

**MARINHA DO BRASIL**  
**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA**  
**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO PARA OFICIAL DE MÁQUINAS - APMA.1/2020**

**EDUARDO FELIPE BITENCOURT**

**ALTERNATIVA CONTRA DESGASTE EM BUCHAS DE PROTEÇÃO DE EIXO DE  
BOMBA DE ÁGUA UTILIZANDO O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A  
ARCO**

**RIO DE JANEIRO**

**2020**

**EDUARDO FELIPE BITENCOURT**

**ALTERNATIVA CONTRA DESGASTE EM BUCHAS DE PROTEÇÃO DE EIXO DE  
BOMBA DE ÁGUA UTILIZANDO O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A  
ARCO**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Orientador: Prof. Elizabeth Fátima Lourenço Borges

**RIO DE JANEIRO**

**2020**

**EDUARDO FELIPE BITENCOURT**

**ALTERNATIVA CONTRA DESGASTE EM BUCHAS DE PROTEÇÃO DE EIXO DE  
BOMBA DE ÁGUA UTILIZANDO O PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A  
ARCO**

Monografia apresentada como Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, como parte dos requisitos para obtenção do Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: Prof. Elizabeth Fátima Lourenço Borges

---

Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

---

Assinatura do Aluno

## RESUMO

A bucha de proteção do eixo é um componente de uma bomba de água com finalidade de servir de defesa contra desgaste, corrosão e erosão do eixo. Nas condições operacionais em que estão expostas sofrem desgaste e oxidação, com isso pode apresentar defeitos que comprometam o seu funcionamento como vazamento excessivo na vedação do eixo, perda da eficiência e ruído. Com o objetivo de analisar a eficiência do processo de aspersão térmica a arco (*Arc Spray – AS*) como alternativa de proteção contra o desgaste, propõe-se fazer um estudo da comparação de revestimentos aspergidos em substituição ao processo atualmente utilizado. Sendo assim, os materiais dos revestimentos aspergidos em forma de arame a serem testados em substituição ao aço AISI 420 temperado e revenido utilizado atualmente na bucha de proteção do eixo, serão UTP AF LEDURIT 68 e 60T, os quais foram selecionados pelo fato de serem revestimentos resistentes aos problemas enfrentados pela bucha. Na revisão bibliográfica realizaram-se pesquisas e consultas sobre aspersão térmica e suas variáveis, tais como: equipamentos, materiais, análises dos revestimentos aspergidos e mecanismos de desgaste. Para o estudo, os revestimentos aspergidos foram avaliados por meio de exames metalográficos (micrografia), ensaios mecânicos (microdureza) realizados na UFSC e ensaio de desgaste pino sobre disco. Após a análise dos resultados obtidos, teve-se como melhor alternativa dentre os testes realizados o arame de revestimento 60T aço cromo.

Palavras-chave: Bucha de proteção do eixo. Aspersão térmica a arco elétrico. Desgaste. Revestimento.

## ABSTRACT

The shaft protection bushing is a component of a water pump to serve as a defense against wear, corrosion and erosion of the shaft. Under the operating conditions in which they are exposed, they suffer wear and oxidation, which can cause defects that compromise their operation, such as excessive leakage in the shaft seal, loss of efficiency and noise. In order to analyze the efficiency of the thermal arc sprinkler process (Arc Spray - AS) as an alternative to protect against wear, it is proposed to make a study of the comparison of sprinkled coatings in substitution to the currently used process. Therefore, the materials of the coatings sprinkled in the form of wire to be tested in substitution to the tempered and tempered AISI 420 steel currently used in the shaft protection bushing, will be UTP AF LEDURIT 68 and 60T, which were selected because they are coatings resistant to the problems faced by the bushing. In the literature review, research and consultations were carried out on thermal spraying and its variables, such as: equipment, materials, analysis of sprayed coatings and wear mechanisms. For the study, the sprinkled coatings were evaluated by means of metallographic examinations (micrograph), mechanical tests (microhardness) performed at UFSC and pin-on-disk wear test. After the analysis of the results obtained, the best alternative among the tests carried out was the 60T chrome steel coating wire.

Keywords: Shaft protection bushing. Thermal sprinkling with electric arc. Wear. Coating.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES/FIGURAS

<b>Figura 3.1:</b> Representação esquemática do processo de deposição de um revestimento.....	17
<b>Figura 3.2:</b> Classificação dos principais processos de aspersão térmica com relação ao meio .....	19
<b>Figura 3.3:</b> Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico, adaptado.....	23
<b>Figura 4.1:</b> Desenho esquemático da bomba de água marca Warman, tipo AH.....	26
<b>Figura 4.2:</b> Formas e aparências da bucha retirada de operação.....	27
<b>Figura 5.1:</b> Tipos de corpos de prova utilizados.....	30
<b>Figura 5.2:</b> Pré-aquecimento dos corpos de prova.....	32
<b>Figura 5.3:</b> Máquina de aspersão térmica a arco elétrico, modelo ARC-SPRAY 300.....	33
<b>Figura 5.4:</b> Aspersão térmica a arco elétrico.....	34
<b>Figura 5.5:</b> Tratamento térmico.....	35
<b>Figura 5.6:</b> Durômetro Fixo-Test.....	35
<b>Figura 5.7:</b> Tribômetro pino sobre disco.....	35
<b>Figura 5.8:</b> Rugosímetro digital SJ-201P – Mitutoyo.....	38
<b>Figura 5.9:</b> Detalhe da carga de 30N sobre o corpo de prova para o ensaio de desgaste.....	39
<b>Figura 6.1:</b> Camada aspergida despreendida do substrato.....	41
<b>Figura 6.2:</b> Inspeção metalográfica corpo de prova nº 01 com UTP AF LEDURIT 68.....	42
<b>Figura 6.3:</b> Inspeção metalográfica corpo de prova nº 02 revestido com 60T.....	43
<b>Figura 6.4:</b> Ensaio de desgaste do corpo de prova nº 03.....	45
<b>Figura 6.5:</b> Ensaio de desgaste do corpo de prova nº 02.....	46
<b>Figura 6.6:</b> Ensaio de desgaste do corpo de prova nº 01.....	46
<b>Figura 6.7:</b> Ensaio de desgaste do corpo de prova nº 01 desprezando o disco 1.2.....	47
<b>Figura 6.8:</b> Média de perda de volume acumulativo da esfera de metal duro versus a distância de deslizamento percorrida.....	48
<b>Figura 6.9:</b> Média de perda de volume acumulativo de todos os corpos de prova versus a distância de deslizamento percorrida.....	48
<b>Figura 6.10:</b> Micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).....	49
<b>Figura 6.11:</b> Pista de desgaste do disco 2.1 com revestimento 60T.....	50
<b>Figura 6.12:</b> Análise EDX da composição química da superfície do disco 2.1 revestido com 60 T aço cromo na área do retângulo vermelho da figura 6.10a.....	50
<b>Figura 6.13:</b> Taxa média de desgaste e micro-dureza Vickers dos discos.....	53

<b>Figura 6.14:</b> Coeficiente médio de desgaste dos discos.....	53
---	----

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 5.1:</b> Composição química (%) do aço AISI 420.....	28
<b>Tabela 5.2:</b> Composição química (%) do arame UTP AF LEDURIT 68.....	29
<b>Tabela 5.3:</b> Composição química (%) do arame 60T aço cromo.....	29
<b>Tabela 5.4:</b> Identificação e quantidade de corpos de prova para ensaios de metalografia, dureza e desgaste.....	30
<b>Tabela 5.5:</b> Composição química (%) da granalha Tecjato, Tecblast 12/20.....	31
<b>Tabela 5.6:</b> Parâmetros utilizados para aspensão dos corpos de prova.....	31
<b>Tabela 6.1:</b> Corpos de prova nº 1, revestido com UTP AF LEDURIT 68, espessura filme de 0,80 mm. Carga de 500g.....	44
<b>Tabela 6.2:</b> Corpos de prova nº 2, revestido com 60T, espessura filme de 0,85 mm. Carga de 500g.....	44
<b>Tabela 6.3:</b> Corpos de prova nº 3, temperado e revenido. Carga de 500g.....	44
<b>Tabela 6.4:</b> Composição química obtida pela análise EDX da superfície do disco 2.1 revestido com 60 T aço cromo na área do retângulo vermelho da figura 6.10a.....	51
<b>Tabela 6.5:</b> Parâmetros de resistência ao desgaste, microdurezas e carga aplicada obtidos do ensaio de esfera-contra-disco para os diferentes discos.....	52

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	12
<b>2.1 Objetivos Específicos</b> .....	12
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	13
<b>3.1 Bombas Centrifugas</b> .....	13
3.1.1 Buchas de Proteção.....	13
<b>3.2 Engenharia de Superfície</b> .....	14
<b>3.3 Tribologia</b> .....	14
3.3.1 Variáveis Tribológicas.....	14
<b>3.4 Desgaste</b> .....	15
3.4.1 Ensaio de Desgaste.....	15
<b>3.5 Aspersão Térmica</b> .....	16
3.5.1 Aplicações de Revestimentos por Aspersão Térmica.....	19
3.5.2 Processos de Aspersão Térmica.....	20
3.5.3 Característica da Aspersão Térmica por Arco Elétrico.....	22
3.5.4 Materiais de Adição para Aspersão Térmica.....	24
<b>4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA</b> .....	26
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
<b>5.1 Materiais Empregados</b> .....	28
5.1.1 Metal de Base (Substrato).....	28
5.1.2 Metal de Deposição por Aspersão Térmica.....	29
<b>5.2 Preparação dos Corpos de Prova</b> .....	30
<b>5.3 Procedimento para Jateamento</b> .....	31
<b>5.4 Aspersão Térmica</b> .....	32
5.4.1 Pré-aquecimento.....	32
5.4.2 Equipamentos e Parâmetros para Aspersão Térmica.....	32
<b>5.5 Têmpera e Revenimento</b> .....	34
<b>5.6 Caracterização</b> .....	36
5.6.1 Metalografia.....	36
5.6.2 Microdureza.....	36



<b>5.7 Ensaio de Desgaste.....</b>	<b>37</b>
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
<b>6.1 Tratamento Térmico.....</b>	<b>40</b>
<b>6.2 Problema Inicial.....</b>	<b>40</b>
<b>6.3 Microestruturas dos Revestimentos Aspergidos.....</b>	<b>41</b>
<b>6.4 Ensaios de Desgaste.....</b>	<b>43</b>
<b>7 CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Componentes metálicos, cujas superfícies estejam expostas a ambientes agressivos e sujeitos a degradação por ação química ou eletroquímica (corrosão), por ação mecânica (desgaste), ou à ação combinada desses dois fenômenos podem ser protegidos pela aplicação de revestimentos. Estes revestimentos podem ser aplicados por diversas técnicas e processos como: eletrodeposição, pintura, soldagem e aspersão térmica.

O desgaste pode ser definido como a indesejável mudança cumulativa em dimensões, motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente a ações mecânicas. Fenômeno tipicamente superficial tem-se a necessidade de processos que sejam utilizados com sucesso na prevenção e minimização do desgaste e corrosão de componentes mecânicos e na manutenção de peças desgastadas. Dentre os vários processos, a aspersão térmica se apresenta com potencial para ser usada na aplicação de revestimentos em equipamentos ou componentes estruturais para satisfazer várias necessidades de proteção, de manutenção e de recuperação. Tais ações vão desde a reparação de superfícies de peças desgastadas ou danificadas em serviço, passando por processos de restauração dimensional, chegando a um aumento na vida útil do componente otimizando as propriedades físicas da superfície.

O processo de aspersão térmica é um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não, são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato formando um revestimento com características especiais.

Através da queima de um gás combustível ou da geração de um arco elétrico a partir de uma tocha de aspersão, é gerado o calor necessário para a execução da operação de revestimento. Na aspersão a arco elétrico as partículas fundidas são aceleradas por ar comprimido, confinadas num feixe, e dirigidas ao substrato. Ao se chocarem com a superfície da peça, as partículas solidificam e aderem pela interação mecânica e metalúrgica. As camadas são interligadas química e mecanicamente, cada uma se sobrepondo à camada precedente, dando origem a uma estrutura lamelar. O processo continua até que seja obtida a espessura desejada do revestimento.

A escolha da técnica de aspersão mais adequada, a ser utilizada, envolve dentre outros aspectos, o estudo do tipo de desgaste, a escolha do metal de adição e o procedimento de operação mais adequado.

O material de revestimento, que pode ser na forma de pó, vareta, cordão ou arame, proporciona diferenças na estrutura e composição química devido à sua natureza, à reação do revestimento com gases do processo e à atmosfera em torno do material de revestimento.

Uma combinação de propriedades incluindo resistência à corrosão, dureza, resistência à abrasão, resistência ao impacto e ao calor, devem ser consideradas quando se relacionam materiais de adição para revestimento.

Em geral, através dos processos de aspersão e com os revestimentos depositados, podem-se obter diversas composições químicas e valores de dureza. Entretanto, é geralmente vantajoso obter-se uma superfície metálica com algum grau de ductilidade, pois dessa forma a ligação entre as partículas e os substratos é favorecida com consequência direta no decréscimo de propensão a trincas.

Revestimentos com aços inoxidáveis, aplicados através de processos de deposição por aspersão térmica, constituem-se em uma alternativa bastante eficiente para proteger os componentes de aço em ambientes corrosivos aliada a uma boa resistência mecânica do revestimento.

Neste trabalho é avaliada a eficiência dos revestimentos pela avaliação da influência dos materiais utilizados e dos parâmetros de processo adotados, pela caracterização microestrutural e através das propriedades mecânicas de microdureza e resistência ao desgaste. Utilizando os revestimentos UTP AF LEDURIT 68 a base de uma liga de carboneto de cromo e o revestimento 60T a base de aço cromo que foram aplicados através do processo de aspersão a arco elétrico (AS, Arc Spray).

## **2 OBJETIVOS**

Analisar a eficiência do processo de aspersão térmica a arco como alternativa de proteção contra o desgaste em comparação ao processo de têmpera e revenimento utilizado atualmente nas buchas de proteção do eixo.

### **2.1 Objetivos Específicos**

- a. Caracterizar as camadas aspergidas por ensaios metalográficos e microdureza.
- b. Analisar a empregabilidade de dois diferentes revestimentos aspergidos pelo processo *Arc Spray* através de ensaio de desgaste pino sobre disco;
- c. Estabelecer a melhor alternativa entre as possibilidades testadas.

### **3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Este capítulo busca apresentar de forma sucinta conceitos básicos a respeito da utilização da aspersão térmica, envolvendo alguns métodos e aplicações, descrevendo seus processos e fundamentos para utilização como técnica proposta contra o desgaste em buchas de proteção.

#### **3.1 Bombas Centrifugas**

Uma bomba centrífuga é, na maioria das vezes, o equipamento mais simples em qualquer planta de processo, é o equipamento mais utilizado para bombear líquidos no saneamento básico, na irrigação de lavouras, nos edifícios residenciais, na indústria em geral, transferindo líquidos de um local para o outro.

##### **3.1.1 Buchas de Proteção**

As buchas existem desde que se passou a usar transportes com rodas e eixos. No caso de rodas de madeira, que até hoje são usadas em carros de boi, já existia o problema de atrito. Durante o movimento de rotação as superfícies em contato provocavam atritos e, com o tempo, desgastam-se os eixos e as rodas, sendo preciso trocá-los.

Com a introdução das rodas de aço manteve-se o problema com relação ao atrito. A solução encontrada foi a de colocar um anel de metal entre o eixo e as rodas. Esse anel, mais conhecido como bucha, reduz bastante o atrito, passando a constituir um elemento de apoio indispensável, onde têm-se a função de servir de suporte a eixos, de modo a reduzir o atrito e amortecer choques ou vibrações.

O eixo das bombas normalmente são protegidos de erosão, corrosão e desgaste nas câmaras de selo, articulações de vazamento, mancais internos, e nas vias fluviais através de buchas renováveis, a menos que seja especificado o contrário. A bucha de proteção do eixo normalmente é construída de material resistente com a função de proteger o eixo contra desgaste, corrosão, e erosão, além de proteger o mesmo na região do engastamento.

### **3.2 Engenharia de Superfície**

A engenharia de superfície é uma atividade que busca um aumento na eficiência das propriedades das superfícies de componentes de engenharia e pode ser definida segundo Davis, 2001 apud Carvalho (2007, p.07) como o “tratamento das regiões da superfície e próximas à superfície de um material para permitir que a mesma execute as funções que são inerentes àquelas exigidas para o material”. O comportamento de um componente de Engenharia é uma consequência altamente dependente da superfície do material, da área de contato nesta superfície e do ambiente sob o qual o material é solicitado, pois este trabalha em ambientes complexos que apresentam cargas elevadas, velocidades elevadas, atrito elevado, elevadas temperaturas e atmosferas agressivas (CARVALHO, 2007).

As características superficiais dos materiais de engenharia têm um efeito significativo na aplicabilidade e na vida útil de um componente. Por sua vez, os componentes devem executar suas funções completas e eficazes, sob várias circunstâncias em ambientes agressivos, os quais são normalmente complexos, combinando esforços de carregamentos com degradação química e física à superfície do componente. Esta superfície pode requerer algum tratamento para melhoria de características superficiais. Alguns tratamentos de superfície promovem alterações na microestrutura do material, outros tratamentos alteram as características químicas da superfície. Os revestimentos duros correspondem à outra forma de tratamento da superfície, onde na grande maioria das situações, é aplicada uma camada protetora de um outro material que apresenta propriedades superiores à superfície de base (STOKES, 2003).

### **3.3 Tribologia**

A Tribologia focaliza o estudo do atrito, do desgaste e da lubrificação e pode ser definida como “A ciência e a tecnologia que estuda a interação e seus efeitos, entre duas superfícies em contato, com movimento relativo”; assuntos e práticas relacionadas ao atrito são também estudados na tribologia (STOETERAU, 2004).

#### **3.3.1 Variáveis Tribológicas**

O atrito e o desgaste estão entre as variáveis tribológicas, sendo o desgaste a principal causa da perda de material e do desempenho mecânico do componente. O atrito é a principal causa da dissipação de energia e, por conseguinte, do desgaste. É possível obter economia

através de controle do atrito, melhorado as condições de contato entre superfícies móveis. Estima-se que um terço dos recursos de energia em uso no mundo atual é utilizado para superar o atrito. A lubrificação se torna um meio eficaz de reduzir o atrito e de controlar o desgaste.

### **3.4 Desgaste**

O desgaste pode ser definido como a indesejável mudança cumulativa em dimensões, motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente a ações mecânicas. Na realidade, a corrosão também pode interagir com o processo de desgaste modificando as características das superfícies sob desgaste. Assim, o desgaste deve ser compreendido como um complexo de diferentes processos que podem ocorrer independentemente ou em combinações (STOETERAU, 2004).

Do ponto de vista físico o desgaste recebe classificação de desgaste mecânico e desgaste químico. Como exemplo do desgaste mecânico tem-se: desgaste por fadiga, quando a fratura é originada do mecanismo de fadiga; desgaste adesivo, quando é originária do resultado das forças adesivas sem particularizar a configuração de contato e o modo da fratura; desgaste abrasivo, quando a fratura é produzida no modo de micro partículas cortadas sendo necessários pontos de contato para o corte. O desgaste químico ocorre quando produtos de reações químicas, do material das faces em contato com gases e líquidos são removidos mecanicamente; uma das mais conhecidas forma de desgaste de origem química e causado por um meio corrosivo é o desgaste por oxidação (HESSE, 2000).

#### **3.4.1 Ensaio de Desgaste**

Segundo Hesse (2000), em seu trabalho sobre ensaio de desgaste por deslizamento pino sobre disco, o ensaio de laboratório mais comum no sistema de abrasão por dois corpos usa a forma do sistema pino sobre disco. Quando o ensaio destina-se a medir a resistência de um material em condições abrasivas, a contra face pode ser revestida por lixas comerciais com granulações variadas que são fixadas à mesa rotativa mediante adesivo adequado. Porém, se a contra face é formada por materiais metálicos ou cerâmicos usinados é provável que seja bem menos abrasiva e as taxas de desgaste conseqüentemente serão menores e o ensaio bem mais

demorado. A perda de material nesta segunda situação não se dá apenas por abrasão, mas poderá envolver outros mecanismos de desgaste (HESSE, 2000).

A norma que regulamenta este ensaio é designada pela ASTM como G 99 – 95. Esta norma fornece um método padronizado, em nível de laboratório, para a execução dos ensaios de desgaste de materiais, durante o deslizamento, usando a configuração pino sobre disco (ASTM G 99 – 95, 1997).

Para os ensaios, este procedimento recomenda o uso de um pino com ponta em forma esférica, com raio da ponta adequado mantido em contato com a face do disco em rotação estável através de pesos, formando assim um caminho circular. A superfície do disco deve ser finamente usinada de modo que fique relativamente lisa. A norma recomenda um valor de rugosidade  $R_a$  menor que  $0,8 \mu\text{m}$  (ASTM G 99 – 95, 1997).

Os materiais são ensaiados sob condições de desgaste entre o pino e o corpo de prova, sendo o volume ou massa desgastada, ou perdida, calculados pela diferença da massa dos corpos de prova antes e depois do ensaio (ambos os pino e disco devem ser pesados) ou calculados através do volume do perfil do sulco formado no disco (STOETERAU, 2004).

Através deste equipamento é possível a análise de uma grande gama de materiais tanto metálicos, cerâmicos, poliméricos e compósitos. Para estes, é possível determinar a influência dos diversos parâmetros nas razões de desgaste para várias combinações de materiais entre pino e disco, ou ainda realizar análises para determinação do lubrificante mais adequado a uma determinada situação de atrito (HESSE, 2000).

### **3.5 Aspersão Térmica**

Aspersão térmica é um grupo de processos nos quais materiais metálicos ou não, finamente divididos, são depositados em uma condição fundida ou semifundida sobre um substrato formando um revestimento com características especiais, conferindo proteção de natureza mecânica (desgaste), química (corrosão) e física (calor e eletricidade). Os materiais sólidos são aquecidos mudando para um estado pastoso ou fundido e acelerados por um gás comprimido em direção ao substrato (metal base), as partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física, dependendo da temperatura da fonte de calor e velocidade imposta às partículas, que pela sobreposição formam camadas de estrutura lamelar com óxidos e poros (MARQUES, 2005).

A figura 3.1 ilustra de forma esquemática o processo de deposição de um revestimento aspergido termicamente. Segundo Pawlowski (1995) apud Comeli o princípio da aspersão



térmica é projetar um material, alimentado em forma de arame ou pó contra um substrato ou metal base, onde ocorrerá uma solidificação e aderência ao mesmo, sendo que o depósito é construído por sucessivas colisões dessas partículas. Ao se chocarem, as partículas se achatam e formam finas lamelas, que se conformam e se aderem às irregularidades superficiais entre si (COMELI, 2006).

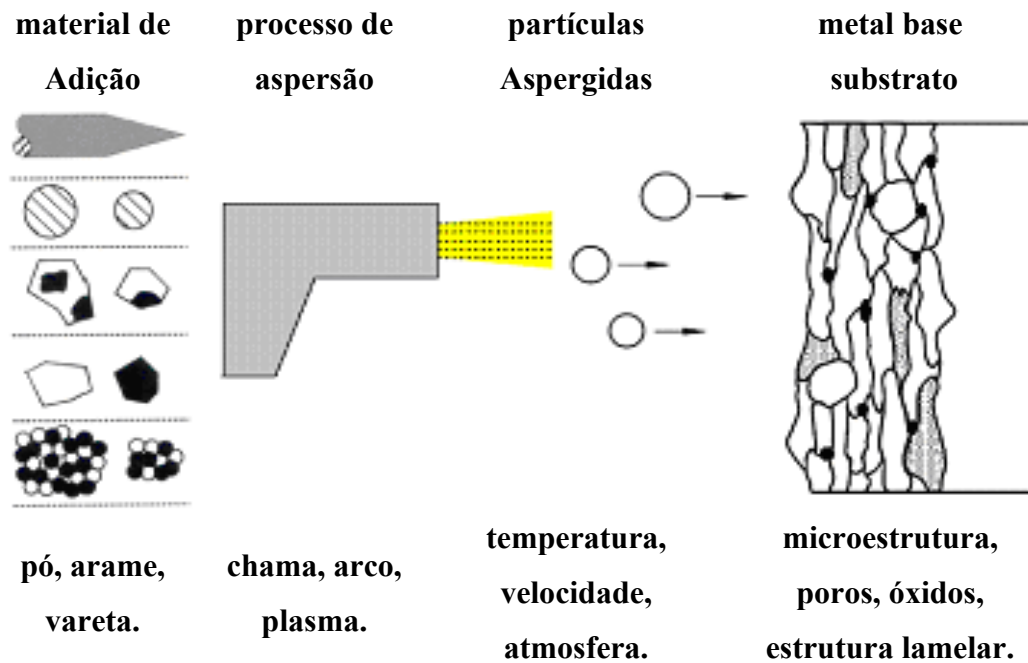


Figura 3.1 – Representação esquemática do processo de deposição de um revestimento pela técnica de aspersão térmica, adaptada de Zimmermann.

Fonte: SCHIEFLER, 2004.

As variações básicas no processo de aspersão térmica referem-se ao material a ser aplicado, ao método de aquecimento e ao método de aceleração das partículas em direção ao substrato, podendo ser dividida em dois grupos básicos dependendo da fonte de calor: combustão e elétrico (LIMA, 2001).

Um fluxograma ilustrativo na figura 3.2 apresentado por Schiefler (2004), em seu estudo sobre revestimentos metálicos aplicados por aspersão térmica agrupa os principais processos de acordo com o meio de aquecimento associado à forma de apresentação do material de adição empregado. Para efeito de simplificação, uma nomenclatura baseada em siglas é comumente usada em substituição às denominações completas dos processos (SCHIEFLER, 2004). A identificação de cada uma das siglas é a seguinte:

a. FS – *Flame Spraying* (aspersão a chama oxi-gás com material de adição na forma de pó ou arame);

- b. HVOF – *High Velocity Oxy-Fuel flame spraying* (aspersão a chama oxigênio-combustível de alta velocidade com material de adição na forma de pó);
- c. D-gun – *Detonation-Gun spraying* (aspersão por detonação);
- d. HVCW – *High Velocity Combustion Wire flame spraying* (aspersão a chama de alta velocidade com material de adição na forma de arame);
- e. PS – *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);
- f. AS – *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico);
- g. LS – *Laser Spraying* (aspersão a laser);
- h. CS – *Cold Spraying* (aspersão a frio).

Segundo *American Welding Society* (1985) apud Marques, o sucesso no uso de revestimentos aspergidos termicamente depende basicamente da aplicação segundo procedimentos bem estabelecidos. Quaisquer desvios destes procedimentos levam, em geral, a resultados não confiáveis (MARQUES, 2005).

Como regra geral Zimmermann (1997) apud Schiefler, informa que o revestimento deve ter boa aderência ao substrato, seja através de ancoragem mecânica junto à interface com o substrato ou devido a interações químico-metalúrgicas tais como: processos de difusão e de formação de ligas metálicas. Essa aderência, somada a uma coesão satisfatória entre as partículas depositadas, garante ao revestimento boas propriedades de natureza mecânica, térmica, química e elétrica (por ex., resistência ao deslocamento, desgaste, corrosão, dureza e condutibilidade) (SCHIEFLER, 2004).



Figura 3.2 – Classificação dos principais processos de aspersão térmica com relação ao meio de aquecimento, associado ao tipo de material de adição empregado.

Fonte: SCHIEFLER, 2004.

Segundo Maranhão (1996) apud Comeli, a aderência de um revestimento efetuado por aspersão térmica compreende a adesão entre o mesmo e o substrato, bem como a coesão entre as partículas depositadas. A aderência é um requisito essencial para o desempenho do revestimento, pois não adianta o mesmo ter uma espessura adequada e livre de poros se não possuir aderência suficiente (COMELI, 2006).

### 3.5.1 Aplicações de Revestimentos por Aspersão Térmica

Segundo estudos apresentados por Pawlowski atualmente os campos de aplicação industrial de revestimentos aspergidos são bastante abrangentes, conforme indicados na relação a seguir (SCHIEFLER, 2004).

- a. Proteção contra a corrosão de peças, estruturas e equipamentos fabricados em materiais suscetíveis a diferentes formas de ataque corrosivo, dependendo do meio de exposição. Indústrias químicas e petroquímicas de processamento fazem uso freqüente de revestimentos para esse fim;
- b. Proteção contra o desgaste adesivo e por *fretting* bem como aumento da resistência contra a abrasão, erosão e cavitação. Praticamente todas as indústrias se beneficiam desse tipo de proteção;
- c. Isolamento térmico e elétrico de componentes. Indústrias usuárias comuns são a eletrônica, automotiva e aeroespacial;
- d. Operações de restauração dimensional em componentes de máquinas (eixos, cilindros, buchas, mancais, etc...). Muitas indústrias utilizam a aspersão térmica para recuperar partes desgastadas e danificadas de peças de elevado custo, sem a necessidade de substituí-las;
- e. Inserção de propriedades especiais (por exemplo, transformação de componentes originalmente não magnéticos e não condutores em magnéticos e/ou condutores, após receberem um revestimento com essas propriedades). Indústrias beneficiárias são a eletroeletrônica, de embalagens e de impressão;

### 3.5.2 Processos de Aspersão Térmica

Serão descritos brevemente os principais processos utilizados para aspersão térmica, enfatizando o processo AS - *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico). Os processos de aspersão térmica podem ser categorizados em quatro grupos básicos de acordo com o método de geração de calor:

- a. Por combustão (FS, HVOF, D-gun, HVCW).
- b. Processos elétricos (PS, AS).
- c. Emissão de fótons (LS).
- d. A frio (CS)

O aquecimento por combustão é um processo que utiliza calor gerado pela queima de gás combustível. Qualquer substância que se funda e não sublima a temperaturas inferiores a 2700°C pode ser aspergido por estes processos. Os materiais aplicados podem ser um metal puro, uma liga metálica, um compósito, um carboneto, um cerâmico, um cermet ou combinações destes (LIMA, 2001).

Aspersão a chama (*FS – flame spraying*) emprega ar comprimido ou oxigênio misturado com uma variedade de gases combustíveis (acetileno, propileno, propano, hidrogênio) utilizados para fundir e impulsionar as partículas fundidas ou semi fundidas em direção ao substrato. Geralmente esse processo produz revestimentos com baixa resistência não sendo empregado onde é desejada alta densidade e excelente aderência ao substrato. (HERMAN, 2005).

No processo de aspersão a arco elétrico (*AS – arc spraying*), dois arames eletrodos consumíveis carregados eletricamente com cargas opostas, são conduzidos de forma a se encontrar em um ponto à frente de um jato de ar comprimido em direção ao substrato, que serve para a atomização. Uma diferença de potencial de 18 a 40 V é estabelecida entre os arames produzindo um arco elétrico. O equipamento básico para este processo consiste de uma fonte de corrente contínua tipo tensão constante, alimentadores de arame com velocidade constante, tocha de aspersão e um sistema de fornecimento de gás comprimido controlável. Um fluxo de gás comprimido promove a atomização da porção fundida dos arames, impulsionando as minúsculas partículas formadas em direção ao substrato (MARQUES, 2005).

As altas temperaturas das partículas produzem, após o impacto com o substrato, interação metalúrgica, zonas de difusão ou ambos. Estas reações localizadas formam pequenas zonas soldadas levando a um revestimento com boa aderência. Um efeito negativo

do alto estado de energia das partículas atomizadas é a tendência a mudar a composição das ligas aplicadas, devido à oxidação durante a aspersão. Este processo apresenta normalmente, maiores taxas de deposição do que outros processos de aspersão térmica. O aquecimento do substrato é menor que os processos de aspersão por chama principalmente por não haver contato com a chama (LIMA, 2001).

O processo por detonação (*D-gun – detonation-gun spraying*) utiliza a energia da explosão de misturas de oxigênio-acetileno para aquecer e impelir materiais em pó para a superfície do substrato a ser revestido. O depósito resultante é extremamente duro, denso e bem aderente ao substrato. A pistola de detonação é diferente de outros equipamentos por aspersão por combustão. Ela utiliza a energia das explosões intermitentes de uma mistura oxigênio-acetileno, ao invés de uma chama estacionária, para impulsionar o pó até o substrato. Quando é feita a ignição da mistura uma onda de choque controlada aquece e acelera as partículas de pó, cuja velocidade de saída é em torno de 600 m/s. (MARQUES, 2005).

A aspersão óxi-combustível de alta velocidade (*HVOF – high velocity oxi-fuel*) surgida no início de 1980 como uma variação do processo de aspersão por combustão exerceu forte influência sobre as possibilidades de aplicação da aspersão térmica. A técnica é baseada em especial no projeto da tocha (pistola) de aspersão em que o combustível, geralmente propano, propileno, metil-acetileno, propadieno ou hidrogênio, querosene, é misturado com oxigênio e queimado em uma câmara de combustão onde a chama é comprimida e em seguida liberada, ocorrendo uma forte aceleração dos gases a uma velocidade de aproximadamente 650 m/s. Portanto, no impacto sobre o substrato as partículas aspergidas são finamente distribuídas, produzindo um revestimento denso e com excelente aderência ao substrato (HERMAN, 2005).

Aspersão a chama de alta velocidade com arame (*HVCW – high velocity combustion wire spraying*) é uma variante do processo HVOF, e seus sistemas foram projetados para combinar a qualidade de revestimentos com a conveniência do uso de arame como material de adição. Basicamente o HVCW envolve a combustão contínua de um gás combustível no interior de uma câmara, com bico de aspersão refrigerado a ar sendo o material fundido continuamente atomizado por um compressor de ar (MARQUES, 2005, SCHIEFLER, 2004).

O processo de aspersão térmica por plasma (*APS – plasma spraying*) utiliza o calor de um plasma para fundir materiais de revestimento na forma de pó. O pó é alimentado, fundido e acelerado em direção ao substrato por um jato de alta velocidade. A energia, temperatura e velocidade do jato de plasma são controladas pelo tipo de bocal constritor, intensidade da

corrente elétrica e vazão do gás do plasma. Em geral nitrogênio e argônio são utilizados como gás de plasma, podendo conter adições de hidrogênio ou hélio para aumentar a potência e velocidade. As maiores aplicações do processo de aspersão a plasma estão em recuperação dimensional e barreira térmica de componentes. Podem-se conseguir espessuras de 0,5 a 6,00 mm e larguras de até 32,00 mm em um único passe (LIMA, 2001).

Segundo Kreye (1997), um processo recente que vem sendo considerado muito promissor é o da aspersão a frio (*CS – cold spraying*) que se notabiliza pela deposição dos materiais em uma faixa de temperaturas significativamente menor, se comparada àquelas utilizadas nos processos tradicionais de aspersão térmica. Neste caso, a expansão de um gás em um bico convergente-divergente a partir de pressões da ordem de 15-35 bar (1,5 a 3,5 MPa) até a pressão ambiente resulta em um fluxo de gás supersônico. Este gás é pré aquecido a temperaturas entre 100 e 600°C, visando aumentar a sua velocidade e, conseqüentemente a velocidade das partículas a serem aspergidas (SCHIEFLER, 2004).

### 3.5.3 Característica da Aspersão Térmica por Arco Elétrico

O processo de aspersão térmica a arco elétrico (AS) utiliza como material de revestimento dois arames metálicos. Os arames são carregados eletricamente com polaridades invertidas e alimentados em uma pistola de aspersão em velocidades controladas, sendo um arame positivo (ânodo) e o outro negativo (cátodo), aplicando-se uma diferença de potencial (LIMA, 2001).

Os arames depositados apresentam diâmetros que variam entre 1,2 a 5 mm e permitem também a operação com uma variedade de materiais, puros ou ligados (sólidos e tubulares). Quando os arames aproximam-se do ponto de contato ocorre a abertura de um arco elétrico gerando-se calor suficiente para fundir continuamente as extremidades dos arames. Utiliza-se também um jato de ar comprimido para atomizar o material que se encontra no estado fundido, acelerando-o à superfície do substrato para dar forma ao revestimento, conforme visualizado na figura 3.3. Em aplicações especiais, onde seja necessário um controle da atmosfera, podem ser utilizados gases inertes como argônio e hélio com o objetivo de redução da oxidação do revestimento, em substituição ao ar comprimido (LIMA, 2001).

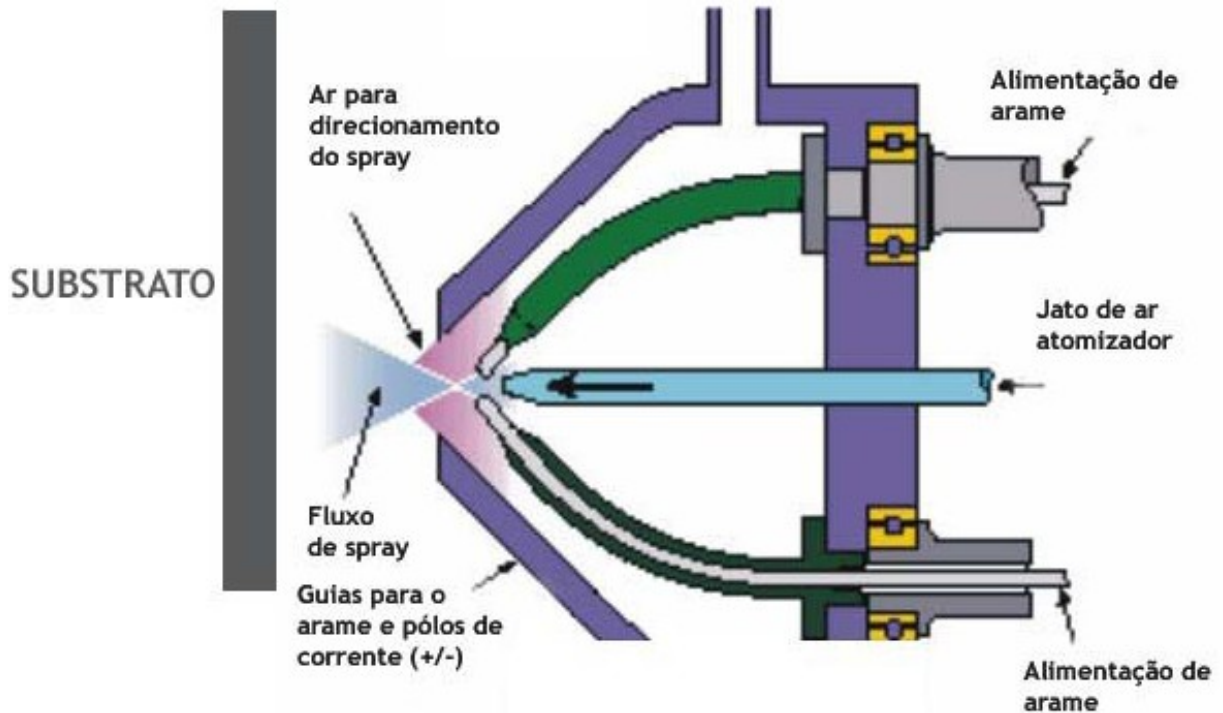


Figura 3.3 - Esquema do processo de aspersão térmica a arco elétrico, adaptado.

Fonte: HALLDEARN, 2006.

Na aspersão a arco elétrico, a quantidade de material que pode ser depositada por unidade de tempo é função do poder elétrico (corrente) do sistema e da densidade e ponto de fusão do arame. Um aumento da diferença de potencial entre os arames proporciona partículas com dimensões maiores e também um comprimento de arco maior. Para a obtenção de revestimentos mais densos e de melhor acabamento, a diferença de potencial deve ser mantida em valores mínimos que sejam compatíveis com a estabilidade do arco (HALLDEARN, 2006). O arco elétrico gerado apresenta temperaturas entre 4000 a 6000°C excedendo o ponto de fusão dos materiais utilizados e a energia elétrica neste processo situa-se entre 5 a 10 kW (LIMA, 2001).

A velocidade de projeção das partículas chega a 250 m/s e uma unidade de controle possibilita a regulação de parâmetros do processo como velocidade de alimentação do arame, suprimento de ar comprimido, corrente e tensão. Durante o ciclo de fusão, o metal aspergido é superaquecido até um ponto onde pode ocorrer volatilização parcial, especialmente com alumínio e zinco. Devido às elevadas temperaturas das partículas, após o impacto com o substrato, são produzidas zonas de difusão e de interação metalúrgica. Estas reações formam pequenas zonas ditas soldadas, levando a um revestimento com boa resistência adesiva e coesiva (LIMA, 2001).

O processo de AS apresenta vantagens como camadas mais densas e mais resistentes comparadas ao processo à combustão, baixo custo, alta taxa de deposição e eficiência, permitindo o revestimento de grandes áreas e alto volume de produção. Este processo apresenta limitações como a utilização unicamente de arames eletricamente condutores, a utilização de aquecedores externos, quando há a necessidade de pré-aquecimento e elevada tendência de mudança na composição química das ligas depositadas devido à oxidação ou à vaporização, ou ainda à ocorrência simultânea desses dois fenômenos (LIMA, 2001).

Este processo, por apresentar a taxa de deposição mais elevada dentre os processos de aspensão térmica pode ser utilizado para revestir peças de grandes dimensões e também um grande número de componentes em uma linha de produção em série (CARVALHO, 2007).

Algumas aplicações típicas incluem o revestimento de estruturas tais como pontes e outras fabricações utilizando o zinco e o alumínio para dar proteção contra a corrosão, recuperação de elementos de máquinas tais como rolamentos e eixos, utilizando ligas de aço e bronze e também o revestimento de carcaças de componentes eletrônicos com cobre, zinco e alumínio, fazendo com que esses revestimentos condutores forneçam proteção da interferência eletromagnética (HALLDEARN, 2006).

#### 3.5.4 Materiais de Adição para Aspensão Térmica

Segundo Kreye (1994), dentre as técnicas de revestimentos mais utilizadas, a aspensão térmica desponta como aquela que apresenta a maior gama de materiais possíveis de serem aplicados. Podem ser aplicados materiais como: metais e ligas metálicas, polímeros e cerâmicas e/ou uma combinação destes, podem ser transformados em materiais para aspensão. De acordo com Pawlowski (1995), os materiais para aspensão são oferecidos na forma de: arame, vareta ou pó sendo estes puros ou ligados. Materiais mais frágeis como cerâmicos ou alguma misturas destes vêm na forma de pós, com diferentes morfologias e granulometrias que dependem do processo de fabricação (SCHIEFLER, 2004).

Os arames são produzidos a partir de metais ou ligas metálicas e são fornecidos normalmente em bobinas e só podem ser utilizados nos processos FS, AS, ou HVCW. A elaboração desses materiais exige um mínimo de ductilidade, visando a sua conformação mecânica. Sendo assim a quantidade de aditivos de elevada dureza que pode ser incorporado aos mesmos é bastante limitada, fazendo com que os revestimentos aspergidos a partir de arames maciços possam apresentar menores propriedades mecânicas (SCHIEFLER, 2004),



podendo citar como exemplo o arame 60T, o qual se trata de um arame maciço de aço cromo feito exclusivamente para *arc spray*.

Segundo Kreye (2001), um novo desenvolvimento na produção de arames tubulares baseia-se em tubos metálicos preenchidos com pó, antes de serem processados na forma de bobinas. Por exemplo, arames deste tipo podem ser fabricados a partir de tubos de ligas ferrosas preenchidos com pós contendo cromo (Cr), boro (B) e silício (Si) (SCHIEFLER, 2004) que é o caso do arame tubular UTP AF LEDURIT 68, o qual se trata de uma liga de carboneto de cromo de alta dureza.

As varetas sinterizadas a base de materiais cerâmicos são empregadas em menor escala que os pós cerâmicos. Uma desvantagem é a forma descontínua com a qual elas são alimentadas, o que inevitavelmente provoca variações microestruturais nas regiões onde o processo foi interrompido e depois reiniciado (LIMA, 2001).

#### **4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA**

A bucha utilizada para o estudo está situada em uma bomba de água centrífuga, possui uma vazão de 700 m<sup>3</sup>/h com uma rotação de 1700 rpm, sua pressão de saída está entre 5 e 6 kgf.

A figura 4.1 mostra o desenho esquemático de uma bomba de água, onde podem ser observados seus principais aspectos construtivos como: a localização da bucha, o eixo, a gaxeta e o rotor.

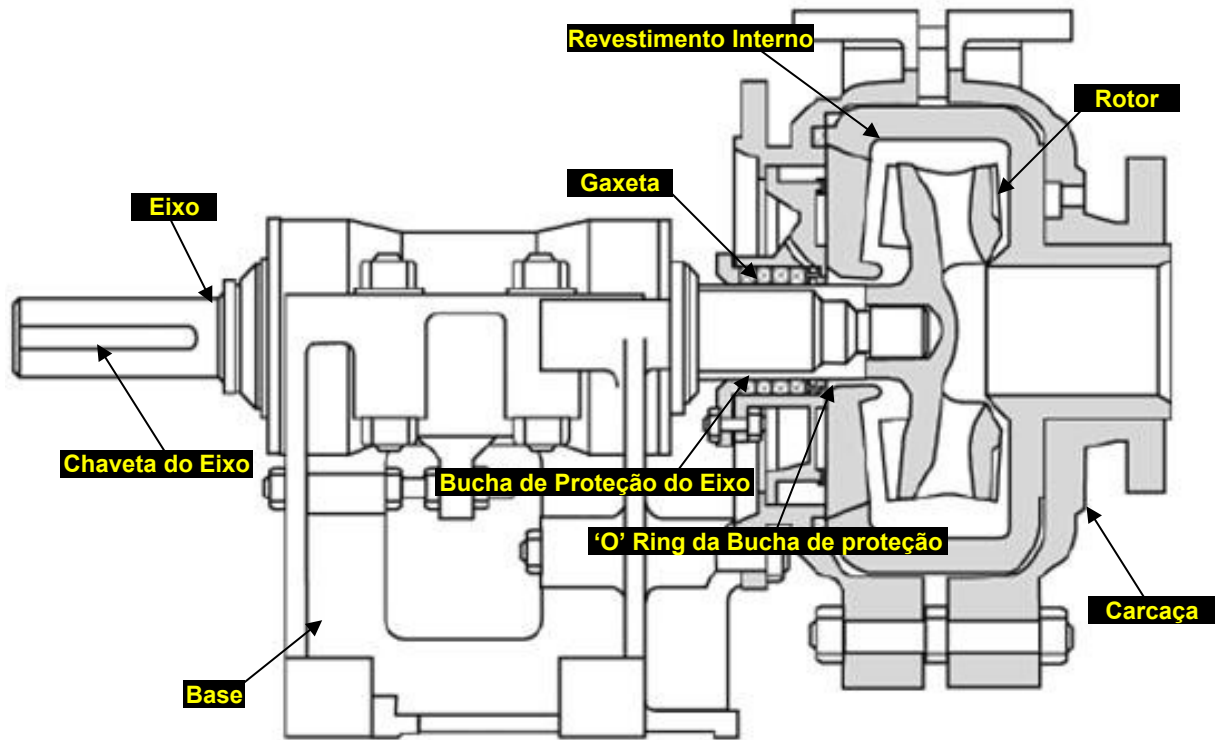


Figura 4.1 – Desenho esquemático da bomba de água marca Warman, tipo AH.

Fonte: WARMAN, 2009.

A figura 4.2 mostra os aspectos superficiais mais comumente encontrados nas buchas acopladas ao eixo das bombas retirados de operação, as quais trabalham em condições de temperatura em torno de  $70^{\circ}\text{C}$ , é possível distinguir as áreas onde houve contato entre a gaxeta e a bucha, onde nota-se o desgaste superficial.

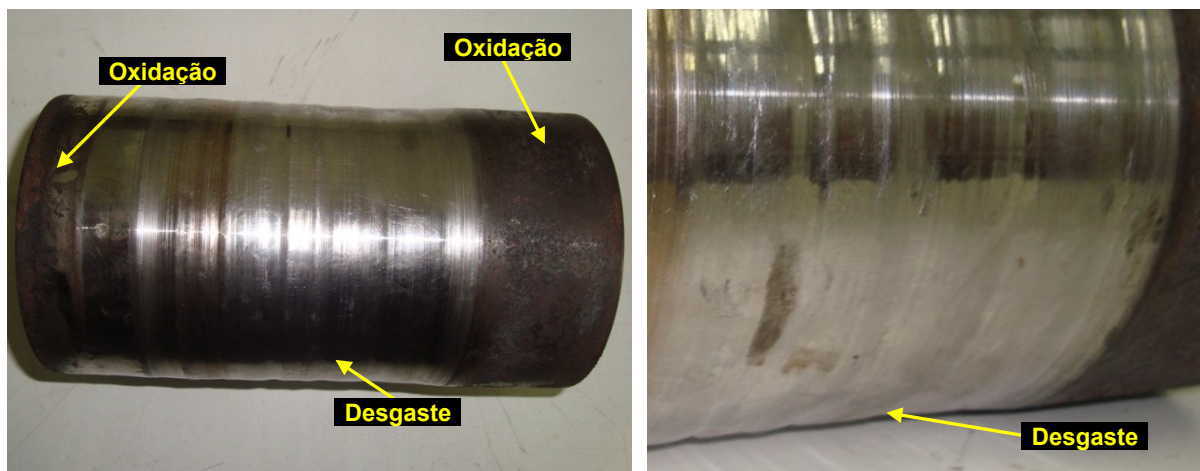


Figura 4.2 - Formas e aparências da bucha retirada de operação.

A rotação do eixo e o fluxo de água no interior da tubulação originam uma

turbulência, que conseqüentemente, causa vibração do eixo que por estarem muito próximas as gaxetas entram em contato com os mesmos ocorrendo desgaste e conseqüentemente a perda de material. A remoção de material da superfície das buchas aumentará a folga entre o eixo e a gaxeta, possibilitando o aumento da frequência de vibração e aumentando o desgaste. As condições extremas operacionais dão início a um processo de desgaste e corrosão, originando sulcos, estrias ou rugosidade excessiva na bucha, possibilitando riscos operacionais que comprometem o seu funcionamento, podendo apresentar defeitos como: vazamento excessivo na vedação do eixo, perda da eficiência e ruído.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

Serão apresentados neste capítulo os procedimentos utilizados para a realização do trabalho, entre eles estão o estudo dos materiais empregados, estudo do processo de aspersão térmica realizado, estudo sobre o ensaio de desgaste, entre outros.

### **5.1 Estudos dos Materiais Empregados**

O material de base dos estudos utilizado nos experimentos é o mesmo empregado atualmente na confecção das buchas de proteção do eixo da bomba de água. Trata-se de um aço inoxidável martensítico AISI 420 na condição temperado e revenido.

Foram realizados e preparados corpos de prova, os destinados à aspersão térmica foram sujeitos a um jateamento superficial e em seguida aspergidos. O restante dos corpos de prova foram temperados e revenidos.

Segue descrição detalhada dos materiais e equipamentos adotados na realização dos experimentos.

### 5.1.1 Metal de Base (Substrato)

Foi utilizado como substrato para os corpos de prova o aço inoxidável martensítico AISI 420. A tabela 5.1 mostra a composição química do material empregado.

Tabela 5.1 – Composição química (%) do aço AISI 420

C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	Mo	Ni	Pb	Fe	Zn
Mais de 0,15	1,00 max.	1,00 max.	0,04 max.	0,03 max.	--	--	12 a 14	--	--	--	equilíbrio	--

Fonte: PINEDO, 2009.

### 5.1.2 Metal de Deposição por Aspersão Térmica

Utilizou-se como material de deposição por aspersão térmica os arames de 1,6 mm de diâmetro UTP AF LEDURIT 68 e 60T aço cromo, para o estudo comparativo da eficiência contra o desgaste em relação ao aço AISI 420 temperado e revenido.

O Revestimento UTP AF LEDURIT 68 trata-se de uma liga de carboneto de cromo com alta dureza em torno de 63 a 65 HRC, desenvolvido para trabalhos onde se apresenta desgaste abrasivo extremamente alto. Na tabela 5.2 têm-se a composição química do arame UTP AF LEDURIT 68.

Tabela 5.2 – Composição química (%) do arame UTP AF LEDURIT 68.

C	Si	Mn	Cr	Nb
5,5	0,3	0,3	22	7

Fonte: BOEHLER TYSSEN,2009.

Outro revestimento utilizado foi o 60T aço cromo que trata-se de um arame de 13 % de cromo, feito exclusivamente para *arc spray*, utilizado para camisas de cilindro, pistões, mancais de virabrequim, cilindros hidráulicos, e numerosos outros elementos de máquinas, devido a sua resistência ao desgaste, baixa retração e também com o seu alto teor de cromo proporciona resistência à oxidação a alta temperatura e fornece uma quantidade razoável de proteção contra a corrosão. Possui uma dureza em torno de 40 a 43 HRC, cuja composição química encontra-se na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Composição química (%) do arame 60T aço cromo.

Carbono	Fósforo	Enxofre	Manganês	Níquel	Cromo	Silício	Ferro
0,3	--	--	1,0	1,0	12/14	0,08	equilíbrio

Fonte: PRAXAIR AND Tafa, 2009.

## 5.2 Preparação dos Corpos de Prova

Foram preparados dois tipos de corpos de prova para realização dos experimentos. Um com geometria cilíndrica (disco), para ser submetido ao teste de desgaste demonstrado na figura 5.1a e outro com geometria retangular para a análise metalográfica e microdureza na figura 5.1b.

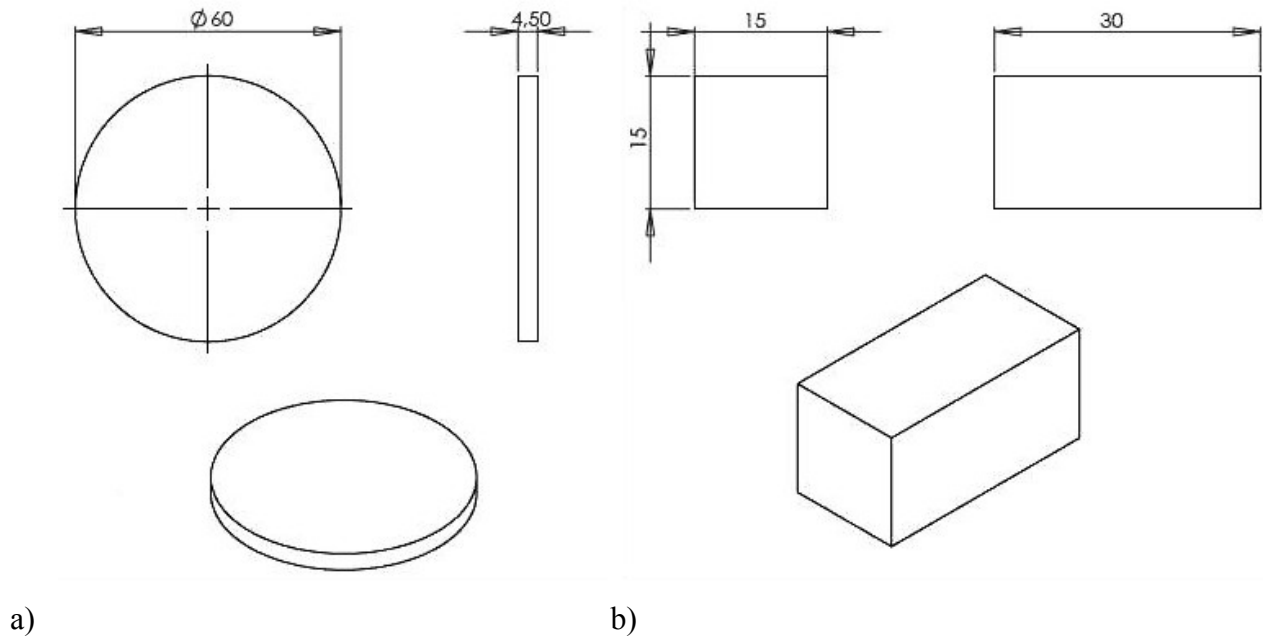


Figura 5.1 – Tipos de corpos de prova utilizados

a: Corpo de prova tipo disco para ensaio de desgaste

b: corpo de prova tipo barra retangular para ensaio metalográfico e microdureza

A tabela 5.4 apresenta a identificação e quantidade dos corpos de prova utilizados.

Tabela 5.4 – Identificação e quantidade de corpos de prova para ensaios de metalografia, dureza e desgaste.

Identificação dos Corpos de Prova	Subdivisão	Quantidade e	Tipo	Estado de Fornecimento	Ensaio
N° 01	Disco 1.1	3	Disco	Aspergido UTP AF LEDURIT 68	Desgaste
	Disco 1.2				
	Disco 1.3				
N° 01	Amostra 1.1	1	Barra Retangular	Aspergido UTP AF LEDURIT 68	Metalografia – Microdureza
	Amostra 1.2				
N° 02	Disco 2.1	3	Disco	Aspergido 60T aço cromo	Desgaste
	Disco 2.2				
	Disco 2.3				
N° 02	Amostra 2.1	1	Barra Retangular	Aspergido 60T aço cromo	Metalografia – Microdureza

	Amostra 2.2		r		
N° 03	Disco 3.1	3	Disco	Temperado – Revenido	Desgaste
	Disco 3.2				
	Disco 3.3				

### 5.3 Procedimento para Jateamento

Os corpos de prova destinados à aspersão térmica foram submetidos a um jateamento superficial de modo a melhorar a adesão da camada a ser aspergida.

Foi utilizado granalha de bauxita sinterizada de composição química mostrada na tabela 5.5 da marca tecjato tipo tecblast 12/20, contendo um grau de dureza 9 na escala mohs e um grau de abrasão alto.

Tabela 5.5 – Composição química (%) da granalha Tecjato, Tecblast 12/20.

Elemento Químico	Percentual
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de alumínio)	78,20 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (óxido de ferro)	13,00 %
SiO <sub>2</sub> (óxido de silício)	4,21 %
TiO <sub>2</sub> (óxido de titânio)	1,82 %
CaO+MgO (óxido de cálcio + magnésio)	0,22 %
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O (óxido de potássio+ sódio)	0,83 %

Fonte: Tecblast.

### 5.4 Aspersão Térmica

A aspersão térmica foi efetuada logo após o jateamento, evitando a oxidação da superfície. A seguir têm-se as etapas, parâmetros e equipamentos utilizados.

#### 5.4.1 Pré-aquecimento

Após a fixação do corpo de prova na bancada montada para a aspersão, foi efetuado o pré-aquecimento a chama, visto na figura 5.2.

A temperatura de pré-aquecimento dos corpos de prova variam em torno de 100°C. O pré-aquecimento foi feito antes da aspersão térmica, o qual visa proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade retidos na superfície do metal, favorecendo a redução das tensões internas, que por sua vez, influencia na coesão da camada aspergida.

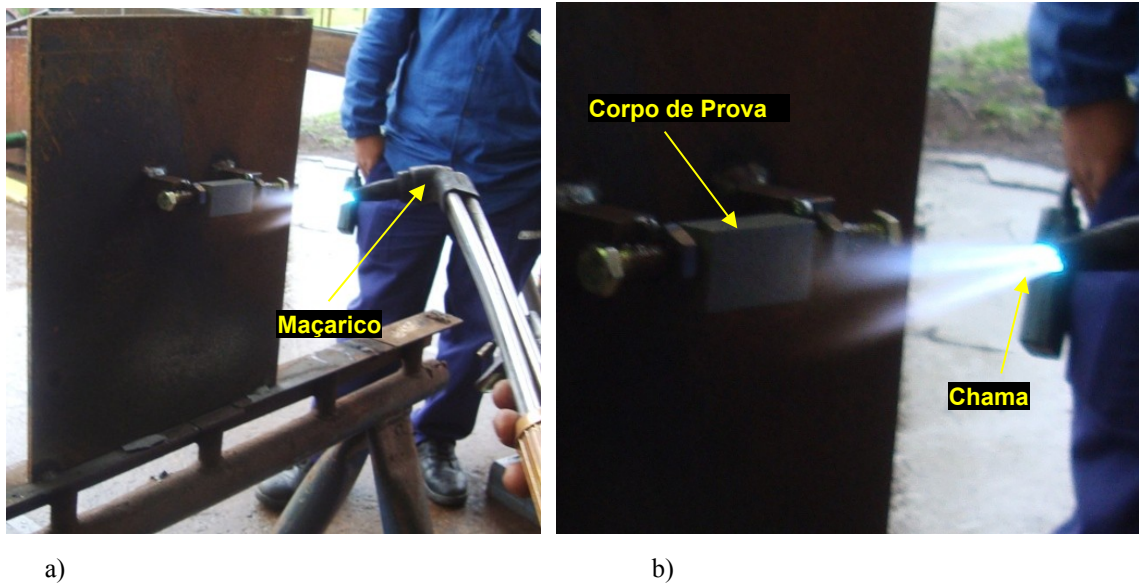


Figura 5.2 – Pré-aquecimento dos corpos de prova.

a: vista geral do pré-aquecimento, b: vista da chama em contato com o corpo de prova.

#### 5.4.2 Equipamentos e Parâmetros para Aspersão Térmica

No processo de aspersão térmica, foi utilizado para a deposição das camadas uma máquina de aspersão térmica a arco elétrico – *ASP (Arc Spray Process)* da marca TBA, modelo ARC-SPRAY 300, conforme a figura 5.3.

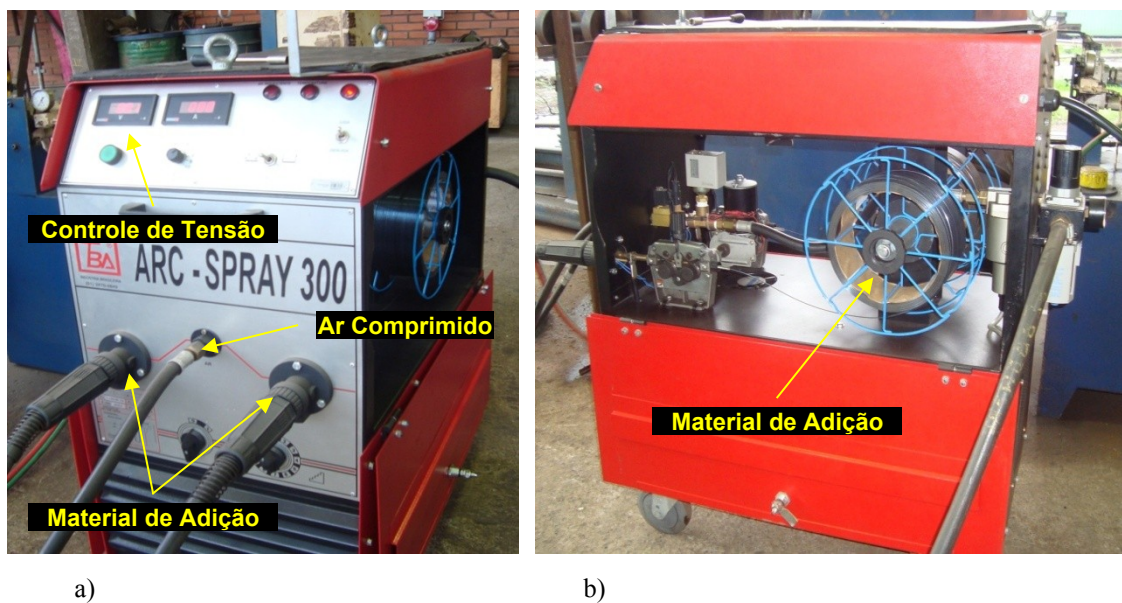


Figura 5.3 – Máquina de aspersão térmica a arco elétrico, modelo ARC-SPRAY 300.

a: vista frontal dos comandos, b: alimentação do arame.



Inicialmente foram aspergidos os corpos de prova n° 01, utilizando o arame tubular de UTP AF LEDURIT 68, logo após foi feita a mudança dos rolos de arames, e na sequência à aspersão dos corpos de prova n° 02. Os parâmetros do processo utilizados estão descritos na tabela 5.6.

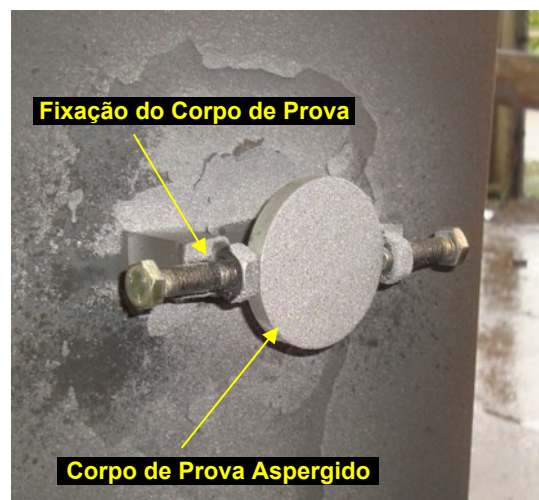
Tabela 5.6 – Parâmetros utilizados para aspersão dos corpos de prova.

PARÂMETROS	Corpos de Prova n°01 Revestimento UTP AF LEDURIT 68	Corpos de Prova n° 02 Revestimento 60T Aço Cromo
Diâmetro do arame	1,6 mm	1,6 mm
Distância da pistola/peça	200 mm	200 mm
Pressão do ar	6,0 bar	6,0 bar
Corrente	240 A	210 A
Tensão	38,5 V	38,5 V
Velocidade do arame	8 m/min	8 m/min
Camada aspergida	±1mm	±1mm

Os corpos de prova n° 01 foram aspergidos em duas partes: primeiramente uma camada de 0,8 mm e posteriormente outra camada de 0,3 mm de espessura. Já para os corpos de prova n° 02, por se tratar de um outro material, foram aspergidos em uma única aplicação de aproximadamente 1mm de espessura. A figura 5.4 ilustra o processo de aspersão térmica dos corpos de prova.



a)



b)

Figura 5.4 – Aspersão térmica a arco elétrico.

a: corpo de prova em processo de aspersão, b: corpo de prova após a aspersão.

## 5.5 Têmpera e Revenimento

Os corpos de prova n° 03 foram preparados com as mesmas as condições utilizadas atualmente nas buchas, temperados e revenidos, servindo de referencia para os demais corpos de prova. Foi utilizado um forno tipo mufla (figura 5.5a) para a realização da têmpera e posteriormente o revenimento. A têmpera foi realizada deixando os corpos de prova n° 03 a uma temperatura de 990°C por 20 minutos, o mesmo parâmetro empregado nas buchas atualmente, aproximadamente 1 hora por polegada, e posteriormente resfriados em óleo.

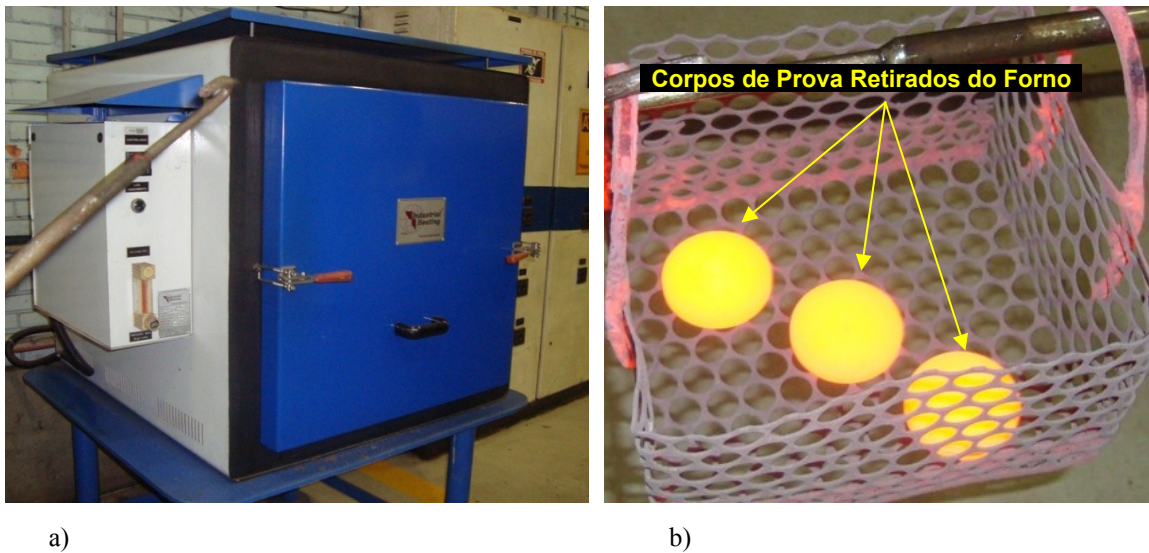


Figura 5.5 – Tratamento térmico.

a: forno tipo mufla, marca Industrial Heating b: corpos de prova retirados do forno.

O processo de têmpera elevou demasiadamente a dureza e fragilizou os corpos de prova. Para a redução da fragilidade do material fez-se o revenimento, a uma temperatura de 590°C por 20 minutos. A figura 5.6 mostra o ensaio de dureza realizado nos corpos de prova submetidos ao tratamento térmico.

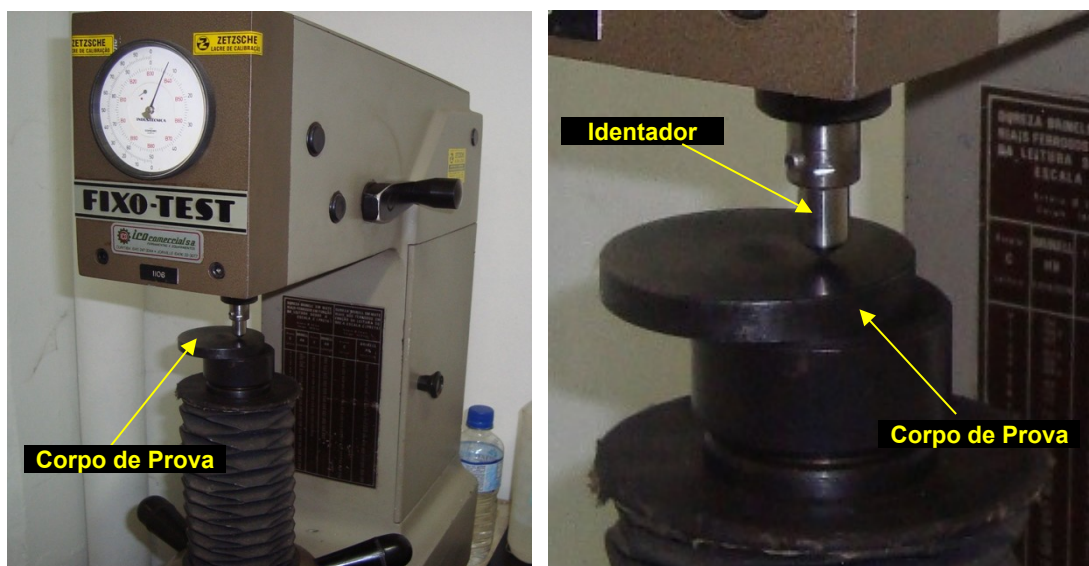


Figura 5.6 – Durômetro Fixo-Test

## 5.6 Caracterização

Para caracterização, foi realizado estudo das análises dos corpos de prova onde foram submetidos a ensaios metalográficos e ensaios de microdureza.

### 5.6.1 Metalografia

Para análise e observação da microestrutura, bem como possíveis defeitos no revestimento, foram preparados os corpos de prova para metalografia. Esta análise possibilita observar e medir a espessura da camada aspergida, determinar níveis de porosidade e óxidos formados durante a aspersão e finalmente a observação da interface entre o revestimento e o substrato.

Na preparação dos corpos de prova teve-se o cuidado de não produzir defeitos nas camadas que não sejam verdadeiros, como defeitos fabricados durante as etapas de: seccionamento, lixamento ou polimento, enfim defeitos originados durante a preparação metalográfica.

Os corpos de prova foram seccionados transversalmente em uma cortadora metalográfica refrigerada, tomando-se muito cuidado nos seguintes pontos:

- a. Direção do corte: do revestimento ao substrato;

b. Pequena aplicação da pressão de corte a fim de não se produzir trincas ou deslocamento do revestimento.

### 5.6.2 Microdureza

Após os procedimentos de lixamento e polimento dos corpos de prova a microdureza dos revestimentos foi determinada por intermédio de ensaios de microdureza Vickers. O equipamento utilizado foi um microdurômetro – HMV – Micro Hardness Tester – Shimadzu. Segundo norma DIN 50133 utilizou-se uma pirâmide de diamante como penetrador e carga de 0,5 kgf e um tempo de penetração (carga) de 15 segundos. Foram realizadas medições ao longo da seção longitudinal dos revestimentos aspergidos, em regiões diferentes, a fim de se determinar com maior precisão possível a distribuição dos valores de microdureza.

## 5.7 Ensaio de Desgaste

Com objetivo de avaliar as taxas de desgaste por deslizamento de revestimentos aspergidos sobre um aço AISI 420, foi adotado como forma de ensaio o sistema “pino sobre disco”. Foi utilizado uma máquina de ensaio pino sobre disco chamado tribômetro, conforme figura 5.7.

O ensaio simula as condições severas de desgaste em componentes mecânicos de acordo com a norma ASTM G99-95. Neste equipamento, o ensaio foi realizado com uma distância total de deslizamento constante, com um determinado valor de carga normal sobre o pino, a uma velocidade de deslizamento constante e condições de temperatura e umidade controladas.



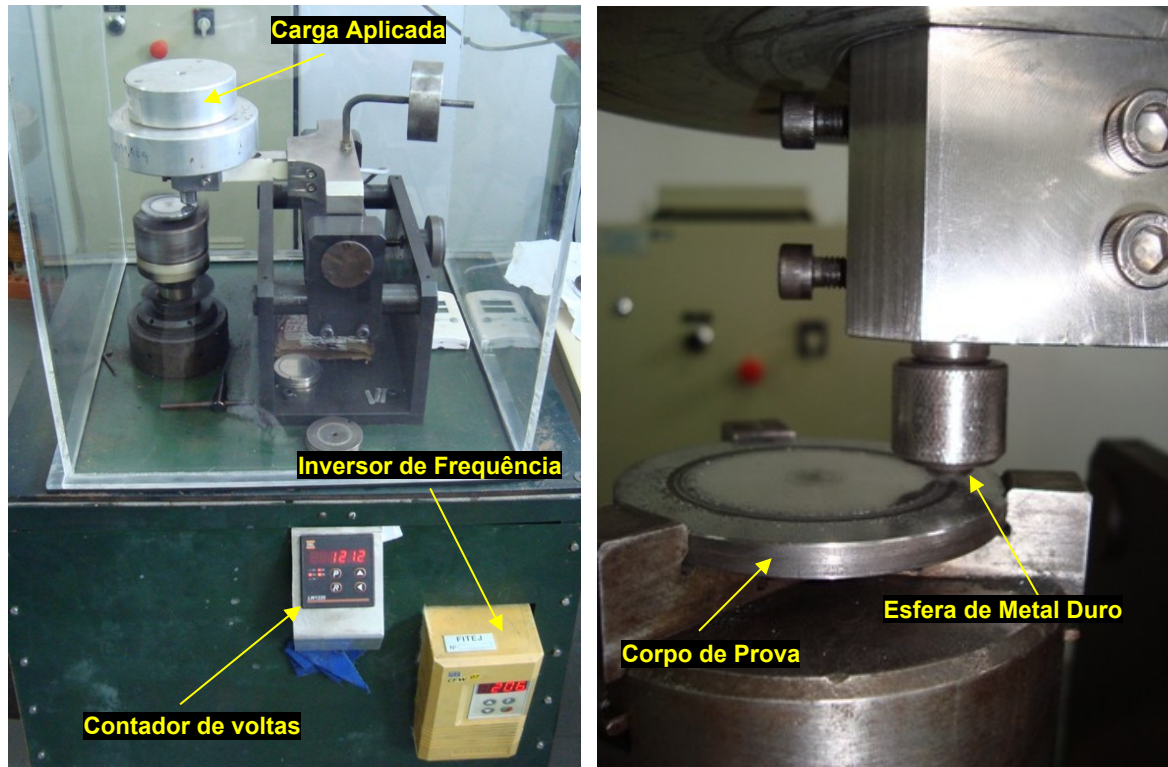


Figura 5.7 – Tribômetro pino sobre disco.

Para o ensaio de desgaste pino sobre disco, os corpos de prova foram retificados após a operação de aspersão térmica, a fim de produzir uma rugosidade adequada. A rugosidade média foi determinada por meio de um rugosímetro digital SJ-201P – Mitutoyo – figura 5.8.



Figura 5.8 - Rugosímetro digital SJ-201P – Mitutoyo.

Os diferentes discos de corpos de prova foram testados contra um pino cuja ponta é uma esfera de metal duro WC-Co de diâmetro 9,75 mm, microdureza Vickers 1500 HV<sub>0,5</sub> e

carga normal no pino de 29 N e 63 N. Foi utilizada uma velocidade de deslizamento de 0,455 m/s ( 206 rpm ), numa pista de deslizamento de 42 mm de diâmetro, dentro de uma câmara fechada com sílica gel usada para remover e controlar a umidade do ar.

Os corpos de prova foram limpos com acetona a fim de eliminar quaisquer vestígios de sujeira ou oxidação. E em seguida, pino e disco foram pesados em uma balança analítica com resolução de 0,1 mg e erro máximo de 0,2 mg, para a determinação de sua massa inicial antes do ensaio.

A distância total percorrida no ensaio para cada disco foi de 3000 metros sendo que a cada intervalo de 300 metros o ensaio foi interrompido e realizou-se a medida de temperatura e da umidade relativa do ar através do Termo Higrômetro - Marca Incoterm. Logo em seguida o disco foi removido e passado um jato de ar comprimido para retirada das partículas depositadas na superfície do mesmo, após cada ensaio foi feito à medição da perda de massa do disco e do pino de esfera de metal duro por meio da balança analítica.

Foi utilizada uma balança analítica com precisão máxima a 220 gramas, marca KERN 870 para a determinação da perda de massa. Os detalhes da posição do corpo de prova, carga e pino (esfera) de metal duro WC-Co podem ser observados na figura 5.9.

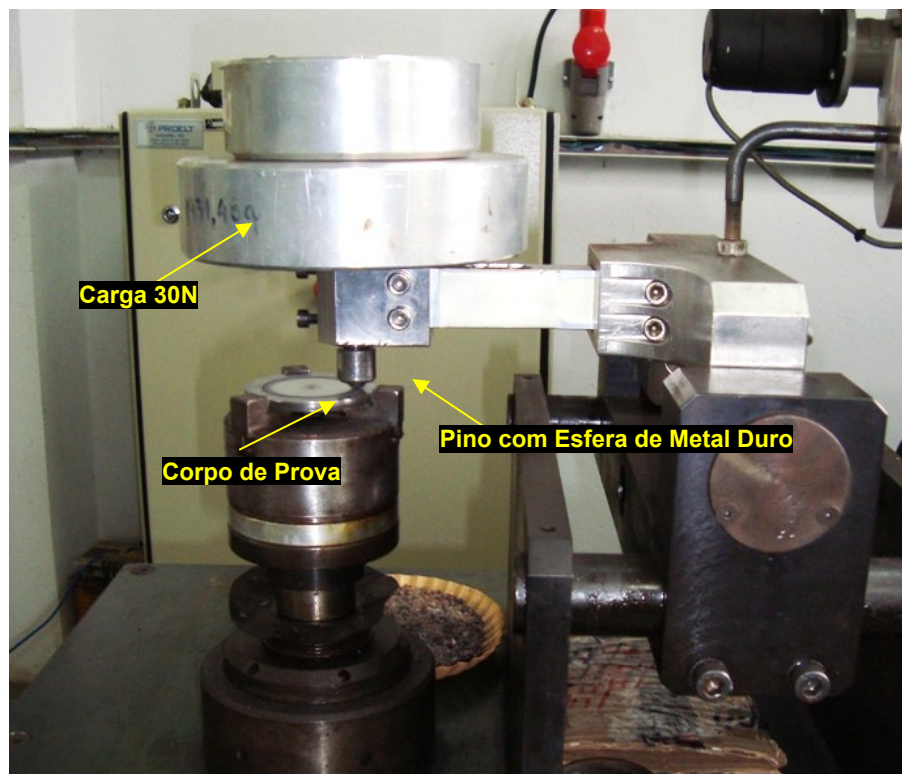


Figura 5.9 – Detalhe da carga de 30N sobre o corpo de prova para o ensaio de desgaste.

Concluído os ensaios de cada disco todos os dados foram digitados em uma planilha no Microsoft Excel a fim de observar o comportamento das curvas de cada um dos discos ensaiados. As curvas traçadas foram: distância percorrida versus perda de volume cumulativo e distância percorrida versus largura da pista.

Para os ensaios de microdureza Vickers (HV) foi utilizado um micro durômetro digital, com penetrador de diamante e carga de 500 gramas – marca Mitutoyo. Nestes ensaios observou-se nos discos a variação de dureza na região central da pista de desgaste (onde ocorreu o desgaste) e a dureza na mesma superfície, na região fora da pista de desgaste.

Foi utilizado microscópio para identificar os principais mecanismos de desgaste atuantes. As micrografias das pistas de desgastes de alguns corpos de prova foram analisadas por intermédio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca CARL ZEISS modelo 940 para a análise dos principais mecanismos de desgastes ocorridos no ensaio de desgaste pino sobre disco.

## **6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Este capítulo apresenta uma discussão dos estudos dos resultados experimentalmente obtidos do tratamento térmico, da aspersão térmica, das microestruturas dos materiais e do ensaio de desgaste.

### **6.1 Tratamento Térmico**

As condições operacionais de tratamento térmico das buchas originais foram reproduzidas nos três corpos de prova nº 03 destinados ao ensaio de desgaste. O processo de têmpera deixou os corpos de prova com uma dureza em torno de 560 HB, após a têmpera fez-se o revenimento o qual atingiu uma dureza média de 350 HB.

### **6.2 Problema Inicial**

No primeiro corpo de prova submetido à aspersão térmica com material de adição UTP AF LEDURIT 68 encontrou-se um problema: a camada aspergida de aproximadamente 2 mm. A elevada espessura proporcionou o desprendimento da camada aspergida (figura 6.1).

A ocorrência deste fato fez com que se optasse por uma aspersão fragmentada e uma camada mais fina. Primeiramente aplica-se uma camada de aproximadamente 0,8 mm de espessura, e depois outra camada subsequente de aproximadamente 0,3 mm de espessura. Este procedimento foi aplicado em todos os corpos de prova nº 01, e este primeiro corpo de prova, que apresentou problema, retorna ao jateamento para depois ser aspergido novamente.

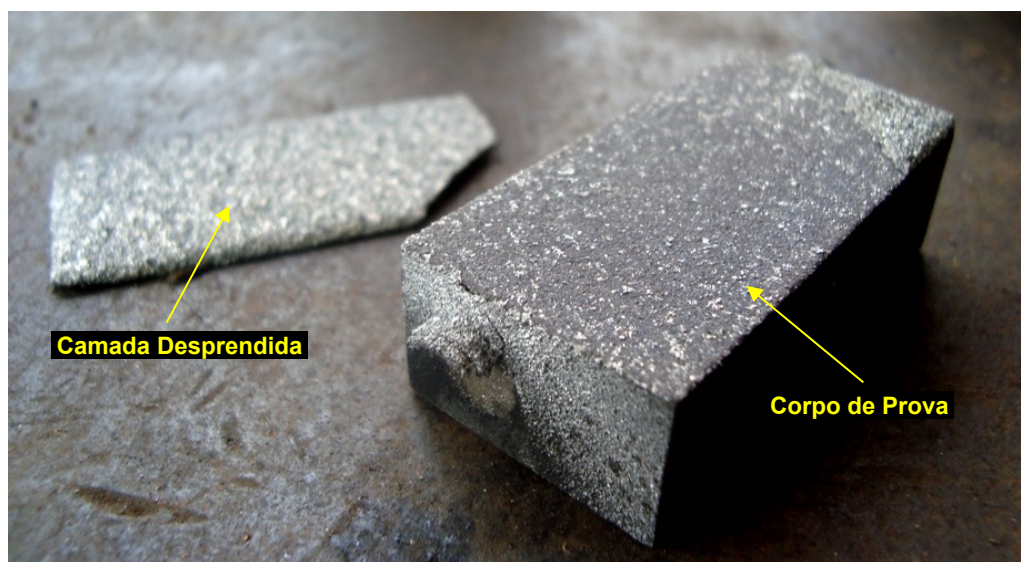


Figura 6.1 – Camada aspergida desprendida do substrato.

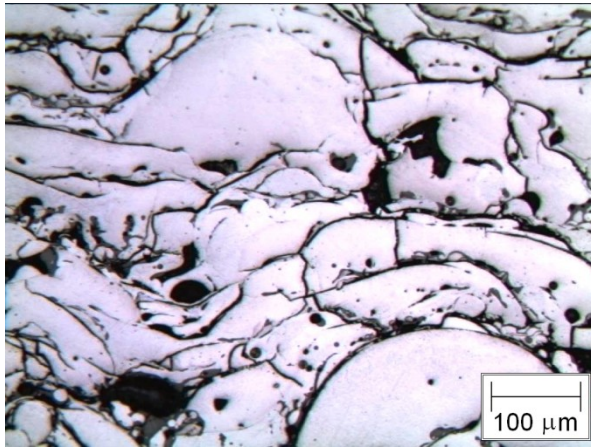
Com a medida tomada os outros corpos de prova não apresentaram problemas, todos aderiram ao substrato.

### 6.3 Microestruturas dos Revestimentos Aspergidos

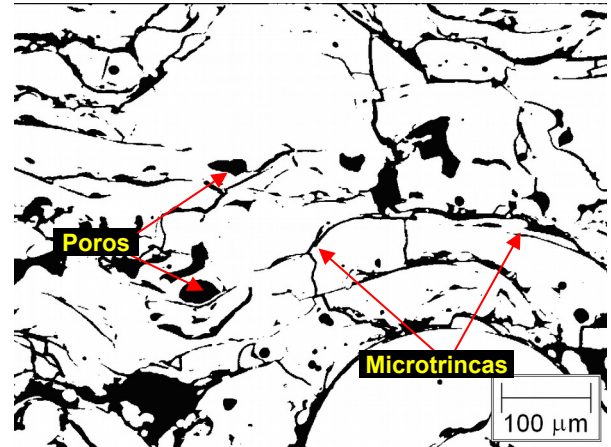
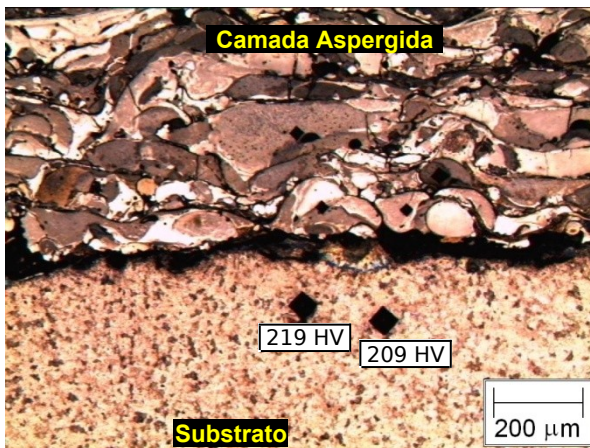
Nas observações dos corpos de prova nº 01 aspergidas com UTP AF LEDURIT 68, verifica-se que existe uma grande diferença entre os níveis de microdureza do substrato e da camada aspergida, como consequência do elevado teor de carbono contido neste consumível.

Verifica-se ainda, em todas as amostras da figura 6.2 que dentro das lamelas que constituem a camada aspergida, existe uma grande variância nos níveis de dureza, indicando assim a formação de uma estrutura heterogênea, e de alta fragilidade, conforme pode ser observado na alta densidade de microtrincas nucleadas. Observa-se também via análise de imagens, a presença de 16,6% de porosidade e microtrincas, evidenciadas na amostra 1.1 binarizada (em preto e branco) da figura 6.2.

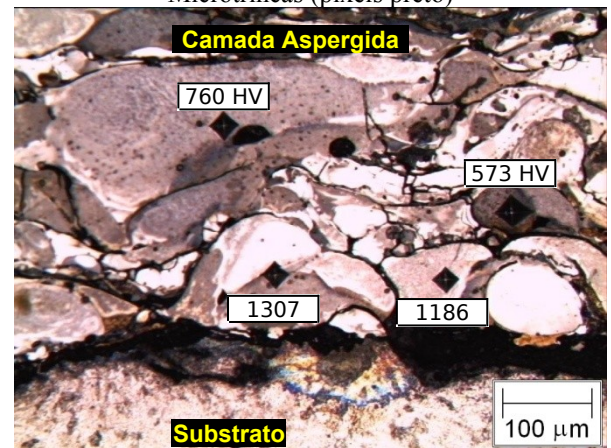




Amostra 1.1 – 200x.

Amostra 1.1 Binarizada: 16,6% porosidade +  
Microtrincas (pixels preto)

Amostra 1.2 – 100x.



Detalhes amostra 1.2 – 200x.

Figura 6.2 - Inspeção metalográfica corpo de prova nº 01 revestido com UTP AF LEDURIT 68.

Os corpos de prova nº 02, aspergidos com metal de adição da série 60 T apresentam níveis de durezas mais próximos das observadas no substrato, na camada aspergida apresenta uma média de 286 HV e no substrato uma média de 252 HV (amostra 2.2 da figura 6.3), bem como ausência de trincas como anteriormente observado na figura 6.2, garantindo uma melhor coesão entre as lamelas da camada aspergida. Verifica-se também uma melhora na densidade, retratada pelo nível de porosidade em torno de 13,3 %.

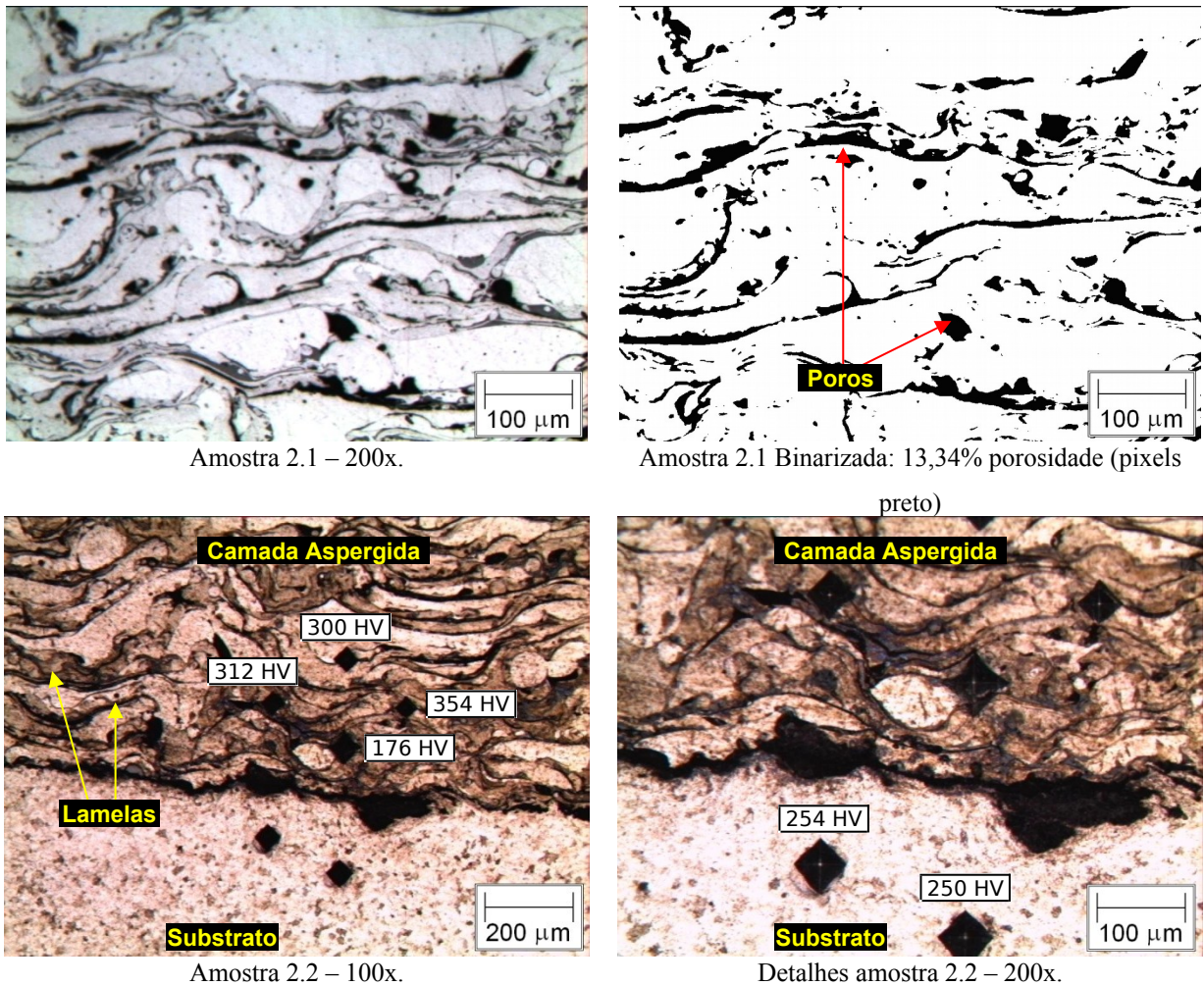


Figura 6.3 - Inspeção metalográfica corpo de prova n° 02 revestido com 60T.

#### 6.4 Ensaios de Desgaste

As tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 demonstram os valores do ensaio de microdureza Vickers (HV) e rugosidade dos corpos de prova dos 9 discos na superfície que foi submetida ao ensaio de desgaste pino sobre disco em uma região fora da pista. As amostras referentes aos corpos de provas n° 01 (tabela 6.1), com revestimento UTP AF LEDURIT 68, apresentaram rugosidade acima da requisitada na norma ASTM G99-95, que preconiza abaixo de  $R_a = 0,8 \mu\text{m}$ .

Tabela 6.1 – Corpos de prova n° 1, revestido com UTP AF LEDURIT 68, espessura filme de 0,80 mm. Carga de 500g

Ensaio de Microdureza Vickers			Rugosidade
Amostra	Valores	Média dos valores (HV)	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Nº 1.1	867,58 – 790,022	828,8	1,48 – 1,71
Nº 1.2	893,9 – 1061,53	977,7	1,24 – 2,55
Nº 1.3	592,18 – 517,17 – 676,05	595,13	1,99 – 3,04

Tabela 6.2 – Corpos de prova nº 2, revestido com 60T, espessura filme de 0,85 mm. Carga de 500g

Ensaio de Microdureza Vickers			Rugosidade
Amostra	Valores	Média dos valores (HV)	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Nº 2.1	408,37 – 273,118 – 448,29	376,60	0,39 – 0,61
Nº 2.2	614,57 – 443,62 – 505,579	521,3	0,45 – 0,28
Nº 2.3	412,55 – 410,427 – 384,63	402,54	0,40 – 0,36

Tabela 6.3 – Corpos de prova nº 3, temperado e revenido. Carga de 500g

Ensaio de Microdureza Vickers			Rugosidade
Amostra	Valores	Média dos valores (HV)	Ra ( $\mu\text{m}$ )
Nº 3.1	460,4 – 478,3 – 356,2	431,6	0,13 – 0,14
Nº 3.2	366,43 – 354,42 – 379,05	366,6	0,10 – 0,12
Nº 3.3	386,6 – 371,75 – 357,8	379,2	0,15 – 0,19

Os gráficos das figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7, demonstram os resultados experimentais dos ensaios de pino-sobre-disco, apresentando o comportamento ao desgaste dos discos.

As curvas relacionam a perda de volume cumulativo dos discos em função da distância de deslizamento percorrida pela esfera. Também mostram a variação do coeficiente de atrito ao longo da distância de deslizamento.

Os ensaios foram realizados na seguinte ordem, primeiramente os corpos de prova nº 03, em sequência os corpos de prova nº 02 e finalizando com os corpos de prova nº 01.

A figura 6.4 apresenta o ensaio de desgaste pino-sobre-disco de discos de aço AISI 420 utilizando somente tratamento térmico de têmpera e revenimento (corpo de prova nº 03). A carga normal é de 29 N. A curva mostra uma fase 1 inicial e uma fase 2 linear. Podemos observar um desgaste alto, com coeficiente de atrito de 0,90, acusando mecanismo de desgaste adesivo.



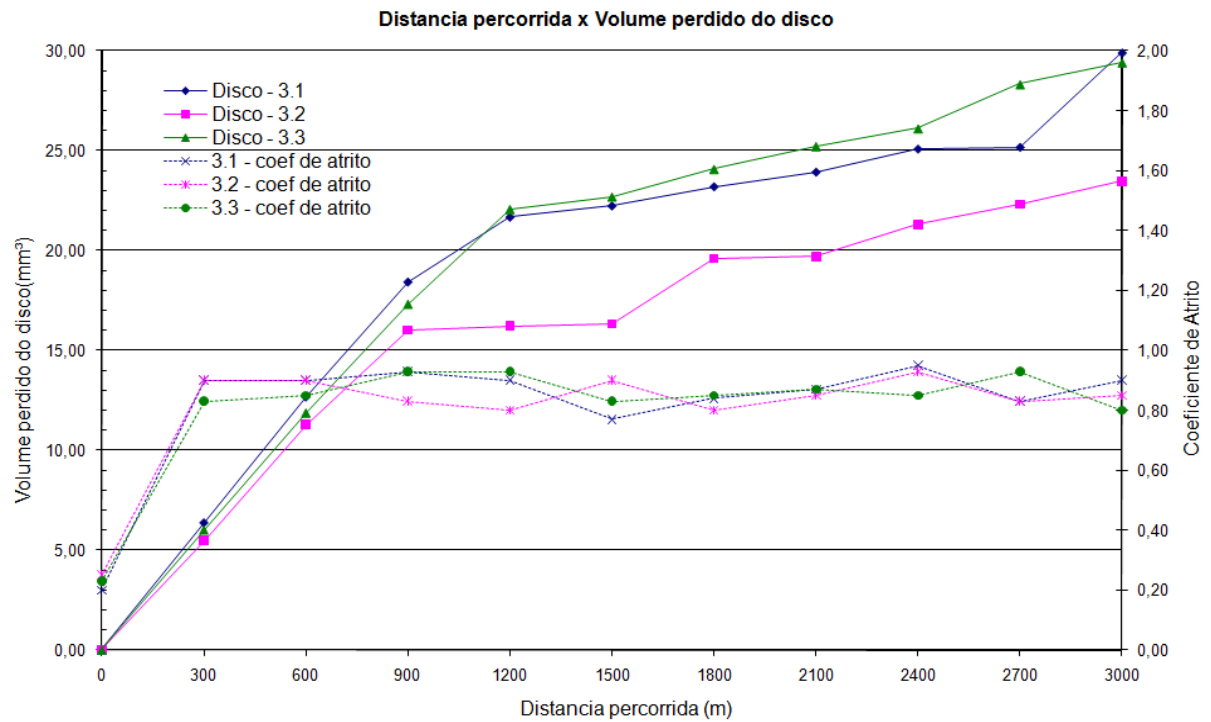


Figura 6.4 - Ensaio de desgaste do corpo de prova nº 03.

A figura 6.5, demonstra o ensaio de desgaste pino-sobre-disco de aço AISI 420 com revestimento de 60T. Nota-se que o disco 2.1 com uma carga de 29 N e nos discos 2.2 e 2.3 com uma carga maior de 63 N apresentaram taxa de desgaste muito pequena se comparadas com os demais discos, também, para ambas as cargas teve baixo coeficiente de atrito, uma media de 0,12, não apresentando desgaste adesivo.

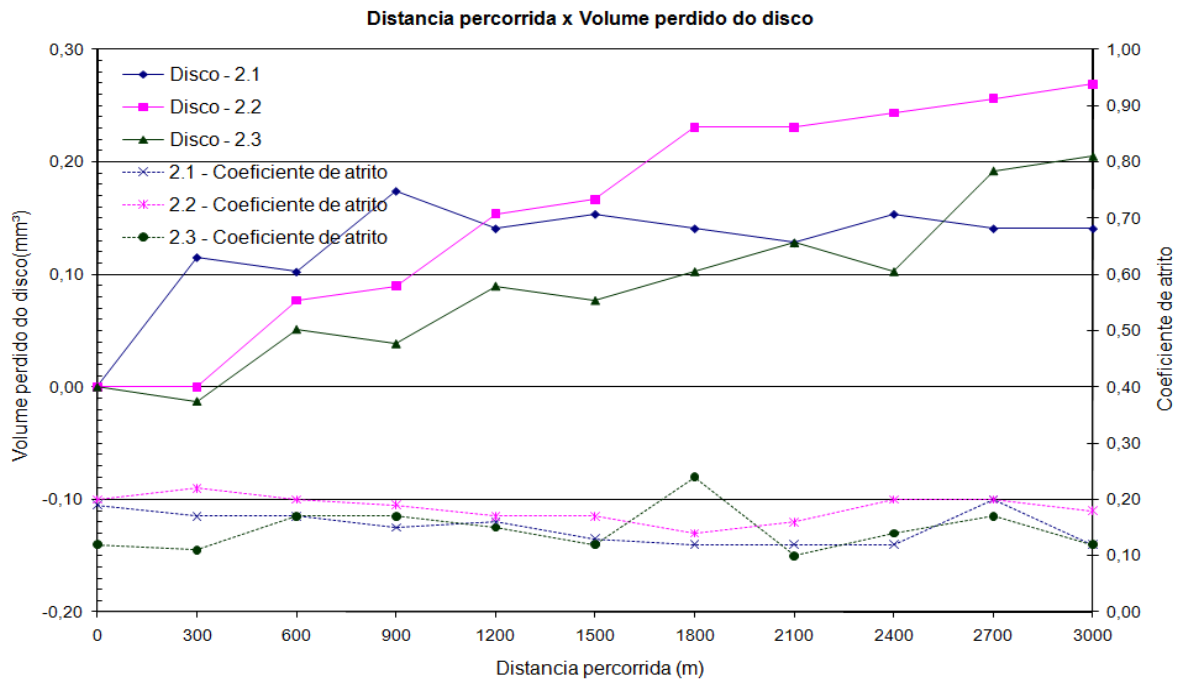


Figura 6.5 - Ensaio de desgaste do corpo de prova n°02.

O ensaio de desgaste apresentado na figura 6.6, demonstra o disco com revestimento de UTP AF LEDURIT 68, a carga normal foi de 63 N.

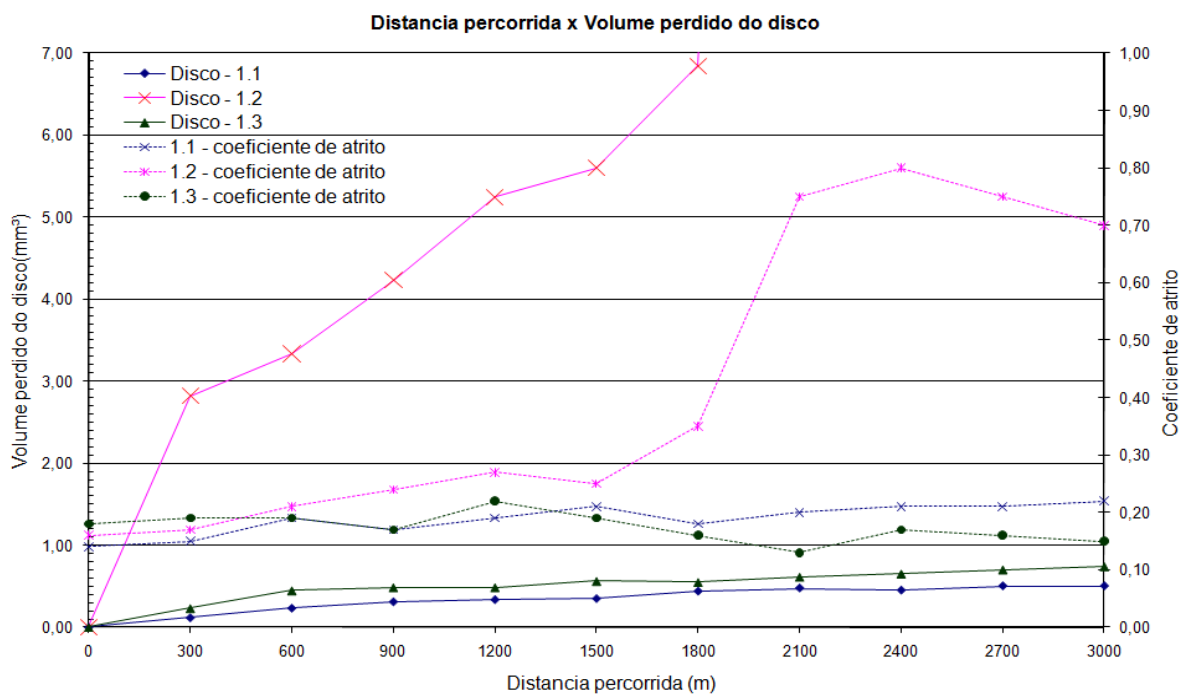


Figura 6.6 - Ensaio de desgaste do corpo de prova n° 01.

A figura 6.7 apresenta também o corpo de prova n°01, desprezando o disco 1.2 que apresentou uma grande perda de massa superficial devido à presença de micro-trincas iniciais originadas no processo de retificação do disco. Nota-se desgaste e coeficiente de atrito pequeno, mas superior ao corpo de prova n° 02.

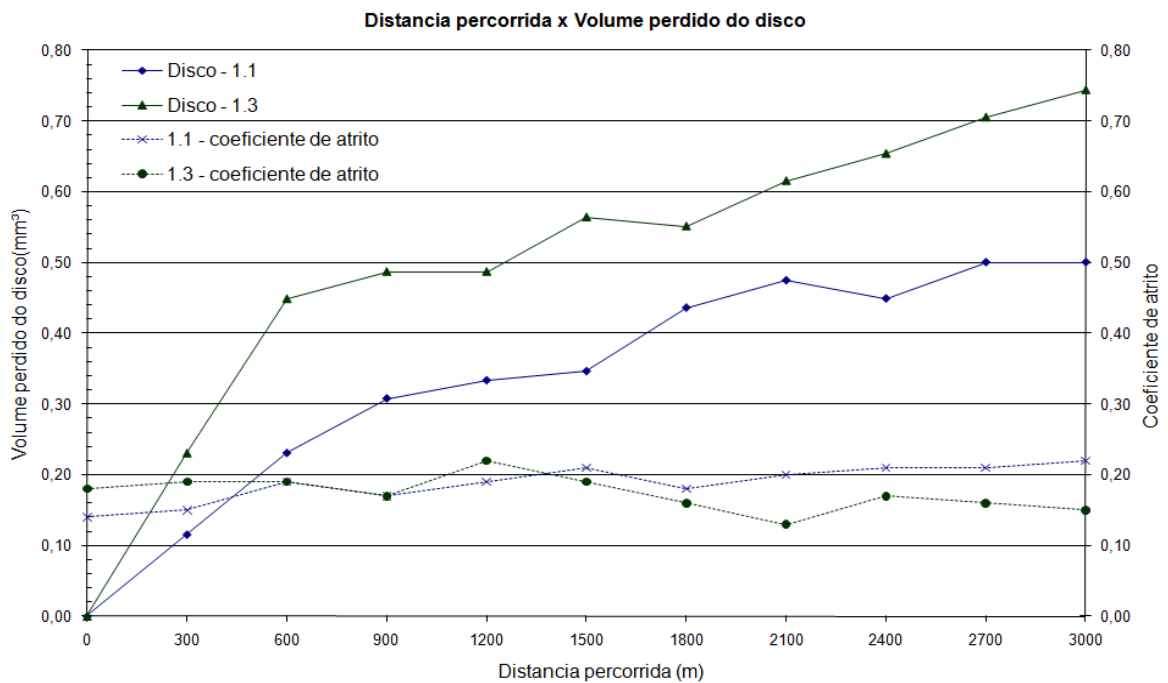


Figura 6.7 - Ensaio de desgaste do corpo de prova n° 01 desprezando o disco 1.2.

Em todos os casos, a esfera de metal duro sofreu um desgaste desprezível ou mínimo como se vê na figura 6.8, apresentando maior desgaste no corpo de prova n° 03 (temperado e revenido).

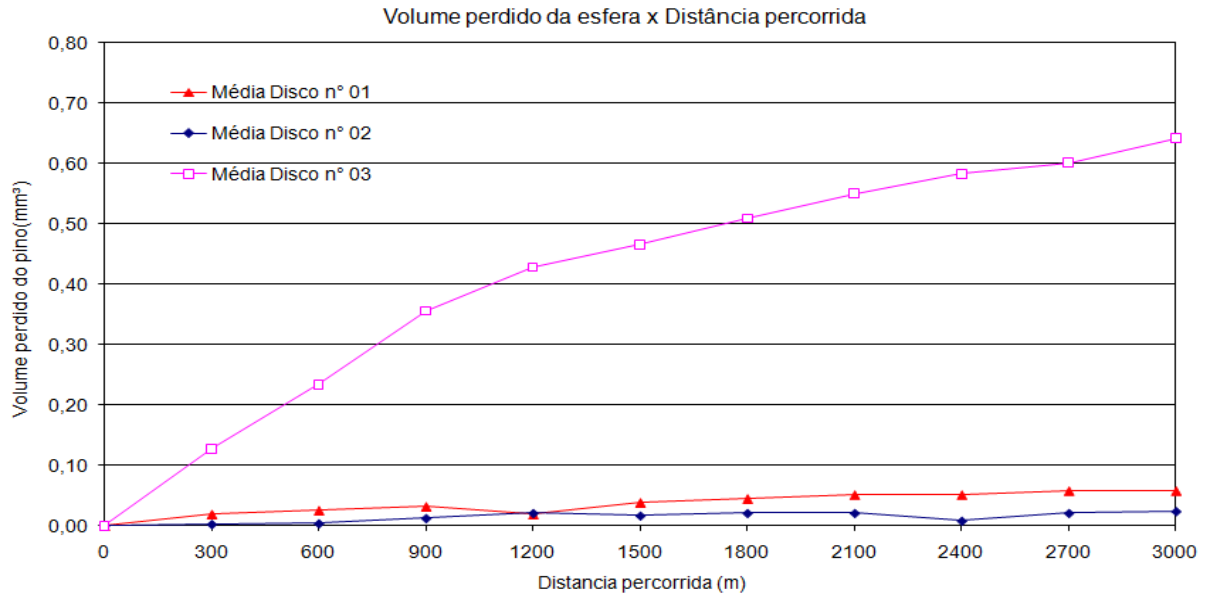


Figura 6.8 – Média de perda de volume acumulativo da esfera de metal duro versus a distância de deslizamento percorrida.

Na figura 6.9 está representado a média do volume perdido versus a distância percorrida de todos os discos ensaiados.

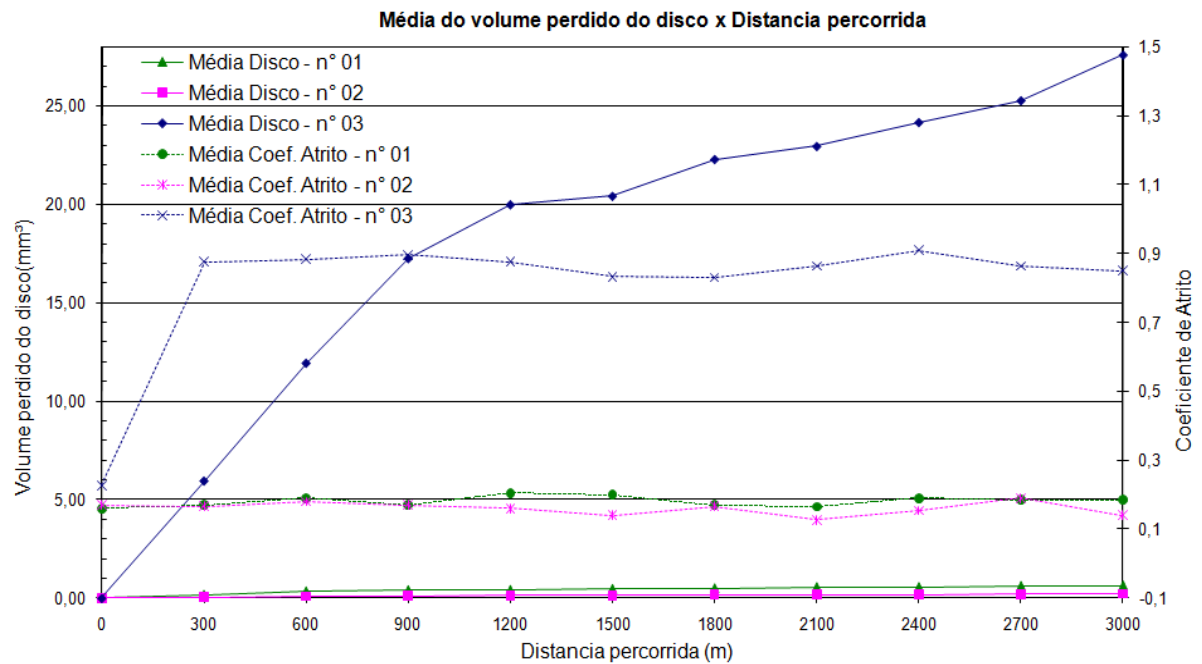


Figura 6.9 – Média de perda de volume acumulativo de todos os corpos de prova versus a distância de deslizamento percorrida.

Conforme a figura 6.9 pode observar que o desgaste dos corpos de prova de n° 01

(UTP AF LEDURIT 68) e nº 02 (60T) foram muito menores em relação ao corpo de prova nº 03 na condição de temperado e revenido, condição utilizada atualmente nas buchas de proteção do eixo.

Para análise dos principais mecanismos de desgaste e do baixo coeficiente de atrito dos discos nº 02, foram obtidas as micrografias dos discos que seguem nas figuras 6.10a e 6.11, onde mostram a superfície do revestimento 60T aço cromo e a pista de desgaste do disco 2.1 ensaiado. As micrografias foram obtidas pela análise da superfície do disco pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV). Nota-se a formação de micro-trincas, micro-riscagem e mecanismo de micro-delaminação ou deslocamento do filme, possivelmente devido ao processo de retificação realizado no disco. A causa da redução do atrito ao valor médio de 0,12 é dada pela baixa rugosidade que impediram a retirada de material da superfície, não ocorrendo um desgaste adesivo, também a causa pode ser dada pelo encruamento do material na pista do desgaste, deixando o material mais duro, impedindo a remoção de material da camada. Na figura 6.10b têm-se a micrografia obtida pelo MEV do disco 1.2 com revestimento UTP AF LEDURIT, apresentando muitas micro-trincas superficiais e poros provenientes do processo de retificação.

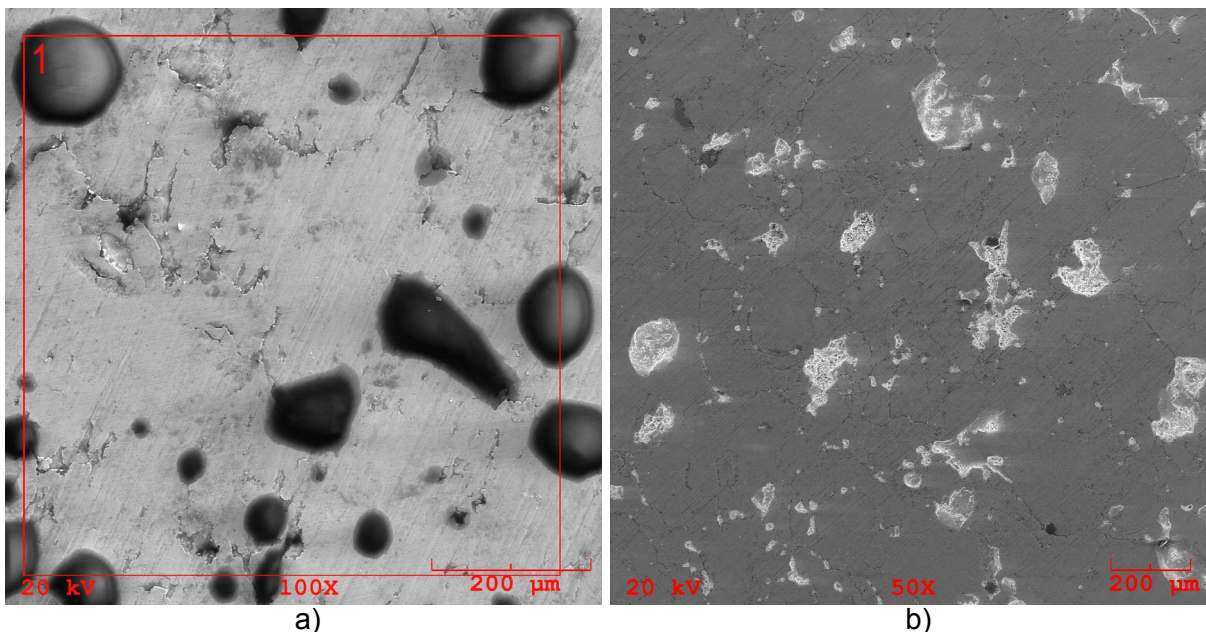


Figura 6.10 – Micrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV).

a: Centro do disco 2.1 com revestimento 60T. Aumento de 100x.

b: Centro do disco 1.2 com revestimento UTP AF LEDURIT. Aumento de 50x.



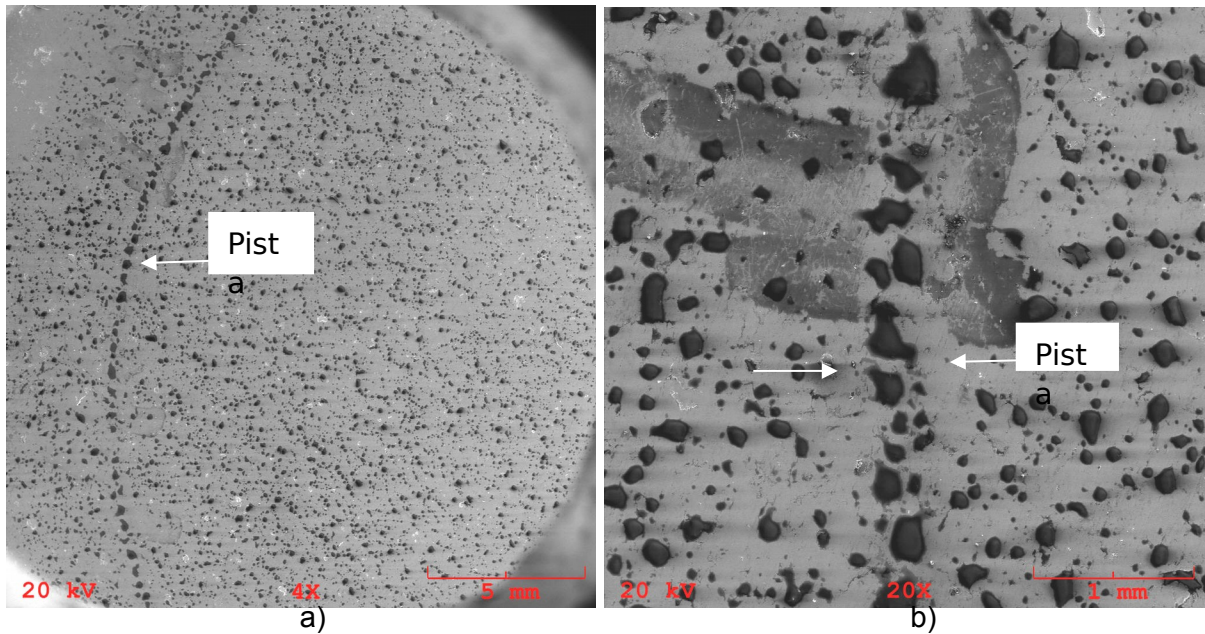


Figura 6.11 - Pista de desgaste do disco 2.1 com revestimento 60T.

a: Aumento de 4x. b: Aumento de 20x.

A figura 6.12 e a tabela 6.4 apresentam a análise química por EDX realizada no MEV da área do retângulo vermelho da Figura 6.10a, revelando um alto percentual de carbono, 22,19 %, na superfície da amostra, possivelmente proveniente do óleo de lubrificação do processo de retificação. Mostra também a presença de 8,952 % de Cr.

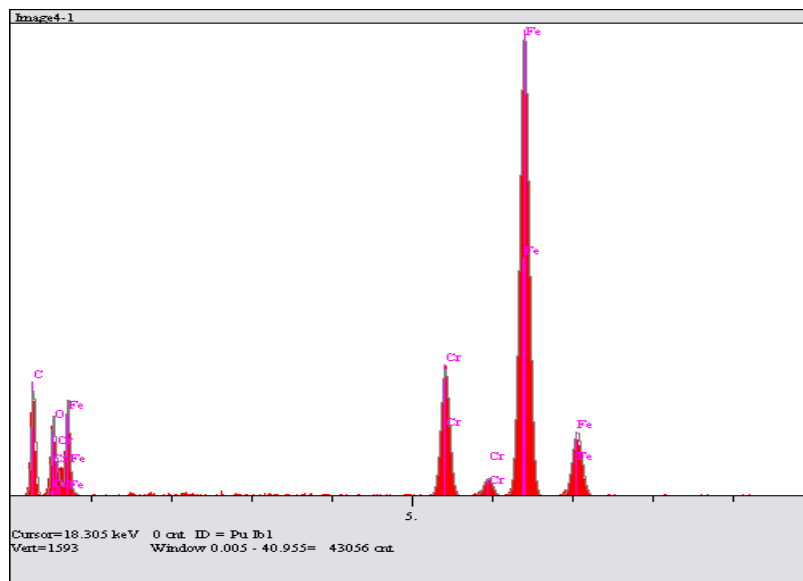


Figura 6.12 - Análise EDX da composição química da superfície do disco 2.1 revestido com 60 T aço cromo na área do retângulo vermelho da figura 6.10a.

Tabela 6.4 - Composição química obtida pela análise EDX da superfície do disco 2.1 revestido com 60 T aço cromo na área do retângulo vermelho da figura 6.10a.

Componente	Tipo	Mole Conc.	Concentração	Unidade (percentual em peso)
C	Calc	52.288	22.190	wt. %
O	Calc	11.131	6.293	wt. %
Fe	Calc	31.708	62.566	wt. %
Cr	Calc	4.873	8.952	wt. %
Total		100.000	100.000	wt. %

Com base nos resultados experimentais do ensaio de desgaste por deslizamento dos discos apresentados nos gráficos das figuras 6.4, 6.5, 6.6 e 6.7 e nas microdurezas medidas, observou-se na tabela 6.5, os seguintes valores de taxa média de desgaste  $Q$  e coeficiente de desgaste das superfícies  $K$ , juntamente com os valores de microdureza na região fora da pista e os valores de carga normal aplicada sobre a esfera. A taxa de desgaste foi calculada, usando-se a equação de desgaste de Archad (equação 1), considerando o valor médio do volume perdido do disco na segunda fase da curva do ensaio de desgaste (para os 3000 metros), ou seja, excluindo-se a fase de rodagem inicial. Na equação de Archad tem-se  $Q$  sendo o parâmetro que mede a razão de desgaste ou “taxa de desgaste”,  $V$  volume perdido acumulado,  $S$  deslizamento,  $F_N$  carga normal aplicada (29 N ou 63 N),  $H$  é a dureza Vickers do material mais mole (discos).

$$Q = \frac{V}{S} = K \frac{F_N}{H} \text{ (mm}^3\text{/m)} \quad (1)$$

$K$  é o coeficiente de desgaste: é adimensional e menor que 1. Em geral, a resistência ao desgaste é definida como sendo  $1/K$ . Portanto quanto maior for o coeficiente  $K$  menor será a resistência ao desgaste.

Tabela 6.5. Parâmetros de resistência ao desgaste, microdurezas e carga aplicada obtidos do ensaio de esfera-contra-disco para os diferentes discos.

Tipo de Superfície do disco de Aço AISI 420	Taxa média de Desgaste $Q = V/S$ ( $\text{mm}^3/\text{m}$ )	Coefficiente de Desgaste K	Microdureza da superfície dos discos (HV – 500g) Fora da Pista	Carga normal aplicada (N)
Disco 3.1 Temp.+ Reven.	$3,67 \times 10^{-3}$	$5,35 \times 10^{-4}$	431,6	29
Disco 3.2 Temp.+ Reven.	$3,67 \times 10^{-3}$	$4,54 \times 10^{-4}$	366,6	29
Disco 3.3 Temp.+ Reven.	$4,33 \times 10^{-3}$	$5,55 \times 10^{-4}$	372,0	29
Disco 2.1 revestido 60T	$2,83 \times 10^{-6}$	$3,61 \times 10^{-7}$	376,6	29
Disco 2.2 revestido 60T	$8,73 \times 10^{-5}$	$7,08 \times 10^{-6}$	521,3	63
Disco 2.3 revestido 60T	$6,67 \times 10^{-5}$	$4,17 \times 10^{-6}$	402,54	63
Disco 1.1 revest. Ledurit 68	$9,83 \times 10^{-5}$	$1,27 \times 10^{-5}$	828,8	63
Disco 1.2 revest. Ledurit 68 (desconsiderado)	$1,30 \times 10^{-2}$	$1,97 \times 10^{-3}$	893,9	63
Disco 1.3 revest. Ledurit 68	$1,30 \times 10^{-4}$	$1,20 \times 10^{-5}$	595,13	63

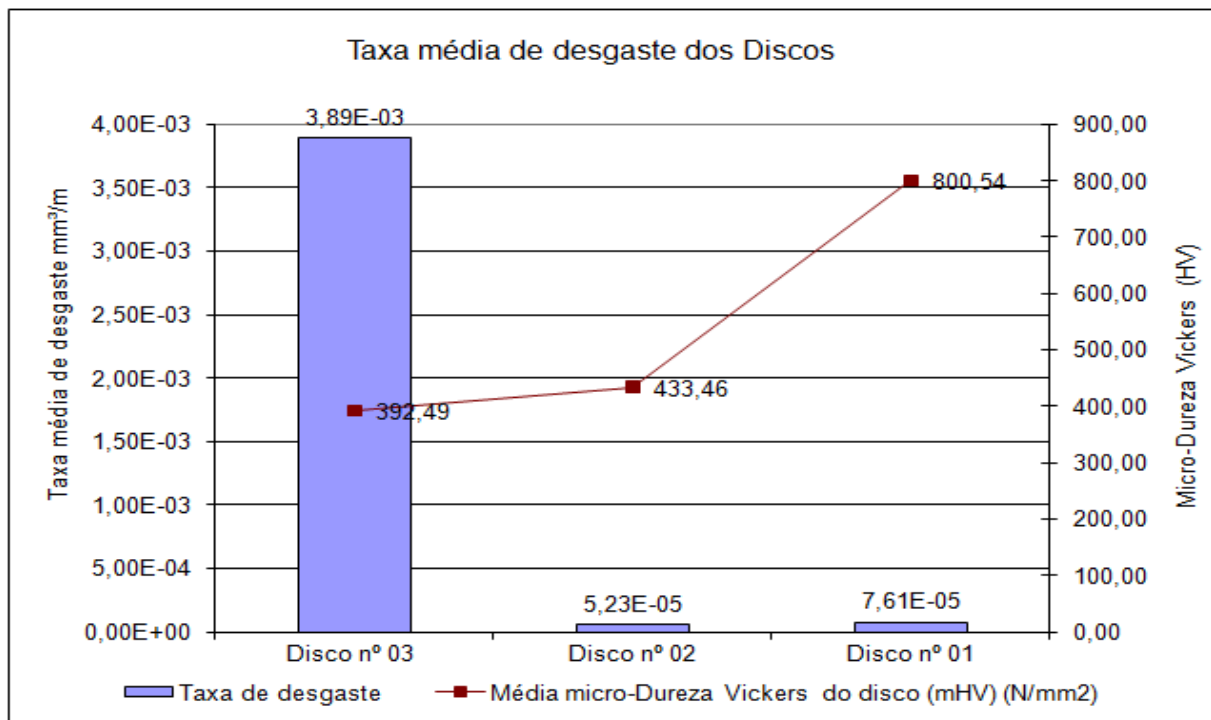


Figura 6.13 – Taxa média de desgaste e micro-dureza Vickers dos discos.

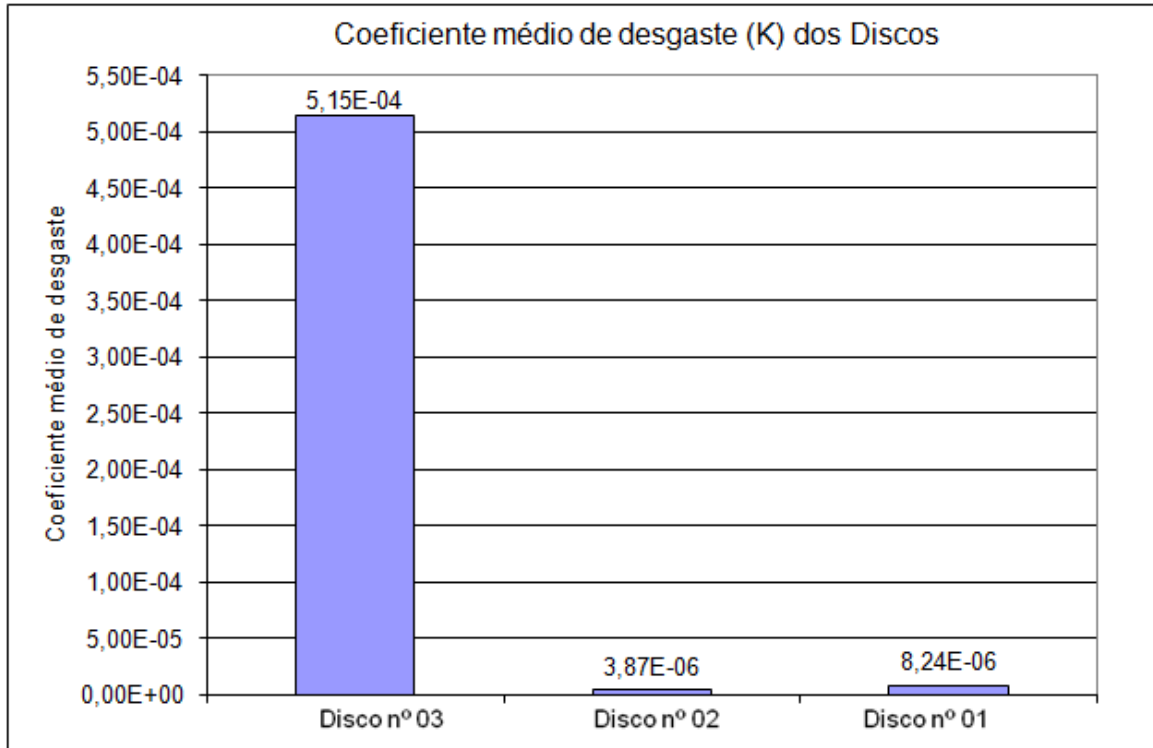


Figura 6.14 – Coeficiente médio de desgaste dos discos.

De acordo com os resultados da tabela 6.5, esboçados nas figuras 6.13, 6.14, desconsiderando os resultados obtidos do disco 1.2, os discos nº 02 de aço AISI 420 revestido com 60T apresentaram os menores coeficientes de desgaste K da ordem de  $3,87 \times 10^{-6}$ , ou seja, os discos com o revestimento 60T aço cromo apresentaram a maior resistência ao desgaste, apesar da dureza ser a praticamente igual que do disco nº 03 com somente tratamento térmico de tempera e revenimento. Este fato pode ser explicado pela ocorrência do encruamento do material na pista de desgaste da camada de revestimento 60 T aço cromo realizada por aspensão térmica a arco elétrico deixando o material mais duro, diminuindo o coeficiente de atrito para 0,12 e impedindo a retirada de material e também pela não ocorrência de desgaste adesivo e baixa rugosidade.

Os discos de aço 420 com revestimento UTP AF LEDURIT 68 apresentaram a maior dureza Vickers superficial, aproximadamente 800 HV, mas a resistência ao desgaste foi intermediária com coeficiente de desgaste K de  $8,24 \times 10^{-6}$ , excluindo-se o disco 1.2 que pelo processo de retificação do disco apresentou a presença de micro-trincas e teve uma grande perda de massa superficial. O coeficiente de atrito medido foi de 0,20 que é um valor baixo, porém maior que o revestimento 60T.

No caso do disco de aço 420 temperado e revenido e sem revestimento, o coeficiente de desgaste aumentou para  $5,35 \times 10^{-4}$ , o maior dentre os discos ensaiados, ou seja, a menor resistência ao desgaste. O coeficiente de atrito também é o maior dentre os três tipos de discos, mostrando um valor médio elevado de 0,90, indicando que houve desgaste adesivo.

## 7 CONCLUSÃO

Tendo em vista o estudo dos processos de aspensão térmica a arco, os ensaios de pino-sobre-disco realizados nos discos de aço AISI 420 com diferentes revestimentos superficiais contra uma esfera de metal duro, as metalografias, os valores de microdureza e as observações no MEV, as seguintes conclusões podem ser ditas:

- a. As amostras de os discos de aço AISI 420 temperado e revenido e revestido com camada de 60T aço cromo (corpos de prova nº 02) apresentaram os menores coeficientes de desgaste K da ordem de  $3,87 \times 10^{-6}$  e, portanto, a maior resistência ao desgaste e também o menor coeficiente de atrito de 0,12. Devido ao encruamento do material e baixa rugosidade revelado com fotos obtidas no MEV, não ocorrendo desgaste adesivo.
- b. Os discos de aço AISI 420 com revestimento de UTP AF LEDURIT 68 (corpos de prova nº 01) apresentaram a maior dureza Vickers superficial, aproximadamente 800 HV, mas a resistência ao desgaste foi intermediária com coeficiente de desgaste K de  $8,24 \times 10^{-6}$ . O coeficiente de atrito foi de 0,20, devido à presença de muitas microtrincas e poros, observadas a partir dos ensaios metalográficos.

- c. As amostras do disco de aço AISI 420 temperado e revenido e sem revestimento (corpos de prova nº 01), o coeficiente de desgaste foi de  $5,15 \times 10^{-4}$ , o maior dentre os discos ensaiados, ou seja, apresentou a menor resistência ao desgaste. O coeficiente de atrito foi também o maior com valor de 0,90, acusando mecanismo de desgaste adesivo.
- d. O processo de usinagem por retificação dos revestimentos realizados 60T e UTP AF LEDURIT 68 tem grande influência na resistência ao desgaste devido à possibilidade de formação de microtrincas superficiais que aumentam a taxa de retirada de material da superfície.
- e. O processo de aspensão térmica a arco apresentou uma melhor eficiência como alternativa de proteção contra o desgaste em comparação ao processo de têmpera e revenimento utilizados atualmente nas buchas de proteção do eixo.
- f. Entre as possibilidades testadas o que apresentou ser a melhor alternativa contra o desgaste para a bucha de proteção do eixo foi o revestimento aspergido a arco com o arame 60T, o qual apresentou o menor desgaste.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] ASTM G 99 – 95 a. **Standard test method for wear testing with a pin on disc apparatus**. Março, 1997.
- [2] Carvalho P. R., **Estudo do comportamento ao desgaste e corrosão dos aços inoxidáveis AISI 316L e AISI 420 depositados pelo processo de aspensão térmica a arco elétrico**, Universidade Federal de Pernambuco. Março, 2007. 89p.
- [3] COMELI, Franco W. **Estudo de revestimento aspergido por HVOF contra o desgaste em hastes de válvulas de turbinas termelétricas**. Dissertação de Mestrado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006. 122p.
- [4] HALLDEARN, R. **Arc thermal spray process**. Disponível em: [www.twi.co.uk](http://www.twi.co.uk). Acesso em: 30 de out. 2020.

- [5] HERMAN, H. SAMPATH S. **Thermal spray coating**. Department of Materials Science and Engineering – State University of New York, 2005. Disponível em: [www.matscieng.sunysb.ed](http://www.matscieng.sunysb.ed). Acesso em 21 de out. 2020.
- [6] HESSE, R. **Construção e teste de validação de um equipamento de ensaio de desgaste do tipo pino sobre disco**. Dissertação de Mestrado, UDESC – Universidade do Estado de Santa Catarina – Março, 2000.
- [7] LIMA, C.R.C; TREVISAN, R.E. **Aspersão térmica**. fundamentos e aplicações. Artliber Editora – São Paulo, 2001. 148p.
- [8] MARQUES, P.V. **Aspersão térmica – INFOSOLDA**. Disponível em: [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br) – Acesso em: 03 de out. 2020.
- [9] PINEDO, C. E., **Tratamentos superficiais para aplicações tribológicas**. Metalurgia e Materiais, v. 60, nº 543, Caderno Técnico - Editorial, p: 163, 2004.
- [10] SCHIEFLER, M.O.F. **Estudo microestrutural e eletroquímico de revestimentos metálicos depositados por aspersão térmica**. Tese de Doutorado, POSMEC – Universidade Federal de Santa Catarina. 313p. 2004.
- [11] STOETERAU, R.L. **Tribologia**. UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Mecânica. 2004.
- [12] STOKES, J. **The theory and application of the HVOF thermal spray process**. Dublin City University Press, Dublin, 2003