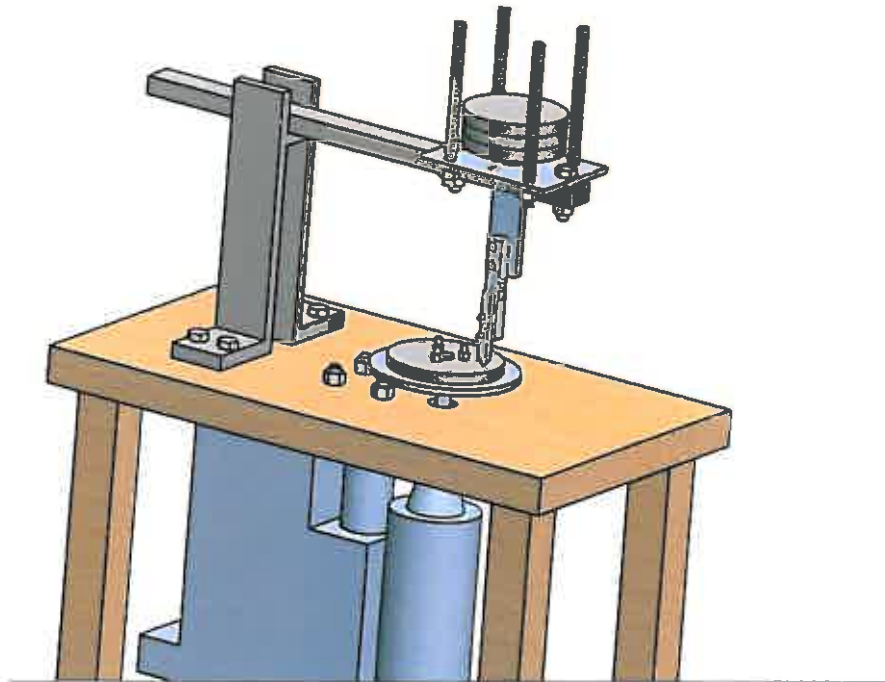




INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica



Projecto e Concepção de um Tribómetro

ANDRÉ FILIPE HENRIQUES GOMES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho final de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Prof. Doutora Teresa Moura e Silva
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado
Vogais: Prof. Doutor Luís António Andrade Ferreira
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Novembro de 2016



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Mecânica

Projecto e Concepção de um Tribómetro

ANDRÉ FILIPE HENRIQUES GOMES
(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Trabalho final de Mestrado para a obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

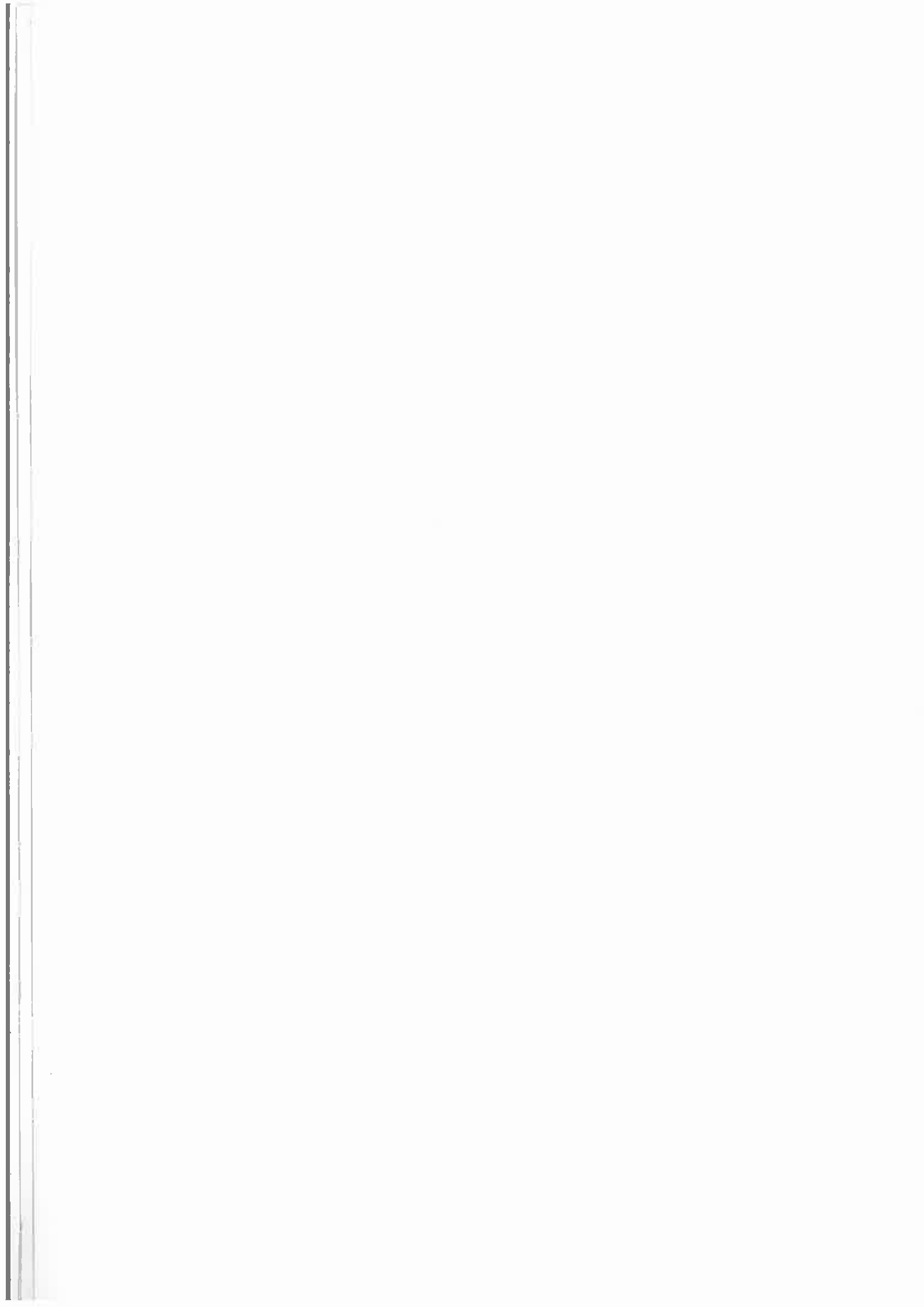
Orientadores:

Prof. Doutora Teresa Moura e Silva
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Júri:

Presidente: Prof. Doutor João Manuel Ferreira Calado
Vogais: Prof. Doutor Luís António Andrade Ferreira
Prof. Doutor José Augusto da Silva Sobral

Novembro de 2016



Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai Edgar Gomes, ao meu irmão Rubén Gomes e aos meus avós paternos Maria Odete Gomes e José Lino Gomes, com todo o meu amor com quem tenho o privilégio de partilhar a minha vida e por contribuíram para caracterizar a pessoa que sou hoje.

“O sucesso pode estar longe de si, mas quando alcança-lo lembre-se do que passou para trás e reconheça as escolhas que fez”

MATT DAMON

Nota:

O presente documento encontra-se redigido conforme as regras anteriores ao Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990”.

Resumo

O presente trabalho final de mestrado, intitulado Projecto e Concepção de um Tribómetro, tem como objectivo proporcionar aos alunos do ISEL da unidade curricular de “Tribologia” um equipamento que lhes mostre experimentalmente algumas das temáticas leccionadas nas aulas desta unidade curricular, nomeadamente a forma de medir coeficientes de atrito e avaliar o desgaste entre combinações de diferentes materiais, através da realização de testes/ensaios de modo fácil e com elevada fiabilidade.

Numa primeira parte do presente trabalho foi realizada uma introdução de âmbito teórico que se pretende de revisão bibliográfica ao que é a Tribologia e áreas envolvidas, bem como o que é um Tribómetro, os vários tipos de Tribómetros existentes e suas funcionalidades. Na segunda parte deste trabalho é realizado o projecto para a construção do Tribómetro e futura realização dos ensaios pretendidos de acordo com as características e especificações deste equipamento.

A construção de um Tribómetro do tipo Pino-Disco, que também estava prevista quando se iniciou este trabalho, não foi contudo possível em parte por falta de apoio financeiro mas também por falta de tempo para a sua conclusão. Porém é apresentado um orçamento estimado para a sua construção.

Foram também realizadas simulações dinâmicas, através do “*Motion Study*” do “*SolidWorks*” o que permitiu concluir que o equipamento projectado neste trabalho será capaz de controlar as variáveis anteriormente referidas permitindo, de forma fácil e fiável, obter valores de coeficientes de atrito e estimar o desgaste resultante da interação entre diferentes materiais, comparando o seu comportamento tribológico.

Todo o Projecto e etapas futuras foram realizados com o intuito de criar um equipamento de fácil utilização tendo a preocupação de procurar soluções que permitam a utilização de materiais /componentes existentes e na Área Departamental de Engenharia Mecânica que, satisfazendo os requisitos do Projecto permitam reduzir os custos.

Palavras Chave: Tribómetro, Projecto, Tribologia, Atrito, Desgaste

Abstract

This Master Thesis, entitled “Design and Development of a Tribometer”, aims to provide Tribology students an equipment to show them experimentally some of the subjects taught in these classes, namely how to measure friction coefficients and evaluate wear between different combinations of materials, by conducting experiments easily and with high reliability.

The first part of this work consisted in a literature review where the theoretical basis of Tribology and its inherent areas, the various types of Tribometers and their features are presented. In the second part of the work the project for the construction of a Tribometer and the development of tests according to the characteristics and specifications of the equipment were carried out. The physical development of a Pin-on-Disk Tribometer was not possible, in part because of lack of financial support, but an estimated budget for the construction of this equipment is presented.

Simulations of the dynamic interaction between different materials were also carried out using “*Motion Study*” of “*SolidWorks*”. From these simulation it was possible to conclude that the equipment designed in this work will be able to control the aforementioned variables allowing to obtain friction coefficient values and estimate the wear resulting from the interaction between different materials and therefore to compare their tribological behaviours.

Therefore the project developed in this work will allow to construct a device that is intended to be simple and easy to assembly and disassembly and thus user-friendly. Also, the different solution selected in the design of the equipment will allow the use of materials/components available at the Mechanical Engineering Department reducing this way the manufacturing costs.

Keywords: Tribometer, Project, Tribology, Friction, Wear

Agradecimentos

A elaboração de um trabalho com a dimensão, complexidade, investimento pessoal e envergadura de um Trabalho Final de Mestrado (TFM) é um processo desafiante, que apresenta fases muito difíceis paralelamente a outras fases extremamente compensadoras. Quero agradecer e publicamente dar conta, mesmo tendo a possibilidade de não mencionar todos.

Em primeiro, quero agradecer ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), que me possibilitou a realização e apresentação pública deste trabalho final de mestrado. Uma palavra especial aos meus orientadores a Professora Teresa Moura e Silva e ao Professor José Augusto Sobral pela disponibilidade e simpatia sempre demonstrada, bem como pela transmissão de conhecimentos e de todo o apoio prestado durante o trabalho efectuado.

Um especial obrigado ao meu pai Edgar e ao meu irmão Rubén pelo carinho, motivação e força que sempre demonstraram.

À minha namorada Sara, que sem o apoio, o incentivo, a compreensão, o encorajamento e a motivação que me transmitiu não seria possível.

Aos meus amigos pelo apoio e incentivo demonstrado e pelos momentos vividos ao longo dos tempos.

Ao meu patrão e chefe pela compreensão e disponibilidade que sempre desejada, tenha sido concedida para a realização do presente TFM.

Bem haja a todos.

Índice Geral

Capítulo 1 Introdução.....	1
1.1.Objectivo	2
1.2. Estrutura do Trabalho.....	2
Capítulo 2 Tribologia	5
2.1 Conceito e origem da Tribologia.....	6
2.2 Importância da Tribologia e suas áreas de domínio	7
2.3. Definição de par cinemático	9
2.4. Sistema Tribológico e Tribo-sistema.....	12
Capítulo 3 Desgaste.....	15
3.1. Tipos de desgaste	16
3.1.1 Desgaste Adesivo	16
3.1.2 Desgaste Abrasivo	18
3.1.3 Desgaste por fadiga	21
3.1.4. Outros tipos de desgaste	22
3.2. Taxa/controlo de desgaste e Factor Pv	25
Capítulo 4 Atrito	31
4.1. A Origem da Força de Atrito.....	33
4.2. Leis do Atrito	34
4.3. Variabilidade do coeficiente de atrito.....	38
4.4. A lubrificação no atrito	39
4.5. Relação entre Atrito e Desgaste	40
Capítulo 5 Tribómetro.....	41
5.1. Tipos de Tribómetros	43
5.1.1. Método Pino-Disco	43
5.1.2. Método Linear	47
5.1.3. Método 4 esferas	48
5.1.4 Método Bloco-Disco	48
5.2. Vantagens e Desvantagens dos diferentes tipos de Tribómetros.....	49
Capítulo 6 Fases do projecto	51
6.1. Objectivos	52
6.2. Parâmetros de funcionamento e Especificações.....	53
6.2.1 – Aplicação da Força Normal.....	54
6.2.2 – Sistema de aquisição da força de atrito	55
6.2.3 – Geometria do pino.....	58
6.2.4 – Disco de Teste	58

6.3. Solução Final.....	60
6.4 – Dimensionamento.....	61
6.4.1. Estudo estático.....	61
6.4.2. Estudo dinâmico.....	63
6.4.3. Análise financeira da solução.....	64
6.5 – Análise de Resultados.....	65
6.5.1. Ensaio Estático.....	65
6.5.2. Motion Study.....	73
6.5.3. Taxa de desgaste.....	85
Capítulo 7 Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros.....	87
7.1 – Conclusões Gerais.....	87
7.2 – Síntese dos objectivos atingidos.....	88
7.3 – Principais Dificuldades ou Problemas.....	89
7.4 – Trabalhos Futuros.....	90
Bibliografia	91
Anexos	95
Anexo I Orçamentos solicitados.....	97
Anexo II Desenho de Detalhe das Peças 2D.....	101
Anexo III Desenho de Conjunto/Identificação.....	115
Anexo IV Procedimento de ensaio do Tribómetro.....	119
Anexo V Especificações técnicas.....	123
Anexo VI Esquiços iniciais do Tribómetro.....	131

Índice de Figuras

Figura 1 - Esquema dos campos que formam a Tribologia.....	5
Figura 2 - Aplicação de água por gravidade para a redução de atrito no Egipto 2.400 A.C.	7
Figura 3 - Esquema representativo dos domínios da Tribologia	8
Figura 4 - Representação dos tipos ou sub-tipos de pares cinemáticos inferiores.	11
Figura 5- Classificação das cadeias cinemáticas	12
Figura 6 - Tribo-Sistema	13
Figura 7 - Chumaceira de Escorregamento	13
Figura 8 - Modelo analítico de um sistema tribológico genérico e exemplo de possíveis variáveis de entrada e saída	14
Figura 9 - Desenho esquemático dos três modos representativos de desgaste	16
Figura 10- Etapas do desgaste adesivo.....	16
Figura 11 - Desgaste abrasivo a dois corpos	19
Figura 12- Desgaste abrasivo a três corpos	19
Figura 13- Modos de desgaste abrasivo	20
Figura 14 - Fenómeno de fadiga de contacto entre a interacção roda-carril.....	21
Figura 15 - Exemplificação do desgaste provocado por cavitação.....	24
Figura 16 - Exemplificação de picadas de erosão líquida	25
Figura 17 - Gráfico típico do Factor Pv.....	28
Figura 18 - Gráficos típicos do Factor Pv admissível relativo de chumaceiras secas e limite	29
Figura 19 - Diagrama de corpo livre de um corpo sujeito à força de atrito por escorregamento	32
Figura 20 - Diagrama de corpo livre de um corpo sujeito à força de atrito por rolamento	32
Figura 21- Retrato dos físicos que estudaram as 3 leis do atrito: Leonardo da Vinci (1452-1519); Guillaume Amontons (1663-1705); Charles Coulomb (1736-1806).....	34
Figura 22 - Representação de contacto feito por asperidades.....	35
Figura 23 - Esquema de Força-Tensão	41
Figura 24 - Tribómetros desenvolvidos por Leonardo Da Vinci para a determinação da força de atrito	42
Figura 25 - Princípio de funcionamento de um Tribómetro do tipo Pino-Disco	43
Figura 26 - Tribómetro Pino Disco	44
Figura 27 - Taxa de desgaste.....	46
Figura 28 - Princípio de funcionamento de um Tribómetro do método linear do tipo Pino-Placa	47
Figura 29 - Tribómetro Método Linear.....	47
Figura 30 - Teste com quatro esferas esquemático	48
Figura 31 - Princípio de funcionamento do teste bloco-disco	49
Figura 32 - Esquema das diferentes fases que constituem o projecto e desenvolvimento do Tribómetro	51
Figura 33 - Esquema objectivos a alcançar	52
Figura 34 - Ligação da célula de carga à placa de Arduino	55
Figura 35 - Célula de carga "10KG Scale Load Cell Weight Weighing Sensor"	56
Figura 36 - Implementação da Célula de carga "10 KG Scale Load Cell" no sistema	56
Figura 37 - Célula de carga TAS 606.....	57
Figura 38 - Implementação da Célula de carga TAS 606 no sistema	57
Figura 39 - Pino desenhado em "SolidWorks"	58
Figura 40 - Disco de Teste desenhado em "SolidWorks"	59
Figura 41 - Implementação do Disco de Teste no sistema	59
Figura 42 - Solução final implementada em "Solidworks"	60
Figura 43 - Cargas e restrições aplicadas na estrutura para realizar a simulação estática em "Solidworks"	62
Figura 44 - Cargas e restrições aplicadas na estrutura para realizar a simulação dinâmica em "Solidworks"	64
Figura 45 - Aplicação do sentido da Força Normal no Ensaio Estático	65
Figura 46 - Estrutura com malha	66
Figura 47 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Aço Carbono.....	66

Figura 48 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Aço Carbono.....	67
Figura 49 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Aço Carbono.....	67
Figura 50 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Borracha Natural.....	68
Figura 51 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Borracha Natural.....	68
Figura 52 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Borracha Natural.....	69
Figura 53 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Teflon.....	70
Figura 54 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Teflon.....	70
Figura 55- Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Teflon.....	70
Figura 56 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Aço Carbono.....	72
Figura 57 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Borracha Natural.....	72
Figura 58 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Teflon..	72
Figura 59 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N.....	74
Figura 60 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N.....	74
Figura 61 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N.....	74
Figura 62 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade.....	75
Figura 63 - Relação da força de atrito vs força normal – Aço Carbono SAE 1020.....	76
Figura 64 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N.....	77
Figura 65 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N.....	77
Figura 66 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N.....	77
Figura 67 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade.....	78
Figura 68 - Relação força de atrito vs força normal – Borracha Natural.....	79
Figura 69 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N.....	80
Figura 70 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N.....	80
Figura 71 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N.....	80
Figura 72 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade.....	81
Figura 73 - Relação força de atrito vs força normal - Teflon.....	82
Figura 74 - Relação força de atrito vs força normal para os três pares cinemáticos.....	83
Figura 75 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade para os três pares cinemáticos.....	83

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Características dos sub-tipos de pares cinemáticos inferiores	10
Tabela 2 – Exemplos de Tribo-Sistema.....	14
Tabela 3 – Valores indicativos das grandezas do coeficiente de atrito.....	37
Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos diferentes Tipos de Tribómetros.....	50
Tabela 5 - Parâmetros e especificações para o Projecto do Tribómetro	53
Tabela 6 - Vantagens e as desvantagens das possíveis formas de aplicação da carga normal.....	54
Tabela 7 – Propriedades dos materiais que constituem o par cinemático Pino-Disco.....	63
Tabela 8 – Valores das deformações e tensões Von Mises máximos nos ensaios estáticos	71
Tabela 9 – Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Aço Carbono SAE 1020).....	75
Tabela 10 - Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Borracha Natural).....	78
Tabela 11 - Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Teflon).....	82
Tabela 12 - Valores do coeficiente de atrito e forças de atrito médios para os pares cinemáticos em estudo	84
Tabela 13 – Propriedades dos materiais sujeitos a desgaste antes e depois dos ensaios	85

Capítulo 1

Introdução

Todos os materiais estão sujeitos ao atrito quando se encontram em contacto dinâmico. O Homem preocupa-se com estes fenómenos desde há milhares de anos, embora só há relativamente pouco tempo (meados dos anos 60) tenha surgido uma nova ciência denominada Tribologia. O âmbito da Tribologia é muito vasto, indo ao encontro de problemas de carácter universal e pluridisciplinar, tornando por esta via o estudo demasiado complexo.

Numa perspectiva tribológica, o desgaste é definido como a perda progressiva de material de uma superfície activa, como resultado do movimento relativo dessas superfícies existentes.

Este fenómeno é assim um processo inevitável, desde que exista atrito entre duas superfícies pelo que é fundamental ter uma compreensão de todos os processos envolvidos para se tentar diminuir ou prevenir a sua ocorrência. Uma vez que é significativo o impacto que o desgaste apresenta nos equipamentos e nos custos da economia mundial.

Em qualquer equipamento mecânico em serviço existem diversos componentes em contacto que estão sujeitos ao desgaste por atrito levando à falha e/ou diminuição da eficiência do equipamento. Uma das consequências desta falha ocorrida devido ao atrito, tem a ver com a necessidade de se executar a substituição ou reparação das peças que apresentam um desgaste superior ao admissível.

Para analisar e melhor compreender os fenómenos de atrito e desgaste são utilizados os Tribómetros. Os Tribómetros são equipamentos onde é possível realizar a caracterização tribológica de diferentes materiais e obter vários parâmetros, nomeadamente o coeficiente de atrito, a eficácia da lubrificação e, de forma indirecta a taxa de desgaste. Estes serão obviamente influenciados por diversos factores entre os quais se contam - a carga normal que é aplicada, a velocidade de deslocamento, as condições do meio envolvente e ambientais e

outras condições que sejam relevantes e que influenciem na interação das superfícies em contacto.

1.1. Objectivo

O objectivo principal do presente TFM centra-se no projecto e desenvolvimento de um Tribómetro do tipo Pino-Disco que permitirá avaliar, através da realização de testes/ensaios de modo fácil e com elevada fiabilidade, o coeficiente de atrito e o desgaste para diferentes combinações de materiais.

No final do presente trabalho pretendia-se que o Tribómetro construído permanecesse no ISEL para posterior utilização por parte dos alunos de ensaios experimentais para análise do atrito na unidade curricular de Tribologia contribuindo para uma melhor compreensão e aprendizagem dos mesmos.

1.2. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi dividido por sete capítulos. No primeiro Capítulo - a Introdução - aborda-se o que concerne a relevância do tema, a motivação que levou a realizá-lo, o seu objectivo, e a própria estrutura do mesmo.

No segundo Capítulo é abordada a ciência da Tribologia, nomeadamente o conceito, a origem, e as áreas de desempenho da mesma, é ainda referida a importância da Tribologia, a definição e conceitos de par cinemático, tipos de desgaste e conceito de Tribo-Sistema, bem como exemplos e variáveis de entrada e saída de um Tribo-Sistema.

No terceiro Capítulo fala-se sobre o desgaste, nomeadamente, os tipos de desgaste (adesivo, abrasivo, fadiga e outros) e por fim realiza-se uma breve introdução sobre a taxa de desgaste e o Factor Pv (Pressão-velocidade).

No quarto Capítulo aborda-se a temática do atrito, nomeadamente a sua origem, o seu conceito, as leis do atrito, o efeito da lubrificação no mesmo e a relação que existe entre o atrito e o desgaste.

No quinto Capítulo dá-se a conhecer o verdadeiro significado e conceito de Tribómetro, os diferentes tipos existentes no mercado, fazendo um aprofundamento acerca dos mais conhecidos e utilizados (método linear e Pino-Disco). Por fim, realiza-se um quadro com as vantagens e desvantagens de cada tipo de Tribómetro.

No sexto Capítulo definem-se os passos e fases a seguir no Projecto do Tribómetro, sendo também apresentadas neste capítulo especificações sobre o equipamento, com vista a definir os seus parâmetros de funcionamento e atingindo-se por fim a idealização da solução final. Todo o Projecto foi dimensionado em Software de modelação 3D "*SolidWorks*" tendo-se realizado algumas simulações, colocando o equipamento sujeito a forças, esforços, restrições e rotações no "*Simulation*" do Software.

No sétimo Capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas com este trabalho, uma breve discussão de resultados e indicados tópicos ou pistas para trabalhos futuros, ou seja, as considerações finais e principais contributos, bem como as perspectivas que podem ser posteriormente abordadas noutros trabalhos futuros.

Capítulo 2

Tribologia

A Tribologia define-se como “a ciência e tecnologia da interação de superfícies em movimento relativo e assuntos e práticas com ela relacionados” (Norma DIN 50323). Esta ciência reúne conhecimentos adquiridos em diferentes áreas científicas, tais como, a química, a mecânica, a física e a ciência dos materiais para prever e explicar os comportamentos físicos dos sistemas mecânicos. Os fenómenos que formam a Tribologia já existiam antes de a mesma ter sido definida como uma ciência. Nomeadamente os estudos dos fenómenos de lubrificação, atrito e desgaste antecedem o ano de 1966 (Sinatora, 2005). Na Figura 1 apresentam-se as principais vertentes ou áreas analisadas em estudos de Tribologia.

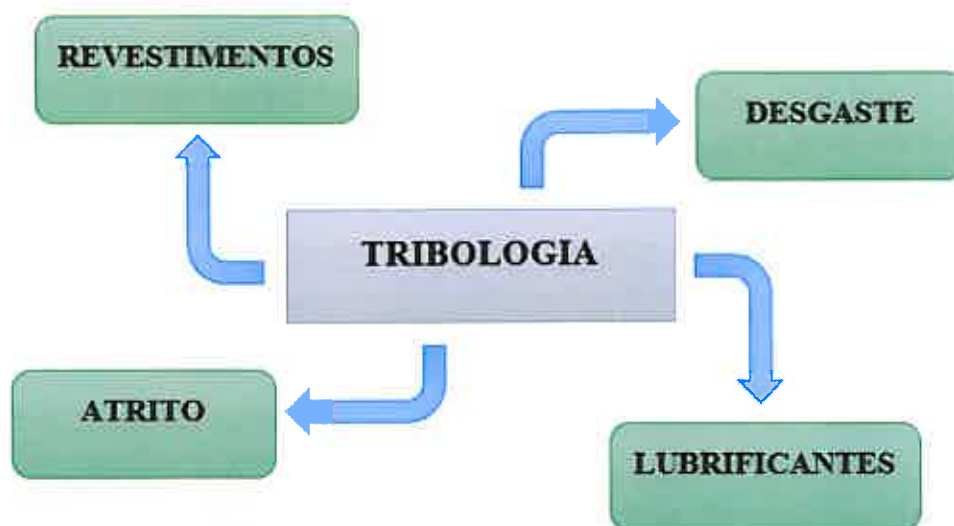


Figura 1 - Esquema dos campos que formam a Tribologia

De seguida são apresentados alguns conceitos e definições sobre Tribologia, bem como o contexto em que foi inicialmente mencionado.

2.1 Conceito e origem da Tribologia

Segundo Halling (1975), a Tribologia é uma palavra que deriva do grego, onde “Tribos” significa roçar, fricção e “Logos” significa ciência ou ramo do saber, sendo assim a tradução literal da palavra Tribologia significa o estudo ou ciência da fricção. A palavra “*Tribology*” foi utilizada pela primeira vez durante um relatório publicado pelo Departamento de Ciência e Educação da Grã-Bretanha, quando decorria o ano de 1966. Nesse documento conhecido como o relatório Jost (Jost, 1966), vinha mencionada a definição de Tribologia, já referenciada anteriormente (esta definição ainda é nos tempos de hoje universalmente aceite). Para além da introdução do termo “Tribologia”, o relatório Jost referiu pela primeira vez o custo associado às falhas decorrentes dos fenómenos de atrito, sendo referido que seria possível poupar cerca de 515 milhões de libras por ano (à época), se fossem evitadas as avarias relacionadas com o desgaste e, de uma maneira geral, a falha mecânica das superfícies técnicas. Neste relatório foram identificadas como principais causas do problema as correntes deficiências a nível das técnicas de lubrificação utilizadas e dos métodos de manutenção aplicados, bem como erros do próprio projecto, e recomendava a aplicação dos conhecimentos já consolidados, e de outros a desenvolver no âmbito da ciência e da tecnologia da lubrificação e dos lubrificantes, dos materiais, dos processos de fabrico e dos métodos de manutenção (Jost, 1966).

Esta ampla definição de Tribologia, demonstra a grande complexidade do assunto.

Embora a definição do termo Tribologia seja recente, os nossos antepassados já aplicavam soluções práticas de Tribologia há séculos atrás. Por exemplo, a invenção da roda, mostra o interesse do homem em reduzir o atrito durante o movimento optando por um movimento de rolamento, de menor atrito, face ao de escorregamento (Halling, 1975). De acordo com Dowson (1979), talvez a mais antiga evidência de Tribologia tenha tido origem no período paleolítico, com a descoberta do fogo pelo homem a partir do calor gerado pelo atrito entre pedaços de madeira, ou a partir das faíscas resultantes da fricção entre pedras. Dowson menciona ainda que o povo do Egipto Antigo empregava lubrificantes à base de gordura animal nas chumaceiras das rodas das suas carruagens. A título de exemplo apresenta-se na Figura 2 o transporte de uma estátua egípcia onde, para

reduzir o atrito, um escravo coloca água no caminho (Zum-Gahr, 1987; Dowson, 1979).

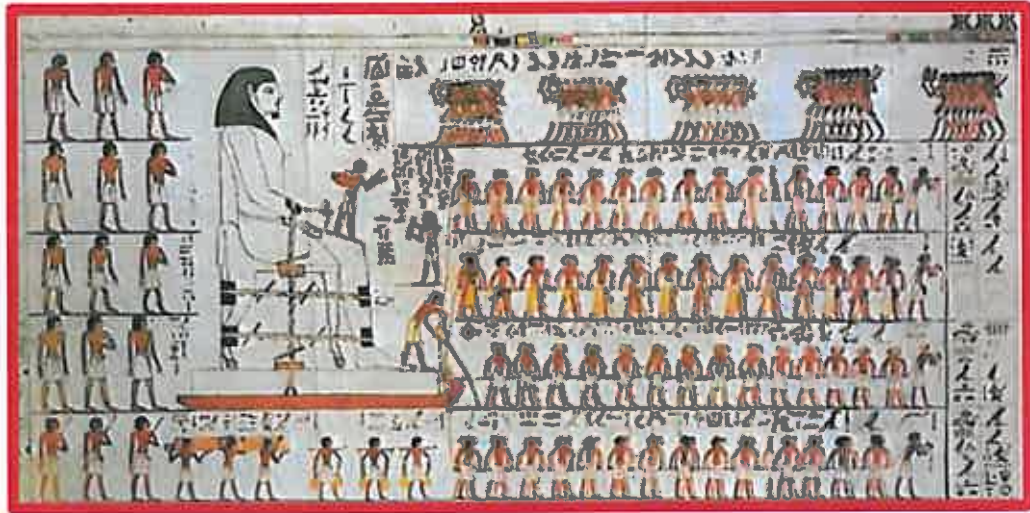


Figura 2 - Aplicação de água por gravidade para a redução de atrito no Egito 2.400 A.C.
(Fonte: Layard, 1953)

2.2 Importância da Tribologia e suas áreas de domínio

No nosso quotidiano a Tribologia encontra-se presente em várias situações, que vão desde a simples prática de desporto, tal como a escalada, sky, snowboard, até por exemplo, à simples actividade de escovar os dentes, onde ocorre um desgaste controlado, com a finalidade de limpar a sujidade entre os dentes e, ao mesmo tempo, manter o esmalte dos dentes (Halling, 1975).

A Tribologia é importante no facto de permitir prolongar a vida útil dos materiais e peças, evitando o desgaste drástico e falhas em equipamentos, nomeadamente em engrenagens, embraiagens, rolamentos e, conseqüentemente tem um enorme impacto, permitindo obter poupanças enormes a níveis de manutenção (como concluído no relatório Jost).

O campo de estudo da Tribologia está interligado a muitas áreas de conhecimento, tais como a química, a mecânica, a física, a ciência dos materiais, a termodinâmica, a estática e dinâmica e a metrologia, entre outros. A Tribologia é assim caracterizada pelo seu aspecto multidisciplinar, como se poderá reconhecer melhor na breve e seguinte descrição dos seus mais importantes domínios e ilustrado na Figura 3.



Figura 3 – Esquema representativo dos domínios da Tribologia

- Controle do Atrito e do Desgaste: O maior interesse técnico recai na redução do atrito e conseqüente minimização do desgaste, genericamente conseguidas por um processo de lubrificação, em complemento, ou não, da prévia preparação das superfícies interactuantes e eventual aplicação de tratamentos de superfície adequados.

Contudo o oposto é também estudado em Tribologia, ou seja, quando se pretende verificar um elevado valor de atrito, de um modo controlado, como por exemplo nos casos dos travões, das embraiaçgens, das rodas de atrito, entre outros.

- Tipos de Contacto: Nos tipos de contacto, em geral, considera-se a forma física do contacto, ou seja o tipo de par cinemático que se estabelece (conforme descrito na secção 2.3). Analisa-se o tipo de movimento relativo, i.e. se se trata de um movimento de escorregamento, de rolamento, ou mesmo de ambos, e ainda a existência ou não de um lubrificante entre superfícies de contacto, isto é, se estamos perante um contacto lubrificado ou de um contacto seco.
- Tipos e os Métodos de Lubrificação: Consideram-se os vários modos de criação e manutenção de uma película lubrificante na zona de contacto, denominada “ponto de lubrificação”, ponto esse que separa as superfícies interactuantes. Distinguem-se a este respeito, e de um modo geral, os

seguintes tipos de lubrificação: hidrodinâmica, hidrostática, elasto-hidrodinâmica, limite (ou camada limite) e sólida.

Neste ponto são também estudadas as diversas formas de fazer chegar o lubrificante aos pontos a lubrificar. Relativamente à grande multiplicidade de soluções, poder-se-ão mencionar métodos de lubrificação como a lubrificação por capilaridade, chapinhagem, sistema óleo-hidráulico, aerossol, entre outros.

- O Estado Geométrico e Metalúrgico das Superfícies: É analisado a influência da rugosidade das superfícies interactuantes e do seu estado de endurecimento, bem como a respectiva composição química no comportamento do par.
- Os Materiais: Neste domínio estudam-se as melhores combinações para os materiais dos pares cinemáticos. A título de exemplo pode referir-se, que para veios de aços os melhores parceiros são os bronzes e/ou revestimentos de metais macios.
- Os Lubrificantes: Refere o grande domínio da investigação, desenvolvimento e aplicação dos lubrificantes, ou seja, a sua obtenção e modo de produção e os seus tipos básicos, tais como minerais, sintéticos, massas entre outros, as suas propriedades e os seus aditivos (Carinhas, 2010).

2.3. Definição de par cinemático

Um mecanismo é definido como um conjunto de elementos interligados que possuem movimentos relativos perfeitamente determinados.

Define-se desta forma par cinemático como a união móvel entre dois elementos de modo que os seus movimentos se tornam mutuamente limitados. Só ocorre um par cinemático entre dois elementos se estes tiverem um determinado contacto, e se esse contacto permitir o movimento relativo entre eles (Paulo Flores, 2005).

As ligações impostas ao movimento relativo de um elemento do par cinemático restringem os seus movimentos em relação aos movimentos que

possuíam em estado livre. As restrições impostas ao movimento relativo entre os dois elementos que formam o par dependem do modo de ligação entre eles, e essas restrições impostas aos pares cinemáticos designam-se por condições de ligação.

Dependendo do tipo de contacto que se estabelece entre os dois elementos do par, o par cinemático classifica-se em superior e inferior.

O par cinemático superior surge quando o contacto entre os dois elementos que formam o par ocorre segundo um ponto ou uma linha, situações que podem ser exemplificadas respectivamente pelo contacto de uma esfera num plano ou de um cilindro sobre um plano. De notar que estes contactos pontuais ou lineares efectivamente só ocorrem do ponto de vista teórico. De facto todos os corpos são mais ou menos deformáveis pelo que na realidade o contacto é feito através de pequenas áreas resultantes da interdeformação das superfícies interactuantes.

O movimento relativo associado aos pares cinemáticos superiores é o movimento de rolamento embora possa existir associada uma maior ou menor componente de escorregamento, resultante do arrastamento de um dos corpos sobre o outro no ponto ou linha de contacto.

Relativamente aos pares cinemáticos inferiores – estes surgem quando as superfícies interactuam por contacto superficial, por exemplo, o caso de um cubo sobre um plano. Neste caso o movimento relativo é o de escorregamento e, de acordo com as coordenadas referenciais, os pares cinemáticos inferiores classificam-se em vários subtipos, tal como referido na Tabela 1.

Tabela 1 – Características dos sub-tipos de pares cinemáticos inferiores

(Sub) TIPO PAR	COORDENADAS INDEPENDENTES	Nº GRAUS DE LIBERDADE	(Sub) TIPO MOVIMENTO RELATIVO
a) Giratório	$\Delta\theta$	1	Circular
b) Deslizante	Δs	1	Linear
c) Helicoidal	$\Delta\theta$ ou Δs	1	Helicoidal
d) Cilíndrico	$\Delta\theta$ ou Δs	2	Cilíndrico
e) esférico	$\Delta\theta$ e $\Delta\phi$ e $\Delta\psi$	3	Esférico
f) Plano	Δx e Δy e $\Delta\theta$	3	Plano

(Adaptado de: Sobral, 2015)

Na Figura 4 é visível a representação dos sub-tipos de pares cinemáticos inferiores, giratório, deslizante, helicoidal, cilíndrico, esférico e plano.

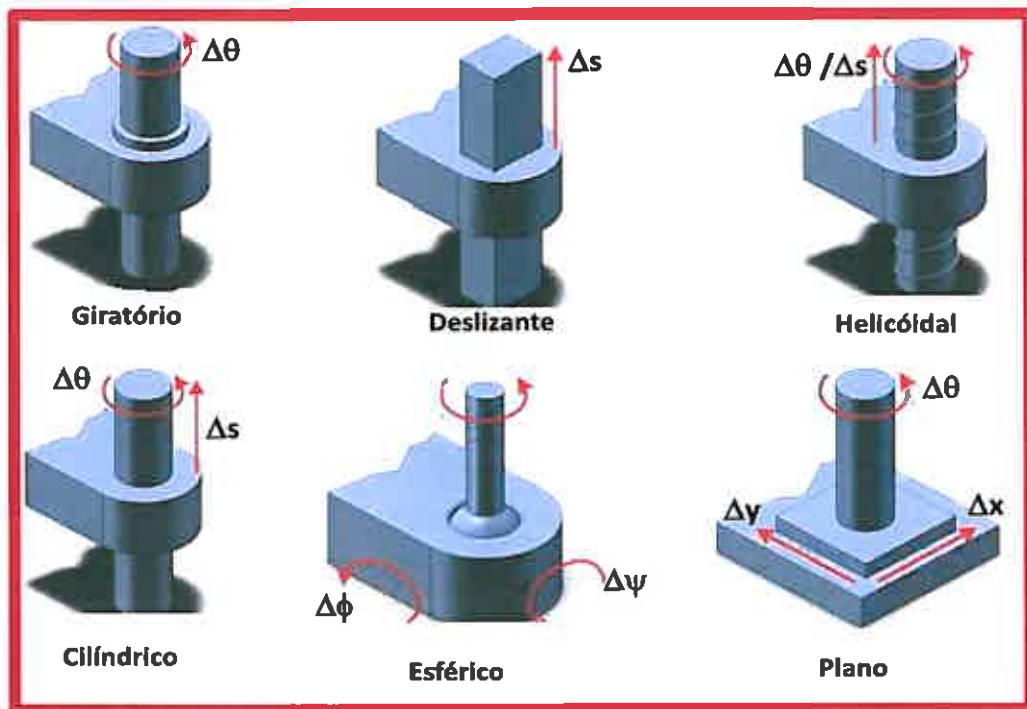


Figura 4 – Representação dos tipos ou sub-tipos de pares cinemáticos inferiores.

Os conjuntos de elementos interligados por pares cinemáticos são denominados cadeias cinemáticas. Portanto, quaisquer composições de elementos interligados, desde que mantenham movimento relativo entre si, constituem cadeias cinemáticas.

A classificação das cadeias cinemáticas é efectuada tendo em conta a função dos pares cinemáticos e dos elementos que estão presentes na cadeia. Sendo assim, as cadeias cinemáticas classificam-se em abertas ou fechadas e elementares ou compostas, ou seja, o que diferencia as cadeias cinemáticas é o número de pares cinemáticos formados pelos elementos constituintes da cadeia.

As cadeias cinemáticas podem-se apresentar conforme o esquema representado na Figura 5.

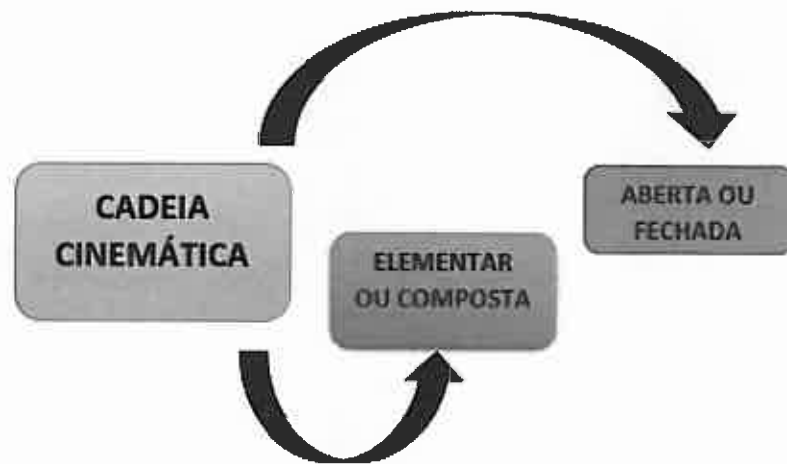


Figura 5- Classificação das cadeias cinemáticas

A cadeia cinemática aberta é a cadeia cinemática onde pelo menos um dos elementos da cadeia forma apenas um par cinemático. A cadeia cinemática fechada é a cadeia cinemática onde todos os elementos formam pelo menos dois pares cinemáticos.

Por outro lado define-se cadeia cinemática elementar como aquela onde todos os elementos formam no máximo dois pares cinemáticos. Da mesma forma a cadeia cinemática composta é a cadeia cinemática onde pelo menos um dos elementos forma mais de dois pares cinemáticos (Carboni, 2008).

2.4. Sistema Tribológico e Tribo-sistema

Todo o equipamento sujeito a cargas e a deslocamentos necessita de análise Tribológica. A solução mais lógica é o uso de lubrificantes, mas dependendo da complexidade do projecto devem-se adoptar outras práticas (Stoeterau, 2004).

Para uma abordagem sistemática de um Sistema Tribológico, começa-se pela dedução lógica de que as propriedades das superfícies de contacto de dois corpos em interacção, bem como as propriedades do lubrificante existente deverão agir entre si para a obtenção de um comportamento Tribológico final, característico da combinação desses componentes.

Contudo, para caracterizar na totalidade o conjunto acima mencionado tem que se considerar o efeito do ambiente envolvente à ligação, ou seja, aos dois elementos em contacto e ao lubrificante, sendo então adicionado um terceiro

componente que é o meio envolvente para obtermos um sistema Tribológico ou Tribo-Sistema (Figura 6).

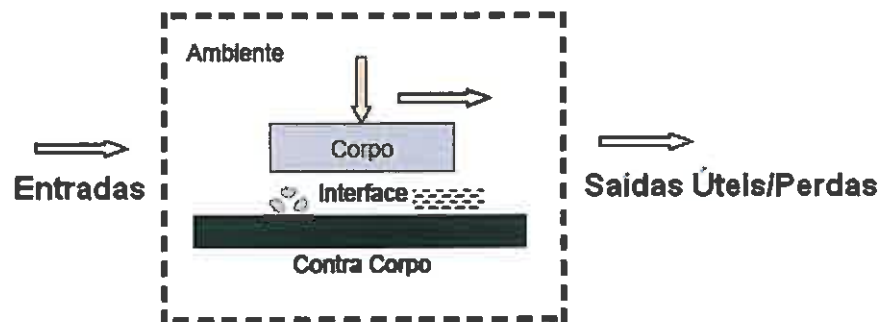


Figura 6 – Tribo-Sistema
(Fonte: Stoeterau, 2004)

Tomemos como exemplo o Sistema Tribológico de uma chumaceira de escorregamento, ilustrada na Figura 7:



Figura 7 – Chumaceira de Escorregamento

Neste caso particular os elementos que constituem o tribo-sistema são:

- Corpo-base: casquilho, usualmente em bronze;
- Corpo oposto: moente do veio, tipicamente em aço;
- Material intermédio: por exemplo, um óleo lubrificante;
- Meio ambiente: vulgarmente, o ar atmosférico.

Contudo estes elementos materiais do Sistema Tribológico não são suficientes por si só para caracterizar na íntegra a chumaceira de escorregamento, ou seja, há que considerar para posse do conhecimento completo da estrutura as propriedades desses elementos, tais como, a geometria e a composição química dos corpos, as propriedades físico-químicas dos lubrificantes e respectivos aditivos, a temperatura e a agressividade química do meio ambiente envolvente bem como, as reacções químicas entre as superfícies de contacto e certos aditivos

do lubrificante (L. Villabón e A. Sinatora, 2006). Será obviamente a relação entre estes parâmetros que irá influenciar o comportamento real do Sistema Tribológico tal como exemplificado esquematicamente na Figura 8 onde se indicam as variáveis de entrada, correspondentes aos factores de solicitação, e as variáveis de saída (trabalho útil e perdas) que serão função do Tribo-Sistema em causa.

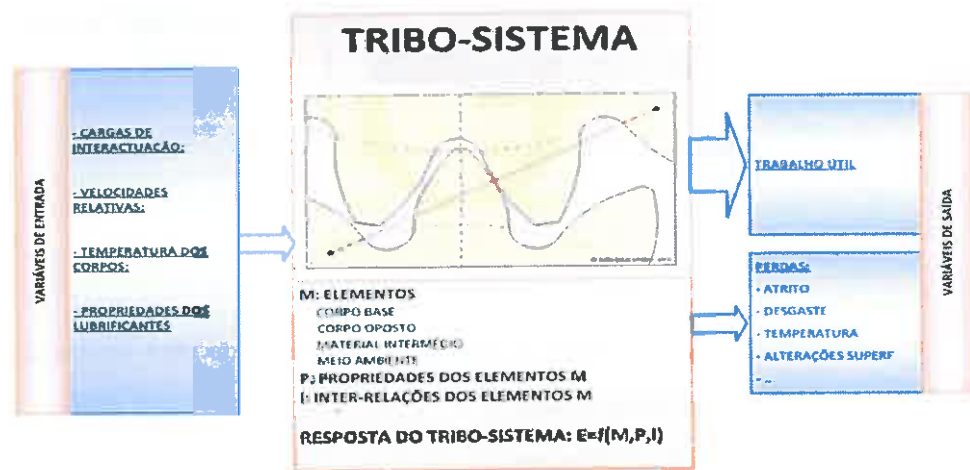


Figura 8 – Modelo analítico de um sistema tribológico genérico e exemplo de possíveis variáveis de entrada e saída

(Fonte: Sobral, 2015)

Na Tabela 2 exemplificam-se as constituições (elementos) de alguns Tribosistemas comumente encontrados em aplicações industriais.

Tabela 2 – Exemplos de Tribo-Sistema

TRIBO-SISTEMA	CORPO-BASE	CORPO OPOSTO	MATERIAL INTERMÉDIO	MEIO AMBIENTE
Chumaceira de Escorregamento	Casquilho	Veio (moente)	Óleo mineral	Ar
Engrenagem	Carreto (roda1)	Roda (roda2)	Óleo de transmissões	Nevoeiro do óleo e ar
Montagem com aperto	Pinho	Furo	-	Ar
Propulsor de navio	Hélice	Água do mar	-	Ar-Água do mar
Travão de disco	Calço	Disco	-	Ar seco, ar húmido, chuva
Torno mecânico	Ferro de corte	Peça a trabalhar	Óleo de corte	Nevoeiro de óleo e ar
Pipeline	Tubo	Partículas de rocha	Petróleo bruto	Petróleo bruto e ar

Capítulo 3

Desgaste

O desgaste pode ser genericamente definido como a perda progressiva de material provocada pela interacção mecânica de duas superfícies em contacto, sob carga, e em movimento relativo (de escorregamento, rolamento, ou ambos). Este fenómeno é deste modo característico dos Sistemas Tribológicos, originando consequente falha mecânica das superfícies de interface, sendo dependente dos dois factores de sollicitação - carga e velocidade – e influenciados pelos factores ambientais.

A deterioração das superfícies de contacto provoca, por via de regra, a produção de partículas de desgaste, seja por meio de um processo sequencial de adesão, transferência, e libertação de material, seja por meio de um processo de produção directa do tipo de corte por arranque de aparta, seja ainda por meio de um processo de picagem por fadiga superficial. Estes três tipos de produção de partículas correspondem aos três principais tipos de desgaste por interacção integralmente sólida – ou sólido-sólido – designando-se respectivamente por: desgaste adesivo, desgaste abrasivo e desgaste por fadiga.

Os modos de falha que ocorrem por simples acção de fenómenos corrosivos, pese embora tratem-se também de processos de falha das superfícies, não serão no entanto considerados neste capítulo já que para ocorrerem não necessitam que exista interacção mecânica de superfícies, bastando a presença de um meio agressivo. Os vários tipos de corrosão, por si só, caem assim fora do âmbito da Tribologia. O que haverá, sim, que considerar, em certos modos de desgaste, é a influência que a corrosão poderá ter nesses processos.

Uma outra forma de desgaste é a que se pode dar por interacção líquido-sólido, sendo os seus exemplos mais comuns os de erosão fluida e de cavitação.

3.1. Tipos de desgaste

De acordo com vários autores (Zum Gahr (1987) e Hutchings (1987)) existem diferentes tipos de desgaste, que podem ser distinguidos de acordo com o mecanismo de remoção de material. As formas de desgaste mais comuns são os modos referidos em cima e que se encontram representados na Figura 9.



Figura 9 - Desenho esquemático dos três modos representativos de desgaste

(Fonte: Kato, 2001)

Os diferentes modos de desgaste ocorrem através de diversos mecanismos que são descritos por mudanças na superfície durante o movimento. De seguida encontra-se um resumo dos mecanismos de desgaste mais comuns (Kato, 2001).

3.1.1 Desgaste Adesivo

O modo de desgaste adesivo é um desgaste típico entre superfícies de dureza semelhante e, sendo inerente ao contacto dinâmico de todos os materiais, este tipo de desgaste é impossível de evitar. Processa-se de acordo com as seguintes três fases apresentadas (Figura 10).



Figura 10- Etapas do desgaste adesivo

(Fonte: Sobral, 2015)

A primeira etapa do desgaste adesivo corresponde ao processo de adesão, onde, devido às elevadas pressões que se fazem sentir nas pequenas áreas de contacto (picos das asperidades (1ª fase)), se estabelece uma ligação química (tipo Van der Waals) entre as duas superfícies em contacto, designada vulgarmente por soldadura a frio ou microsoldadura. De notar que essa ligação é tanto mais eficaz, quanto menos contaminadas essas superfícies se apresentem. Contudo na prática, as superfícies encontram-se sempre com algum grau de contaminação, nem que seja pela mais simples película de oxidação, pelo que o processo de adesão se restringe às pequenas zonas de contacto entre asperidades, onde, devido à carga e ao escorregamento, essa película de contaminante é rompida (Figura 10 (1ª fase)). É assim de realçar a importância da presença destas películas contaminantes nas superfícies resultantes para a minimização do desgaste adesivo (Carinhas, 2010).

A segunda etapa do desgaste adesivo corresponde à transferência de material. Esta resulta do corte das asperidades do material menos dúctil pela raiz por acção do movimento relativo do par cinemático. Como resultado, alguma porção do material é deste modo transferida de uma das superfícies para outra superfície (2ª fase). De notar que nesta fase ainda não ocorre desgaste uma vez que não há perda de massa do conjunto dos dois corpos apenas transferência entre corpos.

Na terceira etapa temos o arranque de partícula que ocorre nas saliências, onde já houve acumulação de material transferido e que se encontra fragilizado por esse processo, sendo obviamente provocado pela acção de raspagem da outra superfície (3ª fase). Trata-se efectivamente da fase onde irá ocorrer o desgaste.

O desgaste por adesão depende de diversos factores, sendo os mais importantes:

- Dureza das Superfícies: quando se pretende eliminar ou evitar o desgaste, aumenta-se a dureza via por exemplo tratamentos térmicos ou termo-químicos. De uma maneira geral, o aumento da dureza de uma determinada superfície, diminui o grau de deformação plástica das asperidades quando em contacto dinâmico com outra superfície, o que por sua vez se traduz na diminuição da área real de contacto. Diminui-se assim a dimensão das partículas de desgaste

- Carga Aplicada: a carga aplicada num determinado sistema Tribológico é o factor que mais influencia o seu desgaste. Com efeito, vários autores, chegaram à conclusão que o desgaste, ou seja, o volume desgastado de uma superfície é influenciado pela carga que lhe é aplicada. O aumento da carga aplicada, aumenta a área real de contacto através do aumento de deformação plástica das irregularidades, aumentando desta forma a probabilidade de formação de partículas de desgaste (Kato, 2001).
- Velocidade: a velocidade é um componente que influencia o desgaste das superfícies em contacto. Durante a fase de formação de ligações adesivas entre as superfícies, o aumento da velocidade de deslizamento dificulta a soldadura entre as asperidades, pois promove o afastamento rápido das superfícies. Conclui-se assim que quanto mais lento for o deslizamento relativo das superfícies, mais facilmente ocorre a adesão e, conseqüentemente, o desgaste do material. Assim de uma maneira geral o aumento da velocidade diminui o desgaste.

3.1.2 Desgaste Abrasivo

O desgaste abrasivo, que surge tipicamente no caso em que as superfícies em contacto apresentam durezas diferentes, resulta da acção cortante das asperidades do material mais duro ou de partículas abrasivas que se encontrem presentes entre duas superfícies, num processo semelhante ao do corte por arranque de aparas. A intensidade do desgaste depende de aspectos como o tamanho, dureza, pressão de contacto e velocidade das partículas (Bayer, 2004). As Figuras 11 e 12 ilustram a diferença entre o desgaste a dois corpos, que surge quando as partículas são endógenas ao tribo-sistemas (resultantes do desgaste adesivo), e a três corpos, onde as partículas resultam de contaminação do meio exterior ou seja, são exógenas ao Tribo-Sistema.



Figura 11 - Desgaste abrasivo a dois corpos

(Fonte: Stachowiak, 2001)

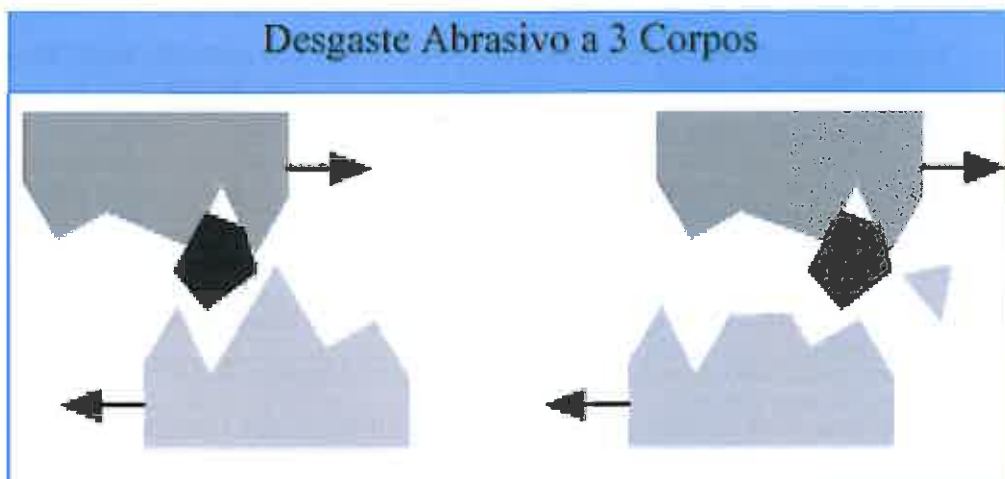


Figura 12- Desgaste abrasivo a três corpos

(Fonte: Stachowiak, 2001).

As partículas em causa, quer tenham sido produzidas por um processo de desgaste adesivo, ou seja, sejam de origem endógena, quer sejam de origem exógena por advirem de um meio-ambiente ou de um material intermédio contaminado, poderão apresentar-se aprisionadas entre as superfícies interactuantes, ou apresentarem-se livres podendo embater mais ou menos violentamente sobre uma dada superfície, por serem projectadas contra esta quando transportadas no seio de um caudal fluído.

No primeiro caso o mecanismo de desgaste denomina-se, simplesmente, por *abrasão*; enquanto no segundo caso designa-se por *erosão sólida*.

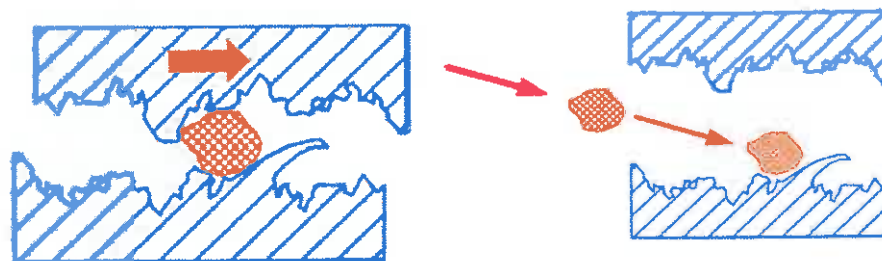


Figura 13- Modos de desgaste abrasivo

(Fonte: Sobral, 2015)

Na Figura 13 podem-se visualizar cada um desses dois modos do desgaste abrasivo. Na Figura do lado esquerdo pode-se ver uma partícula agarrada a uma das superfícies, cortando e arrancando material na outra (modo de *abrasão*); na Figura do lado direito vê-se uma partícula livre, projectada sobre uma superfície e nela provocando, de modo semelhante, arrancamento de material (modo de *erosão sólida*).

Uma forma de minorar o desgaste abrasivo é através do aumento da dureza superficial utilizando tratamentos térmicos ou termo-químicos. Efectivamente à medida que a dureza se aproxima da dureza das próprias partículas estas não só terão mais dificuldade de cortar, como ainda se arredondarão por quebra dos seus gumes, reduzindo de uma ou de outra forma o desgaste. Relativamente à erosão sólida esta pode ser minimizada através da filtragem dos fluídos, como é prática corrente no caso da pneumática, óleo-hidráulica, sistemas de vapor, entre outros.

Os principais factores que influenciam o desgaste por abrasão são:

- Carga Aplicada: a carga aplicada no contacto é directamente proporcional ao desgaste por abrasão, tal como verificado por diversos autores (Zum Gahr (1987) e Hutchings (1987)). Este facto é explicado pela maior profundidade de penetração das partículas abrasivas na superfície mais macia.
- Dureza dos Materiais: a dureza dos materiais é inversamente proporcional ao desgaste por abrasão, ou seja, é o contrário da carga aplicada, sendo que um aumento da dureza superficial diminui o desgaste abrasivo (Rabinowicz, 1965).

- Geometria das Partículas: o desgaste abrasivo a três corpos depende integralmente das dimensões, da forma e da distribuição das partículas. As partículas mais duras apresentam faces mais agudas (cortantes), ao passo que as partículas dúcteis apresentam formas mais arredondadas. Sabe-se que as partículas que apresentam arestas cortantes causam desgastes mais acentuados que as partículas arredondadas. Quanto mais agudas forem as arestas das partículas abrasivas, maior será a sua acção abrasiva, e quando aliada ao impacto, ou fortes pressões, estas partículas podem penetrar na superfície mais profundamente (Hernandez, 1997).

3.1.3 Desgaste por fadiga

Este tipo de desgaste é típico de pares cinemáticos superiores onde, como já foi referido, o contacto entre as superfícies interactuantes é pontual ou linear. Tomemos o exemplo de duas superfícies interactuantes de um par cinemático superior pressionadas uma contra a outra. Nestas condições estabelece-se um estado de tensão na pequena zona de contacto, altamente concentrado e tridimensional, que irá estar na origem deste tipo de modo de falha das superfícies, de influência determinante na sua duração útil. Nos casos em que o carregamento é variável com o tempo, as falhas que ocorrem nas superfícies por um fenómeno de fadiga, denominam-se *fadiga de contacto* ou *fadiga superficial* (Peterson 1980).

Como exemplo do fenómeno de fadiga de contacto, pode apontar-se o processo ocorrido nos rolamentos, onde, se considerarmos um ponto da pista de um rolamento de esferas, a cada volta efectuada todas as esferas transmitem a carga intermitentemente nesse ponto, o que irá provocar um estado de tensão cíclico pontual. Na Figura 14 apresenta-se o aspecto deste modo de desgaste no Tribo-Sistema roda/carril.



Figura 14 – Fenómeno de fadiga de contacto entre a interacção roda-carril

O desgaste por fadiga surge apenas sob condições muito específicas, ou seja, surge por exemplo no contacto de componentes sujeitos a esforços elevados, em rolamento puro ou com muito pouco escorregamento e sujeitos a condições de ausência de lubrificação ou em lubrificação limite. É de salientar o facto de neste modo de desgaste surgir uma tensão de corte máxima na zona sub-superficial que varia periodicamente, que será a responsável pela formação e propagação de fissuras. O aparecimento destas depende do número de ciclos efectuados pelo componente (Baptista 1983).

Archard considera que o desgaste por fadiga pode apresentar-se de forma macroscópica e microscópica (Archard 1980).

O desgaste de forma macroscópica acontece sob a forma de fadiga de contacto de rolamento, podendo ser de tal forma severa que leva à falha do componente. Como ocorre noutras formas de fadiga, o número de ciclos de tensão necessários para a falha diminui com o aumento da tensão. O tipo de falha observada consiste no aparecimento de micro-crateras formadas pelo arrancamento de material à superfície de contacto, que com a continuação se unem formando as macro-crateras. As profundidades destas micro-crateras, correspondem normalmente à distância abaixo da superfície à qual se encontra a tensão de corte máxima (Archard 1980).

De acordo com Rabinowicz, o desgaste por fadiga surge através de fissuras de fadiga que podem ter origem quer na superfície de contacto quer no interior do sólido, ou seja, abaixo da superfície de contacto (Rabinowicz 1965). Rabinowicz propõe ainda que os pontos de menor resistência, como os defeitos estruturais no sólido na zona sub-superficial, próximos da zona na qual se estabelecem as tensões máximas, estejam na origem da formação de fissuras internas. As solicitações permitem a propagação e junção de microfissuras próximas, formando deste modo, fissuras de fadiga que crescem paralelamente à superfície. Atingido o comprimento crítico dá-se a fractura, que é perpendicular à superfície, originando desta forma partículas de forma lamelar (Rabinowicz 1965).

3.1.4. Outros tipos de desgaste

Os desgastes referidos anteriormente são os principais tipos de desgaste existentes, sendo que raramente actuam isoladamente. Existem ainda outros tipos de desgaste, que são considerados como sub-formas dos principais. Entre estes

podem referir-se o desgaste por cavitação, e por erosão, sobre os quais irá de seguida fazer-se uma breve descrição.

Desgaste por cavitação

Designa-se por cavitação a formação de cavidades (bolsas de vapor) no seio de um fluido em movimento. Estas são consequência da aceleração do fluido em determinadas zonas o que provocará uma redução da pressão local do líquido. Caso esta se torne inferior à pressão de vapor o fluido vaporiza formando pequenas bolsas de vapor ou cavidades. Por sua vez, quando a pressão retorna ao normal (sendo maior do que a pressão de vapor do fluido), implosões ocorrem gerando bolhas de vapor ou cavidades em colapso. Cada cavidade de vapor dura pouco tempo, pelo que qualquer aumento da pressão faz com que o vapor dentro da bolha se condensa instantaneamente.

Este colapso das bolsas de vapor provoca ondas de choque que produzem forças de alto impacto nas superfícies metálicas adjacentes levando à destruição da superfície e deslocamento de material. Tipicamente a primeira onda de choque produz uma tensão de compressão na superfície sólida, e quando a onda é reflectida gera uma tensão de tração que é normal à superfície.

No processo de desgaste por cavitação, o líquido é o meio que provoca o desgaste, ou seja, o desgaste por cavitação não requer uma segunda superfície, mas exige apenas que o movimento entre a superfície e o fluido tenha intensidade suficiente para reduzir a pressão local no fluido para um valor inferior ao da sua pressão de vapor.

A cavitação ocorre normalmente em condições hidrodinâmicas, caracterizada por uma alteração súbita e grave da pressão hidrostática existente.

A cavitação pode ser combatida através da minimização dos esforços de tracção sobre o fluido, ou seja, os operadores dos equipamentos devem diminuir o nível das condições de vácuo nas potenciais zonas de cavitação, tal como, aumentar a pressão na saída das válvulas de estrangulamento, aumentar a pressão de entrada na zona de sucção da bomba, utilizar um fluido com baixa pressão de vapor, utilizar um líquido de baixa viscosidade ou aumentar a temperatura do fluido.

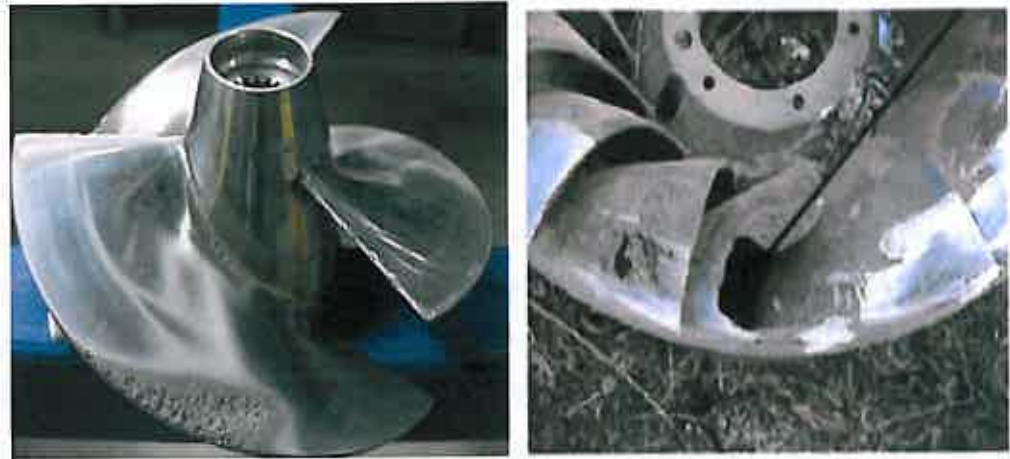


Figura 15 – Exemplificação do desgaste provocado por cavitação

(Fonte: <http://fenomenosdaengenharia.blogspot.pt/2013/06/turbina-vapor-cavitacao.html>)

Desgaste por erosão

Este tipo de desgaste surge quando existe interacção entre um fluido e um sólido e resulta do arranque de material provocado pelo impacto do fluido na superfície. De notar que neste modo de desgaste há que distinguir duas situações diferentes. Uma delas corresponde ao caso em que existem partículas em suspensão no fluido. Neste caso estamos perante uma situação de erosão sólida onde as partículas que são arrastadas no seio do fluido, de elevada energia cinética, ao embater nas superfícies irão provocar crateras e rasgos. Os factores mais importantes no desgaste por erosão são a natureza dos materiais e o ângulo de incidência. Quanto mais duras forem as partículas projectadas maior irá ser o desgaste erosivo, sendo assim de esperar um valor do coeficiente de erosão é superior para materiais frágeis relativamente aos materiais dúcteis. Relativamente ao ângulo de incidência das partículas, pode referir-se que para os materiais frágeis o ângulo de incidência crítico é de 90° e que nos materiais dúcteis é de 15° (Barbedo 1983).

No caso em que o fluido não possui partículas em suspensão o desgaste resulta do impacto repetido das gotículas na superfície. Neste caso o mecanismo de desgaste é o de fadiga de contacto e toma o nome de erosão líquida. Após o impacto as gotículas são expelidas lateralmente pelo que o desgaste surge sob a forma de pequenas cavidades designadas por picadas de erosão líquida (Figura 16).



Figura 16 – Exemplificação de picadas de erosão líquida

3.2. Taxa/controlo de desgaste e Factor Pv

Uma forma corrente e prática de avaliar o desgaste é através da relação do volume de material perdido com as propriedades dos elementos do Sistema Tribológico e com os seus factores de sollicitação, ou seja, é necessário conhecer os vários factores de importância no processo de desgaste (Carinhas, 2010).

Assim, o volume desgastado vai ser função de uma série de parâmetros tais como:

- As propriedades dos corpos interactuantes onde se inclui o acabamento superficial do corpo oposto, por norma o material mais duro, e a dureza (H) do corpo base, por norma feito no material mais macio. Obviamente é expectável que o volume desgastado seja tanto maior quanto mais rugoso for o material do corpo oposto e tanto menor quanto maior for a dureza do corpo base.
- As propriedades do material intermédio sendo o factor determinante a lubricidade deste, ou seja, se o material intermédio tem a capacidade de reduzir o atrito ou, se pelo contrário tem efeito abrasivo, como seria o caso de contaminação externa.
- Os factores de sollicitação como a carga aplicada (F), a extensão do escorregamento (Δe) e a temperatura de serviço na interface. É também

intuitivo que neste caso o volume desgastado será tanto maior quanto mais elevados forem os valores destes parâmetros.

Em meados do séc. XX (1953), Archard, considerando fixas as características do corpo oposto, a temperatura de serviço e as características de material intermédio propôs a equação (3.1) que assume que o volume desgastado é directamente proporcional à carga aplicada (F), à extensão de escorregamento (Δe) e inversamente proporcional à dureza (H) do corpo base (Archard 1980).

$$V = K_H \cdot \frac{F \cdot \Delta e}{H} \quad (3.1)$$

O coeficiente de proporcionalidade - K_H - da equação de Archard (eq. 3.1) designa-se por coeficiente de desgaste sendo uma grandeza adimensional e pode ser encarada como a probabilidade de formação de uma partícula de desgaste. É fortemente influenciado pelas propriedades do metal e pela geometria das asperezas em contacto. Para desgaste adesivo este coeficiente varia entre 10^{-7} e 10^{-2} dependendo das condições operatórias e do material em causa.

Uma forma simples de determinar este parâmetro é através de ensaios de desgaste. Com efeito, conhecendo o volume desgastado de um material e por aplicação da expressão referida, pode-se calcular o coeficiente de desgaste do material, quando ele exhibe uma determinada dureza e esteja sujeito a um determinado escorregamento e a uma carga determinada. Contudo, em termos práticos, a determinação da dureza da superfície de contacto nem sempre é exacta uma vez que estas se encontram normalmente contaminadas. Assim em projecto utiliza-se um coeficiente de desgaste dimensional - k - definido como:

$$k = \frac{K_H}{H} \quad (3.2)$$

Pelo que a equação de Archard pode ser reescrita na forma

$$V = k \cdot F \cdot \Delta e \quad (3.3)$$

O coeficiente de desgaste dimensional costuma de apresentar os seus valores no domínio dos 10^{-17} a $10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, considerando-se desgastes suaves e

toleráveis para $k \leq 10^{-16} \text{ m}^2/\text{N}$ e desgastes severos para $k \geq 10^{-14} \text{ m}^2/\text{N}$ (Carinhas, 2010).

Se trabalharmos a equação anterior, podemos chegar a uma expressão mais prática para o controlo da taxa de desgaste. Para o efeito considerem-se os seguintes pressupostos normalmente válidos em condições de desgaste adesivo:

- O desgaste segundo a direcção de aplicação da carga é uniforme em toda a superfície de contacto, pelo que pode ser directamente controlado pela profundidade de desgaste (h), dada por $h = V/A$, onde A é a área projectada da superfície de contacto.
- A velocidade de escorregamento, v , é constante e portanto calculada por $v = \Delta e/\Delta t$, ou seja, é a relação entre a distância de escorregamento e o tempo gasto em a percorrer.
- Introduzindo a Pressão média (P), como a força exercida sobre a área projectada (A),

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

A equação 3.3 pode ser reescrita utilizando estes pressupostos:

$$A \cdot h = k \cdot P \cdot A \cdot v \cdot \Delta t \quad (3.5)$$

Obtendo-se a relação:

$$P \cdot v = \frac{1}{k} \cdot \frac{h}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Tendo em conta que k , é uma medida da resistência do material ao desgaste a uma determinada temperatura de serviço e que $h/\Delta t$ mede a redução da espessura pela unidade de tempo, factor Pv indica a possibilidade de um determinado material (k) a uma dada temperatura de serviço satisfazer uma certa duração (Δt), antes de ultrapassar um dado nível de desgaste crítico (h).

Em cada caso particular calcula-se o valor do factor Pv aplicado, isto é, relativo às suas condições de serviço, e verifica-se se este é inferior ao factor Pv

admissível para a aplicação em causa, relativo a valores aceitáveis, previamente estabelecidos para o caso em estudo, da profundidade de desgaste e da duração pretendida.

$$Pv \leq Pv_{adm} = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{h}{\Delta t} \right) \text{ admissível} \quad (3.7)$$

Na prática, é usual que os valores admissíveis do factor Pv apareçam na forma dos próprios gráficos da função $P(v)$, que se tratarão de rectas de inclinação negativa no plano ($\log P - \log v$), como se exemplifica na Figura 17. Deste modo, valores aplicados de Pv que correspondam a pontos localizados sobre aquelas rectas, ou para o seu interior, significarão condições aceitáveis de funcionamento; o que não irá suceder no caso contrário.

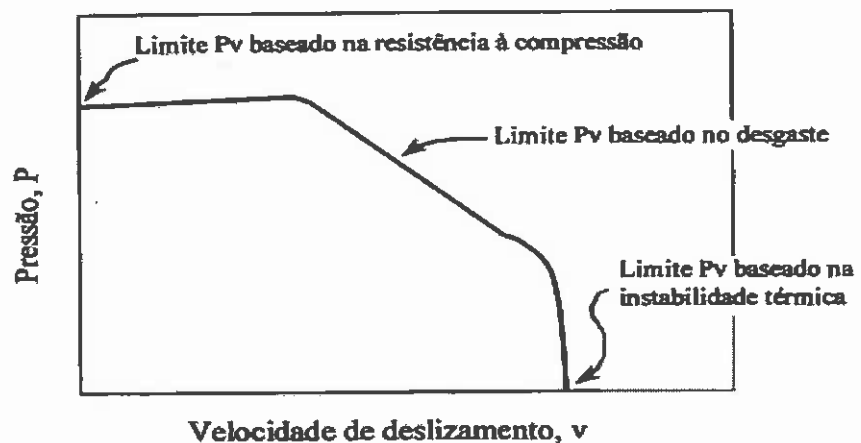


Figura 17 – Gráfico típico do Factor Pv

(Fonte: Jamison, 1994)

Como ilustrado em cima, o limite superior da pressão é determinado através da resistência à compressão do material e a velocidade máxima é determinada pela estabilidade térmica, condutividade, geração de calor e configuração do material. Sendo a forma da curva entre estes dois extremos determinada através da taxa de desgaste admissível e depende do critério de desempenho estabelecido pelo utilizador final (Jamison, 1994).

Os valores de Pv , geralmente obtidos experimentalmente, variam de material para material e as unidades geralmente expressas são MPa m/s.

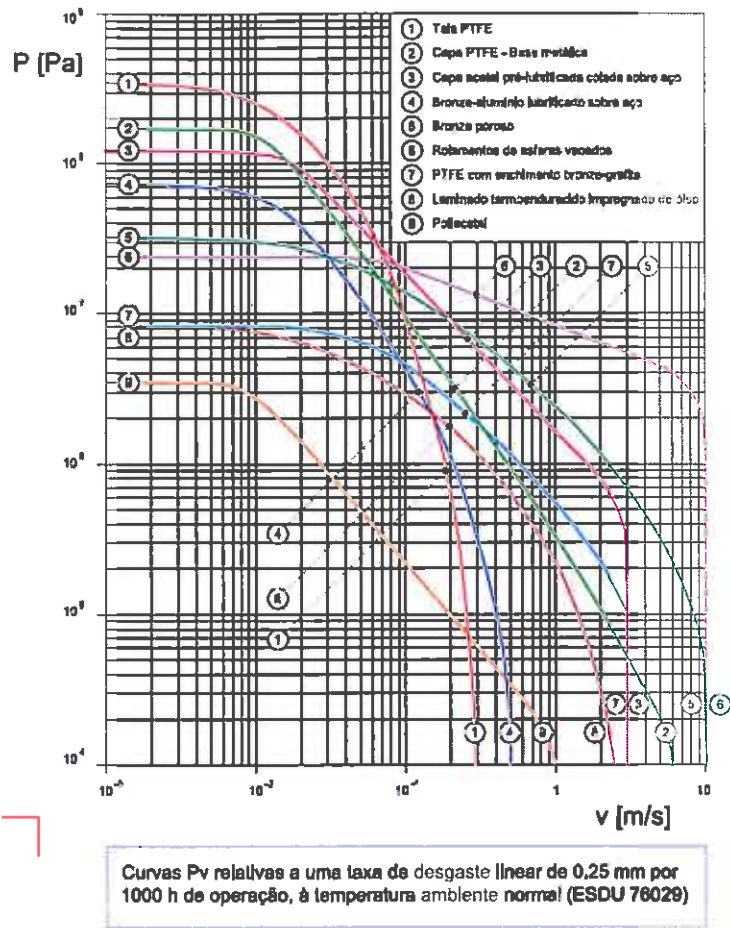


Figura 18 - Gráficos típicos do Factor Pv admissível relativo de chumaceiras secas e limite
 (Fonte: Sobral, 2015)

Capítulo 4

Atrito

O fenómeno do atrito é sentido pela sociedade humana desde há milhares de anos. Porém o seu efeito é utilizado diversas vezes de uma forma inconsciente, por exemplo, sempre que se pretende caminhar, travar um automóvel ou até transmitir movimento através de correias.

No entanto, o efeito do atrito nem sempre é benéfico. Quando se tem a intenção de deslocar um objecto pesado sobre uma determinada superfície, é sentido um esforço que é necessário realizar para vencer o atrito produzido nessa zona de contacto. Tem-se como consequências um aumento da temperatura na zona de contacto e respectivo desgaste das superfícies.

A resistência ao deslocamento relativo entre os corpos foi, nos tempos passados, objecto de muitas experiências e estudos para se compreender o seu mecanismo e efeitos. Como resultado dos vários estudos efectuados, foram desenvolvidos os lubrificantes, que, suportando a carga exercida no contacto, permitem uma separação das superfícies, bem como materiais sintéticos caracterizados por coeficientes de atrito muito baixos, apresentando, por essa razão, uma baixa resistência ao deslizamento.

Podem ser definidos dois tipos de atrito:

- Atrito de escorregamento: que surge em pares cinemáticos inferiores quando um corpo desliza sobre outro corpo (Figura 19).

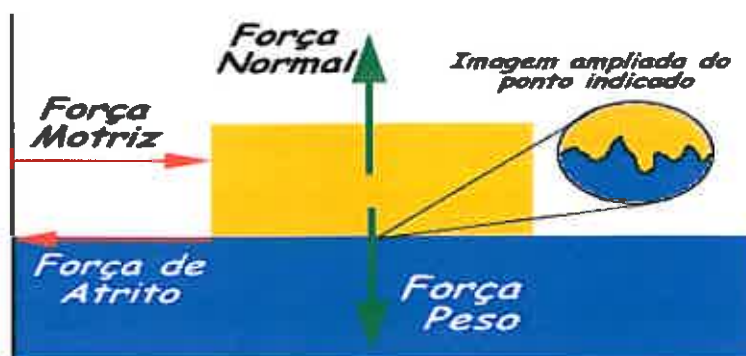


Figura 19 - Diagrama de corpo livre de um corpo sujeito à força de atrito por escorregamento

(Fonte: <http://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/forca-de-atrito-entenda-o-que-sao-atrito-estatico-e-atrito-cinetico.htm>)

- Atrito de rolamento: típico de pares cinemáticos superiores que se estabelece quando um corpo rola sobre uma determinada superfície (Figura 20).

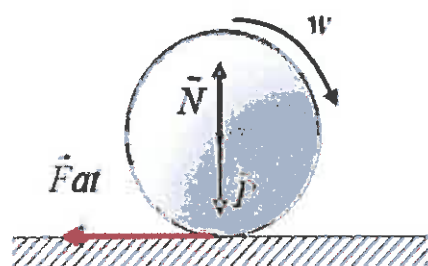


Figura 20 - Diagrama de corpo livre de um corpo sujeito à força de atrito por rolamento

(Fonte: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172013000300033)

No atrito de rolamento existe uma deformação elástica no ponto de contacto com a superfície, ou seja, como se existisse sempre uma pequena elevação que tem que ser vencida no ponto de contacto. Isto pois, porque num corpo idealmente rígido não existe atrito de rolamento.

De notar que o atrito é também normalmente classificado de acordo com o tipo de movimento em:

- Atrito estático: força que se opõe à iniciação do movimento;
- Atrito dinâmico ou cinético: quando existe efectivamente escorregamento entre os corpos (A. Barbedo, 1984).

4.1. A Origem da Força de Atrito

Em 1995 Rabinowicz afirmou que o atrito é a resistência ao movimento que existe quando um objecto sólido é movido tangencialmente em relação a uma superfície de contacto. O atrito em termos quantitativos é expresso como uma força, mais propriamente, força de atrito. A força de atrito é uma força que se opõe ao movimento dos corpos. Efectivamente quando se pretende que um corpo entre em movimento, aplicamos uma força sobre ele, porém esse corpo nem sempre se move. Isso porque passa a actuar sobre o corpo uma força que se opõe ao seu movimento, a força de atrito, como representado na Figura 19 (Rabinowicz, 1995).

De acordo com Halliday et al. (1996), da relação entre a força de atrito e a força normal, surge uma grandeza adimensional, denominada, coeficiente de atrito (μ). O coeficiente de atrito depende sempre dos materiais envolvidos e, sendo uma grandeza empírica, o seu valor é determinado através de dados experimentais.

Tal como referido anteriormente também se define coeficiente de atrito estático e dinâmico, dependendo da situação na qual se determina o coeficiente.

O coeficiente de atrito estático é determinado no instante de iminência do movimento relativo entre as superfícies sujeitas ao atrito, ou seja, quando as superfícies ainda não se moveram, representando-se por μ_e .

Por sua vez, o coeficiente de atrito dinâmico ou cinético ocorre no instante em que existe movimento relativo entre as superfícies, representando-se por μ_d . A força necessária para iniciar o deslocamento é superior àquela que é necessária para o manter, ou seja, a força de atrito estática é sempre superior à força de atrito dinâmica (Halliday, 1996) então verifica-se a relação 4.1.

$$\mu_d < \mu_e \quad (4.1)$$

De notar ainda que no caso dos fluídos newtonianos, o coeficiente de atrito (μ) não depende do movimento, porém, em relação ao deslizamento de fluídos não newtonianos a relação existente entre o coeficiente de atrito cinético e estático pode mudar.

Como verificado na Figura 19, existe sempre um par acção-reacção em relação à força de atrito e força matriz, se existe uma força de atrito na caixa em sentido oposto ao do movimento, existe uma força matriz a actuar para a frente em

sentido contrário (coeficiente de atrito estático μ_e enquanto a caixa está em repouso, coeficiente de atrito cinético μ_d quando a caixa começa a mover-se).

4.2. Leis do Atrito

O atrito começou a ser estudado por Leonardo da Vinci no século XVI que enunciou as leis do atrito seco. Porém só no século XVII estas foram experimentalmente confirmadas por Amontons, em França, denominadas por leis de Amontons. Um século depois, o físico francês Charles Augustin Coulomb trabalhando também no atrito, confirmou as três leis de Da Vinci-Amontons, tendo enunciado uma quarta lei.



Figura 21- Retrato dos físicos que estudaram as 3 leis do atrito: Leonardo da Vinci (1452-1519); Guillaume Amontons (1663-1705); Charles Coulomb (1736-1806).

(Fonte: <http://www.academiadeciencia.org.br/site/2013/01/30/leonardo-da-vinci/>;
<http://alchetron.com/Guillaume-Amontons-1077977-W> ;
http://todayinsci.com/C/Coulomb_Charles/CoulombCharles-Quotations.htm)

Na sequência do trabalho desenvolvido por Da Vinci, Amontons e Coulomb podem então enunciar-se as seguintes leis do atrito seco.

- 1ª lei - A força de atrito é proporcional à carga aplicada
- 2ª lei - A força de atrito é independente da área aparente de contacto
- 3ª lei - O atrito depende da natureza dos materiais em contacto.
- 4ª lei - A força de atrito é independente da velocidade de deslizamento, uma vez iniciado o movimento

A lei do atrito apesar de serem consideradas sobre o efeito teórico correctas é sabido que na prática as mesmas não o são.

De acordo com a 1ª lei a força de atrito pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$F_{a_x} = \mu_x \cdot N \quad (4.2)$$

onde,

F_{a_x} - é a força atrito, medida em newtons, onde o coeficiente x indica se se trata de atrito estático (e) ou dinâmico (d)

N - é a força normal à direcção do movimento, que no caso de o corpo estar num plano horizontal, apresenta a mesma intensidade do peso do corpo, ou seja, $N = P = m \cdot g$, sendo "m" a massa do objecto e "g" a aceleração do campo gravitacional no local.

μ_x - é o coeficiente de proporcionalidade entre as duas grandezas e representa o coeficiente de atrito (μ_e no caso do atrito estático e μ_d no caso do dinâmico)

Verifica-se que quanto maior for a força normal, maior será o atrito entre os corpos.

Embora a 1ª lei do atrito seco seja intuitiva o mesmo não se passa com a 2ª lei. Efectivamente esperar-se-ia que quanto maior fosse a área de contacto mais difícil fosse o movimento do corpo. Este fenómeno só foi totalmente compreendido no século XX por Bowden e Tabor (F.P. Bowden e D. Tabor, 1950) sendo em Inglaterra que postularam que o contacto entre as superfícies interactuantes é feito apenas pelas asperidades (Figura 22).

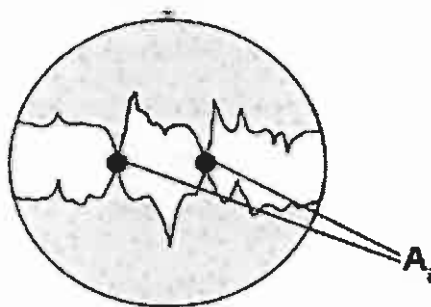


Figura 22 – Representação de contacto feito por asperidades

Distinguiram assim entre a área aparente (área geométrica do contacto) e área real (A_r) de contacto correspondente ao somatório de todas as micro-áreas das asperidades em contacto.

Para além deste pressuposto Bowden e Taylor consideraram ainda que existirá deformação plástica das asperidades durante o contacto sendo o processo semelhante ao que ocorre num ensaio de medição de dureza. Assim, a relação entre a força de interacção de duas asperidades, N , e a sua área de contacto pós-deformação plástica, A_r , seria semelhante à relação que é geralmente adoptada para definição da dureza, H , dos corpos vindo:

$$H = \frac{N}{A_r} \quad (4.3)$$

Considerando ainda que a resistência ao escorregamento se deve somente à resistência do material mais macio ao corte da junção das asperidades já deformadas (τ_c), teríamos para a força de atrito a seguinte equação:

$$Fa = \tau_c \cdot A_r \quad (4.4)$$

Combinando as equações (4.2,4.3 e 4.4) pode chegar-se à relação da independência do coeficiente de atrito da área tal como postulado na 2ª Lei do Atrito Seco.

$$\mu = \frac{Fa}{N} = \frac{\tau_c \cdot A_r}{H \cdot A_r} = \frac{\tau_c}{H} \quad (4.5)$$

Efectivamente a equação (4.5) estabelece que o factor de atrito é apenas dependente das propriedades mecânicas dos corpos em contacto ou seja, típica do par cinemático em causa.

A simplificação desta equação, aplicada ao caso de contactos metal-metal permite ir mais longe no cálculo do coeficiente de atrito (μ). Considerando que o valor da resistência à indentação de um metal é aproximadamente igual ao triplo do valor da sua tensão de cedência, ou seja:

$$H \approx 3 \sigma_c \quad (4.6)$$

A relação entre a tensão de corte de cedência e a tensão normal de cedência, pode ser obtida através de:

$$\tau_c \approx 0.6 \sigma_c \quad (4.7)$$

Vem:

$$\mu = \frac{\tau_c}{H} \approx \frac{0.6 \sigma_c}{3 \sigma_c} = 0.2 \quad (4.8)$$

Obtendo-se deste modo o valor de $\mu = 0.2$ para o coeficiente de atrito para os contactos metal/metal, de acordo com a equação 4.8. Efectivamente este valor de $\mu = 0.2$ dá uma ordem de grandeza para o coeficiente de atrito do contacto seco metal/metal tal como se pode confirmar na Tabela 3 (Carinhas, 2010).

Contudo, e de acordo com o enunciado na 3ª Lei do atrito Seco, o factor de atrito é dependente da natureza dos materiais em contacto pelo que se podem encontrar valores bastante diferentes dependendo do par cinemático em causa.

Tabela 3 – Valores indicativos das grandezas do coeficiente de atrito

(Adaptado: Carinhas, 2010)

PAR CINEMÁTICO	COEFICIENTE DE ATRITO
Metais secos e limpos, em vácuo	>1.0
Metais secos e limpos, ao ar	0.5-1.5
Metais iguais, contaminados	0.2-0.4
Roda-carril, secos	0.25-0.3
Roda-carril, húmidos	0.2
Pneus sobre estrada seca	0.7
Pneus sobre estrada húmida	0.4
Corte de película lubrificante	0.0003
Lubrificação limite	0.02-0.1
Atrito do PTFE (teflon)	0.02-0.1

Se estivermos a falar de uma película espessa de lubrificante, significa que $\lambda \geq 4$, não fará mesmo sentido falarmos de atrito sólido entre corpos, pois neste caso os corpos são separados por um meio lubrificante e nunca se tocam. O atrito ainda existente na película espessa é o atrito fluido, que é devido à resistência ao corte do próprio lubrificante, e que é medido pela viscosidade deste.

Os valores do atrito fluido são muito inferiores ao do atrito sólido, como visível na Tabela 3, onde se verifica o valor de 0.0003 para o coeficiente de atrito relativo ao corte de uma película de lubrificante, valor que é duas ordens de grandeza inferior ao obtido para contacto metal/metal contaminados.

O coeficiente de atrito assume valores sucessivamente crescentes à medida que a espessura da película lubrificante vai diminuindo, isto até se atingir o caso em que $\lambda \leq 1$ – lubrificação limite. O atrito neste caso de lubrificação limite, toma a forma de um atrito sólido lubrificado ou oleado. Os valores de μ são superiores aos do atrito fluido, mas inferiores aos valores obtidos entre metais.

4.5. Relação entre Atrito e Desgaste

Apesar de num determinado par de materiais, o desgaste aumentar se o coeficiente de atrito do par aumentar, reconhece-se que não é possível estabelecerem-se relações gerais entre esses dois parâmetros. Pode-se dizer que não existe uma relação universal entre a quantidade de atrito e a quantidade de desgaste.

A principal razão prende-se com o facto destes dois fenómenos da Tribologia, embora influenciados por algumas características das superfícies que são alvo, possuírem diferentes mecanismos de acção. O mecanismo do atrito é mais relacionado com as variáveis que controlam a resistência ao escorregamento enquanto o mecanismo do desgaste é mais relacionado com as variáveis que determinam a maior ou menor resistência das superfícies a deteriorar-se e perda sucessiva de material.

obtém um coeficiente de atrito superior a 1, enquanto no caso de “metais iguais, contaminados ” o coeficiente de atrito toma valores entre $f = 0.20$ e 0.40 .

O grau de contaminação permite definir três condições para os Tribosistemas reais:

- Contacto seco-limpo, ou contacto não contaminado – condição próxima do real no caso dos materiais poliméricos e condição mais ou menos teórica no caso dos metais.
- Contacto seco contaminado - é o caso usual nas superfícies metálicas dos órgãos de máquinas oxidadas, sujas com fuligens, e outros produtos adsorvidos.
- Contacto sólido oleado – é o caso onde as superfícies das peças estão por norma cobertas de uma película fina de óleo, ou de massa lubrificante, como no caso habitual em maquinaria. Este caso é resultado de um regime de lubrificação limite, definido por um factor de espessura relativa da película $\lambda \leq 1$ significando que a espessura média da película lubrificante é da ordem de grandeza da rugosidade do par cinemático (Carinhas, 2010).
- *Momento do escorregamento* que corresponde à variação do coeficiente de atrito entre a situação de arranque do escorregamento dos dois corpos e a situação de manutenção do respectivo escorregamento. Como referido anteriormente, o coeficiente de atrito no primeiro caso será superior ao segundo. Porém, no caso dos termoplásticos usados em casquilhos de chumaceiras de escorregamento, a situação poderá ser a contrária.
- *Pressão de contacto e temperatura* podem também alterar o coeficiente de atrito, como por exemplo a redução do coeficiente de atrito no caso de sobreaquecimento de calços de travões (“fading dos travões”).

4.4. A lubrificação no atrito

Quando estamos perante a presença de uma película lubrificante entre as duas superfícies de contacto, deixará de existir coeficiente de atrito entre corpos.

Finalmente, relativamente à 4ª Lei do Atrito Seco, esta enuncia o facto já referido anteriormente de que a força de atrito necessária para iniciar o deslizamento é normalmente maior do que a força necessária para o manter, ou seja, o coeficiente de atrito estático é superior ao coeficiente de atrito dinâmico (equação 4.1).

Uma vez estabelecido o deslizamento, o coeficiente de atrito dinâmico é para muitos sistemas quase independente da velocidade de deslizamento, porém quando estamos perante altas velocidades (dezenas ou centenas de metros/segundo) nos metais, o coeficiente de atrito dinâmico diminui com o aumento da velocidade.

4.3. Variabilidade do coeficiente de atrito

O mecanismo básico do atrito além de ser influenciado pelos factores intrínsecos é igualmente afectado por factores de carácter extrínseco aos corpos do Sistema Tribológico. Entre estes factores extrínsecos podem incluir-se a presença de um material lubrificante, os factores de solicitação (cargas, velocidade e temperatura), tipo de limpeza, etc. Estes factores poderão alterar o previsto pelas leis teóricas do Atrito Seco, sendo os desvios do coeficiente de atrito mais visíveis na prática os seguintes:

- *Variabilidade na rugosidade durante o movimento* que ocorre durante a ruptura/formação das soldaduras entre as asperidades. Este efeito contudo só se torna importante no caso da rugosidade inicial ser muito baixa e provocaria, nesta situação, um aumento do coeficiente de atrito.
- *Presença de material lubrificante* o que obviamente provocaria uma diminuição do coeficiente de atrito
- *Grau de contaminação das superfícies*: como referido anteriormente quanto maior for o grau de contaminação mais dificilmente ocorrerão as soldaduras entre as asperidade pelo que será de esperar um menor coeficiente de atrito. Por outro lado, por exemplo no caso de gorduras adsorvidas, a contaminação comporta-se como lubrificante, produzindo uma redução do valor coeficiente de atrito. Esta diferença encontra-se patente na Tabela 3, onde para “metais limpos e secos, em vácuo” – se

Capítulo 5

Tribómetro

O Tribómetro é um equipamento que tem a finalidade de medir quantidades tribológicas, tais como a força de atrito, o coeficiente de atrito e o volume desgastado entre duas superfícies em contacto. A sua origem remonta ao séc. XVII tendo sido inicialmente desenvolvido por Da Vinci.

Um Tribómetro simples é por norma descrito como uma massa em suspensão e uma massa em repouso numa superfície horizontal, sendo a sua ligação feita por meio de uma roldana, tal como exemplificado na Figura 23.

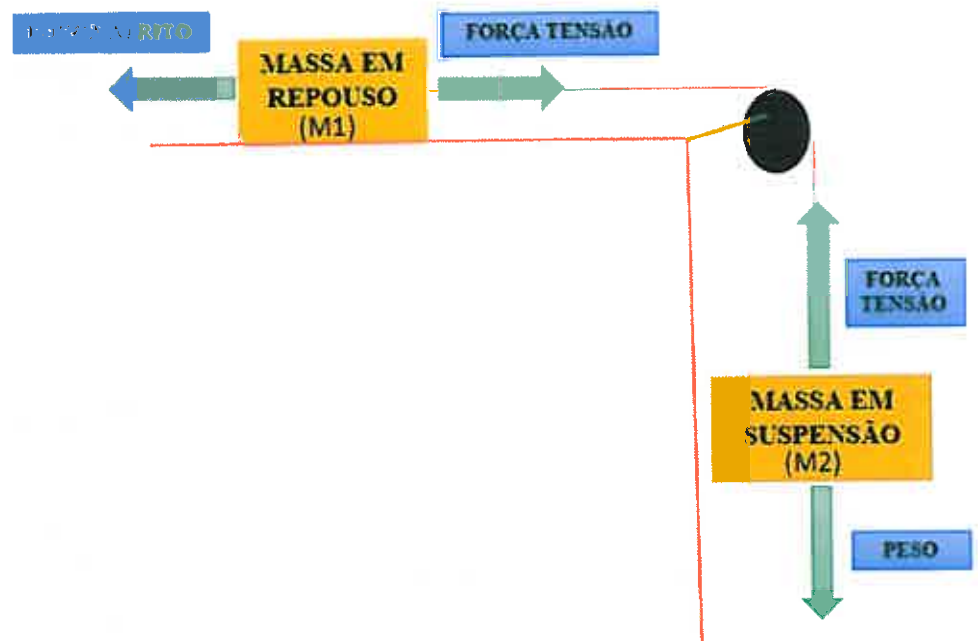


Figura 23 – Esquema de Força-Tensão

Quando o sistema é estacionário, o coeficiente de atrito estático μ_e , é determinado através do aumento da massa em suspensão até ao momento que a massa em repouso começa a deslizar, através da aplicação da equação geral da força de atrito (4.2).

O coeficiente de atrito cinético é determinado através do aumento ou diminuição da carga da massa em suspensão (M_2) até que a massa em repouso atinja uma velocidade constante. De acordo com a relação apresentada na equação 4.2 o coeficiente de atrito dinâmico é obtido de forma simplificada através da relação $\mu = \text{massa em suspensão} / \text{massa em repouso}$.

Tal como referido no Capítulo 4 (Atrito) Leonardo da Vinci é considerado o pai da Tribologia Moderna, em que o seu trabalho contribuiu de forma relevante para o entendimento dos fenómenos de desgaste e atrito. Da Vinci realizou estudos onde media forças de atrito em planos inclinados e horizontais, demonstrando que a força de atrito é dependente da força normal e do deslizamento dos corpos e é independente da área de contacto aparente. Propôs ainda a distinção entre o atrito de rolamento e de escorregamento e definiu o coeficiente de atrito como sendo proporcional à força normal (Zum-Gahr, 1987). A Figura 24 mostra os desenhos dos equipamentos desenvolvidos por Da Vinci para determinar a força de atrito, sendo estes considerados os primeiros Tribómetros na história da civilização (Sinatora 2005).

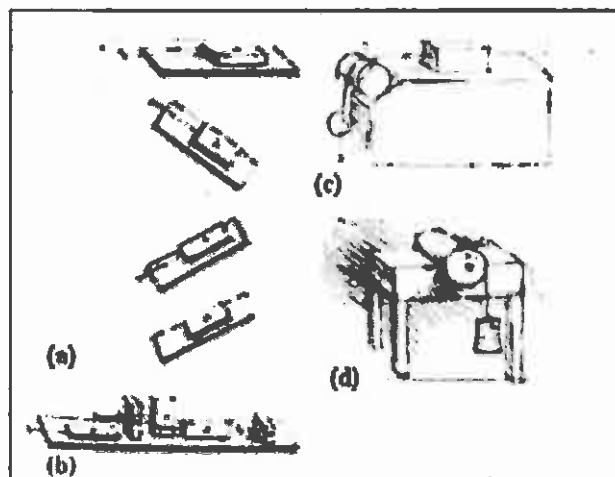


Figura 24 - Tribómetros desenvolvidos por Leonardo Da Vinci para a determinação da força de atrito

(Fonte: <http://www.bibl.ita.br/xiiiencita/FUND18.pdf>)

- (a) Tribómetro em superfícies horizontais e inclinadas;
- (b) Tribómetro considerando o efeito da área aparente;
- (c) Tribómetro utilizando uma polia;
- (d) Tribómetro considerando o torque num cilindro.

Da Vinci ainda teve outras contribuições no campo da Tribologia, tais como estabelecer a importância dos lubrificantes para diminuir a força de atrito, considerar o efeito da rugosidade no deslizamento e demonstrar que a interposição de esferas, como objectos que permitam o rolamento entre corpos, diminui a resistência ao movimento.

5.1. Tipos de Tribómetros

Com o intuito de conhecer e melhorar o equipamento em desenvolvimento, decidiu-se proceder a uma análise dos vários tipos de Tribómetros existentes no mercado. Ao realizar-se esta pesquisa, foi possível averiguar que no campo da Tribologia são utilizados vários métodos para os ensaios do atrito, sendo os mais utilizados o método do Pino-Disco e o método linear, sendo feito deste modo uma pesquisa mais profunda sobre estes dois equipamentos.

5.1.1. Método Pino-Disco

O Tribómetro do tipo Pino-Disco é o método mais utilizado e conhecido para o estudo do atrito sendo utilizado para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento entre contactos com áreas reduzidas.

Neste caso, a medição do coeficiente de atrito é feita através da configuração representada esquematicamente na Figura 25, que consiste num corpo rígido (pino) sobre uma superfície de suporte em rotação (disco). O seu modo de funcionamento é simples e consiste na aplicação de uma determinada carga (F) no pino, de maneira a comprimir o pino contra o disco.

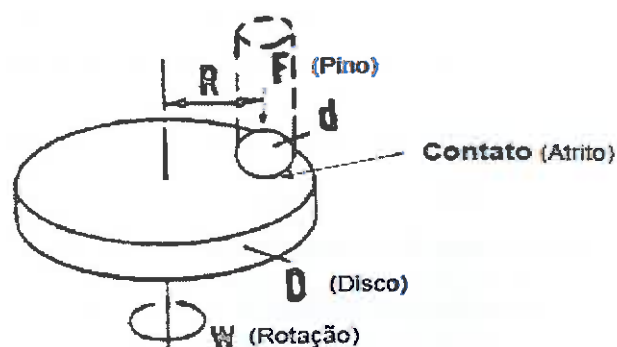


Figura 25 – Princípio de funcionamento de um Tribómetro do tipo Pino-Disco
(Fonte: ASTM G99-04, 2004)

(considerado como tendo uma ponta esférica de raio r), o volume de desgastado é determinado de acordo com a equação 5.1.

$$V_{\text{pino}} = \frac{\pi \times h}{6} \cdot \left(\frac{3 \cdot d^2}{4} + h^2 \right) \quad (5.1)$$

V_{pino} - Perda de volume no pino

d - Diâmetro do desgaste

No caso mais vulgar, em que o desgaste ocorre maioritariamente no disco, para a avaliação do volume desgastado é necessário conhecer o raio pista de desgaste sendo o volume desgastado obtido pela equação 5.2:

$$V = 2\pi R \left[r^2 \sin^{-1} \left(\frac{d}{2r} \right) - \frac{d}{4} (4r^2 - d^2)^{1/2} \right] \quad (5.2)$$

onde,

r - Raio do pino;

R - Raio da pista de desgaste;

d - Largura da pista de desgaste

No caso em que a avaliação do desgaste é feita através da perda de massa esta deve ser transformada em perda de volume através da densidade do material (equação 5.3).

$$V = \frac{\Delta m}{\rho} \quad (5.3)$$

Em que, Δm representa a perda de massa e ρ a densidade

A distância percorrida pelo pino durante o ensaio (ou extensão de escorregamento Δe) pode ser calculada através do número de revoluções executadas pelo disco (equação 5.4):

$$\Delta e = 2\pi r \cdot N \quad (5.4)$$

Em que Δe é a distância percorrida e N o número de revoluções do disco e r o raio da colocação do pino ao centro do disco.

Conhecido o volume desgastado e a distância percorrida é então possível, através da utilização da equação de Archard (equação 3.1) calcular o coeficiente de desgaste k_H .

$$k_H = \frac{HV}{F\Delta e} \quad (3.1)$$

Apesar de existirem inúmeras equações para representar a equação de Archard, a equação 3.1 é universalmente aceite e por isso a mais correcta para avaliar o desgaste.

De notar que quando se inicia o deslizamento o desgaste é bastante mais intenso pelo que se podem definir dois regimes o transiente e o estável, representados esquematicamente na Figura 27. De acordo com Yang (2005), a avaliação do coeficiente de desgaste utilizando perdas de volume obtida em regime transiente conduz a uma imprecisão pode chegar a erros na ordem dos 1000%. Assim este parâmetro deve ser obtido no regime estável (região entre os pontos P e Q da Figura 27) ou seja para distâncias percorridas pelo pino significativas.

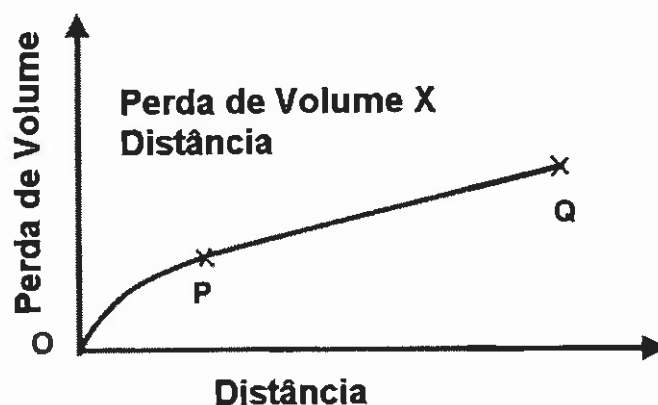


Figura 27 – Taxa de desgaste

(Fonte: Yang, 2005)

Na Figura 26, é apresentado um equipamento comercial do tipo Pino-Disco da Anton-Paar.



Figura 26 - Tribómetro Pino Disco

(Fonte: <http://www.anton-paar.com/be-en/products/applications/high-temperature-tribological-behavior-of-advanced-hard-coatings-for-cutting-tools/>)

O equipamento de teste utiliza a força centrípeta ocasionada pela rotação do disco que causa um movimento desigual entre o disco e o pino, a força é medida nesse momento através de uma célula de carga. A carga normal aplicada no pino é pré-determinada, e pode ser simulada através da utilização de dispositivos mecânicos, hidráulicos e pneumáticos (ASTM G99-04, 2004).

Os resultados, como a temperatura do material, o coeficiente de atrito e mecanismo de desgaste são directamente afectados de acordo com arranjo do pino, podendo este ser estacionário ou rotacional.

O resultado do ensaio consiste numa pista circular no disco sendo a dimensão do desgaste resultado de uma combinação de factores tais como a velocidade de deslizamento, a força aplicada, o meio envolvente (existência ou não de material lubrificante) ou as propriedades dos materiais. As características dos sistemas reais, tais como a temperatura, o meio corrosivo, a lubrificação e a geometria podem levar à obtenção de resultados não concisos e diferentes dos valores reais, pelo que é conveniente simular o maior número possível de variáveis.

Como referido no Capítulo 3, o desgaste pode ser determinado através de ensaios de perda de massa, perfilometria ou variação das dimensões do disco e do pino.

Neste último caso isto é, o ensaio com análise de dimensão, assumindo que o desgaste do disco é insignificante, ocorrendo maioritariamente no pino

5.1.2. Método Linear

O método linear usa para a determinação das propriedades tribológicas o deslizamento de um pino (palpador) sobre uma determinada amostra ou vice-versa. O deslizamento é feito em linha recta e é gerada uma força de atrito. Obtém-se o coeficiente de atrito através da divisão da força de atrito pela força normal aplicada ao conjunto amostra e pino, sendo o coeficiente estático obtido através da divisão da força necessária para iniciar o movimento.

Dentro do Tribómetro do método linear existe o tipo pino-placa onde a amostra é carregada axialmente pelo pino e realiza-se um movimento linear alternativo entre eles. Consequentemente desenvolve-se uma força de atrito contrária ao deslocamento do pino como referenciado na Figura 28. Esta força é medida por uma célula de carga que se encontra ligada ao pino.

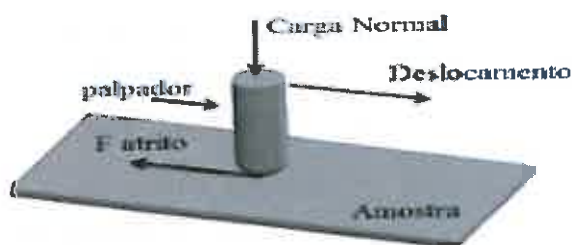


Figura 28 – Princípio de funcionamento de um Tribómetro do método linear do tipo Pino-Placa

Também neste caso o coeficiente de atrito é calculado pela razão entre a da força de atrito e a força normal (equação 4.2).

$$\mu = \frac{\text{força atrito}}{\text{força normal}} \quad (4.2)$$

Na Figura 29 pode-se visualizar um Tribómetro de método linear.



Figura 29 - Tribómetro Método Linear

5.1.3. Método 4 esferas

O teste no Tribómetro de quatro esferas é realizado de acordo com a norma ASTM D4172. Este teste apresenta como principal objectivo a determinação das propriedades dos fluidos lubrificantes nas superfícies que deslizam em determinadas condições.

Este Tribómetro é constituído por três esferas, com um determinado diâmetro em que as estas são juntamente encaixadas e cobertas por um óleo lubrificante. O teste neste Tribómetro consiste na aplicação de uma quarta esfera, que é colocada no topo das três esferas que se encontram encaixadas, e pressionada na cavidade entre elas, conforme se pode visualizar na Figura 30. O sistema é aquecido à temperatura à qual se pretende testar o lubrificante após o que a esfera que se encontra no topo é rodada provocando corte e desgaste entre as quatro esferas. A finalidade do teste consiste em analisar o diâmetro das depressões que são provocadas nas três esferas que se encontram encaixadas (ASTM D4172, 2010).

O método 4 esferas deixou de se realizar, como tal, o equipamento já não se comercializa.

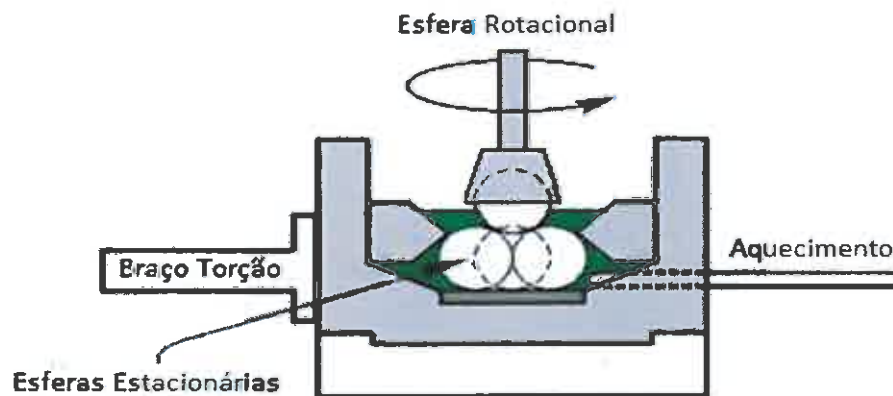


Figura 30 – Teste com quatro esferas esquemático

(Fonte: ASTM D4172, 2010)

5.1.4 Método Bloco-Disco

O ensaio do Tribómetro de desgaste bloco-disco é uma técnica usada para a determinação do desgaste provocado pelo deslizamento entre contactos lineares. Trata-se de um teste flexível pois utiliza-se qualquer tipo de material, atmosfera, variáveis de processo, lubrificantes, entre outros.

Neste ensaio o bloco de teste é pressionado contra o disco quando este está em rotação. O resultado do teste é obtido através do cálculo da perda de volume do bloco, das dimensões de desgaste que ocorreram no bloco e pela perda de volume do disco calculado através da sua perda de massa (ASTM G77, 2010). Na Figura 31 encontra-se ilustrada o princípio de funcionamento do teste bloco-disco.

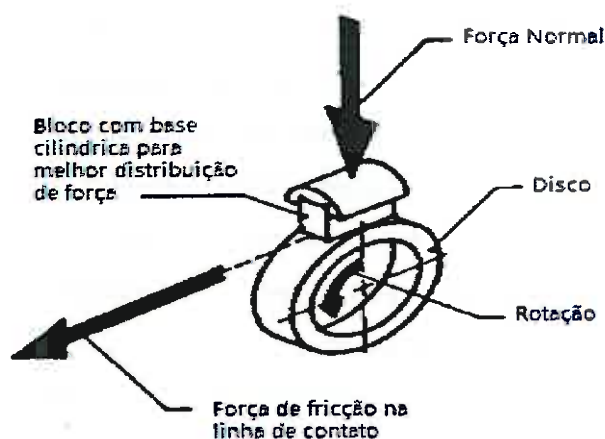


Figura 31 – Princípio de funcionamento do teste bloco-disco

(Fonte: ASTM G77, 2010)

No final do estudo dos equipamentos existentes foi possível verificar inúmeros aspectos sobre o grande número de Tribómetros no mercado, ficando deste modo com uma ideia do que se pode adoptar e melhorar para o Tribómetro a projectar e dimensionar.

5.2. Vantagens e Desvantagens dos diferentes tipos de Tribómetros

A título de conclusão e com vista a ter uma melhor percepção das qualidades dos diferentes tipos de Tribómetros referenciados anteriormente, fez-se uma pesquisa sobre as vantagens e desvantagens dos diferentes Tribómetros como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Vantagens e desvantagens dos diferentes Tipos de Tribómetros

	Vantagens	Desvantagens
Pino-Disco	<p>Útil na realização de testes de desgaste e atrito simples para revestimentos de baixo atrito</p> <p>Permite o movimento por tempo ilimitado num dado sentido numa vasta gama de velocidades</p> <p>É um sistema simples e devido à electrónica utilizada e aos parâmetros pré-estabelecidos, é possível a obtenção de resultados fidedignos</p>	<p>O pino pode enterrar-se no disco que se encontra a rodar influenciando as condições do escorregamento e consequentemente os resultados do ensaio</p> <p>Necessita de muito tempo para obtenção de resultados, para o teste de materiais duros</p>
Método Linear	<p>Permite obter pistas de desgaste mais largas, alterando o tipo de palpador</p>	<p>Existem períodos de aceleração e desaceleração fazendo com que a velocidade não seja constante</p>
Bloco Disco	<p>Muito flexível, permitindo utilizar diferentes geometrias de contacto (pontual, linear ou superficial)</p> <p>Capaz de simular condições operacionais extremas tais como altas temperaturas, pressões e velocidades.</p>	
Quatro Esferas	<p>Configuração semelhante à dos rolamentos</p>	<p>Utilizado para a determinação da lubricidade dos fluidos lubrificantes e não para a avaliação do comportamento de contactos sólidos</p> <p>Já não se comercializa, obsoleto</p>

Depois de feita a análise das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de Tribómetros, foi decidido realizar o projecto sobre o Tribómetro Pino-Disco, sendo o equipamento mais enquadrado nos objectivos pretendidos. Sendo que o equipamento idealizado seria para realizar ensaios em bancada, sendo também a par do Tribómetro do Método Linear um dos principais Tribómetros utilizados. O Tribómetro Pino-Disco apresenta igualmente resultados bastante fiáveis, pois antes da execução dos ensaios, ser possível derivado à electrónica pré-estabelecer os parâmetros a ensaiar, sendo como tal o que apresenta melhores resultados e objectivos face ao pretendido.

Capítulo 6

Fases do projecto

Todas as funções e objectivos que contemplam a execução de um projecto deverão ser definidos logo à partida, para que o equipamento projectado seja capaz de executar com êxito e de modo claro todos os pressupostos para que foi projectado. Contudo é preciso perceber e analisar ao pormenor todas as etapas de desenvolvimento de forma a ser possível estabelecer um limite de acordo com as funções pré-estabelecidas.

Deste modo, apresenta-se o seguinte esquema das diferentes fases do projecto. O presente trabalho foi executado até à consulta ao mercado, ficando a aquisição do material, montagem, calibração do equipamento e realização de ensaios físicos e respectiva validação para trabalhos futuros (Figura 32).



Figura 32 – Esquema das diferentes fases que constituem o projecto e desenvolvimento do Tribómetro

6.1. Objectivos

Feito o estudo do tipo de Tribómetros existentes no mercado, para ter um melhor esclarecimento das inúmeras configurações, foi realizada uma representação dos objectivos/funções tal como apresentado na Figura 33. Nesta representação pode-se visualizar várias soluções e diferentes abordagens para concretizar todas as tarefas e funções necessárias para chegar à solução final.

A Figura 33 pretende representar todos os objectivos necessários para a concretização do Tribómetro. Primeiro, definiu-se um parâmetro o mais geral possível, o Tribómetro que é considerado como o objectivo principal a atingir e deve ser interpretado como a “função mãe”. Consequentemente foi-se dividindo o primeiro parâmetro, em várias sub-funções cada vez mais específicas, ou seja, temos o segundo patamar (Aquisição de dados, Pino-Disco e Aplicação de carga); da Aquisição de dados resulta a obtenção da força de atrito através de uma célula de carga e o movimento rotacional que é realizado através do disco; o Pino-Disco, realiza-se através da rotação do disco em contacto com o pino ponta esférica, a carga pode ser implementada de três maneiras, nomeadamente através de ar comprimido (pneumático), hidráulico e pesos. Sabendo a força normal que foi implementada no Pino-Disco e a leitura da força de atrito através da célula de carga, é possível calcular o coeficiente de atrito entre pares cinemáticos. Com a obtenção do desgaste do disco antes e depois do ensaio é possível obter a taxa de desgaste.

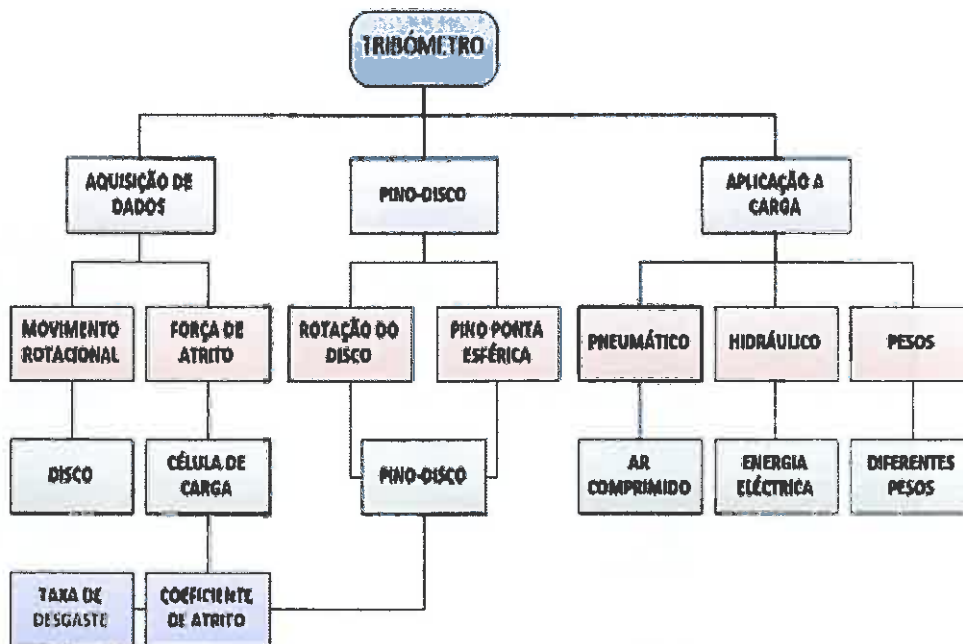

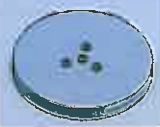


Figura 33 – Esquema objectivos a alcançar

6.2. Parâmetros de funcionamento e Especificações

Como referido em 6.1, no início de todos os projectos são apresentados vários objectivos e especificações iniciais em relação à solução pretendida. Os objectivos traçados e respectivas especificações definem o tipo de Tribómetro, amostra, carga e pino a adoptar.

Tabela 5 - Parâmetros e especificações para o Projecto do Tribómetro

	Tribómetro Pino-Disco	Norma ASTM G-99
Força normal	0 até 40 N, através da implementação de discos devidamente calibrados	-
Movimento de Rotação		
Raio de pista	0 até 50 mm. Pode-se utilizar raio de pista 20 e 40 mm	-
Velocidade de Rotação	580 rpm. O motor do engenho de furar que vai desde os 580 rpm até aos 2900 rpm, apenas se utiliza a velocidade mínima	A velocidade de rotação é tipicamente na ordem dos 0.3 até 3 rad/s (60 até 600 rpm)
Geometria do pino	Ponteira Esférica com um diâmetro de 8 mm e 55mm de altura 	Ponteira Esférica ou cilíndrica com diâmetro entre 2 e 10 mm, com acabamento superficial de 0.8 µm
Tipo de testes	Medição do coeficiente de atrito (através da célula carga) e da taxa de desgaste (através da medição de perda de volume)	O sistema deve ter um meio de medir o coeficiente de atrito.
Tipo de movimento	Pino Fixo e Disco Rotacional	Rotacional - A máquina deve vir equipada com um contador de rotações, ou equivalente que determine o número de rotações do disco
Disco	Ø100 com uma espessura de 8mm 	O disco deve ter um diâmetro (Ø) entre 30 e 100mm, com uma espessura de 2 a 10 mm e um acabamento superficial de 0.8 µm
Material do Disco	Borracha Normal; Aço Carbono (SAE 1020); Teflon	Este método permite a utilização de grande variedade de materiais
Material do pino	Alumina	A norma permite a utilização de grande variedade de materiais

Os parâmetros e especificações apresentados na Tabela 5 foram definidos por forma a respeitar o que está definido na Norma ASTM G-99. A principal

definição passa pela escolha do material para o par cinemático Pino-Disco. A finalidade do ensaio é obter o desgaste do disco, desprezando o desgaste do pino. Como tal, escolheu-se a alumina como material do pino por ter uma elevada dureza. Já para o disco optou-se pela escolha de três materiais distintos, aço carbono SAE 1020, borracha normal e PTFE (Teflon) que, por terem propriedades muito diferentes, permitirão uma melhor calibração do equipamento e visualizar a relação que existe entre todos os materiais e ensaiar os mesmos de maneira a verificar a grande diversidade de resultados entre todos. Para além deste facto, a escolha destes três materiais de teste deve-se ao facto de serem três materiais fáceis de encontrar no mercado e que possuem um custo não muito elevado.

6.2.1 – Aplicação da Força Normal

De modo a se obter uma força de atrito, é necessário a aplicação de uma determinada carga perpendicular ao disco. Tendo em conta a necessidade de aplicar uma força normal com uma intensidade variável, existem várias formas da mesma ser aplicada. Para o presente projecto pretendeu-se encontrar um método que fosse simples e ao mesmo tempo fiável.

Como especificado na Tabela 5, pretende-se aplicar uma força perpendicular ao disco de teste que varie entre 0 até aos 40 N.

Na Tabela 6 são apresentadas várias formas de aplicação da carga normal, incluindo as respectivas vantagens e desvantagens.

Tabela 6 - Vantagens e as desvantagens das possíveis formas de aplicação da carga normal.

	Vantagens	Desvantagens
Implementação de Pesos	Sistema muito simples Baixo custo de aquisição	Grande possibilidade de acontecer erros, devido ao erro humano Pouca precisão
Óleo Hidráulica	Muito estável Operações suaves Grande precisão e fiabilidade Elevada força de trabalho	Elevado custo de manutenção Fluido de trabalho poluente e inflamável Elevado custo de aquisição e implementação
Pneumático	Grande fiabilidade Fácil manutenção Fluido de trabalho não poluente	Pouca precisão É necessário ar comprimido para funcionar

De acordo com os objectivos estabelecidos, e face às alternativas apresentadas na Tabela 6, optou-se por conceber um Tribómetro cuja carga é estabelecida através da aplicação de pesos calibrados.

6.2.2 – Sistema de aquisição da força de atrito

O valor do coeficiente de atrito é retirado pelo quociente entre o valor da força de atrito e a força normal. Conhecendo o valor da força normal aplicada através da utilização de pesos calibrados, em que a sua leitura é realizada através de uma célula de carga TAS 606 (vd. 6.2.2.1), é necessário adquirir o valor da força de atrito durante o ensaio. A leitura da força de atrito é efectuada por uma outra célula de carga (*“10KG Scale Load Cell Weight Weighing Sensor”*), que tem uma capacidade máxima de leitura de 10 kgf (tracção e compressão). O sinal de leitura da célula de carga *10KG Scale Load Cell* será adquirido através de uma placa Arduino Genuíno Uno Rev3 conforme a configuração apresentada na Figura 34. De ressaltar que a programação para aquisição do sinal e sua conversão não faz parte dos objectivos do presente trabalho. A célula de carga definida para aquisição da força de atrito encontra-se representada na Figura 35.

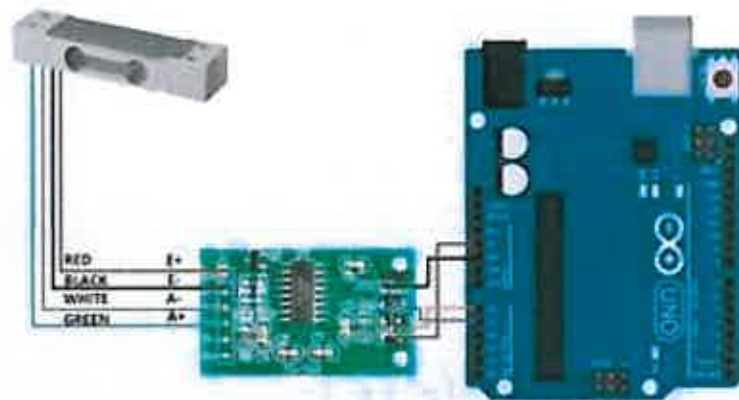
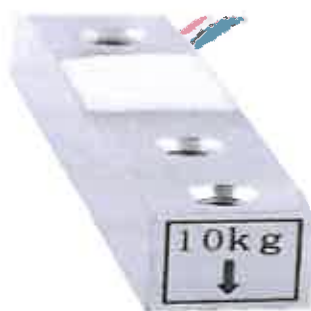


Figura 34 - Ligação da célula de carga à placa de Arduino

Fonte: <http://www.ebay.com/itm/10KG-Scale-Load-Cell-Weight-Weighing-Sensor-HX711-Weighing-Sensor-24bit-AD-Module-/282067197427?hash=item41ac83ddf3:g:IHgAAOSwmfhX5f1g>



Application		Kitchen scale
Model		YZC-133
Capacity	kg	1, 2, 3, 5, 10, 20
Rated output	mV/V	1.0±0.15
Nonlinearity	%	0.05
Repeatability	%	0.03
Hysteresis	%	0.03
Creep(5min)	%	0.1
Temperature effect on sensitivity	%RO/°C	0.003
Temperature effect on zero	%RO/°C	0.02
Zero balance	%RO	±0.1
Input resistance	Ω	1066±20
Output resistance	Ω	1000±20
Insulation resistance	MΩ(50V)	2000
Recommended excitation voltage	V	5V
Compensated temperature range	°C	-10 ~ +50
Operating temperature range	°C	-20 ~ +65
Safe overload	%RO	120
Ultimate overload	%RO	150
Load cell material		Aluminum
Connecting cable		Ø 0.8X180mm

Figura 35 – Célula de carga “10KG Scale Load Cell Weight Weighing Sensor”

O objectivo desta célula de carga é ler a força tangencial à amostra provocada pela conjugação da carga aplicada e do movimento de rotação do disco. Como tal, foi necessário posicionar devidamente a célula de carga no Tribómetro, pelo que se optou por colocar a mesma o mais próximo possível da amostra para minimizar eventuais erros de leitura. A célula de carga será aparafusada a uma chapa que se encontra directamente soldada ao braço principal do equipamento. Por sua vez o pino é aparafusado à célula de carga, que com o movimento rotacional do disco permite obter uma deformação perpendicular a este e consequentemente a força de atrito. Para melhor percepção do sistema descrito anteriormente apresenta-se a Figura 36.

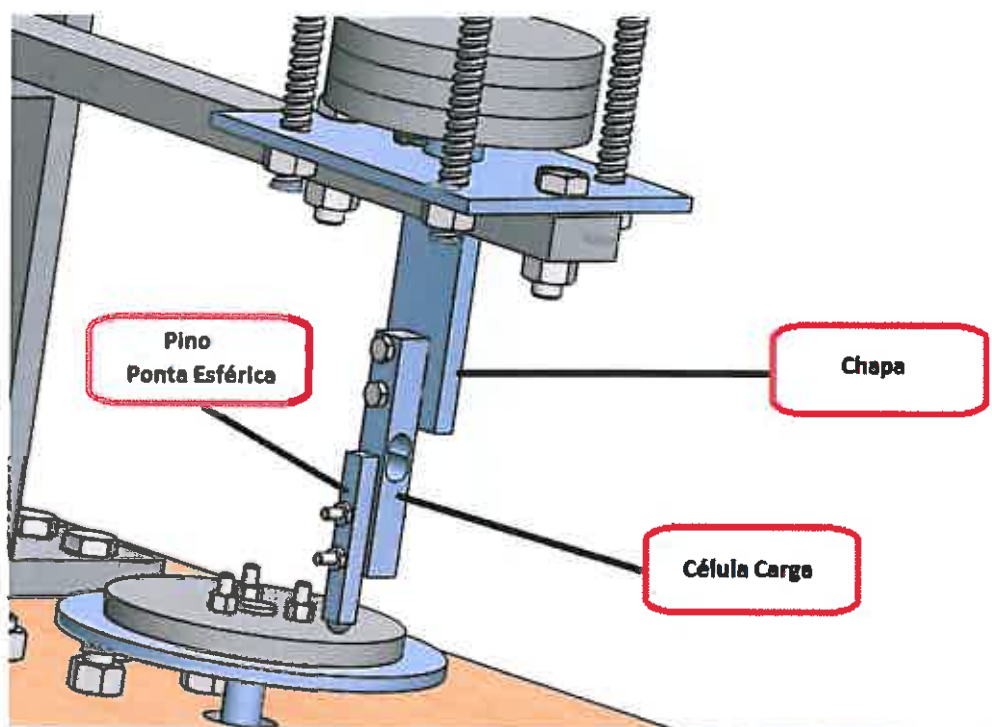


Figura 36 – Implementação da Célula de carga “10 KG Scale Load Cell” no sistema

6.2.2.1 – Sistema de aquisição da força normal

A força normal é resultante da aplicação de pesos devidamente calibrados colocados na vertical do pino. A sua leitura é efectuada por uma célula de carga TAS 606 tal como representado na Figura 37.

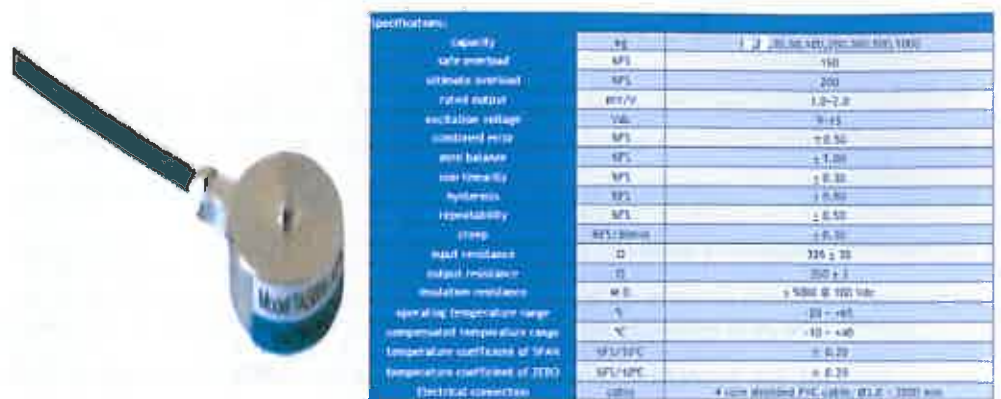


Figura 37 - Célula de carga TAS 606

A célula de carga está aparafusada à base de pesos que se encontra aparafusada ao braço principal do equipamento. Para melhor percepção da concepção do sistema descrito anteriormente apresenta-se a Figura 38.

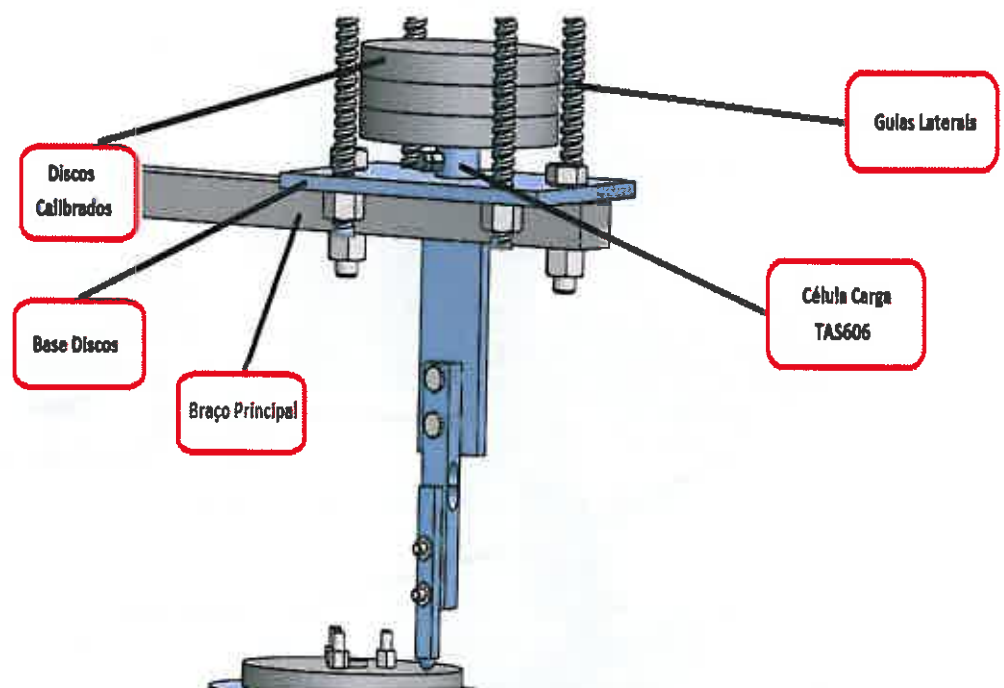


Figura 38 – Implementação da Célula de carga TAS 606 no sistema

6.2.3 – Geometria do pino

O pino é o corpo onde será aplicada a força normal que estará em contacto com a amostra, pelo que a definição da sua geometria é importante para que no contacto com a amostra não se criem esforços que interfiram com a leitura correcta da força de atrito na célula de carga. Na Figura 39 encontra-se o pino idealizado para o Tribómetro Pino-Disco concebido no presente trabalho.



Figura 39 - Pino desenhado em "SolidWorks"

Como visualizado na Figura 39, o Pino possui uma forma rectangular com uma ponta esférica. A forma rectangular e respectiva furação existente na secção foi definida com o objectivo de facilitar a fixação entre a célula de carga e o pino. Tal como referido, o material do pino é a alumina - óxido de alumínio, Al_2O_3 , de elevada dureza - de modo a garantir que durante a realização dos ensaios apenas exista desgaste no disco, no par cinemático Pino-Disco.

6.2.4 – Disco de Teste

O Disco de Teste a par do Pino constituem o par cinemático do sistema sendo deste modo os elementos mais importantes.

Os materiais escolhidos para os discos de teste foram o Aço Carbono SAE 1020, Borracha normal e Teflon. Contudo, caso se pretendam testar diferentes materiais, como por exemplo ligas nobres ou novos revestimentos anti-desgaste, devido a limitações económicas, terá que se implementar uma nova solução de modo a minimizar o tamanho da amostra (disco). A solução passará pela utilização

de umas garras de modo a prender a amostra ao disco de fixação, ou até mesmo utilizar um Disco de Teste em Aço Carbono com cerca de 6mm de espessura (ou uma espessura semelhante) e fazer uma película de somente 2mm (ou outra que no total com o Disco faça 8mm) do material que queremos testar. Com esta solução garante-se uma maior versatilidade do equipamento e a sua possível utilização em actividades de I&D.

Na Figura 40 encontra-se representado o Disco de Teste desenhado em "SolidWorks".

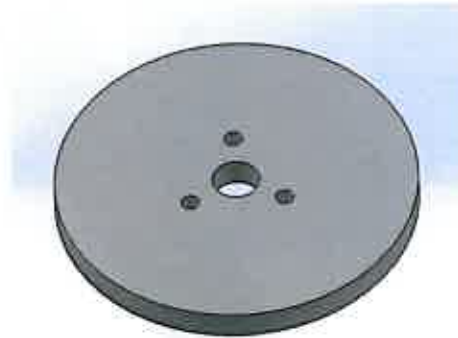


Figura 40 – Disco de Teste desenhado em "SolidWorks"

Na Figura 41, pode-se visualizar o posicionamento do disco de teste no sistema. Este disco tem um diâmetro de 100mm e uma espessura de 8mm de modo a ir ao encontro dos requisitos da Norma ASTM G-99. O disco de teste possui 3 furos para fazer a ligação aparafusada ao disco de fixação que se encontra ligado ao veio da broca do engenho de furar e que transmite o movimento rotacional ao sistema. Quando se construir o equipamento deve-se colocar uma protecção em plástico para proteger a projecção de partículas, derivado ao desgaste do contacto entre o pino e o disco.

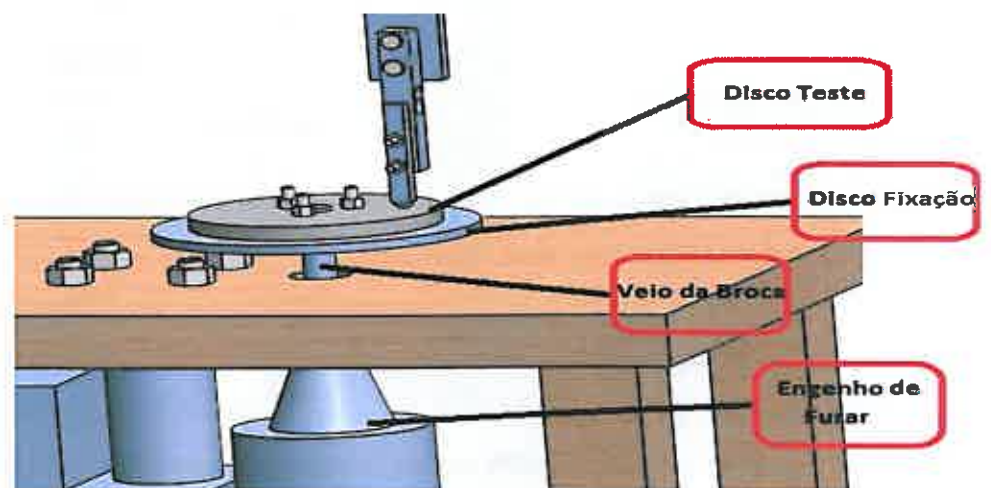


Figura 41 – Implementação do Disco de Teste no sistema

6.3. Solução Final

Através dos diferentes Tribómetros existentes no mercado e das diversas consultas efectuadas ao mercado, foi possível retirar algumas ideias base que serviram para implementar no Tribómetro estudado e projectado neste trabalho.

Até chegar à solução final foram elaborados e desenhados vários desenhos preparatórios como base inicial, que durante o desenvolvimento do projecto se foram aperfeiçoando e revelando de certa forma importantes para a realização da modelação 3D e dos respectivos desenhos (ver anexo VI).

Após definida a idealização da solução final, a mesma foi dimensionada através do Software de elementos finitos “SolidWorks”.

A Figura 42 apresenta a solução final e os componentes principais do Tribómetro projectado.

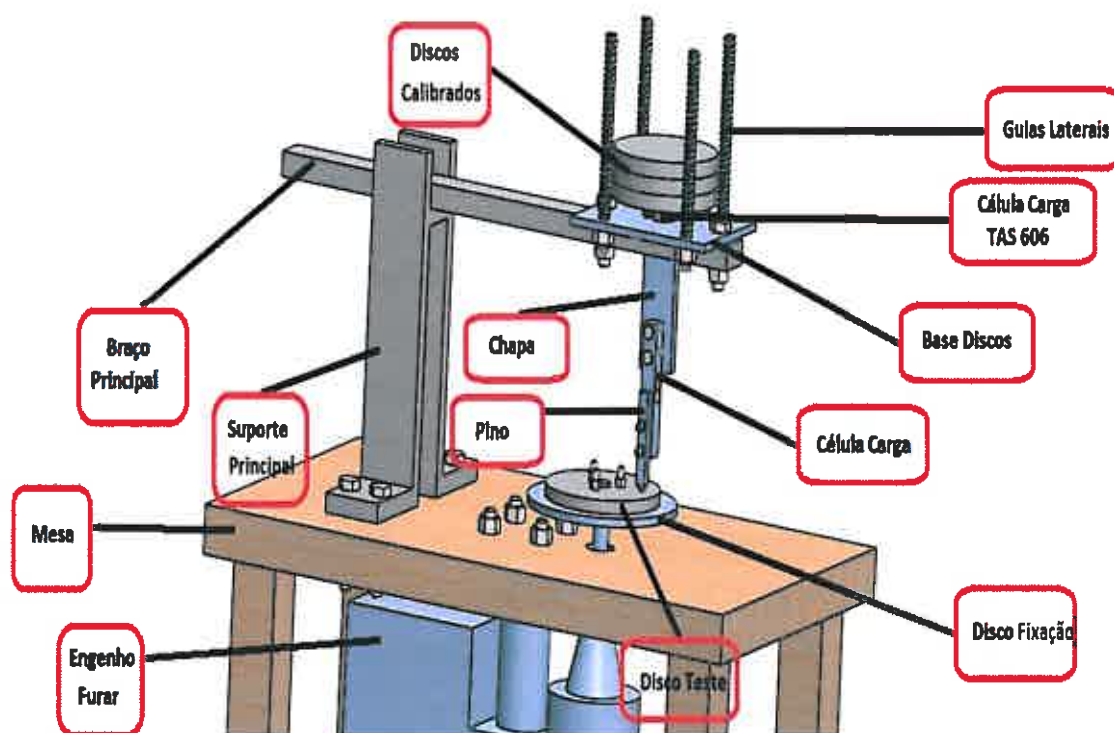


Figura 42 – Solução final implementada em “Solidworks”

No Anexo II e Anexo III podem ser visualizados em pormenor os desenhos de detalhe de todas as partes estruturais projectadas para o Tribómetro.

6.4 – Dimensionamento

O objectivo da presente secção é apresentar e fundamentar o dimensionamento dos principais componentes do Tribómetro Pino-Disco, através da realização de um estudo estático e um estudo dinâmico para verificar o comportamento do sistema face às condições impostas e pretendidas. O dimensionamento dos componentes referidos apresenta um elevado grau de importância, pois permite verificar o cumprimento das suas especificações.

De uma forma geral, as etapas do desenvolvimento baseiam-se na elaboração da modelação 3D do equipamento. De seguida através do “*Simulation*” do “*SolidWorks*” efectuam-se os estudos estáticos e dinâmicos “*Motion Study*” definindo-se as cargas, rotações, rectificações e constrangimentos que actuam nos diferentes componentes do equipamento. Gera-se o refinamento da malha e por último o cálculo dos esforços e deformações. No final, permite verificar se o equipamento irá funcionar dentro dos limites do que é expectável.

6.4.1. Estudo estático

Após a definição de uma estrutura que cumpra todos os objectivos especificados, nomeadamente ser bastante prática, económica e principalmente viável, procedeu-se ao seu dimensionamento em três casos distintos: um com carga máxima 40N, outro com a carga mínima que o equipamento irá suportar, 20N e uma outra situação intermédia correspondente à aplicação de uma carga de 30N.

O modelo final sujeito a simulação estática encontra-se representado na Figura 43. O sistema encontra-se sujeito à força gravítica e à carga aplicada por efeito dos pesos. A mesa está apoiada no chão, estando todos os outros componentes aparafusados e interligados entre si.

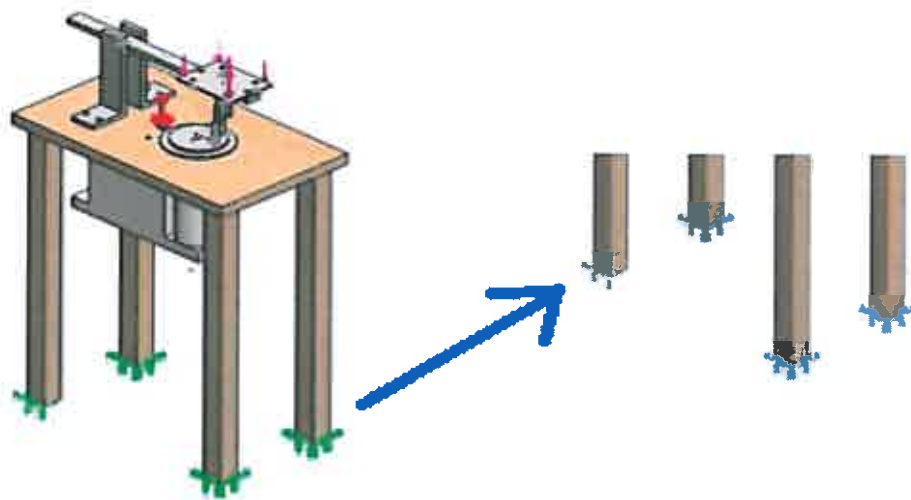


Figura 43 – Cargas e restrições aplicadas na estrutura para realizar a simulação estática em "Solidworks"

À exceção da mesa que é de madeira ($E=3$ GPa; $\nu=0.29$; $\sigma_{ced}= 20$ MPa), da ponta esférica do pino que é de alumina e dos respectivos discos de teste, toda a estrutura do Tribómetro é aço de construção SAE 1020. Este aço foi escolhido por ser um material extremamente acessível no mercado e barato, tendo propriedades muito semelhantes aos diversos aços e servindo sem qualquer implicação para os estudos em causa.

Primeiro foram definidas as condições da simulação, podendo-se verificar na Figura 43 o posicionamento da força aplicada (setas a rosa) na parte superior da base de pesos, simulando o peso dos pesos previamente calibrados (20, 30 e 40 N) e os locais onde a estrutura se encontra fixa (setas a verde/azul) na parte inferior da mesa. Colocou-se ainda o sistema sujeito à força gravítica (seta a vermelho).

Realizaram-se três ensaios para cada um dos três discos (Aço Carbono SAE 1020, Borracha natural e Teflon sujeitos às três cargas).

Na Tabela 7 são apresentadas as diferentes propriedades mecânicas dos materiais que constituem os diversos pares cinemáticos que serão base de estudo neste trabalho.

Tabela 7 – Propriedades dos materiais que constituem o par cinemático Pino-Disco

	Alumina Al2O3	Borracha Natural	Aço Carbono SAE 1020	Teflon
Módulo de Elasticidade (GPa)	370	0.00001	200	0.750
Coefficiente de Poisson	0.22	0.45	0.29	0.46
Massa específica (Kg/m ³)	3960	960	7900	2320
Tensão cedência (MPa)	300	16	421	34
Coefficiente de Expansão Térmica	0.0000074	-	0.000015	-
Condutividade Térmica (W/m·K)	30	-	47	26
Calor específico (J/Kg·K)	850	-	420	1200

6.4.2. Estudo dinâmico

Na realização do ensaio Pino-Disco é indispensável a existência de um motor para transmitir a rotação desejada ao sistema. Como referido na Tabela 5, o Tribómetro pode ter uma velocidade de rotação desde os 60 até 600 rpm. No caso do presente trabalho essa rotação será transmitida através de um engenho de furar. Optou-se pela utilização de um engenho de furar como o equipamento para transmitir o movimento rotacional ao disco, pois este é barato, fácil de encontrar e enquadra-se dentro dos requisitos pretendidos.

O engenho de furar pode funcionar com diferentes rotações e níveis desde as 580 rpm até às 2900 rpm. A velocidade de rotação escolhida e utilizada para dimensionar este projecto foi a mínima de 580 rpm (nível 1), pois era a única velocidade disponível que se enquadrava nos requisitos da norma ASTM G-99.

Na Figura 44 está representada a estrutura que foi utilizada para a realização dos ensaios dinâmicos em “*Motion Study*” no Software “*SolidWorks*”, com o objectivo de retirar o valor do coeficiente de atrito entre a força de contacto

(força tangencial) e a força normal entre o Pino e os discos de teste em estudo. O estudo detalhado desta simulação é apresentado na secção 6.5.2.

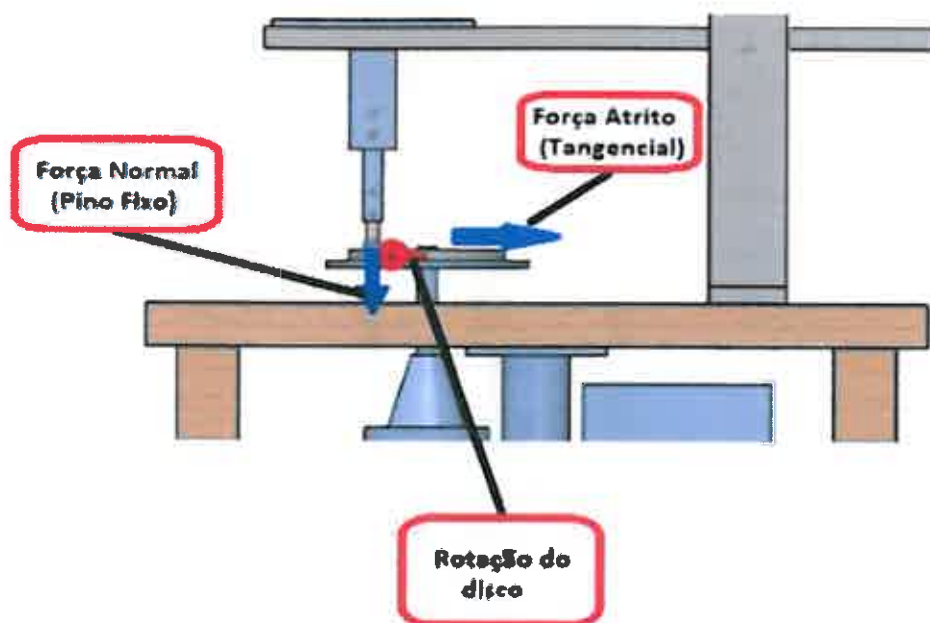


Figura 44 - Cargas e restrições aplicadas na estrutura para realizar a simulação dinâmica em "Solidworks"

6.4.3. Análise financeira da solução

Após a realização dos desenhos de todas as partes estruturais projectadas para o Tribómetro realizou-se uma consulta ao mercado com a finalidade de obter um orçamento para a construção do equipamento. A descrição do preço individual de cada componente pode ser visualizada no Anexo I. O preço total centra-se na ordem dos 1000€.

Referente aos custos envolvidos neste projecto, as componentes que apresentam um custo mais elevado são o apoio do suporte pino, célula carga TAS 606 e os discos de teste.

Uma possível solução para minimizar ainda mais o custo deste Tribómetro passaria por reduzir ainda mais a espessura dos componentes principais (apoio suporte pino, braço principal, espessura dos discos de teste), tentar arranjar uma célula carga mais em conta do que a TAS 606 e realizar uma nova consulta ao mercado para ter preços mais baixos.

6.5 – Análise de Resultados

6.5.1. Ensaio Estático

Este estudo foi realizado com a finalidade de comparar as tensões e deformações a que o sistema está sujeito quando se encontra na fase inicial do processo, ou seja, apenas existindo a força normal de interação do pino contra o disco sem movimento rotacional do disco, conforme ilustrado na Figura 45.

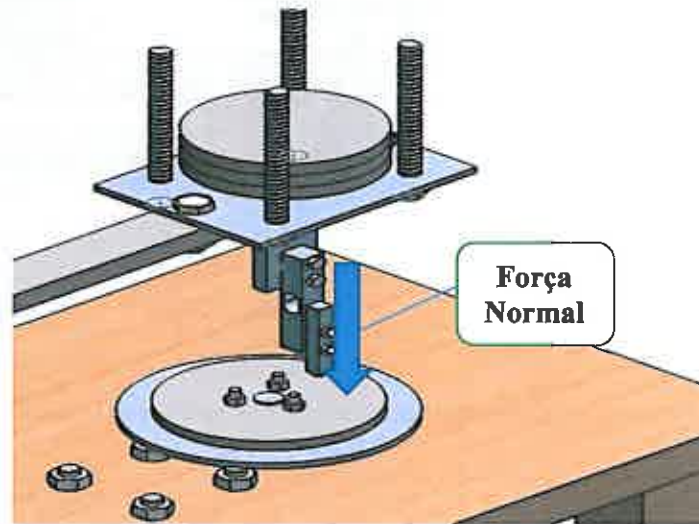


Figura 45 - Aplicação do sentido da Força Normal no Ensaio Estático

Realizaram-se três estudos para cada disco de teste, ou seja no total efectuaram-se 9 simulações.

Numa abordagem inicial foram definidas as condições fronteiras entre a mesa e o chão, e as solicitações a que os componentes estavam sujeitos. Em seguida foi necessário definir o refinamento da malha. Como é uma estrutura simples optou-se por uma malha de quatro pontos Jacobianos de tolerância 0.81 mm e o tamanho do elemento 16.24 mm (malha o mais refinada possível para obter resultados aceitáveis para os valores da deformação e Tensão Von Mises definidos automaticamente através do Software) como representado na Figura 46.



Figura 46 – Estrutura com malha

6.5.1.1. Disco de Teste – Aço Carbono (SAE 1020)

Um dos materiais escolhidos e ensaiado para o disco, de modo a formar um par cinemático com a Alumina do pino, foi o Aço Carbono SAE 1020. Considerando a malha descrita anteriormente, obtiveram-se os valores de deformação e tensão máxima para as diferentes cargas aplicadas de 20, 30 e 40 N, apresentados respectivamente nas Figuras 47, 48 e 49. As propriedades do Aço Carbono encontram-se na Tabela 7.

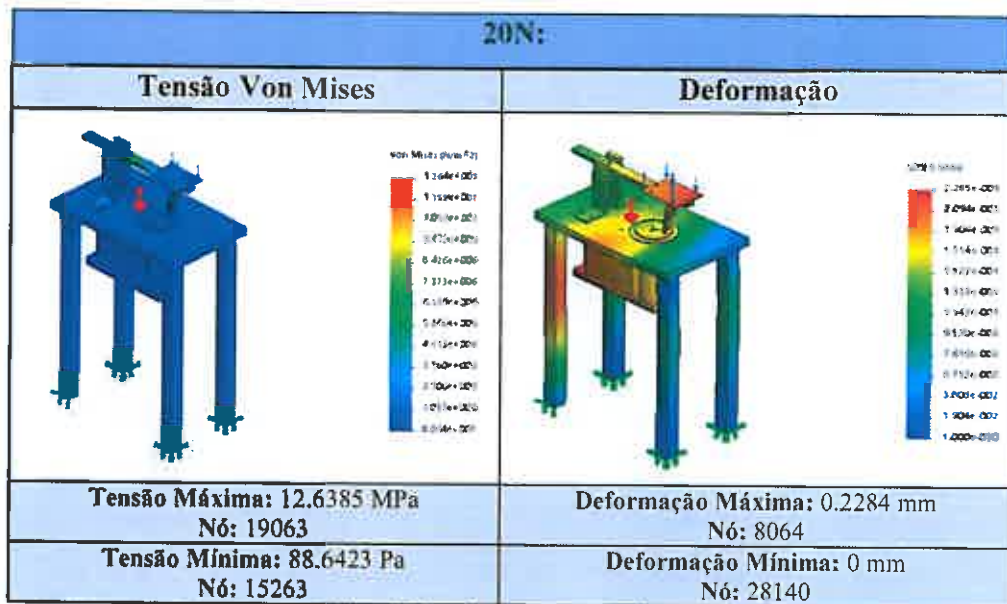


Figura 47 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Aço Carbono

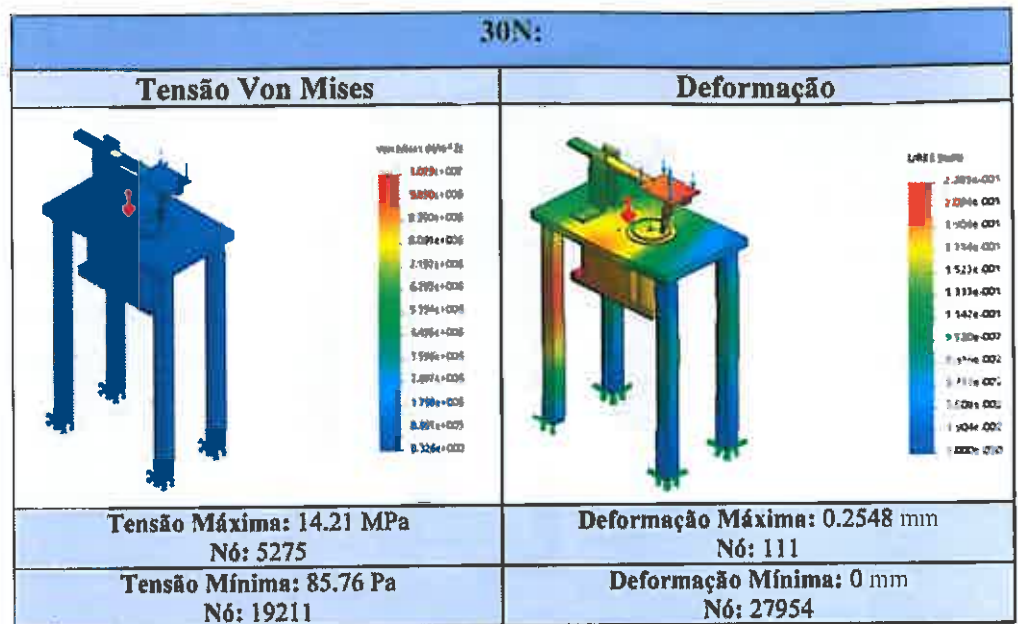


Figura 48 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Aço Carbono

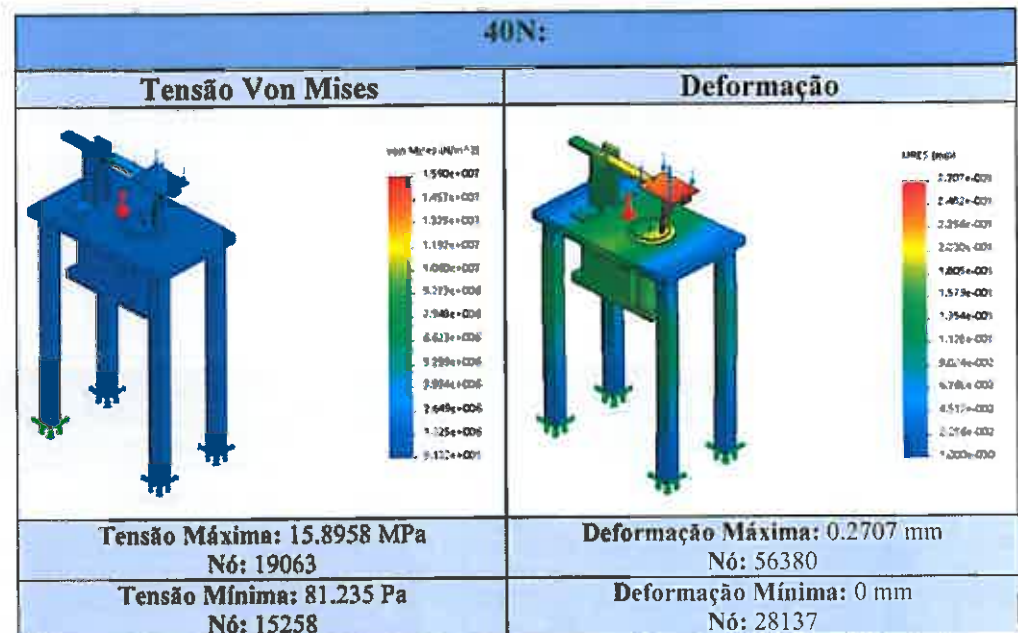


Figura 49 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Aço Carbono

Considerando esta malha, obtém-se, tal como esperado, valores de deformação e tensão máxima no caso da aplicação da carga de 40N, tomando essas grandezas os valores de 0.27072 mm e 15.8958 MPa respectivamente. A deformação encontra-se dentro dos limites impostos e, como as forças em jogo são muito pequenas, a tensão máxima obtida é muito inferior à tensão de cedência do material.

6.5.1.2. Disco de Teste – Borracha Normal

Outro material escolhido e ensaiado para o disco, de modo a formar um par cinemático com a Alumina do pino, foi a Borracha Natural. Considerando a malha descrita anteriormente, obtiveram-se os diferentes valores de deformação e tensão máxima para as diferentes cargas aplicadas de 20, 30 e 40 N (Figuras 50, 51 e 52).

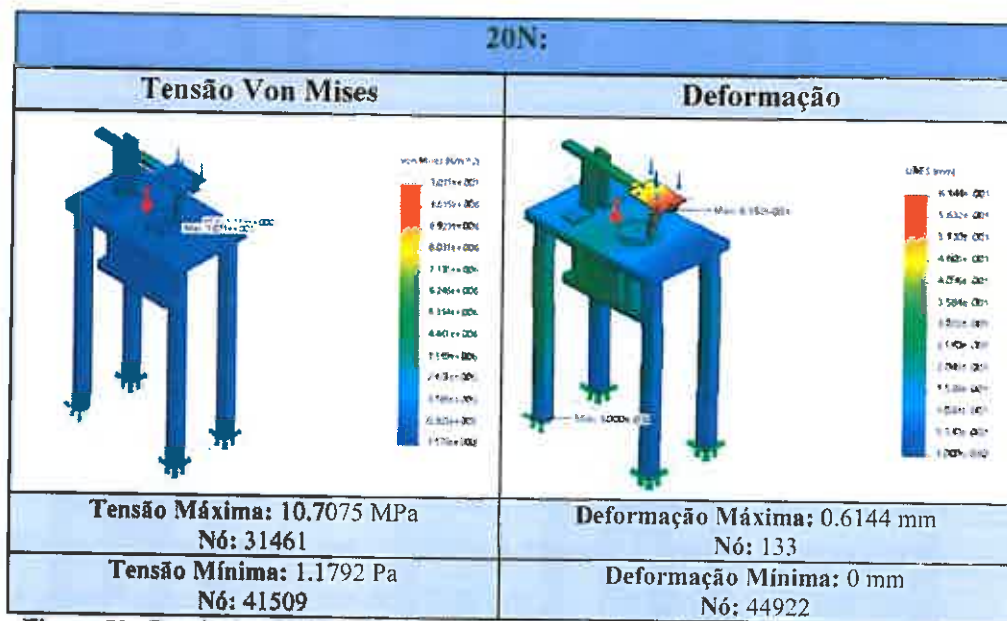


Figura 50 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Borracha Natural

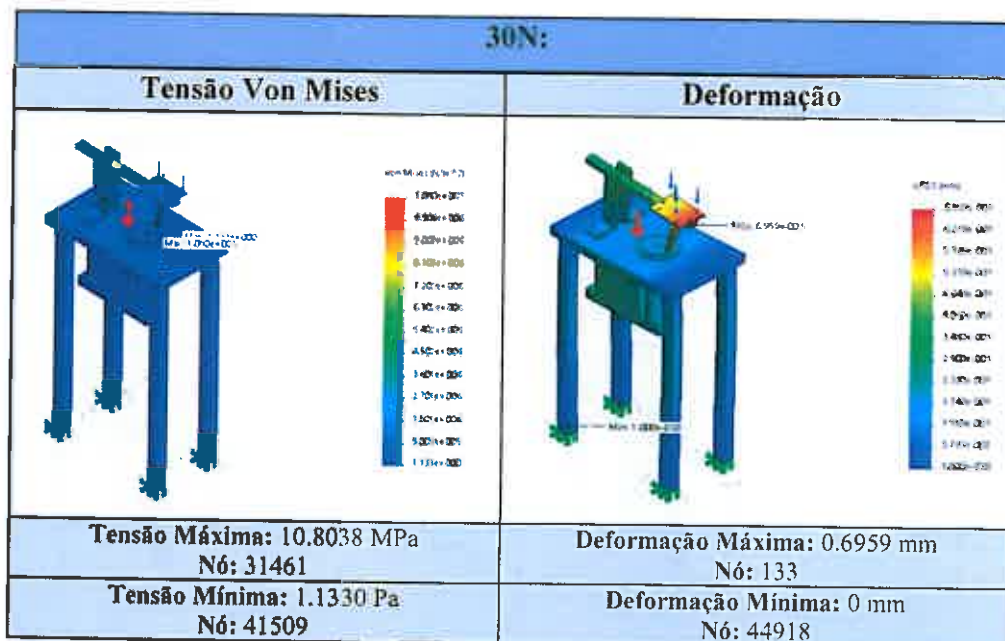


Figura 51 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Borracha Natural

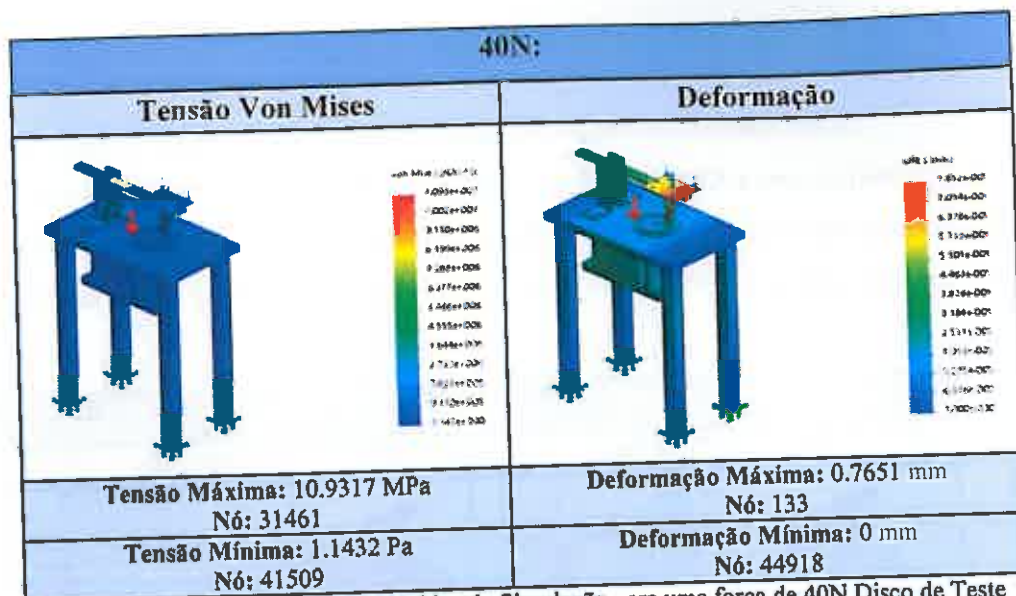


Figura 52 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Borracha Natural

Considerando esta malha também nesta situação se obtiveram os valores máximos de deformação e tensão (respectivamente 0.7651 mm e 10.9317 MPa) para uma carga aplicada de 40N. Também neste caso, a deformação (que, de acordo com o esperado, é superior à obtida no caso do aço carbono) encontra-se dentro dos limites impostos e como as forças em jogo são pequenas, a tensão máxima obtida é inferior à tensão de cedência do material.

6.5.1.3. Disco de Teste – Teflon

Outro material escolhido e ensaiado para o disco, de modo a formar um par cinemático com a Alumina do pino, foi o Teflon. Considerando a malha descrita anteriormente, obtiveram-se os diferentes valores de deformação e tensão máxima para as diferentes cargas aplicadas de 20, 30 e 40 N (Figuras 53, 54 e 55).

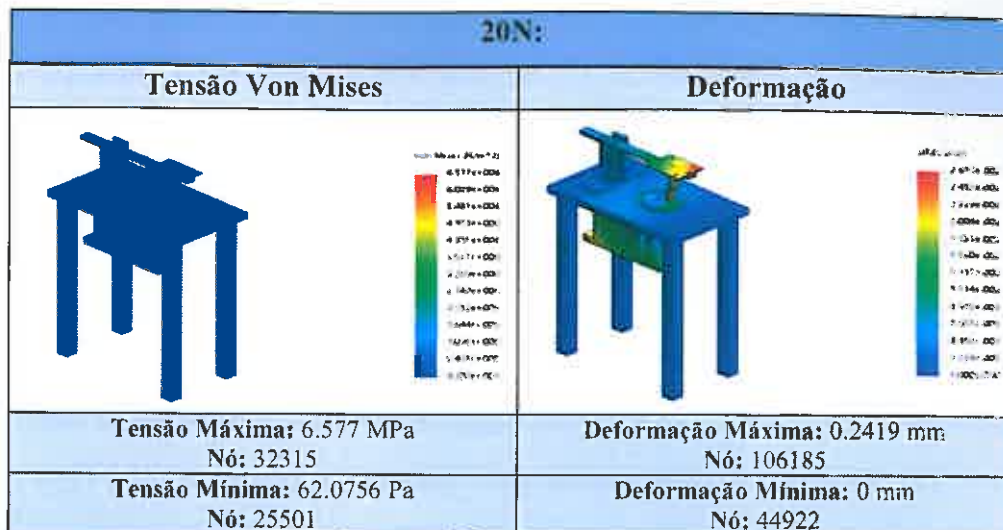


Figura 53 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 20N Disco de Teste Teflon



Figura 54 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 30N Disco de Teste Teflon

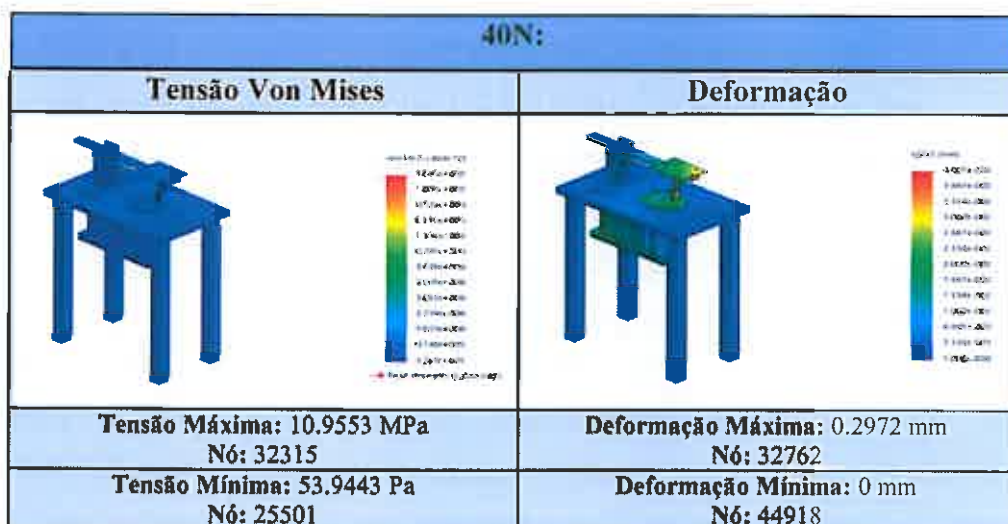


Figura 55 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 40N Disco de Teste Teflon

Mais uma vez, considerando esta malha, os resultados obtidos para a deformação e tensão máximas ocorrem no caso da aplicação de uma força normal de 40N, sendo respectivamente, 0.2972 mm e 10.9553 MPa. Mais uma vez a deformação encontra-se dentro dos limites impostos e como as forças em jogo são pequenas, a tensão máxima obtida é inferior à tensão de cedência do material.

6.5.1.4. Comparação da análise dos ensaios estáticos

De acordo com os valores máximos da deformação e Tensão Von Mises retirados das simulações efectuadas nos ensaios estáticos, chega-se à Tabela 8:

Tabela 8 – Valores das deformações e tensões Von Mises máximos nos ensaios estáticos

Ensaio	Carga aplicada nos Discos (N)	Valores Máximos Deformação (mm)	Valores Máximos Tensão (MPa)	Material Disco de teste
1	20	0,228	12,638	Aço Carbono (SAE 1020)
2	30	0,254	14,210	Aço Carbono (SAE 1020)
3	40	0,270	15,895	Aço Carbono (SAE 1020)
4	20	0,614	10,707	Borracha Natural
5	30	0,695	10,803	Borracha Natural
6	40	0,765	10,931	Borracha Natural
7	20	0,241	6,577	Teflon
8	30	0,278	8,288	Teflon
9	40	0,297	10,955	Teflon

Como se verifica na Tabela 8, o Disco de Aço Carbono é o que está sujeito a uma maior Tensão Von Mises (15.895 MPa), enquanto a Borracha Natural é o material que apresenta uma maior deformação (0.765 mm). A maior diferença verifica-se nos valores da deformação. Conclui-se ainda que nenhum material ultrapassa o valor da sua tensão cedência e, como tal, não existe qualquer problema com as condições iniciais dos ensaios.

De forma a apurar melhores resultados e fugindo um pouco às condições normais de serviço deste Tribómetro, fez-se uma simulação para cada disco de teste, onde no contacto Pino-Disco é exercida uma Força Normal de 125 N sobre o disco. Os resultados destas simulações são apresentados nas Figuras 56, 57 e 58.

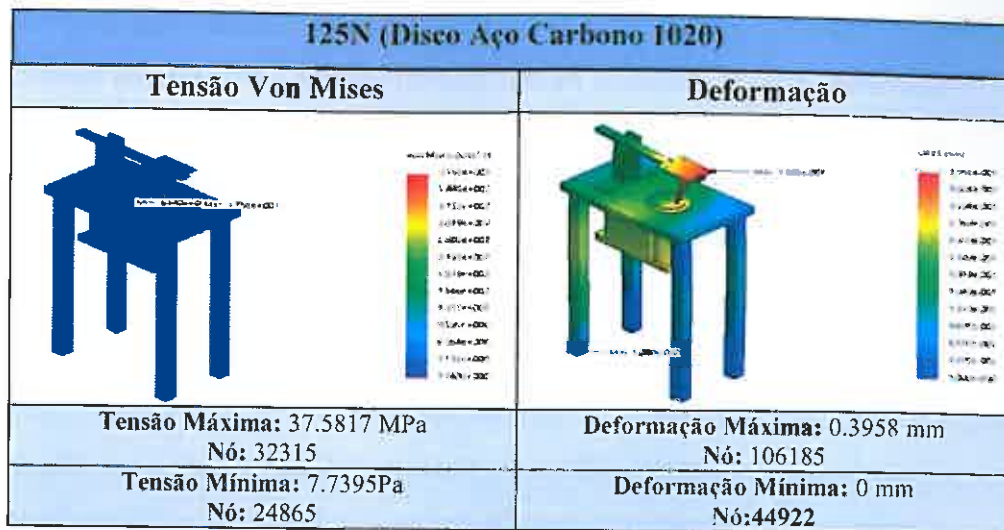


Figura 56 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Aço Carbono

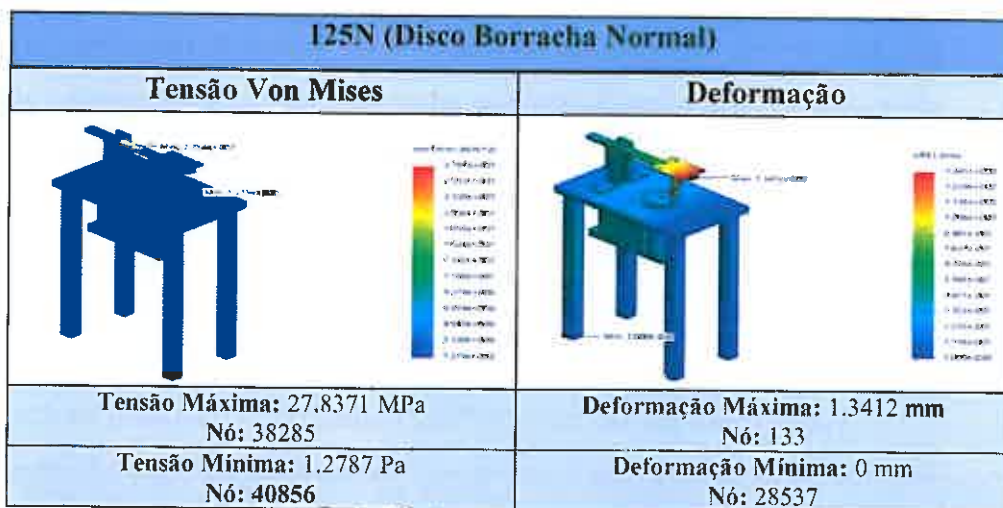


Figura 57 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Borracha Natural

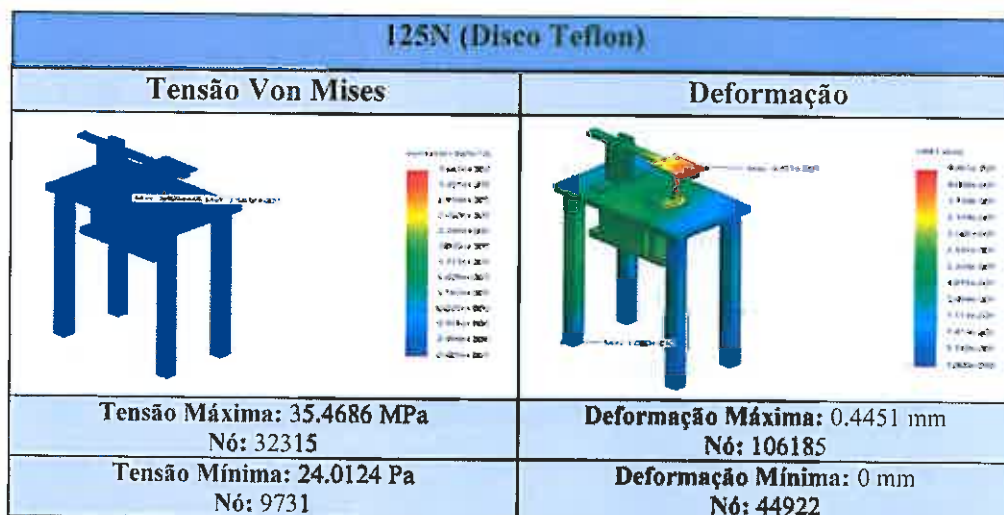


Figura 58 - Resultados Obtidos da Simulação para uma força de 125N Disco de Teste Teflon

Das Figuras 56, 57 e 58 verifica-se que os materiais que constituem os diferentes pares cinemáticos, mesmo quando sujeitos a forças muito superiores às suas condições reais de serviço, os mesmos acabam por não fracturar, ou seja a Tensão Von Mises é inferior à Tensão de Cedência. Concluiu-se que o equipamento poderá trabalhar sem qualquer restrição nas condições normais de serviço.

6.5.2. Motion Study

Além do Estudo estático no Software “*SolidWorks*” e que foi alvo de análise na secção anterior deste trabalho. Também foi realizado um estudo dinâmico em “*Motion Study*”. Este estudo é muito semelhante quanto aos objectivos relativamente ao que se passará nos ensaios experimentais. Consiste na aplicação de uma carga normal do pino no disco através de pesos pré-calibrados sobre o pino (força normal), tendo-se igualmente um disco em rotação, actuado através de um engenho de furar com uma velocidade pré-determinada. Como resultado surge uma força tangencial ao disco, sendo possível determinar o coeficiente de atrito através da razão entre essa a força tangencial (força de atrito) e a criada entre a interacção do pino com o disco de teste (força normal). A Figura 44 representa o processo aqui descrito.

Foram realizados três ensaios (força normal de 20, 30 e 40N) para cada um dos três pares cinemáticos. Com os valores da força de atrito obtidos quase instantaneamente quando sujeito às cargas normais de 20, 30 e 40N é possível obter o coeficiente de atrito em cada instante. O objectivo dos ensaios é assim a determinação do coeficiente de atrito para os três materiais seleccionados, como forma de aferir o equipamento projectado neste trabalho e, simultaneamente, avaliar a forma como a força de atrito evolui em função da velocidade.

6.5.2.1 - Ensaio Alumina (Pino) vs Aço Carbono SAE 1020 (Disco)

Nas Figuras 59, 60 e 61 está representada a relação da força de atrito em função da velocidade para o par cinemático Alumina-Aço Carbono SAE 1020, tendo em conta as diferentes forças normais em análise.

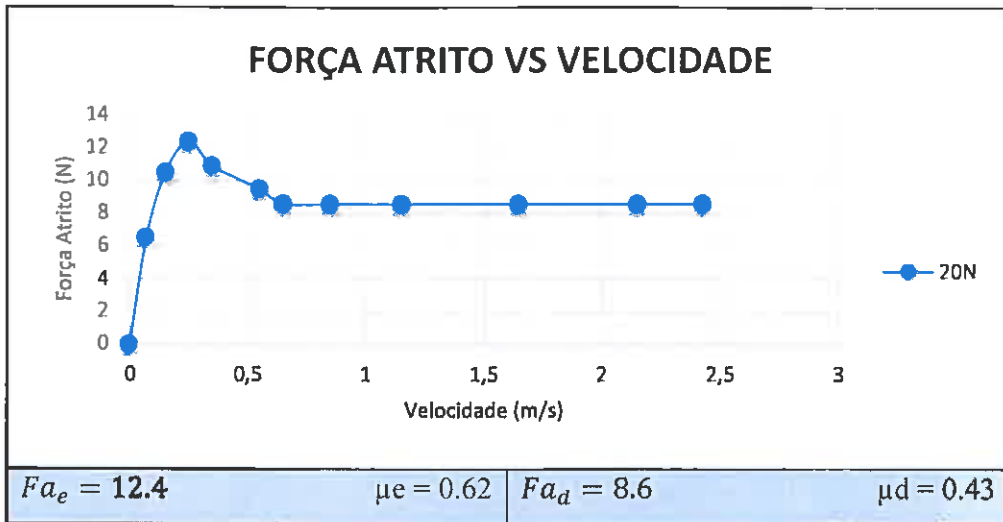


Figura 59 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N

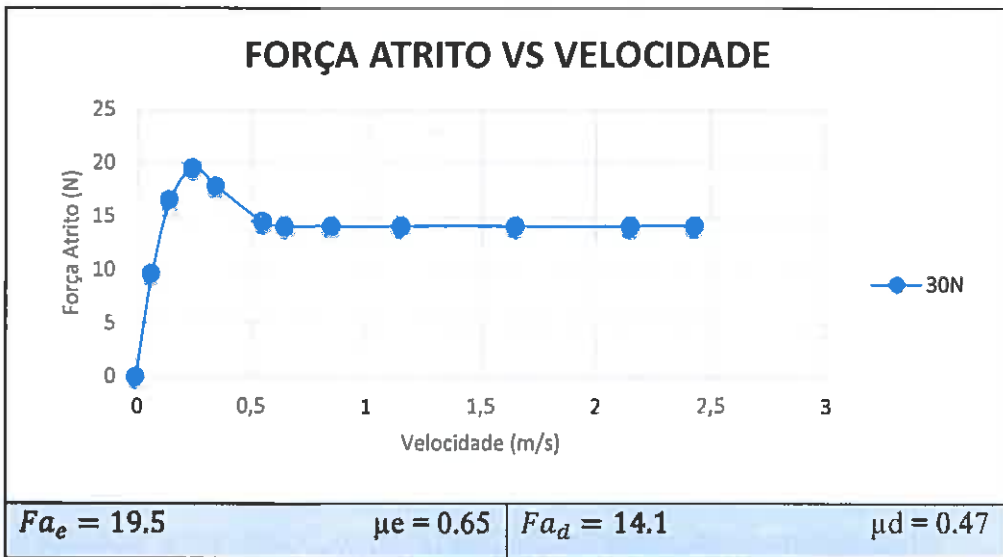


Figura 60 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N

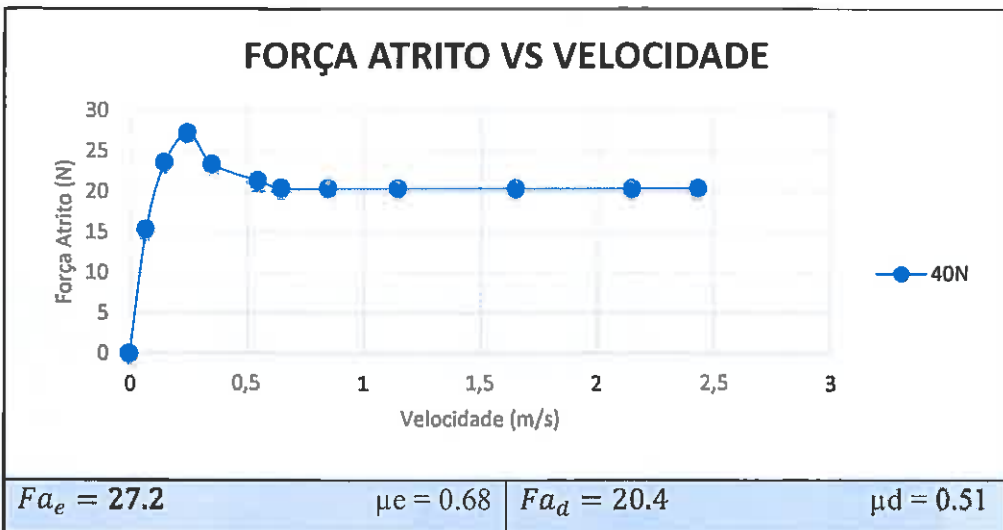


Figura 61 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N

Com as várias simulações realizadas para obter a força de atrito em função da velocidade em cada instante e de acordo com os dados introduzidos para obter as simulações em “SolidWorks”, é possível realizar um Gráfico que relaciona a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade (Figura 62).

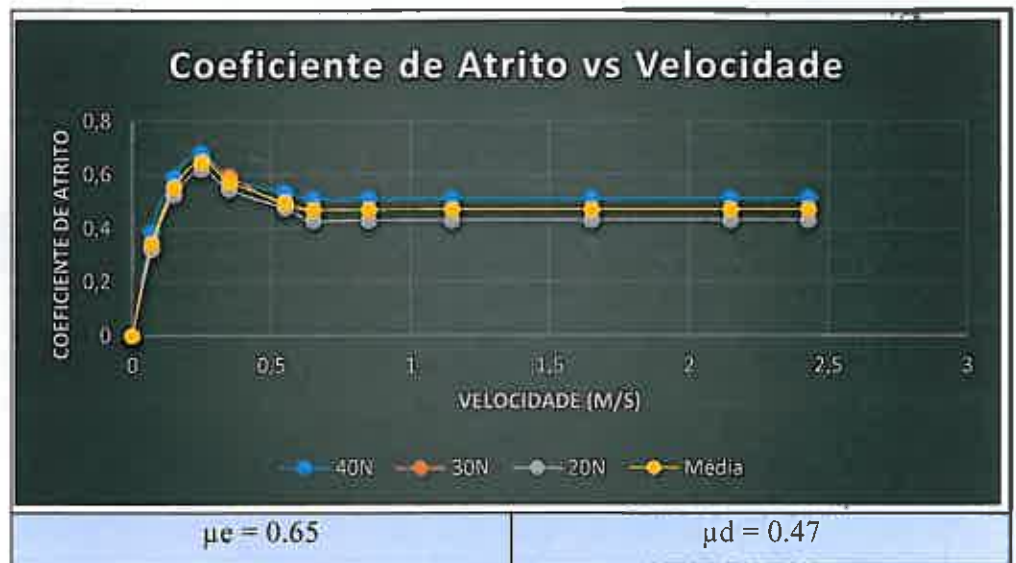


Figura 62 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade

Tendo em conta os valores obtidos em cada instante para os diferentes valores do coeficiente de atrito quando sujeito a diferentes forças normais (20,30 e 40N), apresenta-se através de um gráfico (Figura 62) a média do coeficiente de atrito obtido através das três simulações (linha amarelo “Média”). Obteve-se assim um coeficiente de atrito estático 0.65 (μ_e) e um coeficiente atrito dinâmico de 0.47 (μ_d). Pode-se verificar igualmente que a força necessária para vencer o atrito em todos os casos é quase instantânea.

Na Tabela 9 é possível verificar todos os valores obtidos para a força de atrito (estática e dinâmica) e para o coeficiente de atrito (estático e dinâmico).

Tabela 9 – Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Aço Carbono SAE 1020)

Força Normal	Força Atrito Estático	Força Atrito Dinâmico	Coefficiente Atrito Estático	Coefficiente Atrito Dinâmico
0	0	0	0	0
20	12.4	8.6	0.62	0.43
30	19.5	14.1	0.65	0.47
40	27.2	20.4	0.68	0.51
Valor médio	19.7	14.4	0.65	0.47

Com os valores representados na Tabela 9, é possível realizar um gráfico onde se relaciona a força de atrito em função da força normal (Figura 63).

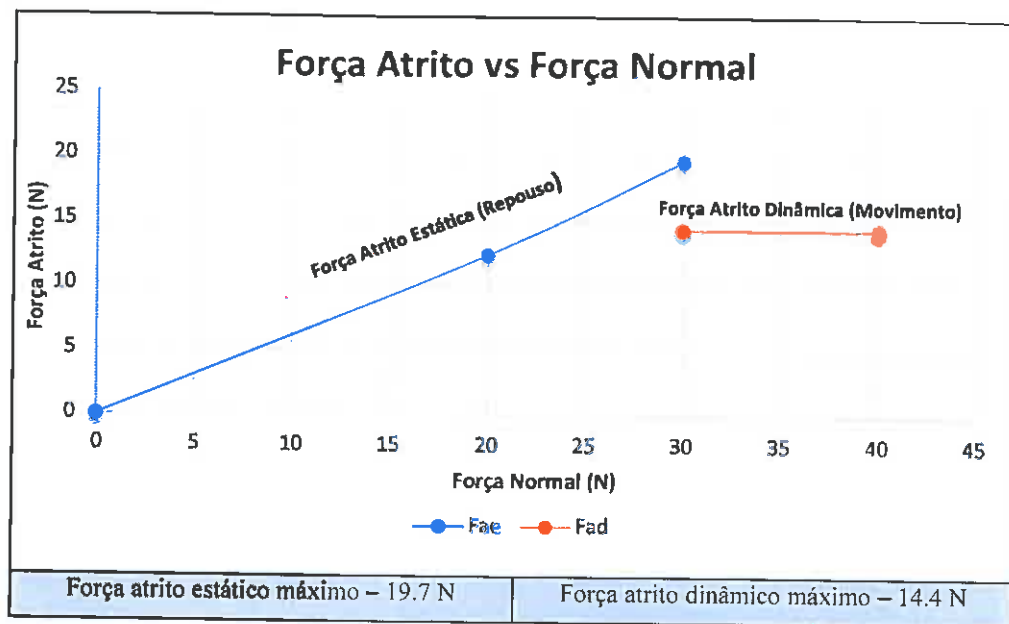


Figura 63 - Relação da força de atrito vs força normal – Aço Carbono SAE 1020

Da Figura 63 concluiu-se que o Disco de Aço Carbono em contacto com o Pino em Alumina estará em repouso até conseguir vencer a força de atrito estática máxima (19.7 N), a partir desse valor o Disco vence a força de atrito e entra em movimento rotacional, obtendo-se uma força de atrito dinâmica de 14.4 N.

6.5.2.2 - Ensaio Alumina (Pino) vs Borracha Natural (Disco)

Nas Figuras 64, 65 e 66 está representada a relação da força de atrito em função da velocidade para o par cinemático Alumina-Borracha Natural, tendo em conta as diferentes forças normais em análise.

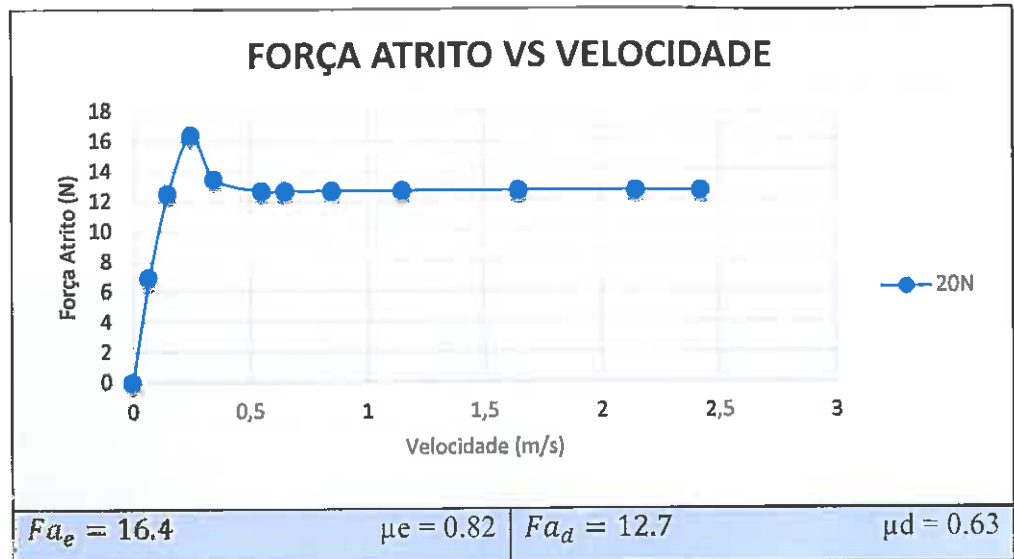


Figura 64 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N

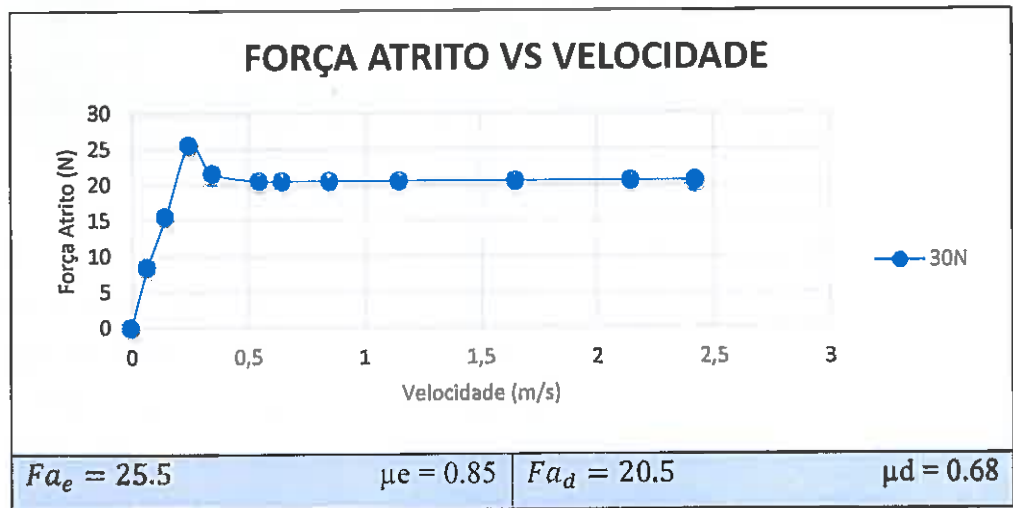


Figura 65 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N

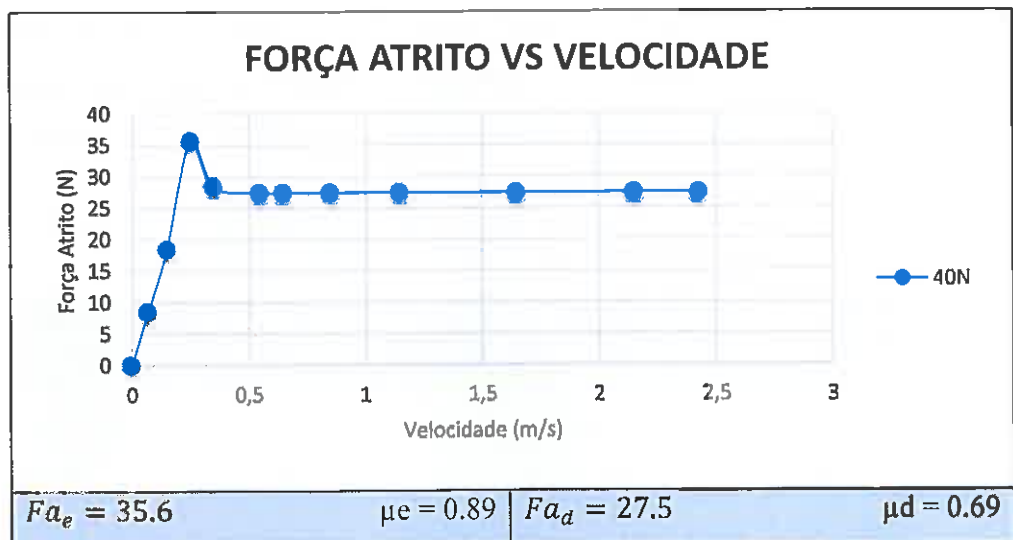


Figura 66 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N

Com as várias simulações realizadas para obter a força de atrito em função da velocidade em cada instante e de acordo com os dados introduzidos para obter as simulações em "Solidworks", é possível realizar um Gráfico que relaciona a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade (Figura 67).

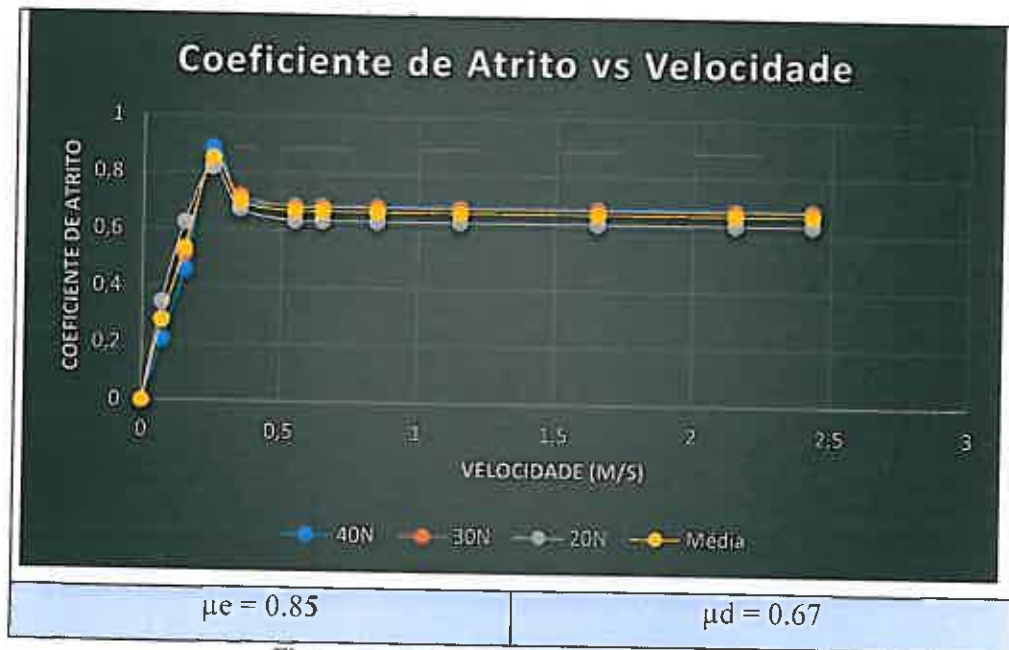


Figura 67 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade

Tendo em conta os valores obtidos em cada instante para os diferentes valores do coeficiente de atrito quando sujeito a diferentes forças normais (20, 30 e 40N), apresenta-se através de um gráfico (Figura 67) a média do coeficiente de atrito obtido através das três simulações (linha amarelo "Média"). Obteve-se assim um coeficiente de atrito estático 0.85 (μ_e) e um coeficiente atrito dinâmico de 0.67 (μ_d). Pode-se verificar igualmente que a força necessária para vencer o atrito em todos os casos é quase instantânea.

Na Tabela 10 é possível verificar todos os valores obtidos para a força de atrito (estática e dinâmica) e para o coeficiente de atrito (estático e dinâmico).

Tabela 10 - Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Borracha Natural)

Força Normal	Força Atrito Estático	Força Atrito Dinâmico	Coefficiente Atrito Estático	Coefficiente Atrito Dinâmico
0	0	0	0	0
20	16.4	12.7	0.82	0.63
30	25.5	20.5	0.85	0.68
40	35.6	27.5	0.89	0.69
Valor médio	25.8	20.2	0.85	0.67

Com os valores representados na Tabela 10, é possível realizar um gráfico onde se relaciona a força de atrito em função da força normal (Figura 68)

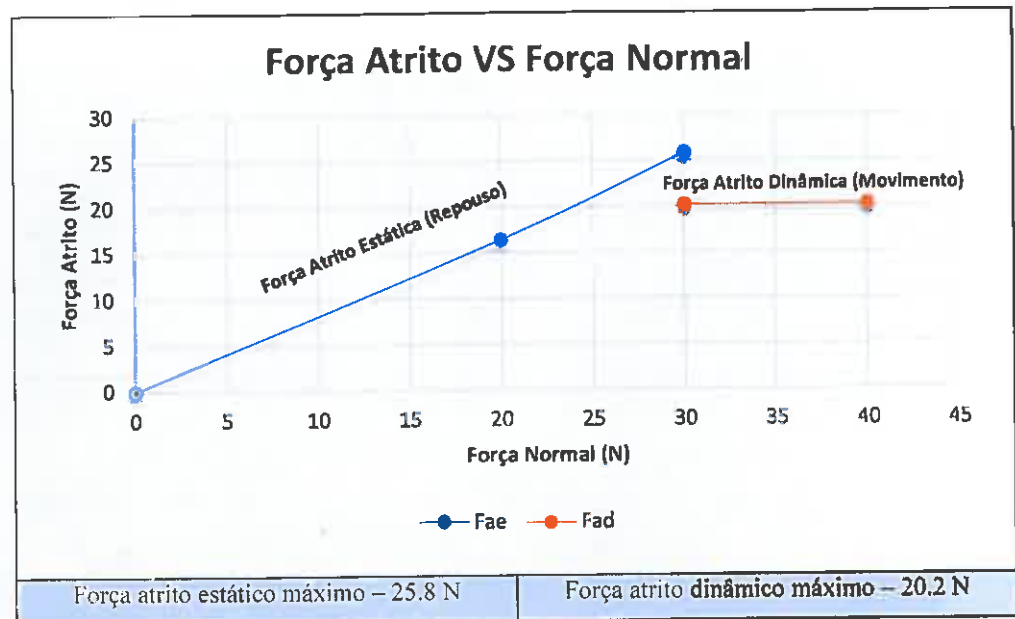


Figura 68 - Relação força de atrito vs força normal – Borracha Natural

Da Figura 68 concluiu-se que o Disco de Borracha em contacto com o Pino em Alumina estará em repouso até conseguir vencer a força de atrito estática máxima (25.8 N), a partir desse valor o Disco vence a força de atrito e entra em movimento rotacional, obtendo-se uma força de atrito dinâmica de 20.2 N.

6.5.2.3 - Ensaio Alumina (Pino) vs Teflon (Disco)

Nas Figuras 69, 70 e 71 está representada a relação da força de atrito em função da velocidade para o par cinemático Alumina-Teflon, tendo em conta as diferentes forças normais em análise.

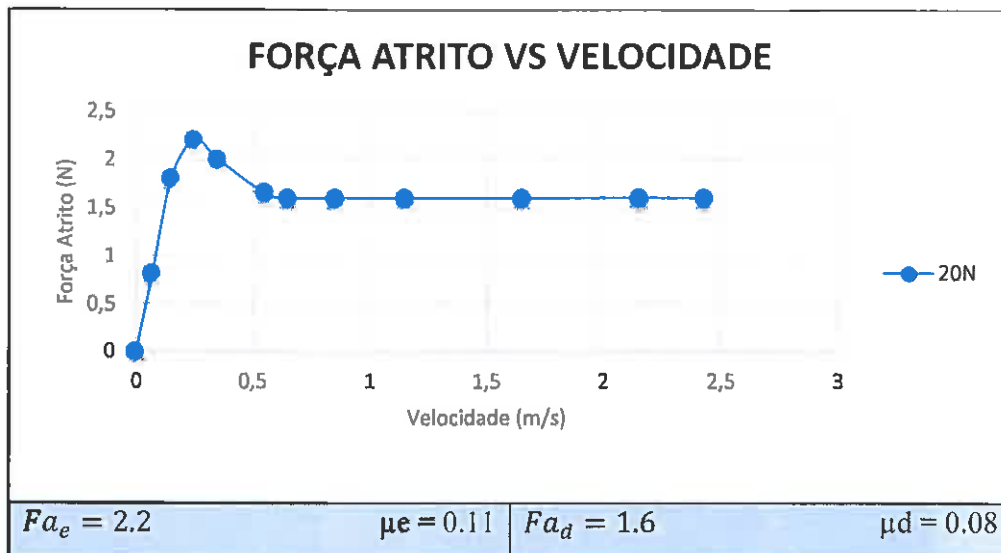


Figura 69 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 20N

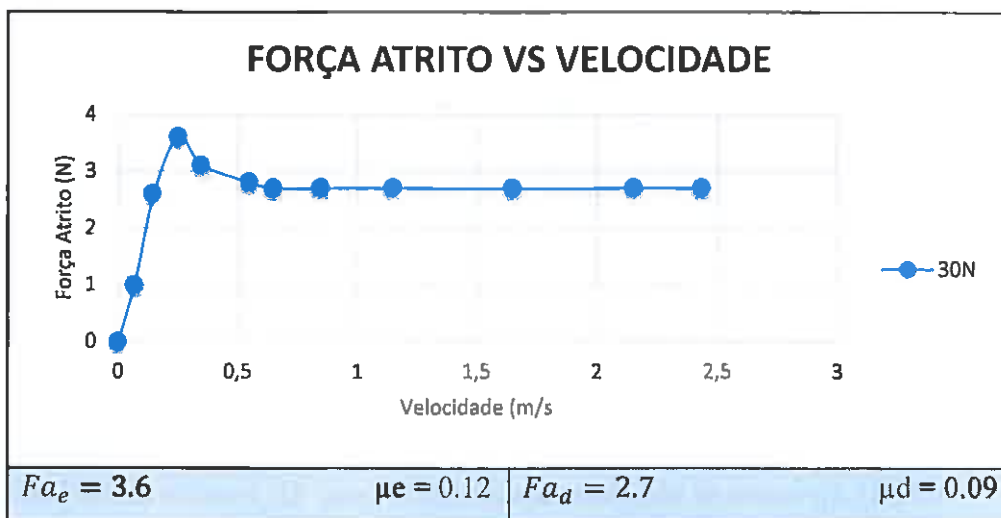


Figura 70 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 30N

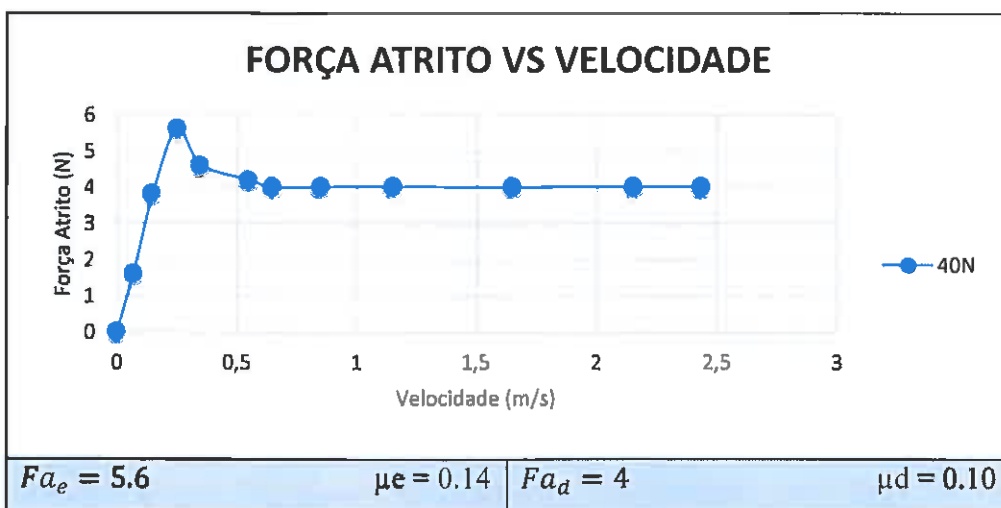


Figura 71 - Relação força de atrito vs velocidade sujeito a uma força normal de 40N

Com as várias simulações realizadas para obter a força de atrito em função da velocidade em cada instante e de acordo com os dados introduzidos para obter as simulações em “Solidworks”, é possível realizar um Gráfico que relaciona a variação do coeficiente de atrito em função da velocidade (Figura 72).



Figura 72 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade

Tendo em conta os valores obtidos em cada instante para os diferentes valores do coeficiente de atrito quando sujeito a diferentes forças normais (20, 30 e 40N), apresenta-se através de um gráfico (Figura 72) a média do coeficiente de atrito obtido através das três simulações (linha amarelo “Média”). Obteve-se assim um coeficiente de atrito estático 0.12 (μ_e) e um coeficiente atrito dinâmico de 0.09 (μ_d). Pode-se verificar igualmente que a força necessária para vencer o atrito em todos os casos é quase instantânea.

Na Tabela 11 é possível verificar todos os valores obtidos para a força de atrito (estática e dinâmica) e para o coeficiente de atrito (estático e dinâmico).

Tabela 11 - Valores obtidos para a força de atrito e coeficiente de atrito nos casos de estudo (Alumina vs Teflon)

Força Normal	Força Atrito Estático	Força Atrito Dinâmico	Coefficiente Atrito Estático	Coefficiente Atrito Dinâmico
0	0	0	0	0
20	2.2	1.6	0,11	0,08
30	3.6	2.7	0,12	0,09
40	5.6	4	0,14	0,1
Valor médio	3.8	2.8	0,12	0,09

Com os valores representados na Tabela 11, é possível realizar um gráfico onde se relaciona a força de atrito em função da força normal (Figura 73).

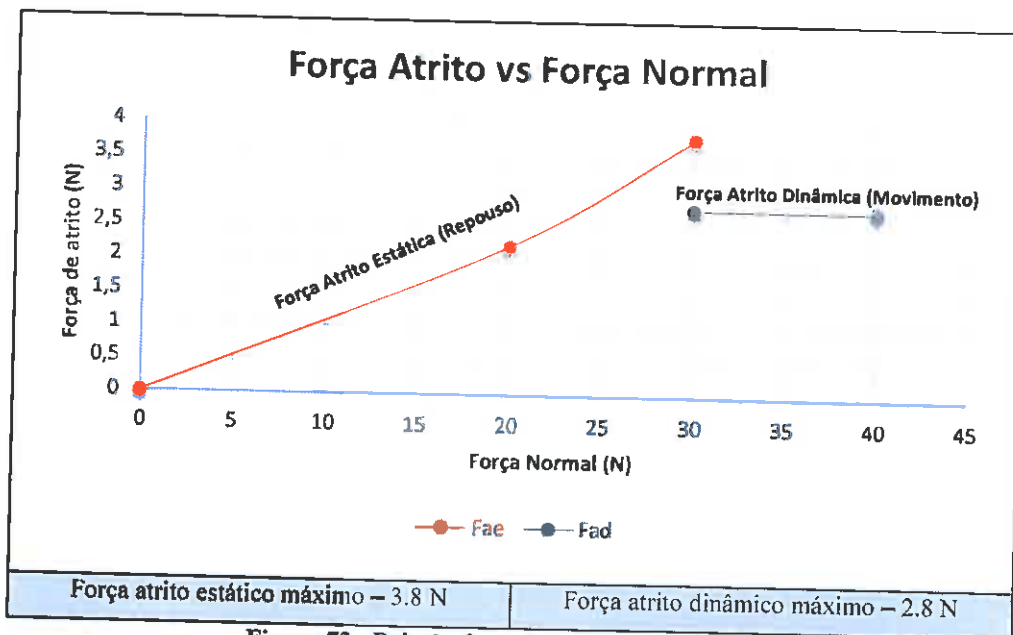


Figura 73 - Relação força de atrito vs força normal - Teflon

Da Figura 73 concluiu-se que o Disco de Teflon em contacto com o Pino em Alumina estará em repouso até conseguir vencer a força de atrito estática máxima (3.8 N), a partir desse valor o Disco vence a força de atrito e entra em movimento rotacional, obtendo-se uma força de atrito dinâmica de 2.8 N.

A partir das Figuras 63, 68 e 73 é possível juntar todas as Figuras numa só e ver os desníveis existentes entre os diferentes pares cinemáticos que foram alvo de análise (Figura 74), quando relacionamos a força de atrito com a força normal.

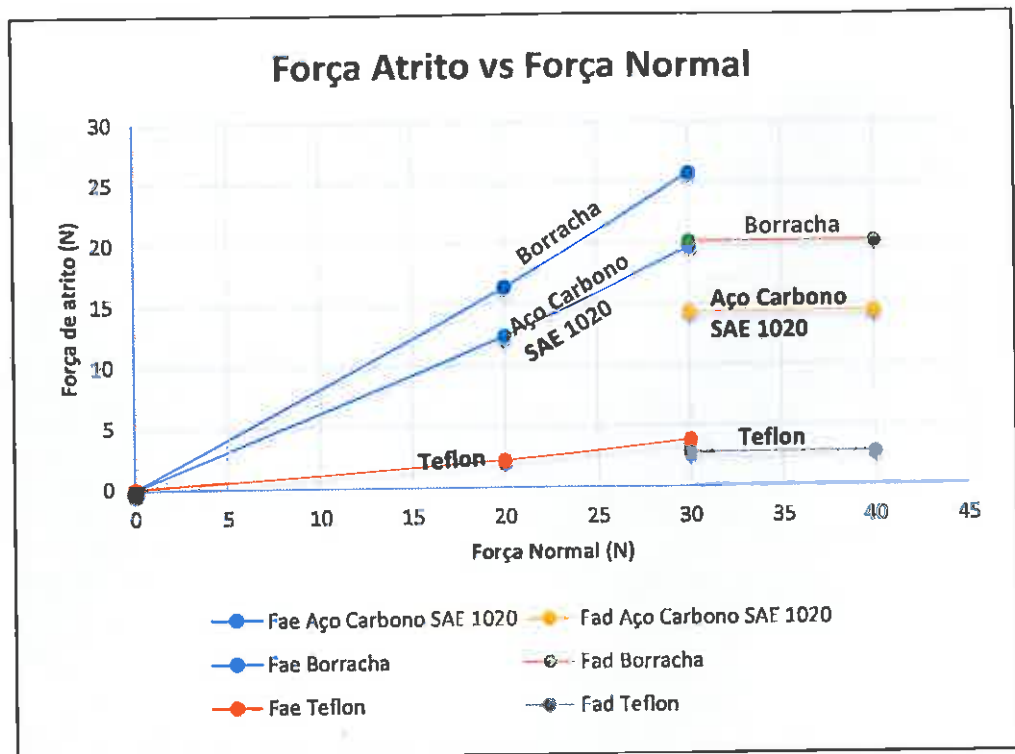


Figura 74 - Relação força de atrito vs força normal para os três pares cinmáticos

A partir das Figuras 62, 67 e 72 é possível juntar todas as Figuras numa só e ver os desníveis existentes entre os diferentes pares cinmáticos que foram alvo de análise (Figura 75), quando relacionamos os valores médios do coeficiente de atrito com a velocidade.

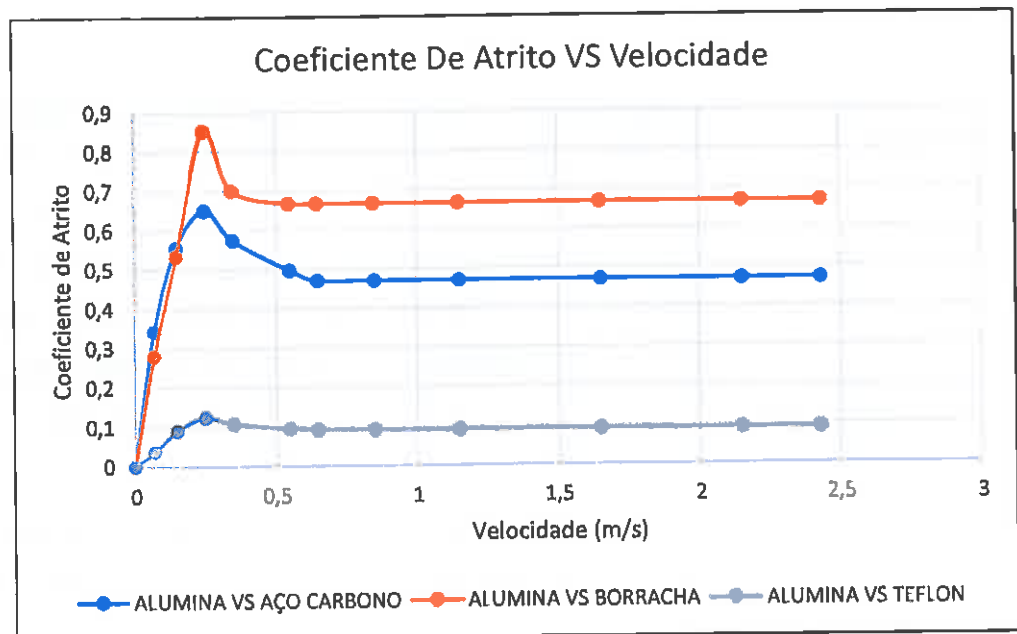


Figura 75 - Relação coeficiente de atrito vs velocidade para os três pares cinmáticos

A partir das Figuras 74 e 75 verifica-se, tal como era expectável, que o par cinemático que apresenta maior força de atrito e por sua vez maior coeficiente de atrito é o par cinemático Alumina vs Borracha Natural. Pelo contrário, o par cinemático Alumina vs Teflon é o que apresenta menor força de atrito e coeficiente de atrito razão pela qual este material é considerado um "lubrificante sólido" podendo ser utilizado em contactos seco, como por exemplo no caso de rolamentos de esferas. Já o par cinemático Alumina vs Aço Carbono SAE 1020 apresenta valores de coeficiente de atrito e força de atrito intermédios, em relativo bom acordo com o valor previsto teoricamente (vd. 4.2). Verifica-se ainda na Figura 75 que a partir do momento que se entra na eminência do coeficiente do atrito dinâmico o mesmo permanece constante independentemente da velocidade de deslizamento, como referido na 4ª lei do atrito seco e enumerada por Coulomb. É sabido que na realidade o atrito não se permanecerá constante, mas sim sofrerá pequenas oscilações.

Os valores médios máximos do coeficiente de atrito e força de atrito poderão ser consultados na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores do coeficiente de atrito e forças de atrito médios para os pares cinemáticos em estudo

	Alumina vs Aço Carbono SAE 1020	Alumina vs Borracha Natural	Alumina vs Teflon
μ_e	0.65	0.85	0.12
μ_d	0.47	0.67	0.09
F _{ae}	19.7	25.8	3.8
F _{ad}	14.4	20.2	2.8

Estes valores obtidos através do "Solidworks" terão obviamente que ser alvo de análise e de comparação com os ensaios experimentais aos diferentes pares cinemáticos quando se tiver o equipamento construído e funcional, sendo alvo de trabalho futuro, como referido no Capítulo 7. Contudo, o facto dos valores obtidos por simulação serem valores credíveis, permite concluir que os pressupostos de partida para a construção do equipamento são válidos.

6.5.3. Taxa de desgaste

Como representado na Figura 33, pretende-se verificar o coeficiente de atrito e a taxa de desgaste entre pares cinemáticos. No que respeita à taxa de desgaste, no caso em que a avaliação do desgaste é feita através da perda de massa, a massa deve ser transformada em perda de volume através do conhecimento da densidade do material. Na Tabela 13 podem ser consultados os diferentes valores, obtidos pela aplicação das equações apresentadas no capítulo 3, que permitem determinar o coeficiente de desgaste final dos diferentes componentes. Esta análise foi efectuada para os diferentes materiais testados, quando sujeitos a uma força normal de 40N e para uma velocidade do disco constante igual a 580 rpm.

Tabela 13 – Propriedades dos materiais sujeitos a desgaste antes e depois dos ensaios

Material Disco	Aço Carbono SAE 1020	Borracha Natural	Teflon
Massa específica (g/cm ³)	7.90	0.96	2.32
Massa Inicial (g)	484.26	58.85	142.21
Massa final (g)	483.96	58.53	142.01
Variação Massa (g)	0.30	0.32	0.20
Variação da Massa (%)	0.06	0.54	0.14
Volume (mm ³)	37.9	341.6	86.2
N ^o rotações (rpm x min)	29000	29000	29000
Tempo ensaio (s)	300	300	300
Raio da pista de desgaste (m)	0.04	0.04	0.04
Distância percorrida (m)	728.28	728.28	728.28
Dureza Brinell (HB)	121	-	-
Carga aplicada (N)	40	40	40
Coefficiente de desgaste (k)	1.54 x 10 ⁻³	-	-

Através dos dados apresentados na Tabela 13 é possível comparar o volume desgastado para os três materiais testados verificando-se, como expectável, que a Borracha Natural é aquela que apresenta o maior valor (341.6 mm³).

Relativamente à determinação do coeficiente de desgaste (k), parâmetro associado com a resistência do material a ser desgastado (para umas dadas

condições de pressão e velocidade), este foi calculado no caso do Aço Carbono SAE 1020. Tal deveu-se ao facto de que a determinação do valor de “k” através da equação de Archard utiliza a dureza de Brinell, escala somente utilizada para os metais. Efectivamente no caso de polímeros e elastómeros a dureza é obtida através de ensaios de Shore, o que inviabiliza a comparação de valores que possuem dois tipos de dureza distintos. O valor de coeficiente de desgaste obtido para o Aço Carbono SAE 1020 foi de 1.54×10^{-3} valor este que é semelhante ao encontrado na bibliografia¹, o que mais uma vez parece permitir concluir que o projecto de Tribómetro realizado neste trabalho permitirá a obtenção de valores fiáveis.

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Wear_coefficient

Capítulo 7

Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

7.1 – Conclusões Gerais

O desenvolvimento de um trabalho sobre o tema proposto surge da necessidade de projectar um equipamento que fosse de fácil concepção e utilização, e que ao mesmo tempo não apresentasse custos elevados, cumprindo sempre o requerido pelas normas ASTM.

Inicialmente foi efectuada uma pesquisa acentuada a vários níveis, com o objectivo de amplificar o nível de conhecimento sobre Tribómetros, bem como o seu princípio de funcionamento. Com os conhecimentos adquiridos na pesquisa efectuada foi possível criar um esquema de objectivos para assim simplificar e definir os passos que se seguiam. No esquema de objectivos foram representados hierarquicamente os objectivos. Com o esquema de objectivos foi possível identificar três características principais: o tipo de movimento, a aquisição de dados e aplicação da força.

Foram verificados os requisitos internacionais constantes na normalização correspondente à construção de Tribómetros, o que permitiu avançar com várias especificações e dimensões de alguns elementos construtivos.

Desta forma, foi possível passar à fase de criação de soluções, sendo a parte mais criativa de todo o processo, havendo a necessidade de contactar diferentes fornecedores para saber as características das células de carga, procurar equipamentos que realizassem o movimento de rotação do disco de teste e fixação, e idealizar uma solução para o posicionamento do Pino e da célula de carga responsável pela medição do valor do coeficiente de atrito.

Após se atingirem os objectivos iniciais, começou-se por desenvolver um modelo virtual 3D com o auxílio do Software “Solidworks”, assim como a realização dos desenhos técnicos do equipamento permitindo ter uma noção da forma e do tamanho real do equipamento projectado.

Finalmente encontrou-se e idealizou-se uma solução final do equipamento que satisfazia todos os objectivos referidos inicialmente.

Antes da execução dos desenhos definitivos, efectuou-se o dimensionamento do Tribómetro. Esta fase consiste em dimensionar o equipamento nos seus principais componentes tendo os mesmos uma maior relevância para um bom funcionamento. Nesta etapa foram realizados ensaios estáticos do Pino em contacto com o Disco de Teste de modo a apurar os valores da deformação e tensão máximas quando sujeitos a diferentes cargas. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, isto porque os valores obtidos para a deformação e tensão máxima encontram-se dentro dos limites impostos, bem como as forças são muito reduzidas, sendo a tensão máxima obtida muito mais baixa que a tensão máxima do material, nunca chegando ao ponto inferior da tensão de cedência do material. Outro ensaio realizado foi o “*Motion Study*” do Software “*Solidworks*”, onde o equipamento foi submetido às condições de força normal de 20, 30 e 40 N e rotação de 580 rpm para os diferentes pares cinemáticos. Com estas condições e através de simulações efectuadas, é possível retirar o valor da força de atrito. Com os valores do coeficiente de atrito e da força normal aplicada é possível retirar o valor do coeficiente de atrito. Estas simulações foram realizadas em função da velocidade, até obter a velocidade de 580 rpm. Estes resultados têm que ser analisados e comparados com os ensaios experimentais depois de construído o equipamento, de modo a apurar o rigor dos valores obtidos através das simulações do Software.

Comparou-se ainda a evolução da força atrito em função da fomal normal e realizou-se a análise aos três pares cinemáticos representados num só gráfico, onde se verificava que a Alumina vs Borracha Natural era o par cinemático que apresentava maior força de atrito e conseqüentemente maior coeficiente de atrito e o par Alumina vs Teflon o inverso.

7.2 – Síntese dos objectivos atingidos

Sendo conveniente apresentar uma síntese de todos os objectivos atingidos, permitindo uma clara e objectiva análise do conteúdo do presente documento. Apresentam-se de seguida os objectivos atingidos:

- Caracterização e análise das áreas de domínio da Tribologia, bem como a importância da mesma;
- Conceitos e análise do desgaste;
- Análise do fenómeno do atrito, as suas leis e a relação do mesmo com o desgaste;
- Definição de Tribómetro;
- Tipos de Tribómetros existentes e relação entre os mesmos (vantagens e desvantagens);
- Estudo e análise de todas as fases de projecto para a idealização final do Tribómetro;
- Execução e análise de ensaios estáticos e dinâmicos;
- Comparação dos resultados entre a força de atrito em função da força normal e velocidade para os três pares cinemáticos que foram alvo de estudo;
- Enunciação de algumas conclusões pertinentes à análise dos resultados das simulações efectuadas, bem como alguns trabalhos futuros.

7.3 – Principais Dificuldades ou Problemas

No presente trabalho foram notadas algumas dificuldades quer a nível técnico, quer a nível de apoio financeiro.

Pode-se concluir que as etapas que trouxeram maior dificuldade na execução deste trabalho foi idealizar uma solução final para o equipamento, solução essa que só foi conseguida após a realização de vários esboços e a realização dos ensaios no Software “Solidworks” que são sempre difíceis de realizar devido aos grandes constrangimentos e parâmetros que se têm que seguir, nomeadamente no ensaio do estudo dinâmico

Outra das dificuldades sentidas foi em conceber um apoio financeiro para a execução deste projecto, em anexo apresenta-se um orçamento para execução do mesmo. O apoio não foi conseguido.

7.4 – Trabalhos Futuros

Na impossibilidade de culminar a realização do presente trabalho com a construção física do Tribómetro devido a restrições financeiras e temporais, pretende-se mesmo assim efectuar a descrição das tarefas que permitirão completar o estudo e simulação apresentados nos capítulos anteriores. Desta forma, apresentam-se as seguintes tarefas:

- Construção do equipamento – Com a concretização das simulações e produção de desenhos apresentados, pode-se passar de imediato à construção física do equipamento. Para tal, é aconselhável realizar uma nova consulta ao mercado de modo a poder actualizar (se necessário) o orçamento apresentado no Anexo I. Para suportar os custos de construção do equipamento é aconselhável procurar alguns patrocínios que facilitarão e poderão acelerar a compra dos diversos materiais.
- Instrumentação e programação - Para além da parte estrutural e sistemas de suporte, será necessário adquirir a plataforma Arduino (ou similar), que permitirá através de ligações físicas (cablagem) e programação (simples) adquirir os dados referentes à leitura das células de carga (e eventualmente outros sensores, como sensores de temperatura e humidade).
- Calibração – Será necessário calibrar o equipamento, pois o Tribómetro tem equipamentos bastante sensíveis, onde pequenos factores externos podem afectar os resultados dos ensaios.
- Ensaios - Desenvolver novas amostras de materiais diferentes, constituindo novos pares cinemáticos diferentes dos três idealizados no presente trabalho. Uma chamada de atenção para o facto de alguns materiais apresentarem custos elevados, pelo que só se justificarão se os mesmos representarem situações reais que se pretendam avaliar.
- Verificação - Nesta fase deverão ser analisados e comparados os dados experimentais obtidos nos vários ensaios com os valores obtidos através da simulação realizada em “Solidworks”, tal como apresentado na Tabela 13.

Bibliografia

- A.Barbedo de Magalhães e A.P. Monteiro Baptista, “Noções básicas sobre o desgaste de materiais”, ENGENHARIA Nº2, 1983
- A.Barbedo de Magalhães e A.P. Monteiro Baptista, “Atrito seco entre corpos metálicos”, ENGENHARIA Nº4, 1984
- American Society For Testing Materials, ASTM G99-04: Method for wear Testing with a pin on disk Apparatus. West Conshhocken PA, 2004
- Archard, J.F., “Wear Theory and Mechanisms” – Wear Control Handbook, ASME, New York, 1980
- Bayer, Raymond G; Mechanical Wear: Fundamentals and Testing. Marcel Dekker: New York, 395 p., 2004.
- Bhushan, B. Introduction to Tribology, John Wiley & Sons: New York, 2002
- Buckley, Donald H; Surface Effects in Adhesion, Friction and Lubrification. Elsevier: Amsterdam, 623 p., 1981.
- Carinhas, P. Henriques, Manual de Tribologia, ISEL, Setembro 2010
- Carboni, A. P. Analise estrutural de cadeias cinemáticas planas e espaciais “Dissertação (Dissertação de mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, Fevereiro 2008.
- Carlos H.S. Pereira, Um Estudo sobre a dureza e os mecanismos de Desgaste de Materiais Metálicos em Altas Temperaturas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2010

Czichos, Horst; "Introduction to Friction and Wear", in Friction and Wear of Polymer Composites, Vol.1, Editor: Friedrich, 1986

Czichos, H. The role of tribology as science and technology – What are the Essentials, Tribology International, 1995

Dowson, D. History of Tribology, Editora: Longman Group Limited, Inglaterra, 1979

F.P. Bowden e D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids – Part I", Clarendon Press, Oxford, UK, 1950.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. Fundamentos da Física – Volume 1, Editora LTC, 330 p., Rio de Janeiro, 1996.

Halling, J. Principles of Tribology, Editora Macmillan Press Ltd, Londres, 401 p., Inglaterra, 1975

Hernandez, O. S. – Otimização do Consumível na Solda de Revestimento aplicada na Indústria Sucroalcooleira. Dissertação de Mestrado. UFSCar – DEMa, P.P.G. São Carlos – SP, 1997

Hutton, Charles A Mathematical and Philosophical Dictionary, Volume II. Londres 1975

Jamison, Warren E., "Plastics and Matrix Composites", CRC Handbook of Lubrication and Tribology, Volume III – Monitoring, Materials, Synthetic Lubricants, and Applications, CRC Press, 1994

João P. F. Fernandes, Análise Cinemática e Dinâmica de Mecanismos com Recursos, Dissertação Mestrado, Universidade do Minho-Portugal, Fevereiro 2000

Jost, H.P, 1960, "Lubrication (tribology) education and research, Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966,p.4. CITADO em: SINATORA

Jost, H.P, 1990,"Tribology-origin and future" Wear, v.136, pp.1-17

Kato, K. Adachi, K., 2001, "Wear Mechanisms", Modern Tribology Handbock, Ed. CRC Press LLC Vol.2 Cap 22.

Jost Rep., Department of Education and Science, HMSO, London, 1966, p.4

Layard, A.G., 1853, "Discoveries in the Ruins of Nineveh and Babylon, I and II, John Murray, Albemarle Street, London. Citado por: Bhushan, B., 1999, "Introduction- Measurement Techniques and Aplications". Handbook of Micro.

L. Villabón, A. Sinatora, Construção e Instrumentação de Abrasômetro do tipo de Borracha para o Estudo do Comportamento Tribológico de Aços, Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, 2006, Vol 13, Pg 1-11

Martins, J.P.L. Estudo, concepção, desenvolvimento e construção de um Tribómetro Linear para Ensaios em Superfícies Flexíveis. Dissertação Mestrado, Universidade do Minho-Portugal, Novembro 2013

Paulo Flores, Cinemática de Mecanismos "Introdução aos Estudos de Mmecanismo", Universidade do Minho, 2005

Peterson, M.B., "Classification of wear processes", Wear Ccontrol Handbook. Peterson, M.B. and Winer, W.O., eds., ASME, New York 1980, pp. 9-15, citado por: Sucki, C.A., 2004, "Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimentos Superficiais na Vida de Ferramentas de Conformação Mecânica a Frio", Dissertação Mestrado, Universidade Federal Santa Catarina

Rabinowicz, E-, Friction and Wear of Materials, Editora John Wiley and Sons, Segunda edição. 315 p., Estados Unidos, 1995

Rabinowicz, E., Friction and Wear of Materials, Editora John Wiley and Sons, New York, 1965

Serbino, E.M., Um estudo dos Mecanismos de Desgaste em Disco de Freio Automotivo Ventilado de Ferro Fundido Cinzento Perlítico, Dissertação de mestrado, Universidade são Paulo

Shpenkov, George P., "Friction Surface Phenomena", Tribology Series 29, Elsevier, 1986

Sinatora, A., 2005, "Tribologia: um resgate histórico e o estado da arte", prova de erudição, São Paulo.

Stachowiak, Gwidon W.; Batchelor, Andrew W. Engineering Tribology. 2.ed. Butterworth-Heinemann: Boston, 744 p., 2001.

Zum-Gahr, K-H., 1987, "Microstructure and Wear of Materials", Tribology Series, 10, Elsevier, pp-1-6 citado por: Suski, C.A., 2004, "Estudo do Efeito de Tratamentos e Revestimento Superfícias na vida de Ferramentas de Conformação mecânica à Frio"

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Tribologia>. 05-10-2015 22:10

<http://www.csm-instruments.com/Tribology-Catalog> 08-10-2015 21:07

<http://www.upc.edu/sct/es/equip/510/tribometro-pin-on-disk.html> 09-12-2015 23:37

<http://www.mecanicaindustrial.com.br/24-metodos-de-lubrificacao-em-mecanica/> 15-12-2015

<https://pt.wikipedia.org/wiki/Corros%C3%A3o> 13-12-2015

https://en.wikipedia.org/wiki/Wear_coefficient 10-09-2016

Anexos

Anexo I

Orçamentos solicitados

Designação do Material	Quantidade	Fornecedor	Prazo de Entrega (Dias)	Preço Individual (€)	Preço total (€)
Engenho de furar	1	Leroy Merlin	Imediata	66,49	66,49
Balança 0.0001g	1	ISEL professora Teresa	-	-	-
Load-cell: 10KG Scale Load Cell Weight Weighing Sensor +HX711 Weighing Sensors AD Module	1	E-BAY	20	5	5
Célula carga redonda (TAS606) - Opcional	1	HTC-Sensor	30	100 (com transporte)	100 (com transporte)
Base Discos	1	CERTISATA	7	25.20	25.20
Braço Principal	1	CERTISATA	7	18.40	18.40
Chapa	1	CERTISATA	7	13.40	13.40
Chapal	1	CERTISATA	7	14.40	14.40
Disco de Peso	6	CERTISATA	7	16.20	97.20
Disco holder	1	CERTISATA	7	49.30	49.30
Disco Teste (Aço carbono, Alumínio, Aço Inox)	3	CERTISATA	7	99.60	298.80
Mesa	1	CERTISATA	7	-	-
Pino	1	CERTISATA	7	65.60	65.60
Apoio Suporte Pino	1	CERTISATA	7	127.50	127.50
Veio da Broca	1	CERTISATA	7	19	19
Guias Laterais	4	CERTISATA	7	10	40
Parafusos e Porcas					
Parafuso ISO 4014 – M10x60x60-N	4	Leroy Merlin	Imediata	0.25	1
Parafuso ISO 4015 – M10x80x80-N	1	Leroy Merlin	Imediata	0.25	0.25
Parafuso ISO 4015 – M5x25x16-N	3	Leroy Merlin	Imediata	0.15	0.45
Parafuso ISO 4014 – M10x45x45-N	2	Leroy Merlin	Imediata	0.25	0.5

Parafuso ISO 4014 – M10x50x26-N	4	Leroy Merlin	Imediata	0.25	1
Parafuso ISO 4015 – M5x30x16-N	2	Leroy Merlin	Imediata	0.15	0.30
Parafuso ISO 4014 – M4x30x14-N	2	Leroy Merlin	Imediata	0.15	0.30
Porca ISO 4034 – M10 - N	15	Leroy Merlin	Imediata	0.05	0.75
Porca ISO 4034 – M5 - N	5	Leroy Merlin	Imediata	0.05	0.25
Porca ISO 4036 – M4 - N	2	Leroy Merlin	Imediata	0.05	0.10
Arduino					
Genuino Uno Rev3 (Placa)	1	Arduino	-	20+VAT	20+VAT
TOTAL					960.19+IVA

Anexo II

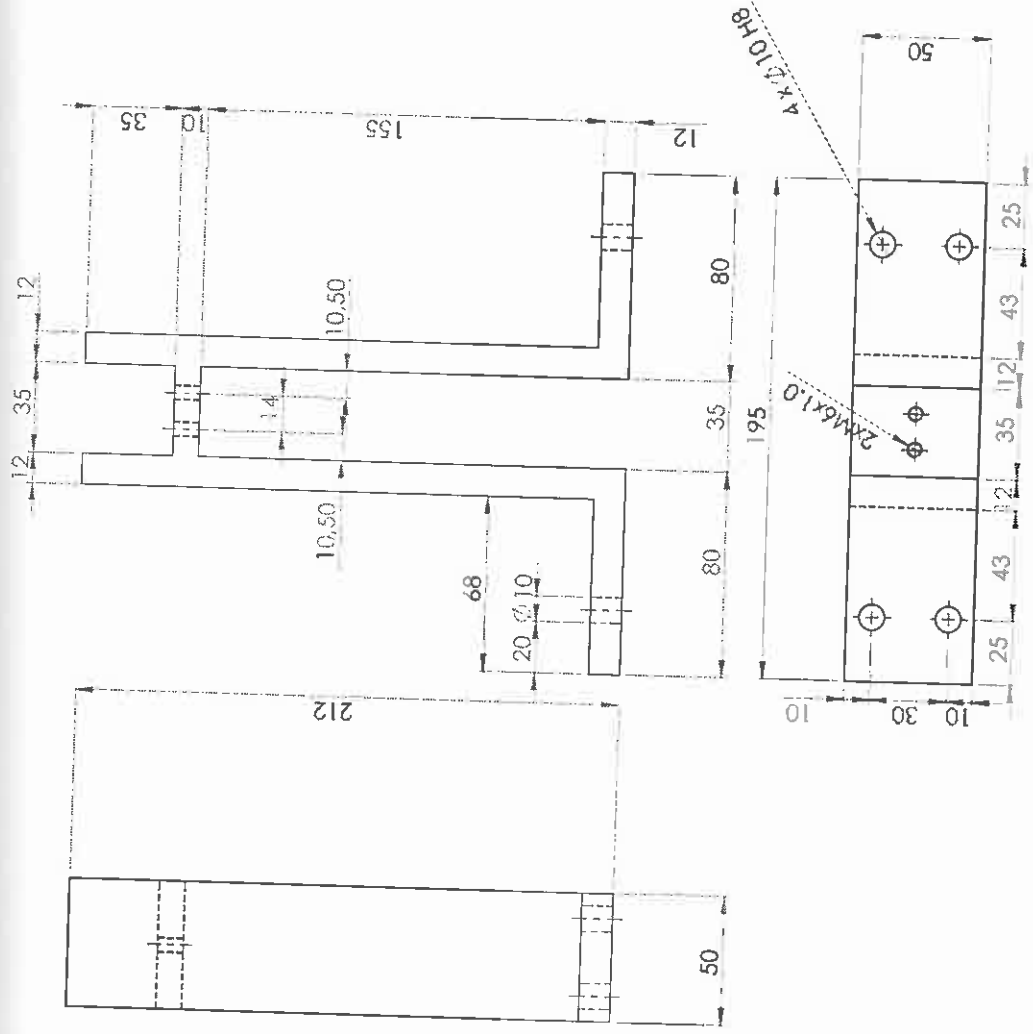
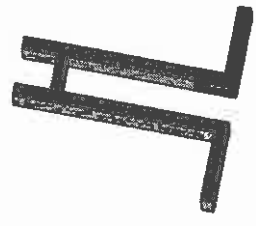
Desenho de Detalhe das Peças 2D

Escala 1:2

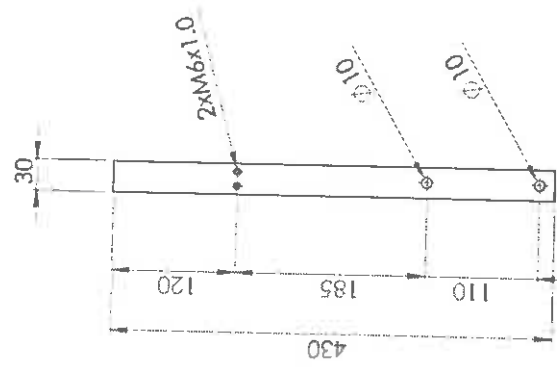
Material - Aço Carbono

Quantidade x1

Vista Isométrica



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TO BE DETERMINED BY THE FABRICATOR		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE	
CHECKED				Apoyo suporte Pino	
APPROVED				ENG. NO.	A3
DATE				SCALE 1:2	SHEET 1 OF 1
MATERIAL				WEIGHT:	3



Vista Isométrica



Escala 1:5

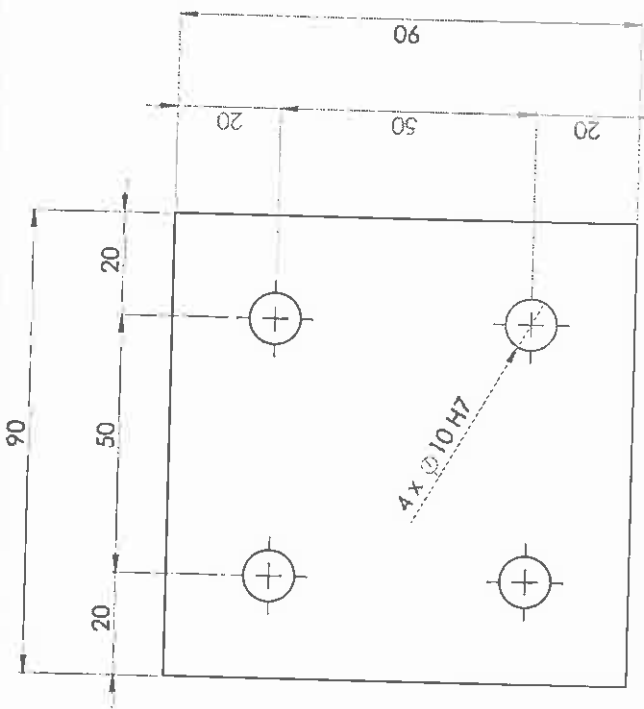
Material - Aço Carbono

Quantidade x1

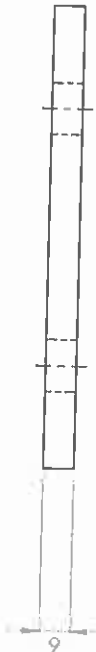
NEEDS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FINISH		DECIMAL AND MEAS SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DATE	SIGNATURE	DATE	SIGNATURE	DATE	SIGNATURE	DATE	SIGNATURE	DATE	SIGNATURE
DRWN		CHKD		APPD		MFG		Q.A.	
MATERIAL									
TITLE									
DWG NO.									
A3									
SHEET 1 OF 1									

BARRA





Vista Isométrica



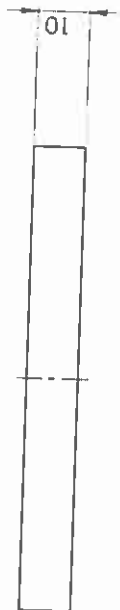
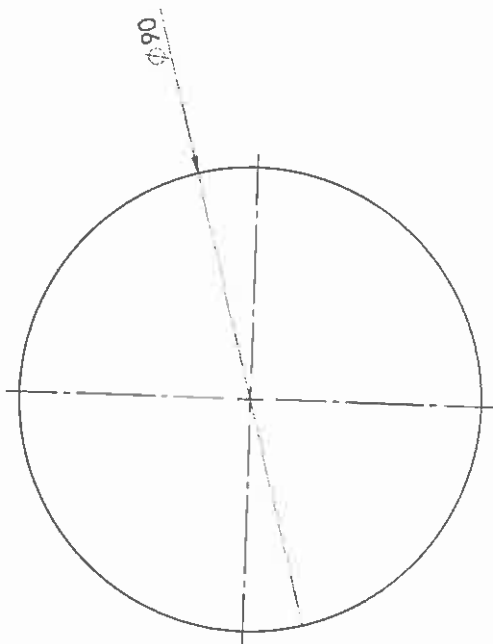
Escala 1:1

Material -Aço Carbono

Quantidade x1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LENGTH ANGLE RADIUS		FREE		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DRWN	NAME	SIGNATURE	DATE						
CHKD									
APP'D									
MFG									
QA									
				MATERIAL:		DWG NO.		SHEET OF 1	
				WEIGHT:		A3		SCALE:	

Chapa



Vista Isométrica



Escala 1:1

Material - Aço Carbono

Quantidade x 6

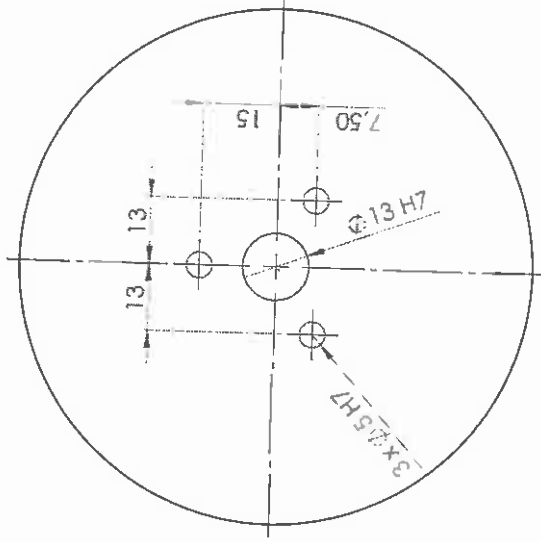
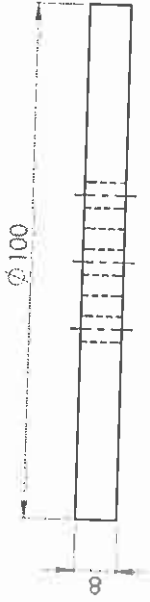
Discos calibrados com 500 gramas

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS CONTACT FINISH UNLESS INDICATED OTHERWISE		FINISH		DIMS AND DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS CONTACT FINISH UNLESS INDICATED OTHERWISE		DO NOT SCALE DRAWING		BY/ISSN			
NAME	SIGNATURE	DATE	MATERIAL	SCALE	TITLE	ENGINEER	DATE	BY/ISSN	BY/ISSN		
DRAWN	CHCKD	DATE									
APPROV											
MFG											
QA											
WEIGHT			MATERIAL			SCALE			SHEET 1 OF 1		
3			A3			2			2		

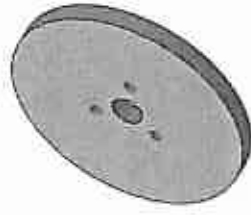
Disco de peso

A3

SHEET 1 OF 1



Vista Isométrica

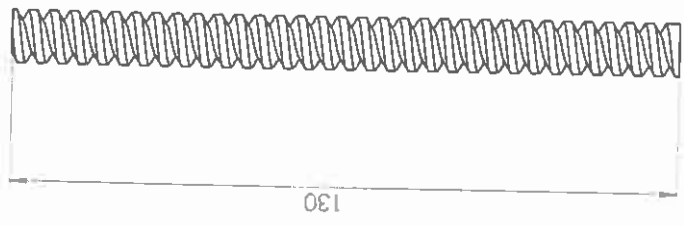
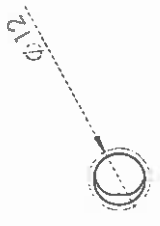


Escala 1:1

Material - Aço Carbono

Quantidade x 3 (1 Aço Carbono, 1 Alumínio, 1 Aço Inox)

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR ANGULAR		FRASE	DATE	SCALE: 1:1	REVISION
NAME	SCHAFER	DATE			
DRAWN					
CHECK					
APPROV					
MFG					
QA					
MATERIAL			TITLE	DWG NO.	
AÇO CARBONO			DISCO		
WEIGHT: 3			SCALE: 1:1	SHEET NO. 2	A3



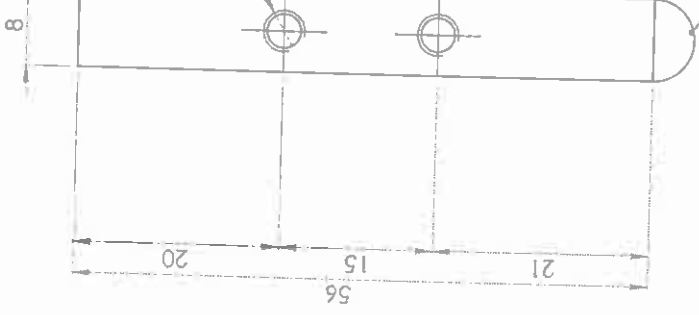
Vista Isométrica



Escala 1:1
 Material - Aço Carbono
 Quantidade x4

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		REVISION	
SURFACE FINISH TO BE INDICATED		DO NOT SCALE DRAWING	
TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:		TITLE	
ANGULAR		Fuso roscado	
LINEAR		DWG NO.	
FINISH		SCALE: 1:1	
DATE		SHEET 1 OF 1	
NAME	SIGNATURE	MATERIAL	
DATE		WEIGHT	
DRAWN		3	
CHECKED		4	
APPROVED		5	
DATE		6	
NAME		7	
SIGNATURE		8	
DATE		9	
NAME		10	
SIGNATURE		11	
DATE		12	
NAME		13	
SIGNATURE		14	
DATE		15	
NAME		16	
SIGNATURE		17	
DATE		18	
NAME		19	
SIGNATURE		20	
DATE		21	
NAME		22	
SIGNATURE		23	
DATE		24	
NAME		25	
SIGNATURE		26	
DATE		27	
NAME		28	
SIGNATURE		29	
DATE		30	
NAME		31	
SIGNATURE		32	
DATE		33	
NAME		34	
SIGNATURE		35	
DATE		36	
NAME		37	
SIGNATURE		38	
DATE		39	
NAME		40	
SIGNATURE		41	
DATE		42	
NAME		43	
SIGNATURE		44	
DATE		45	
NAME		46	
SIGNATURE		47	
DATE		48	
NAME		49	
SIGNATURE		50	

Ssecção Quadrada 8x8(mm)



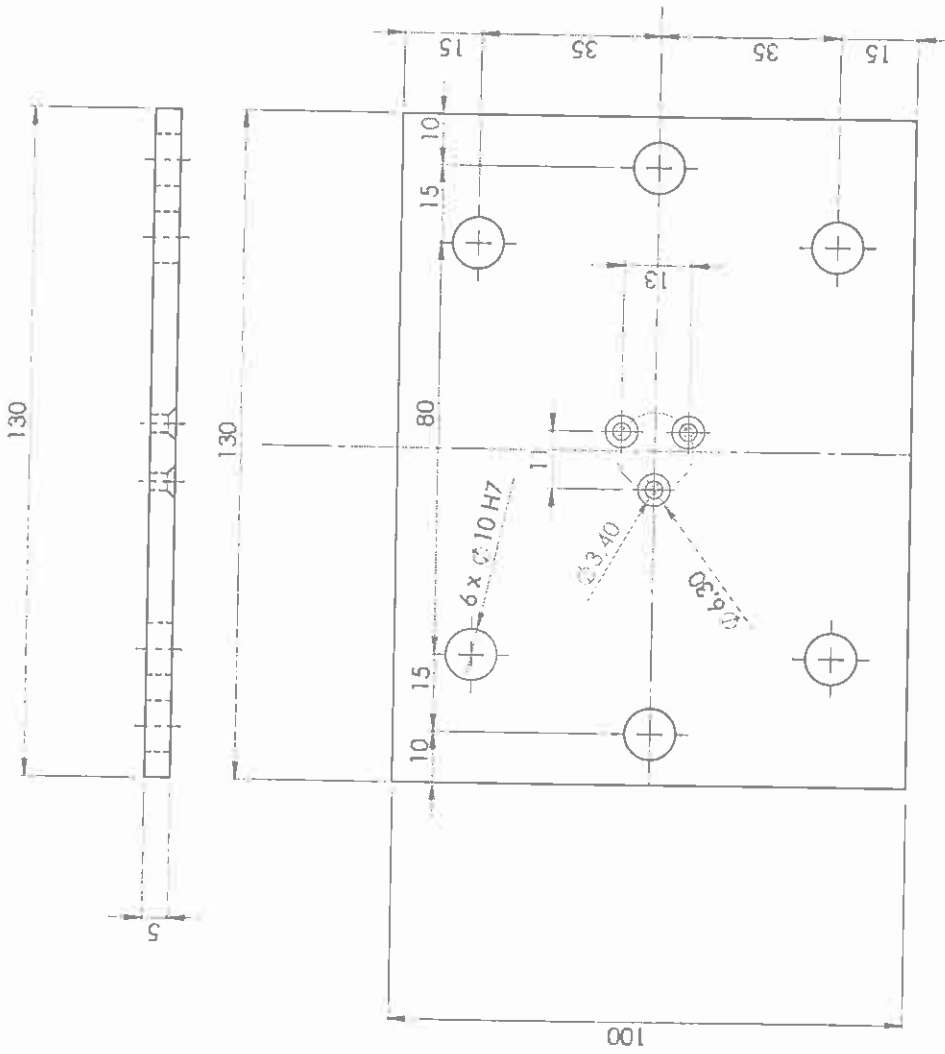
Ponta Esférica (Diâmetro 8mm, meia esfera)

Vista Isométrica

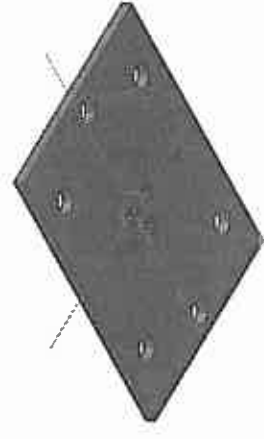


Escala 2:1
 Material - Alumina
 Quantidade x1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		REVISION	
TOLERANCES UNLESS OTHERWISE SPECIFIED		DO NOT SCALE DRAWING	
ANGULAR		TITLE	
NAME		DRAWN	
SIGNATURE		CHECKED	
DATE		APPROVED	
MATERIAL		MFG	
WEIGHT		Dwg No.	
3		A3	
4		2	
5		SHEET 1 OF 1	
6		2	
7		Pino	
8		2	



Vista Isométrica

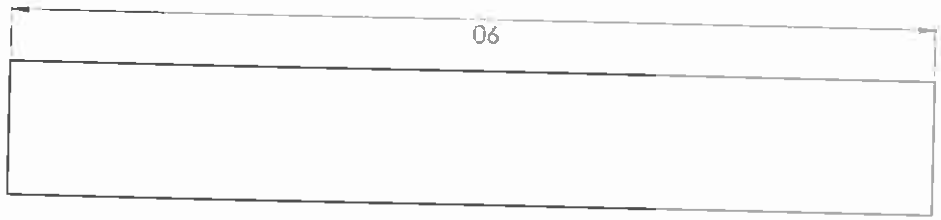
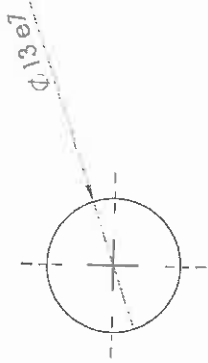


Escala 1:1

Material - Aço Carbono

Quantidade x 1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH		TOLERANCES		FORM AND DIMENSIONS OF EDGES			
ANGULAR		ANGULAR					
NAME	SIGNATURE	DATE					
DRAWN	CHECKED	DATE					
APPROVED	DATE						
MFG	DATE						
QA	DATE						
MATERIAL		DWG NO.		SCALE		SHEET OF 1	
Suporte discos Peso		A3		2		3	



Vista Isométrica



Escala 2:1

Material - Aço Carbono

Quantidade x 1

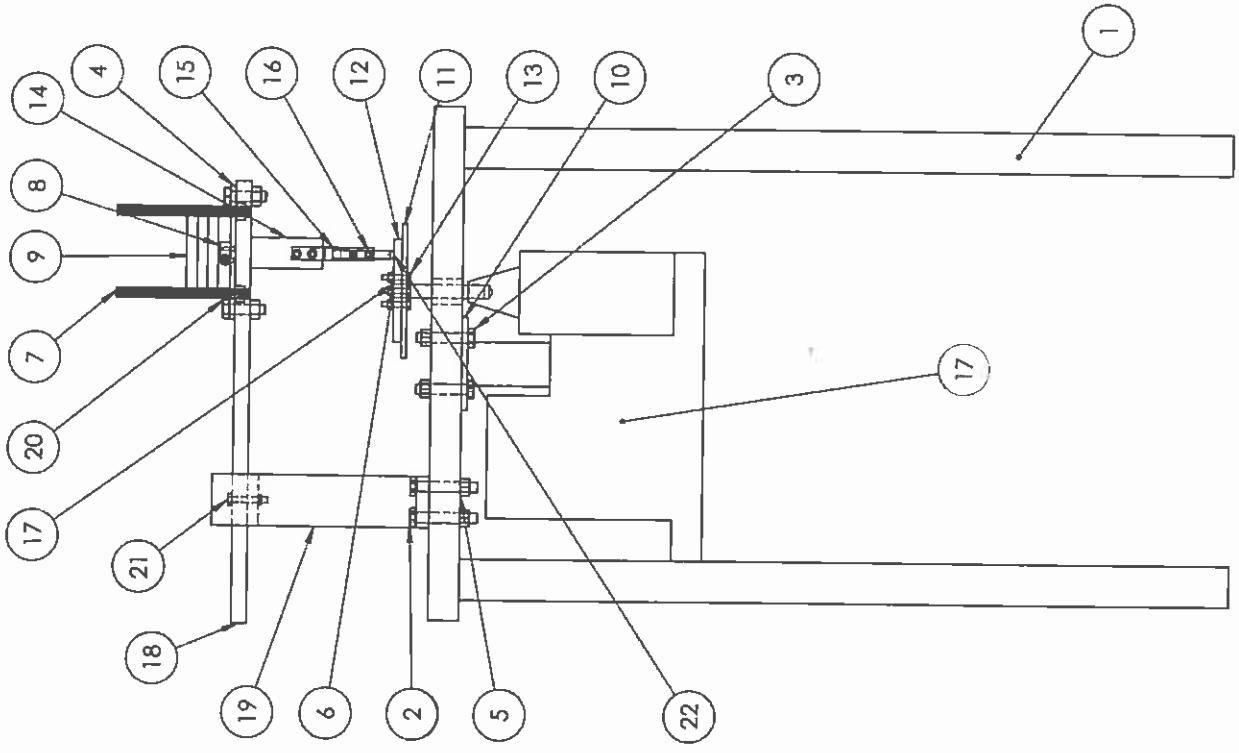
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		PAPER		DEBURRED AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
DRWN	NAME	DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
CHKD	NAME	DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
APPD	NAME	DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
MG	NAME	DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
QA	NAME	DATE	SCALE	DATE	SCALE	TITLE		SHEET 1 OF 1	
MATERIAL		WEIGHT		SCALE 2:1		DRAWN BY		A3	

Veio da broca

Anexo III

Desenho de Conjunto/Identificação

Escala 1:5



ITEM NUM.	LISTA MATERIAL	DESCRIÇÃO	QTY.
1	Mesa		1
2	ISO 4014-M10X60-N		4
3	ISO 4014-M10X50X26-N		4
4	Supporte Discos de Peso		1
5	ISO - 4034 - M10 - N		14
6	ISO - 4034 - M5 - N		5
7	Fuso roscado		4
8	Célula Carga TAS 606		1
9	Discos de peso (500g ou 1Kg)		3
10	Chapa		1
11	Disco Fixação		1
12	Disco Teste		1
13	ISO 4015 - M5 x 25 x 16-N		3
14	Chapa Célula Carga 10kg		1
15	Célula Carga 10 KG (Força Airtite)		1
16	ISO - 4036 - M4 - N		2
17	Engenho de furar		1
18	BARRA		1
19	Supporte Principal		1
20	B18.2.3.2M - M10X10X1.5X35		2
21	B18.2.3.2M - M6X10X1.0X35		2
22	Pino		1

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		PAPER		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DESIGN	SIGNATURE	DATE	DIEBRIK AND DEBurr AND REPAIR SHARP EDGES		TITLE: Tribómetro Peças (identificação)		
CHKD					DWG NO. A3		
APP'D					SCALE: 1:5		
MFG					SHEET 1 OF 1		
QA					MATERIAL		
RECORD:			RECORD:		RECORD:		

Anexo IV

Procedimento de ensaio do Tribómetro

Depois de ter o Tribómetro devidamente instalado e calibrado procede-se ao seguinte procedimento para efectuar os diversos ensaios que será referenciado de seguida:

1. Imediatamente antes de iniciar o teste, tem que se medir ou pesar, limpar e secar as amostras de teste. Usar acetona/álcool como agente de limpeza. Secar os materiais para remover todos os vestígios do fluído de limpeza que pode ter ficado aprisionado no material.
2. Pesar a amostra de teste numa balança com a sensibilidade de 0.0001g
3. Inserir o disco de modo seguro na posição correcta, onde o disco é fixo perpendicularmente ($\pm 1^\circ$) ao eixo de resolução.
4. Inserir o pino seguramente no seu suporte, e se necessário ajustar o mesmo perpendicularmente ao disco ($\pm 1^\circ$) quando está em contacto, para manter as condições necessárias de funcionamento.
5. Adicionar a massa pretendida ao sistema, para se verificar a força de pressão do pino contra o disco
6. Ligar o motor e ajustar a velocidade de rotação aos parâmetros definidos.
7. Iniciar o teste. O teste é finalizado quando o número de rotações é atingido. O teste não deverá ser interrompido ou reiniciado.
8. Remover as amostras e limpar eventuais perdas de material.
9. Pesar a amostra com uma balança com uma sensibilidade na ordem dos 0.0001g
10. Repetir o teste várias vezes até chegar a uma conclusão precisa do pretendido.

Anexo V

Especificações técnicas



Ficha técnica: alumina (Al_2O_3)

Composição principal:

Composto	%
$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	99,8

Dureza: $1,80 \pm 0,05$ GPa (78 – 80 HRC)

Condutividade Térmica: 33 W/m.K

Temperatura de fusão: 1950 - 2050 °C

Temperatura máx. de utilização recomendada: 1700 °C

Taxa de aquecimento/resfriamento máxima recomendada: 8°C/min

Densidade teórica: 3,98 g/cm³

Densidade aparente: $3,85 \pm 0,05$ g/cm³

Porosidade aberta: < 0,6%

Absorção de água: 0,0%

Tamanho de grão primário (D50): 0,5 μm

Módulo de Elasticidade: 270 ± 20 GPa

Características gerais: Alta dureza, elevada resistência a ácidos fortes, alta refratariedade.

(PTFE) Polytetrafluoroethylene

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	2.15 - 2.3 g/cc	0.0777 - 0.0831 lb/in ³	
Apparent Bulk Density	0.36 - 0.91 g/cc	0.013 - 0.0329 lb/in ³	
Water Absorption	0 - 0.03 %	0 - 0.03 %	
Linear Mold Shrinkage	0.01 - 0.058 cm/cm	0.01 - 0.058 in/in	
Mechanical Properties			
Hardness, Rockwell R	58	58	
Hardness, Shore A	98	98	
Hardness, Shore D	50 - 59	50 - 59	
Tensile Strength, Ultimate	10 - 43 MPa	1450 - 6240 psi	
Tensile Strength, Yield	9 - 30 MPa	1310 - 4350 psi	
Elongation at Break	50 - 650 %	50 - 650 %	
Tensile Modulus	0.4 - 1.8 GPa	58 - 261 ksi	
Flexural Modulus	0.5 - 0.7 GPa	72.5 - 102 ksi	
Compressive Yield Strength	10 - 15 MPa	1450 - 2180 psi	
Poisson's Ratio	0.46	0.46	
Shear Strength	5 MPa	725 psi	
Izod Impact, Notched	1.6 J/cm	3 ft-lb/in	
Izod Impact, Notched, Low Temp	0.8 J/cm	1.5 ft-lb/in	
Charpy Impact Unnotched	NB	NB	
Charpy Impact, Notched	0.5 J/cm ²	2.38 ft-lb/in ²	
Tensile Impact Strength	670 kJ/m ²	319 ft-lb/in ²	
Coefficient of Friction	0.06 - 0.1	0.06 - 0.1	
Limiting Pressure Velocity	0.063 MPa-m/sec	1800 psi-ft/min	
Electrical Properties			
Electrical Resistivity	1e+011 - 1e+018 ohm-cm	1e+011 - 1e+018 ohm-cm	
Surface Resistance	1e+011 - 1e+018 ohm	1e+011 - 1e+018 ohm	
Dielectric Constant	2.1	2.1	
Dielectric Constant, Low Frequency	2.1	2.1	
Dielectric Strength	18 - 105 kV/mm	457 - 2670 kV/in	
Dissipation Factor	0.0001 - 0.0003	0.0001 - 0.0003	
Dissipation Factor, Low Frequency	0.0001 - 0.0003	0.0001 - 0.0003	
Arc Resistance	300 sec	300 sec	

Thermal Properties

CTE, linear -100°C	86 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	47.8 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
CTE, linear 20°C	79 - 150 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	43.9 - 83.3 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
CTE, linear 100°C	100 - 140 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	55.6 - 77.8 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
CTE, linear 250°C	170 - 220 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$	94.4 - 122 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^\circ\text{F}$
Specific Heat Capacity	1.2 - 1.4 $\text{J}/\text{g}\cdot^\circ\text{C}$	0.287 - 0.335 $\text{BTU}/\text{lb}\cdot^\circ\text{F}$
Thermal Conductivity	0.24 - 0.35 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	1.67 - 2.43 $\text{BTU}\cdot\text{in}/\text{hr}\cdot\text{ft}^2\cdot^\circ\text{F}$
Melting Point	330 $^\circ\text{C}$	626 $^\circ\text{F}$
Maximum Service Temperature, Air	260 - 290 $^\circ\text{C}$	500 - 554 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	73 $^\circ\text{C}$	163 $^\circ\text{F}$
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)	45 - 100 $^\circ\text{C}$	113 - 212 $^\circ\text{F}$
Minimum Service Temperature, Air	-200 $^\circ\text{C}$	-328 $^\circ\text{F}$
Flammability, UL94	V-0	V-0
Oxygen Index	95 %	95 %

Anexo VI

Esquiços iniciais do Tribómetro

