

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL CARLO NADALIN TREVISAN

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DESGASTE EM UM SISTEMA  
PINO-DISCO ATRAVÉS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS COMBINADA  
COM AVALIAÇÃO DE PRESSÃO DE CONTATO POR MEIO DE  
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

DANIEL CARLO NADALIN TREVISAN

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO DESGASTE EM UM SISTEMA  
PINO-DISCO ATRAVÉS DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS COMBINADA  
COM AVALIAÇÃO DE PRESSÃO DE CONTATO POR MEIO DE  
SIMULAÇÃO NUMÉRICA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

Co-Orientador Prof. Dr. Marco Antonio Luersen

CURITIBA

2013

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

Por meio deste termo, aprovamos a monografia do Projeto de Pesquisa “Análise do comportamento do desgaste em um sistema pino-disco através de ensaios experimentais combinada com a avaliação de pressão de contato através de simulação numérica”, realizado pelo aluno Daniel Carlo Nadalin Trevisan, como requisito parcial para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Prof. Dr. Carlos Henrique da Silva

DAMEC – UTFPR

Orientador

Prof. Dr. Marco Antonio Luersen

DAMEC – UTFPR

Co-Orientador

Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde

DAMEC – UTFPR

Avaliador

Prof.Dr. Ana Paula Carvalho da Silva Ferreira

DAMEC - UTFPR

Curitiba, 30 de Abril de 2013

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho aos amigos e familiares que auxiliaram no período que durou o curso de Engenharia Industrial Mecânica. No entanto, em primeiro lugar, é necessário agradecer a Deus, sem o qual não teria forças para encarar um curso dessa importância e por fim, elaborar um trabalho de tal complexidade.

## **AGRADECIMENTOS**

É necessário agradecer às pessoas, equipes de laboratórios e empresas envolvidas nesse trabalho, os quais com a parceria nas diversas etapas de desenvolvimento tornaram-no viável.

Ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC - UTFPR), representado pelos laboratórios e pessoas vinculadas (professores e alunos), os quais contribuíram em diversas etapas para resolução das questões que surgiam à medida que o trabalho avançava.

Ao Laboratório de Superfícies e Contato (LASC- DAMEC), cujo suporte com equipamento foi fundamental para realização dos ensaios experimentais e ainda especificamente do corpo docente atuando nesse ambiente, representado pelo professor Dr. Carlos Henrique da Silva.

Ao Laboratório de Mecânica Estrutural (LAMES - DAMEC) cujo suporte traduzido na estrutura computacional e no apoio do corpo docente, na pessoa do professor Dr. Marco Antonio Luersen foram de fundamental importância para desenvolvimento e aplicação do método dos elementos finitos, abordado no problema.

Ao Laboratório de Metrologia e Qualidade (LAMEQ - DAMEC), no qual encontrou-se apoio tanto para realizar medições importantes nas etapas de preparação de corpos de prova e após os ensaios experimentais. Agradecendo especialmente ao professor Dr. Walter Luis Mikos e à aluna bolsista do laboratório Blanco Higashino, cujo tempo dedicado no apoio a esse trabalho merece reconhecimento.

Ao Laboratório de Materiais (DAMEC) e ao Laboratório de Plasma (DAMEC) que com equipamentos auxiliares permitiram validar e analisar os corpos de prova utilizados.

Ao Laboratório de Fabricação (DAMEC) cujo apoio na usinagem dos discos e da peça de adaptação foram importantes para dar prosseguimento no trabalho.

Agradecimento à empresa Aços Favorit Distribuidora Ltda e à equipe de baja do DAMEC 'Bajaguara' que realizaram a doação dos materiais para fabricação dos discos de ensaio.

Agradecimento à empresa Só Esferas Com. de Esferas Ltda que forneceram as esferas utilizadas nos ensaios de desgaste.

Agradecimento à empresa SpectroScan e ao professor Dr. César Lúcio Molitz Allenstein que auxiliaram na identificação da composição do material dos discos usados nos ensaios.

Agradecimento à empresa Artis Matriz, cujo serviço de retificação dos discos foi importante para o desenvolvimento do trabalho.

Agradecimento à empresa K&L Laboratórios de Metrologia cujo serviço de medição da planicidade dos discos foi realizada sob cortesia e se mostrou muito receptiva quando o serviço foi requerido.

Agradecimento especial aos colegas de curso e alunos de mestrado que trabalham nos laboratórios citados, cujo apoio e paciência para ajudar devem ser reconhecidos.

## RESUMO

TREVISAN, Daniel C. N. Análise do comportamento do desgaste em um sistema pino-disco através de ensaios experimentais combinada com a avaliação de pressão de contato por meio de simulação numérica. 2013.124. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Industrial Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

A vida de um componente mecânico, principalmente daquele submetido a cargas dinâmicas é quase sempre determinada pelas condições de carregamento à que está sujeito. Tensões alternadas de fadiga, assim como tensões de contato, precisam receber atenção especial durante o projeto de um equipamento. Algumas vezes, essa postura não é observada pelos projetistas seja pela falta de conhecimento aprofundado de certos critérios de falha (Von Mises ou Tresca), ou mesmo pelo tempo que uma análise mais completa possa exigir. Então, acaba-se adotando o superdimensionamento de componentes como estratégia de projeto. O problema dessa conduta é a possibilidade de encarecer o projeto ou até mesmo aumentar a complexidade de fabricação. A partir da observação da dificuldade para considerar o critério de desgaste no âmbito de um projeto, somado ao fato de que todo componente mecânico em contato deslizante está suscetível a esse fenômeno, vislumbrou-se a oportunidade de trabalhar com a teoria do desgaste associada a ferramentas de análise já existentes. A proposta do presente trabalho inclui aplicar o volume de desgaste medido para cálculo do campo de tensões instantâneo a que o corpo de prova está submetido. Para atingir tal objetivo, foi utilizada a combinação de duas ferramentas: análise experimental e método de elementos finitos (MEF).

A integração entre essas duas ferramentas foi feita adotando o modelo de desgaste proposto por Archard. Modelo em que o volume de desgaste está associado à distância percorrida durante o ensaio e à pressão no contato entre os componentes. Já o MEF atuou fornecendo os campos de pressão para possibilitar o cálculo do coeficiente de desgaste que varia com o transcorrer do ensaio. A análise se restringiu ao contato esfera (alumínio) contra disco (aço liga AISI D2 temperado e revenido). Os resultados obtidos foram satisfatórios e mostram que a metodologia empregada é viável, pois, a partir do uso do modelo de Archard, consegue-se descrever bem a variação do coeficiente de desgaste ao longo do ensaio.

**Palavras-chave:** Desgaste, Modelo de Archard, Método dos Elementos Finitos, Coeficiente de desgaste, desgaste abrasivo.

## ABSTRACT

TREVISAN, Daniel C. N. Analysis of wear behavior in a pin-disc system through experimental evaluation combined with contact pressure analysis through numerical simulation. 2013.124. Graduation Course (Industrial Mechanical Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

The life of a mechanical component, especially that subjected to dynamic loads is almost always determined by the loading conditions to which it is subject. Alternating stress fatigue, as well as contact stresses, need to receive special attention during the design of a device. Sometimes, this approach is not observed because of the designer's lack of depth knowledge of certain failure criteria (Von Mises or Tresca), or even by the bigger time spent to a more complete analysis would require. Then, it ends up taking oversizing of components such as design strategy. The problem with this approach is the possibility of getting a more expensive desing or even increase manufacturing complexity. From the observation of the difficulty to consider the criterion of wear within a project, associated with the fact that every mechanical components in sliding contact is susceptible to this phenomenon, it was saw the opportunity to work with the theory of wear associated with existing analysis tools. The purpose of this work includes applying the wear volume measured to calculate the stress field in the instant that the test body is subjected. To achieve this target, it was used the combination of two tools: experimental analysis and finite element method (FEM). The integration between these two tools was made by adopting the wear model proposed by Archard wear. Model in which the wear volume is associated with the distance traveled during the test and the contact pressure between the test bodies. The FEM applied supplied pressure fields to enable the calculation of the wear coefficient that varies with the passing of the test. The analysis was restricted to the sphere contact (aluminum) against disk (AISI D2 alloy steel hardened and tempered). The results obtained were satisfactory and show that the method is feasible, since, from the use of Archard model, it is possible to describe well the wear coefficient variation throughout the test.

**Keywords:** Wear, Archard Model, Finite Element Method, Wear Coefficient.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Propriedades metalúrgicas que influenciam o desgaste por deslizamento (ZUM-GAHR, 1987 , modificado). .....24
- Figura 2 – Evidência do desgaste abrasivo e adesivo no sistema de movimentação de espelho retrovisor de automóvel (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio. ....25
- Figura 3–Mecanismos de desgaste durante contato deslizante: (a) junções adesivas com transferência de material, (b) da deformação plástica devido a fadiga de superfície em materiais dúcteis, (c) quebra de partículas devido a fadiga de superfície em materiais frágeis, (d) reações triboquímicas e quebras em regiões de filmes de oxidação.....26
- Figura 4- Figura 4.a Curva experimental da perda de massa ou volume versus a distância de deslizamento ou tempo.(I) Running-in ou amaciamento, (II) regime permanente,(III) Running-out ou período de falha. Figura 4.b Progresso do desgaste em função dos mecanismos de desgaste. Fonte: ZUM-GARH,1987, modificado.....27
- Figura 5 - Efeito do tempo de contato na força de atrito estático entre metais.....31
- Figura 6 - A energia gerada durante o deslizamento pode ser dissipada sob a forma de calor ou através da deformação do material. Fonte: PETER BLAU,2009 modificado.....35
- Figura 7 – (a) Deslocamento de estruturas, deformações e tensões durante deslizamento a seco. (b) aumento da densidade de discordâncias e deformações devido ao aumento de asperezas na contraface. (c) núcleos de discordâncias recuperados, resultando na diminuição das deformações de superfície. (d) trincas de delaminação e tensões internas. Fonte: Salesky et al 1983 *apud* ZUM-GAHR,1987 modificado.....42
- Figura 8 - Diferentes tipos de fragmentos de desgaste e camadas formadas durante o desgaste por deslizamento a seco. (a) detritos de desgaste em pó.(b)camada compactada de fragmentos de desgaste.(c)camada de transferência de baixa ductilidade(d) camada de transferência contendo partículas como inclusões e

|  |    |
|--|----|
| óxidos.(e) camada de transferência de alta ductilidade.(f) camadas dúcteis e fortemente aderidas devido a reação triboquímica.....   | 44 |
| Figura 9 - Geometrias usadas nos testes de ensaio por deslizamento. (A) Anel-anel ao longo de uma linha; (B) Anel-anel face-a-face. (C) Pino-disco na superfície; (D) Pino-disco sobre a curvatura; (E) Bloco-anel; (F) Pino-plano. Fonte: HUTCHINGS,1992.....   | 46 |
| Figura 10 - Ensaio assimétrico: geometrias de contato. A - Contato conforme; B - Contato não-conforme. Fonte: HUTCHINGS modificado, 1992.....  | 47 |
| Figura 11 - Discretização de uma região de interesse em de elementos finitos. Fonte: FAGAN,1992 modificado.....  | 49 |
| Figura 12- Visão geral do ambiente do <i>Ansys Workbench</i> .....   | 53 |
| Figura 13 - Quadro descritivo das subtarefas para resolução do problema estático estrutural. ....  | 53 |
| Figura 14 - Resultados dos ensaios para a pressão e coeficiente de atrito. ....  | 57 |
| Figura 15 - Resultados dos ensaios da profundidade de deslizamento dos ensaios. Círculos representam resultados dos experimentos, linhas são correspondentes a resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, sendo a linha mais espessa a média entre as outras duas. Fonte: PÕDRA e ANDERSSON, 1999 modificado..... | 57 |
| Figura 16 - Tribômetro a ser utilizado nos ensaios em laboratório.....   | 59 |
| Figura 17 - Fluxograma descritivo da Metodologia.....  | 60 |
| Figura 18 - Método de medição da altura desgastada h do pino ensaiado .....  | 62 |
| Figura 19 – Amostra de esfera de Alumínio usada nos ensaios. ....  | 63 |
| Figura 20 - Porta esferas utilizado para os experimentos. ....   | 64 |
| Figura 21 - Peça de acoplamento usinada para adaptar encaixe no tribômetro. ....   | 64 |
| Figura 22 - Montagem do porta esferas e da peça de acoplamento. ....   | 65 |
| Figura 23 - Disco usinado e pronto para o processo de têmpera .....  | 66 |
| Figura 24 - Divisão de pistas para os ensaios pino sobre disco.....  | 68 |
| Figura 25 - Evidência da rastreabilidade das esferas.....  | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26 – Deslocamento do pino em função do tempo para distância de deslizamento de 100m (ensaios preliminares).....      | 72 |
| Figura 27 - Ensaio pino o sobre disco para distância de deslizamento de 800m. ....  | 74 |
| Figura 28 - Esfera após desgaste por deslizamento com distância de 800 m.....   | 75 |
| Figura 29 - Face DIIIf1 após os ensaios de desgaste por deslizamento, evidenciando as pistas marcadas. ....                 | 75 |
| Figura 30 - Evidência do diâmetro de desgaste em uma esfera após ensaio. ....   | 76 |
| Figura 31 – Microscópio tridimensional modelo UM-214B. ....   | 76 |
| Figura 32 - Justificativa para medição dos diâmetros de desgaste da das esferas...  | 80 |
| Figura 33 - Deslocamento do pino na direção vertical para a distância de 30m, 50m, 100m,200m, 400m, 600m, 800m e 1000m..... | 81 |
| Figura 34 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 30m .....  | 82 |
| Figura 35 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 400m. ....   | 82 |
| Figura 36 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 1000m. ....  | 83 |
| Figura 37 - Gráfico da altura de desgaste ao longo da distância de deslizamento. ..   | 87 |
| Figura 38 - Resultados da simulação numérica s= 30 m.....   | 90 |
| Figura 39 - Resultados da simulação numérica s= 50 m.....   | 90 |
| Figura 40 - Resultados da simulação numérica s= 100 m.....  | 91 |
| Figura 41 - Resultados da simulação numérica s= 200 m.....  | 91 |
| Figura 42 - Resultados da simulação numérica s= 400 m.....  | 92 |
| Figura 43 - Resultados da simulação numérica s= 600 m.....  | 92 |
| Figura 44 - Resultados da simulação numérica s= 800 m.....  | 93 |
| Figura 45 - Resultados da simulação numérica s= 1000 m.....   | 93 |
| Figura 46 - Pressão de contato em função da distância de deslizamento obtida como resultados do modelo do MEF. ....         | 94 |
| Figura 47 - Coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento. ....  | 97 |
| Figura 48 - Taxa de variação de k em função da distância de deslizamento. ....  | 97 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 49 - Topografia medida para a esfera DIf1-30. ....  | 100 |
| Figura 50 - Topografia medida para a esfera DIf2-50. ....  | 100 |
| Figura 51 - Topografia medida para a esfera DIIIf1-100. ....                                     | 100 |
| Figura 52 - Topografia medida para a esfera DIf1-200. ....                                       | 101 |
| Figura 53 - Topografia medida para a esfera DIf2-400. ....                                       | 101 |
| Figura 54 - Topografia medida para a esfera DIIIf1-600. ....                                     | 101 |
| Figura 55 - Topografia medida para a esfera DIf1-800. ....                                       | 102 |
| Figura 56 - Topografia medida para a esfera DIf2-1000.....                                       | 102 |
| Figura 57 - Desgaste da esfera DIIIf1-30 ampliada por microscopia ótica, aumento<br>100 x. ....  | 103 |
| Figura 58 - Desgaste da esfera DIIIf1-1000 ampliada por microscopia ótica – aumento<br>50x. .... | 104 |
| Figura 59 - Evidência dos ensaios preliminares. ....   | 112 |

## LISTA DE TABELAS

|   |           |
|---|-----------|
| Tabela 1 - Efeito da Pressão sobre o coeficiente de atrito em metais puros.....                                   | 34        |
| Tabela 2 - Composição química, em peso, do aço AISI D2 usado nos experimentos.<br>.....                           | 65        |
| Tabela 3 - Medição da dureza das esferas de Alumínio.....   | 67        |
| Tabela 4 - Dureza do disco antes e depois do tratamento térmico. ....   | 67        |
| Tabela 5 - Classificação de pistas nos discos de ensaio.....  | 68        |
| Tabela 6 - Classificação de esferas. ....   | 69        |
| Tabela 7 - Medição da rugosidade Ra das faces dos discos após processo de<br>retificação.....                     | 70        |
| Tabela 8 - Medição da rugosidade Rt das faces dos discos após processo de<br>retificação.....                     | 70        |
| Tabela 9 - Tabela descritiva dos incrementos aplicados para os ensaios.....                                       | 73        |
| Tabela 10 - Dados do coeficiente de atrito extraídos do programa que controla o<br>tribômetro. ....               | 84        |
| Tabela 11 - Resultado das medições dos diâmetros de desgaste. ....  | 85        |
| <b>Tabela 12 - Alturas de desgaste calculadas.....</b>  | <b>86</b> |
| Tabela 13 - Comparação dos ensaios entre o modelo teórico de Hertz e o modelo de<br>Elementos Finitos criado..... | 89        |
| Tabela 14 - Resultado das simulações numéricas.....   | 94        |
| Tabela 15 - Coeficiente de desgaste calculado.....  | 96        |

## **LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS**

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná;

DAMEC – Departamento Acadêmico de Mecânica;

MEF – Método dos Elementos Finitos;

LAMES – Laboratório de Mecânica Estrutural;

LASC - Laboratório de Superfícies e Contato;

LIM – Laboratório Integrado de Materiais;

LabPlasma – Laboratório de Plasma;

LAMEQ – Laboratório de Metrologia e Qualidade;

CAD - Computer Aided Desing;

ASTM – American Society for Testing Materials.

## LISTA DE SÍMBOLOS

- V – Volume de desgaste ( $m^3$ );
- s – Distância de deslizamento (m);
- K – Coeficiente de desgaste adimensional;
- p – Pressão de contato normal (Pa);
- $F_N$  – Carregamento Normal (N);
- H – Dureza do material mais mole (Pa);
- h – Profundidade de desgaste (m);
- k – Coeficiente de desgaste dimensional ( $Pa^{-1}$ );
- $A_{ap}$  – Área de contato aparente ( $mm^2$ );
- $\mu_s$  - Coeficiente de Atrito Estático;
- $\tau_m$  – Resistência ao cisalhamento do material mais fraco(Pa);
- A – Área de contato real ( $mm^2$ );
- [k] – Matriz de rigidez;
- {U} – Vetor de deslocamentos nodais;
- {F} – Vetor de forças nodais;
- $r_{des}$  – Raio correspondente ao desgaste na esfera (mm);
- r – Distância do centro do disco até a pista de desgaste (mm);
- $\omega$  – Velocidade angular (rad/s);
- v – Velocidade tangencial (m/s);
- Erro% - Erro percentual relativo (%);
- Vr – Valor de referência ( unidade qualquer);
- Vc – Valor calculado (unidade qualquer).
- $p_{m\acute{a}xima}$  – Pressão máxima de Hertz (Pa);
- x – Posição de análise da pressão de Hertz na coordenada do raio (mm);

$r_0$  – Raio crítico para o cálculo da pressão de Hertz (mm);

$R$  – Raio da esfera (mm);

$E^*$  - Módulo de elasticidade normalizado (Pa);

$E_1$  – Módulo de elasticidade do material 1 (Pa);

$E_2$  – Módulo de elasticidade do material 2 (Pa);

$\nu_1$  – Coeficiente de Poisson do material 1;

$\nu_2$  – Coeficiente de Poisson do material 2;

$\nu$  – Menor coeficiente de Poisson entre os materiais 1 e 2 .

# SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>19</b> |
| 1.1      | Contexto do Tema  | 19        |
| 1.2      | Caracterização do Problema  | 20        |
| 1.3      | Objetivos   | 20        |
| 1.4      | Justificativa   | 21        |
| 1.5      | Conteúdo ou Etapas do Trabalho  | 23        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>24</b> |
| 2.1      | Mecanismos de desgaste  | 24        |
| 2.2      | Desgaste por Deslizamento   | 26        |
| 2.3      | Modelo de Archard   | 28        |
| 2.4      | Fundamentos do atrito durante o desgaste por deslizamento.                                  | 30        |
| 2.4.1    | Efeitos dos parâmetros no atrito de um sistema sobre a condição de <i>running-in</i> .      | 34        |
| 2.4.2    | Running-in: transições nas condições de atrito.   | 37        |
| 2.5      | Introdução ao estudo das propriedades físicas do comportamento de desgaste ao deslizamento. | 39        |
| 2.5.1    | Influência da dureza.   | 40        |
| 2.5.2    | Influência do trabalho à frio e ductilidade   | 41        |
| 2.5.3    | Influências do tipo de material associados a elementos microestruturais.                    | 43        |
| 2.6      | Métodos de teste do desgaste por deslizamento   | 45        |
| 2.7      | Método dos Elementos Finitos  | 48        |
| 2.7.1    | Visão Geral do Método dos Elementos Finitos   | 48        |
| 2.7.2    | <i>Ansys Workbench</i> e o problema do contato  | 52        |
| 2.7.3    | <i>Engineering Data</i>   | 54        |
| 2.7.4    | <i>Geometry</i>   | 54        |
| 2.7.5    | Model, <i>Set up</i> , <i>Solution</i> e <i>Results</i>                                     | 55        |
| 2.8      | Integração da análise do desgaste com o Método dos elementos finitos                        | 55        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>  | <b>58</b> |
| 3.1      | Descrição da Metodologia  | 58        |
| 3.2      | Características do ensaio   | 61        |
| <b>4</b> | <b>EXECUÇÃO DA METODOLOGIA</b>  | <b>63</b> |
| 4.1      | Preparação dos corpos de prova  | 63        |
| 4.2      | Identificação dos corpos de prova   | 67        |
| 4.2.1    | Identificação dos discos  | 67        |
| 4.2.2    | Identificação de esferas  | 68        |
| 4.3      | Caracterização geométrica das superfícies   | 69        |
| 4.4      | Ensaio de desgaste  | 71        |
| 4.5      | Medição do desgaste e rugosidade das esferas  | 75        |
| 4.6      | Simulações Numéricas  | 77        |
| 4.7      | Cálculo do coeficiente de desgaste  | 78        |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b>   | <b>79</b> |
| 5.1      | Análise dos resultados  | 79        |
| 5.1.1    | Ensaio pino sobre disco   | 79        |
| 5.1.2    | Resultados da Simulação Numérica  | 88        |
| 5.1.3    | Cálculo do coeficiente de desgaste $k$  | 95        |

|   |     |
|---|-----|
| 6 CONCLUSÕES  | 105 |
| REFERÊNCIAS   | 107 |
| APÊNDICE A – DESENHO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA DE ADAPTAÇÃO             | 109 |
| APÊNDICE B – DESENHO DE FABRICAÇÃO DOS DISCOS                       | 110 |
| APÊNDICE C – ENSAIOS PRELIMINARES                                   | 111 |
| APÊNDICE D – DISCUSSÃO DE INCOERÊNCIAS EM RESULTADOS DE<br>DESGASTE | 114 |
| APÊNDICE E – AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO AO LONGO DO<br>ENSAIO  | 117 |
| APÊNDICE F – AVALIAÇÃO DO PROJETO                                   | 119 |
| I. Diferenças entre a metodologia proposta e a empregada.           | 119 |
| II. Cronograma  | 119 |
| III. Imprevistos do projeto   | 122 |
| IV. Produtos do projeto   | 122 |
| ANEXO A – MEDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO DISCO DE AÇO AISI D2             | 123 |
| ANEXO B – RELATORIO DE MEDIÇÃO DO DISCO DE ENSAIO após<br>RETIFICA  | 124 |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contexto do Tema

O projeto de componentes para os diversos sistemas da área mecânica deve levar em conta muitos aspectos relacionados a carregamentos estáticos, dinâmicos, de contato entre outros. O principal enfoque dos dimensionamentos refere-se à obtenção de longa vida em fadiga e bom desempenho, associadas com custos viáveis em relação à competitividade no mercado. Pensando segundo esse contexto, surge a necessidade do desenvolvimento de modelos cada vez melhores que descrevam as condições de trabalho dos componentes. A ideia é, justamente, usar mais modelos matemáticos em vez de ensaios, já que esses últimos são demorados e onerosos. Não bastasse isso, esses experimentos apresentam diversas restrições que impedem a reprodução das reais condições de trabalho em laboratório. A outra face do problema também compromete: modelos matemáticos são, muitas vezes, baseados em projetos de experimento, os quais, com raras exceções, podem apenas descrever o comportamento de uma gama específica de problemas, tendo, por isso, utilização limitada. Assim, houve a preocupação de desenvolver um trabalho na área de mecânica estrutural que tentasse unir aspectos de cunho experimental e matemático tentando resolver problemas de contato e desgaste.

O desenvolvimento da tecnologia computacional impulsiona o aperfeiçoamento de programas de simulação numérica, possibilitando análises cada vez mais complexas e próximas da realidade. Desde que esses programas foram desenvolvidos, pesquisadores tentam utilizá-los da melhor maneira possível. A facilidade que se obtém em gerar modelos é uma fonte de estímulo para novas abordagens. A maioria dos trabalhos que faz uso de simulação numérica tenta obter uma correlação entre as informações obtidas em um modelo matemático e as obtidas em ensaios experimentais. Os pesquisadores dessa linha fazem uma série de ensaios para obter uma família de curvas e, associado com a simulação numérica, desenvolvem um modelo matemático para gerar equações que representarão essas curvas. Outros tentam unir as duas abordagens (experimental e matemática), isto é, usam os dados de uma para completar ou carregar informações

na outra. E é justamente essa a proposta deste trabalho: realizar uma abordagem em conjunto para descrever o problema de contato, usando a base teórica já desenvolvida pelo pesquisador John F. Archard (ARCHARD, 1986).

## **1.2 Caracterização do Problema**

Dentro do contexto da utilização de ferramentas experimentais e computacionais, propõe-se usar a potencialidade que o modelo de Archard oferece para descrever o problema de desgaste de maneira mais próxima da realidade. Neste trabalho, busca-se melhor aproveitar essa teoria e usar modelos numéricos para gerar campos de pressões de contato que fornecerão informações para a equação proposta por Archard. Assim, será possível relacionar o parâmetro empírico (coeficiente de desgaste) com o volume de desgaste, ou a variação desse parâmetro com o tempo de uso do componente. O cálculo de tensões pode ser mais bem feito por modelos numéricos, já que os modelos analíticos são limitados a uma pequena quantidade de geometrias (por exemplo, esfera-plano, esfera-esfera, cilindro-cilindro) e não leva em conta que essas geometrias se alteram com o tempo, dentro do contexto de desgaste. Os programas computacionais geram esse campo de tensões para qualquer geometria e permitem que se programem rotinas para fornecer resultados referentes a um ensaio completo. Entende-se que essa maneira de atacar o problema de contato pode ser muito eficiente e permitirá chegar a resultados de vida de componentes mais próximos da realidade.

## **1.3 Objetivos**

O trabalho desenvolvido foi norteado por um objetivo que faz uma ligação entre cada técnica de abordagem (experimental e numérica) e o comportamento do desgaste. O objetivo geral é, portanto, aplicar a metodologia desenvolvida - a qual analisa as tensões de contato por meio de um modelo de elementos finitos válido - com o intuito de determinar o coeficiente de desgaste ( $k$ ) para um contato não-conforme em função do tempo de ensaio.

Para realizar o estudo do comportamento do coeficiente de desgaste, outros objetivos específicos foram necessários. Analisar os corpos de prova após o ensaio e realizar simulações numéricas dos campos de tensão resultantes são os principais objetivos específicos.

## 1.4 Justificativa

A principal justificativa para elaboração deste trabalho está na possibilidade de utilizar a metodologia aqui apresentada para resolução de problemas reais. O principal modo de aplicação seria uma melhor estimativa da vida de um par de componentes submetidos a tensões de contato, com carga, temperatura, geometria, etc também definidos (análise quantitativa). Pode-se, no entanto, também ser aplicada para analisar o comportamento do desgaste de um componente, fazendo-se uma análise mais qualitativa do sistema submetido ao contato. A importância de se resolver o problema do comportamento em desgaste com auxílio de ferramentas matemáticas consiste justamente em descrever o fenômeno do desgaste de forma mais próxima da realidade, considerando aspectos da geometria dos corpos em contato.

O desgaste por deslizamento pino contra disco é uma das modalidades de ensaio de desgaste mais comuns que existem. Esse é o sistema tribológico com o qual se trabalhará, o qual é simples, mas, futuramente, esse tipo de análise poderá ser estendido a aplicações mais complexas de desgaste. A possibilidade de aplicação em outros sistemas tribológicos ocorre porque essa técnica (usando elementos finitos e dados experimentais) é bastante flexível. Isso porque o método dos elementos finitos permite variação de geometrias e alteração de variáveis e parâmetros de maneira ampla e relativamente simples.

Para a presente análise, os ensaios foram feitos em uma máquina de testes com módulos de ensaios específicos para desgaste. Assim, a disponibilidade da máquina para realização do projeto somado a sua capacidade de atender os requisitos, justificam o uso neste trabalho.

Quanto à modelagem do desgaste, apesar do modelo de Archard ser um dos mais simples, mostra-se adequado para representar os fenômenos de desgaste por meio da associação de diversas variáveis que influenciam o desgaste por deslizamento. Basicamente, todas essas variáveis são resumida em um parâmetro  $k$  ( $\text{Pa}^{-1}$ ), obtido experimentalmente e que expressa do nível de desgaste para o sistema em análise. Esse modelo foi desenvolvido para o contato entre metais, mas pode fornecer algumas indicações para o contato entre outros materiais (HUTCHINGS,1992).

A oportunidade de realizar o trabalho em conjunto com o LaMEs (Laboratório de Mecânica Estrutural) e o LASC (Laboratório de Superfícies e Contato), para estudo do fenômeno de desgaste em componentes mecânicos, foi avaliada como muito produtiva. Apesar de serem grupos distintos, muitos trabalhos podem ser feitos em cooperação dos dois grupos para explicar os fenômenos do desgaste.

Outro aspecto importante é que este trabalho fez uso da multidisciplinariedade. É evidente que a mecânica estrutural é o foco de trabalho, no entanto, observa-se que os resultados podem ser aplicados em qualquer análise que considera o problema de contato ou desgaste. Outras considerações podem ser feitas em relação a outras áreas da mecânica como a fabricação e as ciências térmicas. O acabamento superficial de cada componente do par em contato pode fazer grande diferença nos resultados de número de ciclos, então essa influência será utilizada nos parâmetros de ensaio a fim de limitar o escopo do problema. Da mesma maneira, a forma segundo a qual o calor será transferido de um corpo para o outro (uni ou bidimensional, taxa constante ou variável de transferência de calor) deverá ser avaliada quando da avaliação dos resultados. Outro aspecto relacionado à multidisciplinaridade pode estar relacionado com a própria máquina de ensaios, a qual possuirá sistema de leitura de dados e controle de parâmetros avançada. Conhecer o funcionamento, mesmo que superficialmente pode ser de grande valia para evitar erros grosseiros ou sistemáticos quando da leitura de resultados. Assim, um estudo básico de eletrônica e controle contemplará outro campo da ciência diferente da mecânica, a eletrônica.

A motivação pessoal para elaboração de um trabalho nesse sentido foi devido à duplicidade de técnicas usadas: modelagem matemática e experimentação. As diversas disciplinas estudadas alternavam entre aspectos da teoria e experimental. Desenvolveu-se a capacidade de associar as duas abordagens em vários sistemas da engenharia mecânica. Então, pensou-se que um projeto com essa duplicidade seria uma boa oportunidade para o fechamento de um curso tão fascinante. A opção pela área de mecânica estrutural surgiu naturalmente ao se perceber que essa era a área com a qual o autor possuía maior afinidade.

## 1.5 Conteúdo ou Etapas do Trabalho

O presente trabalho foi elaborado usando o método experimental de análise de problemas. Desse modo, foi elaborada uma metodologia derivada desse método. O capítulo 2, Fundamentação Teórica, faz uma revisão da bibliografia sobre os temas do problema do contato, do desgaste e uma breve explicação de uma das principais ferramentas do trabalho: o método dos elementos finitos.

O entendimento do capítulo 3, Materiais e Métodos, é de fundamental importância para que todo o trabalho seja compreendido. Nesse capítulo justifica-se o porquê do uso dessa metodologia e um fluxograma ilustra a sequência de operações para se atingir os objetivos do trabalho.

O capítulo 4, Execução da Metodologia, descreve como a metodologia foi aplicada com detalhes. O objetivo desse capítulo foi o de mostrar ao leitor o que foi realizado pelo autor em linhas gerais, mas apontando os elementos mais relevantes.

No capítulo 5, Resultados, são mostrados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia desenvolvida. Há também a discussão dos resultados e explicação dos fenômenos envolvidos em cada etapa do ensaio. Faz-se também, uma revisão dos aspectos operacionais do projeto como cronograma, imprevistos e os produtos do projeto.

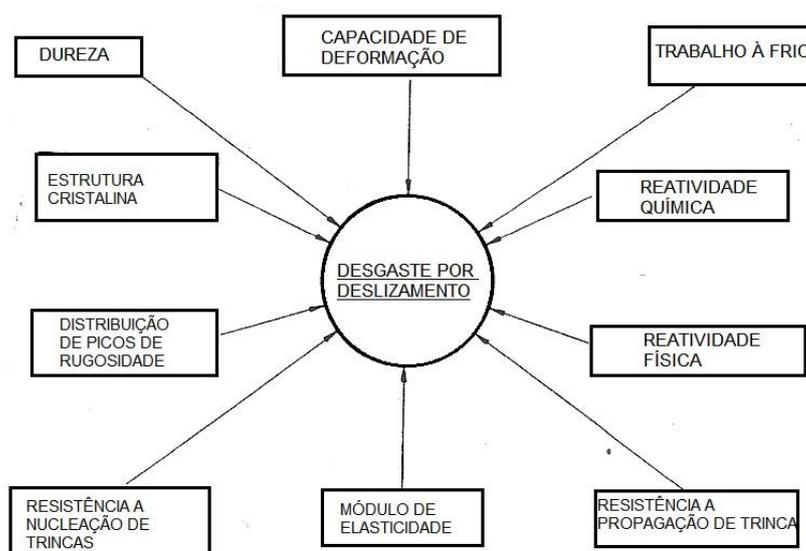
No capítulo 6, Conclusões, são descritas as informações relevantes que os produtos do projeto forneceram para análise. Também foram sugeridos tópicos para trabalhos futuros dando continuidade à metodologia empregada neste trabalho. Esse capítulo faz o fechamento do trabalho e permite ao leitor fazer uma análise crítica geral do projeto.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Mecanismos de desgaste

A base teórica para o entendimento dos procedimentos adotados no trabalho está diretamente ligada ao conceito de desgaste e as consequências que esse fenômeno gera nos sistemas.

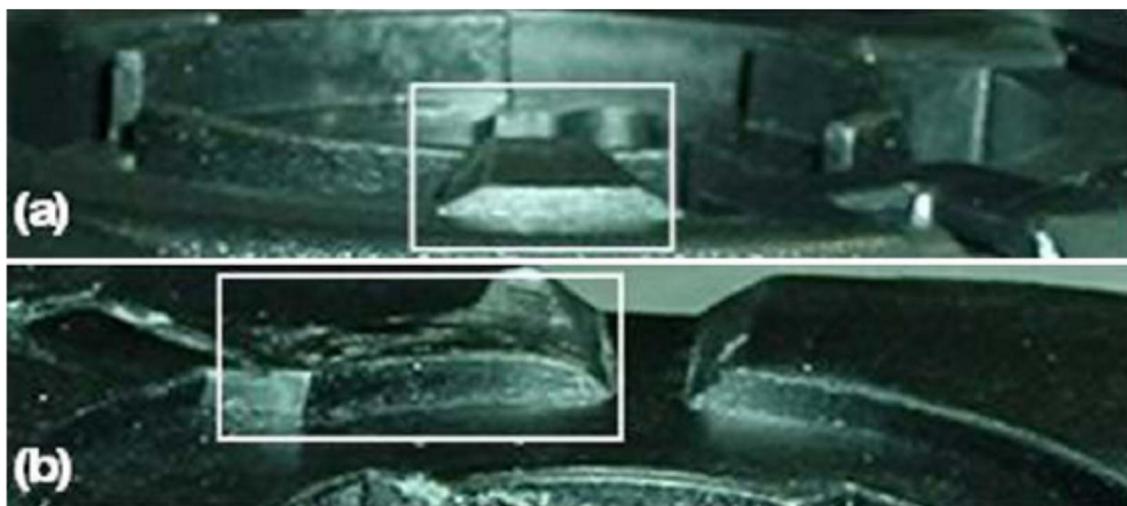
O desgaste por deslizamento é observado em várias aplicações na engenharia, em que o contato entre componentes é necessário. Os materiais em contato e suas propriedades influenciam muito no comportamento do desgaste ao longo do tempo. A Figura 1 mostra algumas das propriedades que apresentam maiores influencia sobre o desgaste por deslizamento.



**Figura 1 - Propriedades metalúrgicas que influenciam o desgaste por deslizamento (ZUM-GAHR, 1987 , modificado).**

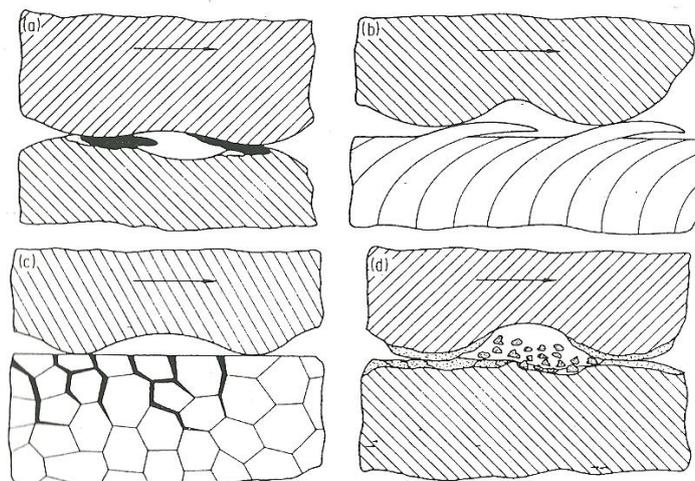
Entende-se por desgaste o dano de uma superfície sólida, envolvendo ou não perda progressiva de material. É devido ao movimento relativo entre duas superfícies de contato. Deve-se salientar que essa definição não exclui os fenômenos de danos da superfície sem remoção de material, mesmo que haja apenas deformação plástica, configura-se como desgaste. É comum separar os mecanismos de desgaste em quatro: por abrasão, por adesão, por reação

triboquímica e por fadiga (ZUM-GAHR, 1987). A Figura 2 mostra um exemplo de desgaste por abrasão e adesão. Para esse sistema, observa-se clara perda de material. Os mecanismos de desgaste foram identificados como de natureza abrasiva e adesiva devido à geometria do corpo e o valor da pressão exercida sobre o contra-corpo ser elevada (ASHRAF e NAJAFABADI, 2008). A Figura 2.a é representativa a condição da peça do retrovisor de um automóvel antes do ensaio de desgaste por deslizamento, já a Figura 2.b mostra a condição da mesma peça após os ensaios. Mais especificamente para o desgaste por deslizamento (ZUM-GAHR,1987) estabelece uma série de mecanismos para mostrar esse tipo de desgaste. A Figura 3 contém uma demonstração desses mecanismos. O mecanismo adesivo é representado pela união do material representado pela cor preta com a superfície do corpo superior (Figura 3.a). O mecanismo de desgaste por fadiga superficial também é mostrado, especificado tanto para um material dúctil (Figura 3.b), quanto para um material frágil (Figura 3.c). E por fim, o mecanismo de desgaste por reação triboquímica, representado pela Figura 3.d.



**Figura 2 – Evidência do desgaste abrasivo e adesivo no sistema de movimentação de espelho retrovisor de automóvel (a) antes do ensaio e (b) depois do ensaio.**

**Fonte: ASHRAF e NAJAFABADI, 2008, modificado.**



**Figura 3–Mecanismos de desgaste durante contato deslizante: (a) junções adesivas com transferência de material, (b) da deformação plástica devido a fadiga de superfície em materiais dúcteis, (c) quebra de partículas devido a fadiga de superfície em materiais frágeis, (d) reações triboquímicas e quebras em regiões de filmes de oxidação.**

Fonte:ZUM-GAHR,1987, modificado.

## 2.2 Desgaste por Deslizamento

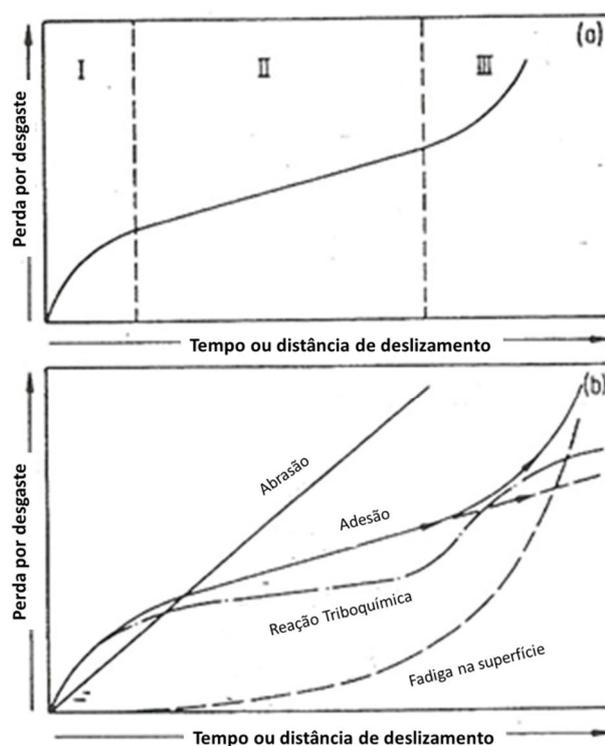
Desgaste por deslizamento pode ser caracterizado devido ao movimento relativo entre duas superfícies rugosas, que estejam em contato e submetidos a carregamentos. O dano a superfície não é causado por penetração profunda de asperezas, mas sim por ação das tensões de contato. As superfícies podem ser de natureza metálica, não-metálica, em um sistema lubrificado ou não-lubrificado (ZUM-GAHR, 1987).

O termo desgaste adesivo é comumente usado para descrever o desgaste por deslizamento, mas essa definição pode ser enganosa. A adesão é importante no fenômeno de desgaste por deslizamento, mas não é o único processo físico e químico que deve estar envolvido. Dependendo da rugosidade dos corpos envolvidos no processo, pode haver processos abrasivos, ou, observando a afinidade química, a reação triboquímica.

Pode-se dizer que desgaste por deslizamento (ou *sliding wear*) é um termo genérico. Outros termos em inglês podem se referir ao mesmo tipo de desgaste, diferenciando-se apenas pelo modo que ocorre ou o resultado do desgaste. *Scuffing* refere-se ao dano localizado na superfície associado a uma soldagem pontual entre

superfícies em deslizamento. Esse termo geralmente é usado para descrever o colapso da lubrificação observado em deslizamentos de alta velocidade. *Galling* refere-se ao mesmo fenômeno que *scuffing*, mas de forma mais severa, com soldagem local, associada com grande dano da superfície. O fenômeno *galling* é observado para deslizamentos não lubrificados a baixas velocidades relativas e caracterizados por envolver superfícies de elevada rugosidade e transferência ou deslocamento de grandes fragmentos de material (HUTCHINGS,1992).

Uma forma bastante usada para caracterizar o desgaste por deslizamento é uma curva da perda de volume ou massa *versus* a distância ou tempo de deslizamento. Tal curva está representada na Figura 4.a, a qual é dividida em três regiões ou períodos claramente distintos. O primeiro período (I) é chamado de *running-in*, ou, em português, amaciamento. O segundo estágio (II) é nomeado regime permanente de desgaste e, por fim, o terceiro estágio (III) é chamado de *running out*, em português denominado período de falha do material.



**Figura 4- Figura 4.a Curva experimental da perda de massa ou volume versus a distância de deslizamento ou tempo.(I) Running-in ou amaciamento, (II) regime permanente,(III) Running-out ou período de falha. Figura 4.b Progresso do desgaste em função dos mecanismos de desgaste. Fonte: ZUM-GARH,1987, modificado.**

Cada um desses três estágios possui particularidades em relação aos mecanismos de desgaste. O período de amaciamento é caracterizado pela acomodação das superfícies em contato, isto é, trata-se do início do desgaste, em que os picos de rugosidade interagem e realiza-se a quebra dos picos mais frágeis. Por isso, observa-se que nesse período a taxa de desgaste – ou a perda de massa por unidade de tempo – é maior que a verificada no estado estacionário. Essa taxa de desgaste só será maior no período de estado estacionário se houver algum tipo de tratamento superficial no material (cementação, nitretação) ou, ainda se for submetido a um processo de encruamento prévio. Já na região II, é verificado que o volume de desgaste varia quase que linearmente com o tempo. Essa é a região mais confortável que um componente submetido ao desgaste pode trabalhar. Isso porque, devido a essa linearidade, o processo é previsível, sendo possível prever qual será o volume de desgaste após certo tempo de trabalho. Deseja-se, também que esse período se estenda o máximo possível para garantir uma vida de trabalho razoavelmente longa para emprego num sistema mecânico. A terceira região é caracterizada por um crescimento da taxa de desgaste ao longo do tempo até que a ruptura ocorra devido à grande quantidade de material perdida.

Fazendo uma análise da participação dos mecanismos envolvidos em cada etapa do processo de desgaste, foram levantadas as curvas observadas na Figura 4.b. Essa Figura mostra que um comportamento linear do desgaste, desde o running-in só pode ser atribuído ao mecanismo abrasivo. Os demais mecanismos atuam de forma não-linear, mas com a mesma característica de serem bem pronunciados no terceiro estágio de desgaste. Diversos fatores estão envolvidos no processo de desgaste por deslizamento e estão implícitos em todos os gráficos da Figura 4. Propriedades do material (dureza, tenacidade à fratura, etc), geometria, acabamento superficial, afinidade química entre materiais e tipo de lubrificação são alguns desses fatores (ZUM-GAHR,1987).

### **2.3 Modelo de Archard**

A teoria proposta por Archard foi inicialmente desenvolvida por Holm e melhorada por Archard. A ideia inicial de Holm foi atribuir uma natureza probabilística ao fenômeno do desgaste para fazer associação com as observações

experimentais. Definiu-se, então, um parâmetro K adimensional – o coeficiente de desgaste - que expressaria a probabilidade de o encontro de dois átomos resultar em remoção de material (HOLM, 1946). Dessa consideração para o coeficiente de desgaste, resultou na Equação (1).

$$\frac{V}{s} = K \cdot \frac{F_N}{H} \quad (1)$$

Sendo V o volume desgastado, s a distância de deslizamento,  $F_N$  a carga normal, H a dureza do material mais mole e K o coeficiente de desgaste adimensional, que relaciona a teoria e o experimento. Como é feita análise baseando-se um parâmetro da dureza do material mais mole (H) de caráter rígido-plástico, a teoria de Holm é limitada a esse tipo de análise.

A partir desse modelo, observou-se que o uso da dureza do material mais mole nem sempre fornecia bons resultados comparados com os experimentos em laboratórios. Sabendo também que, no contexto da engenharia, a profundidade desgastada (h) é mais interessante que o volume de desgaste, Archard propôs uma maneira diferente de escrever a equação de Holm, dividindo de ambos os lados a área de contato aparente  $A_{ap}$ . Com isso, obtém-se a Equação (2) (modelo de Archard), nela observa-se que o efeito da dureza (H) foi eliminado e agora passou-se a trabalhar com profundidade de desgaste, assim a abordagem da teoria de Archard será de caráter elástico para a presente análise. Além disso, a adaptação de Archard forneceu um coeficiente de desgaste dimensional em  $\text{Pa}^{-1}$  que expressa a probabilidade de, ao encontro de duas asperezas (ou picos de rugosidade) haver remoção de uma partícula de desgaste (ARCHARD,1986).

$$\frac{V}{s \cdot A_{ap}} = K \cdot \frac{F_N}{A_{ap} \cdot H} \rightarrow \frac{h}{s} = k \cdot p \quad (2)$$

Sendo k o coeficiente de desgaste dimensional em  $\text{Pa}^{-1}$  e p a pressão normal de contato em Pa. Transferindo a Equação (2) ao domínio diferencial, para utilizá-la no problema do valor inicial, ela pode ser reescrita na forma da Equação (3).

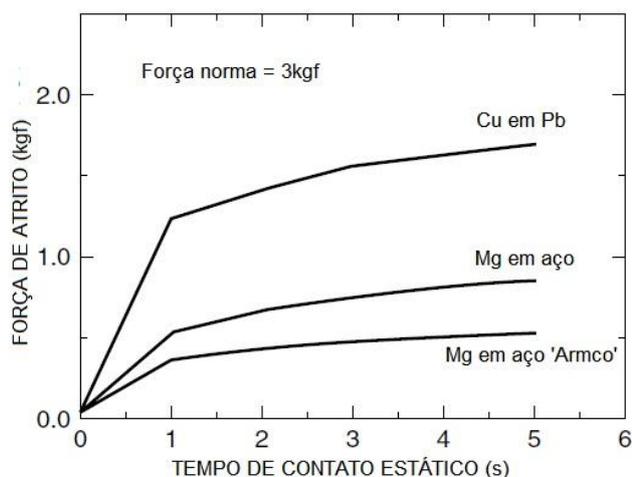
$$\frac{dh}{ds} = k.p \quad (3)$$

A partir do uso da expressão de Archard em domínio diferencial, pode-se aplicar essa expressão em uma rotina de um código de elementos finitos (PÕDRA e ANDERSSON,1999).

#### **2.4 Fundamentos do atrito durante o desgaste por deslizamento.**

O estudo do atrito para a condição de deslizamento pode ser observada tanto sobre a ótica da estática, quanto da dinâmica. Assim, mesmo quando o sistema tribológico não apresenta movimento relativo entre corpo e contra corpo, existem várias análises, no âmbito da estática que podem ser realizadas. Uma delas é quanto ao acomodamento do contato. O efeito da variação da força de atrito no âmbito do desgaste está associado com a primeira fase da curva de desgaste mostrada na Figura 4.a o *running-in*, por isso faz-se uma breve revisão da teoria.

Antes de iniciar o movimento num ensaio de desgaste, é comum aplicar uma ‘força de acomodamento’, chamado também de “*pre touch*” do inglês, significa pré apalpação. Quando dois corpos são pressionados um contra o outro, os átomos de suas superfícies começam a interagir. O nível dessa interação dependerá de outros fatores como pressão de contato, temperatura, a reatividade entre os dois materiais. Levando tais fatores em consideração, é natural que o atrito estático seja alterado com a duração do contato. (Blau,2009). A Figura 5 mostra um exemplo desse efeito.



**Figura 5 - Efeito do tempo de contato na força de atrito estático entre metais.**  
**Fonte: BELAK E STOWERS 1992 *apud* PETER BLAU, 2009 modificado.**

O atrito é um fenômeno que foi observado há muito tempo e desde então muitos modelos foram desenvolvidos para explicar a forma com que ele atua na natureza. Um dos primeiros modelos de atrito estático estava ligado com a adesão e a quebra de fronteiras entre átomos de superfícies opostas. Tal modelo não era satisfatório para explicar os efeitos desse fenômeno. Segundo essa teoria, pela adesão, forças de cisalhamento eram transferidas de um corpo para outro e o movimento do corpo só se daria quando a força aplicada fosse maior que essa adesão superficial. Numa outra concepção do atrito estático, percebeu-se que eram forças repulsivas entre as asperezas e não forças adesivas que geravam a resistência ao deslizamento. Com o advento da tecnologia e uso de microscopia eletrônica, foi possível identificar que o efeito da força adesiva combinada com a resistência entre asperezas são responsáveis pelo atrito estático. Nesse contexto, a resistência ao deslizamento do par de materiais envolvidos no ensaio determina a resistência ao deslizamento. Em alguns casos, quando há boa afinidade química entre os materiais, a resistência ao deslizamento na interface é maior que a resistência de um dos materiais e, assim, tem-se que o atrito estático é definido pelo material com menor resistência ao cisalhamento. O coeficiente de atrito estático ( $\mu_s$ ), então, pode ser escrito na forma da Equação (4).

$$\mu_s = \left( \frac{\tau_m \cdot A}{F_N} \right) \quad (4)$$

Em que  $\tau_m$  representa a resistência ao cisalhamento do material mais fraco e A a área de contato real,  $F_N$  é a força normal – que é a soma da força normal e da força adesiva na interface (BLAU,2009).

No entanto mesmo considerando a importância entre a afinidade química entre os materiais na interface, ensaios específicos mostraram que o coeficiente de atrito não depende apenas dos materiais envolvidos: vários outros aspectos devem ser levados em conta como geometria, temperatura, força normal, umidade do ambiente, etc. Assim, para um mesmo par de materiais, por exemplo, cobre e níquel há diferenças entre os coeficientes de atrito do par níquel-cobre e o cobre-níquel. O que se conclui que, para o atrito estático – e para qualquer outro sistema tribológico – o comportamento não pode ser dado apenas pelo par de materiais envolvidos, mas sim pelas características desse sistema tribológico.

Para se estudar os efeitos das variáveis dentro de um sistema tribológico, a abordagem mais observada em artigos científicos é manter as demais variáveis do sistema constantes e variar aquela que tem interesse na análise. Essa estratégia é eficiente desde que as conclusões obtidas não tenham pretensão em explicar um conjunto muito amplo de comportamentos. A eficiência desse método é questionável para certos parâmetros que estão intimamente ligados com outros (a velocidade de deslizamento e temperatura, por exemplo). Mesmo com a limitação de se cometer erro sem desconsiderar efeitos conjugados das variáveis, é importante conhecer como cada uma delas participa dessa complexa composição que é o sistema tribológico, especificamente o atrito. Um exemplo desse fato é que, no caso de um dos materiais ser muito mole em relação ao outro, a abordagem do desgaste para o estudo do atrito é o melhor caminho para descrever os efeitos. Isso ocorre porque os efeitos das superfícies serão modificados rapidamente e, a descrição do desgaste fornece valiosas informações sobre o comportamento do sistema quanto ao atrito.

Outro exemplo que pode ser dado é quanto ao estabelecimento do estado estacionário para o atrito, que como foi verificado para o desgaste, depende de

fatores específicos e pode até nem ser atingido. Para superfícies muito lisas, tem-se que o estado estacionário para o atrito demora mais tempo para ser atingido e não ocorrerá ao mesmo tempo em que o estado estacionário para o desgaste.

O acabamento superficial também é bastante importante no estudo do atrito. Se, durante a usinagem da superfície, houver direções específicas dos sulcos, haverá diferentes coeficientes de atrito para as diferentes direções de deslizamento. Acabamentos de superfície como polimento, lapidação e retificação frontal usinam a superfície em direções aleatórias permitindo que o estudo seja feito sem que essa variável atue sobre o sistema.

Nesse contexto, a rugosidade também desempenha papel importante. Além do acabamento superficial (que define morfologia de picos e vales), a rugosidade será indicador, entre outros fatores, da distribuição e tamanho de picos e vales. Num processo de deslizamento, o atrito é influenciado pela rugosidade verificada na superfície. Por exemplo, em superfícies usinadas, verificam-se picos e vales bem definidos cujo tamanho será definido pelo raio de corte da ferramenta e velocidade de avanço da mesma. Em um contexto de desgaste, o *running-in* dessa interface usinada terão seus picos removidos e platôs serão formados. A seguinte sequência de desgaste periódico pode ser observada numa condição de estado quase estacionário (BLAU,2009) :

1. A superfície experimenta deformações plásticas e trincas de fadiga crescem;
2. Lascas são formadas após união entre trincas de fadiga, gerando pites na superfície;
3. Platôs continuam a suportar o carregamento a medida em que o material é desgastado ;
4. Os platôs suportam cada vez mais pesados carregamentos por unidade de área;
5. Os platôs são arrancados e o processo se repete a partir da sequência 1.

Essa descrição de desgaste mostrada pelo autor considera o aspecto periódico dos fenômenos. Verifica-se que tal sequência é de aspectos dinâmicos do

atrito, ainda não citados e é através desses critérios que a teoria do desgaste é estudada.

A fim de selecionar os parâmetros que serão utilizados nos ensaios será necessário o conhecimento dos diversos efeitos que tais parâmetros geram sobre os corpos de prova. Assim, nas seções 2.4.1 e 2.5 é feita uma revisão bibliográfica que explique tais efeitos.

#### 2.4.1 Efeitos dos parâmetros no atrito de um sistema sobre a condição de *running-in*.

##### 2.4.1.1 Influência do carregamento aplicado.

Um exemplo de que observar aspectos dinâmicos do sistema tribológico é mais aconselhável, é o estudo da influência do valor do carregamento do corpo contra o contra corpo numa situação de desgaste por deslizamento. Sabe-se que quanto maior o carregamento imposto no corpo sobre o contra corpo, menor será o valor do coeficiente de atrito. Isso ocorre por diversas razões, a principal delas é que a área de contato real não aumenta na mesma proporção que a força aplicada e assim, pela Equação (4), tem-se que um aumento proporcional maior em  $F_N$  do que na área real de contato  $A$  resultará num menor valor para  $\mu_s$ . A Tabela 1 exemplifica diversos casos em que isso pode ser verificado. (BLAU,2009)

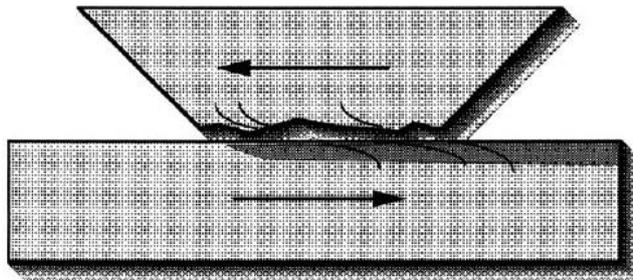
**Tabela 1 - Efeito da Pressão sobre o coeficiente de atrito em metais puros.**

| Material | $\mu$ (pressão 57,5 MPa) | $\mu$ (pressão 1380,0 MPa) |
|----------|--------------------------|----------------------------|
| Indio    | 0,34                     | 0,05                       |
| Estanho  | 0,30                     | 0,10                       |
| Cádmio   | 0,21                     | 0,09                       |
| Alumínio | 0,71                     | 0,18                       |
| Prata    | 0,40                     | 0,20                       |
| Zinco    | 0,66                     | 0,22                       |
| Níquel   | 0,52                     | 0,32                       |

**Fonte:** Peterson e Ling (1966 *apud* Peter Blau, 2009, modificado).

#### 2.4.1.2 Influência da velocidade de deslizamento

Quanto a influência da velocidade de deslizamento muito se tem discutido sua relação direta com a temperatura na interface do deslizamento. De fato, para se estudar a influência da alteração da velocidade do deslizamento sobre o atrito devem-se considerar aspectos não apenas da temperatura, mas os modos de transferência de calor. Estudos mostram que algo em torno de 90% da energia produzida no deslizamento com atrito é transformado em calor. A porção restante de energia é aplicada para deformação do material, enquanto se cria uma nova área de superfície e outra parte é alocada para criação de defeitos nos materiais em contato. A Figura 6 ilustra esse fenômeno.



**Figura 6 - A energia gerada durante o deslizamento pode ser dissipada sob a forma de calor ou através da deformação do material. Fonte: PETER BLAU,2009 modificado.**

A tendência observada para a maioria dos casos é que a força de atrito seja reduzida conforme a velocidade de deslizamento é aumentada. As razões disso acontecer são as seguintes :

- Formação de óxidos a altas temperaturas;
- A tensão de cisalhamento da maioria dos materiais é reduzida para altas temperaturas;
- No caso da superfície submetida ao atrito fundir, o material líquido serve como lubrificante nas superfícies de contato.

Por outro lado, quando as velocidades de deslizamento não são muito altas, há a possibilidade do coeficiente de atrito aumentar. Isso ocorre para a situação em que o aumento da velocidade implica em um aumento no taxa de desgaste, já que

mecanismos abrasivos são potencializados. Por isso, a fim de se fazer uma análise mais adequada, deve-se estudar cada sistema tribológico para observar o comportamento quando do aumento da velocidade (BLAU,2009).

#### **2.4.1.3 Influência da temperatura**

A influência da temperatura deve ser sempre considerada dentro de um contexto individual ou quando da análise da velocidade de deslizamento, devido a correlação direta entre essas duas variáveis. O estudo da temperatura como variável para o atrito num sistema tribológico é dividido por escopo: internamente ou externamente. Internamente consideram-se efeitos diretamente associados ao ensaio; aquecimento por atrito, e num nível menos pronunciado, reações químicas (exotérmicas ou endotérmicas). Já sobre o critério externo consideram-se a temperatura das fronteiras.

O nível de importância a ser dado por essa variável cresce ao se analisar a quantidade de outras propriedades do material que são afetadas pela mudança em seu valor. Listam-se alguma delas:

- Tensão de cisalhamento;
- Processos de desgaste abrasivos;
- Tendência de o material sofrer trabalho a frio;
- Tendência de o material aderir e difundir-se para o outro material do par tribológico.

Sabe-se, dessa forma, que não se pode aplicar uma análise simples e abrangente quando se relaciona a força de atrito com a temperatura: existem vários mecanismos associados ( como os já citados) que podem levar a comportamentos irregulares na curva de análise. Uma análise mais acurada deve ser feita para cada par tribológico.

No entanto, a tendência é de que o coeficiente de atrito tende a diminuir conforme a temperatura aumenta para muitas ligas aplicadas na engenharia. Esse efeito deve-se, principalmente pela redução no valor da resistência ao cisalhamento dos materiais. Num par tribológico de materiais distintos, o efeito da temperatura facilitará o mecanismo de delaminação, a ser observado mais adiante.

Para ensaios realizados à temperatura ambiente, há a incorporação apenas de aspectos internos de temperatura sobre o atrito, permitindo uma observação mais facilitada dos mecanismos de desgaste, já que se observa apenas uma fonte de influência.

Temperatura mais elevadas no contexto do atrito pode facilitar a geração de partículas que aumentam ou diminuem o coeficiente de atrito, já que podem facilitar ou dificultar o deslizamento (BLAU,2009).

#### **2.4.2 Running-in: transições nas condições de atrito.**

Running in, como já citado é uma etapa do processo de desgaste em que diversas propriedades se alteram continuamente e em amplitudes diferentes. Uma dessas propriedades é o coeficiente de atrito. Os atributos da transição do running in até o estado estacionário para força de atrito são listados :

- Mudanças na magnitude da força de atrito;
- O tempo que um tribosistema precisa para alcançar o estado estacionário;
- As características das flutuações na força de atrito.

Essas características derivam da forma segundo a qual o atrito se comporta para determinado par tribológico. Por exemplo, há a tendência de o desgaste produzir uma camada de material que é transferida para a superfície oposta e produz a transições no desgaste e no atrito. Essa camada transferida é chamada de camada de terceiro corpo (ou do inglês *third body layer*) ou ainda *tribolayer*. Tal camada pode amortecer o carregamento e formar partículas menores que acentuarão o desgaste na interface.

Observando de uma maneira a simplificar essa análise, a transição do atrito durante o *running-in* pode ocorrer de maneira contínua ou descontínua. Essa última é dotada de variações que são difíceis de prever e controlar. No entanto, quando a transição é impulsionada por efeitos de fadiga, por meio do monitoramento do crescimento da trinca é possível fazer um estudo preditivo. Transições contínuas implicam em mudanças graduais relacionadas ao balanço dos processos

dominantes na interface. É difícil definir a duração da transição em si porque as mudanças são mais graduais e lentas, e porque os efeitos são sobrepostos.

Ainda, como em outros casos associados ao atrito, sabe-se que se deve estudar a transição para cada par tribológico (ou grupo de pares), evitando generalizações. Isso porque, uma causa de transição pode ser diferente mesmo que produza o mesmo efeito. Por exemplo, uma mudança na força de atrito pode ser devido a um desgaste do revestimento ou pela presença de partículas na interface (devido ao desgaste abrasivo).

Uma das maneiras mais adequadas de se estudar o comportamento do atrito para determinado par tribológico é fazer uma análise da curva correspondente ao ensaio de desgaste específico. Três itens devem ser observados em uma curva força atrito X tempo de desgaste:

- O formato geral da curva;
- A duração de certos comportamentos da curva;
- A magnitude das flutuações da força de atrito com o tempo.

Poucos trabalhos se preocupam em interpretar os efeitos da transição do coeficiente de atrito. Essa análise da curva de atrito exige um estudo das superfícies de contato e dados da força de atrito para que cada estágio da evolução da superfície seja correlacionado com o atrito. Em geral, para realizar uma análise adequada, deve-se levar em conta quatro processos: transferência metálica, formação e remoção de filmes, formação de detritos e deterioração cíclica da superfície (fadiga de contato).. Vários diferentes processos atuam simultaneamente e, para atingir o estado estacionário, todos eles devem convergir para esse sentido.

Tais considerações também são válidas quando da consideração do *running in* para a taxa de desgaste, no entanto, deve-se ressaltar que esses dois processos (de atingir o estado estacionário) não ocorrem necessariamente ao mesmo tempo para o atrito e para a taxa de desgaste. Há mais consistência em correlacionar atrito com desgaste quando estão presentes mecanismos abrasivos de forma mais pronunciada em relação aos que envolvem adesão, desgaste triboquímico ou por fadiga.

Associado ao processo abrasivo está a rugosidade da superfície, parâmetro esse que define diversos aspectos do *running in*. A rugosidade pode ser medida em parâmetros distintos que descrevem diferentes propriedades da topografia da superfície. O parâmetro que avalia a média de altura de picos e vales ( $R_z$ ) é um dos mais utilizados na avaliação do atrito no âmbito do *running in*. Associado à rugosidade e à abrasão, estão os fenômenos 'trincamento de asperezas' e 'resposta plástica'. O trincamento de asperezas consiste na quebra de picos de rugosidade conforme o processo abrasivo se desenvolve, no entanto, a consideração que isso torna a superfície menos rugosa nem sempre é verdadeira. Uma superfície já considerada com baixa rugosidade, ao sofrer o processo de desgaste pode se tornar mais rugosa que o estado inicial, basta que o outro componente do par tribológico apresente rugosidade e durezas altas o que favorecerá o riscamento da superfície. Já a resposta plástica ocorre quando as camadas sub-superficiais do material não se deformam mais plasticamente pois atingiram um estado de encruamento suficiente para suportar a pressão de contato de um modo elástico. Esse encruamento se deu devido ao processo abrasivo atuante na superfície.

Todos esses fatores de influência do atrito sobre o processo de desgaste em um sistema tribológico convergiram para uma mesma direção: analisar separadamente esses efeitos pode levar a cometer erros grosseiros na análise do atrito. O sistema deve ser avaliado em sua totalidade e o estudo de cada um dos efeitos deve ser feito de forma criteriosa a fim de auxiliar na explicação das tendências que cada fator possui no decorrer dos ensaios. A combinação dos fatores, mediante o domínio dos mecanismos envolvidos, permitirá ao pesquisador a explicar os comportamentos e razões de variação desse parâmetro tribológico tão complexo que é o atrito (BLAU,2009)

## **2.5 Introdução ao estudo das propriedades físicas do comportamento de desgaste ao deslizamento.**

Esse tópico foi criado a fim de estudar aspectos mais específicos do desgaste ao deslizamento, considerando influências mais diretas na taxa de desgaste. Os estudos das influências sobre o atrito forneceram base teórica para se entender processos específicos do *running-in* e do estado estacionário para a condição de

atrato. Conhecer aspectos que conduzirão ao estado estacionário da taxa de desgaste será o objetivo específico desse tópico.

Primeiramente, é necessário fazer uma distinção entre o desgaste moderado e desgaste severo. Há uma classificação específica dos pesquisadores Archard e Hirst (*apud* Zum-Gahr, 1987) que classificam da seguinte maneira:

- Desgaste severo: é devido ao contato metal-metal ou contato entre pares tribológicos em que se observam eventos como adesão, abrasão, deformação plástica, formação de juntas e difusão de materiais na interface de contato. Esse nível de desgaste torna a superfície desgastada mais rugosa e apresenta um coeficiente de desgaste pelo menos 3 vezes maior em magnitude em relação ao desgaste moderado;
- Desgaste moderado: ocorre durante o contato deslizante de superfícies cobertas por camadas de óxidos ou camadas produzidas por determinadas reações triboquímicas.

Uma vez diferenciados esses dois conceitos, é possível usá-los de maneira a explicar o efeito de cada propriedade sobre o desgaste durante o *running-in* (ZUM-GAHR, 1987).

### **2.5.1 Influência da dureza.**

O efeito da dureza sobre o desgaste do material não é simples, pois diferentes mecanismos de desgaste podem prevalecer, dependendo das condições de operação dos ensaios. Assim, a intensidade do desgaste pode aumentar diminuir ou permanecer inalterada.

Para um desgaste severo, sabe-se que a adesão é facilitada quando as durezas dos materiais são baixas. A princípio, a separação de junções de adesão não provoca perda de material. O desgaste ocorre se as juntas de adesão se quebram ao longo do deslizamento entre os materiais. Como parâmetro de ensaio para avaliar a dureza, utilizamos o carregamento. Por exemplo, nessa situação, para uma dada dureza, é aplicada uma carga de um corpo contra outro. Para produzir um

desgaste adesivo acentuado por adesão (chamado de *scuffing*), em uma dureza menor, será necessário um menor carregamento, pois baixas durezas favorecem processos adesivos de desgaste. Por outro lado, o aumento da dureza provoca mudanças substanciais no desgaste dos materiais devido à mudança do mecanismo de desgaste dominante. Se processos adesivos prevaleciam em baixos valores de dureza, há uma transição para processos triboquímicos com o aumento da dureza para ensaios a seco. Como visto, trata-se de uma transição do desgaste severo para o moderado. Esse processo pode inclusive ocorrer durante um ensaio: com o trabalho a frio sobre o contato, a dureza nessa região é aumentada e a adesão passa a ter pouco efeito sobre o contato. Da mesma forma desgaste por fadiga superficial também pode atuar nesse contexto de desgaste moderado. Para melhor avaliar um ensaio, é usual determinar um valor crítico de dureza em que ocorre a transição do mecanismo de desgaste, que com o trabalho a frio, sempre terá o sentido de desgaste severo para o desgaste moderado.

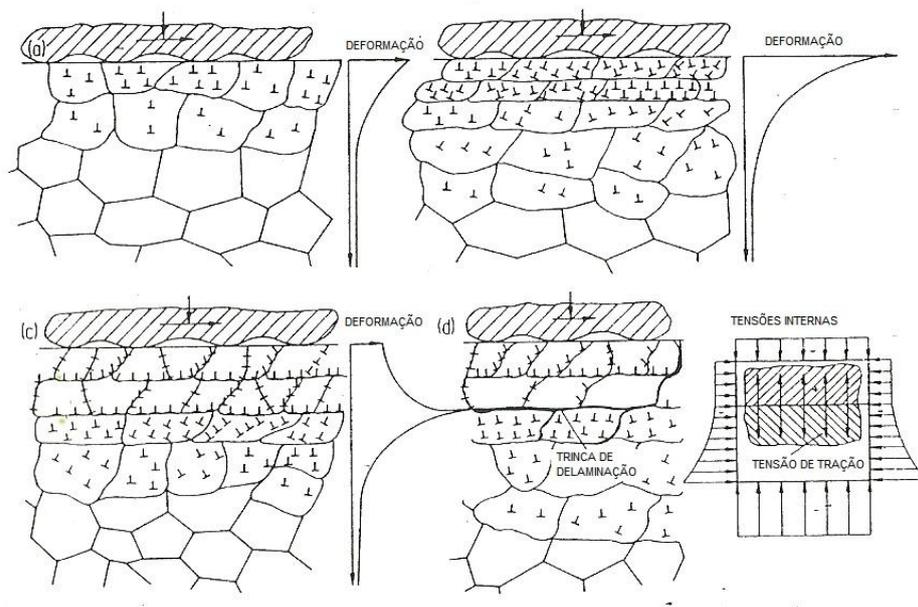
A reação triboquímica pode favorecer a formação de óxidos mais duros que o material-base e quando isso ocorre, o desgaste torna-se ainda mais severo, já que o fenômeno da abrasão fica mais intenso. Caso contrário: haver a formação de óxidos mais moles (o que é mais comum para materiais de engenharia) haverá transição para um desgaste moderado (ZUM-GAHR, 1987).

### **2.5.2 Influência do trabalho à frio e ductilidade**

Durante o deslizamento de superfícies, deformações são acumuladas naquela que está carregada (corpo) devido às repetidas passagens de asperezas da superfície do contra corpo. Essas deformações são menos pronunciadas quanto mais se afasta da superfície, e será menor quanto maior for a susceptibilidade do material ao trabalho a frio. Trincas podem surgir em regiões que existem essas deformações. Rupturas ocorrerão quando a tensão no material devido às deformações ultrapassar a ductilidade do material.

O processo de delaminação pode ser explicado através desses mecanismos de distribuição de deformações, segundo um gradiente. Deformações superficiais e o deslocamento de discordâncias aumentam com o número de passagens nas

asperezas do contra corpo. As deformações são acumuladas, e as discordâncias são rearranjadas dentro da estrutura cristalina. As camadas mais próximas da superfície passam por um processo de recuperação cristalina devido à ativação térmica incentivada pelo aumento da temperatura. O aumento da temperatura ocorre pela energia gerada do atrito entre as superfícies. As camadas afetadas pelo deslocamento, mas que não sofreram aquecimento suficiente para ativar o deslocamento de discordâncias, acabam mantendo o estado de tensões anterior. Há então um gradiente de tensões na interface recuperada e essa não-recuperada (não-aquecidas), e tensões internas compressivas iniciam o processo de delaminação. A interface, devido a essa concentração de tensões compressivas passa a ter preferência para a formação de trincas de delaminação, havendo também uma direção preferencial para a propagação da trinca: na interface do gradiente de tensões. A Figura 7 descreve esquematicamente o fenômeno de delaminação.



**Figura 7 – (a) Deslocamento de estruturas, deformações e tensões durante deslizamento a seco. (b) aumento da densidade de discordâncias e deformações devido ao aumento de asperezas na contraface. (c) núcleos de discordâncias recuperados, resultando na diminuição das deformações de superfície. (d) trincas de delaminação e tensões internas.**

Fonte: Salesky et al 1983 *apud* ZUM-GAHR,1987 modificado.

Esse tipo de formação de desgaste indica de maneira clara que o trabalho a frio e a ductilidade do material influenciam o coeficiente de desgaste. Concluindo, se houver uma alta taxa de trabalho a frio, as deformações nas camadas superficiais e

subsuperficiais do contato serão reduzidas, para uma mesma condição de atrito. Então a formação e propagação de trincas serão inibidas, já que as deformações são menores. Também, quanto mais dúctil for o material, mais resistência quanto ao processo de geração de trincas por delaminação é observado. Um aumento na ductilidade pode desfavorecer o processo de recuperação das estruturas cristalinas em níveis subsuperficiais, fato que favorece à não criação de gradientes de deformação entre níveis superficiais e subsuperficiais (ZUM-GAHR,1987).

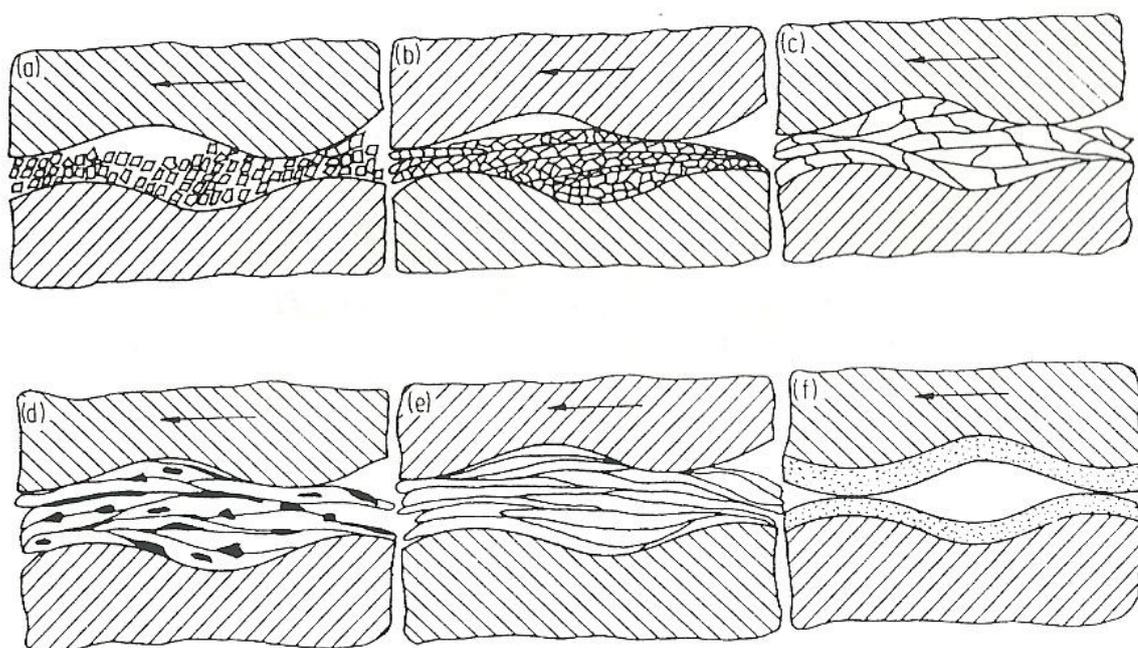
### **2.5.3 Influências do tipo de material associados a elementos microestruturais.**

Elementos microestruturais têm grandes influencias sobre o processo de desgaste. Inclusões, defeitos, solutos são alguns elementos que tornam mais complexas as análises de desgaste. O estudo de estruturas monofásicas deve ser introduzido para que se prever como se comportará uma estrutura multifásica.

Para melhor analisar efeitos de estruturas monofásicas sobre o desgaste, Feller e Klinger (*apud* Zum-Gahr,1987), realizaram uma série de experimentos pino sobre cilindro em que tanto o pino quanto o cilindro eram do mesmo material.

Para o alumínio, alguns mecanismos de desgaste ficaram bastante evidentes. Os pesquisadores realizaram análises em microscópio eletrônico e identificaram que o alumínio é bastante influenciado pelo efeito da oxidação superficial, sendo o mecanismo de desgaste triboquímico gerado por esse efeito. O trabalho a frio e a formação de detritos sob a forma de pó também foram evidenciados no ensaio, sendo os principais mecanismos responsáveis a fadiga de contato e a abrasão, respectivamente. No geral, não se observou grande influência do mecanismo de adesão para essa condição de ensaio do alumínio. Em comparação com outros materiais, o fato de o alumínio apresentar menor resistência em relação ao desgaste chamou a atenção dos pesquisadores, e levou-os a defender a teoria de que o fato de o Al possuir puramente ligações metálicas facilitaria o processo tribológico. Isso ficou mais evidente, quando se analisou que outros materiais ensaiados, dotados de algum tipo de ligação covalente em termos microscópicos (além da ligação metálica), apresentaram maior resistência ao desgaste.

Uma explicação melhor é dada pelos pesquisadores para cada um dos fenômenos tribológico observados. A oxidação tribológica no alumínio resultou na liberação de detritos sob a forma de pó dessa camada oxidada. O processo de abrasão foi o responsável pela separação dos óxidos dos corpos de prova, já que, para o alumínio, o material puro possui uma dureza muito maior que seu óxido, favorecendo esse arrancamento de óxidos quando da abrasão. As Figura 8.a, Figura 8.c e Figura 8.d ilustram os mecanismos descritos para o alumínio.



**Figura 8 - Diferentes tipos de fragmentos de desgaste e camadas formadas durante o desgaste por deslizamento a seco. (a) detritos de desgaste em pó.(b)camada compactada de fragmentos de desgaste.(c)camada de transferência de baixa ductilidade(d) camada de transferência contendo partículas como inclusões e óxidos.(e) camada de transferência de alta ductilidade.(f) camadas dúcteis e fortemente aderidas devido a reação triboquímica.**

**Fonte: ZUM-GAHR,1987 modificado.**

Como já discutido, a influencia da dureza sobre a intensidade do desgaste pode ser conflitante. Se por um lado, a alta susceptibilidade ao trabalho a frio e o aumento da dureza reduz o desgaste, diminuindo a deformação plástica e mecanismos de adesão, pode por outro lado facilitá-lo. O modo segundo o qual uma alta dureza pode facilitar o desgaste está associado ao processo de delaminação, pela geração de gradientes de deformação em camadas subsuperficiais. A intensidade com que o contato age sobre as superfícies deve ser levada em conta. Considerando não apenas aspectos do par tribológico, mas também comportamentos específicos dos materiais submetidos ao desgaste, pode fornecer

em que nível as propriedades (dureza, por exemplo) atuam sobre os mecanismos: se para aumento da resistência ao desgaste ou diminuição.

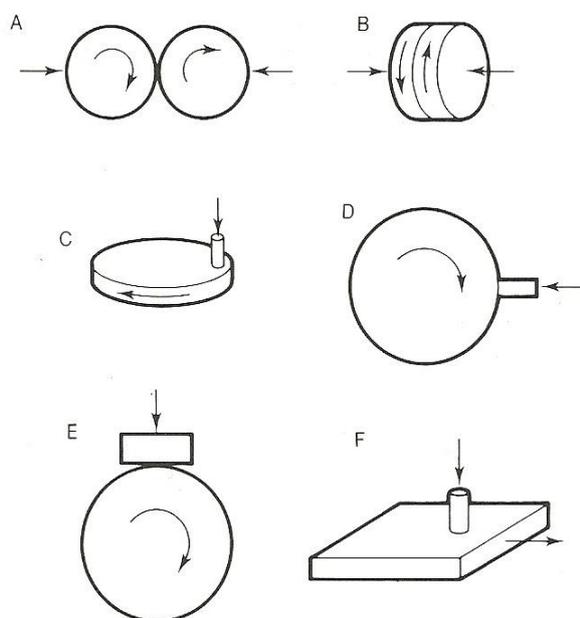
Para materiais que apresentam algum tipo de soluto na microestrutura, dois efeitos podem ocorrer quando à resistência ao desgaste: se promover aumento na dureza do material, haverá aumento na resistência ao desgaste, por outro lado, se gerarem efeitos de instabilidade, haverá diminuição na resistência ao desgaste. Essa instabilidade citada ocorre quando os solutos impõem tensões residuais ou quando é observado um gradiente de dureza dentro da microestrutura.

Num contexto geral da influência da microestrutura, a dureza é o fator associado. No geral, o aumento na resistência ao desgaste pode ser executado por meio do aumento da dureza ou pela transição de desgaste, do severo para o moderado. A transição ocorre através da formação de óxidos na interface de contato ou pela utilização de sistemas de lubrificação (ZUM-GAHR,1987).

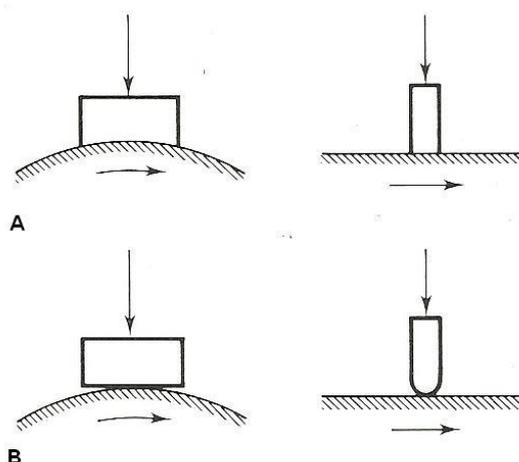
## **2.6 Métodos de teste do desgaste por deslizamento**

Como métodos de teste de desgaste por deslizamento, existem muitos arranjos experimentais. Análises em laboratório, usualmente, tentam avaliar dois fatores distintos: mecanismos segundo os quais o desgaste por deslizamento ocorre, ou simular aplicações práticas a fim de fornecer informações úteis para o projeto de um sistema. A menor modificação nas condições de ensaio de desgaste por deslizamento pode resultar em mudanças radicais nos mecanismos associados com a taxa de desgaste, por exemplo. Os equipamentos projetados para medir e controlar grandezas associadas ao desgaste são chamados de tribômetros (do inglês, *tribometers*), também conhecidos como *tribotesters*. Os equipamentos de medição podem ser divididos em dois grupos: o primeiro possui as superfícies de deslizamento dispostas simetricamente, em que os coeficientes de desgaste para materiais idênticos devem ser os mesmos; o outro, mais comumente observado, o sistema assimétrico, em que os dois corpos, mesmo que sejam do mesmo material, apresentarão taxas de desgaste diferentes. A Figura 9 mostra exemplos dos ensaios simétricos e assimétricos. As Figura 9.A e Figura 9.B mostram o ensaios simétricos anel-anel ao longo de uma linha e face-a-face, respectivamente. Arranjos simétricos de equipamentos não são muito usados para o estudo de desgaste, eles são aplicados mais para simular sistemas observados na prática. Já o grupo de ensaio

assimétrico é amplamente usado tanto para área de simulação quanto para o estudo do desgaste propriamente dito. O mais comum desse grupo é o teste do pino sobre disco – que será o foco de análise desse trabalho. Essa modalidade de ensaio pode ser feita com o pino sobre a face plana (Figura 9.C) ou o pino sobre a curvatura do disco (Figura 9.D). Outros tipos caracterizados, também bastante utilizados são do bloco carregado contra um anel e do pino carregado contra um plano, Figura 9.E e Figura 9.F, respectivamente. Ainda outra classificação pode ser feita: o contato pode ser observado inicialmente apenas numa área de contato nominal – contato conforme (caso do pino sobre o disco com pino de ponta plana), ou pode-se observar o contato somente em um ponto ou linha – contato não conforme (caso pino sobre disco com ponta esférica), Figura 10.A e Figura 10.B, respectivamente. Para arranjos assimétricos há, ainda, uma diferenciação quanto aos corpos envolvidos. O pino, ou o bloco dependendo do modelo de ensaio, é usualmente tratado como corpo (do inglês *specimen*) e este é o componente para o qual a coeficiente de desgaste geralmente é medido; enquanto o outro corpo – representado pelo disco, superfície ou anel – é chamado de contra corpo (do inglês *counterface*) (HUTCHINGS,1992).



**Figura 9 - Geometrias usadas nos testes de ensaio por deslizamento. (A) Anel-anel ao longo de uma linha; (B) Anel-anel face-a-face. (C) Pino-disco na superfície; (D) Pino-disco sobre a curvatura; (E) Bloco-anel; (F) Pino-plano. Fonte: HUTCHINGS,1992.**



**Figura 10 - Ensaio assimétrico: geometrias de contato. A - Contato conforme; B - Contato não-conforme. Fonte: HUTCHINGS modificado, 1992.**

A maneira como o equipamento atuará na medição dos parâmetros de desgaste é relativamente simples. O desgaste propriamente dito será medido a partir da retirada do espécime do equipamento para medição de suas dimensões ou de sua massa. No caso de contatos conforme, a área de contato aparente aumenta com o tempo de ensaio, o desgaste pode ser medido pelo tamanho da impressão de desgaste sobre o corpo. Para medir a força de atrito, usualmente mede-se a força tangencial no corpo, sendo esse valor equivalente, em módulo, à força de atrito. Uma vez possuindo a força de atrito, é possível calcular não apenas o coeficiente de atrito, mas também monitorar possíveis desvios causados pela mudança brusca de rugosidade ou falhas do equipamento de ensaio. A distância de deslizamento pode ser determinada a partir do conhecimento da velocidade e duração do teste. Deve-se atentar, no entanto, que não se obterá as mesmas condições de desgaste usando a metade do tempo de ensaio e o dobro da velocidade, isto é, outros aspectos estão inerentemente ligados a velocidade, por exemplo, a temperatura na região do contato. Assim, parâmetros como lubrificação, composição atmosférica e até mesmo a posição do aparato (devido ao efeito da gravidade) podem fornecer resultados diferentes no ensaio. Finalmente, deve-se considerar o fato de que, apenas se houver comprovação de que o mesmo mecanismo que rege o desgaste em um ensaio é observado no problema prático, podem-se estabelecer critérios de comparação e determinação de vida de componente ou investigar modos de falha (HUTCHINGS, 1992).

## **2.7 Método dos Elementos Finitos**

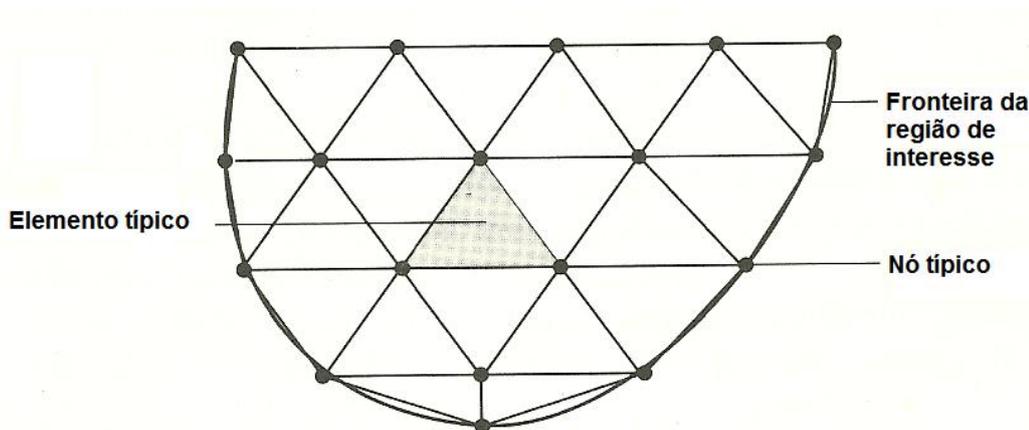
### **2.7.1 Visão Geral do Método dos Elementos Finitos**

Tratando mais especificamente do método dos elementos finitos (MEF), um bom entendimento da técnica se faz necessário para interpretação dos resultados. O método dos elementos finitos é um método numérico cujo desenvolvimento se iniciou na década de 1950 e vem sendo continuamente melhorado desde então. Atualmente é utilizado nas mais diversas aplicações da engenharia e largamente aceito na indústria. Essa técnica tem servido para fazer uma análise preliminar dos efeitos que o sistema físico gera sobre um produto submetido a determinadas condições. Por exemplo, no desenvolvimento do projeto de um automóvel, observa-se que o protótipo é testado muito depois que os primeiros testes com métodos numéricos (dentre eles elementos finitos) são executados. Se bem aplicada, essa técnica pode reduzir custos, já que menos ensaios serão feitos, além de fornecer valores numéricos confiáveis que quantificam a estabilidade e segurança do produto. O desenvolvimento da tecnologia de computadores em termos de hardware possibilitou um desenvolvimento da referida técnica. Empresas especializadas desenvolvem softwares com capacidade cada vez maior de integrar diferentes efeitos físicos numa mesma análise, por exemplo, em uma análise da indústria aeroespacial, devem-se avaliar efeitos aerodinâmicos e estruturais de forma simultânea.

Os problemas de estado estacionário ou análises de equilíbrio são as aplicações mais comuns do método dos elementos finitos. Para a área estrutural, problemas de elasticidade são calculados por essa técnica a partir do cálculo dos valores de deslocamentos, dos quais é possível derivar os valores das deformações e tensões dos corpos. O problema de autovalores e autovetores também é clássico para o cálculo estrutural. Nesse caso, também é feita uma análise estática, mas a análise é quanto às frequências naturais de um sistema e modos de vibrar, também importantes em termos de projetos. Um terceiro tipo de problema que o método dos elementos finitos pode resolver é o transitório. Essa classe de problemas é caracterizada pela mudança gradual ao longo do tempo das condições (carregamentos, transferência de calor, por exemplo) a que estará submetido o sistema. Os problemas também podem ser classificados quanto a sua linearidade.

Alguns problemas não se observa alteração de propriedades durante a análise: os efeitos de uma iteração não afetam o da iteração subsequente. Esses problemas são chamados de lineares e são de solução mais simplificada. Já para aqueles problemas em que os efeitos (de deslocamento ou temperatura, por exemplo) de uma iteração afetam diretamente as condições de análise da próxima iteração são chamados de não lineares. Para esse último tipo de problema deve ser feita uma reavaliação das condições do corpo antes de se iniciar cada iteração, tornando a solução mais demorada e complexa (FAGAN, 1992).

Os princípios que regem o método dos elementos finitos são simples. Considera-se, por exemplo, um corpo em que uma determinada distribuição de variável (de temperatura ou deslocamento) é requerida como resposta. Primeiramente a região é dividida numa montagem de subdivisões chamadas elementos e o conjunto de elementos é chamado de malha. Cada elemento é conectado por juntas, as quais são conhecidas como nós. A Figura 11 mostra a divisão entre elementos e as junções entre eles para um corpo arbitrário. A variável em análise atua sobre cada elemento de uma maneira pré-definida de acordo com o tamanho, tipo e número de elementos.



**Figura 11 - Discretização de uma região de interesse em de elementos finitos. Fonte: FAGAN,1992 modificado.**

A distribuição da variável dentro de cada elemento é definida por uma função polinomial ou trigonométrica. Essa divisão de uma geometria em elementos é chamada de discretização. A partir dessa discretização é que equações governantes

do processo em análise (de transferência de calor ou deformação, por exemplo) são aplicadas a cada elemento e pode-se montar um sistema de equações. Essas equações descrevem o comportamento do corpo como um todo. A solução do problema basicamente considera os efeitos em cada elemento de forma conjunta, já que se deseja que a variável nos nós seja compatível em elementos adjacentes, isto é, espera-se o mesmo valor numérico num nó e que esse mesmo valor seja expandido para a análise de todo o elemento. O sistema de equações para uma análise estática, proveniente de uma discretização por elementos finitos, pode ser escrito sob a forma matricial, conforme mostrado na Equação (5).

$$[k]\{U\} = \{F\} \quad (5)$$

Onde, para problemas estruturais,  $[k]$  é a matriz de rigidez,  $\{U\}$  é o vetor de deslocamentos nodais e  $\{F\}$  é o vetor de forças nodais. Há alguma dificuldade na solução devido ao número de equações envolvidas que pode chegar facilmente ao número de 50000 dependendo do tipo de análise que se necessita. A meta de solução é determinar os valores de deslocamentos, representados pelo vetor  $\{U\}$ , para aquela condição de carregamento, fornecida pelo vetor  $\{F\}$ . A matriz de rigidez é uma característica do sistema e é calculada pelo software conforme a geometria do problema e propriedades dos materiais. Observando a Equação (5), verifica-se que para a obtenção do vetor  $\{U\}$  é necessário inverter a matriz  $[k]$  ou realizar um escalonamento no sistema de equações de modo a resolvê-lo. Esse é o maior problema em se tratando de tempo de solução: como o número de equações geralmente é alto há dificuldade de realizar essa solução mesmo para softwares sofisticados. Esse problema é ainda mais agravado para problemas não lineares. Nesse tipo de problema a matriz de rigidez deve ser recalculada a cada iteração do problema, já que os deslocamentos nos corpos alteram as propriedades do problema e, conseqüentemente, a matriz de rigidez é modificada. Trata-se de um problema não linear, que também é característica do problema de contato, uma vez que a carga de contato é aplicada gradualmente e as características na região do contato são modificadas a cada iteração. A convergência de solução do problema de contato com o MEF é, portanto, lenta devido a esse caráter não linear do problema. Após obtido os deslocamentos nodais  $\{U\}$ , através das relações defomações-

deslocamentos e das relações constitutivas, calculam-se as deformações e tensões, respectivamente.

Todas essas análises específicas de elementos finitos possibilitaram a resolução de problemas que não possuem soluções analíticas. Associado a isso, as melhorias nos softwares comerciais estão cada vez mais facilitando a aplicação da técnica e tornando-a cada vez mais acessível às organizações. Para solucionar um problema através do método dos elementos finitos, basicamente três etapas globais devem ser cumpridas: pré-processamento, solução e pós-processamento. Cada uma dessas etapas deve ser cuidadosamente realizada para que o problema forneça resultados consistentes. Atenção quanto aos resultados deve ser grande, já que erros de interpretação de resultados podem comprometer o andamento do projeto. Até mesmo a não identificação de uma inconsistência no início de uma análise acaba comprometendo todos os demais resultados. Nesse contexto, o pré-processamento tem papel fundamental: nessa etapa que se fornece ao programa as entradas do problema. As principais subetapas do pré-processamento são:

- Características dos materiais dos corpos;
- Modelagem dos corpos envolvidos;
- Construção e refinamento da malha de elementos finitos;
- Condições de carregamento;
- Condições de contorno (simetria, restrições, etc).

Essas subetapas listadas são importantes, pois é possível que, se não realizadas com esmero, a próxima etapa, de solução não poderá ser executada pelo programa, isto é, a solução não irá convergir. Na etapa de solução selecionam-se os 'tipos de soluções', que variam de acordo com o tipo de problema (linear, não-linear, transiente, estacionário), e os critérios de parada para que o cálculo propriamente dito seja feito de maneira mais eficiente e rápida. Nessa etapa é importante monitorar a convergência do problema: o software fornece, para cada iteração, o valor do erro em relação à iteração anterior conforme os critérios de parada estabelecidos anteriormente. Ao se verificar que não há convergência recomenda-se a parada imediata da solução. Por outro lado, se houver convergência, obter-se-ão os valores do problema, mas esse não é o fim da resolução: agora o pós-

processamento deve ser feito para expressar esses valores. Pós- processar consiste em selecionar imagens gráficas e tabelas de valores para serem plotados pelo programa para posterior avaliação e interpretação de resultados. A etapa de pós-processamento também inclui a observação da existência de erros e inconsistências comparados com resultados analíticos ou experimentais e a rejeição dos resultados nesse caso. Também é importante que se selecione apenas os dados relevantes para a análise, restritas a uma região de interesse, por exemplo, de modo tornar a plotagem em tabela ou gráfico menos poluídos (FISH e BELYTCHKO, 2009).

### **2.7.2 Ansys Workbench e o problema do contato**

O *software* utilizado para realizar as simulações de contato é o *Ansys Workbench*, um *software* comercial bastante completo. O *Ansys* tem essa característica chamada *Workbench*, pois os projetos de um arquivo podem ser dispostos em um 'quadro de trabalho' (tradução para *workbench*). Nesse quadro é possível, por exemplo, que resultados de um modelo de simulação estrutural forneçam dados para um modelo de escoamento de um fluido. Para cada modelo, uma sequência de informações (ou subtarefas) deve ser fornecida para o *software*.

Mais especificamente, para resolver o problema de contato do presente trabalho utilizou a ferramenta de cálculo estrutural estático. Para essa situação, o *Ansys* indica as etapas necessárias para construir o modelo. A Figura 12 mostra uma visão geral do ambiente do *Ansys Workbench* para o caso citado, já a Figura 13 evidencia o painel de subtarefas para resolver o problema.

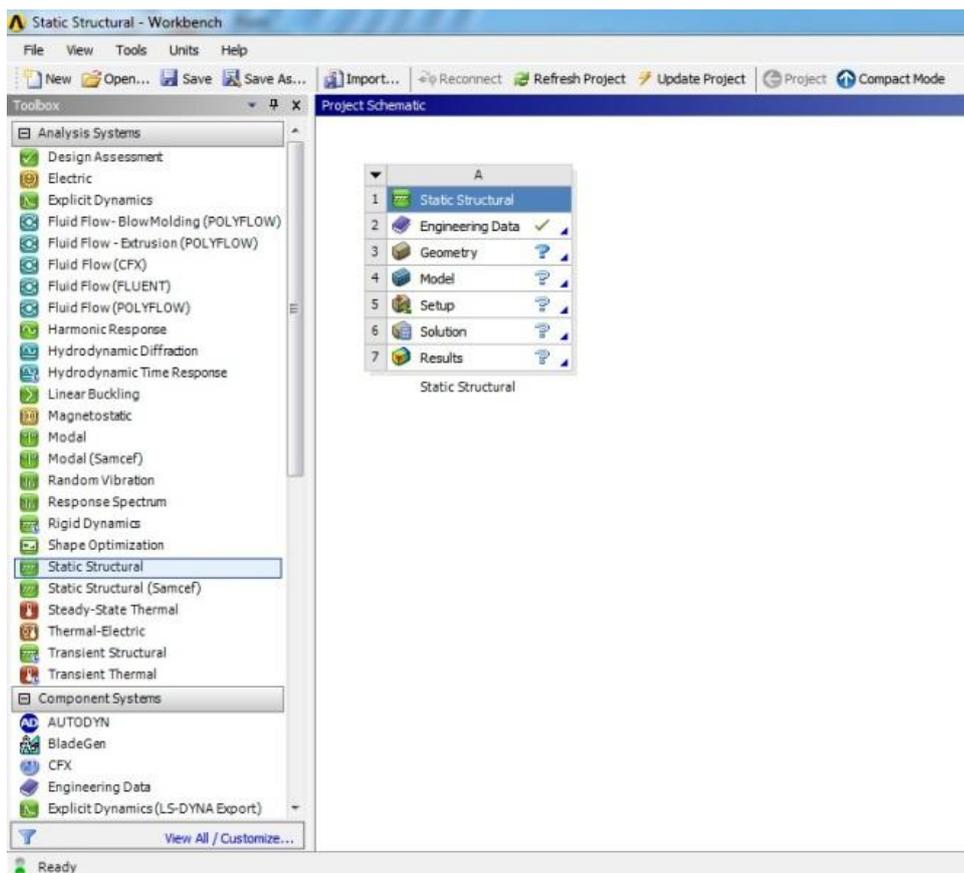


Figura 12- Visão geral do ambiente do *Ansys Workbench*<sup>1</sup>.



Figura 13 - Quadro descritivo das subtarefas para resolução do problema estático estrutural.

Descrever como funciona cada subtarefas do problema estático estrutural, aplicado no presente trabalho, se faz necessário para que se possa entender a sistemática do software e como utilizá-lo.

<sup>1</sup> Todas as Figuras e Tabelas que não possuem indicação de Fonte foram compiladas pelo autor.

### **2.7.3 Engineering Data**

Essa subtarefa é automaticamente configurada pelo software e trata-se da edição e seleção dos materiais que serão usados no modelo. Assim, todos os materiais que compõem o modelo devem ser adicionados a uma lista principal. Além de ser possível selecionar materiais já existentes no software, é possível criar novos com as características específicas. É possível editar valores como módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, resistência ao escoamento, resistência à fratura conforme o material que se deseja analisar. Num contexto de uso avançado da ferramenta, é possível cadastrar no software curvas de ensaios realizados com o material de análise para que o modelo fique mais representativo.

### **2.7.4 Geometry**

Como o próprio nome sugere nessa subtarefa o software requer a criação ou importação da geometria que será analisada para o método dos elementos finitos.

O próprio Ansys possui uma ferramenta CAD (do inglês, *Computer Aided Design*) para geração da geometria do modelo que, apesar de ser bastante simples, cumpre bem a função e possui as mesmas ferramentas de softwares CAD comerciais.

Caso a geometria seja mais complexa ou haja mais afinidade com softwares CAD comerciais, é possível importar desenhos 3D desses programas a fim de aplicá-los no modelo. Nesse ponto o Ansys Workbench é bastante flexível, já que é capaz de se comunicar com vários softwares CAD, quais sejam: SolidWorks (*Dassault Systèmes*), Inventor (*Autodesk*), CATIA (*Dassault Systèmes*), ProEngineer (*PTC*), entre outros. Uma vez importada a geometria, também é possível importar, em conjunto, os sistemas de coordenada e propriedades do material, simplificando a etapa *Geometry* caso o programa CAD já possua as características do material discriminadas.

Outro ponto importante dessa subtarefa é classificar corretamente o tipo de análise que será feita: 2D ou 3D, de acordo com a geometria é possível um ou outro tipo de análise.

### **2.7.5 Model, Set up, Solution e Results**

Essas três subtarefas podem ser descritas juntas, pois todas elas são feitas no *solver* (módulo interno ao Ansys que efetivamente resolve os modelos) chamado *Mechanical*. Nesse *solver* todas as ações descritas anteriormente como construção e refinamento da malha de elementos finitos, carregamento, condições de contorno (simetria, restrições, etc) são executadas.

A definição das malhas representa a condição de modelagem ou *Model*, já as condições de carregamento, simetria e restrições estão associadas com a etapa *Set up*. Para as etapas *solution* e *results*, diversas ações dentro do *Mechanical* podem ser realizadas.

A definição da forma de solução e o algoritmo a ser aplicado têm influência para obtenção dos resultados. Dependendo do tipo de problema um algoritmo é mais eficiente e converge mais rapidamente que outro, sendo a pesquisa e estudo de algoritmos dentro do *Help* do programa necessários. Para a tarefa de resultados (*Results*) devem-se selecionar quais resultados se deseja após a simulação. Tensão equivalente de Von-Mises, deformação total, tensões principais e tensão de cisalhamento são alguns exemplos de resultados que podem ser requisitados para o programa calcular. Quando esses resultados forem calculados, formatos de apresentação como tabelas e gráficos podem ser parametrizadas, escolhendo escala, disposição de dados, etc.

## **2.8 Integração da análise do desgaste com o Método dos elementos finitos**

A escolha do método de solução numérica integrados com os ensaios experimentais foi observada em outros trabalhos da literatura principalmente quando se levou em conta a mudança na geometria dos corpos durante o ensaio. Para Põdra e Andersson (1999), o método dos elementos finitos (MEF) é uma ferramenta versátil, pois permite resolver problemas de tensão e deformação independentemente da geometria dos corpos. Zhang e Meng (2006) indicam a necessidade de usar uma ferramenta do cálculo numérico para tratar de um problema do contato, já que é considerado dinâmico por natureza. Por fim, Ashraf e Najafabadi (2006) citam a abrangência que o método dos elementos finitos consegue oferecer para o problema, já que os dois importantes resultados

esperados de um modelo de desgaste sob o ponto de vista da engenharia são a mudança nas dimensões e efeitos localizados de desgaste. O modelo de elementos finitos apresentado pelos autores fornece ambos os aspectos.

Assim, conclui-se que, caso o modelo aplicado no *software* de elementos finitos seja corretamente implementado, é possível tratar o problema do contato de forma abrangente.

O trabalho de Põdra e Andersson (1999) segue as mesmas diretrizes a serem observadas no presente trabalho. A ideia de usar elementos finitos e procedimentos experimentais está presente nesse trabalho, com um abordagem diferente. Põdra e Andersson realizaram análises separadas, analisando o problema do contato sob a ótica experimental e depois segundo o método dos elementos finitos, usando o ensaio pino sobre disco. Os valores de coeficiente de desgaste calculados a partir dos procedimentos experimentais serviram como dados de entrada para o modelo de elementos finitos, que seria responsável por apresentar resultados de desgaste ao longo da distância de deslizamento.

Algumas informações relevantes foram observadas neste trabalho. Uma delas seria a comprovação de que a pressão de contato é substancialmente reduzida à medida que o desgaste de pino de ponta esférica contra o disco se desenvolve. Isso ocorre porque a mudança de geometria – e conseqüente aumento na área de contato – distribui o carregamento de modo que a pressão de contato diminua. A Figura 14 mostra essa substancial redução na pressão de contato para o carregamento de 21N. É possível observar também nessa figura a evolução do valor do coeficiente de desgaste, mostrando a variação das condições de desgaste ao longo do ensaio.

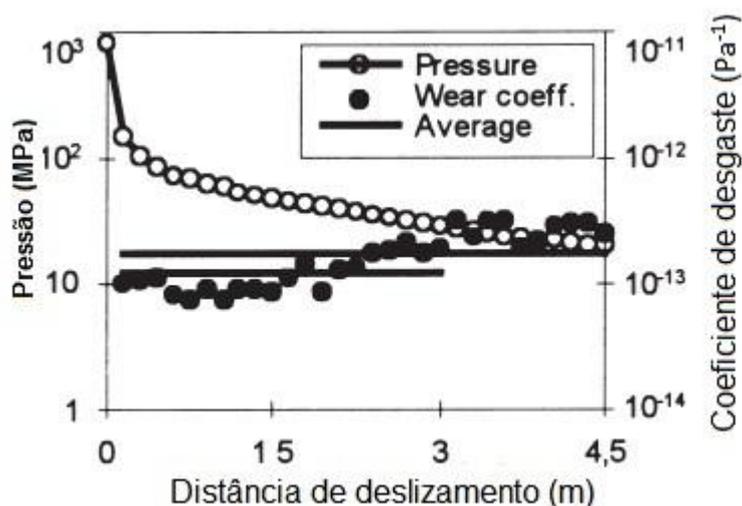


Figura 14 - Resultados dos ensaios para a pressão e coeficiente de atrito.

Fonte: PÔDRA e ANDERSSON, 1999 modificado.

Outras informações relevantes que serviram de apoio para o presente trabalho, foi o gráfico que associa a análise puramente experimental com a análise puramente por elementos finitos, com dados de entrada obtidos experimentalmente. A Figura 15 mostra esse gráfico comparativo entre as duas técnicas de abordagem (numérica e experimental). Os círculos representam os resultados experimentais, enquanto que as linhas aqueles valores resultantes do método dos elementos finitos. Segundo os autores do artigo, a diferença obtida foi considerada alta devido aos erros incorporados em cada abordagem. Essa diferença serviu de inspiração para não usar as técnicas independentemente, mas sim uma associada à outra.

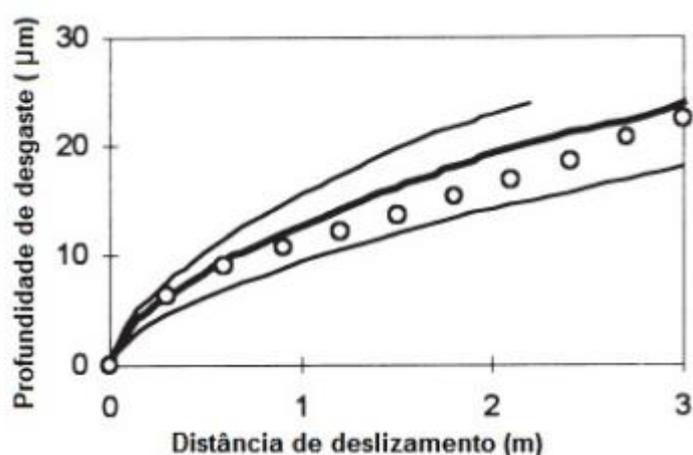


Figura 15 - Resultados dos ensaios da profundidade de deslizamento dos ensaios. Círculos representam resultados dos experimentos, linhas são correspondentes a resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, sendo a linha mais espessa a média entre as outras duas. Fonte: PÔDRA e ANDERSSON, 1999 modificado.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Descrição da Metodologia

O método utilizado para elaboração desse trabalho foi o experimental para estudo dos efeitos do ensaio de desgaste por deslizamento. Associado a isso, será utilizado o método dos elementos finitos como uma ferramenta auxiliar que proverá campos de tensão a serem usados no modelo de Archard.

Para aplicação do método experimental citado, foi desenvolvida uma metodologia específica, que é o principal produto do presente trabalho. A partir dela é possível obter resultados que consideram mudanças nas dimensões e efeitos localizados do desgaste (ASHRAF e NAJAFABADI, 2006), os quais tendem a ser mais precisos que análises puramente experimentais que fazem uso do modelo de Archard.

Para realização das simulações com elementos finitos, o *software* utilizado foi o Ansys Workbench. A metodologia possui uma relação de precedência dos ensaios experimentais, isto é, a etapa de simulações com elementos finitos depende dos resultados obtidos nos ensaios de desgaste por deslizamento.

Os ensaios de desgaste serão realizados em um tribômetro tipo pino contra disco de nome CETR-UMT (*Comprehensive Materials Testing for Mechanical Tribological Properties*) do fabricante Bruker, instalado no LASC (Laboratório de Superfícies e Contato) da UTFPR (Figura 16).



**Figura 16 - Tribômetro a ser utilizado nos ensaios em laboratório**

**Fonte: BRUKER NANO SURFACE DIVISION, 2012.**

A Figura 17 apresenta um fluxograma que melhor explica essa relação de precedência.

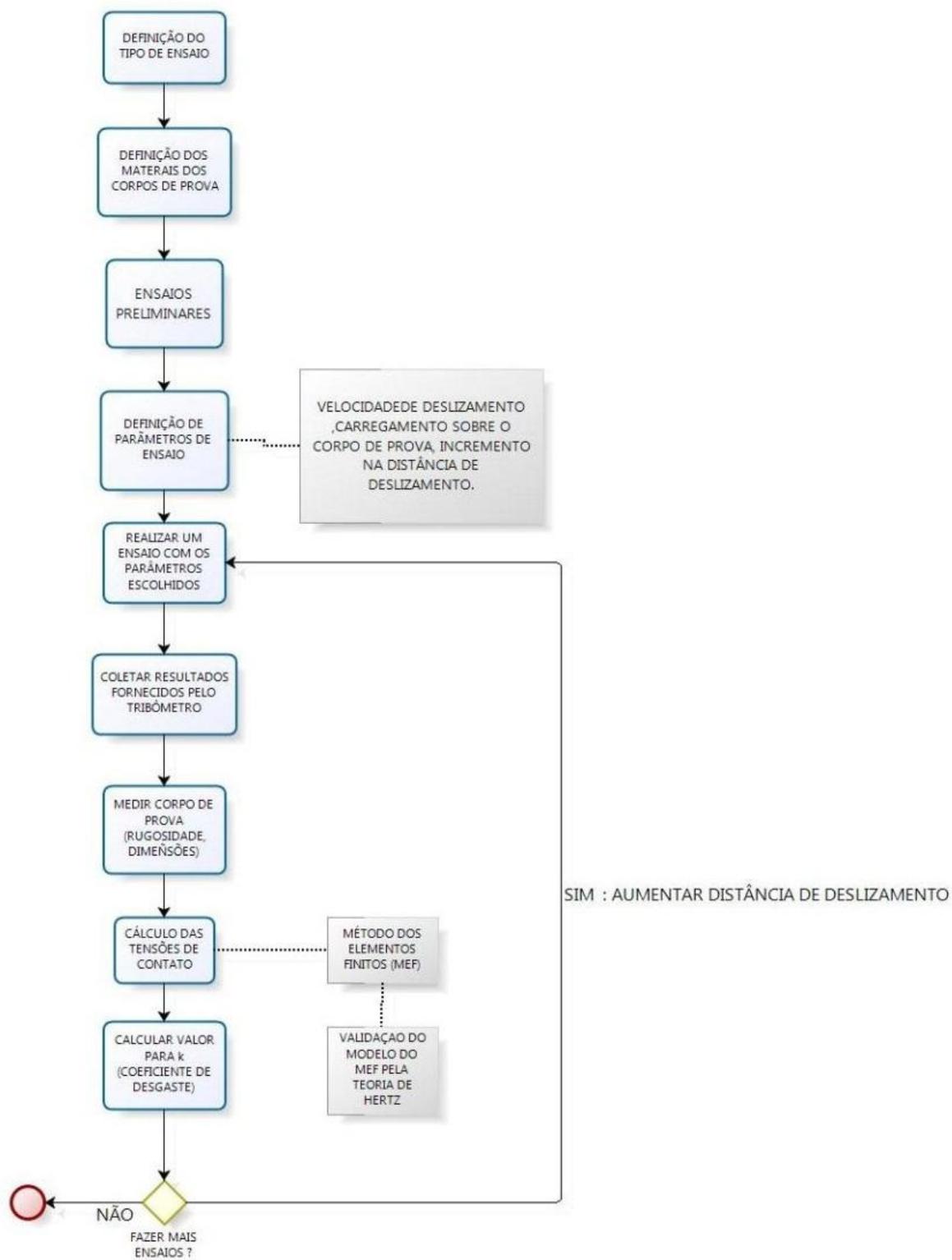


Figura 17 - Fluxograma descritivo da Metodologia.

Ao se analisar o fluxograma da Figura 17 observa-se o caráter iterativo da metodologia, sempre tendendo a realizar mais ensaios caso o critério de parada não seja atendido. Esse critério depende do alcance do estado estacionário para o desgaste e para o atrito, para que seja possível avaliar o comportamento do coeficiente de desgaste ( $k$ ) até se atingir esse estado. O erro percentual relativo entre iterações para o coeficiente de desgaste e coeficiente de atrito foi escolhido como critério de parada: caso seja maior que 5%, novos ensaios devem ser executados.

### 3.2 Características do ensaio

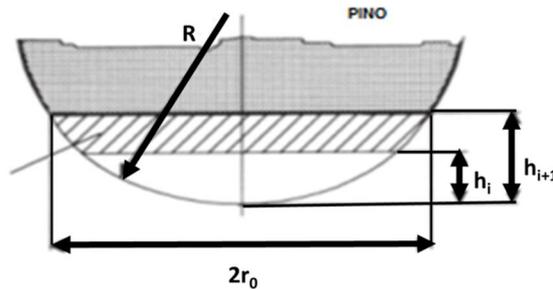
O tipo de ensaio de desgaste e os materiais utilizados para realização da análise foram estrategicamente escolhidos com o intuito de que a análise com o método dos elementos finitos fosse justificada. Deseja-se explorar as vantagens desse método em relação a métodos teóricos para cálculo de tensões (Teoria de Hertz para o contato, por exemplo). Para isso dois requisitos deveriam ser cumpridos. Primeiro, deveria haver uma forma de comunicação entre os resultados do ensaio e a geometria a ser aplicada no programa: deveria ser possível desenhar (em programa CAD) a região desgastada de forma exata para aplicar o cálculo das tensões de contato. Em segundo lugar, para efeitos de simplificação da análise dos elementos finitos, o desgaste deveria ocorrer predominantemente em um dos corpos de prova apenas. Isso além de facilitar a comunicação experimento-programa, reduz o tempo computacional de forma considerável, pois as alterações de geometria seriam consideradas em apenas um corpo do contato.

Então, para atender o requisito de comunicação com o método dos elementos finitos, propôs-se a utilizar uma situação de contato não conforme assimétrico em que a medição do desgaste pudesse ser feita de modo simples e exato. Com isso, o ensaio executado foi o pino sobre disco, cujo pino possuísse ponta arredondada (na prática uma esfera). A forma de medir o desgaste na esfera de forma exata<sup>2</sup> seria através da observação da geometria, conforme a Figura 18 evidencia. Para medir o desgaste, basta mensurar o valor de  $2r_0$ , chamado também de diâmetro de desgaste. Uma vez realizada a medição do diâmetro de desgaste é

---

<sup>2</sup> O erro associado será devido apenas aos erros de medição (incerteza de medição).

possível desenhar o pino desgastado em um *software* CAD e importar essa geometria para o cálculo das tensões de análise numérica, no caso o *Ansys Workbench*.



**Figura 18 - Método de medição da altura desgastada  $h$  do pino ensaiado**  
**Fonte: Põdra e Andersson ,1999, modificado.**

O segundo requisito para aproveitar as potencialidades do método dos elementos finitos seria adotar um material muito mais mole para o pino de modo que ele desgastasse muito mais que o disco. Para cumprir este requisito, duas ações foram tomadas: usar um material de dureza reduzida (quando comparado com os aços) para compor o pino e endurecer o material do disco. Assim, o material do pino selecionado foi o Alumínio, reconhecidamente de menor dureza que o aço, o material para o disco. No entanto, para potencializar a diferença de dureza, preocupou-se em selecionar um aço com alta temperabilidade, o aço AISI D2. Esse material é um aço-liga, cuja dureza após a têmpera e revenimento atinge valores de até 62 HRC. Utilizando o par tribológico pino de alumínio e disco de aço AISI D2 temperado, cumpre-se o segundo requisito, facilitando a aplicação do método dos elementos finitos.

## 4 EXECUÇÃO DA METODOLOGIA

### 4.1 Preparação dos corpos de prova

Como já citado, os materiais utilizados para os corpos de prova foram o alumínio para o pino com ponta arredondada e o aço AISI D2 temperado para o disco. No entanto, algumas ações foram tomadas a fim de simplificar a preparação desses corpos de prova.

A primeira delas foi não usar um pino de alumínio inteiriço para os ensaios, mas sim esferas de alumínio presas num porta esferas. Com isso, poupa-se o trabalho de usinar os pinos, mantendo o tipo de ensaio, visto que a esfera simula perfeitamente um pino de ponta arredondada com mesmo raio. A Figura 19 mostra uma imagem das esferas de Alumínio AISI 1100-H18<sup>3</sup> com diâmetro de  $4,762\pm 0,080\text{mm}$  (equivalente a  $\varnothing 3/16''$ ) com ovalização máxima de 0,1mm. Esse diâmetro foi escolhido devido ao fato de ser compatível com o porta esferas disponível.



Figura 19 – Amostra de esfera de Alumínio usada nos ensaios.

O porta esferas (Figura 20) foi obtido sob o regime de empréstimo junto ao Laboratório Integrado de Materiais (LIM) da UTFPR. O diâmetro interno de acoplamento da máquina é de 3,3 mm, porém o porta esfera possui diâmetro externo de 6 mm. Para contornar esse problema, construiu-se uma peça auxiliar de acoplamento, chamada aqui de peça de acoplamento.

---

<sup>3</sup> Dados do fornecedor: Só Esferas Com. de Esferas Ltda



**Figura 20 - Porta esferas utilizado para os experimentos.**

A Figura 21 mostra a peça de acoplamento e a Figura 22 indica como ela é montada junto ao porta esferas, com auxílio de um parafuso M4, sendo possível também verificar a dimensão do conjunto. O Apêndice A mostra o desenho de fabricação dessa peça de adaptação.



**Figura 21 - Peça de acoplamento usinada para adaptar encaixe no tribômetro.**



**Figura 22 - Montagem do porta esferas e da peça de acoplamento.**

Uma vez resolvido o problema do pino, tomaram-se as medidas para preparação do disco, então contra-corpo do ensaio pino sobre disco. Por meio de doação da 'Equipe Bajaguara'<sup>4</sup> da UTFPR, obteve-se o material para preparação dos discos: aço AISI D2. Uma vez tendo os dois discos requisitou-se a medição da composição química dos discos para certificação de que se tratava do aço AISI D2. A Tabela 2 mostra a composição para o aço AISI D2 usado nos experimentos. O resultado da medição, executada em parceria à empresa 'SpectroScan Tecnologia de Materiais' está no Anexo A e comprova que a composição do aço AISI D2 medido está dentro da tolerância de composição.

**Tabela 2 - Composição química, em peso, do aço AISI D2 usado nos experimentos.**

| C (%) | Mn(%) | Si(%) | Cr(%) | Mo(%) | V(%)  | P(%)    | S(%)   |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|
| 1,626 | 0,357 | 0,302 | 10,97 | 0,801 | 0,956 | <0.0050 | <0,100 |

A segunda medida foi usar os discos conforme a Figura 23 mostra, que consiste em realizar o faceamento da superfície e depois a furação em pontos

<sup>4</sup> Empresa doadora: Aços Favorit Distribuidora Ltda.

específicos que permitiriam o encaixe na máquina<sup>5</sup>. O Apêndice B mostra o desenho de fabricação dos discos.



**Figura 23 - Disco usinado e pronto para o processo de têmpera .**

O tratamento térmico foi baseado na trabalho de Medanha *et al* (2008), , sendo selecionadas as seguintes condições de tratamentos: têmpera a 1030°C durante 30 minutos e revenimento simples a 300°C com duração de 120 minutos. O tratamento térmico foi realizado no forno à vácuo EDG modelo EDG10P-S , instalado no Laboratório de Plasma (LabPlasma) da UTFPR.

Para avaliar o critério de diferença de dureza entre o pino e o disco, realizou-se a medição dessa grandeza nos discos antes e depois do tratamento térmico. Para a esfera de alumínio, a dureza medida foi na média de  $44,3 \pm 2,6$  HV1<sup>6</sup> (Tabela 3). Para o disco, foi necessário realizar a medição antes e depois da têmpera. A dureza média do material sem tratamento térmico foi de  $205,6 \pm 6,81$  HV2<sup>6</sup> e após a têmpera e revenimento foi a média de  $578,3 \pm 19,39$  HV2<sup>6</sup> (Tabela 4). O equipamento usado para medição de dureza foi o microdurômetro HMV Shimadzu instalado no Laboratório de Materiais da UTFPR.

---

<sup>5</sup> Tanto a usinagem da peça de adaptação quanto dos discos foram realizadas sob encomenda ao Laboratório de Fabricação da UTFPR com a supervisão e projeto do autor.

<sup>6</sup> A faixa de incerteza do tipo A foi calculada para probabilidade de 95%.

**Tabela 3 - Medição da dureza das esferas de Alumínio.**

| Medições                 | Dureza das esferas de Alumínio AISI 1100-H18 (HV1) |
|--------------------------|--|
| 1                        | 43,0   |
| 2                        | 46,0   |
| 3                        | 43,8   |
| Média ± Incerteza tipo A | 44,3 ± 2,6   |

**Tabela 4 - Dureza do disco antes e depois do tratamento térmico.**

| Medições                 | Estado de fornecimento | Têmpera (1030°C) + Revenimento (300°C) |
|--------------------------|------------------------|--|
| 1                        | 210,0 HV2              | 590,0 HV2                              |
| 2                        | 205,0 HV2              | 578,0 HV2                              |
| 3                        | 202,0 HV2              | 567,0 HV2                              |
| Média ± Incerteza tipo A | 205,7 ± 6,8 HV2        | 578,3 ± 19 HV2                         |

Uma vez que se certificou de que os corpos de prova estavam com a dureza adequada para realização dos ensaios, classificaram-se os corpos de prova.

## 4.2 Identificação dos corpos de prova

### 4.2.1 Identificação dos discos

Após a usinagem dos discos, realizou-se uma identificação deles para haver rastreabilidade quando da análise dos resultados. A classificação inicial foi feita quanto ao disco (DI e DII), quanto às faces dos discos (DI f1, DI f2, DII f1 e DII f2).

Como se trata de um ensaio de pino sobre disco, deve-se introduzir o conceito mais específico para os discos: o de pistas de desgaste. Uma pista de desgaste é classificada como o perímetro no qual o pino percorrerá a distância de deslizamento desejada. Numa pista, o pino se deslocará numa trajetória circular com velocidade constante, a velocidade tangencial. Para cada face do disco, várias pistas podem ser usadas. Com o intuito de garantir identificação das pistas, para cada face, foram separadas 8 pistas. As pistas de menor número são aquelas que estão mais próximas do centro, conforme a Tabela 5 mostra em que  $r$  é a distância da pista em relação ao centro do disco. A Figura 24 indica a posição de cada pista no disco, em que  $P$  é o símbolo para 'pista'.

Tabela 5 - Classificação de pistas nos discos de ensaio.

| Pista | Nomenclatura das pistas |        |         | r (mm) |
|-------|-------------------------|--------|---------|--------|
|       | Dlf1                    | Dlf2   | DlIf1   |        |
| P1    | Dlf1-1                  | Dlf2-1 | DlIf1-1 | 15,5   |
| P2    | Dlf1-2                  | Dlf2-2 | DlIf1-2 | 17,5   |
| P3    | Dlf1-3                  | Dlf2-3 | DlIf1-3 | 26     |
| P4    | Dlf1-4                  | Dlf2-4 | DlIf1-4 | 29     |
| P5    | Dlf1-5                  | Dlf2-5 | DlIf1-5 | 32     |
| P6    | Dlf1-6                  | Dlf2-6 | DlIf1-6 | 35     |
| P7    | Dlf1-7                  | Dlf2-7 | DlIf1-7 | 38     |
| P8    | Dlf1-8                  | Dlf2-8 | DlIf1-8 | 41     |

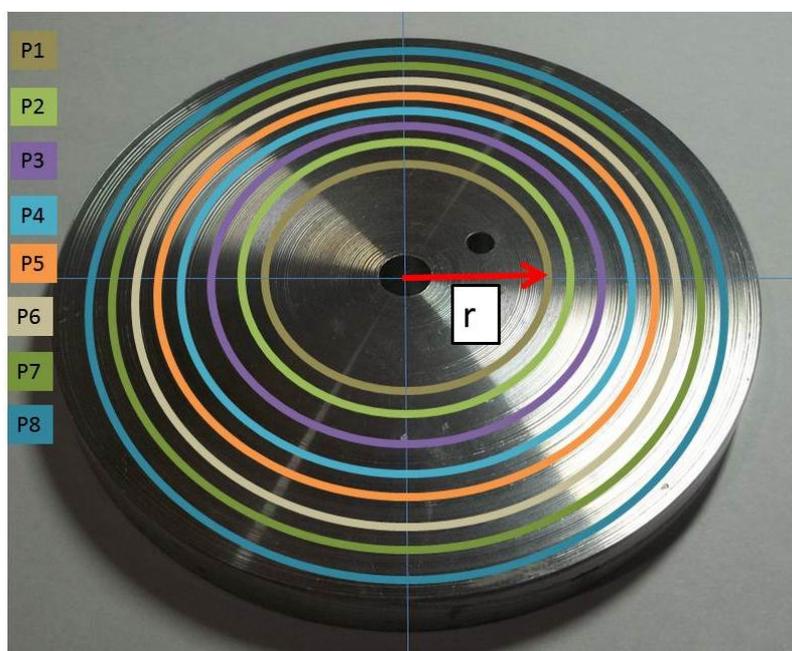


Figura 24 - Divisão de pistas para os ensaios pino sobre disco.

A Tabela 5 define a classificação das pistas e permite completa rastreabilidade dos discos, mas não das esferas. Para classificação das esferas, deve-se associá-las uma face de do disco, já que se utilizaram pistas não desgastadas para cada esfera.

#### 4.2.2 Identificação de esferas

Como citado anteriormente, as esferas estão vinculadas à face em que foram desgastadas. Outro vínculo observado é a distância de deslizamento à qual elas

foram submetidas. Assim, a classificação das esferas deve levar em conta esses dois aspectos. A Tabela 6 resume essa classificação, existindo, portanto 24 esferas.

**Tabela 6 - Classificação de esferas.**

| Distância de Deslizamento (m) | Fases dos discos |           |           |
|-------------------------------|------------------|-----------|-----------|
|                               | Dif1             | Dif2      | DIf1      |
| 30                            | Dif1-30          | Dif2-30   | DIf1-30   |
| 50                            | Dif1-50          | Dif2-50   | DIf1-50   |
| 100                           | Dif1-100         | Dif2-100  | DIf1-100  |
| 200                           | Dif1-200         | Dif2-200  | DIf1-200  |
| 400                           | Dif1-400         | Dif2-400  | DIf1-400  |
| 600                           | Dif1-600         | Dif2-600  | DIf1-600  |
| 800                           | Dif1-800         | Dif2-800  | DIf1-800  |
| 1000                          | Dif1-1000        | Dif2-1000 | DIf1-1000 |

As esferas foram devidamente separadas em plásticos individuais e etiquetadas a fim de garantir que não houvesse perda de rastreabilidade, conforme mostra a Figura 25.



**Figura 25 - Evidência da rastreabilidade das esferas.**

### 4.3 Caracterização geométrica das superfícies

Uma vez realizado o tratamento térmico, realizou-se uma última usinagem a fim de garantir o paralelismo entre as faces do disco. Para isso, enviaram-se os discos recém-tratados termicamente para uma empresa que trabalha no ramo de usinagem: Artis Matriz - Indústria de Matrizes Ltda. Nessa empresa foi feita a retificação plana frontal a fim de melhorar o acabamento da superfície e correção do paralelismo entre as faces, apresentando sulcos em direções aleatórias. Uma vez

tendo recebido os discos retificados<sup>7</sup>, realizou-se a medição da rugosidade. O equipamento usado para a medição foi o perfilômetro óptico tridimensional Taylor-Hobson CCI-Lite, instalado no LAMEQ da UTFPR. A resolução desse equipamento é de 0,1 Angstroms, segundo o fabricante (TAYLOR-HOBSON,2012).

Os resultados são mostrados na Tabela 7, para o parâmetro Ra<sup>6</sup> e na Tabela 8 para o parâmetro Rt<sup>6</sup>, utilizando-se do filtro gaussiano, cut-off 0,08 mm. As quatro medições foram feitas em regiões aleatórias do disco.

**Tabela 7 - Medição da rugosidade Ra das faces dos discos após processo de retificação.**

| RUGOSIDADE Ra ( $\mu\text{m}$ ) |                    |                    |              |              |
|---------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|
| Medição                         | Face DI-f1         | Face DI-f2         | Face DII-f1  | Face DII-f2  |
| 1                               | 0,1787             | 0,1836             | 0,1480       | 0,154        |
| 2                               | 0,1424             | 0,1505             | 0,1481       | 0,1529       |
| 3                               | 0,1497             | 0,1488             | 0,1487       | 0,1598       |
| 4                               | 0,1709             | 0,1522             | 0,1419       | 0,1569       |
| MÉDIA $\pm$ Incerteza           |                    |                    | 0,1467 $\pm$ | 0,1559 $\pm$ |
| tipo A                          | 0,1604 $\pm$ 0,020 | 0,1588 $\pm$ 0,020 | 0,004        | 0,004        |

**Tabela 8 - Medição da rugosidade Rt das faces dos discos após processo de retificação.**

| RUGOSIDADE Rt ( $\mu\text{m}$ ) |                  |                  |                  |                  |
|---------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Medição                         | Face DI-f1       | Face DI-f2       | Face DII-f1      | Face DII-f2      |
| 1                               | 1,615            | 1,734            | 1,357            | 1,303            |
| 2                               | 0,9419           | 1,145            | 0,9810           | 1,293            |
| 3                               | 1,160            | 1,460            | 1,558            | 1,372            |
| 4                               | 0,8838           | 1,296            | 1,066            | 1,594            |
| MÉDIA $\pm$ Incerteza           |                  |                  |                  |                  |
| tipo A                          | 1,150 $\pm$ 0,39 | 1,409 $\pm$ 0,30 | 1,241 $\pm$ 0,31 | 1,391 $\pm$ 0,17 |

Para confirmar a condição de paralelismo dos discos, foi enviado um deles para medição em um Laboratório de Metrologia especializado. O motivo para enviar apenas um deles foi devido ao fato de que eles foram retificados juntos, portanto apresentariam o mesmo paralelismo. O laboratório em questão foi o 'K&L Laboratórios de Metrologia', o qual possui rastreabilidade junto à Rede Brasileira de

<sup>7</sup> A identificação dos discos é explicada na seção 4.2.1.

Calibração. O resultado da medição resultou num paralelismo de  $0,012 \pm 0,005\text{mm}$ , isto é, o desvio máximo obtido em relação às duas faces foi de  $0,012\text{mm}$  para uma extensão de  $85\text{ mm}$  (diâmetro do disco) e incerteza de medição de  $\pm 0,005\text{mm}$ . Tal resultado era esperado e é satisfatório para realização dos ensaios de desgaste. Deve-se frisar que essa preocupação quanto ao paralelismo procede, já que, caso o desvio máximo fosse um desvio maior que  $\pm 1^\circ$  entre as faces do disco<sup>8</sup> - correspondendo a um paralelismo superior a  $1,48\text{mm}$  - os resultados da análise de desgaste poderiam estar comprometidos. O relatório de medição de paralelismo é o Anexo B.

Salienta-se que as empresas referidas nesse trabalho foram procuradas à medida que se vislumbrava a necessidade de certificar que os materiais a serem introduzidos nos processos experimentais estavam de acordo com aquilo que o projeto de pesquisa exigia. Tal preocupação surgiu a fim de que o máximo número de incertezas fosse eliminado dentro do processo experimental.

#### 4.4 Ensaios de desgaste

Após a realização dos ensaios preliminares (ver Apêndice C), foram definidos os parâmetros para execução dos ensaios de desgaste. Para tanto, utilizaram-se dos seguintes materiais:

- Dois discos (DI e DII) de aço AISI D2 temperados, faces (DI1, DI2, DII1) retificadas;
- 24 esferas de Alumínio AISI 1100 com diâmetro de  $4,762\text{ mm}$ .

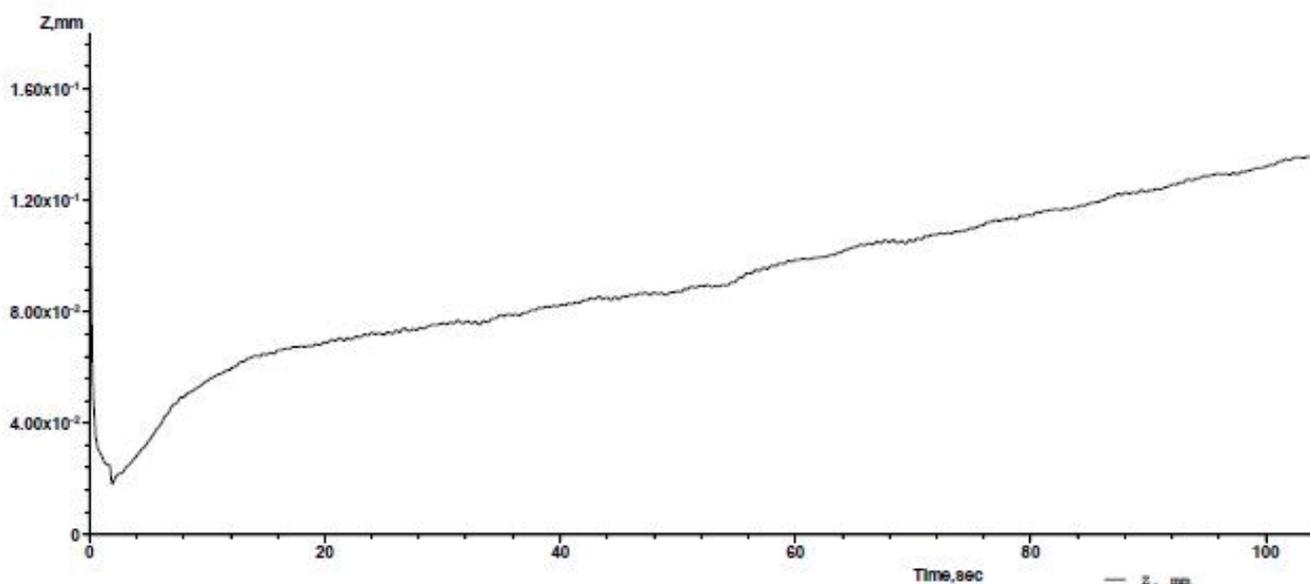
Os ensaios preliminares permitiram que se seleccionassem os valores de  $1\text{m/s}$  para a distância de deslizamento e  $3\text{N}$  para o carregamento sobre o pino.

Logo de início, percebeu-se a importância de análise mais acurada dos primeiros metros de distância de deslizamento. Isso porque é no início do ensaio por deslizamento que as maiores taxas de desgaste são observadas: há a predominância de mecanismos abrasivos, como já comentado. Com o intuito de acompanhar a evolução do desgaste no início dos ensaios, os incrementos na

---

<sup>8</sup> Valor estabelecido pela Norma ASTM G99 (ASTM, 1996)

distância de deslizamento para o início do ensaio foi menor em relação aos demais incrementos. Os ensaios preliminares foram importantes para definir até que distância os incrementos deveriam ser menores: esses experimentos mostraram que para a condição de carregamento de 3N e velocidade de 1m/s, até a distância de 100m a taxa de desgaste era maior. A Figura 26 mostra o gráfico de um dos ensaios preliminares do deslocamento do pino z ao longo do tempo.



**Figura 26 – Deslocamento do pino em função do tempo para distância de deslizamento de 100m (ensaios preliminares).**

Apesar de a Figura 26 mostrar o gráfico do deslocamento do pino ao longo do tempo, ele é análogo a um gráfico do deslocamento do pino ao longo da distância de deslizamento, já que a velocidade tangencial é de 1 m/s. Nota-se que desde o início do ensaio até aproximadamente 30 m de distância, há um grande deslocamento do pino. Logo, percebe-se que há uma necessidade de que os incrementos até essa condição sejam menores que os outros. À medida que os ensaios foram se desenvolvendo, percebeu-se que as variações no desgaste eram menores, isto é, a taxa de desgaste era menor, então diferentes incrementos foram aplicados.

Assim, a Tabela 9 mostra o planejamento dos ensaios efetivos assim como os incrementos entre cada etapa.

**Tabela 9 - Tabela descritiva dos incrementos aplicados para os ensaios.**

| Distância de deslizamento (m) | Incremento (m) |
|-------------------------------|----------------|
| 30                            | -              |
| 50                            | 20             |
| 100                           | 50             |
| 200                           | 100            |
| 400                           | 200            |
| 600                           | 200            |
| 800                           | 200            |
| 1000                          | 200            |

Observando a Tabela 9, nota-se que os ensaios foram conduzidos até a distância de 1000m, mas ao contrário do planejado, os ensaios não foram realizados até que se atingisse o estado estacionário para a taxa de desgaste. Não foi possível cumprir o proposto, pois se temeu pela segurança do ensaio, isto é, o desgaste atingiu níveis tão altos até a distância de 1000m que o disco e o porta esferas estavam na iminência do contato, o qual danificaria o aparato de fixação de esferas.

A maneira de distribuição do uso das pistas foi sistemática. A forma sistemática de tratamento foi atribuir uma pista para cada distância de deslizamento. As menores distâncias de deslizamento foram dispostas mais próximas ao centro e as maiores mais distantes.

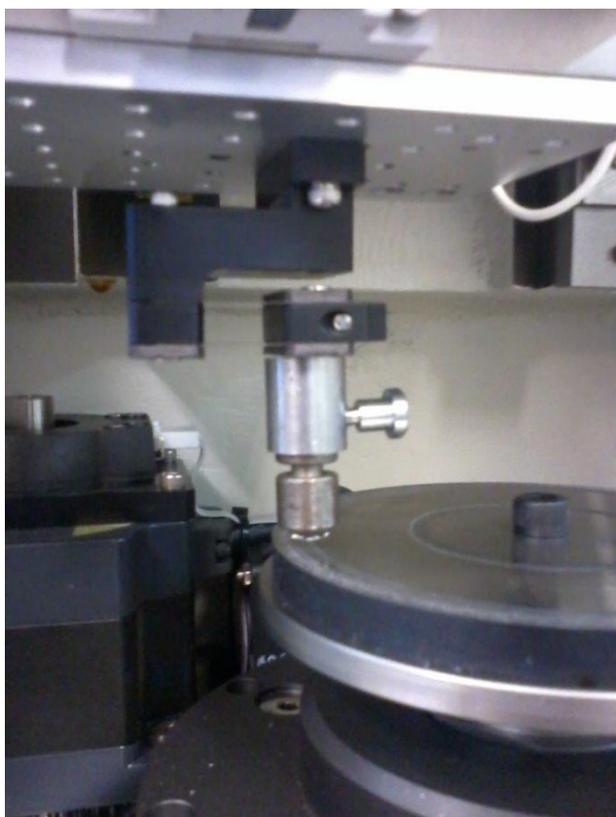
Essa medida foi importante, pois a regulação de velocidade do disco no tribômetro era baseada no número de rotações por minuto (RPM). Ora, sabe-se que o cálculo da velocidade tangencial (selecionada constante e igual a 1m/s) é dado por  $v = \omega \cdot r$ , em que  $\omega$  é a velocidade angular em rad/s e  $r$  é a distância da pista em relação ao centro do disco. Usando pistas mais afastadas para distâncias de deslizamento maiores, o desgaste no disco estaria mais bem distribuído. Por exemplo, se fosse feito o oposto, toda a distância de deslizamento de 1000m estaria distribuído num perímetro menor, pois a pista estaria mais próxima do centro e ao fim do ensaio, certamente, o sulco de desgaste no disco seria maior. Esse sulco maior poderia afetar o sistema de desgaste e a consideração de que a altura de desgaste no disco é desprezível não seria válida.

Outra preocupação do presente trabalho foi quanto à repetitividade dos ensaios. Como já citado, um ensaio de desgaste por deslizamento é influenciado por

uma série de fatores e nem sempre é possível controlar todos eles. Assim, a fim de identificar possíveis eventos esporádicos que provocaram situações particulares de desgaste, para cada distância de deslizamento realizaram-se três ensaios.

Para uma análise mais acurada do comportamento dos corpos de prova durante o ensaio, algumas informações foram obtidas do tribômetro. Os dados que foram considerados mais importantes para a análise foram: o deslocamento na direção vertical do pino, a força de atrito e o coeficiente de atrito. A partir disso, é possível exportar os dados do ensaio para uma planilha e analisá-los.

A Figura 27 atesta a realização dos ensaios efetivos, segundo os parâmetros escolhidos. Essa imagem representa um ensaio cuja distância de deslizamento era de 800m e foi obtida quando já se havia percorrido 600 metros.



**Figura 27 - Ensaio pino o sobre disco para distância de deslizamento de 800m.**

A Figura 28 mostra essa mesma esfera após o ensaio, evidenciando esse material da esfera deformado rente ao porta esferas. A Figura 29 mostra uma das faces do disco – a face DIIIf2 – após os ensaios.



**Figura 28 - Esfera após desgaste por deslizamento com distância de 800 m.**



**Figura 29 - Face DII f1 após os ensaios de desgaste por deslizamento, evidenciando as pistas marcadas.**

Uma vez que os ensaios apresentaram resultados satisfatórios, iniciou-se o processo de medição das esferas, foco de análise experimental do trabalho.

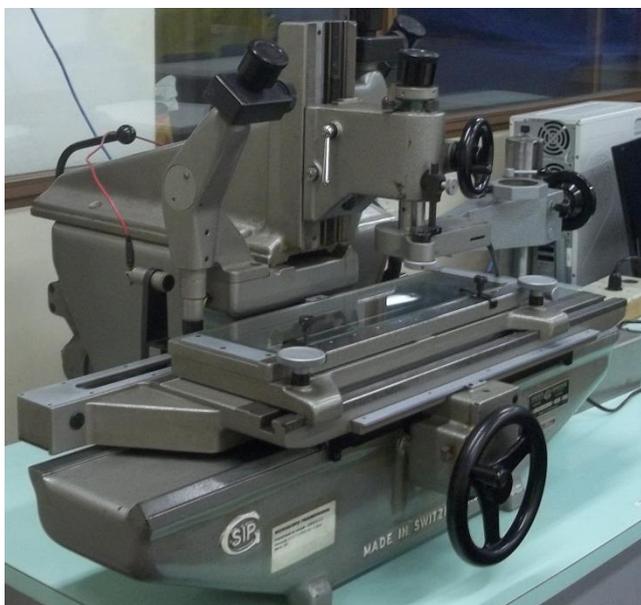
#### **4.5 Medição do desgaste e rugosidade das esferas**

Uma vez realizados todos os ensaios, as esferas de alumínio desgastadas foram levadas até o Laboratório de Metrologia e Qualidade (LAMEQ) da UTFPR para realizar as medições do desgaste. A medição do desgaste seria feita por meio da medição do diâmetro de desgaste, mostrado pela Figura 30.



**Figura 30 - Evidência do diâmetro de desgaste em uma esfera após ensaio.**

O equipamento utilizado para essa medição foi o Microscópio Tridimensional de medição SGIP (*Société Genevoise d'Intruments de Physique*) modelo UM-214B (Figura 31), cuja resolução é de 0,0005 mm. Logo se verificou que essa resolução era compatível com os resultados do trabalho, pois ela representou menos de 10% dos desvios padrões calculados.



**Figura 31 – Microscópio tridimensional modelo UM-214B.**

Para cada esfera ensaiada (24 esferas) mediram-se 3 vezes o diâmetro de desgaste. Isso foi feito a fim de calcular a média, desvio padrão e incerteza de medição tipo A.

Com os valores médios do diâmetro de desgaste, foi possível calcular a altura de desgaste  $h$  com auxílio da Equação (6), obtida com o auxílio de conceitos da geometria(Figura 18).

$$h = R - \sqrt{R^2 - r_{des}^2} \quad (6)$$

Em que  $R$  é o raio da esfera e  $r_{des}$  é o raio correspondente ao desgaste (metade do diâmetro de desgaste).

#### 4.6 Simulações Numéricas

A simulação numérica foi a etapa posterior aos ensaios experimentais, já que dependia dos valores para diâmetro de desgaste medidos. Uma vez obtidos os valores médios para diâmetro de desgaste (descritos no tópico anterior) desenharam-se no programa CAD SolidWorks as esferas desgastadas após os ensaios. Posteriormente, os modelos CAD foram importados no ambiente do Ansys.

A implementação do modelo de contato seguiu a lógica do problema estático estrutural do Ansys. No entanto, existem algumas particularidades do modelo que devem ser citadas.

Primeiramente, simplificou-se o problema utilizando-se a análise 2D, com um modelo axissimétrico. Tal modelo simula a situação 3D, fazendo uso de elementos 2D. Essa simplificação, apesar de gerar erros e poder exigir malhas mais finas, diminui consideravelmente o tempo de processamento das simulações. A definição da malha do modelo e o algoritmo para resolvê-lo foram obtidos através da consulta à ferramenta de ajuda do Ansys. Por fim, optou-se pelo algoritmo *Aumented Lagrange* no modo assimétrico, parâmetros esses que garantiram a convergência do modelo.

Outro parâmetro escolhido para o modelo foi a aplicação do conceito de contato sem atrito (do inglês, *frictionless contact*). Essa hipótese simplificadora potencializa o efeito do carregamento sobre o contato e desconsidera efeitos do atrito, quando da deformação elástica e plástica do contato. Essa consideração é

compatível com o modelo de Hertz para o contato. Assim, considerar o contato sem atrito se configurou como uma medida estratégica para validar o modelo.

As propriedades dos materiais em contato foram de 200GPa e 71GPa para o módulo de elasticidade do aço e alumínio, respectivamente e módulo de Poisson de 0,3 para o aço e 0,33 para o alumínio. Sendo esses os valores aplicados no modelo de Hertz para cálculo de tensões de contato.

Uma observação importante que deve ser considerada em relação ao modelo desenvolvido é a sua restrição quanto a alteração de temperatura no contato. O modelo criado calculou os campos de pressão sem considerar que, durante o desgaste, a temperatura no contato aumenta com o tempo. Isso poderia ser facilmente aplicado no modelo, no entanto não foi feito devido à dificuldade em se medir a temperatura na interface de contato.

Uma vez gerado o modelo, verificou-se a necessidade de sua validação junto a um modelo teórico amplamente difundido: o modelo para contato de Hertz. Desse modo, realizou-se o cálculo analítico pela teoria de Hertz e para o modelo, para o caso esfera sobre plano, cujos parâmetros seriam o carregamento de 3N, esfera de alumínio e o disco de aço estrutural. Os resultados convergiram, o que validou o modelo criado, bastando apenas alterar a geometria da esfera para aplicar a condição de desgaste observada para cada distância de deslizamento.

#### **4.7 Cálculo do coeficiente de desgaste**

O coeficiente de desgaste foi obtido através do uso da Equação (2), que representa a lei de Archard. Para isso, basta isolar o  $k$  (coeficiente de desgaste), obtendo-se a Equação (7).

$$k = \frac{h}{s \cdot p} \quad (7)$$

O valor de  $h$  é calculado com base nos valores médios de diâmetro de desgaste e auxílio da Equação (6),  $s$  é a distância de deslizamento (parâmetro do ensaio) e  $p$  é o resultado da pressão de contato, calculado pelo método dos elementos finitos. O comportamento de  $k$  durante o ensaio representa o fechamento do trabalho e faz a ligação entre os elementos próprios do ensaio experimental ( $h$  e  $s$ ) com aquele obtido pelo método dos elementos finitos (pressão de contato).

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Análise dos resultados

#### 5.1.1 Ensaio pino sobre disco

Como citado anteriormente, para cada distância de deslizamento, realizaram-se três ensaios. Essa medida (três ensaios para o desgaste) foi bastante positiva e permitiu identificar um erro sistemático cometido no trabalho. A princípio, não houve a preocupação de dedicar pistas livres de desgaste para todos os ensaios. Assim, para o segundo e terceiro ensaio de cada distância, as pistas do disco já apresentavam impressões de desgaste, gerados nos ensaios anteriores. As medições de desgaste permitiram a identificação de valores divergentes em relação ao primeiro ensaio de cada pista. A ação imediata foi descartar os resultados obtidos da primeira e segunda repetição e realizar novos ensaios em pistas não desgastadas. Para uma compreensão melhor dessa análise, a leitura do Apêndice D é recomendada, já que trata dessa análise.

Uma vez utilizadas pistas livres de desgaste, novamente verificou-se que para ensaios em distâncias de 200m, 400m, 600m e 1000m haviam divergências em relação aos outros dois ensaios naquela distância. Curiosamente, essas inconsistências foram observadas para uma mesma face do disco, a DIf2. A solução imediata foi descartar esses ensaios e realizar outros em outra face, a DIIf1. Os resultados obtidos nesses novos ensaios convergiram com os outros para as respectivas distâncias.

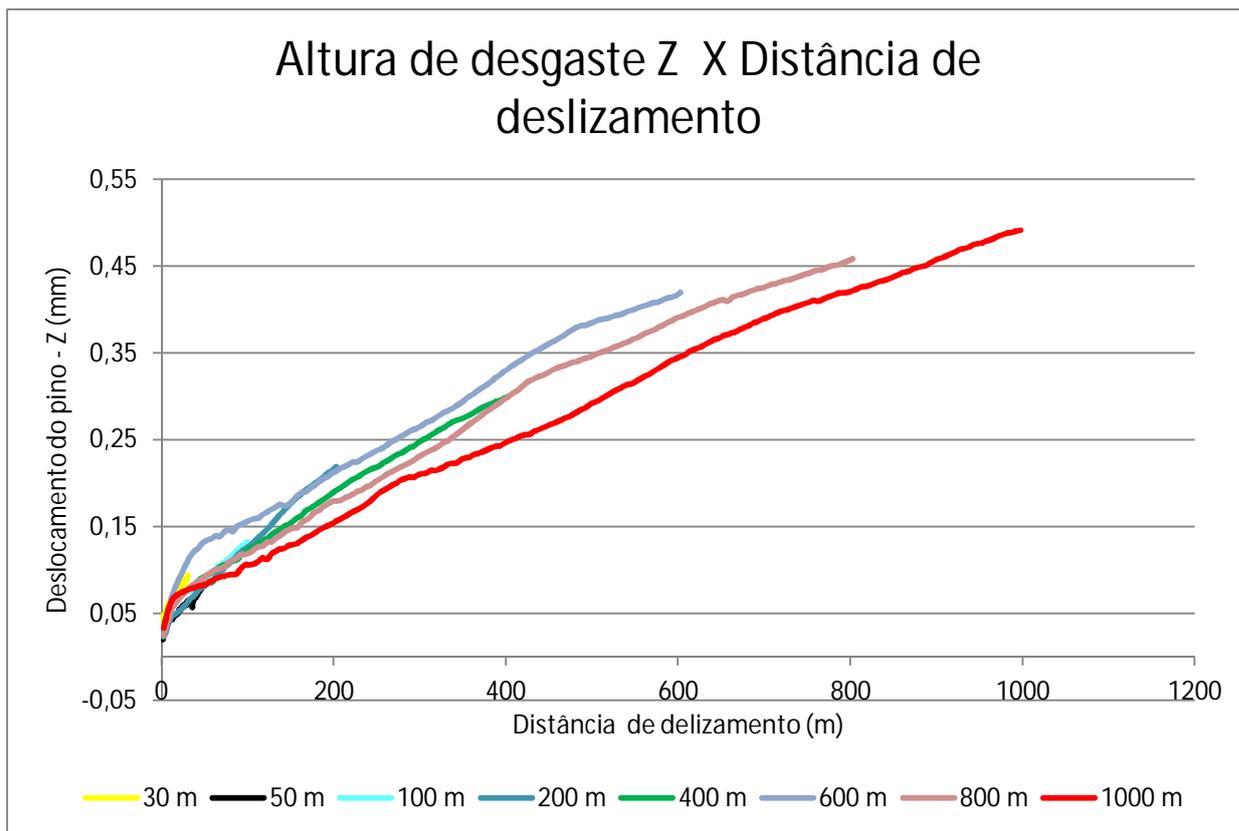
Resolvido esse problema do processo experimental, extraíram-se as curvas do deslocamento do pino na direção vertical e do coeficiente de atrito do programa de controle do tribômetro. Deve-se frisar que o deslocamento vertical do pino não representa necessariamente o desgaste da esfera: esse valor é a soma de diversos fatores e é um valor medido pela máquina para manter o carregamento de 3N constante. O valor do deslocamento do pino é, portanto, a soma da deformação plástica do pino e do disco, deformação elástica do pino e do disco, desgaste do disco e, por fim o desgaste da esfera, conforme mostra a Figura 32. Para definir a altura de desgaste, esse valor de deslocamento do pino não é válido, já que é composto por esses 6 fatores. Esses valores servem apenas para avaliar o

comportamento do ensaio. O desgaste da esfera será medido pelo diâmetro de desgaste e será analisado mais adiante.



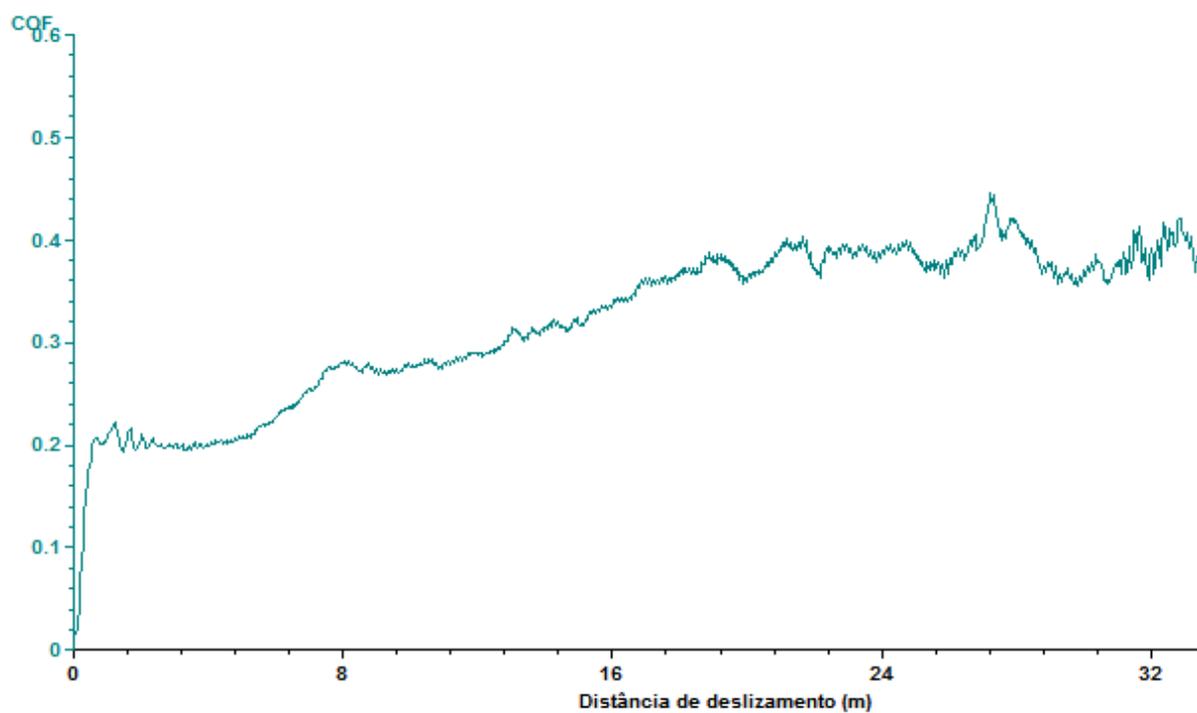
**Figura 32 - Justificativa para medição dos diâmetros de desgaste da das esferas.**

A Figura 33 mostra curvas do deslocamento vertical do pino. Cada uma delas representa um ensaio pino contra disco realizado até a distância de deslizamento indicada na legenda.

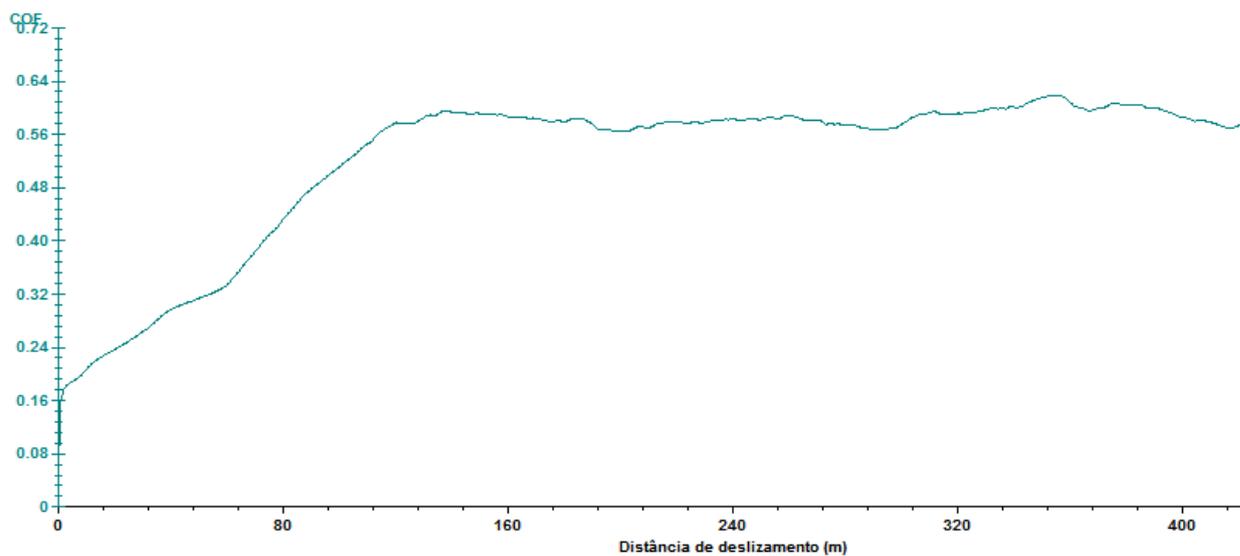


**Figura 33 - Deslocamento do pino na direção vertical para a distância de 30m, 50m, 100m, 200m, 400m, 600m, 800m e 1000m.**

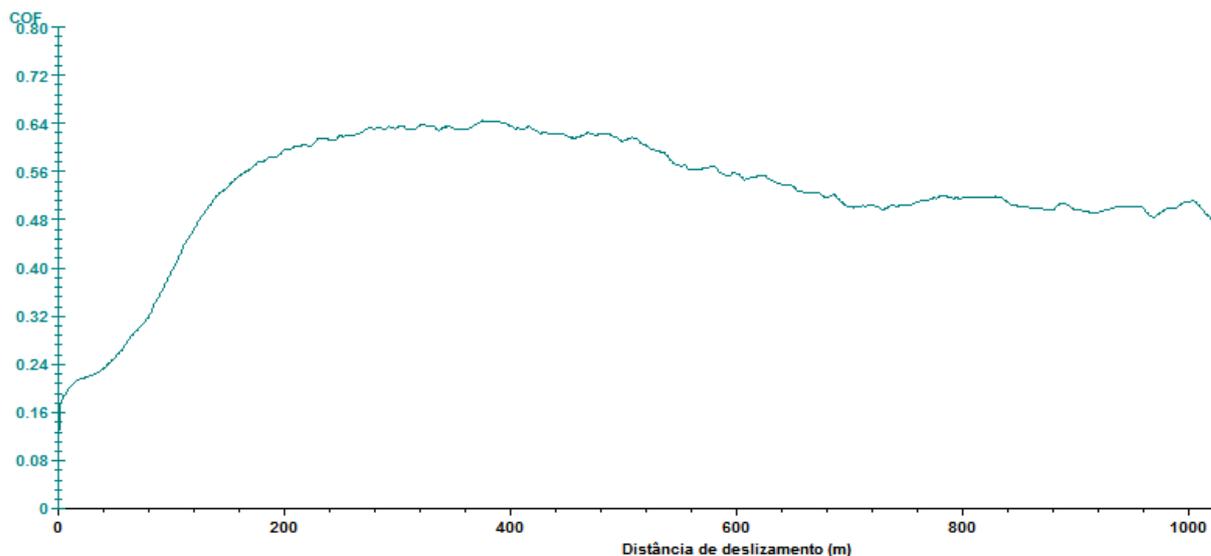
O coeficiente de atrito é obtido dividindo-se a força de atrito medida pela célula de carga pelo valor da força de carregamento (fixada em 3N para todos os ensaios). As Figura 34, Figura 35 e Figura 36 são correspondentes aos gráficos do coeficiente de atrito e referentes às faces Dlf1, Dlf2 e Dllf1, respectivamente. A cada uma delas está associada com uma distância de deslizamento. Para a Figura 34, 30 m, para a Figura 35, 400 m e para a Figura 36, 1000m.



**Figura 34 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 30m .**



**Figura 35 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 400m.**



**Figura 36 - Comportamento do coeficiente de atrito para o ensaio até 1000m.**

Essas curvas para o coeficiente de atrito são muito úteis na medida em que permitem analisar em que momento do ensaio o estado estacionário para o coeficiente de atrito foi alcançado. Elas foram filtradas no programa a fim de facilitar a visualização. Para o gráfico correspondente à Figura 34 o filtro usado foi de módulo 250, da Figura 35 de 60000 e da Figura 36, 80000. Esses valores são correspondentes à quantidade de picos e vales removidos por unidade da escala das abscissas. Os picos observados no fim das curvas devem ser desconsiderados, já que são relativos à desaceleração do disco.

O gráfico da Figura 34 mostra certa instabilidade em relação ao coeficiente de atrito. Esse fator pode se atribuído claramente ao fato de predominarem mecanismo abrasivo sobre o sistema, conforme verificado na seção 2.4. Essa condição abrasiva é devido à existência de asperezas duras de aço AISI D2 formadas após o processo de retificação. Nessa condição inicial do ensaio, observam-se os maiores valores para atrito. A Figura 35 é um gráfico de uma condição intermediária do ensaio, quando os mecanismos abrasivos já foram reduzidos, e mecanismos de adesão alternados com outros de delaminação são sugeridos. A temperatura na interface já gera uma influência sobre a condição de contato, potencializando a formação de óxidos de alumínio – a camada de terceiro corpo - sabidamente mais moles que o metal alumínio (BLAU, 2009). Uma visão geral do comportamento do coeficiente de

atrito ao longo do ensaio é dada pelo gráfico da Figura 36. Nela é possível observar uma tendência à estabilização do atrito ao se observar a amplitude da escala do gráfico. Nessa condição, pode-se identificar o estado estacionário para o atrito, já que os poucos picos observados no gráfico (ainda que se considere o filtro aplicado) sugerem uma estabilização contínua dos valores de coeficiente de desgaste (BLAU, 2009). Mais especificamente, nos últimos 200 m do ensaio, o sistema apresentou uma variação de 0,03 no coeficiente de atrito, representando um erro percentual relativo (Equação (8), em que  $V_r$  é o valor de referência da distância anterior e  $V_c$  é o valor calculado para a distância vigente) de 0,97%: condição necessária para considerar o estado estacionário. A Tabela 10 é referente aos valores numéricos para coeficiente de atrito extraídos do *software* da máquina de testes. Pode-se verificar também que o valor de atrito entre 800 m e 1000m pouco se altera.

$$Erro_{\%} = \frac{|V_r - V_c| \cdot 100}{V_r} \quad (8)$$

**Tabela 10 - Dados do coeficiente de atrito extraídos do programa que controla o tribômetro.**

| Distância de deslizamento(m) | Coeficiente de atrito | Erro relativo (%) |
|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| 30                           | 0,270                 | -                 |
| 50                           | 0,389                 | 44,07             |
| 100                          | 0,540                 | 38,82             |
| 200                          | 0,614                 | 13,70             |
| 400                          | 0,600                 | 2,28              |
| 600                          | 0,555                 | 7,50              |
| 800                          | 0,517                 | 6,85              |
| 1000                         | 0,522                 | 0,97              |

Observa-se que os valores medidos para o coeficiente de atrito resultaram em módulos grandes por duas razões principais.

A primeira delas é o par tribológico envolvido; o alumínio e o aço liga AISI D2. Sabe-se que as propriedades desses materiais são bastante distintas tanto sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, quanto sob o ponto de vista comportamento dessas propriedades a temperaturas diferentes da temperatura ambiente. Essa disparidade de propriedades favoreceu com que, no ensaio se prevalecesse os fenômenos abrasivos atuaram de forma mais acentuada e

acabaram por tornar instáveis as condições de contato. Os picos de rugosidade duros do aço que eram mais proeminentes desgastaram severamente a esfera de alumínio, proporcionando alto coeficiente de atrito alto. Essa condição avança até que há uma estabilização do coeficiente de atrito dado pelo aumento da área de contato, fato que reduziu a pressão e favoreceu o atingimento do regime permanente para o coeficiente de atrito.

A segunda razão pela qual foram apresentados valores baixos para o coeficiente de atrito (Tabela 10) foi a alta velocidade de deslizamento empregada nos ensaios: 1m/s. Essa velocidade foi escolhida estrategicamente a fim de forçar a condição de estado estacionário do sistema tribológico. A consequência dessa escolha, além da rápida estabilização, foi o baixo coeficiente de atrito cinético. Com uma alta velocidade de deslizamento as asperezas do material mais mole ou são arrancadas bruscamente ou sofrem deformação plástica instantânea, devido à alta energia associada a essa velocidade. Assim, a resistência ao deslizamento fica inibida e baixos coeficientes de atrito são observados.

Então, foi executada a medição dos diâmetros de desgaste das esferas. A Tabela 11 mostra o resultado das medições que convergiram<sup>9</sup>.

**Tabela 11 - Resultado das medições dos diâmetros de desgaste.**

| Distância de deslizamento (m) | Média diâmetro desgaste (mm) | Incerteza Tipo A (mm) | CV (%) |
|-------------------------------|------------------------------|-----------------------|--------|
| 30                            | 1,4063                       | ±0,044                | 3,0979 |
| 50                            | 1,5696                       | ±0,062                | 3,9316 |
| 100                           | 1,6749                       | ±0,031                | 1,8328 |
| 200                           | 2,1217                       | ±0,025                | 1,1879 |
| 400                           | 2,5175                       | ±0,016                | 0,6161 |
| 600                           | 2,9969                       | ±0,030                | 0,9988 |
| 800                           | 3,1569                       | ±0,059                | 1,8689 |
| 1000                          | 3,5156                       | ±0,028                | 0,7889 |

A Tabela 11 resume todo o processo de ensaios realizados no tribômetro. Foram realizados, ao todo 24 ensaios válidos para a análise, devido ao uso de 3

<sup>9</sup> Uma discussão breve sobre os resultados de medição de desgaste que não convergiram pode ser encontrada no Apêndice C.

esferas desgastadas para cada uma das 8 distâncias de deslizamento trabalhadas. Para cada uma das 24 esferas realizam-se três medições no microscópio, obtendo-se a média dos diâmetros de desgaste como indicado na Tabela 11.

O cálculo da média do diâmetro de desgaste - que envolve os três ensaios realizados para cada distância de deslizamento – é a ‘média das medições’. A incerteza de medição do tipo A também foi avaliada, tal valor foi calculado para uma probabilidade de 95%. Assim, há 95% de probabilidade de que o valor verdadeiro da medida se encontre dentro da faixa correspondente. Por exemplo, para a distância de deslizamento de 30 m, a probabilidade é de 95% de que o valor verdadeiro esteja na faixa de  $1,4063 \pm 0,044$  mm. Observa-se que resultaram em valores relativamente baixos ao se calcular o coeficiente de variação (razão percentual entre a incerteza e as médias CV na Tabela 11), cujo valor máximo foi de 6,6282 % para a distância de deslizamento de 50 m. Uma vez tendo-se obtido os resultados das médias de diâmetro de desgaste da Tabela 11, calculou-se pela Equação (6) as chamadas alturas de desgaste (h) que serão diretamente aplicadas na equação do modelo de Archard.

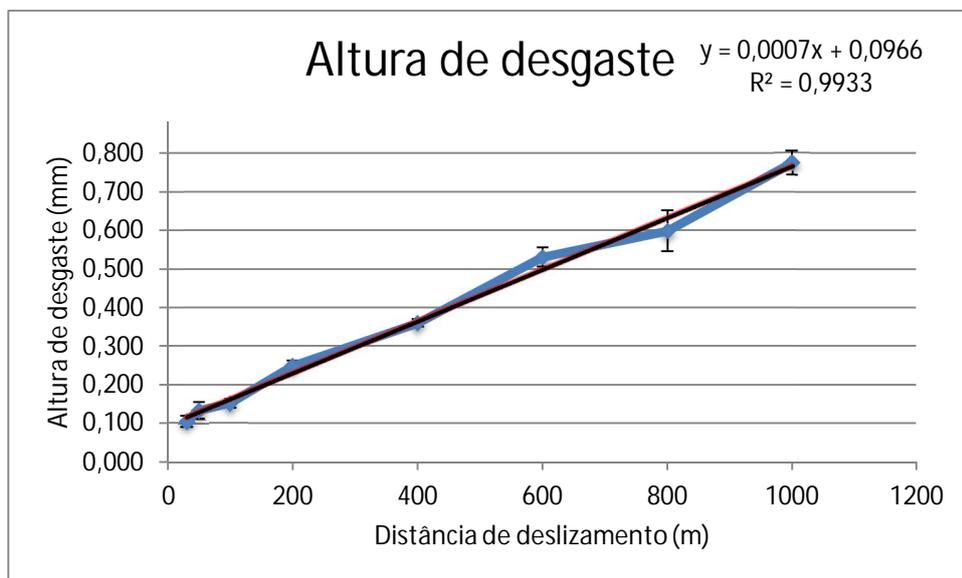
Tabela 12 mostra os resultados dessas alturas de desgaste com as respectivas incertezas tipo A associadas, calculadas a partir dos valores médios dos diâmetros de desgaste.

**Tabela 12 - Alturas de desgaste calculadas.**

| Distância de deslizamento(m) | h (mm)         |
|------------------------------|----------------|
| 30                           | 0,1062 ± 0,014 |
| 50                           | 0,1331 ± 0,022 |
| 100                          | 0,1521 ± 0,012 |
| 200                          | 0,2494 ± 0,013 |
| 400                          | 0,3599 ± 0,010 |
| 600                          | 0,5306 ± 0,024 |
| 800                          | 0,5984 ± 0,052 |
| 1000                         | 0,7750 ± 0,030 |

A Figura 37 mostra o gráfico das alturas de desgaste em função das distâncias de deslizamento. A esse gráfico foi adicionada uma linha de tendência de

função linear, cujo coeficiente de correlação chega a 0,9933. Isso mostra que há um aumento linear da altura de desgaste ao longo do tempo, característica típica do mecanismo abrasivo (vide Figura 4.b).



**Figura 37 - Gráfico da altura de desgaste ao longo da distância de deslizamento.**

Embora a Figura 37 apresente um comportamento linear, o critério para avaliação do regime estacionário não está associado apenas a um comportamento linear da altura de desgaste: é necessário observar a variação do coeficiente de desgaste, estudo feito na seção 5.1.3. Há, portanto a comprovação de que, ao se atingir o estado estacionário para o atrito, não se atingirá necessariamente esse estado para o desgaste. E isso justifica a análise separada que foi realizada entre o coeficiente de atrito e coeficiente de desgaste.

Não foi possível prosseguir com os incrementos nos ensaios a fim de se atingir o estado estacionário devido a um problema com o porta esferas. O porta esferas, para a distância de deslizamento de 1000 metros estava na iminência do contato com o disco que rotacionava. Com intuito de preservar os materiais, agiu-se por bem em não prosseguir com os ensaios, continuando a aumentar a distância de deslizamento.

Uma análise mais detalhada do processo de desgaste é feita após a apresentação dos resultados do coeficiente de desgaste  $k$ , na seção 5.1.3.

### 5.1.2 Resultados da Simulação Numérica

Com os dados de desgaste obtidos, foi possível aplicá-los no modelo de elementos finitos. Antes de introduzir no modelo os valores específicos do desgaste, houve a necessidade de se validar o modelo de simulação. A Tabela 13 compara os valores de Pressão de contato e de Tensão de cisalhamento máximo entre o modelo de Hertz e o modelo criado no software. Nessa tabela também está calculado o erro percentual relativo entre as duas formas de cálculo. As Equações (9), (10), (12) e (13) explicam como foi calculado a pressão máxima de contato e a tensão de cisalhamento máxima para o modelo de Hertz (NORTON, 2007)

Para a pressão de contato, considerando contato entre dois materiais distintos 1 e 2:

$$p = p_{maximo} \left( 1 - \frac{x^2}{(r_0)^2} \right) \quad (9)$$

Sendo,

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3F_N R}{4.E^*}} \quad (10)$$

$$E^* = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (11)$$

$$p_{maximo} = \frac{3F_N}{2.\pi.r_0^2} \quad (12)$$

Sendo  $R$  é o raio da esfera e  $x$  a coordenada da pressão do centro da esfera até o ponto de análise.

Para a tensão de cisalhamento máxima:

$$\tau_{13max} = \frac{p_{maximo}}{2} \left[ \frac{(1-2\nu)}{2} + \frac{2}{9}(1-\nu)\sqrt{2(1+\nu)} \right] \quad (13)$$

Sendo  $\nu$  o menor coeficiente de Poisson entre os materiais do contato,  $\nu_1$  e  $E_1$ ,  $\nu_2$  e  $E_2$  os coeficientes de Poisson e módulos de elasticidade dos materiais 1 e 2, respectivamente. O valor de  $p_{maximo}$  é obtido conforme a Equação (12).

**Tabela 13 - Comparação dos ensaios entre o modelo teórico de Hertz e o modelo de Elementos Finitos criado.**

| Pressão de Contato (MPa) |        |          | Tensão de Cisalhamento Máxima (MPa) |        |          |
|--------------------------|--------|----------|-------------------------------------|--------|----------|
| Hertz                    | Modelo | Erro (%) | Hertz                               | Modelo | Erro (%) |
| 705,04                   | 681,56 | 3,33     | 229,86                              | 211,45 | 8,00     |

O erro percentual calculado é dado pela Equação(8), em que o valor de referência ( $V_r$ ) é aquele obtido pela teoria de Hertz e o valor calculado ( $V_c$ ) é aquele obtido por elementos finitos. Esse erro observado para os dois cálculos é aceitável. A teoria de Hertz possui a limitação de considerar o contato sem atrito e perfeitamente elástico. Por outro lado, no modelo gerado no programa de simulação numérica há a consideração de contato sem atrito, mas aspectos relativos á deformação plástica são características desse modelo. O erro percentual de maior valor foi observado justamente para aquela tensão que mais associada está à questão do modo como os corpos se deformam: a tensão de cisalhamento. A propensão à deformação plástica observada no modelo acabou fornecendo um valor menor para a tensão de cisalhamento máxima, isso porque quando uma deformação desse tipo ocorre, o material acaba por amortecer tensões internas, algo que o modelo elástico de Hertz não prevê. O modelo foi construído observando-se essa questão da deformação plástica a fim de transferir os efeitos da deformação plástica ao cálculo do coeficiente de desgaste.

Voltando a situação de ensaio do trabalho, para cada valor médio de diâmetro de desgaste – associado a uma distância de deslizamento– uma simulação foi realizada. Dessa simulação, vários valores foram possíveis de serem obtidos, mas os principais deles foram os valores de pressão de contato e tensão de cisalhamento máxima.

As Figuras 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44 e 45 são representativas da simulação em questão e mostram graficamente os campos de pressões de contato observados para cada distância de deslizamento.

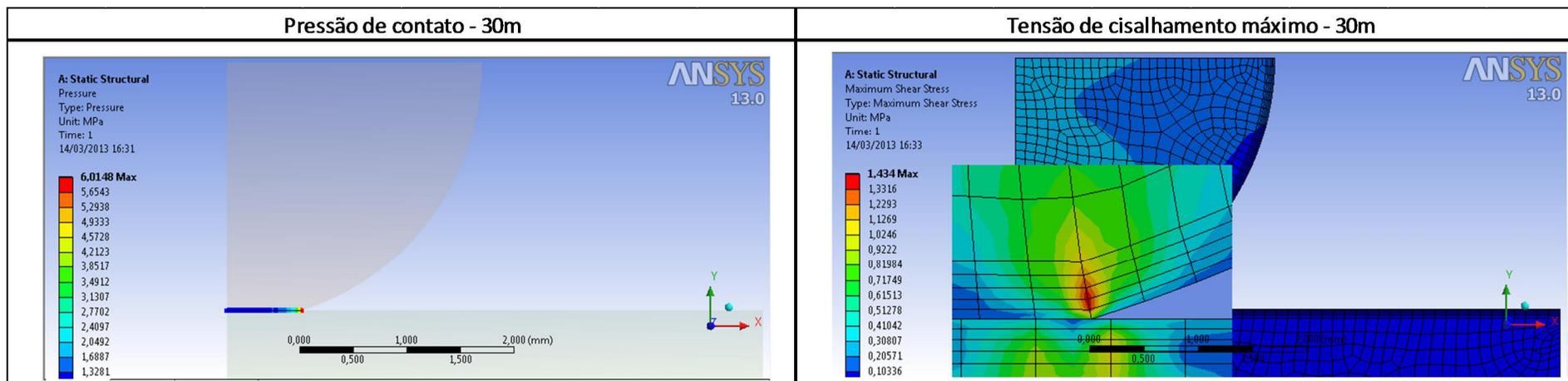


Figura 38 - Resultados da simulação numérica s= 30 m.

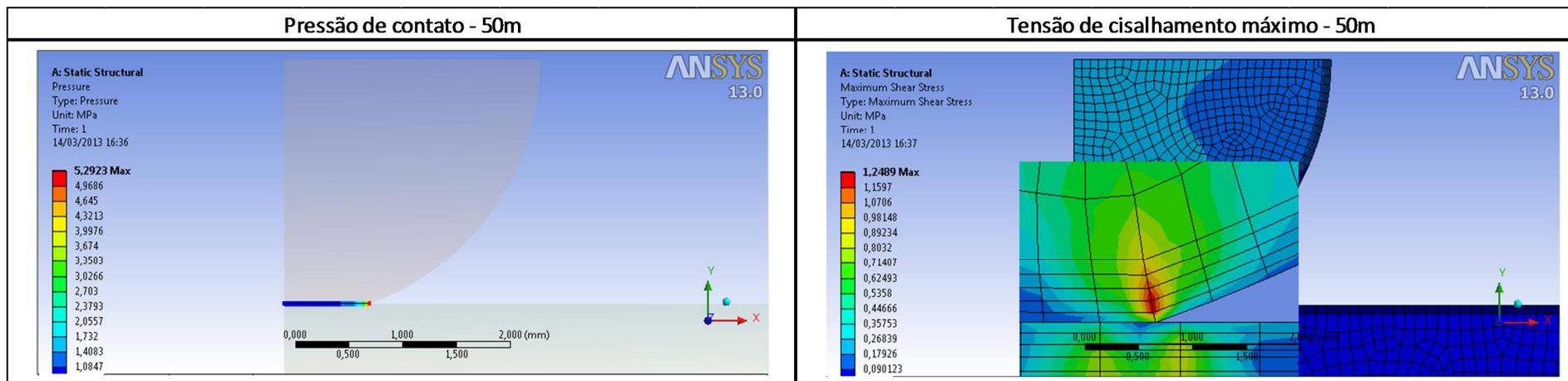


Figura 39 - Resultados da simulação numérica s= 50 m.

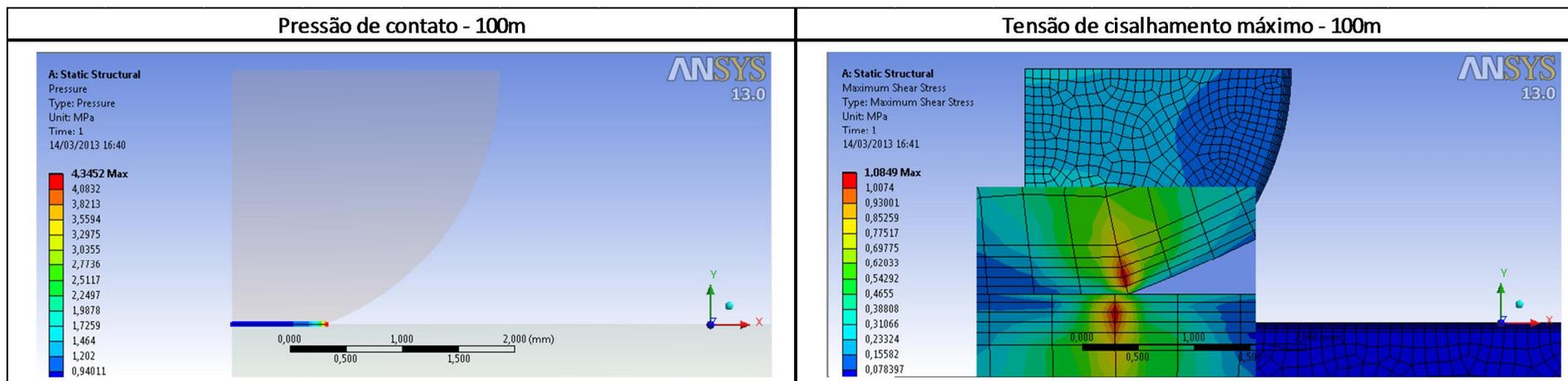


Figura 40 - Resultados da simulação numérica s= 100 m.

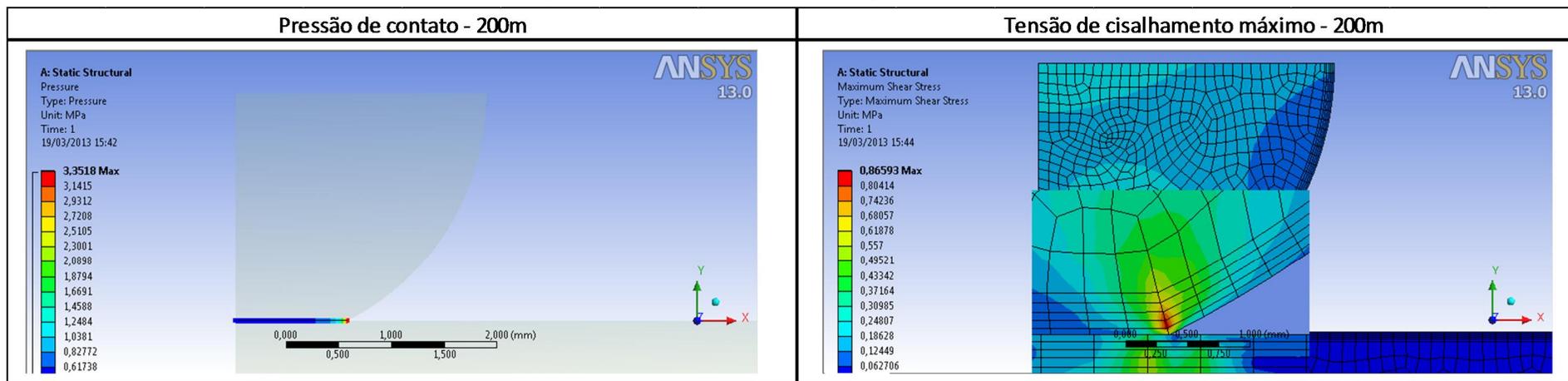


Figura 41 - Resultados da simulação numérica s= 200 m.

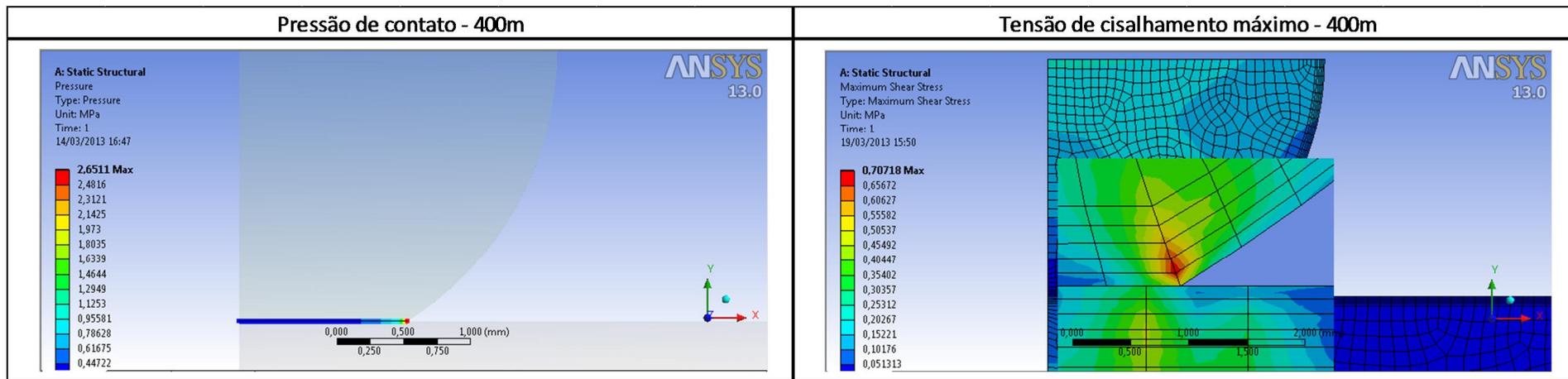


Figura 42 - Resultados da simulação numérica s= 400 m.

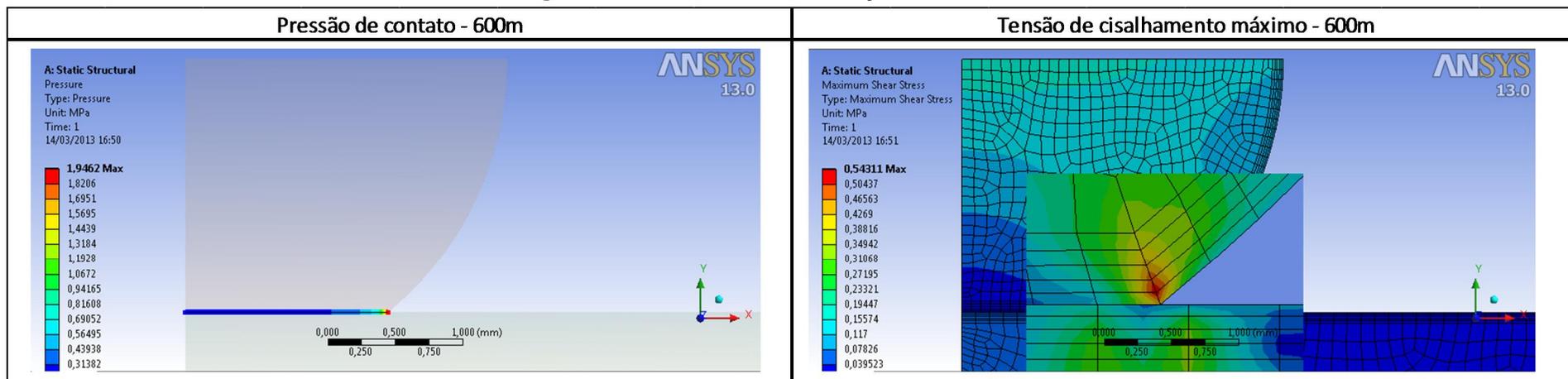


Figura 43 - Resultados da simulação numérica s= 600 m.

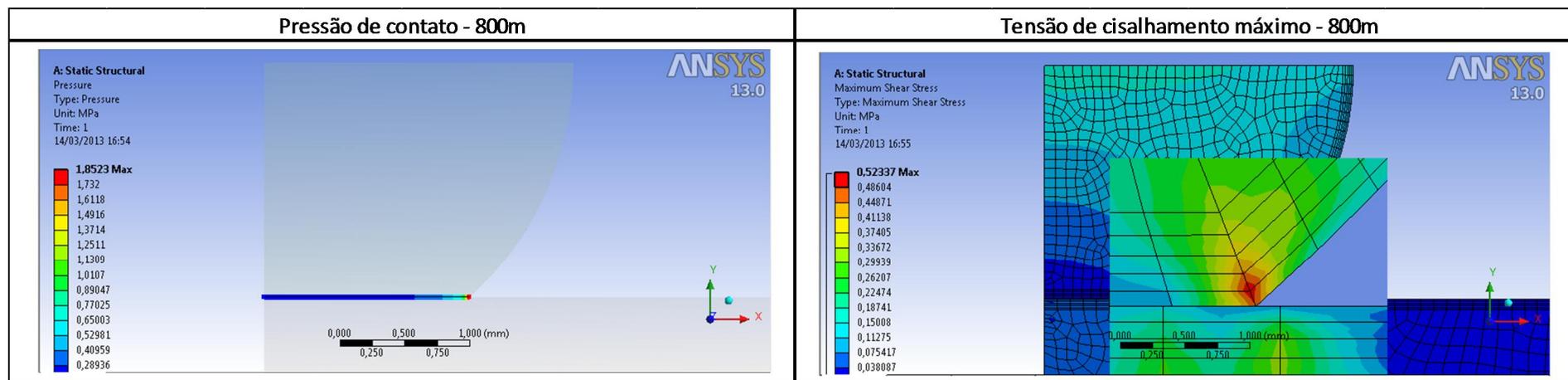


Figura 44 - Resultados da simulação numérica  $s= 800$  m.

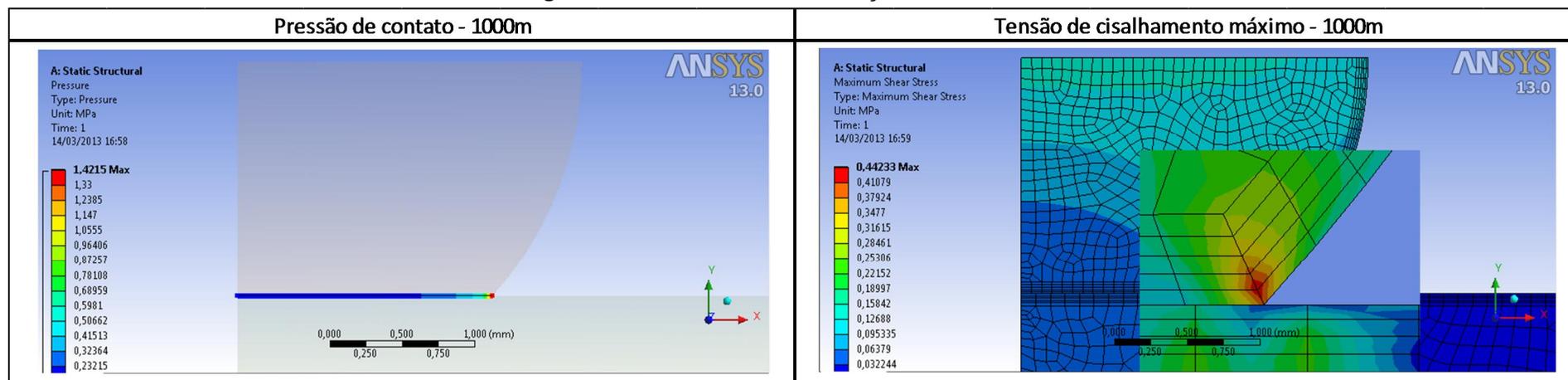
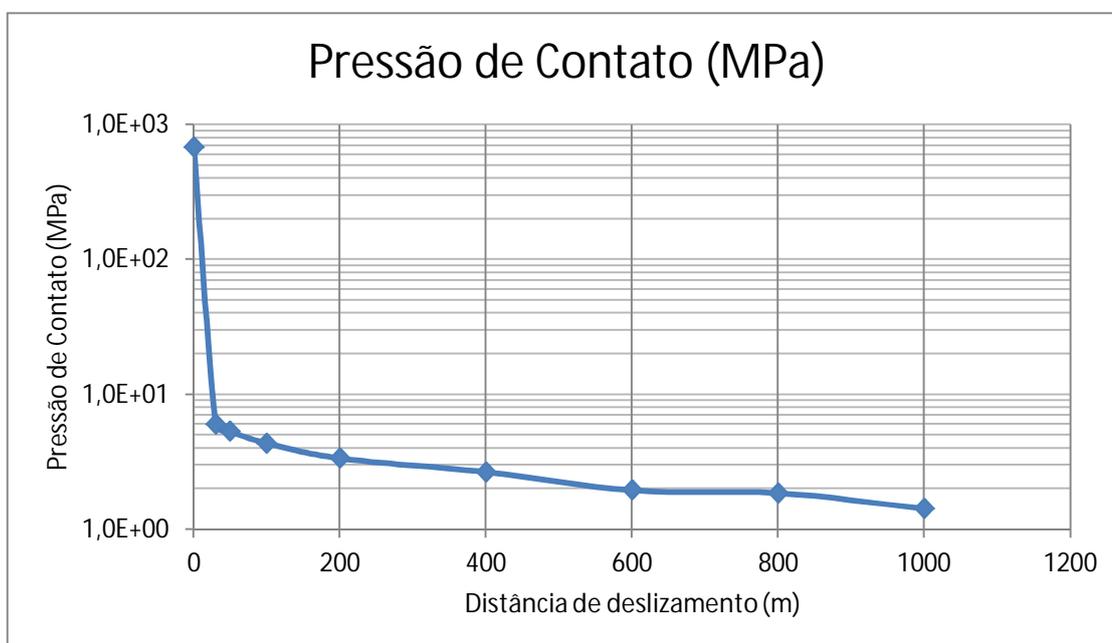


Figura 45 - Resultados da simulação numérica  $s= 1000$  m.

A Tabela 14 indica os valores máximos das simulações com os valores da pressão de contato e da tensão de cisalhamento máxima. Importante lembrar que o carregamento aplicado sobre o pino foi constante e igual a 3 N, sendo apenas a mudança na geometria das esferas, devido ao desgaste, o responsável pela mudança no campo de pressões de contato.

**Tabela 14 - Resultado das simulações numéricas.**

| Distância de deslizamento (m) | Pressão de Contato (MPa) | Tensão de Cisalhamento máxima (MPa) |
|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|
| 30                            | 6,0148                   | 1,43400                             |
| 50                            | 5,2923                   | 1,24890                             |
| 100                           | 4,3452                   | 1,08490                             |
| 200                           | 3,3518                   | 0,86593                             |
| 400                           | 2,6511                   | 0,70718                             |
| 600                           | 1,9462                   | 0,54311                             |
| 800                           | 1,8523                   | 0,52337                             |
| 1000                          | 1,4215                   | 0,44233                             |



**Figura 46 - Pressão de contato em função da distância de deslizamento obtida como resultados do modelo do MEF.**

Os resultados para a simulação numérica, apesar de num primeiro momento causar estranheza, são coerentes. Ao analisar a Tabela 13, verifica-se que os valores tanto para Pressão de Contato quanto para a Tensão de Cisalhamento máximo são muito maiores que esses da Tabela 14, referentes à situação pós-desgaste. Acontece que, na situação sem desgaste da Tabela 13, o contato entre os corpos é observado em um ponto e suas vizinhanças (dependendo da deformação plástica ocorrida). Após o desgaste, a área de contato entre a esfera e o plano aumenta gradativamente e de forma considerável. Isso propicia uma grande redução das tensões de contato, já que a carga está sendo distribuída numa área maior. A Figura 14, referente ao artigo de Põdra e Andersson (1999), pode ser comparada com a Figura 46: elas ilustram o mesmo comportamento de redução substancial na pressão de contato à medida que o ensaio se desenvolve.

Uma análise da pressão de contato ao longo da distância de deslizamento é feita no Apêndice E, levando-se em conta a plasticidade do contato no início dos experimentos passando para um estado elástico.

### 5.1.3 Cálculo do coeficiente de desgaste $k$

O coeficiente de desgaste  $k$  ( $\text{Pa}^{-1}$ ) é um parâmetro experimental muito importante que foi uma adaptação do coeficiente de desgaste adimensional  $K$  proposto por Holm. O coeficiente definido por Archard é responsável por descrever a influencia de todas as muitas variáveis envolvidas num processo de desgaste. Assim, pela análise de comportamento ao longo do tempo desse parâmetro, muitas informações podem ser extraídas. O cálculo foi feito utilizando dados experimentais ( $h$  e  $s$ ) e da simulação numérica e a Equação (7). A Tabela 15 mostra os valores calculados para  $k$  ao longo das distâncias de deslizamento com os respectivos valores de incerteza<sup>6</sup>.

$$k = \frac{h}{s \cdot p} \quad (14)$$

Tabela 15 - Coeficiente de desgaste calculado.

| Distância de deslizamento(m) | $k(1.10^{-10} \cdot Pa^{-1})$ | Erro % relativo |
|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 30                           | $5,886 \pm 0,75$              | -               |
| 50                           | $5,028 \pm 0,81$              | 14,57           |
| 100                          | $3,501 \pm 0,27$              | 30,37           |
| 200                          | $3,720 \pm 0,19$              | 6,26            |
| 400                          | $3,394 \pm 0,091$             | 8,77            |
| 600                          | $4,544 \pm 0,21$              | 33,89           |
| 800                          | $4,038 \pm 0,35$              | 11,14           |
| 1000                         | $5,452 \pm 0,21$              | 35,01           |

A Tabela 15 mostra o erro percentual relativo para o coeficiente de desgaste. Comprova-se novamente que o estado estacionário não foi alcançado para a distância de 1000 m. O erro percentual entre o valor de  $k$  para 800 m e 1000m é de 35,01%, valor que mostra claramente que alguns processos dentro do contexto do desgaste ainda não se estabilizaram. Uma estabilização aceitável poderia ser verificada caso o erro percentual relativo fosse em torno de 5% entre as duas últimas distâncias de deslizamento ensaiadas.

A Figura 47 mostra o gráfico representativo da evolução de  $k$  ao longo da distância de deslizamento. É possível observar que o estado estacionário para o coeficiente de desgaste não foi atingido, pois mesmo na condição de 1000 m de distância de deslizamento há a tendência de aumento do coeficiente  $k$ . Essa tendência pode ser mais bem avaliada pela Figura 48 que mostra a taxa de variação de  $k$  em relação à distância de deslizamento. Ainda na Figura 47, é possível identificar três estágios ( ou regiões) A, B e C distintas. No estágio A, observa-se que há uma redução no valor do coeficiente de desgaste porque fenômeno do 'amaciamento' ou *running in* está ocorrendo. Observando a Equação (7), ocorre que o valor de  $h$  desgastado entre 30 e 50 metros não acompanhou a mesma taxa de desgaste observada entre 0 e 30 metros. No estágio B, é possível identificar uma estabilização do desgaste, devido à transição de regime de desgaste, a ser explicado mais adiante. Já no estágio C há um evento de crescimento do coeficiente de desgaste, devido a efeitos no contato em que há significativo aumento de área de contato para uma pequena altura de desgaste  $h$ . Essa mudança na área de contato

afeta diretamente o valor da pressão de contato, diminuindo-a e, observando a Equação (7), tem-se que o valor do coeficiente de desgaste  $k$  tende a aumentar.

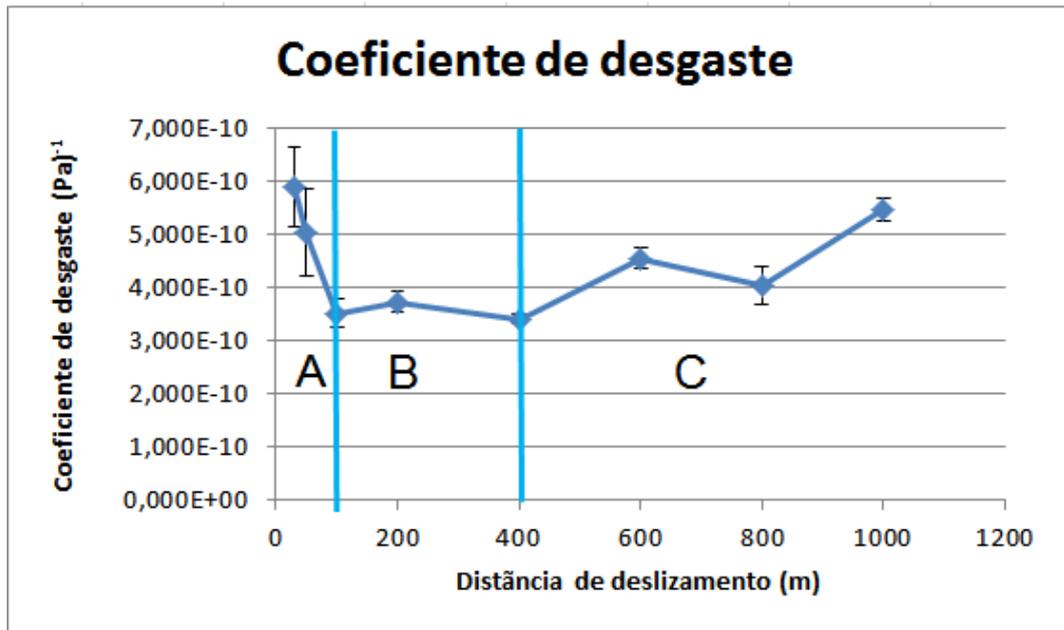


Figura 47 - Coeficiente de desgaste em função da distância de deslizamento.

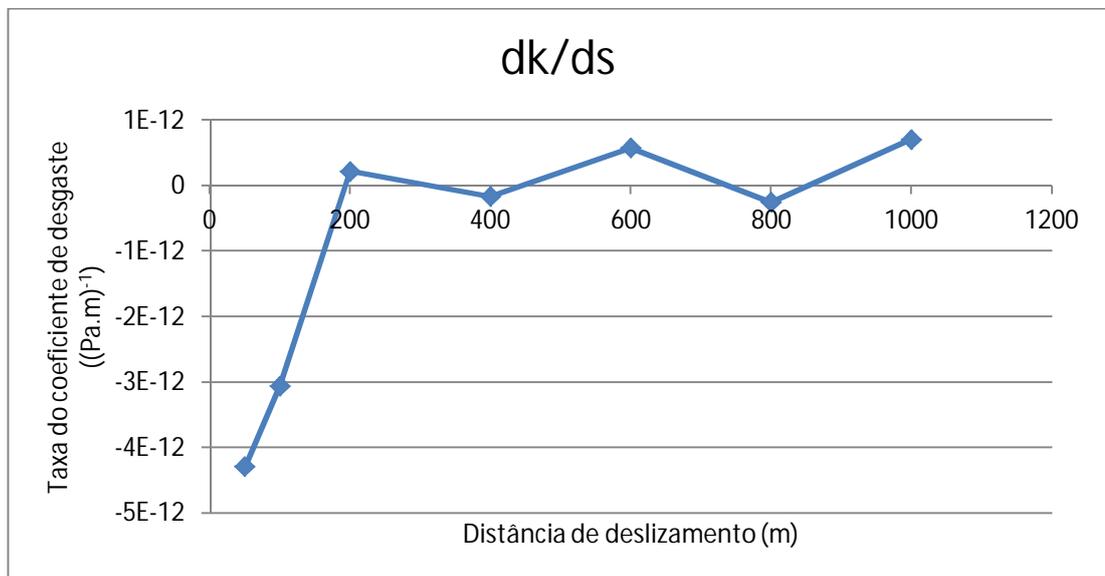


Figura 48 - Taxa de variação de  $k$  em função da distância de deslizamento.

A fim de fazer uma análise global do ensaio, volta-se à análise da curva da Figura 37. Observando-se essa figura e a Figura 4.b (ZUM-GARH,1987), nota-se claramente que há predominância do mecanismo abrasivo durante todo ensaio: há um comportamento linear para o volume desgastado para ambas as curvas. Essa é

uma informação valiosa e está atrelada às condições de ensaio, quais sejam: par tribológico utilizado, parâmetros de ensaio (velocidade tangencial) e a existência de picos duros de rugosidade no disco que atuam removendo o material da esfera de alumínio.

A região A é caracterizada como início do ensaio em que o mecanismo abrasivo é associado com a diminuição significativa do coeficiente de desgaste, devido ao contato metal-metal. A remoção de material para essa situação é alta - se comparada a todo o resto do desgaste até se atingir o estado estacionário. Então, à medida que o deslizamento entre superfícies ocorre, há o aumento da temperatura na interface e esse é o outro fator responsável pela variação do coeficiente de desgaste no início do ensaio (estágio A da Figura 47). Uma vez atingido certo nível de temperatura é c o contato metal-metal na interface é alternado momentos em que, devido à formação de óxidos na interface ou detritos desgastados que ficam aí presos, há uma camada dessas partículas que impede o contato metal-metal.

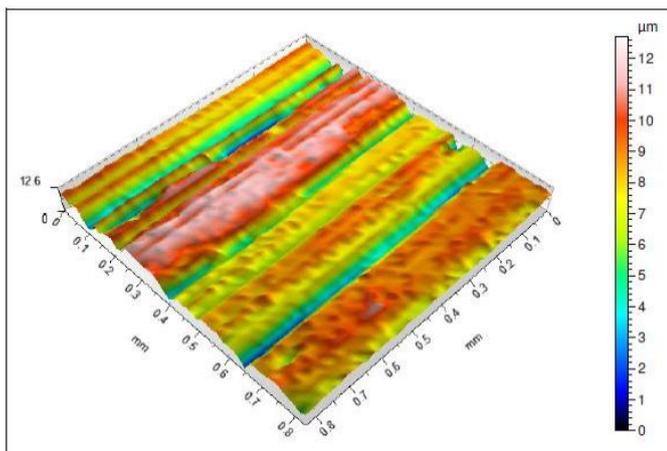
Ocorre, então, a transição para o regime moderado de desgaste, atingindo-se o estágio B da Figura 47, a aproximadamente 100m de distância de deslizamento. A partir da condição de desgaste moderado, a influência da temperatura, do nível de formação de óxidos (mecanismo de reação triboquímica) e capacidade de trabalho a frio dos materiais (mecanismo de fadiga) serão importantes. Para esse novo regime de desgaste, a observação dos ensaios e a literatura mostram que as partículas de desgaste não se assemelham mais a cavacos de usinagem, mas sim a pequenos detritos sob a forma de pequenos cacos ou até mesmo em pó (ZUM-GAHR, 1987). Como esses tipos de detritos restringem o contato metal-metal, a condição de diferença de dureza entre o alumínio e o aço D2 perde a grande influência que possuía anteriormente. Então, a taxa de desgaste no estágio B é menor que no estágio anterior.

A explicação para o estágio C da Figura 47 está justamente associada à não estabilização do coeficiente de desgaste. Um dos fatores é que a dureza da esfera de alumínio é muito menor que a do disco de aço temperado, fazendo com que as condições de desgaste abrasivo perdurem. O segundo fator é que a transição de desgaste severo para desgaste moderado, ocorrido logo nos primeiros 100 metros de distância de deslizamento, retardou a obtenção de um estado estacionário, isto é,

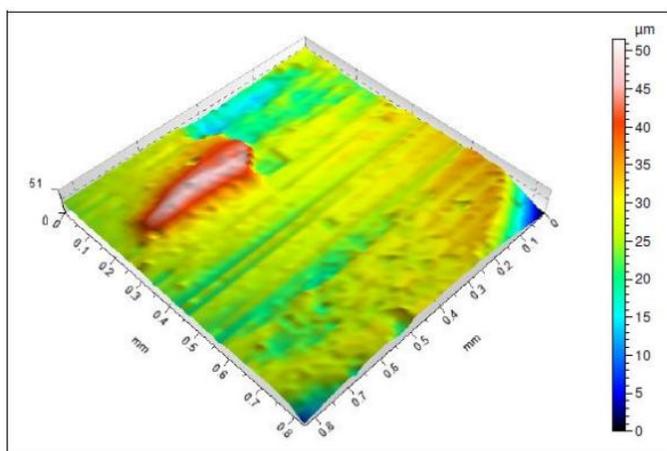
o mecanismo abrasivo de desgaste foi menos evidente devido à atuação dos mecanismos de reação triboquímica e fadiga superficial que reduziram o coeficiente de desgaste.

Assim, pela Figura 47, região C, nota-se que não existe uma estabilização no coeficiente de desgaste ( $k$ ). Apesar de se observar linearidade no desgaste da esfera de alumínio (coeficiente de correlação igual a 0,9933 da Figura 37), isso não garantiu que as demais propriedades associadas ao desgaste estivessem estáveis, mas ao contrário: o erro percentual relativo de 35,01% para o valor  $k$  a 1000m em relação ao mesmo  $k$  a 800m (Tabela 15): evidência a não estabilização desse parâmetro. A variação linear da altura de desgaste  $h$  promove uma variação não-linear da área de contato aparente (por se tratar de uma geometria esférica), cujo impacto na pressão de contato também não será linear. Desse modo, a variação não linear da pressão de contato (Tabela 14) somado à variação não linear do coeficiente de desgaste  $k$  (Tabela 15), produziram efeitos que mantiveram, por combinação de efeitos, a linearidade observada para a altura de desgaste  $h$  (Tabela 12). A literatura inclusive cita a dificuldade de se atingir o estado estacionário para o ensaio pino com ponta arredondada contra disco (PÖDRA e ANDERSSON,1999).

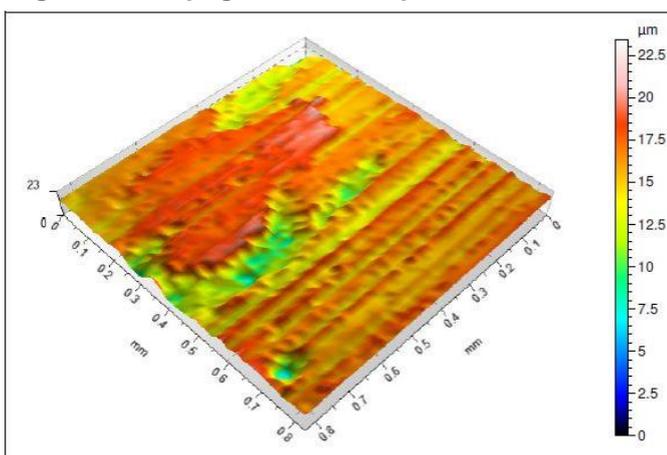
Realizou-se então a medição por amostragem da rugosidade das superfícies desgastadas das esferas com o perfilômetro da Figura 24 com objetivo de obter a topografia das esferas após o ensaio e tentar observar os mecanismos associados. Assim, para cada distância de deslizamento mediu-se uma vez a rugosidade da esfera – com intuito de avaliar a topografia da superfície, escolhida de maneira aleatória. As esferas cujas rugosidades foram medidas são as seguintes: D1f1-30, D1f2-50, D11f1-100, D1f1-200, D1f2-400, D11f1-600, D1f1800 e D1f2-1000. As Figuras 49,50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56 mostram, respectivamente, a topografia de cada de cada superfície com os respectivos valores de rugosidade de superfície  $S_q$ .

 $Sq=2,096\mu\text{m}$ 

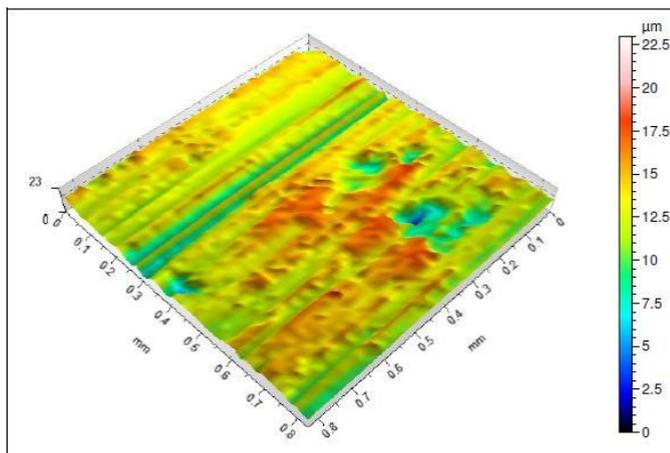
**Figura 49 - Topografia medida para a esfera DIf1-30.**

 $Sq=5,760\mu\text{m}$ 

**Figura 50 - Topografia medida para a esfera DIf2-50.**

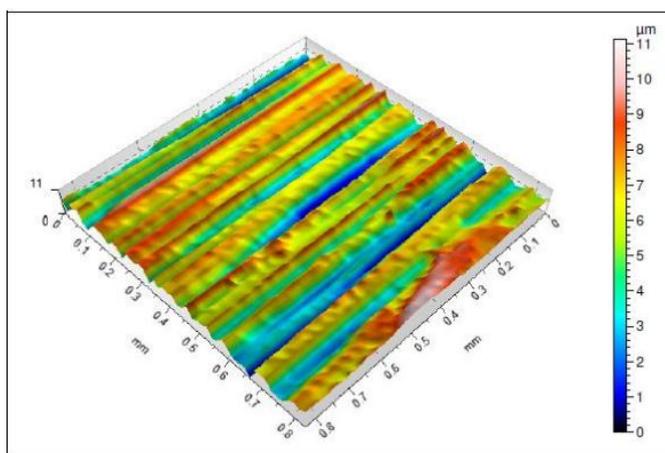
 $Sq=2,229\mu\text{m}$ 

**Figura 51 - Topografia medida para a esfera DIf1-100.**



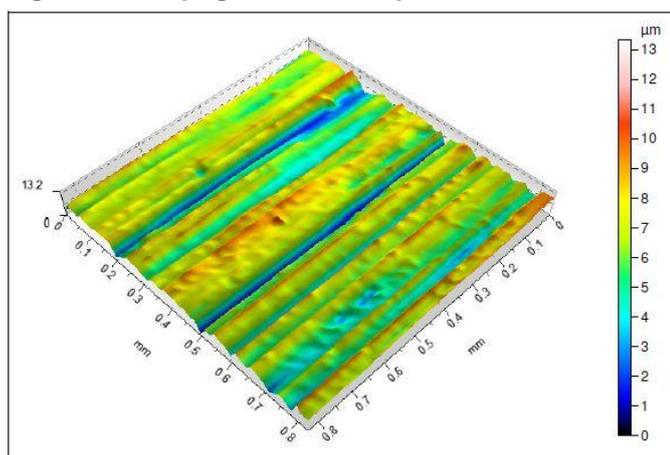
$S_q=2,202\mu\text{m}$

**Figura 52 - Topografia medida para a esfera D1f1-200.**



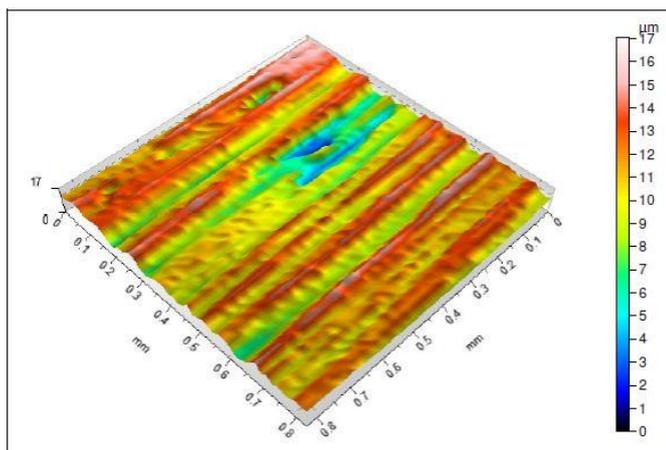
$S_q=2,129\mu\text{m}$

**Figura 53 - Topografia medida para a esfera D1f2-400.**



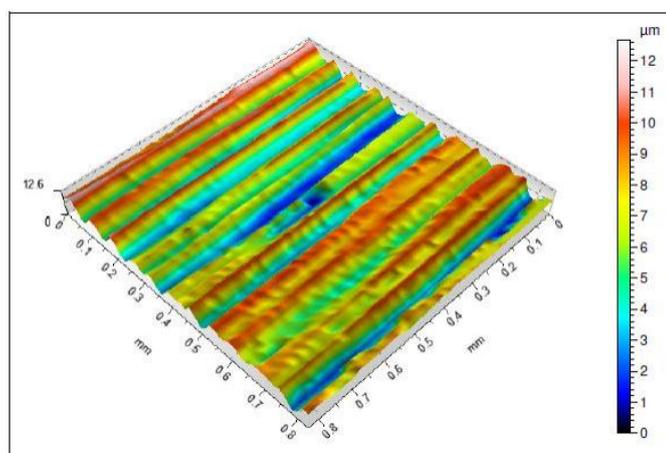
$S_q= 1,878\mu\text{m}$

**Figura 54 - Topografia medida para a esfera D1f1-600.**



$Sq=2,490\mu\text{m}$

**Figura 55 - Topografia medida para a esfera D1f1-800.**

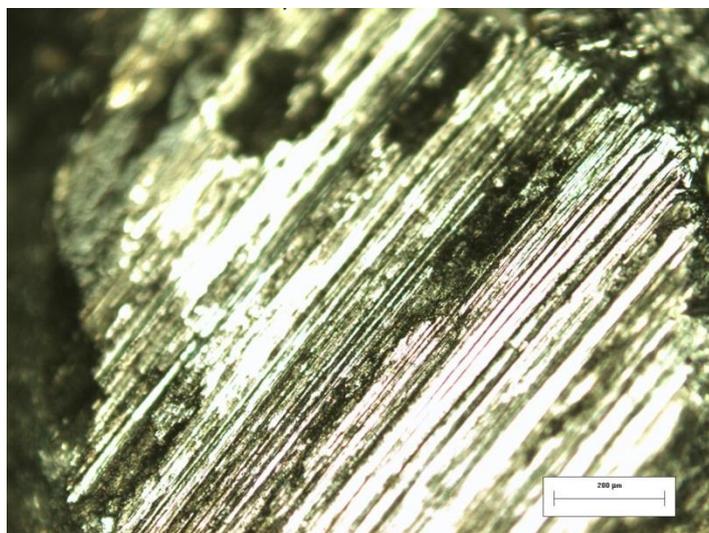


$Sq=2,500\mu\text{m}$

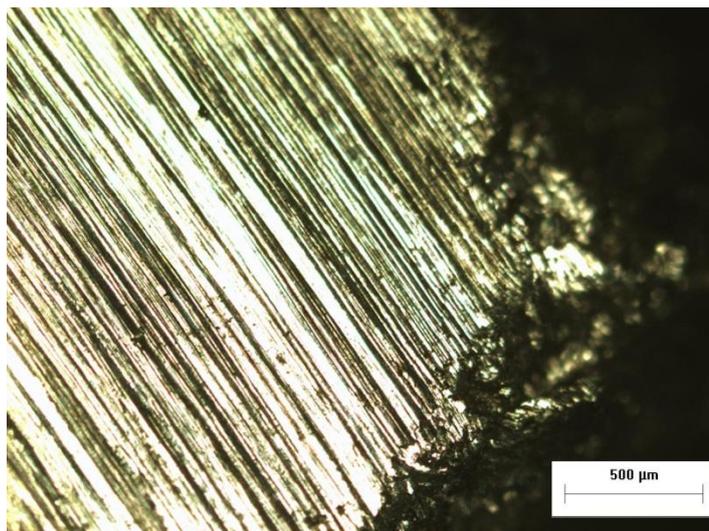
**Figura 56 - Topografia medida para a esfera D1f2-1000.**

Essas imagens das topografias das esferas desgastadas mostram os fenômenos que foram comentados anteriormente. Sabe-se que o mecanismo abrasivo predomina durante toda a distância de deslizamento, o que é sugerido pela característica de picos e vales contínuos e sob a forma de 'ondas' observados em todas as imagens de topografia de superfície. A partir de 100 metros outros mecanismos começam a se tornar evidentes como a adesão e a delaminação. Para distâncias maiores, como a de 800 metros, na Figura 55 é possível identificar os fenômenos da adesão (em menor intensidade), fadiga e reação triboquímica (oxidação). A região na cor vermelha à esquerda da imagem representa óxidos aderidos à superfície, os sulcos também à esquerda representariam o mecanismo da adesão, por fim os sulcos mais profundos na cor azul escuro, são representativos do mecanismo de fadiga.

As Figuras 57 e 58 mostram imagens obtidas do Microscópio Olympus BX51M (câmera CCD Coolsnap – Procf color – *Media Cybernetics*), cujo software analisador de imagens é o Image-PRO Plus versão 4.0, instalado no Laboratório de Materiais da UTFPR. A Figura 57 representa uma imagem da esfera DII1f1-30, a e a Figura 58 da esfera DII1f1-1000. Nessas duas imagens ficam evidenciados os fenômenos já descritos para cada etapa do ensaio. Tanto a Figura 57 quanto a Figura 58 mostram que o mecanismo de abrasão é predominante no ensaio. Para a Figura 58, realizou-se uma ampliação na borda da esfera DII1f1-1000. Nessa região, observa-se o fenômeno da delaminação e ainda resquícios de material deformado aderido à borda. Para as duas imagens, informações valiosas são obtidas. O desgaste ocorre predominantemente nas regiões externas da esfera e se espalha para o centro da esfera, isso está de acordo com os resultados obtidos por elementos finitos, os quais mostram que os valores máximos de pressão de contato e tensão de cisalhamento máximo estão localizados nas regiões mais externas das esferas. A segunda informação é a observação dos sulcos de desgaste na superfície da esfera, sugerindo que a abrasão ocorreu durante todo o ensaio.



**Figura 57 - Desgaste da esfera DII1f1-30 ampliada por microscopia ótica, aumento 100 x.**



**Figura 58 - Desgaste da esfera DII f1-1000 ampliada por microscopia ótica – aumento 50x.**

## 6 CONCLUSÕES

Os objetivos propostos no presente trabalho foram atingidos de forma satisfatória. Utilizou-se a metodologia desenvolvida e obtiveram-se resultados coerentes: a descrição do comportamento de um par tribológico submetido ao desgaste por deslizamento foi realizada com êxito, apesar de não se observar o estado estacionário para o coeficiente de desgaste. Usando a Equação de Archard para o desgaste, foi possível obter uma curva que descreveu a evolução desse desgaste. A ferramenta do método dos elementos finitos foi muito importante para que a aplicação da teoria de Archard fosse viável. Assim, houve coerência entre os resultados numéricos e o desgaste observado nas esferas, isto é, foi possível associar as imagens obtidas a partir do perfilômetro e do microscópio óptico com os resultados obtidos pela equação de Archard.

Outra conclusão do trabalho foi quanto ao comportamento em desgaste do par tribológico e sua associação com a transição da condição severa para a condição moderada. Essa transição ocorreu por volta dos 100 metros de distância e ficou comprovada a partir da análise das imagens que sugeriam mecanismos característicos de cada etapa e a predominância do mecanismo abrasivo durante todo o ensaio. Ainda, os valores obtidos pela equação de Archard convergiram para essa interpretação, os gráficos da taxa de desgaste *versus* distância de deslizamento indicavam para essa transição de desgaste severo para moderado.

A contribuição da metodologia foi quanto à preparação dos corpos de prova foi muito importante para garantir e atingir esses resultados numéricos. A preocupação de se utilizar corpos de prova com características rastreáveis e compatíveis com o modelo de ensaio proposto foi tema de reflexão durante o início do trabalho. Estima-se que 20% do tempo total dedicado ao trabalho foi gasto para a seleção e preparação dos corpos de prova, aí se incluem também as medições e avaliações de rastreabilidade. Entendeu-se, portanto, que, em um trabalho científico, todo e qualquer elemento deve ser tratado com extremo cuidado, zelando pela rastreabilidade e repetitividade dos ensaios e que isso é fundamental a obtenção de resultados coerentes.

Algumas considerações foram realizadas para execução do trabalho e podem ser avaliadas em trabalhos futuros. Uma consideração implícita do modelo foi a análise estática do problema de contato. Sabe-se que num contexto de desgaste por deslizamento há efeitos dinâmicos tanto de caráter térmico quanto de caráter estrutural atuando na interface de contato. Tais aspectos não foram levados em conta, mesmo sabendo que a temperatura pode afetar várias propriedades mecânicas num ensaio convencional. No caso estrutural, os efeitos dinâmicos são minimizados devido ao controle da máquina sobre as vibrações geradas. Isso ocorre porque a célula de carga corrige os efeitos da vibração na interface, mantendo constante (dentro de uma faixa aceitável) o carregamento da esfera sobre o disco. Em análises futuras, pode ser interessante que se incorpore os efeitos da temperatura e de vibrações no modelo do método dos elementos finitos. Assim, seria possível o identificar as particularidades desse novo modelo e aplicar a mesma metodologia desenvolvida no presente trabalho.

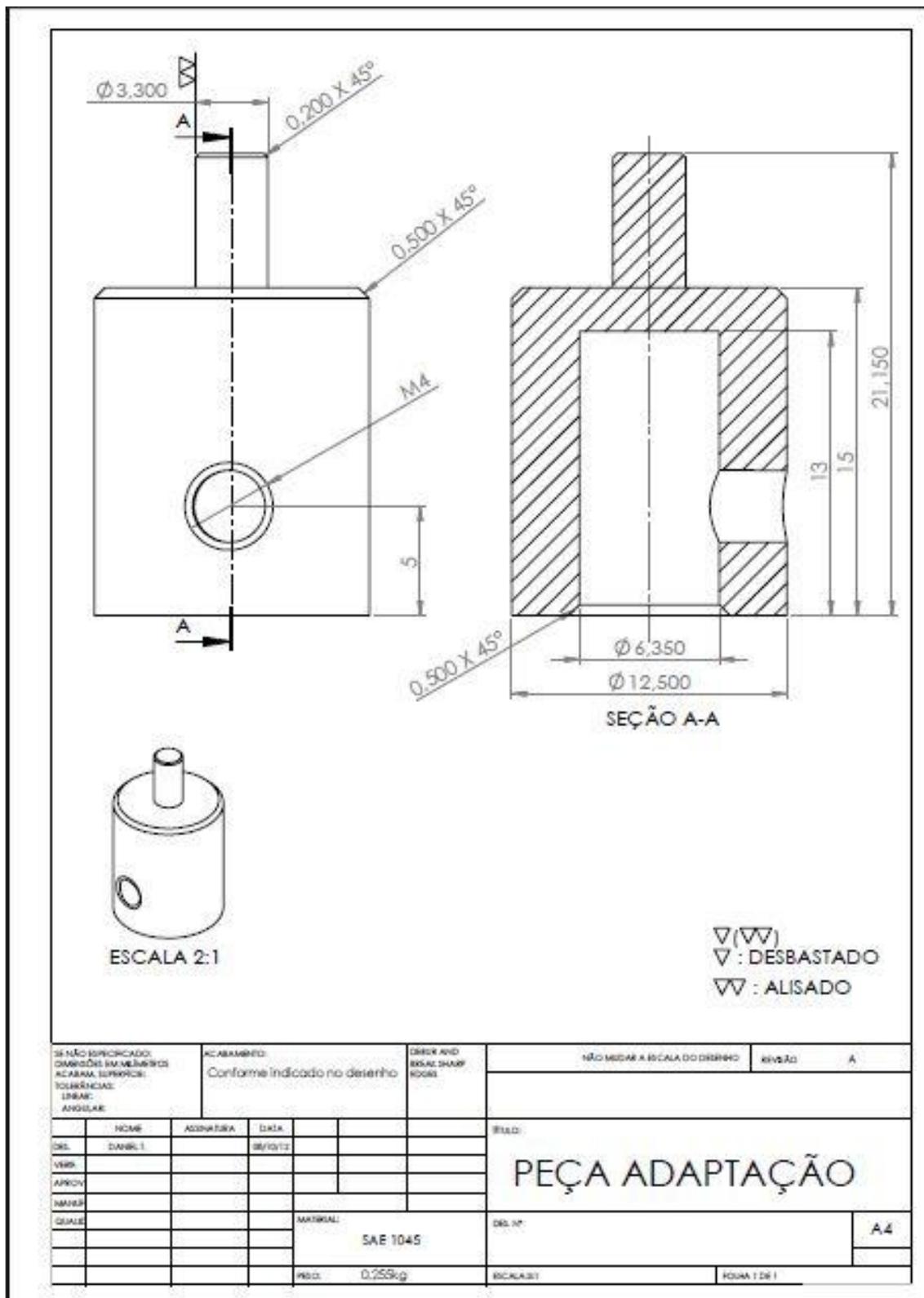
Como foi citado, não foi possível atingir o estado estacionário para o coeficiente de desgaste, fato que não invalida o trabalho, mas foi constatado. A razão disso foi a pequena dimensão da esfera de alumínio e os parâmetros usados no ensaio. Uma proposta para novos trabalhos seria usar esferas de alumínio com diâmetro superior a 4,762 mm (acredita-se que um diâmetro de 6 mm seria suficiente) a fim de realizar ensaios em que se permitam atingir o citado estado estacionário. Por outro lado, usar materiais com durezas mais próximas para o pino e o disco ou reduzir a velocidade de deslizamento são recomendados, a fim de não tornar o ensaio tão severo no início do ensaio e ser possível observar o aumento linear da altura de desgaste (como visto na Figura 37) associado com o regime estacionário para o coeficiente de desgaste (não verificado para a Figura 47 em que há instabilidade na região C do gráfico). Isto é, acredita-se que, ao tornar o desgaste menos severo no início do ensaio, o coeficiente de atrito se estabilizará mais rapidamente, já que menos efeitos abrasivos - os quais são característicos por apresentarem efeitos instáveis - estarão presentes.

## REFERÊNCIAS

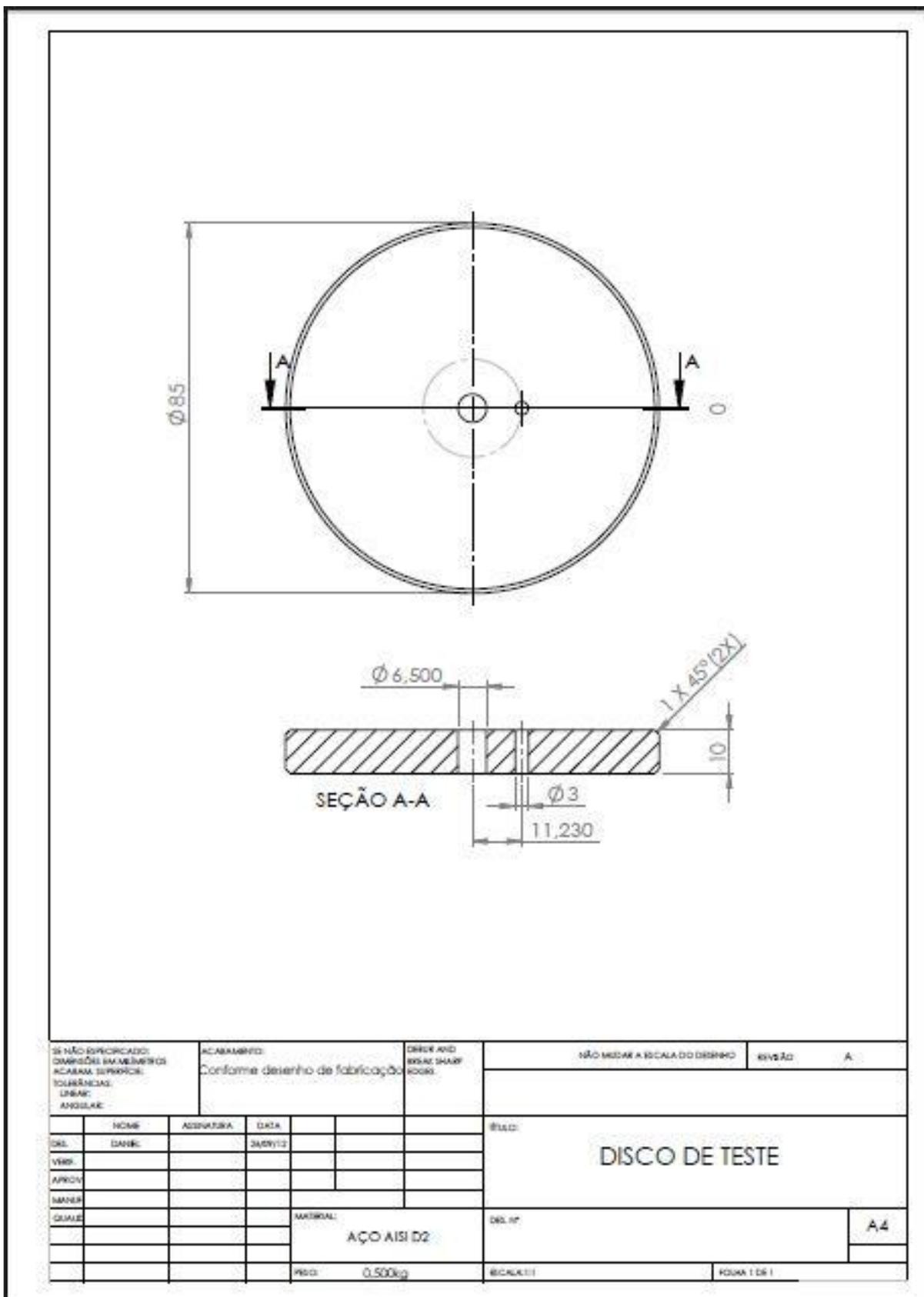
- [1] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – **ASTM, Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus, G 99–95.** Philadelphia, 1996, 5p.
- [2] ARCHARD, J.F. **Friction between metal surfaces.** Wear, Volume 113, Dezembro, 1986. Páginas 3-16.
- [3] ASHRAF, M.A. NAJAFABADI B.S.,GOL,O.SUGUMAR, D. **Numerical simulation of sliding wear for a polymer-polymer sliding contact in an automotive application.** The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 41, Numbers 11-12 (2008).
- [4]BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications.** 2nd ed. Boca Raton, FL.; London: CRC Press, c2009. xiv, 2009,420 p.
- [5] BRUKER, Nano Surfaces Division. **Tribometers – Tribology, Corrosion, Friction & Wear Studies.** Acesso em 12/06/2012, disponível em Site da Bruker Nano Surfaces Division : <http://www.bruker-axs.com/tribometers.html>
- [6] FAGAN, M. J., 1957-. **Finite element analysis: theory and practice.** Burnt Mill: Longman Scientific & Technical, 1992. 315 p.
- [7] FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **Um primeiro curso em elementos finitos.** Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009., 241 p.
- [8] HOLM, R. **Electric Contacts.** Almqvist & Wiksells Boktryckeri AB,Uppsala, 1946.
- [9] HUTCHINGS, I. M.. **Tribology: friction and wear of engineering materials.** Oxford, MA: Butterworth-Heinemann, c1992. 273 p.
- [10]MENDANHA,A.,JUNIOR,A.R.F.,GOLDENSTEIN,H.TSCHIPTSCHIN,A.P.,PINED O,C.E.**Principais parâmetros metalúrgicos e suas influências na qualidade e desempenho do aço para trabalho a frio AISI D2.** Congresso MOLDES – ABM,2008

- [11] PODRĂ, P. ANDERSSON, S. **Simulating sliding wear with finite element method.** Tribology International, Volume 32, Issue 2, February 1999, Pages 71-81.
- [12] NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- [13] BRIZMER, V., KLIGERMAN, Y. ETSION, I. **The effect of contact conditions and material properties on the elasticity terminus of a spherical contact,** International Journal of Solids and Structures, Volume 43, Issues 18–19, Setembro 2006, Páginas 5736-5749.
- [14] ZHANG W.M., MENG, G. **Friction and wear study of hemispherical rotor bushing in a variable capacitance micromotor.** Microsyst Technology. 2006.
- [5] ZUM-GAHR, K. **Microstructure and Wear of Materials.** Tribology Series, Volume 10. ed. Elsevier, 1987, 560 p.

# APÊNDICE A – DESENHO DE FABRICAÇÃO DA PEÇA DE ADAPTAÇÃO



## APÊNDICE B – DESENHO DE FABRICAÇÃO DOS DISCOS



## APÊNDICE C – ENSAIOS PRELIMINARES

Os ensaios preliminares foram desenvolvidos com os seguintes materiais:

- Disco de aço AISI D2, face D1f1-P0 ( r=23mm);
- 10 esferas de Alumínio AISI 1100 com diâmetro de 4,762 mm.

O objetivo desses ensaios foi o de obter familiaridade com o tribômetro e definir aqueles que seriam parâmetros constantes para o ensaio: o carregamento sobre o pino e a velocidade de deslizamento (ou velocidade tangencial do ensaio), principais parâmetros envolvidos num ensaio de desgaste.

Todos os parâmetros foram selecionados com o intuito de obter o estado estacionário para o coeficiente de atrito e para o coeficiente de desgaste da maneira mais rápida e segura possível. Para isso foi necessário estudo da influência de cada um dos parâmetros que integram um ensaio de desgaste por deslizamento. A literatura forneceu dados sobre as influências desses parâmetros sobre o atrito e o desgaste, podendo ser observadas nas seções 2.4 e 2.5 respectivamente.

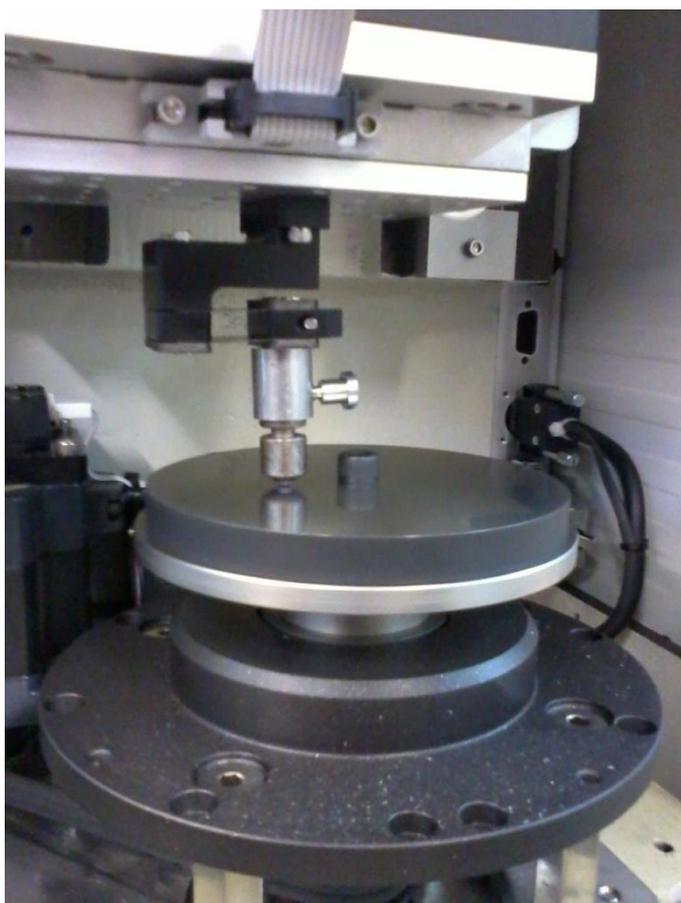
A primeira decisão tomada quanto aos ensaios é que eles seriam feitos sem lubrificação. O ensaio não lubrificado fornece condições mais severas para o desgaste (ZUM-GAHR, 1987) e por isso essa condição foi escolhida. Para os demais parâmetros (carregamento sobre o pino e velocidade tangencial), trabalhou-se variando um e mantendo-se o outro constante. O primeiro parâmetro analisado foi o carregamento. A célula de carga instalada na máquina permitia um carregamento de, no máximo, 10N, fator que limitou as condições de ensaio. Foram realizados ensaios com cargas de 1N, 3N, 5N e 7N<sup>10</sup> para velocidade tangencial de 0,5 m/s e distância de deslizamento de 100metros. Verificou-se que para os ensaios de 5N e 7N uma taxa de desgaste muito alta e que o ensaio estava instável sob o ponto de vista de controle da força de carregamento, executado pela máquina. Descartaram-se, portanto os valores de carregamento de 5N e 7N como parâmetros para os testes efetivos, restando os valores de 1N e 3N. Esses valores de carregamento apresentaram comportamento estável, mas o valor de 3N acabou

---

<sup>10</sup> Preocupou-se em não utilizar valores de carregamento próximos de 10N por questão de preservação da célula de carga a trabalhos extremos.

sendo escolhido tendo em vista que um dos objetivos do trabalho é estudar o comportamento de desgaste até se atingir o estado estacionário, o qual seria obtido mais rapidamente para o carregamento de 3N. Isso pode ser observado pela Tabela 1, que mostra que o coeficiente de atrito estático é maior para maiores carregamentos (BLAU, 2009).

Uma vez definido o carregamento, devia-se determinar qual a velocidade tangencial (em m/s) na qual os ensaios efetivos seriam executados. As velocidades testadas foram de 0,1m/s, 0,3m/s, 0,5m/s, 0,7m/s e 1m/s. Observou-se que para todas essas velocidades havia estabilidade para o carregamento de 3N, então se optou por utilizar o valor de 1m/s, já que acarretaria em ensaios de duração menor e, de acordo com a teoria do desgaste (tratada brevemente na seção 2.5.3 ), convergiria mais rapidamente para o estado estacionário. A Figura 59 ilustra um dos ensaios preliminares realizados.



**Figura 59 - Evidência dos ensaios preliminares.**

É necessário frisar que os valores para carregamento e velocidade tangencial foram escolhidos usando como critérios predominantes a estabilidade e duração dos ensaios. Esperava-se que o estado estacionário fosse atingido mais rapidamente com esses valores, garantindo ainda, que não houvesse ruídos e vibrações excessivos ou que a máquina trabalhasse de maneira instável. Tais parâmetros tem sua importância na condução dos ensaios. O foco de análise não é trabalhar com uma situação específica de desgaste ou simular uma aplicação na engenharia, mas sim analisar o comportamento do desgaste, usando a metodologia desenvolvida. Essa etapa de ensaios preliminares foi uma das mais importantes, pois permitiu que se obtivesse familiaridade na programação do tribômetro e que se analisassem importantes comportamentos do desgaste do alumínio e do disco de aço temperado. Observou-se claramente que o desgaste na esfera era predominante no ensaio, apresentando o disco desgaste desprezível.

## APÊNDICE D – DISCUSSÃO DE INCOERÊNCIAS EM RESULTADOS DE DESGASTE

Como citado no texto, houve uma falha inicial na aplicação da metodologia do ensaio de desgaste. Essa falha foi percebida após as medições dos diâmetros de desgaste das esferas. O erro consistiu em usar uma única pista para os três ensaios referentes a cada distância de deslizamento. Ao se executar o ensaio numa distância de 100 metros, por exemplo, o segundo e terceiro ensaios foram realizados em pistas já desgastadas pelas repetições anteriores, o que incorporou erros ao experimento. No momento da execução dos ensaios, não se considerou as consequências de se usar pistas já desgastadas para realizar as repetições. A Tabela I mostra os resultados das medições do diâmetro de desgaste para as distâncias de 100m e 800m. A Tabela II mostra as médias das medições dos diâmetros de desgaste com as respectivas incertezas de medição<sup>6</sup>.

**Tabela I – Medição dos diâmetros de desgaste.**

| Distâncias de deslizamento<br>(m) | Diâmetro de desgaste(mm) |        |        |        |        |        |        |        |        |
|-----------------------------------|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                                   | dI1                      | dI2    | dI3    | dII1   | dII2   | dII3   | dIII1  | dIII2  | dIII3  |
| 100                               | 1,6001                   | 1,5962 | 1,5904 | 1,7366 | 1,7473 | 1,7508 | 1,6659 | 1,6934 | 1,6935 |
| 800                               | 3,0434                   | 3,0968 | 3,0408 | 3,1358 | 3,1572 | 3,1426 | 3,2547 | 3,2753 | 3,2651 |

**Tabela II – Média das medições dos diâmetros de desgaste.**

| Distâncias de deslizamento<br>(m) | Média das Medições (mm) |               |               |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|
|                                   | Média                   | Média         | Média         |
| 100                               | 1,596 ± 0,0082          | 1,745 ± 0,013 | 1,684 ± 0,027 |
| 800                               | 3,060 ± 0,053           | 3,145 ± 0,018 | 3,265 ± 0,017 |

Uma vez obtidos os valores para as médias das medições, já é possível observar que os valores para uma mesma distância de deslizamento possuem uma diferença relativamente alta. A partir do momento em que se observaram essas diferenças nos valores, considerou-se que eles não estavam associados com erros

de medição, já que a precisão do equipamento – caracterizada pela resolução de 0,0005 mm – não permitiria erros dessa ordem de magnitude. Prosseguindo com a análise, calculou-se o impacto que esses valores teriam sobre a altura de desgaste, então produto dos ensaios de desgaste. Calculou-se, conforme mostrado na Tabela III, as alturas de desgaste correspondentes às médias dos diâmetros de desgastes com as respectivas incertezas<sup>6</sup>, usando a Equação (6), com as respectivas incertezas do tipo A.

**Tabela III – Alturas de desgaste calculadas a partir dos diâmetros de desgaste.**

| Alturas de desgaste (mm)       |                |                |               |
|--------------------------------|----------------|----------------|---------------|
| Distâncias de deslizamento (m) | hI             | hII            | hIII          |
| 100                            | 0,138 ± 0,0029 | 0,166 ± 0,0049 | 0,154 ± 0,010 |
| 800                            | 0,557 ± 0,045  | 0,593 ± 0,016  | 0,648 ± 0,016 |

Observa-se pela Tabela III que o impacto da diferença observada para os diâmetros de desgaste é grande sobre os valores calculados de altura de desgaste (h). Para mostrar isso de maneira mais clara, calculou-se o erro percentual relativo - da Equação (8) - conforme mostrado na Tabela IV. Nessa tabela, a primeira coluna chamada de ‘ hII em hI ’ considera-se o valor de hII como  $V_c$  e o hI como  $V_r$ , da Equação(8). As demais colunas seguem a mesma lógica.

**Tabela IV – Erro percentual relativo entre as alturas de desgaste calculadas.**

| Erro percentual relativo (%)   |           |            |             |
|--------------------------------|-----------|------------|-------------|
| Distâncias de deslizamento (m) | hII em hI | hIII em hI | hIII em hII |
| 100                            | 20,32     | 11,82      | 7,07        |
| 800                            | 6,55      | 16,34      | 9,19        |

Observou-se que os erros percentuais relativos entre os ensaios I e III (a primeira e terceira repetição) eram muito altos para essas distâncias de deslizamento: chegam a 11,82 % para 100m e 16,34 % para 800m.

Para uma análise experimental como é feita nesse trabalho esses valores para erro são inadmissíveis e comprometem seriamente os resultados que dependem desse valor. Uma vez descartada a hipótese de que o erro poderia estar

associado à medição no microscópio tridimensional, a melhor explicação para esse erro foram as diferentes condições das pistas de deslizamento para a segunda e terceira repetições de cada distância de deslizamento. Para essas repetições, as pistas do disco já estavam desgastadas e, portanto, possuíam rugosidade, dureza e outras condições de contato diferentes de uma pista livre de desgaste (usada apenas na primeira repetição). A identificação dessa falha na metodologia foi realizada e o motivo facilmente detectado gerou uma ação de contingência. Optou-se por descartar os ensaios referentes à segunda e terceira repetições e repeti-los em pistas livres de qualquer desgaste. Os resultados dos novos ensaios foram satisfatórios e representam os valores da Tabela 11.

## APÊNDICE E – AVALIAÇÃO DA PRESSÃO DE CONTATO AO LONGO DO ENSAIO

O valor de 3N para o carregamento sobre o pino foi definido através de ensaios de desgaste preliminares. Essa avaliação não levou em conta a existência de uma carga crítica – calculada para o par de materiais em contato esfera contra plano – a partir da qual o material da esfera inicia a escoar, cuja análise é importante no âmbito macroscópico no início do ensaio. As equações (I) e (II) são usadas para o cálculo dessa carga crítica  $P_c$  podem ser encontradas no trabalho de Brizmer *et al.*(2005), cuja leitura é recomendada. Os parâmetros dos materiais para obtenção de  $P_c$  para o contato em questão são na Tabela V.

$$P_c = \frac{\pi^3}{6} C_v^3 Y \left( R(1-\nu^2) \frac{Y}{E} \right)^2 \quad (I)$$

$$C_v = 1,295 e^{(0.736\nu)} \quad (II)$$

**Tabela V - Parâmetros utilizados para cálculo da carga crítica.**

| Símbolo            | Descrição                                     | Valor |
|--------------------|---|-------|
| R                  | Raio da esfera (mm)                           | 2,381 |
| Y                  | Tensão de escoamento do AISI 1100-H18 (MPa)   | 150   |
| $\nu$              | Módulo de Poisson do AISI 1100-H18            | 0,33  |
| $\nu_{\text{aço}}$ | Módulo de Poisson do aço AISI D2              | 0,3   |
| $E_{\text{aço}}$   | Módulo de elasticidade do aço AISI D2 (GPa)   | 200   |
| $E_{\text{Al}}$    | Módulo de elasticidade do AISI 1100-H18 (GPa) | 68,9  |
| E                  | Módulo de elasticidade combinado (GPa)        | 57,2  |

O valor para  $P_c$  calculado foi de 0,11N, isto é, considerando que o carregamento do ensaio foi de 3N, tem-se que no início do desgaste, o material já estava escoando. Isto é, o contato é plástico no início do ensaio, no âmbito macroscópico.

À medida que o desgaste avança, a área de contato aumenta e a pressão no contato se reduz substancialmente. A partir de então esse cálculo para a carga

crítica não é mais válido, pois ele foi calculado para o contato esfera-plano condição que não permanece após o desgaste. Então, a característica do contato passa a ser elástica (no ambiente macroscópico), devido à redução na pressão de contato.

No entanto, o desgaste em si, atua com micro-mecanismos plásticos de desgaste (abrasão), possuindo, num âmbito microscópico condições plásticas de desgaste, já que, além de existir essa pressão macroscópica sobre o pino, há efeitos como a velocidade tangencial  $v$  e o aquecimento resultante do deslizamento entre superfícies, ambos descritos pelo coeficiente de desgaste  $k$ .

O objetivo desse apêndice foi de situar o leitor sobre os fenômenos associados à pressão de contato, levando-se em conta os aspectos elásticos e plásticos para que se entenda a transição do contato macroscopicamente plástico para elástico.

## APÊNDICE F – AVALIAÇÃO DO PROJETO

### I. Diferenças entre a metodologia proposta e a empregada.

A única alteração em relação à metodologia foi a não-realização de mais ensaios a fim de se atingir o estado estacionário para o desgaste, a seção 5.1.1 mostra o porquê dessa alteração. Todos os demais itens propostos na Figura 17 foram cumpridos.

### II. Cronograma

O cronograma planejado anteriormente foi alterado devido ao fato dos prazos de entrega do trabalho ter sido estendido. O Quadro 1 mostra o cronograma inicial para entrega do trabalho. No Quadro 2 tem-se o cronograma atualizado que foi devidamente cumprido. O cronograma planejado inicialmente foi compilado em maio de 2012, mas à medida que se percebeu que o prazo de entrega do trabalho foi estendido, realizou-se a revisão mostrada no Quadro 2. Essa alteração foi importante, já que permitiu aumentar o tempo para algumas atividades. As atividades coloridas em verde no Quadro 2 são aquelas que foram beneficiadas e obtiveram maior tempo para realização. Escolheram-se elas, pois são consideradas estratégicas: uma vez que essas tarefas fossem realizadas de modo adequado, todo o projeto estaria bem encaminhado. E, de fato, observou-se que essas etapas foram muito importantes e foram as que geraram maiores dificuldades para o autor.

| Atividades - Tcc1 e 2                                    | QUINZENAS |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|  | fev/01    | fev/02 | mar/01 | mar/02 | abr/01 | abr/02 | mai/01 | mai/02 | jun/01 | jun/02 | jul/01 | jul/02 | ago/01 | ago/02 | set/01 | set/02 | out/01 | out/02 | nov/01 | nov/02 | dez/01 | dez/02 |
| Definição do tema e PD                                   | X         |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Termo de Abertura  |           | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Estudo Tribologia  |           | X      | X      | X      | X      | X      |        | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Estudo Método dos elementos Finitos - Ansys              |           |        | X      | X      |        |        |        | X      | X      | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Reuniões com PD  |           |        | X      | X      | X      |        | X      | X      | X      |        | X      |        | X      | X      | X      |        | X      |        | X      | X      | X      |        |
| Apresentação artigo para orientadores                    |           |        |        |        | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Redação do relatório PPP                                 |           |        |        |        | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Entrega do relatório (PPP)                               |           |        |        |        |        |        | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Apresentação da PPP conforme orientações da banca.       |           |        |        |        |        |        |        | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Entrega da versão final da PPP (proposta)                |           |        |        |        |        |        |        |        |        | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Estudo/treinamento da máquina de testes                  |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Definição de parâmetros de Ensaio (ensaios preliminares) |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Cotação de material para corpo de prova                  |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Compra de material para corpos de prova                  |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Execução de ensaios na máquina                           |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |        |
| Caracterização da superfície de desgaste                 |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      | X      |        |        |        |        |        |
| Realizar simulação numérica                              |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      |        | X      |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Redação da Monografia                                    |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      | X      |        |        | X      | X      |        |        |        |        |
| Entrega da monografia (PP)                               |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      |        |        |        |
| Apresentação do PP conforme orientações da banca.        |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      |        |        |
| Entrega da versão final da monografia                    |           |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        | X      |

Quadro 1 – Cronograma do projeto planejado.



### **III. Imprevistos do projeto**

Além daqueles imprevistos que serão tratados no Apêndice C, referentes aos problemas durante os ensaios por deslizamento, houve o problema, já citado quanto o iminente contato do porta-esferas e o disco. Essa ocorrência – de não atingir o estado estacionário para o desgaste - havia sido prevista, no entanto a medida de contingência era realizar mais ensaios e rever cronograma. Havia tempo e material para realizar ensaios além dos 1000 metros de distância de deslizamento, mas não foi feito por medida de segurança. Caso a esfera tivesse maior diâmetro – e outro porta esferas fosse usado – seria possível avançar os ensaios em distâncias de deslizamento maiores que 1000 metros. Num primeiro momento essa restrição quanto à não continuidade dos ensaios preocupou, no entanto, após se perceber que os ensaios já realizados tinham sido satisfatórios, entendeu-se que a proposta de aliar análise experimental e elementos finitos num mesmo contexto de desgaste, foi cumprida.

### **IV. Produtos do projeto**

O principal produto do presente projeto foi o desenvolvimento da metodologia que associa o método dos elementos finitos e análise experimental. Essa associação realizada utilizando-se da teoria de Archard para o desgaste por deslizamento.

Outros produtos do projeto são os gráficos correspondentes às Figura 47 Figura 48, além da Tabela 15 Esses produtos foram exatamente aqueles que se propunha no início, exceto pelo fato de não ser possível atingir o estado estacionário para o desgaste.

Nesses três itens textuais têm-se os resultados de todas as análises do projeto, cujos valores são considerados subprodutos do projeto e serviram para validar a metodologia empregada. Avaliar o problema do contato com auxílio dos elementos finitos constitui uma contribuição, mesmo que algo parecido já tenha sido realizado por outros autores. No entanto, a característica híbrida desse trabalho não é facilmente encontrada na literatura.

## ANEXO A – MEDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DO DISCO DE AÇO AISI D2

11/8/2012 9:14:33 AM

### QMatrix Analysis Results

Sample Identification

| Amostra | 36810-UTFPR -BARRA AISI D2 |         |         |         |        |          |        |       |       |        | Qualidade |
|---------|----------------------------|---------|---------|---------|--------|----------|--------|-------|-------|--------|-----------|
|         | C                          | Si      | Mn      | P       | S      | Cr       | Mo     | Ni    | Cu    | Al     |           |
|         | %                          | %       | %       | %       | %      | %        | %      | %     | %     | %      |           |
| 1.      | 1.617                      | 0.305   | 0.362   | <0.0050 | <0.100 | 10.90    | 0.801  | 0.154 | 0.099 | 0.014  |           |
| 2.      | 1.616                      | 0.300   | 0.356   | <0.0050 | <0.100 | 10.97    | 0.809  | 0.151 | 0.099 | 0.014  |           |
| 3.      | 1.644                      | 0.300   | 0.353   | <0.0050 | <0.100 | 11.05    | 0.794  | 0.151 | 0.100 | 0.014  |           |
| ↑       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |
| ∅       | 1.626                      | 0.302   | 0.357   | <0.0050 | <0.100 | 10.97    | 0.801  | 0.152 | 0.099 | 0.014  |           |
| ↓       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |
|         | As                         | B       | Ca      | Co      | Mg     | Nb       | Pb     | Sb    | Sn    | Ti     |           |
|         | %                          | %       | %       | %       | %      | %        | %      | %     | %     | %      |           |
| 1.      | 0.015                      | <0.0020 | 0.0018  | 0.0066  | 0.030  | <0.00005 | <0.100 | 0.036 | 0.013 | 0.0042 |           |
| 2.      | 0.014                      | <0.0020 | 0.0018  | 0.0064  | 0.030  | <0.00005 | <0.100 | 0.041 | 0.013 | 0.0040 |           |
| 3.      | 0.013                      | <0.0020 | 0.0016  | 0.0059  | 0.030  | <0.00005 | <0.100 | 0.032 | 0.012 | 0.0035 |           |
| ↑       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |
| ∅       | 0.014                      | <0.0020 | 0.0017  | 0.0063  | 0.030  | <0.00005 | <0.100 | 0.036 | 0.013 | 0.0039 |           |
| ↓       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |
|         | V                          | W       | Zn      | Zr      | Se     | Fe       |        |       |       |        |           |
|         | %                          | %       | %       | %       | %      | %        |        |       |       |        |           |
| 1.      | 0.963                      | <0.010  | <0.0010 | 0.0024  | 0.080  | 84.38    |        |       |       |        |           |
| 2.      | 0.958                      | <0.010  | <0.0010 | 0.0025  | 0.095  | 84.30    |        |       |       |        |           |
| 3.      | 0.946                      | <0.010  | <0.0010 | 0.0025  | 0.098  | 84.23    |        |       |       |        |           |
| ↑       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |
| ∅       | 0.956                      | <0.010  | <0.0010 | 0.0025  | 0.091  | 84.30    |        |       |       |        |           |
| ↓       |                            |         |         |         |        |          |        |       |       |        |           |

Fe100  
Bruker Elemental

Concentrations  
1/1

# ANEXO B – RELATORIO DE MEDIÇÃO DO DISCO DE ENSAIO APÓS RETIFICA



RUA SERGIPE, 113 - BONECA DO IGUAÇU - CEP 83040-120 - SÃO JOSÉ DOS PINHAIS - PARANÁ  
FONE/FAX : (41) 3382-7666 - IE: 90.429.129-37 - CNPJ: 09.294.095/0001-78  
www.kellab.com.br / kel.sj@kellab.com.br

RBC - REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO  
LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO: DIMENSIONAL, MASSA, FORÇA, TORQUE E DUREZA  
ACREDITADO PELA CGCRE DE ACORDO COM A ABNT NBR ISO/IEC 17025, SOB O NÚMERO CAL 0144

QUALIFICADO PELA ANFAVEA NAS ÁREAS DE ACÚSTICA, DIMENSIONAL, ELETRICIDADE,  
ENSAIOS AUTOMOTIVOS, FÍSICA E QUÍMICA, ÓPTICA, TEMPERATURA E UMIDADE,  
TEMPO E FREQUÊNCIA, VAZÃO E VISCOSIDADE



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº S050370/2012

Emissão  
11/12/2012

## 1. Dados do Instrumento e Solicitante:

Denominação: DISPOSITIVO  
Contratante: DANIEL CARLO NADALIN TREVISAN  
Rua Sergipe, 314 - Curitiba - PR  
Solicitante: DANIEL CARLO NADALIN TREVISAN  
Rua Sergipe, 314 - Curitiba - PR  
Fabricante: NÃO CONSTA  
Classificação: DISPOSITIVO  
Código: DSP-01  
Ordem de serviço: 006469/2012  
Data de Recebimento: 05/12/2012  
Data da calibração: 11/12/2012

## 2. Procedimento

A calibração foi realizada conforme procedimento PSQ-DIM.19, revisão 003. Padrões utilizados: Máquina de Medir por Coordenadas certificado 04842/2012 RBC/MITUTOYO, válido até 04/2014.

"Este certificado atende os requisitos de acreditação pela CGCRE/INMETRO, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidades - SI)"

## 3. Tabela de Resultados

| Cota | Valor Nominal (Dispositivo) | Média Obtida (Padrão Utilizado) | Desvio | Incerteza de Medição | Unidade | k    | veff |
|------|-----------------------------|---------------------------------|--------|----------------------|---------|------|------|
| 1    | PARALELISMO                 | 0,012                           | 0,012  | 0,005                | mm      | 2,00 | ∞    |

## 4. Condições Ambientais e Local

Local da calibração: K&L Laboratórios de Metrologia  
Temperatura: 20,0 °C ± 1,0 °C  
Umidade relativa do ar: Abaixo de 65,0 %ur

## 5. Notas

5.1 - As incertezas expandidas de medição  $U$  relatadas são baseadas em uma incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência  $k$ , o qual para uma distribuição  $t$  com  $veff$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

5.2 - Desvio: Diferença entre a média obtida e o valor nominal.

Observações:

JATRO GOUVEA DOS SANTOS  
SIGNATÁRIO AUTORIZADO

Este certificado é válido exclusivamente para o objeto calibrado descrito nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes, mesmo que similares. Não é permitida a reprodução deste certificado, somente original. Certificado conferido e assinado eletronicamente. Pág. 1/1