas em estudo, em termos dos coeficientes de desgaste obtidos por perfilometria 3D.

Figura 38: Comparação dos coeficientes de desgaste obtidos por perfilometria 3D dos sistemas em estudo.



Fonte: o autor.

## 6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados, as seguintes conclusões podem ser feitas:

- 1) Em uma escala de 1 a 5, onde 1 representa o melhor e 5 o pior desempenho em desgaste, os sistemas estudados foram classificados da seguinte maneira:
  1. Sistema dúplex sequencial
  2. Sistema dúplex carbonetado
  3. Sistema carbonetado
  4. Sistema sequencial
  5. Substrato de aço AISI 316
- 2) Quando comparados, os resultados dos volumes desgastados calculados com base nos diâmetros das calotas se mostraram geralmente maiores que aqueles obtidos por medições diretas através de perfilometria tridimensional de contato. Comparações entre diversas variáveis envolvendo os dois métodos indicaram que a técnica de perfilometria é mais precisa para avaliação dos volumes desgastados nos ensaios, sobretudo quando estão sendo estudados materiais de menor dureza. Contudo, quando se trata de sistemas recobertos, a perfilometria de contato não é capaz de analisar quanto do material foi desgastado no recobrimento e quanto foi desgastado no substrato.
- 3) A análise dos micromecanismos de desgaste indicou que a indentação foi o mecanismo predominante em todos os sistemas estudados, exceto no sistema sequencial, no qual foi observado o mecanismo misto.
- 4) A diferença entre os mecanismos de desgaste atuantes no sistema sequencial e nos demais sistemas, ressalta o quão importante é o controle rigoroso das condições do ensaio microabrasivo durante a sua realização. Variações pequenas nos parâmetros adotados podem resultar em alterações significativas dos resultados.

- 5) Para os sistemas recobertos, o coeficiente de desgaste do substrato ( $K_s$ ) foi superior ao apresentado pelo recobrimento ( $K_c$ ) tanto para o sistema dúplex carbonetado quanto para o dúplex sequencial. A comparação entre os valores apresentados pelos dois sistemas indicou um desempenho melhor do sistema dúplex sequencial.

## **7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

- 1) Realizar sobre os sistemas em estudo ensaios de microabrasão com a utilização de outros parâmetros: materiais abrasivos diferentes (menos severos), diferentes cargas normais e distâncias totais deslizadas.
- 2) Refazer os ensaios sobre o sistema sequencial para verificar a hipótese adotada como justificativa para as diferenças observadas entre os mecanismos de desgaste apresentados por este sistema e os demais.
- 3) Realizar novos ensaios de microabrasão sobre os sistemas em estudo utilizando parâmetros de ensaio que favoreçam a manifestação do micromecanismo de desgaste de riscamento (menores concentrações de abrasivo e maiores cargas normais).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADACHI, K.; HUTCHINGS, I.M. **Wear-mode mapping for the micro-scale abrasion test.** *Wear.* v.255, p.23-29, 2003.
- ALVES JUNIOR, C. **Fundamentos da nitretação a Plasma.** [S.l.]: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, [20--?].
- AMIRI, S.; MORADSHAHI, M. **Influence of different layer microstructures induced by different gás compositions on corrosion behavior of plasma nitrided stainless steel.** *Surface and Coatings Technology.* v.201, p.7375-7381, 2007.
- BELL, T.; DONG, H.; SUN, Y. **Realising the potential of duplex surface engineering aspects.** *Tribology International.* v.31, p.127-137, 1998.
- BLAWERT, C. et al. **Characterisation of duplex layer structures produced by simultaneous implantation of nitrogen and carbon into austenitic stainless steel X5CrNi189.** *Surface and Coatings Technology.* v.128-129, p.219-225, 2000.
- BLAWERT, C. et al. **Nitrogen and carbon expanded austenite produced by  $PI^3$ .** *Surface and Coatings Technology.* v.136, p.181-187, 2001.
- Bose, K.; Wood, R.J.K. **Optimum tests conditions for attaining uniform rolling abrasion in ball cratering tests on hard coatings.** *Wear.* v.258, p.322-332, 2005.
- CALLISTER, W. D. **Materials science and Engineering: an introduction.** 7 ed. Nova York: John Wiley e Sons, 2007.
- COMINELI, O. G. **Fundamentos Tecnológicos da Fabricação do Aço.** Apostila do curso de Tecnologia dos Metais. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- Cozza, R.C.; Tanaka, D.K.; Souza, R.M. **Friction coefficient and wear mode transition in micro-scale abrasion tests.** *Tribology International.* v.44, p.1878-1889, 2011.
- GEE, M. G. et al. **Progress Towards Standardisation of ball Cratering.** *Wear.* v.255, p.1-13, 2003.
- HE, J. L.; CHEN, K. C.; DAVISON, A. **Improvements in the understanding and application of duplex coating systems using arc plasma technology.** *Surface and Coatings Technology.* v.200, p.1464-1471, 2005.
- HOLMBERG, K.; MATHEWS, A. **Coatings Tribology: Properties, Techniques and Applications in Surface Engineering.** Amsterdam: Elsevier, 1994.
- HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials.** London: Edward Arnold, 1992.
- KOHONEN, A. S.; SIRVIO, E. H. *Thin Solid Films.* v.96, p.103, 1982.

LARISCH, B.; BRUSKY, U.; SPIES, H. J.; **Plasma Nitriding of Stainless Steels at low Temperatures**. Surface and Coatings Technology. v.116-119, p.205-211, 1999.

LLANES LEYVA, C. A. **Modificações Superficiais de Aço TI-UBC por Processos a Plasma em Configuração Triodo: Influência no Comportamento ao Desgaste e a Corrosão**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

LIANG, W. et al. **The wear and corrosion properties of stainless steel nitride by low-pressure plasma-arc source ion nitriding at low temperatures**. Surface and Coatings Technology. v.130, p.304-308, 2000.

LOREY, C. et al. **Ball cratering an efficient tool for 3 body microabrasion of coated systems**. Surface and Coatings Technology. v.200, p.153-156, 2005.

LUGSCHEIDER, E.; BOBZIN, K.; LACKNER, K. Investigations of mechanical and tribological properties of CrAIN + C thin coatings deposited on cutting tools. v.174-171, p.681-686, 2003.

MENTHE, E.; Rie, K. –T. **Further investigation of the structure and properties of austenitic stainless steel after plasma nitriding**. Surface and Coatings Technology. v.116-119, p.199-204, 1999.

MOLLER, W. et al. **Plasma-immersion ion implantation for diffusive treatment**. Surface and Coatings Technology. v.116-119, p.1-10, 1999.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. B. **Avaliação do Efeito de Modificações Superficiais a plasma no Desempenho do Aço AISI 316 Frente ao Desgaste e Corrosão**. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

PICARD, S. et al. **Corrosion behavior, microhardness and surface characterization of low energy, high current ion implanted austenitic stainless steel**. Materials Science and Engineering. v.A303, p.163-172, 2001.

RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Materials**. 2 ed. Nova York: John Wiley e Sons, 1995.

Rickard, G. et al. **The crater grinder method as a means for coating wear evaluation – an update**. Surface and Coatings Technology. v.90, p. 107-114, 1997.

RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. **A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems**. Surface and Coatings Technology. v.79, p.231-239, 1996.

TREZONA, R.I.; ALLSOPP, D.N.; HUTCHINGS, I.M.. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**. Wear v.225–229, p.205–214, 1999.

STACHOWIAK, G.B.; STACHOWIAK, G.W.; BRANDT, J.M. **Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles**. Tribology International. v.39, p.1-11, 2006.

STACK, M. M.; MATHEW, M.. **Microabrasion transitions of metallic materials.** Wear. v.255 p.14-22, 2003.

SUN, Y.; BELL, T. **Plasma surface engineering of low alloy steel.** Materials Science and Engineering. v.A140, p.419-434, 1991.

TSUJIKAWA, M. et al. **Surface material design of 316 stainless steel by combination of low temperature carburizing and nitriding.** Surface and Coatings Technology. v.200, p.507-511, 2005.

TSUJIKAWA, M. et al. **Surface material design of 316 stainless steel by combination of low temperature carburizing and nitriding.** Surface and Coatings Technology. v.193, p.309, 2005.

ULRICH, S. et al. **Influence of low energy ion implantation on mechanical properties of magnetron sputtered metastable (Cr,Al)N thin films.** Thin Solid Films. v.437, p.164-169, 2003.

ZUM-GAHR, K. **Microstructure and Wear of Materials.** Amsterdam: Elsevier, 1987.

WILLIAMSON, D. L.; OZTURK, O. **Metastable phase formation and enhanced diffusion in f.c.c. alloys under high dose, high flux nitrogen implantation at high and low ion energies.** Surface and Coatings Technology. v.65, p.15-23, 1994.