

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



**ESTUDO INICIAL DE ATRITO EM MATERIAIS  
CARBONOSOS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DE  
ELETRODOS**

**GLEIVERSON ALMEIDA MORETE  
SANLEY DUMER PIMENTEL**

**VITÓRIA – ES  
DEZEMBRO/2008**

**GLEIVERTON ALMEIDA MORETE  
SANLEY DUMER PIMENTEL**



**ESTUDO INICIAL DE ATRITO EM MATERIAIS  
CARBONOSOS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DE  
ELETRODOS**

Projeto de Graduação dos alunos  
Gleiverson Almeida Morete e Sanley  
Dumer Pimentel, apresentado ao  
Departamento de Engenharia Mecânica  
do Centro Tecnológico da Universidade  
Federal do Espírito Santo, para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
DEZEMBRO/2008**

**GLEIVERSON ALMEIDA MORETE  
SANLEY DUMER PIMENTEL**



**ESTUDO INICIAL DE ATRITO EM MATERIAIS  
CARBONOSOS EMPREGADOS NA FABRICAÇÃO DE  
ELETRODOS**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Cherlio Scandian**  
**Orientador**

---

**Prof. Dr. Flávio J. Silva**  
**Examinador**

---

**Prof. Dr. Washington M. S. Jr.**  
**Examinador**

**Vitória - ES, dia 08 de Dezembro, 2008**

## **AGRADECIMENTOS**

No decorrer do projeto enfrentamos várias dificuldades e obstáculos que graças a Deus, ao nosso empenho e a ajuda de vários amigos conseguimos transpor.

Agradecemos aos nossos pais, pelo apoio e ajuda durante o projeto e caminhada estudantil.

Ao Prof. Dr. Cherlio Scandian, que acreditou que seríamos capazes de concluir o trabalho da maneira esperada e planejada, nos dando apoio e dedicação do seu tempo.

Ao Dr. Luciano Varejão por ter nos cedido as amostras de materiais carbonosos analisadas em nosso projeto.

Ao Prof. Dr. Flávio J. Silva pela ajuda que nos deu realizando diversas análises topográficas.

Ao Prof. Dr. Antônio Cesar Bozzi pelos auxílios e dicas dadas, além de material didático emprestado.

Ao Zan Pierre, técnico do laboratório de Engenharia dos Materiais da UFES, pelo apoio que nos deu quando precisávamos fazer algum ensaio, mesmo estando atarefado.

Enfim, a todos aqueles que passaram por nossas vidas durante estes anos.

## RESUMO

Eletrodos pré-cozidos são amplamente utilizados em fornos a arco elétrico para a produção de ligas metálicas especiais. Esses eletrodos são constituídos basicamente por antracitos de várias procedências e piche, que atua como elemento ligante.

Os antracitos naturais são submetidos a um tratamento térmico, em temperaturas superiores a 2000 °C, visando à organização de sua estrutura em direção à estrutura gráfica. Após esta etapa eles são misturados com o elemento ligante e moldados em um formato cilíndrico por extrusão. Posteriormente é realizado um tratamento térmico, na faixa de 800 a 1000 °C, no bloco de eletrodo cru.

A motivação desta pesquisa foi a necessidade de se conhecer o valor de atrito entre materiais carbonosos e outros materiais. Como estes eletrodos são enroscados na abóboda de um forno elétrico, um melhor conhecimento do atrito entre o material carbonoso e a rosca evitaria trincamentos ou má conexão do eletrodo.

No presente trabalho uma série de quatro compósitos carbonosos, denominados amostra 1, 2, 3 e 4, foram cedidos por uma empresa localizada no município de Serra-ES. As amostras 1 e 2 possuíam as superfícies usinadas e as amostras 3 e 4 superfícies não-usinadas.

As amostras carbonosas foram deslizadas sobre um plano inclinado e através da tangente do ângulo formado entre o plano e a superfície, foi medido o coeficiente de atrito entre os materiais que estavam atuando como plano inclinado e os compostos carbonosos. Os materiais utilizados como contra-corpo foram aço 1020, liga de alumínio e liga de cobre.

Através dos resultados obtidos pelos testes simplórios, foi possível verificar a dependência do coeficiente de atrito entre materiais carbonosos e os materiais usados como contra-corpo e a influência da temperatura.

Palavras-chave: Atrito, materiais carbonosos, plano inclinado

## ABSTRACT

Electrodes pre-cooked are widely used in the electric arc furnace for the production of special alloys. These electrodes are formed basically by anthracite from various backgrounds and tar, which acts as a binder.

The anthracite natural undergo a heat treatment at temperatures above 2000 °C, seeking the organization of its structure toward the graphite structure. After this stage they are blended with the element binder and molded into a cylindrical shape by extrusion or vibration. Subsequently a heat treatment is carried out, in the range of 800 to 1000 °C in the block of raw electrode.

The motivation of this research was the need to know the value of friction between carbon materials and other materials. As these electrodes are kinky in the vaults of an electric oven, a better knowledge of friction between the material and carbon thread avoid cracks or bad connection of the electrode.

In this work a series of four composite carbons, known as sample 1, 2, 3 and 4, were sold by a company located in the municipality of Serra-ES. Samples 1 and 2 have the machined surfaces and the samples 3 and 4 non-machined surfaces.

The carbon materials slid on an inclined plane and through the tangent of the angle formed between the plane and the surface was measured coefficient of friction between the materials that were acting as inclined plane and the composite carbon. The materials used as a counter-body were 1020 steel, aluminum alloy and copper alloy.

Through the results of the tests sawney, were unable to verify the dependence of the coefficient of friction between materials carbon and the materials used as counter-body and the influence of temperature.

Keywords: Friction, carbons materials, inclined plane

## LISTAS DE TABELAS

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Classificação Processo de Carbonificação .....                                       | 14 |
| Tabela 2 - Parâmetros topográficos dos corpos .....                                             | 34 |
| Tabela 4 - Parâmetros topográficos dos contra-corpos .....                                      | 34 |
| Tabela 2 - Coeficientes de atrito estático entre as amostras e os diferentes contra-corpos..... | 34 |
| Tabela 5 - Durezas dos contra-corpos .....                                                      | 38 |
| Tabela 6 - Coeficientes de atrito da amostra 1.....                                             | 52 |
| Tabela 7 - Coeficientes de atrito da amostra 2.....                                             | 53 |
| Tabela 8 - Coeficientes de atrito da amostra 3 .....                                            | 54 |
| Tabela 9 - Coeficientes de atrito da amostra 4 .....                                            | 55 |

## LISTAS DE FIGURAS

|             |                                                                                                                    |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 -  | Período formação do carvão .....                                                                                   | 12 |
| Figura 2 -  | Formação do carvão a partir de detritos vegetais .....                                                             | 13 |
| Figura 3 -  | Fluxograma da produção de eletrodos de materiais carbonosos.....                                                   | 16 |
| Figura 4 -  | Esquema representativo da distribuição granulométrica de grãos de antracitos em um molde.....                      | 18 |
| Figura 5 -  | Proposta de Euler para o atrito.....                                                                               | 23 |
| Figura 6 -  | Efeito do oxigênio no atrito de ferro puro.....                                                                    | 24 |
| Figura 7 -  | Tensão atuando em um elemento com asperezidade idealizada pressionado contra um contra-corpo .....                 | 25 |
| Figura 8 -  | Fenômeno de Crescimento de junções .....                                                                           | 26 |
| Figura 9 -  | Variação do coeficiente de atrito com a Carga Normal.....                                                          | 27 |
| Figura 10 - | Constituintes da película de oxidação do ferro .....                                                               | 27 |
| Figura 11 - | Bloco sobre plano inclinado.....                                                                                   | 32 |
| Figura 12 - | Resultados de todos os testes de atrito estático realizado .....                                                   | 36 |
| Figura 13 - | Variação do coeficiente de atrito estático no aço 1020.....                                                        | 39 |
| Figura 14 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do aço lixado .....                                                            | 39 |
| Figura 15 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do aço não lixado .....                                                        | 40 |
| Figura 16 - | Variação do coeficiente de atrito estático no cobre.....                                                           | 41 |
| Figura 17 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do cobre lixado .....                                                          | 42 |
| Figura 18 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do cobre não-lixado .....                                                      | 42 |
| Figura 19 - | Variação do coeficiente de atrito estático no alumínio .....                                                       | 43 |
| Figura 20 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D da liga de alumínio lixada .....                                               | 44 |
| Figura 21 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D da liga de alumínio não-lixada.....                                            | 44 |
| Figura 22 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 1..... | 46 |
| Figura 23 - | Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 2..... | 46 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra2, ponto 3.....  | 47 |
| Figura 25 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 4..... | 47 |
| Figura 26 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 1..... | 48 |
| Figura 27 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 2..... | 48 |
| Figura 28 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 3..... | 49 |
| Figura 29 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 4..... | 49 |
| Figura 30 - Amostra 4 do material carbonoso à base de antracito.....                                                           | 50 |

## SUMÁRIO

|            |                                                                                                                         |    |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUÇÃO .....                                                                                                        | 11 |
| 1.1        | ORIGEM E FORMAÇÃO DO ANTRACITO .....                                                                                    | 11 |
| 1.2        | ELETRODOS DE MATERIAIS CARBONOSOS.....                                                                                  | 14 |
| 1.3        | PICHE.....                                                                                                              | 15 |
| 1.4        | PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS ELETRODOS DE MATERIAIS CARBONOSOS .....                                                        | 16 |
| 1.4.1      | GRAFITIZAÇÃO .....                                                                                                      | 17 |
| 1.4.2      | MOAGEM E SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....                                                                                  | 17 |
| 1.4.3      | COMPOSIÇÃO DO AGREGADO SÓLIDO .....                                                                                     | 17 |
| 1.4.4      | MISTURA DO AGREGADO SÓLIDO E PICHE.....                                                                                 | 18 |
| 1.4.5      | MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO .....                                                                                            | 19 |
| 1.4.6      | COZIMENTO .....                                                                                                         | 19 |
| 1.4.7      | ACABAMENTO (USINAGEM).....                                                                                              | 20 |
| 1.5        | ATRITO .....                                                                                                            | 20 |
| 1.5.1      | HISTÓRICO .....                                                                                                         | 22 |
| 1.5.2      | ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM O COEFICIENTE DE ATRITO....                                                              | 23 |
| 1.5.3      | FORMAÇÃO DE ÓXIDOS .....                                                                                                | 27 |
| 1.5.4      | MEDINDO O ATRITO EM LABORATÓRIO .....                                                                                   | 28 |
| 1.5.5      | PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS .....                                                                                           | 29 |
| CAPÍTULO 2 | MÉTODOS EXPERIMENTAIS .....                                                                                             | 31 |
| 2.1        | TESTE DO PLANO INCLINADO.....                                                                                           | 31 |
| 2.2        | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA A ANÁLISE DAS AMOSTRAS COMPÓSITOS CARBONOSOS E SUPERFÍCIES DOS PLANOS (TOPOGRAFIA) ..... | 33 |
| 2.3        | TESTE DE DUREZA VICKERS .....                                                                                           | 33 |
| CAPÍTULO 3 | RESULTADOS E DISCUSSÕES .....                                                                                           | 34 |
| CAPÍTULO 4 | CONCLUSÕES.....                                                                                                         | 45 |
| ANEXO 1 –  | TOPOGRAFIA DOS ELETRODOS (CORPOS) .....                                                                                 | 46 |

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| ANEXO 2 – IMAGEM DAS AMOSTRAS À BASE DE ANTRACITO UTILIZADAS NO PROJETO..... | 50 |
| ANEXO 3 – COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MEDIDOS EM CADA TESTE....          | 51 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                              | 55 |

## **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o eletrodo pré-cozido. Inicialmente, apresentamos uma pesquisa sobre o desenvolvimento da produção de eletrodos e a sua utilização, logo após, as principais matérias-primas utilizadas e depois um breve estudo sobre atrito.

### **1.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DO ANTRACITO**

De acordo com geólogos, o carvão mineral é uma rocha sedimentar evoluída de matéria orgânica por meio de uma série de processos geoquímicos naturais (ação de bactérias, oxidação, hidrólise, redução, efeitos de calor e pressão em presença de água), com componentes heterogêneos de diferentes propriedades químicas e físicas [1].

Segundo Antônio Germano Gomes Pinto, a formação do carvão mineral teve início no Período Carbonífero (era Paleozóica) quando imensas florestas de ambientes que apresentavam decomposição sem oxigênio (anaeróbicos, como pântanos, deltas e estuários de rios e alguns lagos, principalmente no que hoje corresponde ao hemisfério norte) foram soterradas em camadas horizontais em função dos movimentos tectônicos, por isso as reservas de carvão são, geralmente, veios horizontais de grande extensão [9].

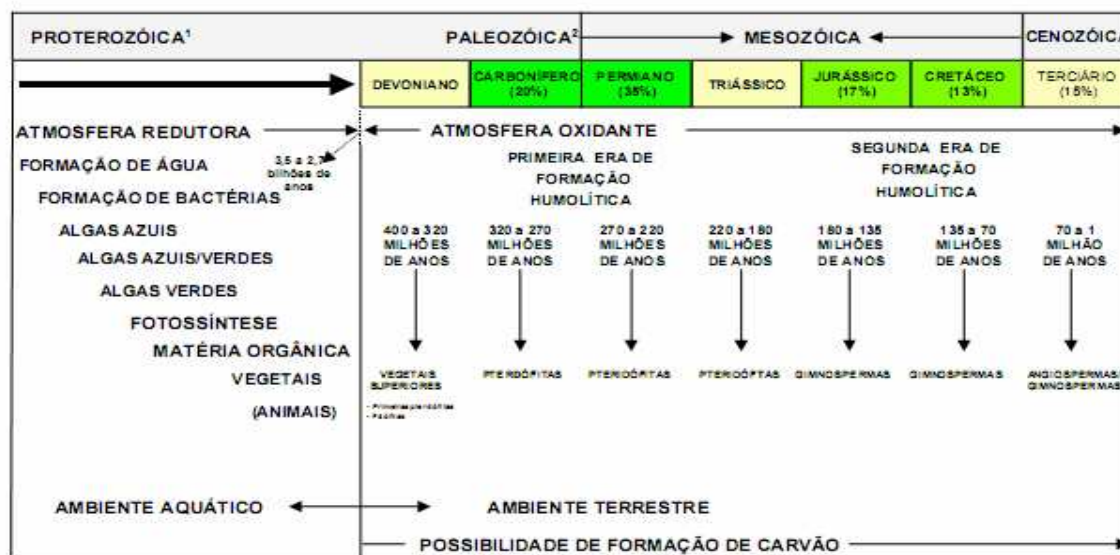
O tempo teve uma influência de menor importância na carbonificação. A evidência dessa afirmação é dada pelo fato de que num mesmo período geológico, por exemplo, no carbonífero são encontrados carvões de diferentes tipos. Assim, na bacia de Moscou, que é do carbonífero, são encontrados linhitos e nas bacias do Ruhr e da Polônia, também do carbonífero, encontrados desde o linhito até o antracito [1].

A pressão exercida pelas camadas sobrepostas às de carvão não é, geralmente, a origem única da carbonificação. A uma mesma profundidade, ou seja, sob uma pressão de compactação similar, são encontrados carvões de diferentes graus de carbonificação. Um exemplo disso é que a 1000 metros de

profundidade na região da Lorena são encontrados carvões alto voláteis - segundo a classificação AFNOR - com teores de oxigênio de 8,5% e, em regiões próximas e mais ao norte dessa região, encontrados carvões baixo voláteis com teores de oxigênio de cerca de 2% [1].

A temperatura é considerada o fator mais importante para que um carvão tenha atingido um determinado grau de carbonificação. A temperatura aumenta, em média, de 3 a 5 °C para cada 100 metros de profundidade. Ou seja, conforme a profundidade, as camadas de carvão podem ter sido levadas a temperaturas de até 200 °C, que são consideradas como suficientes para a formação de antracito [1].

Conforme a figura 1, a provável formação de carvão se deu, principalmente, durante o período carbonífero no hemisfério norte. Durante o carbonífero, o hemisfério sul estava coberto de gelo e não havia florestas. Assim, essa formação de carvão nesse hemisfério só pôde ocorrer a partir do período permiano. Esse esquema das transformações que ocorreram de tal modo a possibilitar a formação de carvão ao longo dos diferentes períodos e eras geológicas está ilustrado abaixo [1].



- 1- Vai da solidificação da crosta terrestre até os primeiros sinais de vida;
- 2- Surgimento dos animais de organização celular rudimentar, pelo desenvolvimento dos invertebrados, aparecimento de vermes e insetos cefalópodes e répteis, e na flora, os criptogramas vasculares, fanerógamas e gimnospermas.

Figura 1 - Período formação do carvão [10]

A figura 2 está esquematizando a formação do carvão a partir de detritos vegetais. As plantas morrem e formam massa de matéria vegetal em decomposição, através de um processo de soterramento por várias camadas de sedimentos, essa matéria vegetal é transformada, sob ação de temperatura e pressão, em carvão mineral [1].

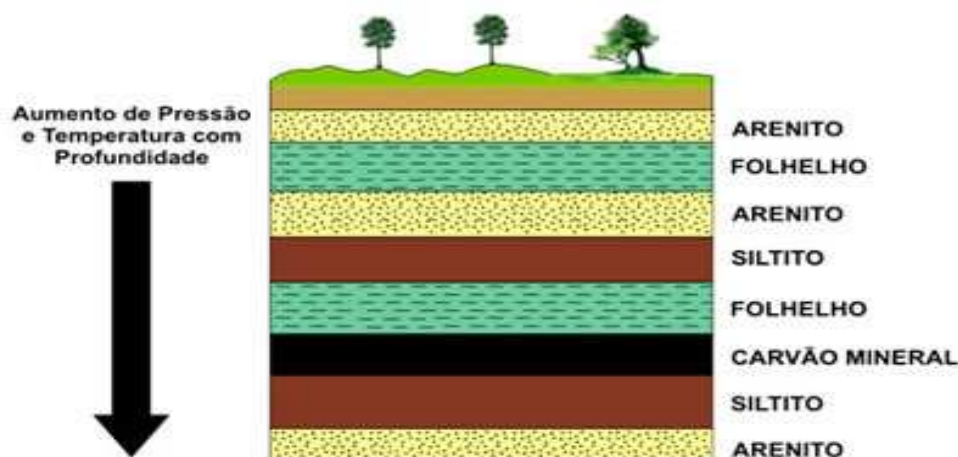


Figura 2 - Formação do carvão a partir de detritos vegetais [11]

Desse modo, o material vegetal passou a sofrer a ação de grandes variações de temperaturas e pressão, provocando mudanças físicas e químicas, transformando-se em turfa, linhito, hulha e antracito sucessivamente [1].

A carbonificação é o processo pelo qual os restos vegetais, ao longo do tempo geológico, se solidificam em ambiente anaeróbico, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono. A qualidade de cada depósito de carvão é definida pela temperatura, pressão e tempo de formação, o que define a sua maturidade orgânica [1].

Inicialmente a turfa é convertida em linhito, ambos considerados de baixa maturidade orgânica, em comparação com outros carvões, o linhito é mais leve e de cor mais escura. Após mais alguns milhares de anos, os efeitos da temperatura e da pressão ampliam a maturidade orgânica do linhito, transformando-o em hulha (sub-betuminoso) e após mais algumas transformações chega-se ao carvão betuminoso, mais duro e escuro. Em seguida, o aumento da maturidade orgânica leva à formação do antracito [1].

A tabela 1 abaixo mostra a proporção de carbono nos diversos estágios desde a madeira até o antracito, evidenciando as fases nas quais passa a matéria orgânica vegetal durante o processo de carbonificação. Embora não existam evidências concretas da conversão de um componente em outro, visto que os processos que originaram os carvões duraram milhões de anos, considera-se que os carvões pertencem a uma série de combustíveis fósseis sólidos, que começa na turfa e termina no antracito [1].

Tabela 1 - Classificação Processo de Carbonificação [1]

| Elemento | Classificação |         |                    |           |
|----------|---------------|---------|--------------------|-----------|
|          | Turfa         | Linhito | Hulha              | Antracito |
| C (%)    | 60            | 65-75   | 80-85              | 91-93     |
| H (%)    | 5,5 -8,0      | 5-8     | 4,5-5,5            | 3-4       |
| O (%)    | 32-34,5       | 20-30   | * 12-21<br>** 5-20 | 4-5       |

\* No carvão sub-betuminoso;

\*\* No carvão betuminoso.

Constata-se que: "partindo-se da madeira em direção ao antracito, há um aumento do teor de carbono (o processo de enriquecimento em carbono é chama do de carbonificação) e diminuição dos teores de oxigênio e nitrogênio" [1].

## 1.2 ELETRODOS DE MATERIAIS CARBONOSOS

Eletrodos pré-cozidos são utilizados em fornos a arco elétrico desde o último século. Eles são constituídos basicamente de carbono na forma de grafite, o qual oferece excelentes características para a condução de corrente elétrica e resistência contra o desgaste por oxidação a altas temperaturas. Os primeiros eletrodos foram produzidos em forma de prisma, e devido a este formato uma operação contínua não era possível, pois eles tinham de ser trocados quando consumidos até certa dimensão. Inovações no seu formato permitiram uma operação contínua dos fornos pela união de dois eletrodos através de roscas confeccionadas em suas extremidades. O eletrodo de grafite com esse tipo de união foi introduzido em fornos de arco abertos para a produção de ferro e aço já no início deste século [2].

Após a segunda guerra mundial iniciou-se a produção de silício metálico por um processo descontínuo utilizando blocos de eletrodo pré-cozido. Com a crescente demanda de silício metálico, o eletrodo de carbono tornou-se um componente essencial no processo de produção deste produto [2].

### **1.3 PICHE**

O piche é um subproduto do processo de destilação do petróleo, do alcatrão de carvão, ou de biomassa, ricos em compostos orgânicos, nos quais o elemento carbono é o principal constituinte [2].

A hulha, aquecida em câmaras especiais, decompõe-se em torno de 1000 °C, perdendo voláteis e deixando um resíduo sólido denominado coque. À medida que se formam, e com o aumento progressivo da temperatura, os produtos voláteis são removidos em uma câmara e submetidos a um processo de resfriamento. Os vapores não condensáveis são lavados com água, ou solução fraca de ácido sulfúrico, em equipamentos específicos para a eliminação da amônia presente. Finalmente, o gás já frio é considerado limpo é tratado para que sejam retiradas substâncias de baixo ponto de volatilização, como o benzeno, o tolueno e outros [2].

São muitos os derivados do alcatrão, alguns dos quais constituem matérias-primas essenciais para as indústrias de carboderivados. Entre eles se encontram hidrocarbonetos (benzeno, tolueno, xileno, naftaleno), ácidos carbólicos (fenol, crisol, xilenol, naftol, fenilfenol), bases azotadas (anilina, piridina, quinaldina), substâncias sulfurosas, e outras. Como produto final resultante da destilação do alcatrão, tem-se o piche, um líquido espesso, de consistência variável de acordo com a temperatura de destilação [2].

O piche é empregado como elemento ligante, unindo partículas sólidas de carvões como os utilizados nos eletrodos para fornos a arco, na pasta eletródica e nos materiais refratários, os quais sofrem diferentes tratamentos de acordo com a sua utilização. Além de aglomerante, o piche é um importante precursor para outros materiais carbonosos de ponta tais como fibras de carbono [2].

#### 1.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS ELETRODOS DE MATERIAIS CARBONOSOS

A produção de eletrodos de materiais carbonosos à base de antracito consta basicamente das seguintes etapas [3]:

- Grafitização;
- Moagem e separação granulométrica;
- Composição do agregado sólido;
- Mistura do agregado sólido e piche;
- Moldagem e compactação;
- Cozimento;
- Usinagem.

Cada etapa da produção pode influenciar no produto final. Portanto, além de uma escolha adequada das matérias-primas, deve-se dar uma atenção especial aos processos de produção, cujo fluxograma básico é apresentado na figura 03:

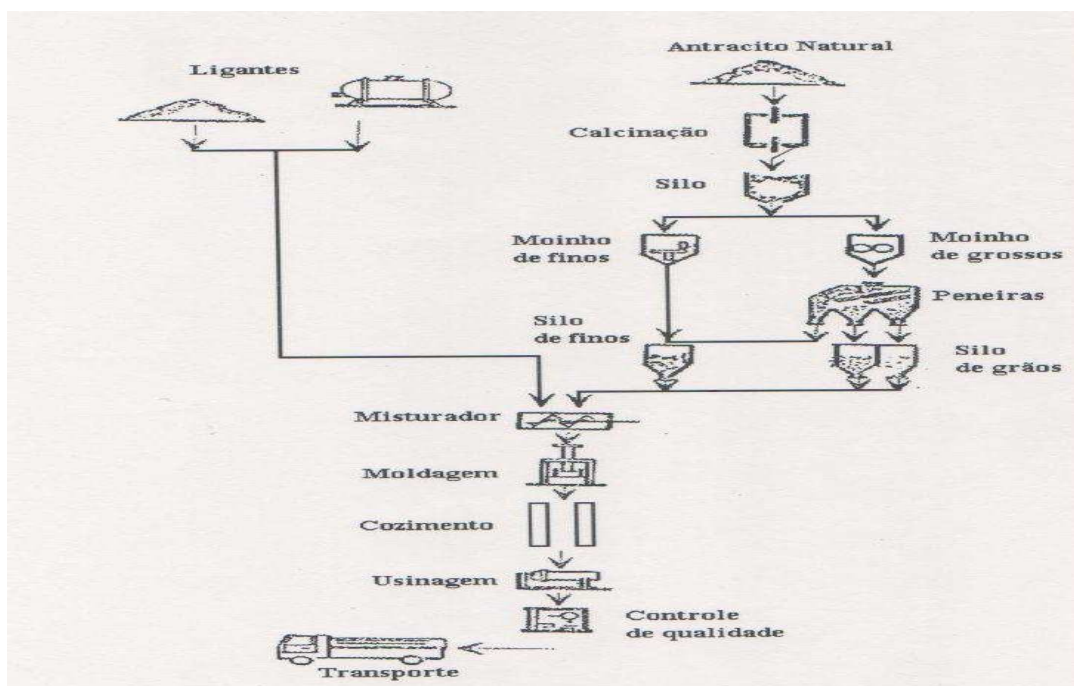


Figura 3 - Fluxograma da produção de eletrodos de materiais carbonosos [3]

#### **1.4.1 GRAFITIZAÇÃO**

O processo de grafitação envolve duas etapas: a conversão do material orgânico inicial em carbonos sólidos e vários compostos voláteis por pirólise, prosseguida pela conversão do carbono em grafite. Este processo envolve temperaturas da ordem 3000 °C e pode ser realizado em fornos a arco elétrico. No fluxograma apresentado na figura 3, o forno se apresenta na posição vertical e é alimentado no topo. A temperatura do material cru (mistura de antracitos, coque de petróleo, etc.) é elevada gradativamente a partir do topo do forno (em torno de 1000 °C) até a sua região central, onde atinge o seu máximo, em torno de 2700 °C. Dessa região em diante temos uma queda gradativa de temperatura até a base do forno (em torno de 1000 °C), onde o material já grafitado é retirado [3].

#### **1.4.2 MOAGEM E SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA**

O material tratado termicamente, ou seja, com estrutura aproximada à estrutura do grafite, passa por um processo de moagem e é peneirado e dividido em três frações granulométricas [3]:

Fração grossa:  $\frac{3}{4}$  a 5 mesh;

Fração média: 5 a 32 mesh;

Fração fina: 32 a 200 mesh.

#### **1.4.3 COMPOSIÇÃO DO AGREGADO SÓLIDO**

Visando produzir uma boa compactação, otimizando as propriedades mecânicas do produto final, uma mistura das granulometrias é efetuada baseando-se no tamanho das partículas e na proporção mínima de ligante, formando assim o agregado sólido. Esta é uma das etapas mais elaboradas antes de se iniciar a produção do eletrodo de matérias carbonosas à base de

antracito; várias composições são efetuadas e testadas em escala piloto até se obter as características desejadas. Um esquema ilustrativo de uma distribuição granulométrica é apresentado na figura 4:

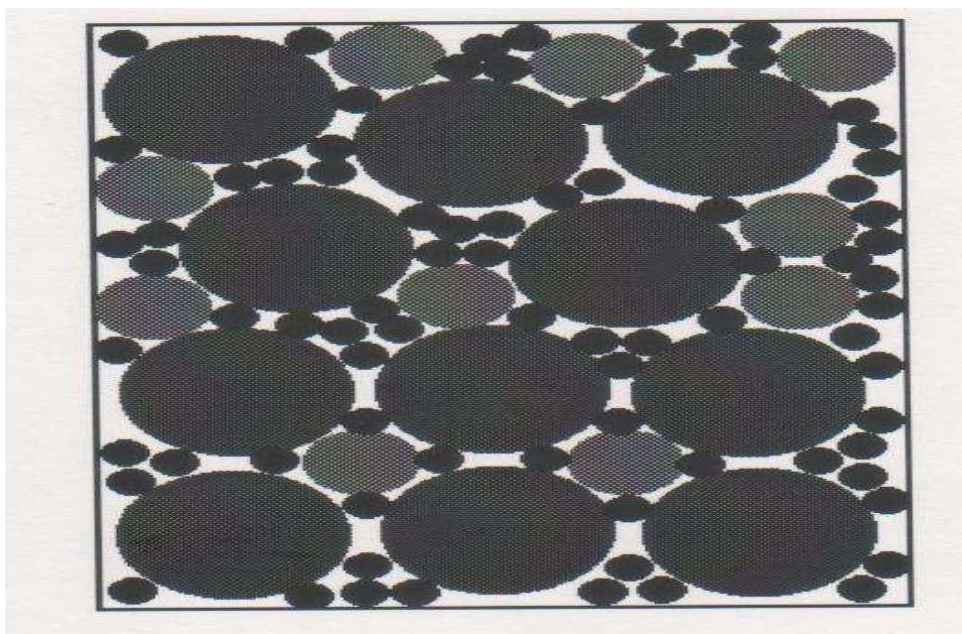


Figura 4 - Esquema representativo da distribuição granulométrica de grãos de antracitos em um molde [3]

#### **1.4.4 MISTURA DO AGREGADO SÓLIDO E PICHE**

Com a definição da composição do agregado sólido, a etapa seguinte é a de adição de aglomerante. Os aglomerantes possíveis para materiais carbonosos são principalmente [3]:

- Resinas fenólicas, furfurílicas e furâmicas;
- Dextrina, dextrose, sacarose e melaço;
- Amido;
- Alcatrão, creosoto, óleo carbólico;
- Licor sulfítico;
- Piche.

São exigências básicas do aglomerante:

- Perfeita molhabilidade do agregado sólido;
- Apresentar resistência satisfatória para o manuseio;
- Formar após o tratamento térmico uma fase resistente, aderente ao agregado sólido;
- Possuir coeficiente de dilatação próximos do agregado sólido;
- Permitir a aglomeração com baixo consumo;
- Apresentar resistência a oxidação.

O aglomerante utilizado na produção de eletrodos de antracito estudados é o piche de alcatrão de carvão, adicionado ao agregado sólido em misturadores com condições especiais de temperatura e fluidez. A temperatura é controlada para permitir uma perfeita molhabilidade do aglomerante e estabelecida de acordo com o ponto de amolecimento do piche. A fluidez é controlada com a adição de certos óleos minerais, permitindo uma adequação da pasta resultante ao molde para posterior compactação [3].

#### **1.4.5 MOLDAGEM E COMPACTAÇÃO**

A pasta resultante do processo de aglomeração foi moldada com dimensões apropriadas para o processo de usinagem e compactada a elevadas pressões. O molde possui vários orifícios que servem para a eliminação de matérias voláteis na etapa de cozimento [3].

#### **1.4.6 COZIMENTO**

A pasta, devidamente moldada e compactada, foi submetida a um tratamento térmico para a eliminação de matéria volátil e efetivação da aglomeração. O cozimento foi realizado sob taxa de aquecimento da ordem de

1 °C/minuto, e temperatura da ordem de 1200 °C, constituindo uma das etapas mais demoradas do processo de produção. A taxa de aquecimento deve estar baseada na dimensão do eletrodo verde, proporção de ligante, granulometria, etc [3].

#### **1.4.7 ACABAMENTO (USINAGEM)**

Após o cozimento, o bloco obtido é inspecionado por meio de vários ensaios não destrutivos antes de ser enviado para a usinagem. O processo de usinagem é efetuado por meio de tornos especiais, onde são feitas as junções, acoplamentos “nipples” e acabamento superficial, para dar a forma final do eletrodo [3].

A forma das junções é muito importante para o perfeito fluxo de corrente elétrica no eletrodo. Elas devem ser projetadas para permitir um perfeito e rápido encaixe, colaborando assim para os processos de produção em forno a arco. A maioria das perdas de eletrodo é devido a trincas nas roscas da união e a falhas durante o acoplamento de eletrodos [3].

### **1.5 ATRITO**

Atrito é a resistência ao movimento de um corpo sobre outro corpo. A palavra atrito vem do verbo latin *fricare*, que significa friccionar, atritar. Os corpos em questão podem ser um gás e um sólido (atrato aerodinâmico), um líquido e um sólido (atrato líquido) ou ainda entre dois corpos sólidos (atrato sólido) [4]. Devido ao objetivo deste projeto, aqui apenas será abordado o atrito sólido.

Geralmente o atrito é considerado como sendo constante, independente do meio onde se encontra. Na verdade, todo deslizamento produz um diferente tipo de atrito. Uma das razões para isto é que as superfícies dos materiais mudam constantemente. Até mesmo no vácuo, superfícies de materiais A e B não são exatamente compostas por A e B, mas possuem composições de elementos (impurezas) que precipitaram para a superfície. Superfícies expostas ao ar geralmente oxidam, até mesmo cerâmicos óxidos irão se oxidar

e alguns ainda irão hidrolisar suas superfícies. Adicionalmente o ar possui vapor, hidrocarbonetos e outros contaminantes (o simples fato de se encostar o dedo na superfície já é um contaminante). Dificilmente os materiais A e B irão de fato se “tocar”, pois sempre haverá camadas dos mais variados tipos de substâncias entre A e B. [5]

A magnitude ou “nível” do atrito é geralmente expressa em termos do coeficiente de atrito  $\mu$ , que é a força resistente ao movimento  $F$ , dividida pela força normal ao corpo:

$$W. \mu = F/W \quad (1).$$

O atrito muitas vezes tem sido assumido como invariante sobre todas as condições (independente da força, velocidade de deslizamento, área de contato, e outras variáveis que envolvam o meio) e chamado de “atrito de Coulumb” [4].

Um dos objetivos desta introdução é mostrar como na maioria das vezes é inútil tentar encontrar valores de atrito em livros e artigos. A maioria dos valores publicados foram medidos em pesquisas laboratoriais, muitas vezes com simples técnicas, e raramente representam fielmente o ambiente e as condições de trabalho em que ocorrerá o deslizamento. Deste modo, valores encontrados em publicações podem apresentar valores muito diferentes da realidade. Raramente as publicações apresentam as condições em que foram realizadas as medições para se encontrar o coeficiente de atrito que apresentam.

O valor do atrito que será apresentado para o problema proposto neste projeto de graduação não foge à realidade descrita acima, tendo-se em vista que não será possível fazer uma representação fiel das condições de trabalho do eletrodo. Todavia, através deste trabalho espera-se que valores mais próximos à realidade sejam encontrados, de modo que se possa ter uma aplicação de torque no eletrodo mais precisa possível.

### 1.5.1 HISTÓRICO

Com o início da revolução industrial em meados do século XVIII na Inglaterra, o homem passou a produzir os mais variados tipos de máquinas (máquinas a vapor, artefatos militares, etc.) porém dando pouca importância ao atrito. Amontons (1633 – 1705), engenheiro e arquiteto francês, chegou a lamentar o fato de que “embora todos eles tenham escrito sobre forças em movimento, provavelmente não há um sequer que tenha dado devida atenção ao efeito do atrito nas máquinas”. [4]

O teólogo e matemático suíço Euler (1707-1783) foi o primeiro a descrever matematicamente o atrito. Em 1750, enquanto trabalhava em Berlim, ele sugeriu que o atrito era causado por um efeito retentor entre as superfícies [12].

Ao colocar um bloco sobre um plano inclinado, Euler imaginava que os entroncamentos entre as superfícies impediam que o bloco deslizasse, ou seja, a força de atrito resultava da força gravitacional, onde o próprio atrito minimiza a energia potencial do objeto na extremidade do plano inclinado. A partir deste modelo, ele poderia prever que o bloco estaria na iminência de deslizar quando uma das "faces" das asperezas estivesse na horizontal. Deste modo, Euler pôde encontrar geometricamente (figura 5) uma relação entre o ângulo de inclinação do plano ( $B$ ) e o ângulo de inclinação dos entroncamentos ( $A$ ), ou seja, o deslizamento aconteceria quando  $B$  for maior que  $A$  (em qualquer uma das duas superfícies) [12].

Assim, Euler encontrou matematicamente a relação entre o coeficiente de atrito e a tangente do ângulo de inclinação do plano e percebeu que para determinados ângulos, corpos com diferentes rugosidades permaneciam em iminência de movimento, ou seja, o coeficiente de atrito  $\mu = \tan \theta$ . Euler foi pioneiro na distinção de coeficientes de atrito estático e cinético característico de cada objeto de modo quantitativo, onde o coeficiente de atrito estático  $\mu_s$  é maior do que o coeficiente de atrito cinético  $\mu_k$ . Foi ainda o primeiro a idealizar em escala microscópica um modelo representativo do atrito entre duas superfícies, o qual se dá por sucessivos “encaixes e desencaixes” entre as

superfícies de contato. Euler definiu o atrito como  $F = \mu W$ , onde  $W$  é o módulo da força normal que o plano faz sobre a superfície do bloco em reação à força que o bloco faz sobre o plano [12].

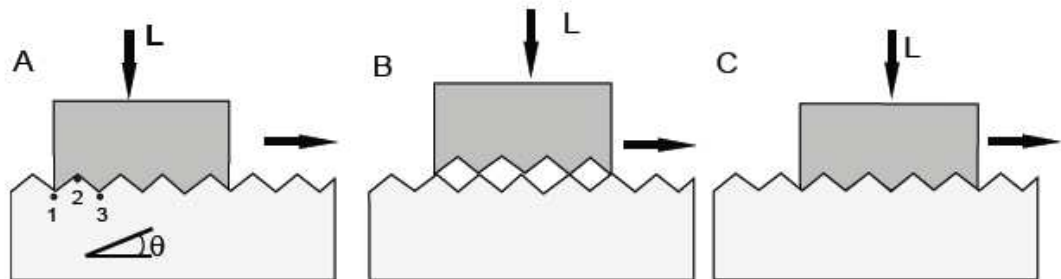


Figura 5 - Proposta de Euler para o atrito [4]

Graças a evolução de técnicas experimentais a tribologia amadurece. F. P. Bowden e D. Tabor publicam um livro constituído por uma série de trabalhos próprios e trabalhos-chave de outros pesquisadores relacionados a tribologia macroscópica em meados do século XX. A partir destes trabalhos foi possível expor uma teoria satisfatória para explicar a proporcionalidade entre a força de atrito e a carga normal. Quando dois corpos estão em contato somente alguns pontos da superfície destes corpos participam efetivamente do contato, a chamada área real de contato. Eles observaram que o atrito, apesar de independente da área aparente de contato, é de fato proporcional à área real de contato. Também foi observado que a área real de contato independe do tamanho da superfície, mas é diretamente proporcional à força normal. [4]

### 1.5.2 ALGUNS FATORES QUE INFLUENCIAM O COEFICIENTE DE ATRITO

O modelo de Bowden e Tabor para o atrito considera de maneira simples, que a força de atrito em metais é devida a duas fontes: uma força adesiva desenvolvida a partir da real área de contato entre as superfícies, e uma força de deformação necessária para romper as asperidades da superfície mais macia através da superfície mais dura. Convenientemente essas duas forças são tratadas separadamente; a força de atrito  $F$  será considerada então a soma da contribuição desses termos :  $F = F_{adh} + F_{def}$  [4].

O termo adesivo surge devido a força atrativa entre as asperidades. Essa força de adesão torna-se muito significativa se as superfícies em contato (especialmente entre metais) estiverem “limpas”, sem filme óxido ou outros tipos de impurezas (figura 6) [5].

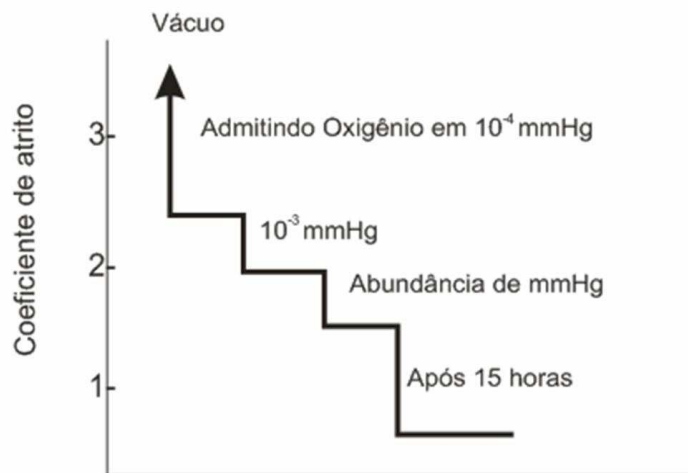


Figura 6 - Efeito do oxigênio no atrito de ferro puro [13].

As principais razões de porquê significantes adesões não são observadas quando duas superfícies estão em contato são duas: Em primeiro lugar as superfícies estarão cobertas por filmes óxidos e outros tipos de filmes o que tornarão a adesão mais fraca. Em segundo lugar, quando aplicada uma carga, as tensões elásticas em torno das asperezas geram tensões suficientes para quebrar as junções das asperidades durante o processo de descarregamento, exceto quando o material é particularmente dúctil. Portanto, apenas em materiais macios e dúcteis, e onde pelo menos parte do filme óxido possa ser removida, é que apreciável efeito de adesão pode ser observado [6].

Se a real área de contato, a soma de todas as asperidades em contato, for denotada por  $A$  e assumido que todas as junções possuem a mesma tensão cisalhante  $s$ , então a força de atrito devida a adesão pode ser dada por:

$$F_{adh} = As \text{ [5].}$$

A figura 7 mostra uma placa de material carregada contra uma superfície plana rígida, representando uma forma muito idealizada de um contato de asperidade.

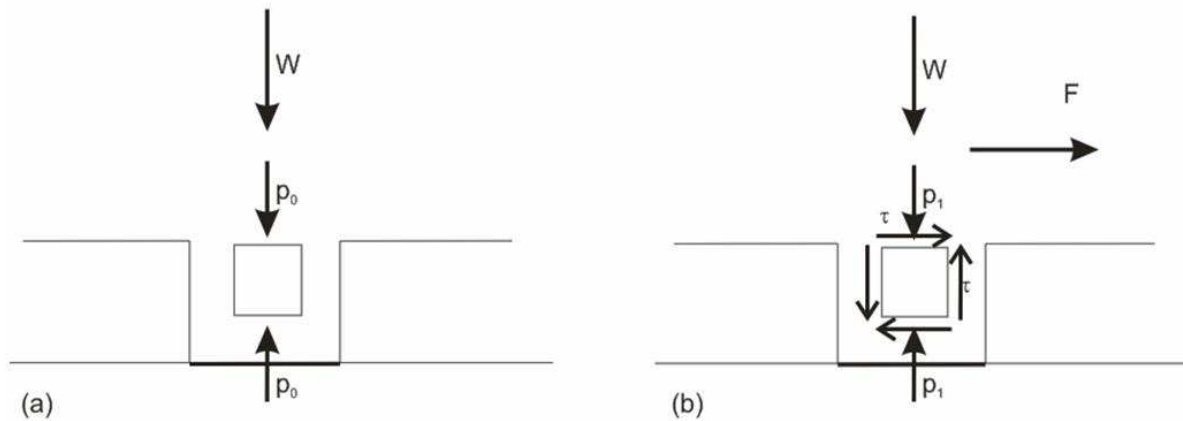


Figura 7 - Tensão atuando em um elemento com asperidade idealizada pressionado contra um contra-corpo (a) sem força tangencial, e (b) com força tangencial aplicada [5].

Um elemento do material interno a esta placa (*figura 7-a*) está sujeito a uma compressão uniaxial pela tensão normal  $P_0$ . Pode-se assumir que ela seja um ponto de escoamento, visto que quase todos os contatos de asperidades entre metais são plásticos [5].

Quando uma tensão tangencial é então aplicada a uma junção de asperidade, como mostrado na figura em (7-b), o elemento do material experimenta uma tensão de cisalhamento adicional  $\tau$ . Para o material permanecer no ponto de escoamento, a tensão normal sobre o elemento deve ser reduzida a  $P_1$ . Se a carga normal permanecer constante, então a área de contato deve crescer. Este fenômeno é conhecido como crescimento de junção, representado na figura 8 [5].

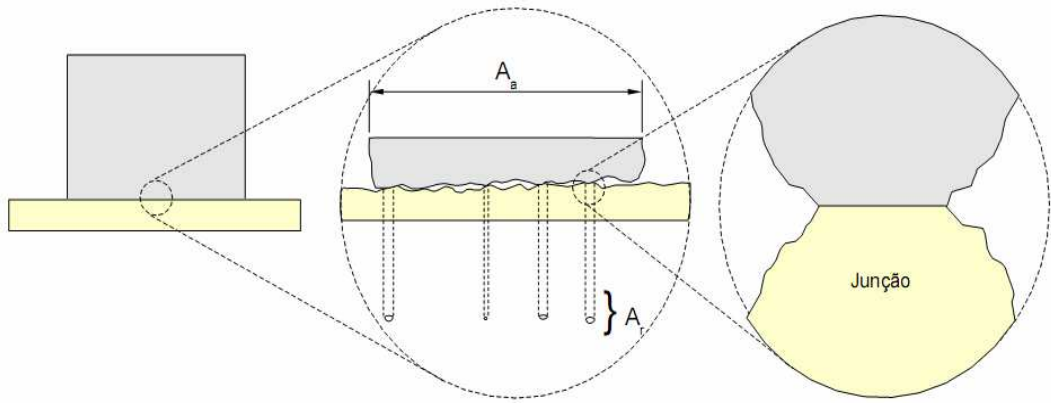


Figura 8 - Fenômeno de Crescimento de junções

A relação entre  $P_0$ ,  $P_1$  e  $\tau$  é determinada pelo critério de escoamento. Para o critério de Tresca, no qual o fluxo plástico ocorre em um valor crítico da tensão de cisalhamento máxima, tem-se [5]:

$$P_1^2 = 4\tau^2 = P_0^2 \quad (2)$$

$$P_1 = W / A \quad (3)$$

$$\tau = F / A \quad (4)$$

Substituindo (2) em (3)

$$W^2 + 4F^2 = A^2 P_0^2 \quad (5)$$

Para  $W$  constantes e  $P_0$  uma propriedade do material: se  $F$  aumentar, a área real de contato também aumentará e consequentemente  $\mu$ . Neste modelo, não existe limitação para o crescimento da área real de contato [5].

A maioria dos casos está limitada à ductilidade do material e/ou à presença de um filme na interface, de baixa resistência ao cisalhamento, entre as duas superfícies, o que impede o crescimento da força de atrito indefinidamente. [5]

Bowden e Tabor mostraram que outro fator que tem significativa influência no valor do atrito é o tipo de filme óxido que se encontra sobre o corpo ou contra-corpo. A figura 9 mostra uma experiência realizada por eles. Neste experimento

foi observado que a medida que a camada de óxido  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é removida de um aço (devido o aumento da carga) e passam atuar as camadas de óxido  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{FeO}$  o coeficiente de atrito diminui [5].

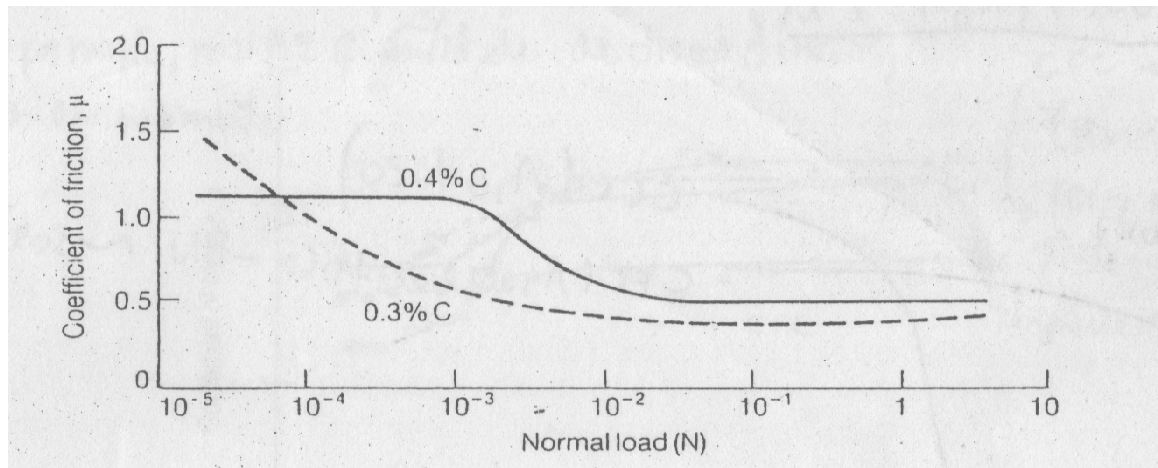


Figura 9 - Variação do coeficiente de atrito com a Carga Normal [5]

Em cerâmicas, os principais fatores que contribuem para o valor de atrito são o tipo de filme superficial (ou oxidação superficial) e o tipo de fratura que ocorre na superfície. Os efeitos da composição atmosférica, temperatura, carga, velocidade de deslizamento e outros fatores podem ser encarados como termos do tribossistema. [4]

### 1.5.3 FORMAÇÃO DE ÓXIDOS

Metais que podem apresentar vários estados de oxidação como, por exemplo, ferro, cobre, cobalto e manganês podem formar películas constituídas de camadas de óxidos de diferentes composições. A figura 10 mostra os constituintes da película de oxidação do ferro [8].

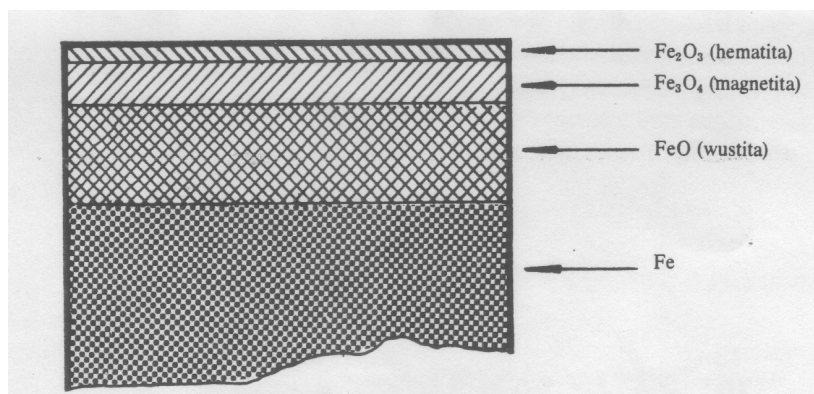


Figura 10 - Constituintes da película de oxidação do ferro [8]

Foi observado uma lei para a taxa de reação para camadas de óxido muito finas que se formam a temperaturas relativamente baixas. A dependência do ganho de peso em relação ao tempo  $t$  é logarítmica e assume a forma [8]:

$$W=K_1\log(K_2t+K_3) \quad (6)$$

onde os valores de  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  são constantes. Esse comportamento de oxidação é observado para o alumínio, o ferro e o cobre a temperaturas próximas do ambiente, que se oxidam rapidamente no início e depois lentamente, tornando-se a película praticamente constante, isto é, não aumenta de espessura [8].

As constantes  $K$  que aparecem na equação de oxidação, dependem da temperatura, em certos casos da pressão em todos os casos da natureza do metal. Para um dado metal e uma pressão fixa, cada uma dessas constantes pode ser representada em função da temperatura pela equação de Arrhenius:

$$\ln K = \frac{-Q}{RT} + C^{te} \quad (7)$$

onde  $Q$  é a energia de ativação da reação de oxidação,  $R$  é constante dos gases e  $T$  é temperatura absoluta [8].

Metais como alumínio, ferro e cobre, se oxidam inicialmente com grande velocidade mas a película formada impede posterior oxidação [8].

#### 1.5.4 MEDINDO O ATRITO EM LABORATÓRIO

Como o atrito depende intensamente do meio onde se encontram os corpos que deslizam e das características dos mesmos, torna-se impossível caracterizar o atrito em todos os sistemas. Entretanto, de modo a minimizar a imensidão de resultados que se obteria caso fossem feitas medições nos mais diferentes meios, foram criados alguns testes em laboratórios, permitindo assim, pelo menos se ter uma “idéia” mais próxima à realidade [12].

Tendo-se em vista que as características do atrito são totalmente dependentes dos sistemas, algumas mudanças neste sistema podem gerar

resultados discrepantes daqueles encontrados em medições laboratoriais. Portanto, é importante ter em mente que os testes realizados devem estar o mais próximo possível das condições reais de trabalho.

A norma ASTM G 40 define o coeficiente de atrito como “a razão adimensional entre a força de atrito e força normal entre dois corpos”. O coeficiente de atrito estático é definido como “o coeficiente de atrito correspondente à máxima força necessária a sujeitar um corpo para que se inicie o movimento relativo”. Em um plano inclinado, este valor é igual a  $\tan \theta$ , o ângulo de inclinação do plano que inicia o movimento do corpo [14].

O plano inclinado certamente é o teste mais conhecido para medir coeficiente de atrito [4]. Seu maior problema é que na maioria das vezes não é possível simular com precisão o tribo-sistema. Apesar deste teste não ser o mais preciso, é de grande valia, pois o mesmo pode pelo menos fornecer uma idéia sobre o coeficiente de atrito.

Embora o atrito seja totalmente dependente do tribossistema, algumas normas foram criadas com o objetivo de se padronizar testes. É importante notar que estes testes normalizados muitas vezes podem trazer resultados muito aquém da realidade, todavia os mesmo podem servir como base inicial para o estudo do atrito.

A ASTM estabelece a norma C 808 para a medição de atrito em materiais carbonosos [15].

### **1.5.5 PARÂMETROS TOPOGRÁFICOS**

A forma geométrica de qualquer superfície é determinada pelo processo de acabamento final usado para produzi-la. Poderá haver ondulações e extensões de ondas que vão desde comprimentos atômicos a escalas macroscópicas. Poderá ainda haver picos e vales causados por micro-eventos, assim como deformações não-uniformes de microestruturas, fraturas locais ou pitting. Mesmo após um rigoroso processo de polimento a superfície possuirá rugosidades, ainda que em escala atômica.

A caracterização estatística da topografia de superfície é uma técnica em potencial para complementar o estudo do atrito. A avaliação da evolução da morfologia da superfície, qualquer que seja a causa, pode ser apreciada pela determinação do perfil da rugosidade a intervalos determinados. Plotando-se estes pontos sucessivos no plano morfológico, obtém-se a seqüência da evolução da superfície [7].

Os parâmetros usados neste projeto estão definidos abaixo:

**SRq:** *Desvio Rms*: Descreve a altura estatística, o r.m.s. (ou variância) da topografia superficial, em relação a um plano médio.

O valor r.m.s dá um peso a picos e vales extremos. Este parâmetro, em determinações instrumentadas, apresenta maior simplicidade porque os efeitos de fase nos filtros elétricos são comparativamente pouco importantes e podem ser negligenciados, ao passo que seu efeito sobre a média aritmética é maior e não pode ser negligenciado. Em trabalhos estatísticos, r.m.s. tem maior significado.

**SRa:** É um parâmetro de rugosidade universalmente reconhecido, e o mais utilizado. Corresponde à média aritmética dos valores absolutos do perfil. Para medições 2D, ele é definido segundo DIN 4768 (1990-05), DIN EN ISO 4287 (1998- 10).

No seu cálculo não há distinção entre picos e vales, pois se utilizam valores absolutos do perfil. Assim, picos ou vales não típicos têm pouca influência no valor deste parâmetro. Finalmente este parâmetro não fornece informações sobre a forma das irregularidades ou do perfil . [7]

## **CAPÍTULO 2 MÉTODOS EXPERIMENTAIS**

A produção de eletrodos de compostos carbonosos com características adequadas para a sua utilização em fornos a arco requer um controle bem definido das matérias-primas e do processo de produção. Neste projeto de graduação foi dada ênfase ao estudo do atrito em superfícies de materiais carbonosos. Foi considerado como corpo as amostras de compostos carbonosos e como contra-corpo o aço 1020, a liga de alumínio e o cobre. A seguir encontram-se os métodos como foram realizados os testes.

### **2.1 TESTE DO PLANO INCLINADO**

Para este projeto foram utilizadas quatro amostras de compostos carbonosos, sendo duas usinadas e duas não usinadas. Estas amostras foram deslizadas sobre três chapas de diferentes materiais: liga de alumínio, liga de cobre e aço 1020 em variadas condições.

Com o intuito de tornar este estudo o mais plausível possível, foi escolhida uma face de cada uma das chapas e estas foram preparadas (igualmente) da seguinte maneira:

- Primeiro foram lavadas com água e sabão neutro visando remover impurezas superficiais;
- Em seguida foram lixadas com lixas de granulometria 80 mesh da marca Utility Clath para tornar as superfícies as mais uniformes possíveis;
- Por fim, foram lixadas com lixas de granulometria 150 mesh da marca Norton, promovendo assim um acabamento final mais regular entre as chapas.

A outra face das chapas não sofreu qualquer alteração em sua superfície, exceto uma limpeza com água e sabão neutro para a retirada de impurezas.

Para medir o coeficiente de atrito, as chapas foram postas horizontalmente com uma de suas extremidades fixa e a outra posta sobre um macaco de carro. Em seguida uma amostra era posta sobre esta chapa. Este plano foi então inclinado (com a elevação do macaco) até a eminência do movimento das

amostras, de modo a determinar o coeficiente de atrito. A cada novo teste as superfícies dos planos eram limpas com álcool (exceto no caso das superfícies aquecidas a 150°C, que eram apenas limpas com a passagem de um pano seco).

Os testes foram realizados com ambos os lados da superfície (lixada e não lixada) a temperatura ambiente (25°C). Foram também realizados nas superfícies lixadas, testes com os planos aquecidos a aproximadamente 75°C e 150°C. Para aquecer os planos foi utilizado um aquecedor tipo chapa da marca Weber e usado um pirômetro FLUKE para medir a temperatura superficial.

Um corpo de massa **m** sobre um plano **P** inclinado ficará em repouso enquanto a força de atrito entre o corpo e o plano for igual em módulo e de sentido contrário à resultante das forças aplicadas no bloco, segundo a direção do plano inclinado (ver Figura 11). Na situação de movimento iminente, basta existir uma pequena variação da inclinação do plano (aumento do ângulo  $\theta$ ) para que o corpo inicie o movimento sobre o plano.

Partindo do princípio de que  $F_A = \mu \cdot N$ , e que  $\theta$  é o ângulo formado pela chapa e a horizontal na eminência do movimento, tem-se que o coeficiente de atrito:  $\mu = \tan \theta$ . Este ângulo  $\theta$  foi então medido com um goniômetro, determinando assim o coeficiente de atrito estático  $\mu_{est}$ .

Cada teste foi repetido dez vezes, de modo a determinar com maior precisão os resultados. Todos os testes foram realizados no laboratório de Engenharia de Materiais do centro tecnológico da UFES.

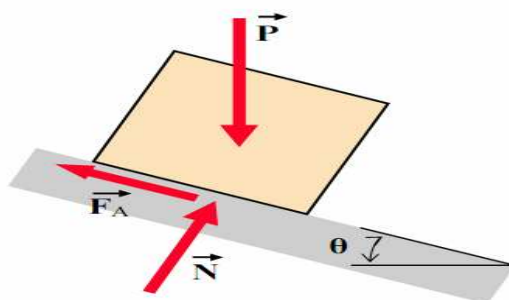


Figura 11 - Bloco sobre plano inclinado

## **2.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA A ANÁLISE DAS AMOSTRAS COMPÓSITOS CARBONOSOS E SUPERFÍCIES DOS PLANOS (TOPOGRAFIA)**

Para os contra-corpos, as chapas foram cortadas em amostras de pequeno tamanho. Em seguida essas amostras foram analisadas no rugosímetro 3D, da marca Taylor Hobson, do modelo TalySurf CCI 3000A para verificação da rugosidade de suas superfícies, da parte lixada e não lixada.

Para os corpos, devido a similaridade entre as amostras que foram usinadas e as que não foram usinadas, apenas a amostra usinada 2 e a não-usinada 4 foram analisadas no rugosímetro 3D em quatro pontos diferentes.

Foram feitas varreduras utilizando-se o rugosímetro 3D e arquivados os dados para posterior análise.

## **2.3 TESTE DE DUREZA VICKERS**

Primeiramente as amostras de liga de alumínio, liga de cobre e aço 1020 foram lixadas na máquina politriz DP 10 da marca STRUERS, passando pelas lixas de 220 mesh e 600 mesh. Após isto, foram ensaiadas através do teste de dureza Vickers.

O teste de dureza Vickers consiste em penetrar o material sob teste com um indentador de diamante, na forma de uma pirâmide reta de base quadrada e um ângulo de  $136^{\circ}$  entre as faces opostas, utilizando uma carga de 1 a 100 kgf.

O teste foi realizado no durômetro portátil modelo HPO10, da marca Werkstoffprüfmaschinen Leipzig, utilizando uma carga de 10 Kgf de penetração por 10 segundos.

## CAPÍTULO 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O gráfico da figura 12 exibe um resumo de todo o trabalho realizado no plano inclinado.

As tabela 2 e 3 apresentam os valores encontrados para os parâmetros topográficos dos corpos e contra-corpos.

A tabela 4 mostra um resumo dos valores dos coeficientes de atrito encontrados para as quatro amostras.

A tabela 5 apresenta os valores de dureza encontrados nos testes realizados nos contra-corpos.

As figuras 14, 15, 17, 18, 20 e 21 exibem as imagens topográficas dos contra-corpos. O anexo 1 exibe as imagens topográficas dos corpos.

O anexo 2 exibe uma fotografia do eletrodo.

O anexo 3 exibe os coeficientes de atrito estáticos obtidos em cada teste.

Tabela 2 - Parâmetros topográficos dos corpos

| <b>Parâmetros topográficos - Corpo</b> |                                |                |                |                |
|----------------------------------------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                        | <b>Amostra 2 – Usinada</b>     |                |                |                |
|                                        | <b>Ponto 1</b>                 | <b>Ponto 2</b> | <b>Ponto 3</b> | <b>Ponto 4</b> |
| <b>Sq (µm)</b>                         | 44,638                         | 71,506         | 0,073164       | 0,20118        |
| <b>Sa (µm)</b>                         | 30,528                         | 55,7022        | 0,04769        | 0,15222        |
|                                        | <b>Amostra 4 - Não Usinada</b> |                |                |                |
|                                        | <b>Ponto 1</b>                 | <b>Ponto 2</b> | <b>Ponto 3</b> | <b>Ponto 4</b> |
| <b>Sq (µm)</b>                         | 27,178                         | 0,086421       | 35,4243        | 38,226         |
| <b>Sa (µm)</b>                         | 20,262                         | 0,06334        | 25,7994        | 29,6551        |

Tabela 3 - Parâmetros topográficos dos contra-corpos

| <b>Parâmetros topográficos – Contra-Corpo</b> |                   |                       |                                |                                    |                             |                                 |
|-----------------------------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
|                                               | <b>Aço Lixado</b> | <b>Aço Não Lixado</b> | <b>Liga de Alumínio Lixado</b> | <b>Liga de Alumínio Não Lixado</b> | <b>Liga de Cobre Lixado</b> | <b>Liga de Cobre Não Lixado</b> |
| <b>Sq (µm)</b>                                | 1,7697            | 1,8364                | 2,65561                        | 0,5796                             | 1,788                       | 0,22967                         |
| <b>Sa (µm)</b>                                | 1,3419            | 1,2625                | 2,04472                        | 0,48822                            | 1,3913                      | 0,17877                         |

Tabela 4 - Coeficientes de atrito estático entre as amostras e os diferentes contra-corpos

| Coeficientes de atrito estático encontrados nos testes realizados |                      |                       |             |            |                      |                       |             |            |                      |                       |        |            |
|-------------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------|-------------|------------|----------------------|-----------------------|-------------|------------|----------------------|-----------------------|--------|------------|
| Material                                                          | Aço 1020             |                       |             |            | Liga de Alumínio     |                       |             |            | Liga de Cobre        |                       |        |            |
|                                                                   | Aquecido 75°C lixado | Aquecido 150°C lixado | Lixado 25°C | Não Lixado | Aquecido 75°C lixado | Aquecido 150°C lixado | Lixado 25°C | Não Lixado | Aquecido 75°C lixado | Aquecido 150°C lixado | Lixado | Não Lixado |
| AMOSTRA 1                                                         | 0,24                 | 0,45                  | 0,28        | 0,53       | 0,67                 | 0,70                  | 0,83        | 0,72       | 0,56                 | 0,66                  | 0,71   | 0,61       |
|                                                                   |                      |                       |             |            |                      |                       |             |            |                      |                       |        |            |
| AMOSTRA 2                                                         | 0,25                 | 0,44                  | 0,30        | 0,56       | 0,64                 | 0,72                  | 0,84        | 0,79       | 0,54                 | 0,69                  | 0,69   | 0,64       |
|                                                                   |                      |                       |             |            |                      |                       |             |            |                      |                       |        |            |
| AMOSTRA 3                                                         | 0,27                 | 0,49                  | 0,29        | 0,54       | 0,70                 | 0,75                  | 0,85        | 0,70       | 0,57                 | 0,62                  | 0,65   | 0,65       |
|                                                                   |                      |                       |             |            |                      |                       |             |            |                      |                       |        |            |
| AMOSTRA 4                                                         | 0,27                 | 0,50                  | 0,30        | 0,53       | 0,69                 | 0,76                  | 0,84        | 0,77       | 0,57                 | 0,67                  | 0,68   | 0,62       |
|                                                                   |                      |                       |             |            |                      |                       |             |            |                      |                       |        |            |
| MÉDIA                                                             | 0,26                 | 0,47                  | 0,29        | 0,54       | 0,68                 | 0,73                  | 0,84        | 0,74       | 0,56                 | 0,65                  | 0,68   | 0,63       |
| DESV. PADRÃO                                                      | 0,02                 | 0,03                  | 0,01        | 0,01       | 0,03                 | 0,03                  | 0,01        | 0,04       | 0,01                 | 0,03                  | 0,03   | 0,02       |

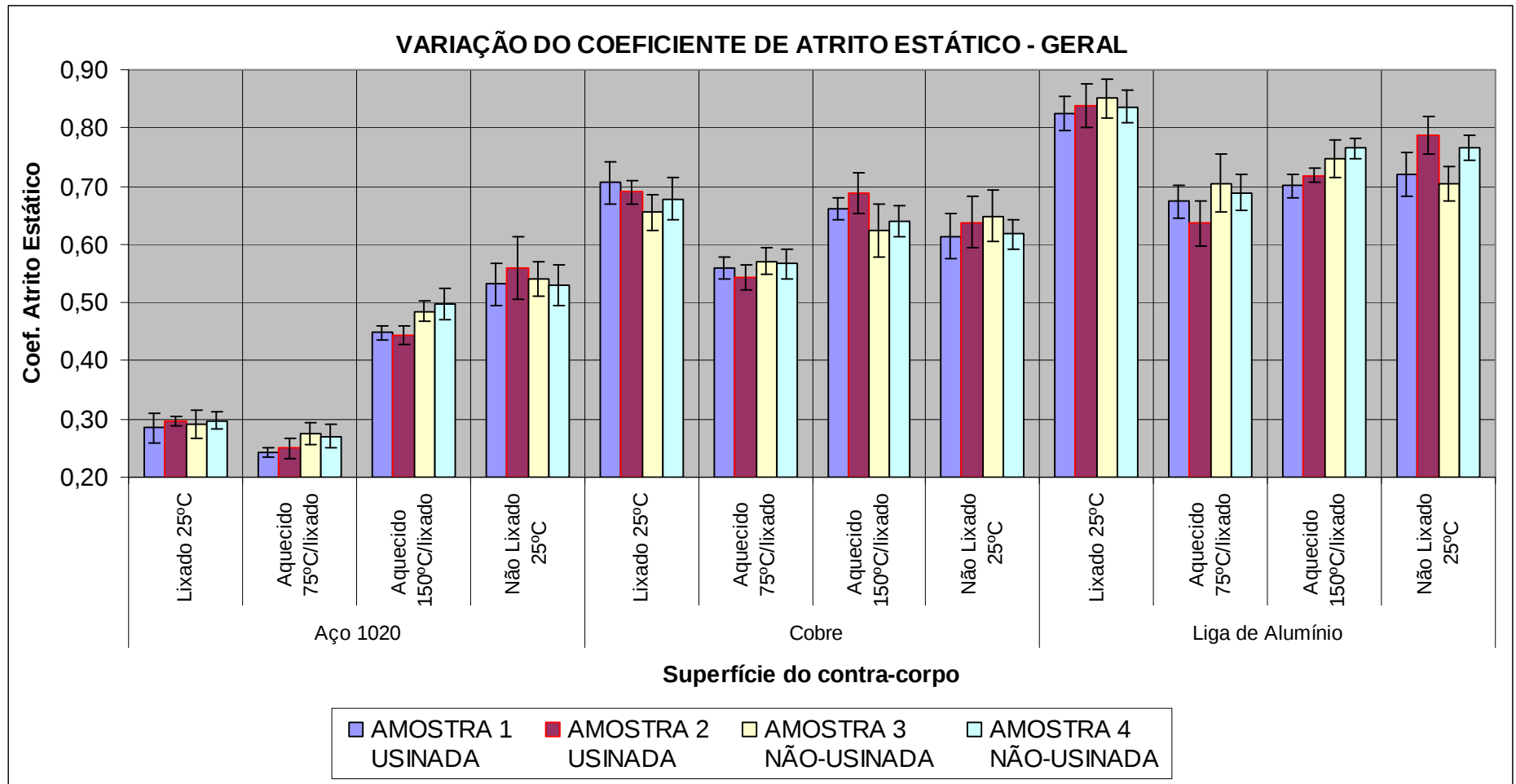


Figura 12 - Resultados de todos os testes de atrito estático realizado

É possível dividir os resultados obtidos em três categorias:

- 1) de acordo com o acabamento superficial das amostras do corpo (usinado ou não-usinado);
- 2) de acordo com os diferentes tipos de materiais usados como contra-corpo (aço 1020, liga de alumínio e cobre);
- 3) de acordo com os diferentes tipos de acabamento e temperatura superficial (lixado, não lixado, aquecido, não aquecido) para um mesmo material no contra-corpo.

Deste modo, os resultados serão analisados separadamente, de modo a facilitar todo o entendimento do assunto.

*Categoria 1 (resultados variando apenas as amostras dos corpos 1, 2, 3 ou 4):* é possível verificar que praticamente não houve influência do acabamento superficial destas amostras no que tange ao coeficiente de atrito estático. Salvo pequenas variações (dentro do desvio padrão) comuns a este tipo de teste, praticamente todos os valores do coeficiente de atrito estático foram estatisticamente iguais para as mesmas condições tribológicas no contra-corpo (mesmo acabamento, mesmo material do plano inclinado e mesma temperatura), podendo concluir que o tipo de acabamento dado ao corpo (usinado ou não) praticamente não possui influência no atrito estático. Em alguns (poucos) casos é possível ver uma pequena tendência na qual a superfície usinada apresenta menor coeficiente de atrito (ex.: no aço 1020 lixado e aquecido a 150°C). É importante ressaltar que os materiais carbonosos são muito heterogêneos e portanto os quatro pontos que foram analisados de cada corpo no rugosímetro 3D não são suficientes para garantir qualquer sensibilidade do coeficiente de atrito aos parâmetros topográficos. Para uma melhor ligação entre os parâmetros topográficos e o atrito seriam necessários centenas de outros pontos em cada amostra.

*Categoria 2 (diferentes tipos de materiais usados como contra-corpo: aço 1020, liga de alumínio e cobre):* aqui é possível perceber uma grande variação nos resultados obtidos. Para o aço 1020, o coeficiente de atrito estático variou entre 0,26 e 0,54. Para o cobre, entre 0,56 e 0,68. Para a liga de alumínio,

entre 0,68 e 0,84. Fazendo uma comparação entre superfícies que sofreram o mesmo acabamento (e na mesma temperatura) e variando apenas o material do contra-corpo, nota-se claramente uma grande diferença nos coeficientes de atrito estático. Por exemplo, os resultados para uma superfície lixada à temperatura ambiente e mudando apenas o material do plano inclinado, foram 0,29 para o aço 1020, 0,68 para a liga de cobre e 0,84 para a liga de alumínio. Estes resultados muito provavelmente estão relacionados a dois fatores: a dureza do material e as diferentes rugosidades superficiais. As durezas crescem seguindo a seguinte ordem: liga de alumínio, liga de cobre e aço 1020. Os valores dos parâmetros superficiais são praticamente idênticos para o cobre e o aço 1020 e aumentam um pouco para a liga de alumínio, portanto certamente o fator que mais influência é a dureza do contra-corpo.

Tabela 5 - Durezas dos contra-corpos

| <b>Dureza dos Contra-corpos</b> |                                     |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| <b>Material</b>                 | <b>Dureza Kgf (HV<sub>10</sub>)</b> |
| Aço 1020                        | 154                                 |
| Liga de Cobre                   | 96,7                                |
| Liga de Alumínio                | 46,4                                |

A liga de alumínio possui uma dureza 46,4 HV<sub>10</sub>, sendo assim o mais macio entre os materiais. Essa menor dureza justifica os mais altos valores de coeficiente de atrito estático encontrado entre todos os materiais utilizados neste estudo como contra-corpo. Devido a esta menor dureza, o índice de plasticidade torna-se muito alto, o que conseqüentemente torna maior a área real de contato quando comparada com os outros materiais.

O cobre apresenta uma dureza 96,7 HV<sub>10</sub>, maior que a liga de alumínio porém menor que a do aço 1020, tendo portanto valores intermediários de coeficiente de atrito estático. A área real de contato deve ser menor que na liga de alumínio, diminuindo assim o atrito estático.

Por fim, o aço 1020 possui a maior dureza, 154 HV<sub>10</sub>, e portanto o menor valor de coeficiente de atrito estático. Mais uma vez isso se deve ao fato de que no aço 1020 é encontrado o menor índice de plasticidade, e provavelmente a menor área real de contato.

Deste modo é possível concluir que há um crescimento de junções a medida que a dureza do contra-corpo torna-se menor, conseqüentemente aumentando o coeficiente de atrito estático.

*Categoria 3 (diferentes tipos de acabamento e temperatura superficial (lixado, não lixado, aquecido, não aquecido) para um mesmo material no contra-corpo):* começando pelo aço 1020 tem-se a seguinte situação: para a superfície lixada e a temperatura ambiente encontra-se um valor de 0,29 para  $\mu_{est}$ . Este valor quase dobra (igual a 0,54) quando a superfície do plano é a não lixada.

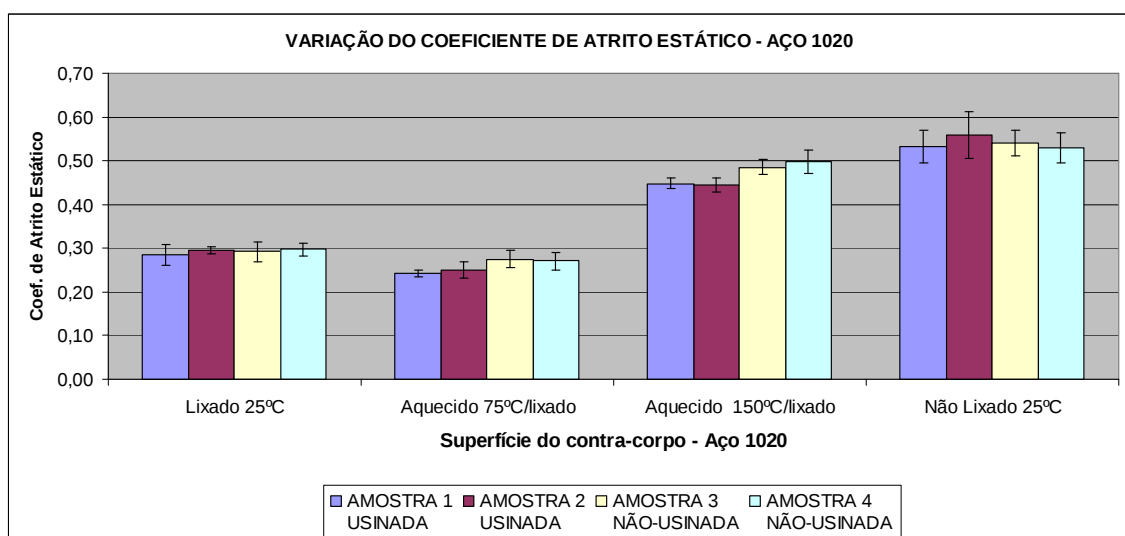


Figura 13 - Variação do coeficiente de atrito estático no aço 1020

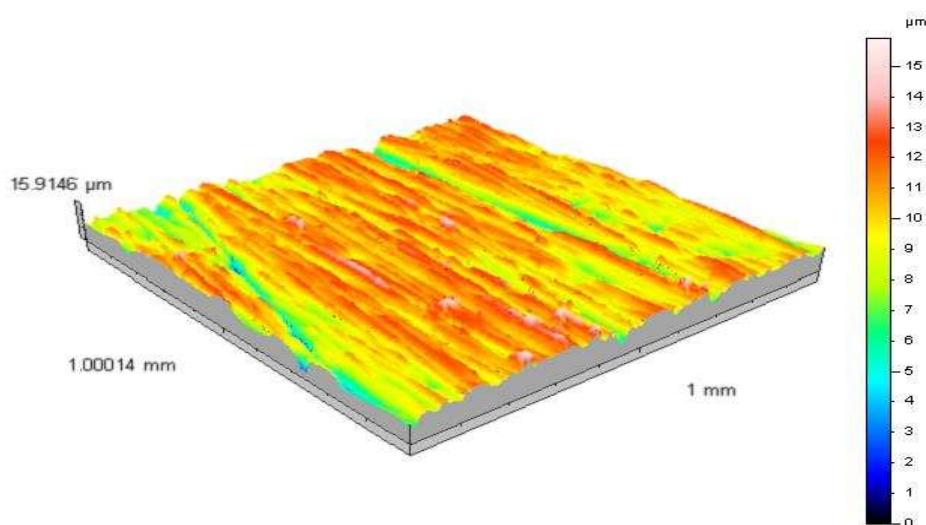


Figura 14 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do aço lixado

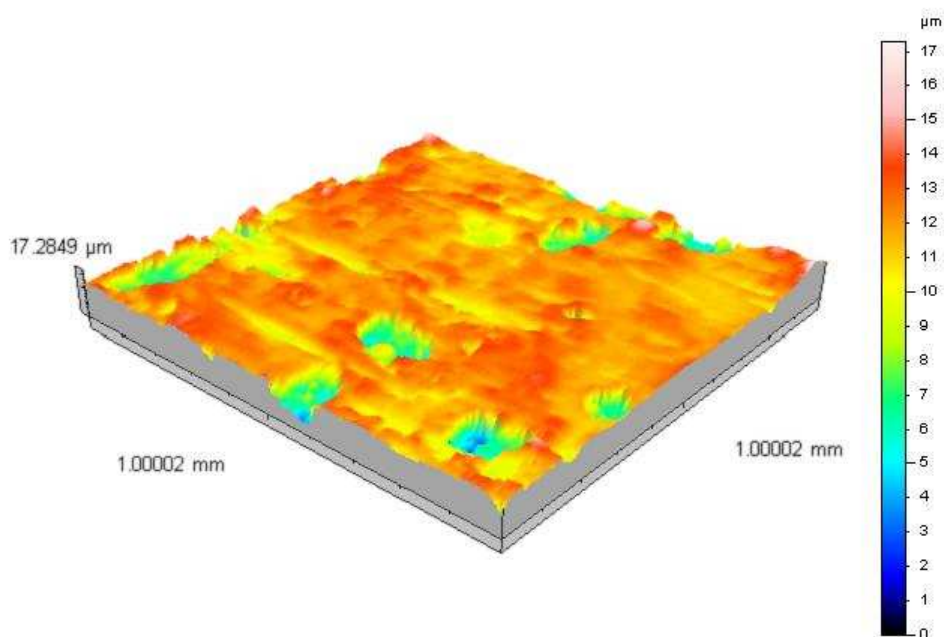


Figura 15 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do aço não-lixado

Os parâmetros topográficos para estas duas superfícies são bastante próximos e portanto certamente não são os principais responsáveis por esta discrepância nos resultados. A principal influência provavelmente é o modo como estas superfícies foram tratadas. A superfície lixada deve ter removida de si o óxido  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  que antes havia nela, enquanto que a superfície não lixada continuou com este óxido. Assim, a superfície lixada deve ter ficado com os óxidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  e  $\text{FeO}$  que conforme já mencionado na revisão bibliográfica, são óxidos que induzem a um coeficiente de atrito menor. Então, é conclusivo que o principal fator para o atrito estático de materiais carbonosos em temperatura ambiente delizando sobre aço 1020 é o tipo de óxido (ferrugem e/ou outras impurezas) que se tem na sua superfície e não a rugosidade superficial do contra-corpo.

Quando a superfície lixada do aço 1020 começa a ser aquecida, percebe-se um pequeno decréscimo no coeficiente de atrito estático (0,26 a 75°C) porém muito próximo do desvio padrão para o aço 1020 lixado e na temperatura ambiente. Provavelmente a 75°C, o tipo de óxido que se forma contribui para uma pequena diminuição do atrito estático. Aumentando ainda mais a temperatura este valor cresce consideravelmente, atingindo 0,47 a 150°C. Isto possivelmente se deve ao fato de que ao elevar a temperatura, uma nova

camada de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  é formada e conseqüentemente torna o valor do coeficiente de atrito maior.

O cobre não lixado tem  $\mu_{est}$  igual a 0,63 e o lixado igual a 0,68. Analisando os parâmetros topográficos percebe-se uma diferença de aproximadamente oito vezes entre os valores encontrados para o cobre não-lixado e o cobre lixado (por exemplo, o  $S_q$  do cobre lixado é igual a  $1,78804 \mu\text{m}$  enquanto que para o cobre não lixado, igual a  $0,229671 \mu\text{m}$ ). Essa diferença de parâmetros certamente é o principal responsável pelos resultados obtidos. É importante notar que ao contrário do aço 1020 que apresentou resultados com quase 100% de variação (0,29 e 0,54), no cobre esta faixa de valores foi muito menor (8% ou 0,63 e 0,68), mostrando que provavelmente o principal fator contribuinte para o atrito nos materiais carbonosos é o tipo de óxido superficial que se tem (juntamente com a dureza), e não a rugosidade superficial. Como as superfícies lixada e não lixada foram limpas de modo bastante semelhante, certamente o óxido formado em suas superfícies são semelhantes, o que justifica este pequeno aumento de coeficiente de atrito mesmo com uma rugosidade quase oito vezes maior.

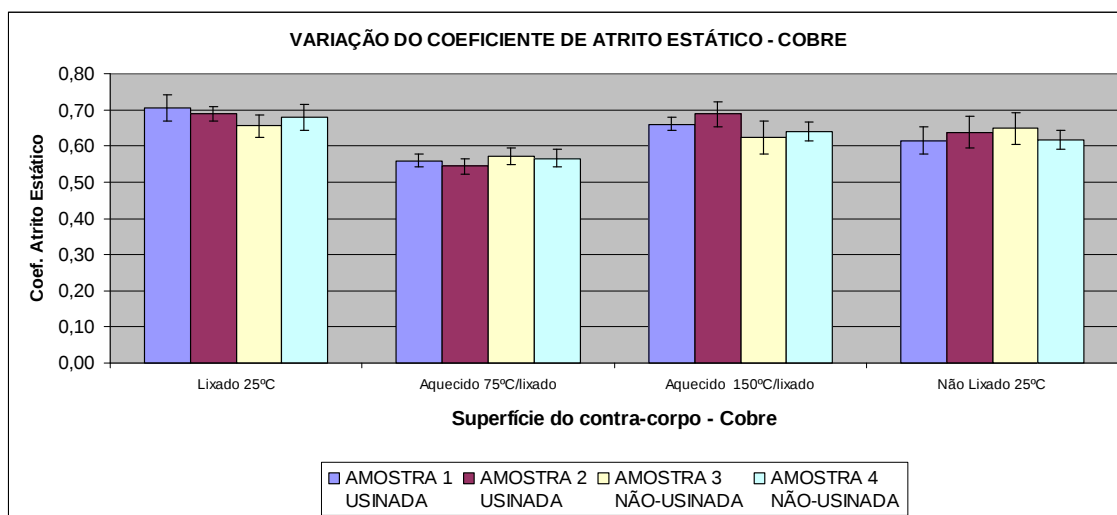


Figura 16 - Variação do coeficiente de atrito estático no cobre

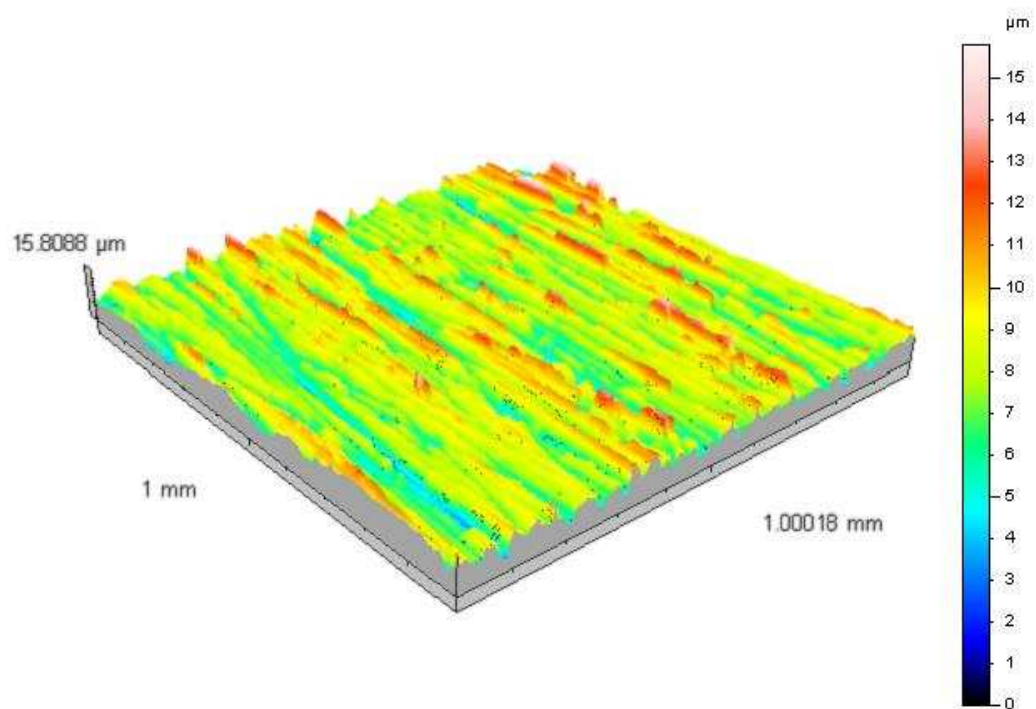


Figura 17 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do cobre lixado

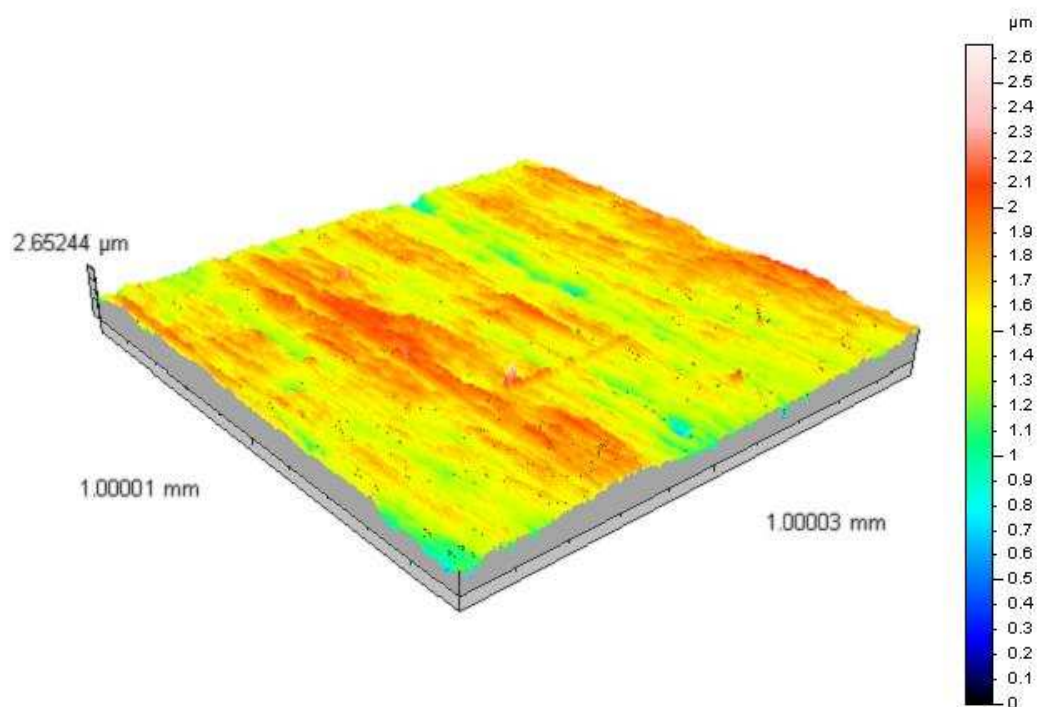


Figura 18 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do cobre não-lixado

Ao aquecer a superfície de cobre, assim como no aço, percebe-se uma diminuição do  $\mu_{est}$ . Elevando ainda mais a temperatura,  $\mu_{est}$  aumenta. Aqui, assim como no aço 1020, deve se formar uma camada de óxido com o aumento da temperatura, que contribui para a diminuição do atrito estático. Porém, a medida que a temperatura aumenta, apesar da camada de óxido tornar-se mais espessa, o cobre deve estar se tornando mais macio, resultando em um aumento da área real de contato e consequentemente do coeficiente de atrito estático.

Por fim a liga de alumínio. Esta obteve um  $\mu_{est}$  quando não-lixada e a temperatura ambiente igual a 0,75 e lixada igual a 0,84. Como no cobre, os parâmetros de amplitude variaram em torno de cinco vezes, porém a variação no atrito não foi mais que 12%. Isso comprova novamente que a rugosidade teve pouca influência no valor do atrito estático. Como o alumínio forma uma rápida e aderente camada de óxido, tanto ele lixado quanto não-lixado possuem a camada superficial muito parecida, resultando em  $\mu_{est}$  próximos.

Quando iniciado o aquecimento da liga de alumínio o  $\mu_{est}$  diminui, porém com uma elevação ainda maior da temperatura, este coeficiente aumenta, comportamento semelhante ao do cobre e provavelmente pelo mesmo motivo. A 75°C deve estar havendo uma formação da camada de óxido que contribui para a diminuição do atrito estático. Porém a 150°C o alumínio deve estar mais macio, aumentando assim o coeficiente de atrito estático.

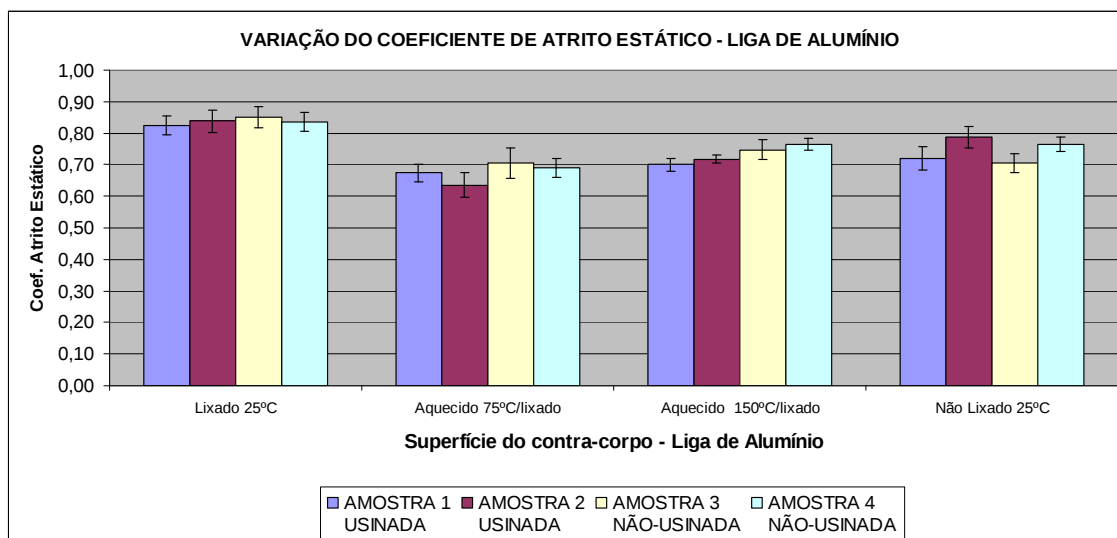


Figura 19 - Variação do coeficiente de atrito estático na liga de alumínio

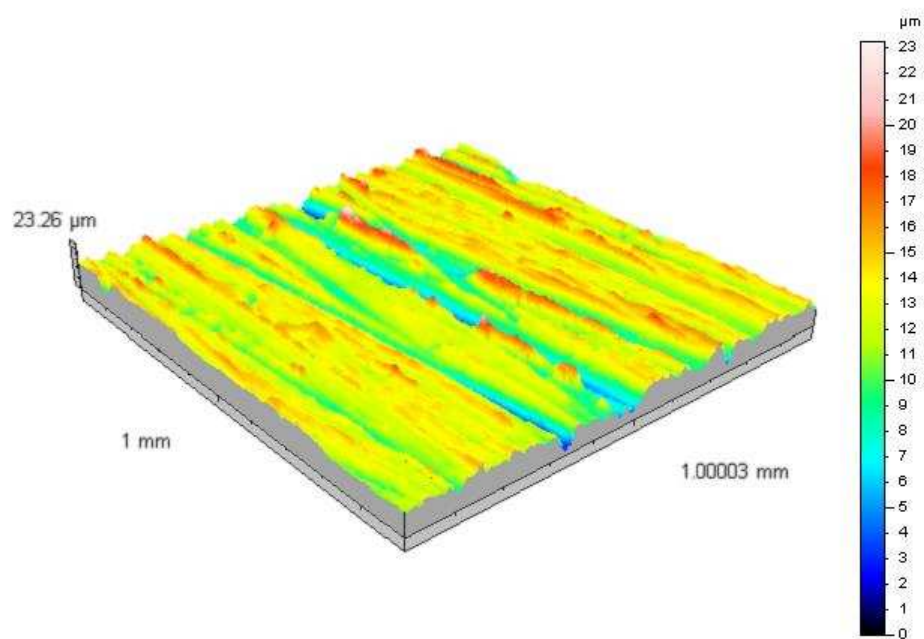


Figura 20 - Topografia gerada no rugosímetro 3D da liga de alumínio lixado

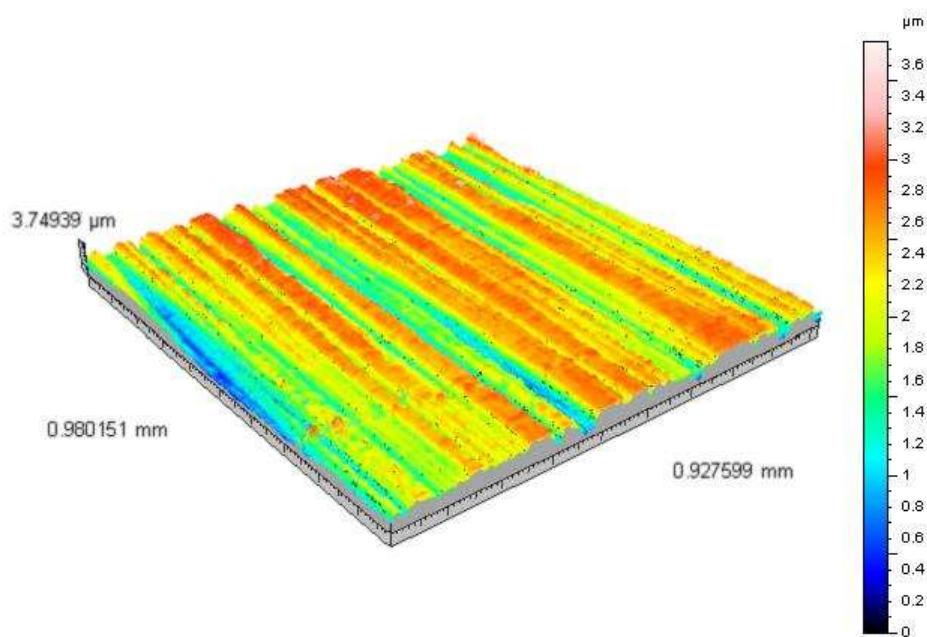


Figura 21 - Topografia gerada no rugosímetro 3D da liga de alumínio não- lixado

## CAPÍTULO 4 CONCLUSÕES

Após a análise de todos os resultados foi possível chegar às seguintes conclusões:

- . O tipo de acabamento superficial dos materiais carbonosos (usinados ou não) não influencia no valor do atrito.
- . O atrito estático em materiais carbonosos diminui a medida que a dureza do contra-corpo aumenta.
- . O principal determinante para o valor do atrito estático entre materiais carbonosos e o aço 1020 é o tipo de óxido que se tem sobre a superfície do contra-corpo.
- . Materiais carbonosos deslizando sobre cobre e liga de alumínio tendem a reduzir o atrito em temperaturas abaixo de 75°C. Em torno de 150°C tendem a aumentar.
- . O tipo de acabamento superficial sofrido pelo contra-corpo tem pouca influência no valor do atrito.

É importante ressaltar que os resultados obtidos neste projeto são válidos para as condições de teste descritas. Certamente diversos outros fatores podem influenciar o atrito estático em materiais carbonosos.

## ANEXO 1 – TOPOGRAFIA DOS ELETRODOS (CORPO)

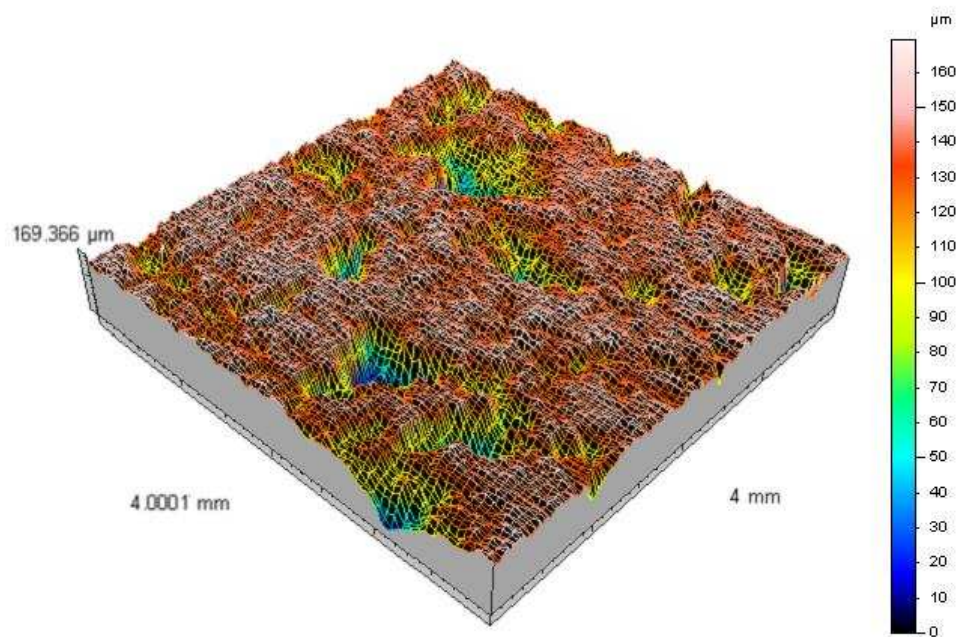


Figura 22 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 1

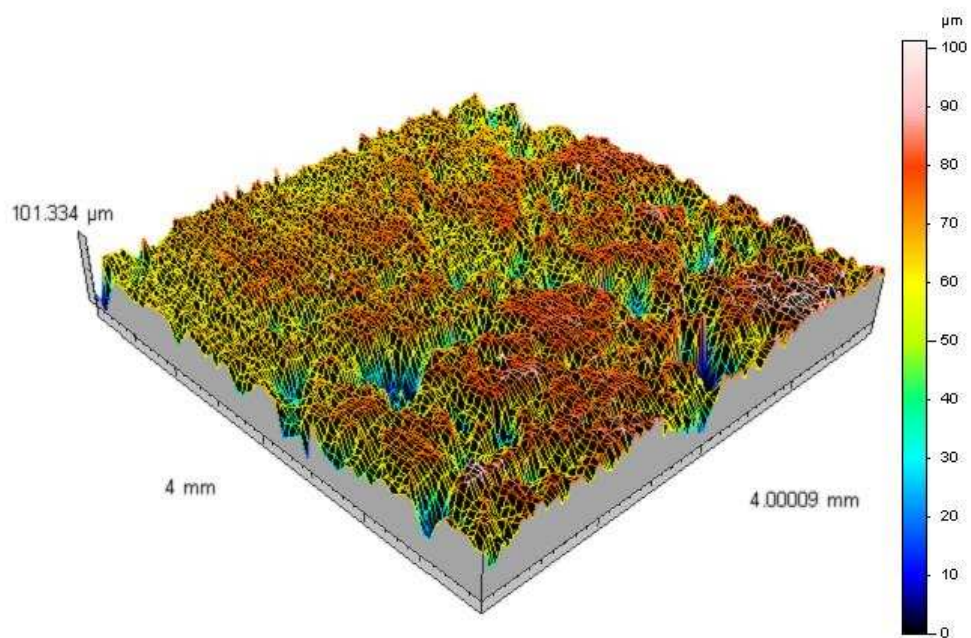


Figura 23 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 2

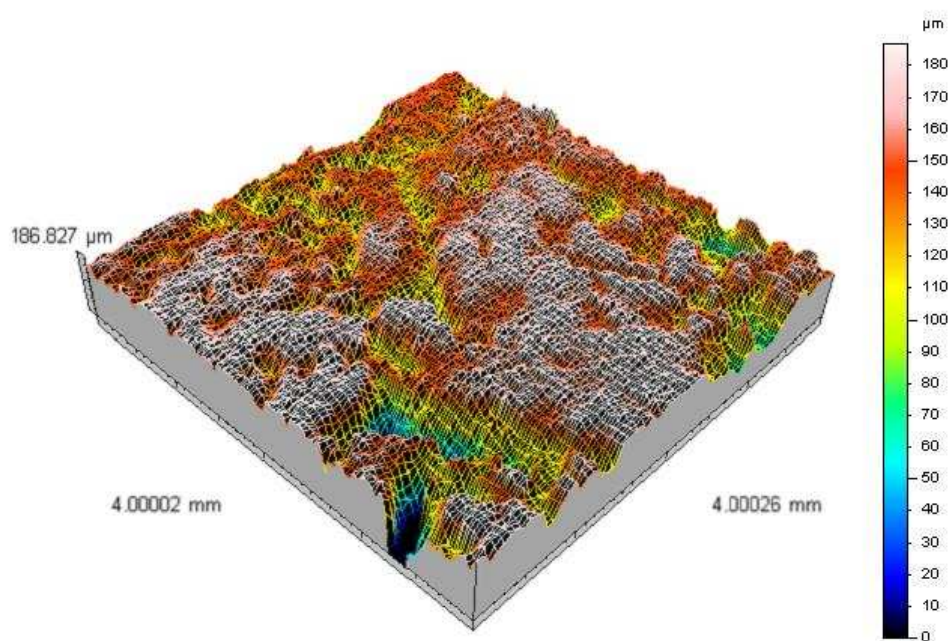


Figura 24 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 3

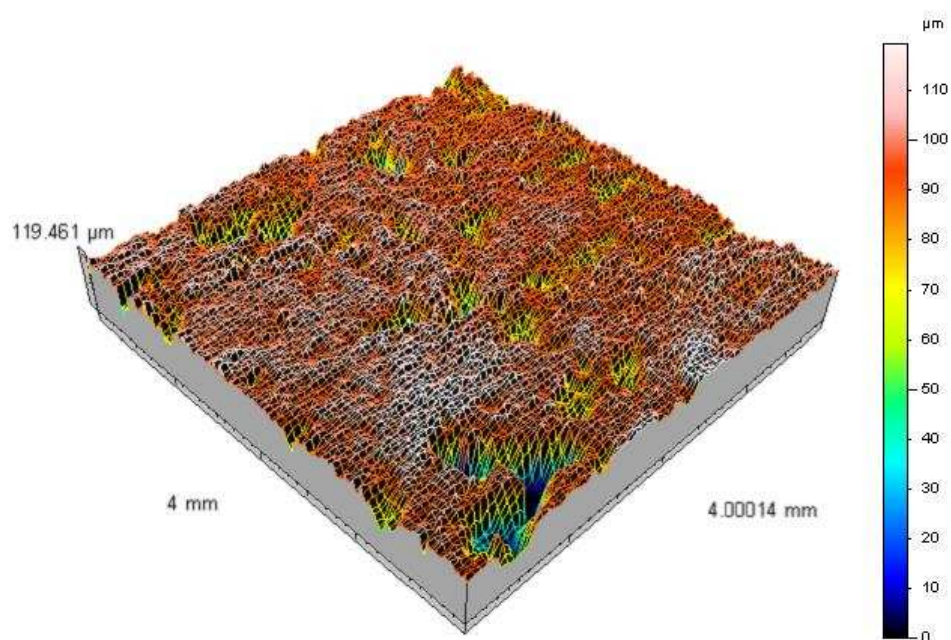


Figura 25 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 2, ponto 4

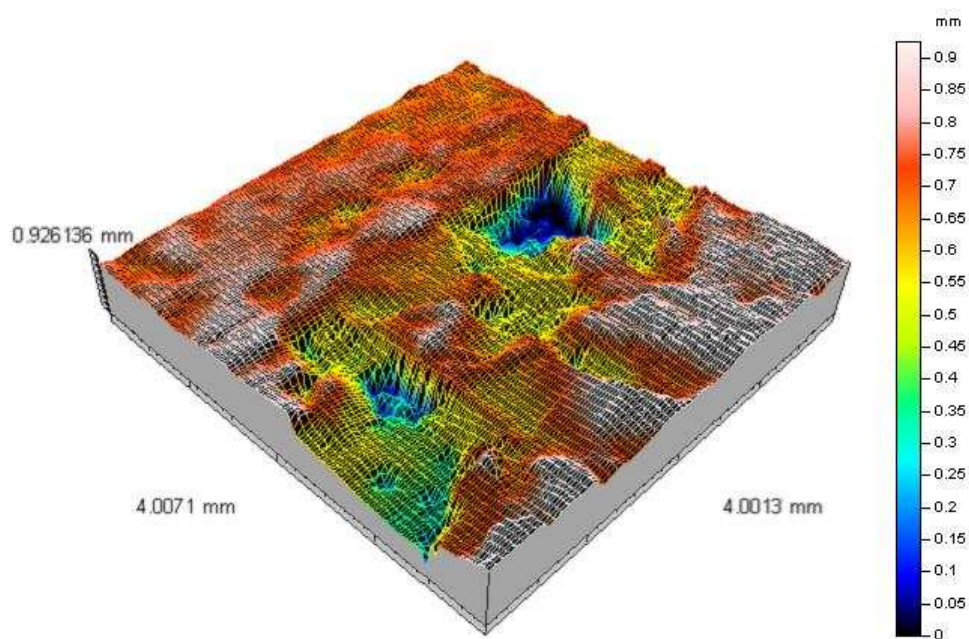


Figura 26 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 1

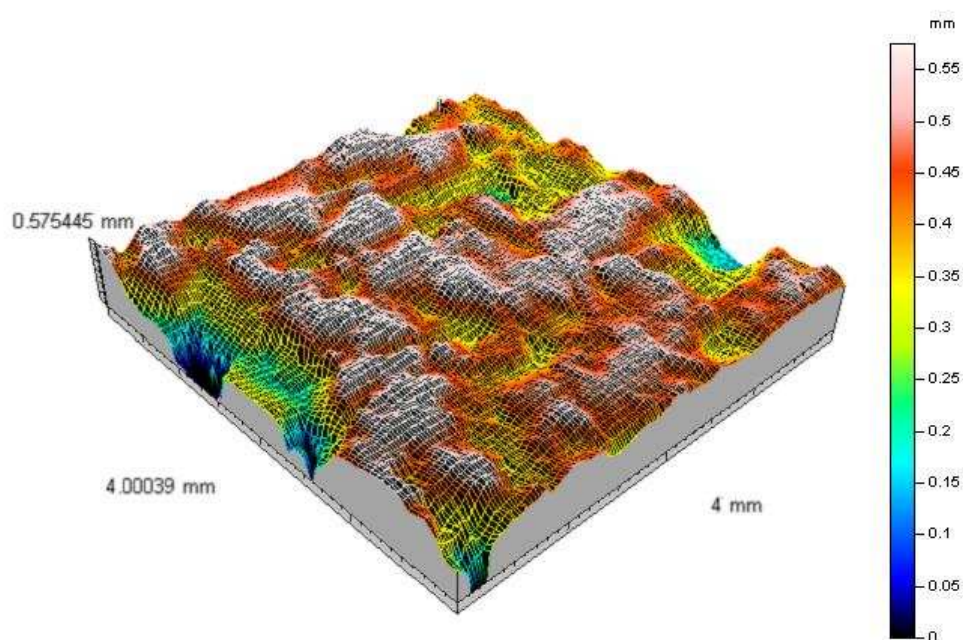


Figura 27 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 2

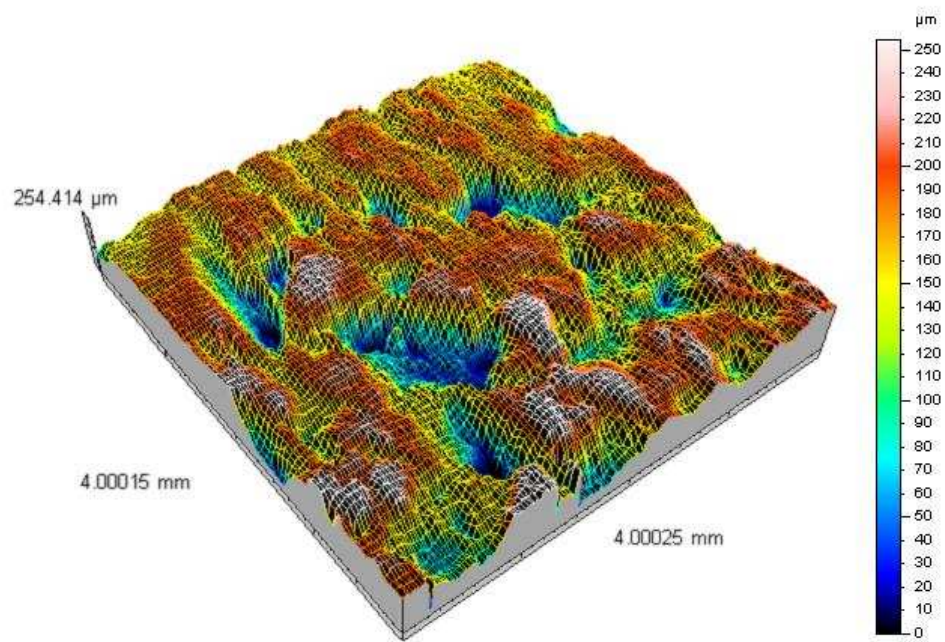


Figura 28 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 3

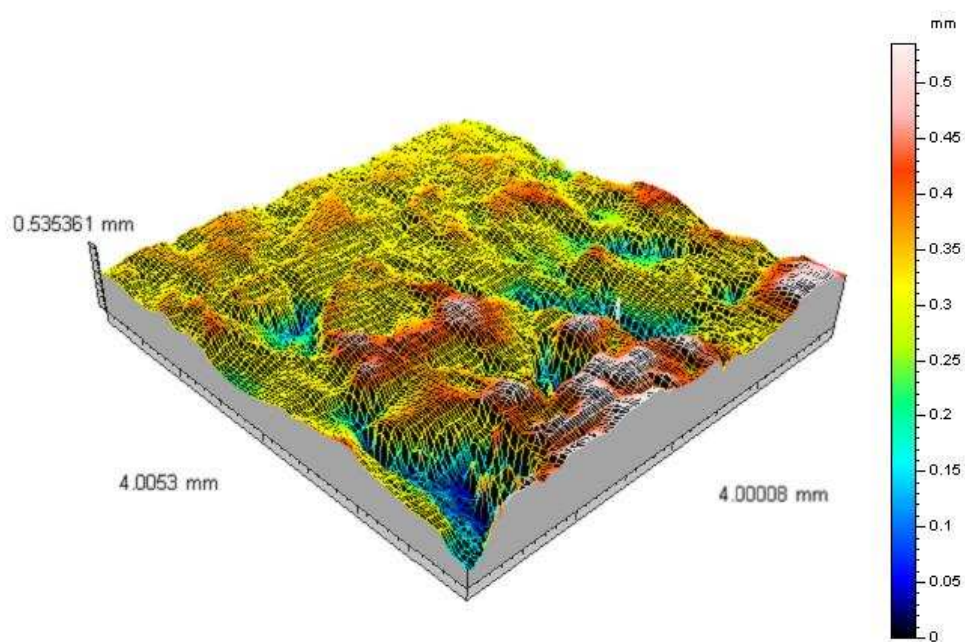


Figura 29 - Topografia gerada no rugosímetro 3D do eletrodo de material carbonoso à base de antracito, amostra 4, ponto 4

## **ANEXO 2 - IMAGEM DAS AMOSTRAS À BASE DE ANTRACITO UTILIZADAS NO PROJETO**

Na figura abaixo está sendo mostrado a amostra 4 de material carbonoso à base de antracito do experimento (eletrodo). Em razão das quatro amostras serem de tamanho e forma semelhantes, somente uma imagem das amostras está sendo exibida.



Figura 30 - Amostra 4 do material carbonoso à base de antracito

## ANEXO 3 – COEFICIENTES DE ATRITO ESTÁTICO MEDIDOS EM CADA TESTE

Tabela 6 – Coeficientes de atrito estático da amostra 1

|                      | AMOSTRA 1<br>USINADA |                         |                          |                       |                |                         |                          |                       |                  |                         |                          |                    |
|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------|
|                      | Aço 1020             |                         |                          |                       | Cobre          |                         |                          |                       | Liga de Alumínio |                         |                          |                    |
|                      | Lixado<br>25°C       | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C | Lixado<br>25°C | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C | Lixado<br>25°C   | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não Lixado<br>25°C |
| <b>Medida<br/>1</b>  | 0,29                 | 0,25                    | 0,44                     | 0,55                  | 0,70           | 0,56                    | 0,65                     | 0,73                  | 0,84             | 0,62                    | 0,65                     | 0,81               |
| <b>Medida<br/>2</b>  | 0,32                 | 0,24                    | 0,46                     | 0,51                  | 0,75           | 0,58                    | 0,67                     | 0,58                  | 0,73             | 0,60                    | 0,70                     | 0,76               |
| <b>Medida<br/>3</b>  | 0,32                 | 0,25                    | 0,42                     | 0,61                  | 0,84           | 0,54                    | 0,60                     | 0,60                  | 0,90             | 0,67                    | 0,72                     | 0,78               |
| <b>Medida<br/>4</b>  | 0,31                 | 0,25                    | 0,47                     | 0,50                  | 0,66           | 0,52                    | 0,65                     | 0,61                  | 0,78             | 0,65                    | 0,73                     | 0,73               |
| <b>Medida<br/>5</b>  | 0,30                 | 0,25                    | 0,43                     | 0,55                  | 0,66           | 0,57                    | 0,70                     | 0,65                  | 0,84             | 0,69                    | 0,70                     | 0,77               |
| <b>Medida<br/>6</b>  | 0,25                 | 0,23                    | 0,47                     | 0,59                  | 0,69           | 0,55                    | 0,68                     | 0,65                  | 0,87             | 0,70                    | 0,73                     | 0,66               |
| <b>Medida<br/>7</b>  | 0,26                 | 0,24                    | 0,47                     | 0,52                  | 0,73           | 0,54                    | 0,67                     | 0,62                  | 0,84             | 0,67                    | 0,67                     | 0,69               |
| <b>Medida<br/>8</b>  | 0,29                 | 0,24                    | 0,44                     | 0,55                  | 0,71           | 0,60                    | 0,66                     | 0,53                  | 0,84             | 0,70                    | 0,73                     | 0,71               |
| <b>Medida<br/>9</b>  | 0,25                 | 0,24                    | 0,44                     | 0,47                  | 0,68           | 0,58                    | 0,65                     | 0,58                  | 0,79             | 0,73                    | 0,73                     | 0,64               |
| <b>Medida<br/>10</b> | 0,27                 | 0,23                    | 0,44                     | 0,47                  | 0,66           | 0,56                    | 0,67                     | 0,60                  | 0,84             | 0,71                    | 0,66                     | 0,67               |

Tabela 7 – Coeficientes de atrito estático da amostra 2

|                      | AMOSTRA 2<br>USINADA |                         |                          |                       |                |                         |                          |                       |                  |                         |                          |                       |
|----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
|                      | Aço 1020             |                         |                          |                       | Cobre          |                         |                          |                       | Liga de Alumínio |                         |                          |                       |
|                      | Lixado<br>25°C       | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C | Lixado<br>25°C | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C | Lixado<br>25°C   | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C |
| <b>Medida<br/>1</b>  | 0,29                 | 0,27                    | 0,42                     | 0,67                  | 0,70           | 0,52                    | 0,61                     | 0,61                  | 0,84             | 0,65                    | 0,72                     | 0,92                  |
| <b>Medida<br/>2</b>  | 0,31                 | 0,29                    | 0,45                     | 0,58                  | 0,67           | 0,53                    | 0,67                     | 0,70                  | 0,73             | 0,73                    | 0,73                     | 0,75                  |
| <b>Medida<br/>3</b>  | 0,29                 | 0,23                    | 0,47                     | 0,54                  | 0,73           | 0,51                    | 0,75                     | 0,73                  | 0,90             | 0,65                    | 0,73                     | 0,78                  |
| <b>Medida<br/>4</b>  | 0,31                 | 0,24                    | 0,44                     | 0,68                  | 0,66           | 0,52                    | 0,65                     | 0,62                  | 0,79             | 0,60                    | 0,67                     | 0,75                  |
| <b>Medida<br/>5</b>  | 0,29                 | 0,24                    | 0,46                     | 0,56                  | 0,73           | 0,55                    | 0,70                     | 0,70                  | 0,90             | 0,63                    | 0,73                     | 0,77                  |
| <b>Medida<br/>6</b>  | 0,29                 | 0,23                    | 0,47                     | 0,57                  | 0,71           | 0,58                    | 0,68                     | 0,61                  | 0,78             | 0,53                    | 0,73                     | 0,76                  |
| <b>Medida<br/>7</b>  | 0,30                 | 0,25                    | 0,44                     | 0,52                  | 0,68           | 0,56                    | 0,78                     | 0,67                  | 0,84             | 0,62                    | 0,72                     | 0,81                  |
| <b>Medida<br/>8</b>  | 0,29                 | 0,25                    | 0,44                     | 0,55                  | 0,66           | 0,60                    | 0,73                     | 0,63                  | 0,87             | 0,65                    | 0,73                     | 0,78                  |
| <b>Medida<br/>9</b>  | 0,30                 | 0,27                    | 0,45                     | 0,47                  | 0,65           | 0,53                    | 0,65                     | 0,53                  | 0,84             | 0,60                    | 0,70                     | 0,73                  |
| <b>Medida<br/>10</b> | 0,31                 | 0,23                    | 0,40                     | 0,47                  | 0,71           | 0,54                    | 0,67                     | 0,58                  | 0,92             | 0,70                    | 0,73                     | 0,84                  |

Tabela 8 – Coeficientes de atrito estático da amostra 3

|              | AMOSTRA 3<br>NÃO-USINADA |                         |                          |                       |  |                |                         |                          |                       |  |                |                         |                          |                       |
|--------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|--|----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|--|----------------|-------------------------|--------------------------|-----------------------|
|              | Aço 1020                 |                         |                          |                       |  | Cobre          |                         |                          |                       |  | Alumínio       |                         |                          |                       |
|              | Lixado<br>25°C           | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C |  | Lixado<br>25°C | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C |  | Lixado<br>25°C | Aquecido<br>75°C/lixado | Aquecido<br>150°C/lixado | Não<br>Lixado<br>25°C |
| Medida<br>1  | 0,31                     | 0,25                    | 0,47                     | 0,47                  |  | 0,60           | 0,58                    | 0,61                     | 0,73                  |  | 0,79           | 0,78                    | 0,84                     | 0,67                  |
| Medida<br>2  | 0,31                     | 0,31                    | 0,47                     | 0,53                  |  | 0,73           | 0,58                    | 0,54                     | 0,62                  |  | 0,90           | 0,81                    | 0,81                     | 0,73                  |
| Medida<br>3  | 0,28                     | 0,27                    | 0,46                     | 0,54                  |  | 0,66           | 0,52                    | 0,71                     | 0,69                  |  | 0,78           | 0,67                    | 0,67                     | 0,74                  |
| Medida<br>4  | 0,25                     | 0,27                    | 0,53                     | 0,54                  |  | 0,71           | 0,60                    | 0,60                     | 0,73                  |  | 0,84           | 0,62                    | 0,73                     | 0,78                  |
| Medida<br>5  | 0,25                     | 0,31                    | 0,49                     | 0,51                  |  | 0,68           | 0,56                    | 0,60                     | 0,63                  |  | 0,87           | 0,70                    | 0,73                     | 0,70                  |
| Medida<br>6  | 0,29                     | 0,29                    | 0,47                     | 0,55                  |  | 0,66           | 0,55                    | 0,61                     | 0,53                  |  | 0,94           | 0,65                    | 0,80                     | 0,69                  |
| Medida<br>7  | 0,31                     | 0,25                    | 0,49                     | 0,54                  |  | 0,58           | 0,53                    | 0,67                     | 0,61                  |  | 0,87           | 0,67                    | 0,72                     | 0,64                  |
| Medida<br>8  | 0,31                     | 0,25                    | 0,51                     | 0,58                  |  | 0,66           | 0,58                    | 0,70                     | 0,62                  |  | 0,84           | 0,84                    | 0,73                     | 0,75                  |
| Medida<br>9  | 0,32                     | 0,27                    | 0,49                     | 0,56                  |  | 0,65           | 0,61                    | 0,68                     | 0,63                  |  | 0,92           | 0,62                    | 0,73                     | 0,70                  |
| Medida<br>10 | 0,31                     | 0,29                    | 0,49                     | 0,60                  |  | 0,64           | 0,60                    | 0,53                     | 0,70                  |  | 0,78           | 0,70                    | 0,73                     | 0,66                  |

Tabela 9 – Coeficientes de atrito estático da amostra 4

|                      | <b>AMOSTRA 4<br/>NÃO-USINADA</b> |                                 |                                  |                                |                        |                                 |                                  |                                |                        |                                 |                                  |                                |
|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|                      | <b>Aço 1020</b>                  |                                 |                                  |                                | <b>Cobre</b>           |                                 |                                  |                                | <b>Alumínio</b>        |                                 |                                  |                                |
|                      | <b>Lixado<br/>25°C</b>           | <b>Aquecido<br/>75°C/lixado</b> | <b>Aquecido<br/>150°C/lixado</b> | <b>Não<br/>Lixado<br/>25°C</b> | <b>Lixado<br/>25°C</b> | <b>Aquecido<br/>75°C/lixado</b> | <b>Aquecido<br/>150°C/lixado</b> | <b>Não<br/>Lixado<br/>25°C</b> | <b>Lixado<br/>25°C</b> | <b>Aquecido<br/>75°C/lixado</b> | <b>Aquecido<br/>150°C/lixado</b> | <b>Não<br/>Lixado<br/>25°C</b> |
| <b>Medida<br/>1</b>  | 0,31                             | 0,25                            | 0,53                             | 0,61                           | 0,62                   | 0,60                            | 0,60                             | 0,61                           | 0,78                   | 0,67                            | 0,77                             | 0,81                           |
| <b>Medida<br/>2</b>  | 0,31                             | 0,27                            | 0,55                             | 0,44                           | 0,65                   | 0,54                            | 0,65                             | 0,62                           | 0,84                   | 0,70                            | 0,79                             | 0,75                           |
| <b>Medida<br/>3</b>  | 0,29                             | 0,32                            | 0,49                             | 0,51                           | 0,71                   | 0,55                            | 0,61                             | 0,63                           | 0,81                   | 0,75                            | 0,79                             | 0,78                           |
| <b>Medida<br/>4</b>  | 0,32                             | 0,27                            | 0,49                             | 0,58                           | 0,65                   | 0,58                            | 0,61                             | 0,65                           | 0,79                   | 0,73                            | 0,78                             | 0,70                           |
| <b>Medida<br/>5</b>  | 0,29                             | 0,28                            | 0,49                             | 0,51                           | 0,73                   | 0,54                            | 0,65                             | 0,66                           | 0,84                   | 0,65                            | 0,76                             | 0,77                           |
| <b>Medida<br/>6</b>  | 0,32                             | 0,25                            | 0,47                             | 0,53                           | 0,73                   | 0,55                            | 0,66                             | 0,61                           | 0,85                   | 0,62                            | 0,73                             | 0,74                           |
| <b>Medida<br/>7</b>  | 0,29                             | 0,29                            | 0,45                             | 0,53                           | 0,70                   | 0,57                            | 0,62                             | 0,62                           | 0,84                   | 0,75                            | 0,71                             | 0,79                           |
| <b>Medida<br/>8</b>  | 0,27                             | 0,26                            | 0,51                             | 0,51                           | 0,65                   | 0,51                            | 0,68                             | 0,63                           | 0,79                   | 0,70                            | 0,76                             | 0,81                           |
| <b>Medida<br/>9</b>  | 0,29                             | 0,25                            | 0,53                             | 0,54                           | 0,76                   | 0,60                            | 0,71                             | 0,53                           | 0,91                   | 0,67                            | 0,78                             | 0,74                           |
| <b>Medida<br/>10</b> | 0,29                             | 0,27                            | 0,46                             | 0,52                           | 0,60                   | 0,61                            | 0,60                             | 0,61                           | 0,93                   | 0,65                            | 0,79                             | 0,76                           |

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Filho, Olney A. V. – Estudo para o uso de matérias-primas nacionais em misturas de carvões para obtenção de coque com características requeridas em altos-fornos de alta produtividade, Tese para obtenção do Título de Mestrado em Engenharia Metalúrgica, 2007, Minas Gerais, Brasil.
2. Mantell, C.L., Carbon and Graphite handbook, John Wiley, New York, 1968, pp. 289-309.
3. Coser, Max Mauro – Estudo de Propriedades de Eletrodos Pré-Cozidos e de suas Matérias-Primas, Tese para obtenção do Título de Mestrado em Física, 1997, Espírito Santo, Brasil.
4. Basse, Jorn Larse – Introduction to friction, ASM HandBook Volume 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, National Science Foundation, 1992.
5. Hutchings, Ian M. – Tribology : friction and wear of engineering materials, Oxford : Butterworth Heinemann, 1992.
6. Bhushan, Bharat, – Modern tribology handbook, Boca Raton, FL : CRC, 2001.
7. Mello, Dr. José Daniel Biasoli de – Caracterização estatística da topografia de superfícies modificadas contendo óxidos.
8. Gentil, Vicente - Corrosão. 3ª edição revisada, Rio de Janeiro, 1996.
9. Antônio Germano Gomes Pinto, 2007, p. 57

10. Olney Amorim Viana Filho, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, UFMG, 200
11. [www.brascook.com.br](http://www.brascook.com.br), 22/11/2008
12. Ludema, Kenneth C. - Friction, Wear, Lubrication - A textbook in tribology, 1995
13. Buckley D H, Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear and Lubrication, Elsevier, 1981
14. ASTM G40 - 05 Standard Terminology Relating to Wear and Erosion
15. ASTM C808 - 75(2005) Standard Guideline for Reporting Friction and Wear Test Results of Manufactured Carbon and Graphite Bearing and Seal Materials