

# **Influência do Meio Envolvente no Coeficiente de Atrito**

**Paulo Sérgio Franco Farinha**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Mecânica**

Orientadores: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Prof. João Paulo Davim Tavares da Silva

## **Júri**

Presidente: Prof. Rui Manuel dos Santos Oliveira Baptista

Orientador: Prof. Pedro Alexandre Rodrigues Carvalho Rosa

Vogais: Prof. Maria Beatriz Cipriano de Jesus Silva

Eng. Alcino Pereira dos Reis

**Novembro 2018**

O Atrito é simultaneamente bênção e maldição. Depende das circunstâncias e da aplicação.

## Agradecimentos

Queria, em primeiro lugar, agradecer à minha família pelo total e incondicional apoio prestado durante todo o meu percurso académico. Agradeço em especial à minha mãe pela paciência infindável e disponibilidade sempre demonstrada; ao meu pai pelas tremendas horas de discussão construtiva sobre os mais variados temas da mecânica, matemática e física e ao meu irmão pelas horas de conversa sobre os mais variados temas.

Seguidamente, agradeço ao Professor Pedro Rosa, meu orientador, pelos desafios colocados e confiança demonstrada durante a elaboração da presente investigação.

Agradeço igualmente a todos os meus colegas com quem eu tive o prazer de partilhar o espaço do *LM3*, nomeadamente ao Afonso Gregório e ao António Carvalhosa, que me acolheram e me ajudaram a iniciar este trabalho, mas também ao Duarte Andrade, Daniel Ferreira, Luís Almeida, João Sousa e Pedro Santos, entre outros, pelo sempre presente espírito de entreajuda e camaradagem.

Um agradecimento especial ao João Raposo pela paciência demonstrada, conhecimento transmitido e espetacular espírito de camaradagem.

Agradeço também a todos os elementos do Núcleo de Oficinas (NOF) e também ao Sr. Farinha, do Laboratório de Tecnologia Mecânica, pelo apoio técnico prestado e conhecimentos transmitidos durante o desenvolvimento do presente trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus amigos, desde os de mais longa data, aos dos últimos anos de faculdade, e restantes colegas de curso pelas maravilhosas experiências e aventuras que passámos juntos nestes últimos anos.

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## Resumo

A presente dissertação aborda a influência da rugosidade, da concentração de oxigénio e da pressão de contacto no coeficiente de atrito entre o WC-Co e diversos metais. Foi desenvolvido um equipamento para a realização de ensaios tipo pino-na-placa com controlo da velocidade, permitindo o recurso a misturas gasosas e a diferentes pressões de contacto. Os ensaios foram realizados utilizando atmosferas com três concentrações de oxigénio distintas: 0%, 20% e 100%. Foram utilizados provetes de Ti6Al4V, cobre eletrolítico, AA 5080, DC 04 e DP 980, sendo a ferramenta em carboneto de tungsténio. A ferramenta foi utilizada com duas rugosidades distintas. O coeficiente de atrito foi estimado com base nas forças medidas durante os ensaios. Constatou-se que o aumento da rugosidade, da deposição de material e da pressão de contacto aparente leva a um aumento do coeficiente de atrito. Observou-se igualmente o aumento do atrito com a concentração de oxigénio. O DP 980 mostrou a maior sensibilidade ao oxigénio e a menor foi registada para o Ti6Al4V. A pressão de contacto teve maior influência no AA 5080 e menor no cobre.

**Palavras-Chave:** Coeficiente de Atrito, Experimental, Rugosidade, Pressão de Contacto, Gás Activo e Gás Inerte

## Abstract

The present dissertation discusses the influence of surface roughness, concentration of oxygen in the surrounding medium and contact pressure on the friction coefficient between WC-Co and various materials. An experimental apparatus was developed to allow pin-on-plate tribological tests, with speed control, allowing for different gaseous mixtures and contact pressures to be used. The tests were performed using three different oxygen concentration values: 0%, 20% and 100%. Specimens of Ti6Al4V, electrolytic copper, AA 5080, DC 04 and DP 980 were used on a Tungsten Carbide tool. The tool was used with two different surface roughness conditions. The friction coefficient was determined by analysing the forces that developed during the process. It has been observed that an increase in surface roughness, material deposition and apparent contact pressure leads to an increase in the friction coefficient. It has also been determined that the increasing of oxygen percentage in the surroundings leads to an increase in friction. DP 980 showed the highest sensitivity to oxygen while the lowest one was recorded for Ti6Al4V. Contact pressure had greater influence in AA 5080 and the lesser was for copper.

**Keywords:** Friction Coefficient, Experimental, Surface Roughness, Contact Pressure, Active Gas and Inert Gas

# Índice

Agradecimentos .....	i
Resumo .....	iii
Abstract .....	iv
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Abreviaturas .....	xii
Nomenclatura .....	xiv
1. Introdução .....	1
2. Fundamentação Teórica.....	3
2.1. Tribologia .....	3
2.2. Atrito.....	3
2.3. Modelos de Atrito.....	5
2.3.1. Modelo de Amonton-Coulomb.....	5
2.3.2. Modelo de Prandtl.....	5
2.3.3. Modelo de Wanheim-Bay .....	5
2.3.4. Modelo Híbrido.....	7
2.4. Quantificação do Atrito.....	7
2.4.1. Ensaio Pino no Disco.....	8
2.4.2. Ensaio de Pino na Placa .....	9
2.4.3. Ensaio de Anel .....	9
2.4.4. Ensaio de Corte Ortogonal.....	10
2.5. Natureza das Superfícies .....	11
2.5.1. Geometria e Acabamento .....	11
2.5.2. Contribuição dos Óxidos Superficiais no Coeficiente de Atrito .....	12
2.6. Lubrificação .....	13
3. Desenvolvimento Experimental.....	15
3.1. Máquina de Ensaios.....	15
3.1.1. Acessórios para Ensaio Tipo Pino na Placa .....	15



3.2.	Calibração Célula de Carga Bidimensional .....	16
3.2.1.	Sistema de Calibração.....	16
3.2.2.	Metodologia de Calibração .....	18
3.2.3.	Curvas de Calibração.....	18
3.3.	Materiais e Atmosferas Utilizadas.....	19
3.4.	Procedimento Experimental e Plano de Ensaios .....	20
3.5.	Rugosímetro Mahr .....	21
4.	Análise e Discussão de Resultados .....	23
4.1.	Influência da Rugosidade e da Deposição de Material na Interface de Contacto .....	23
4.1.1.	Liga de Titânio Ti6Al4V.....	23
4.1.2.	Cobre .....	24
4.1.3.	Alumínio AA 5080 .....	26
4.1.4.	Aço DC 04.....	27
4.1.5.	Aço DP 980.....	28
4.2.	Influência da Percentagem de Oxigénio.....	30
4.3.	Influência da Pressão de Contacto.....	31
4.3.1.	Liga de Titânio Ti6Al4V.....	32
4.3.2.	Cobre .....	32
4.3.3.	Alumínio AA 5080 .....	32
4.3.4.	Aço DC04.....	33
4.3.5.	Aço DP 980.....	33
5.	Conclusões e Trabalho Futuro .....	35
5.1.	Conclusões .....	35
5.2.	Sugestões e Trabalho Futuro .....	37
6.	Referências.....	39
	Anexos.....	43

## Lista de Figuras

Figura 1 - Mecanismos microscópicos que geram atrito: (a) Adesão; (b) Interação Mecânica; (c) Efeito dos Óxidos; (d) Partículas Presas (Cristino, 2011).....	4
Figura 2 - Representação esquemática das principais leis de atrito usadas em engenharia, mostrando a tensão de atrito numa interface sólido – sólido, como uma função da pressão normal. São apresentadas duas curvas (A e B) geradas a partir da lei do atrito de Bay (Fernandes, 2017).....	6
Figura 3 - Tribómetro de Pino no Disco (Lozano, 2015).....	8
Figura 4 – Tribómetros Pino na Placa: (a) Bowden-Leben, de baixa frequência e alta amplitude e (b) Cameron-Mills, de alta frequência e baixa amplitude (Stachowiak, 2004). .....	9
Figura 5 – Ensaio de Anel: (a) representação esquemática do aparato experimental utilizado para efectuar um ensaio de anel numa prensa equipada com uma ferramenta punção-matriz, (b) fotografia mostrando um detalhe do anel e do prato de compressão inferior (Martins, 2013). .....	10
Figura 6 - Aparatos mais comuns de testes tribológicos de processos: (a) torneamento de um tubo de grande diâmetro; (b) maquinagem de um provete paralelepípedo (Cristino, 2011).....	10
Figura 7 - Aspecto real de uma superfície acabada: a) Esquema representativo das impurezas que afetam a superfície dos metais; b) Forma geométrica de uma superfície vista ao nível microscópico. (Fernandes, 2017).....	12
Figura 8 - Aparato Experimental: (a) Esquema; (b) Cadeia Cinemática; (c) Célula de Carga Bidimensional montada na BCC e; (d) Dispositivo de Fixação de Provetes. ....	15
Figura 9 – Ferramenta: (a) Face Polida; (b) DFF com Ferramenta de Face Polida; (c) Face Rugosa e; (d) DFF com Ferramenta de Face Rugosa. ....	16
Figura 10 - Zona de ensaio: (a) regiões da zona de ensaio: I e III regiões transiente; e II região estacionária; (b) zona ideal de ensaio; marcas de ensaios na (c) face rugosa e (d) face polida .....	16
Figura 11 – Mecanismo de calibração; (a) esquema; (b) sistema sem carga e; (c) sistema em carga.....	17
Figura 12 - Componentes do Sistema de Calibração: (A) Vertical; Horizontal: (B) Estrutura Fixa; e (C) Estrutura Móvel.....	17
Figura 13 - Componente para aplicação pontual das forças (CAPF).....	17
Figura 14 - Gráficos de Calibração dos Eixos: (a) Vertical e (b) Horizontal.....	18
Figura 15 – Materiais utilizados para o fabrico de Provetes: (a) Ti6Al4V; (b) Cobre; (c) AA 5080; (d) DC 04; e (e) DP 980 .....	19
Figura 16 – Montagem de Provetes e Ensaio com provetes de AA5080 ((a) e (b)) e Ti6Al4V ((c) e (d)). .....	20
Figura 17 – Aparato Medição Rugosidades: (a) Mesa e Coluna; Perthometer S2 (esq) e Unidade Comando Eixo Vertical (dta); (b) PKS Ball Joint Vice (esq) e Mesa de Coord.X/Y Mahr PKT (dta) .....	21
Figura 18 – Rugosímetros: (a) Unidade de Avanço Mahr GD 25 e (b) PGK com conjunto de acessórios para sonda MFW 250 (Chaves, Ponteiras e Guardas).....	21
Figura 19 - Padrões de Calibração do Rugosímetro (esquerda para a direita): PGN-3; PEN-10 e PGN-10 .....	21

Figura 20 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) .....	23
Figura 21 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) .....	24
Figura 22 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de AA5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) .....	26
Figura 23 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de aço DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) .....	27
Figura 24 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de aço DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) .....	28
Figura 25 - Gráfico do coeficiente de atrito médio em função da percentagem de oxigénio para ensaios de atrito tipo pino na placa para os vários matérias em estudo em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm) ....	30
Figura 26 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm).....	32
Figura 27 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com Cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm).....	32
Figura 28 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com AA5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm).....	32
Figura 29 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm).....	33
Figura 30 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa (Ra=0.426 µm) e Polida (Ra=0.209 µm).....	33

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Rugosidades das Faces da Pastilha de Corte .....	16
Tabela 2 - Plano de Ensaios .....	20
Tabela 3 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ ).....	23
Tabela 4 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ ) .....	25
Tabela 5 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de AA 5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ ).....	26
Tabela 6 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de aço DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ ).....	27
Tabela 7 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de aço DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ ).....	28
Tabela 8 - Área Aparente de Contacto.....	31
Tabela 9 - Influência da pressão de contacto aparente nos materiais em estudo .....	36

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## Abreviaturas

ArP	Ensaio com Árgon em Superfície Polida
ArR	Ensaio com Árgon em Superfície Rugosa
ATMP	Ensaio com Atmosfera em Superfície Polida
ATMR	Ensaio com Atmosfera em Superfície Rugosa
BCC	Base da Célula de Carga
CAPF	Componente de Aplicação Pontual de Forças
CEV	Componente de Calibração do Eixo Vertical
DAQ	Aquisição de Dados (do inglês <i>Data Acquisition</i> )
DFF	Dispositivo de Fixação da Ferramenta
DFP	Dispositivo de Fixação do Provette
GLC	Ensaio com Glicerina em Superfície Rugosa
HSS	Aço Rápido (do inglês <i>High Speed Steel</i> )
O2P	Ensaio com Oxigénio em Superfície Polida
O2R	Ensaio com Oxigénio em Superfície Rugosa
PdL	Ensaio com Pasta de Lítio em Superfície Rugosa
WC	Carboneto de Tungsténio

## Abreviaturas de Instituições e Organismos

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
LM3	Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico
NI	<i>National Instruments</i>

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## Nomenclatura

$\alpha_A$	Razão entre as Áreas de Contacto Real e Aparente
$A_A$	Área Aparente de Contacto
$b_c$	Largura da Zona de Ensaio
$D_{PCA}$	Factor de Comparação da Influência da Pressão de Contacto Aparente
$e_p$	Espessura do Provede
$f$	Constante representativa da Tensão de Corte na Interface de Contacto
$F_a$	Força de Atrito
$F_H$	Força Horizontal
$F_N$	Força de Normal à Superfície
$F_V$	Força Vertical
$k$	Tensão de Corte Máxima
$l_c$	Comprimento de Contacto
$m$	Factor de Atrito de Prandtl
$P$	Pressão Normal à Superfície
$P_{CA}$	Pressão de Contacto Aparente
$\tau$	Tensão de Corte
$\tau_i$	Tensão de Corte Média
$\sigma_e$	Tensão Limite de Elasticidade
$\mu$	Coefficiente de Atrito de Coulomb
$\mu_A$	Componente do Coeficiente de Atrito relativa à Adesão
$\mu_{DP}$	Componente do Coeficiente de Atrito relativa às Interações Mecânicas
$\mu_{Ox}$	Componente do Coeficiente de Atrito relativa à Acção dos Óxidos
$\mu_P$	Componente do Coeficiente de Atrito relativa à Acção das Partículas Presas
$V_H$	Resposta do Sistema para o Eixo Horizontal (valor em volts)
$V_V$	Resposta do Sistema para o Eixo Vertical (valor em volts)



Esta página foi propositadamente deixada em branco

# 1. Introdução

O corte por arranque de apara envolve diversos fenómenos físico-químicos complexos que tendem a dificultar a compreensão e a modelação dos processos de maquinagem. Estas dificuldades têm promovido uma investigação mais teórica, através da utilização de técnicas de simulação numérica para resolver não linearidades e a interdependência entre os fenómenos físicos considerados. Todavia, nem os próprios programas de simulação numérica mais modernos têm a capacidade de encontrar uma solução completa para uma tão alargada gama de condições operativas. Esta divergência parece indiciar a ausência da contabilização de algumas contribuições fenomenológicas nos modelos utilizados.

A análise tradicional do atrito no corte por arranque de apara, descrita em Childs (2006), não considera as reacções das superfícies recém-geradas com elementos químicos existentes no meio envolvente, seja este meio líquido ou gasoso. Esta abordagem não considera os fenómenos físico-químicos e a sua influência no enrolamento da apara, mesmo tendo em conta a elevada sensibilidade dos metais à oxidação. Durante o corte de metais são geradas novas superfícies virgens e quimicamente ativas devido à propagação de fissuras, em condições de alta temperatura pelo calor gerado pela deformação plástica e na presença de meio envolventes ativos. Estas circunstâncias potenciam o aparecimento de pontos de soldadura entre a face recém gerada da apara e a face de ataque da ferramenta, especialmente na presença de fortes tensões compressivas (Bowden e Rowe 1956). No entanto, mesmo em condições de maquinagem a seco, este fenómeno nem sempre se verifica. Isto implica que alguns gases ou vapores presentes na atmosfera são capazes de inibir a formação de pontos de soldadura. De facto, existem estudos que sugerem que os filmes de óxido podem influenciar o escorregamento da apara, principalmente porque a sua presença evita o contacto metal-metal (Bowden e Tabor 1954).

Rowe e Smart (1963) testaram provetes de aço macio num torno convencional, controlando a atmosfera envolvente, fazendo incidir um jacto de gás directamente na interface apara-ferramenta, e concluíram que a ausência de oxigénio no corte resultava em forças de corte mais elevadas e na deterioração da qualidade de acabamento da superfície maquinada, quando comparadas com condições de atmosfera ambiente.

Mais tarde, Williams (1978) demonstra experimentalmente que, tanto o alumínio como o cobre, apresentavam valores das forças mais baixas para velocidades de corte de 2 mm/s em câmara de vácuo. Por outro lado, o corte do aço macio nestas mesmas condições apresentava forças de corte mais elevadas quando comparados com o corte à pressão atmosférica. Mais recentemente foram ainda levadas a cabo experiências utilizando vapor de tetraclorometano como lubrificante numa câmara inicialmente em vácuo, onde se verificou a redução do coeficiente de atrito na interface apara-ferramenta em condições de corte ortogonal de uma liga envelhecida de alumínio 2014 (Wakabayashi, 1993).

Cristino (2011) encontrou a mesma tendência no corte de chumbo, verificando uma redução das forças de corte e maior enrolamento da avara com a redução da percentagem de oxigénio no meio envolvente. Estes estudos mostram a importância dos lubrificantes gasosos no corte de metais (Wakabayashi, 1993). Porém, uma análise mais detalhada, mostra a incerteza que existe sobre o real efeito da oxidação ou não oxidação das superfícies recém geradas no coeficiente de atrito e consequentemente nas forças envolvidas nos processos de corte. Os estudos anteriores foram realizados em condições operativas muito distintas o que invalida a comparação dos resultados. Deste modo, importa a realização de ensaios com diferentes atmosferas em condições operativas comparáveis.

A presente dissertação é motivada pelos trabalhos desenvolvidos por Cristino (2011, 2013) e Fernandes (2017), procurando contribuir para a compreensão da influência do oxigénio no coeficiente de atrito. Ao contrário dos trabalhos anteriores, o presente trabalho foi desenvolvido utilizando ensaios tribológicos tipo Pino na Placa.

Este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos, incluindo a presente Introdução.

O segundo capítulo faz uma breve introdução aos fundamentos considerados relevantes para a compreensão do trabalho desenvolvido na presente dissertação e está dividido em seis Secções. São expostos os temas da Tribologia, dos Mecanismos Básicos do Atrito; da Modelação do Atrito e das Técnicas de Quantificação do Atrito. São igualmente abordadas questões associadas às micro geometrias das superfícies, à influência dos óxidos e à lubrificação e a sua influência no Atrito.

O terceiro capítulo expõe o desenvolvimento experimental do presente trabalho e encontra-se dividido em cinco Secções. A primeira apresenta o Aparato Experimental e os acessórios necessários à realização do Ensaio Tipo Pino na Placa; a segunda trata da Calibração da Célula de Carga, apresentando o Sistema de Calibração e os seus componentes, a Metodologia seguida para a calibração e as Curvas de Calibração obtidas; a terceira apresenta os Materiais e Misturas Gasosas em estudo; a quarta expõe o Procedimento Experimental e o Plano de Ensaios; e a quinta apresenta o Rugosímetro que foi instalado no laboratório na área referente à Metrologia, no contexto da realização deste trabalho.

O quarto capítulo refere-se à Análise e Discussão dos Resultados obtidos para a influência de diversos factores no coeficiente de atrito, e encontra-se dividido em três Secções. A primeira apresenta os resultados obtidos para a Influência da Rugosidade e Deposição de Material na superfície da ferramenta; a segunda trata da Influência da Percentagem de Oxigénio na Interface de Contacto; e a terceira expõe a Influência da Pressão de Contacto Aparente.

Por último, no quinto Capítulo são apresentadas as Conclusões e Perspetivas de Trabalho Futuro resultantes do presente trabalho.

## 2. Fundamentação Teórica

A presente secção apresenta os fundamentos da tribologia e fenómenos associados ao atrito. Apresentam-se várias teorias de modelação do atrito, a sua evolução, bem como algumas técnicas experimentais utilizadas na sua caracterização. O capítulo finaliza com a exposição do impacto dos óxidos e da lubrificação no coeficiente de atrito.

### 2.1. Tribologia

O termo Tribologia deriva do grego *tribo*, que significa esfregar/friccionar, e *logos*, que significa estudo/ciência, e foi introduzido em 1966 por Peter Jost num documento desenvolvido para o Governo do Reino Unido (que ficou conhecido como *Jost Report*) (Jost, 1966). Este aborda as perdas monetárias anuais daquele país, relacionados com atrito e desgaste. Neste artigo, a Tribologia é definida como a ciência e a tecnologia que estudam a interação entre superfícies em movimento relativo, sendo as principais áreas de aplicação o atrito, o desgaste e a lubrificação. Esta é uma ciência multidisciplinar, envolvendo as áreas da Engenharia Mecânica, Química e de Materiais (Jost, 2006).

A evolução desta área científica está intimamente ligada à diminuição dos custos associados aos processos de fabrico, nomeadamente nos processos de corte por arranque de apanha, e à manutenção de equipamentos. As condições em que se encontram as superfícies de contacto desempenham um papel importante no corte, desde influenciarem o acabamento, a energia despendida, até à proteção do material da peça contra a corrosão e a abrasão. O custo do ciclo de vida de um equipamento eletromecânico, depende essencialmente do atrito e do desgaste.

O estudo aprofundado das interações entre superfícies durante estes processos tem contribuído para o desenvolvimento de novas ferramentas, lubrificantes e métodos de trabalho.

### 2.2. Atrito

O Atrito, como força, refere-se àquela que se opõe ao movimento relativo, ou tendência para tal, entre duas superfícies em contacto. Atrito e desgaste não são propriedades intrínsecas dos materiais, mas sim uma característica indicativa de como um par de materiais reage, quando em contacto, num ambiente específico e sujeito a determinadas forças, que tendem a promover o movimento relativo entre os materiais. O conceito de atrito divide-se ainda entre atrito estático (resistência sem existência de movimento relativo) e atrito dinâmico (resistência em movimento relativo).

A Força de Atrito não é uma força fundamental. Infelizmente não existe consenso global sobre o que realmente causa o atrito. No entanto, este deve-se a um conjunto de mecanismos que actuam simultaneamente, mas que se manifestam de formas diferentes sob diferentes circunstâncias.

Todos estes factores contribuem para que o estudo do atrito seja complexo envolvendo várias áreas científicas, tal como referido anteriormente.

Os mecanismos básicos de atrito são um conjunto específico de fenómenos microscópicos, nomeadamente de cariz físico, químico ou relacionados com os materiais. São vários os mecanismos

desta natureza que têm vindo a ser propostos ao longo dos últimos séculos, com diferentes níveis de receptividade por parte da comunidade científica internacional. No entanto foram poucas as mudanças introduzidas ao longo do tempo, sendo que ainda se consideram os mesmos factores. É denominador comum na comunidade científica que todos os mecanismos estão sempre presentes na geração de atrito, mas que o mecanismo dominante depende de situação para situação: natureza das duas superfícies, dos materiais, das características do movimento relativo, da pressão de contato, da temperatura, da duração do contacto, das características químicas do ambiente na interface e em redor desta, da presença ou ausência de terceiros corpos, e de certas características da montagem experimental, como vibrações e rigidez. Os mecanismos microscópicos envolvidos, na geração de atrito são:

a) Adesão (Figura 1 (a)),  $\mu_A$ , é muito importante em aplicações em vácuo e para superfícies muito polidas, podendo ser mais significativa que as restantes parcelas para metais que sejam mais suscetíveis à ocorrência de soldaduras a frio à temperatura ambiente. Em condições normais, a adesão é apenas um factor secundário, mas desempenha um papel indirecto significativo pelo seu efeito sobre os fenómenos de *ploughing* e interpenetração;

b) Fenómenos de Deformação Plástica (Figura 1 (b)),  $\mu_{DP}$ , nomeadamente de *ploughing* e interpenetração, causada pela deformação plástica de uma superfície por aspereza dura de outra e pela prisão de uma aspereza noutra;

c) Deformação e/ou Fractura de Camadas Superficiais (Figura 1 (c)),  $\mu_{Ox}$ , como óxidos, existentes nas regiões deformadas plasticamente;

d) Interferência e Deformação Plástica (ao nível local) causada por corpos estranhos (Figura 1 (d)),  $\mu_C$ , nomeadamente partículas de poeiras que se depositam na interface de contacto.

Em geral, há algum acordo sobre as causas do atrito e as contribuições vêm das várias componentes:

$$\mu = \mu_A + \mu_{DP} + \mu_{Ox} + \mu_P \quad (1)$$

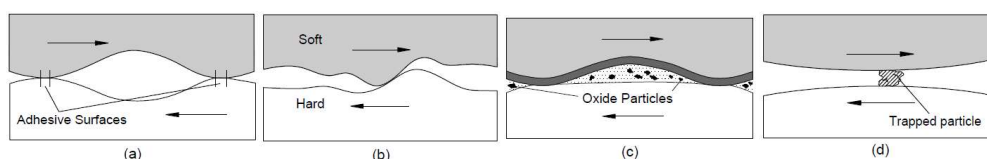


Figura 1 - Mecanismos microscópicos de geração de Atrito: (a) Adesão; (b) Interação Mecânica; (c) Efeito dos Óxidos; (d) Partículas Presas (Cristino, 2011).

## 2.3. Modelos de Atrito

### 2.3.1. Modelo de Amontou-Coulomb

A Lei do Atrito de Coulomb (Equação (2)), também conhecida como a Lei Clássica do Atrito, é baseada em trabalhos desenvolvidos por Leonardo da Vinci e Amontou:

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} = \frac{\tau_i}{P} \quad (2)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito,  $F_N$ , é a Força Normal à superfície de contacto,  $F_a$ , é a Força de Atrito resultante do efeito da aplicação da Força Normal,  $\tau_i$  a Tensão de Corte Média na superfície de contacto, e,  $P$ , a Pressão Normal de Contacto.

Esta lei enuncia que para um dado coeficiente de atrito constante, a tensão de corte cresce na mesma razão que a pressão de contacto. Outra condicionante a esta lei vem da aplicação da Teoria da Plasticidade, que restringe a sua aplicabilidade para baixas pressões, tendo em conta que para pressões elevadas esta relação deixa de existir (Ali, 2001).

A aplicação desta lei aos processos de deformação plástica e corte de metais pode gerar valores muito baixos do coeficiente de atrito, sendo considerados irrealistas, como consequência dos valores de pressão normal poderem exceder os da tensão de corte do material (Fernandes, 2017).

Este será o modelo utilizado no desenvolvimento do presente trabalho.

### 2.3.2. Modelo de Prandtl

A Lei de Prandtl, ou do Atrito Constante (Equação (3)), assume que a tensão de corte é proporcional à força necessária para que ocorra deformação plástica do material:

$$\tau = m \cdot k \quad (3)$$

Onde  $m$  representa o factor de atrito ou proporcionalidade e varia entre 0 (condições de atrito nulo) e 1 (condições de atrito máximo geralmente com ocorrência do fenómeno de adesão) e  $k$  corresponde à tensão de corte máxima do material.

Tal como o coeficiente de atrito, o factor de atrito depende de parâmetros como temperatura, pressão, velocidade, meio envolvente e solubilidade dos materiais envolvidos (Brown, 1969).

### 2.3.3. Modelo de Wanheim-Bay

A Teoria de Adesão de Bowden e Tabor considera que todas as superfícies são rugosas, ou seja, que possuem picos e vales e, como tal, o contacto entre dois corpos ocorre apenas em pontos específicos, resultando numa área real de contacto, que é apenas uma pequena fracção da área aparente de contacto. Como a área de contacto é significativamente pequena, a pressão aplicada é elevada. Bowden e Tabor (1964) afirmaram que o fenómeno de adesão ocorre nas zonas de contacto e que a força necessária para romper esta ligação é a medida de atrito. Analisando a deformação plástica de

asperezas de forma isolada, os autores anteriores apresentaram uma explicação teórica para o coeficiente de atrito na Lei de Coulomb.

A Lei de Coulomb e a Teoria de Adesão de Bowden e Tabor têm uma aplicabilidade limitada. Para além do limite de proporcionalidade, a deformação das asperezas favorece a ocorrência de interações entre si nas superfícies dos materiais. Nestas condições a variação do atrito com a pressão deixa de ser proporcional, sendo que para pressões elevadas aproxima-se do valor máximo. Quando a área real de contacto iguala a área aparente, o modelo de atrito constante (Lei de Prandtl) apresenta-se como o mais adequado. Este modelo assume que a inclinação das asperezas é baixa, sendo que estas condições são verificadas ao longo de todo o intervalo de interesse. Os estudos realizados por Bay (1985) tiveram em conta a inclinação das asperezas, obtendo-se como resultado um novo modelo de atrito e novas curvas de atrito mais compreensivo, evoluindo-se para uma nova lei.

O modelo geral de Wanheim-Bay, diz que o atrito numa interface em contacto é proporcional à tensão normal nos casos em que este assume valores baixos,  $P/\sigma_e < 1.5$ , mas tende para um valor constante a altas pressões normais na interface de contacto  $P/\sigma_e > 3$ . Esta formulação é apresentada como se segue:

$$\tau = f \cdot \alpha \cdot k \quad (4)$$

Onde  $\tau$  é a tensão resultante do atrito,  $f$  é uma constante que representa a tensão de corte na interface de contacto (para ligações fortes o seu limite é 1 e reduz-se à medida que a força na ligação diminui),  $\alpha$  é a razão entre a área real de contacto e a aparente,  $k$  é a tensão de corte máxima do material.

A Figura 2 mostra uma representação esquemática das leis de atrito discutidas anteriormente, apresentando a evolução da tensão de corte em função da pressão normal de contacto para diferentes leis. Verifica-se, no entanto, que para pressões baixas as leis de atrito de Coulomb e Bay dão resultados idênticos.

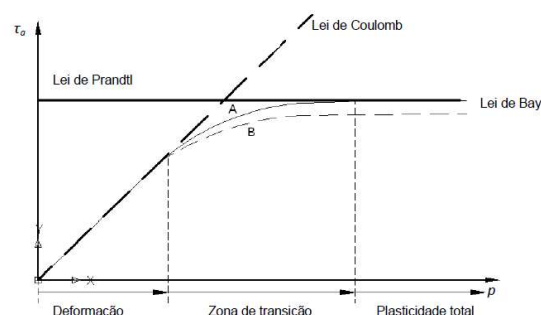


Figura 2 - Representação esquemática das principais leis de atrito usadas em engenharia, mostrando a tensão de atrito numa interface sólido – sólido, como uma função da pressão normal. São apresentadas duas curvas (A e B) geradas a partir da lei do atrito de Bay (Fernandes, 2017).

#### 2.3.4. Modelo Híbrido

O Modelo Híbrido, combina os Modelos de Coulomb e de Prandtl. O seguinte critério define quando é que cada modelo é usado:

$$\tau = \begin{cases} mk, & \text{se } \mu P \geq mk \text{ [Prandtl]} \\ \mu P, & \text{se } \mu P < mk \text{ [Coulomb]} \end{cases} \quad (5)$$

#### 2.4. Quantificação do Atrito

Ao longo da História, a quantificação do atrito tem vindo a tornar-se progressivamente mais complexa à medida que se procura reproduzir com maior rigor as condições operativas dos processos. Esta quantificação tem, na generalidade dos casos, um carácter qualitativo, sendo o trabalho desenvolvido com base em metodologias simples de modo a permitir a comparação e replicação dos mesmos por outras entidades. As primeiras metodologias para a quantificação do atrito remontam às primeiras civilizações, mas por ventura, os trabalhos de Leonardo da Vinci sobre o escorregamento de um objecto num plano inclinado são os mais conhecidos. Progressivamente, outros métodos de quantificação, não só do atrito do par tribológico, mas também da influência de outros parâmetros, tais como a lubrificação, pressão de contacto ou temperatura, foram sucessivamente sendo introduzidos.

O cálculo do atrito, geralmente com base na medição da força de atrito, requer o uso de equipamento experimental bastante dispendioso e por vezes de utilização complexa em condições laboratoriais controladas (Stachowiak, 2004). A qualidade e precisão destas medidas permite melhorar significativamente a compreensão dos mecanismos tribológicos e auxiliar em questões energéticas e de fiabilidade da indústria. São vários os ensaios tribológicos que têm sido sugeridos na literatura para modelar as condições de atrito nos processos de corte. Os vários ensaios podem ser agrupados, na generalidade, em duas grandes categorias: Testes de Processos e Testes de Simulação. Os primeiros, aplicam operações típicas do corte sem alterar a cinemática básica do processo, enquanto que os segundos usam equipamentos e procedimentos laboratoriais, simples e baratos, no entanto eficazes, para avaliar o atrito sem perder a relevância para as operações reais de corte.

A maioria dos diferentes métodos para a quantificação do atrito encontram-se descritos nas normas ASTM por parte do comité D-2, entre outras publicações (Cristino, 2007). Dos listados nas normas ASTM, destacam-se os métodos Bloco no Anel (ASTM D2714) e o Pino no Disco (ASTM G 99-95a), por serem os métodos mais indicados para recriar as condições nos processos de corte por arranque de apara e de deformação plástica (Carilho, 2007)

Os Tribómetros, máquinas de ensaios tribológicos, são aparatos cujo objectivo é medir atrito e/ou desgaste em condições controladas. Este aparato deve ser cuidadosamente seleccionado, consoante a aplicação desejada, para que seja possível a recriação fiel das características de atrito e/ou desgaste do processo que se pretenda analisar.



Dos ensaios seguidamente apresentados, os ensaios Pino no Disco, Pino na Placa e de Anel pertencem ao agrupamento dos Ensaios de Simulação, enquanto que o ensaio de Corte Ortogonal pertence ao grupo dos Ensaios de Processos.

#### 2.4.1. Ensaio Pino no Disco

O tribómetro de Pino no Disco é talvez a máquina de ensaios tribológicos mais utilizada para avaliar o coeficiente de atrito em zonas com deformação plástica local e deformação elástica. Neste equipamento (Figura 3), o pino é pressionado contra um disco em movimento rotativo, sendo o coeficiente de atrito calculado com base nos valores das forças vertical e horizontal. Este ensaio permite obter um bom controlo experimental das variáveis envolvidas no processo, sendo este o factor determinante para ser o ensaio mais preferido pelos investigadores (Stachowiak, 2004).

A geometria básica de um sistema de pino-no-disco consiste na utilização de um pino com secção circular e ponta hemisférica que desliza sobre uma superfície plana de um disco em rotação. O diâmetro do pino e a espessura do disco dependem do caso em estudo, mas devem ser seleccionados de forma a promover a rigidez de todo o sistema.

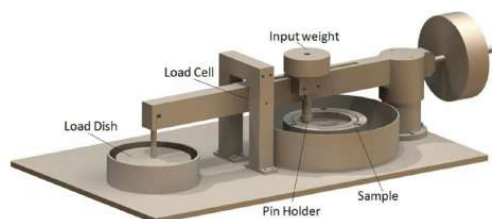


Figura 3 - Tribómetro de Pino no Disco (Lozano, 2015)

O acabamento superficial de ambos os componentes (pino e disco) deve coincidir com as condições experimentais que se pretendem reproduzir, sendo que um dos principais parâmetros é a rugosidade superficial. Para evitar o efeito de forças indesejadas ao sistema, as faces dos discos e pinos devem estar paralelas e o disco deve rodar concêntricamente. Nos aparatos frequentemente encontrados no mercado, a carga é aplicada no pino através do uso de um sistema de alavanca de pesos calibrados, e o paralelismo do sistema garantido através do uso de contrapesos. É de salientar ainda que as máquinas de ensaios de pino-no-disco trabalham frequentemente em condições extremas quer de pressão de contacto quer de velocidades relativas na interface, de forma a deliberadamente se acelerar o processo de desgaste, diminuindo assim o tempo efectivo dos ensaios. Estas condições extremas não são necessárias para a avaliação do atrito, mas pretendem avaliar o desgaste, já que o primeiro pode ser determinado em apenas uma rotação do sistema.

No entanto, a aplicabilidade deste ensaio à simulação das condições de atrito dos processos de corte por arranque de aparas tem sido, desde já algum tempo, posta em causa. Vários autores, argumentaram que este ensaio é inadequado, por ser incapaz de reproduzir os valores de pressão de contacto, a temperatura e o fluxo de material, frequentemente encontrados nas aplicações industriais (Grzesik, 2002). No caso do fluxo de material, argumenta-se que enquanto no corte a aparas desliza sobre a face de ataque apenas uma vez, no ensaio de Pino no Disco, o pino desliza na mesma zona várias vezes durante o ensaio. Como consequência, alguns autores foram apresentando as suas alternativas como são os casos de Olsson (1989), Hedenquist e Olsson (1991) e Zemzemi (2007).

### 2.4.2. Ensaio de Pino na Placa

Em tudo idêntico ao anterior, o Ensaio de Pino na Placa segue os mesmos princípios de funcionamento que o Ensaio de Pino no Disco. A maior diferença, e mais óbvia, é o método de actuação. Enquanto que no anterior havia o movimento rotativo de um disco, neste temos movimento linear de uma placa. Observando ao nível local a região de contacto das duas superfícies, pode-se concluir que as condições de ambos os ensaios são suficientemente idênticas para não serem consideradas como características diferenciadoras.

No entanto, se o foco do ensaio mudar de caracterização do atrito para caracterização do desgaste, já existem diferenças. O aparato Pino na Placa proporciona um meio mais conveniente para o estudo do deslizamento bidirecional, em oposição ao deslizamento unidirecional, estudado nos aparatos Pino no Disco.

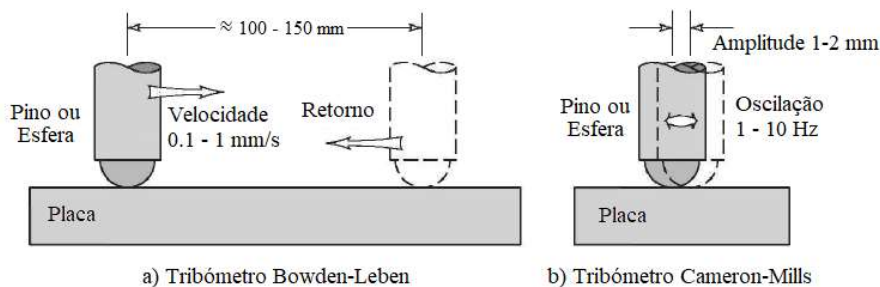


Figura 4 – Tribómetros Pino na Placa: (a) Bowden-Leben, de baixa frequência e alta amplitude e (b) Cameron-Mills, de alta frequência e baixa amplitude (Stachowiak, 2004).

Uma clara vantagem para os tribómetros de pino no disco e pino na placa é a inexistência de restrições quanto ao material dos provetes, nas normas que os regem, já que para outros ensaios tribológicos, as normas especificam quais os materiais a utilizar.

### 2.4.3. Ensaio de Anel

Um outro tipo de ensaio frequentemente utilizado para calibração do atrito, principalmente nos processos de forjamento, é o ensaio de anel. Neste ensaio, um provete anelar com dimensões específicas é comprimido e deformado entre pratos. A partir do controlo da variação da altura e do diâmetro interno do provete em cada fase do ensaio, é possível, sem instrumentos especiais de medida, obter o coeficiente de atrito,  $\mu$ , através da interpolação com as curvas teóricas de calibração. Contrariamente à maioria dos métodos, este não necessita de medição da força, sendo suficiente o controlo dimensional do provete durante cada fase do ensaio.

Na Figura 5 (a), encontra-se representado o comportamento típico de dois provetes anelares idênticos, obtidos após a realização do ensaio de anel com uma mesma redução de altura ( $\Delta h$ ). Um dos provetes comprimido encontra-se em condições de atrito reduzido (anel do lado direito), enquanto o outro em condições de atrito elevado (anel do lado esquerdo). Verifica-se, portanto, que nos dois casos o comportamento do anel durante o ensaio é expressivamente diferente. Na condição de baixo atrito, o diâmetro interior do anel aumenta, enquanto no caso oposto verifica-se uma diminuição do mesmo. Note-se que em ambos os casos há um aumento do diâmetro exterior.

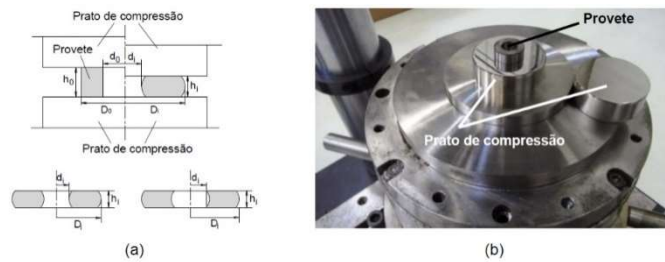


Figura 5 – Ensaio de Anel: (a) representação esquemática do aparato experimental utilizado para efectuar um ensaio de anel numa prensa equipada com uma ferramenta punção-matriz, (b) fotografia mostrando um detalhe do anel e do prato de compressão inferior (Martins, 2005).

A utilização deste método prevê a aplicação de uma série de pressupostos simplificativos, o que pode conduzir a erros e incertezas (Loveday e Books, 2000). Além disto, uma vez que os valores obtidos por este método variam com vários parâmetros, entre os quais a velocidade relativa e a pressão de contacto, faz com que qualquer estimativa do atrito seja apenas um valor indicativo (as condições de lubrificação podem variar em cada fase do ensaio).

Apesar de este tipo de ensaio ser amplamente utilizado, este apenas é adequado para classificar qualitativamente os lubrificantes ou o acabamento das superfícies das ferramentas, pois não é ideal para a obtenção de valores quantitativos fiáveis para fins de modelação. Os valores obtidos são altamente dependentes dos pressupostos assumidos para o cálculo das curvas de calibração, sendo que para reduções de altura inferiores a 20%, o método não é muito sensível, estando muito dependente do grau de qualidade da caracterização mecânica do material (Loveday e Books, 2000), (Petersen, 1997).

#### 2.4.4. Ensaio de Corte Ortogonal

Na generalidade, os Testes Tribológicos de Processos simplificam a geometria de tridimensional para bidimensional, ou seja, efectuam corte Ortogonal (onde o corte é perpendicular à aresta de corte) em vez de corte Oblíquo. As condições de ortogonalidade no corte podem ser obtidas, por exemplo, no torneamento de uma parede tubular (Figura 6 (a)) ou na maquinagem de um provete paralelepipedico (Figura 6 (b)).

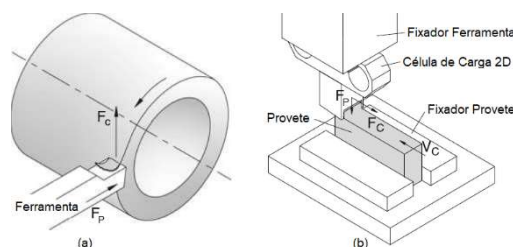


Figura 6 - Aparatos mais comuns de testes tribológicos de processos: (a) torneamento de um tubo de grande diâmetro; (b) maquinagem de um provete paralelepipedico (Cristino, 2011).

Embora a precisão e o grau de confiança dos valores de atrito determinado nestes testes sejam geralmente altos (Cristino, 2011), são vários os factores que os podem levar a serem considerados como uma abordagem inadequada: (a) a disponibilidade de máquinas-ferramenta (preferencialmente não alocadas à produção); (b) a influência das variáveis operacionais (podem revelar-se difíceis de

controlar); (c) a incapacidade de fornecer informações quantitativas locais sobre o atrito (Astakhov, 2005); e (d) a exigência de aparatos experimentais complexos e dispendiosos. Além disso, estes testes tribológicos não podem ser classificados nem como técnicas de calibração independentes, nem como testes laboratoriais para a determinação do coeficiente de atrito. Estas são as razões que motivam os investigadores a procurarem procedimentos alternativos baseados em testes de simulação.

## 2.5. Natureza das Superfícies

### 2.5.1. Geometria e Acabamento

Quando se tenta compreender o fenómeno de atrito entre duas superfícies, é necessário conhecer detalhes específicos acerca das superfícies envolvidas (Myers, 1999). Conforme visto anteriormente, a força de atrito entre superfícies depende das forças de interação entre elas (i.e., da sua natureza química) e da dureza e tensões de cedência de cada material (da sua natureza física).

Todas as superfícies obtidas por processos de fabrico não são totalmente planas ou lisas, quando observadas numa escala microscópica, e facilmente se constata que possuem irregularidades, apesar de muitas vezes parecerem perfeitamente polidas à vista desarmada (Jamari e Schipper, 2006). Estas irregularidades encontradas na superfície são geralmente denominadas de asperezas, sendo que a sua origem pode ser atribuída a diversos fenómenos tais como: à fractura dos materiais, à formação de óxidos, a alterações metalúrgicas, à deposição de material na superfície e à solidificação de líquidos. Quando dois corpos entram em contacto entre si este dá-se inicialmente ao nível das asperezas.

O tipo de deformação que ocorre (elástica, elasto-plástica, plástica) durante o contacto de superfícies depende do valor da carga normal aplicada, da micro-geometria e das propriedades dos materiais em contacto. Vários investigadores como Thomas (1999) e Burakowski (1999) concluíram que a força de atrito depende das propriedades específicas dos materiais envolvidos e da área de contacto estabelecida entre ambas as superfícies. É importante referir que em muitos casos o atrito obtido é diferente do espectável, nomeadamente por diferenças entre a área real e a aparente ou por as asperezas apresentarem gradientes de dureza (por exemplo, devido ao fenómeno de encruamento da deformação plástica de materiais). A diferença entre a área real e a aparente pode ainda ser promovida pela existência de partículas estranhas aos materiais em interação como camadas de óxidos, existência de bolsas de gás ou líquido, condensação de vapores, impurezas sólidas, etc. De facto, estudar o atrito na interação de metais corresponde também ao estudo dos seus óxidos, pois exceptuando-se casos muito específicos é impossível encontrar uma superfície completamente isenta de contaminantes. Na melhor hipótese, a superfície normal de um metal estará coberta de camadas adsorvidas de moléculas de gases e/ou outros contaminantes.

A orientação macroscópica das asperezas (textura superficial) está diretamente dependente do processo utilizado para a sua obtenção podendo variar desde grandezas atómicas a macroscópicas. Existem casos em que a geometria da superfície é causada pelos efeitos localizados, como por exemplo, a presença de elementos microestruturais mais duros, a fractura local ou o efeito da corrosão que pode atacar a superfície de forma aleatória. Mesmo após um cuidadoso polimento é impossível fazer com que a superfície a nível atómico esteja totalmente lisa (Carilho, 2007) pelo que, torna-se

importante distinguir entre derivações macroscópicas (desvios), flutuações, rugosidades e micro-rugosidades (Figura 7) relativamente à superfície teórica ideal.

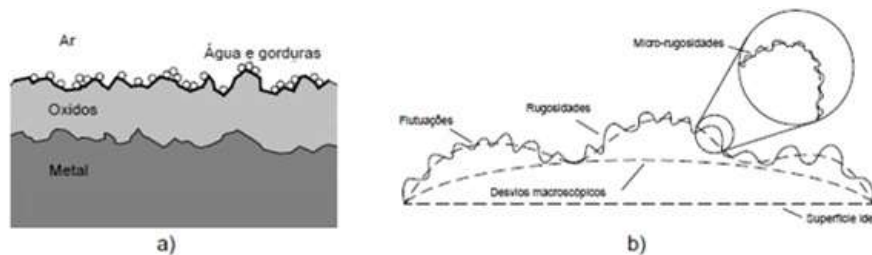


Figura 7 - Aspecto real de uma superfície acabada: a) Esquema representativo das impurezas que afetam a superfície dos metais; b) Forma geométrica de uma superfície vista ao nível microscópico. (Fernandes, 2017).

No caso do processo de corte por arranque de aparas, por exemplo, as ferramentas de corte deixam nas superfícies saliências e depressões que, embora tendo uma altura pequena em relação às dimensões globais da peça, podem influenciar a resistência da peça a esforços mecânicos (fadiga ou início de fractura) ou à corrosão. Assim, quando se analisa detalhadamente uma superfície cilíndrica obtida por torneamento, a sua geometria não coincide exactamente com a de uma superfície cilíndrica circular recta, pois as suas geratrizes apresentam rugosidades e ondulações, o mesmo se passando com as diretrizes. Uma vez que as superfícies resultantes do fabrico não coincidem com as superfícies geométricas pretendidas, diferindo estas tanto na dimensão, como na forma, é necessário em cada caso definir as variações consideradas admissíveis. Para cada dimensão são estabelecidas tolerâncias lineares e para o acabamento da superfície é definido o grau de rugosidade.

### 2.5.2. Contribuição dos Óxidos Superficiais no Coeficiente de Atrito

O par metal-metal é, provavelmente, o par tribológico mais estudado. Nos casos em que a interacção entre dois corpos é realizada na presença de camadas de óxidos, diferentes tipos de comportamentos podem ser observados. Estes dependem, nomeadamente, de parâmetros como as características mecânicas dos óxidos existentes na interface e a pressão superficial exercida. Na prática, podemos afirmar que o atrito pode ser considerado como o valor resultante da combinação de um conjunto de interacções superficiais de natureza óxido-óxido, óxido-metal e metal-metal.

Nos processos de corte, a interacção que temos interesse em estudar é a da aparas com a ferramenta (zona secundária, no que toca à dissipação de energia). Ao longo da segunda metade do século XX, vários foram os trabalhos publicados no âmbito da influência das atmosferas no corte, com maior ou menor ênfase na formação de óxidos e na sua influência para o processo. Os mesmos trabalhos também abordam o efeito dos lubrificantes, que serão referidos na subsecção seguinte. Um entrave à simples comparação dos vários valores obtidos são as características das várias ferramentas utilizadas, já que são diferentes de trabalho para trabalho (nomeadamente geometria e material). Sendo assim, a comparação limita-se ao aspecto qualitativo e não quantitativo.

Rowe (1963) verificou que o corte de aço macio com uma atmosfera de oxigénio originava valores de forças de corte inferiores quando comparados com os obtidos com ar, azoto e em vácuo. Postulou-se que tal facto se devia a uma alteração no mecanismo de formação da apara (no caso do oxigénio) e à formação de pontos de soldadura e aresta postiça de corte (no caso do vácuo).

Rowe (1966) estendeu o leque de materiais ao cobre e alumínio, mantendo igualmente o aço macio. Tal como determinado antes, o oxigénio faz diminuir a força de corte, quando comparado com os valores de corte em ar e azoto, e obtém-se um melhor acabamento e menor transferência de material para a ferramenta. No entanto, essa melhoria não é significativa no cobre e alumínio. Aliás, para velocidades de corte muito baixas os valores das forças de corte são maiores em oxigénio do que em azoto.

Estes resultados foram igualmente verificados por Williams (1978), que acrescenta que as melhorias observadas se devem a uma alteração no modo de deformação secundária da apara.

Cristino, (2011) efectuou experiências com chumbo em atmosferas de oxigénio, ar, azoto e argón. As forças de corte eram claramente superiores na atmosfera activa (oxigénio), seguindo-se a atmosfera padrão (ar) e finalmente nas atmosferas inertes (azoto e argón).

## 2.6. Lubrificação

Em termos funcionais, lubrificação define-se como a redução do atrito entre duas superfícies, através da redução do nível de interação existente entre as asperezas (Myers, 1999). Um lubrificante pode ser um sólido, um líquido ou um gás, existente entre as superfícies em movimento relativo. Pode-se considerar, pelo menos ao nível local, que as superfícies se encontram completamente separadas e que a resistência ao movimento relativo é causada pela necessidade de vencer a força de atrito causada pelo terceiro corpo (constituído geralmente por camadas de óleos, óxidos ou outros corpos estranhos).

Os mecanismos de redução do atrito, entre duas superfícies em movimento relativo podem ser convenientemente divididos em quatro regimes (Myers, 1999): o Hidrodinâmico, o Elasto-hidrodinâmico, (iii) a Camada Limite, e (iv) o de Lubrificação Química.

No Hidrodinâmico, um interveniente com uma camada relativamente espessa, evita o contacto directo entre as superfícies em movimento relativo, e conseqüentemente reduz o atrito entre eles. No Elasto-Hidrodinâmico, uma camada muito fina de lubrificante sobre altas pressões localizadas faz com que o lubrificante demonstre as suas características especiais (viscosidade) evitando o contacto directo entre as asperezas. Na Camada Limite, a acção do lubrificante é o resultado da existência de uma película monomolecular aderente a um ou ambos os sólidos e que reduzem as forças de adesão que actuam nos pontos de contacto. E finalmente, na Lubrificação Química, o lubrificante enfraquece ou destrói as ligações soldadas nas asperezas por meio de ataque químico.

Em todos os casos, o atrito é dependente das propriedades combinadas do fluido lubrificante e das superfícies em contacto. Se as superfícies estão completamente separadas, o coeficiente de atrito dependerá essencialmente das propriedades do lubrificante.

Rowe (1963) efectuou experiências em aço macio e determinou que com o uso de vapor de água como lubrificante se obtêm melhores resultados, ainda que muito ligeiros, do que os obtidos em atmosfera de azoto. No entanto, estes não são melhores do que os obtidos em ar. O autor notou igualmente que com o uso de ácidos gordos os resultados obtidos não eram melhores que os do vapor de água. Foi igualmente testada uma combinação de oxigénio com vapor de água e ácidos gordos (garantia de existência de total camada lubrificante), mas os resultados apenas foram significativamente melhores para baixas velocidades de corte, quando comparados com os da atmosfera de oxigénio.

Barlow (1966) efectuou experiências em cobre com tetracloreto de carbono ( $CCl_4$ ), marcado radioactivamente, com o objectivo de verificar qual o fenómeno responsável pela diminuição das forças de corte quando este era aplicado na face posterior da apara. Ao contrário de trabalhos anteriores na matéria, cujos resultados apontavam para uma penetração do fluido de corte na apara, foi determinado que a acção do mesmo apenas se restringia a uma reacção química à superfície. Este fenómeno foi classificado como efeito Rehbinder (diminuição da taxa de encruamento na zona do plano de corte) (Andrade et al., 1950). Foi igualmente identificado que em caso de lubrificação da face de ataque da ferramenta o efeito Rehbinder na face posterior da apara não se verifica.

Rowe (1966) efectuou experiências com aço macio, cobre e alumínio, usando ácidos gordos e tetracloreto de carbono. A acção dos ácidos gordos no cobre é substancialmente benéfica quando comparada com o corte em ar. No entanto, caso estes sejam saturados com oxigénio, os resultados obtidos começam a piorar e agravam-se significativamente se houver excesso de oxigénio. Quando aplicado ao corte de aço, os ácidos gordos demonstraram ser um bom lubrificante. Em todos os três metais, o tetracloreto de carbono demonstrou ser um bom lubrificante, sendo em geral o lubrificante no estado líquido o mais efectivo na redução das forças de corte.

Wakabayashi (1993) aborda o corte de alumínio com ferramentas de HSS, com e sem revestimento de TiN, na presença de lubrificantes gasosos, nomeadamente tetracloreto de carbono e etanol ( $C_2H_5OH$ ), em atmosfera controlada e a baixas velocidades de corte. As diferenças entre as *performances* de cada ferramenta não são significativas em vácuo, mas quando se adiciona o tetracloreto as diferenças são substancialmente significativas, com a ferramenta com revestimento a obter os melhores resultados. No entanto, os resultados para o etanol não mostram diferenças significativas entre as duas ferramentas. Estas conclusões são corroboradas pelas observações efectuadas quanto à transferência de material da apara para a ferramenta e pelo acabamento superficial obtido.

### 3. Desenvolvimento Experimental

Na presente Secção são apresentados e descritos os aparatos e procedimentos experimentais desenvolvidos no âmbito da presente tese, bem como o plano de ensaios.

#### 3.1. Máquina de Ensaio

O aparato experimental utilizado na medição do coeficiente de atrito teve por base a cadeia cinemática de uma fresadora TRIAC Denford (Figura 8 (b)) de três eixos, com controlo numérico, cujas principais características se encontram na Tabela A.2.1 (Anexo A.2).

A célula de carga utilizada nesta montagem é uma célula de carga bidimensional, que foi desenvolvida de propósito para este tipo de aplicações e com uma sensibilidade mínima de cinquenta gramas (em cada eixo), permitindo medir as forças que se desenvolvem nos eixos vertical e horizontal da mesma. Esta encontra-se instalada, por meio de dois parafusos M5, numa base (*BCC*), que por sua vez se encontra instalada na mesa de trabalho por meio de quatro parafusos M8. Na cabeça móvel da cadeia cinemática foi instalado, aproveitando os furos M8 já existentes, o dispositivo de fixação de provetes, ou *DFP* (Figura 8 (d)). No topo da célula de carga existem quatro furos roscados M5 e um M8 que permitem a rápida instalação das várias ferramentas necessárias à realização dos ensaios. A aquisição de dados (*DAQ*) é efectuada com recurso a uma placa NI 9237, ligada a um computador com software comercial NI Labview. Foi criado um programa específico em Labview (ver Anexo A.1) para a aquisição de dados e desenvolvido um sistema para a calibração da célula de carga bidimensional.

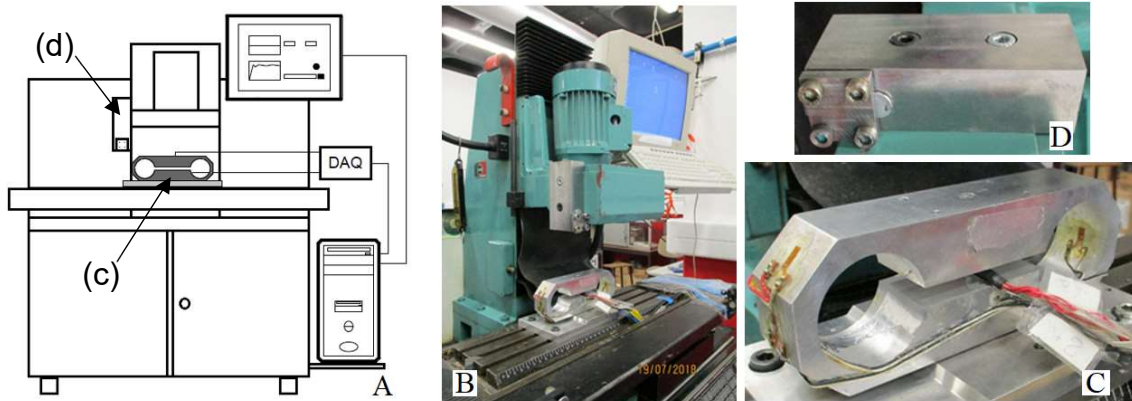


Figura 8 - Aparato Experimental: (a) Esquema; (b) Cadeia Cinemática; (c) Célula de Carga Bidimensional montada na *BCC* e; (d) Dispositivo de Fixação de Provetes.

##### 3.1.1. Acessórios para Ensaio Tipo Pino na Placa

Para o ensaio tipo pino na placa foi desenvolvido um dispositivo para fixação da ferramenta (*DFP*), aparafusável à célula de carga por meio de quatro parafusos M4, onde é possível aparafusar, através de um aparafuso M5, a ferramenta. Foi utilizada como ferramenta uma pastilha de corte de carboneto de tungsténio (Figura 9 (a) e (c)). De modo a evitar efectuar corte, em vez de fricção pura, as arestas de corte da ferramenta foram removidas, como se pode observar na Figura 9 (c).



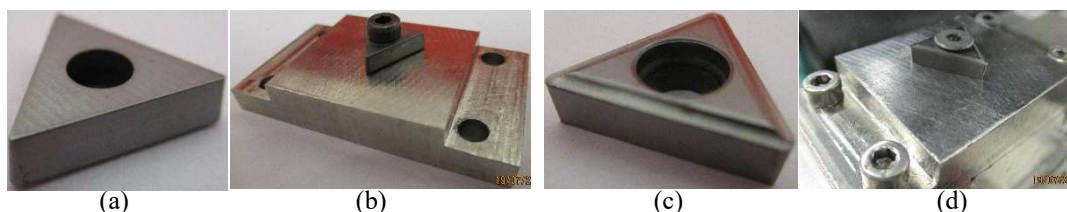


Figura 9 – Ferramenta: (a) Face Polida; (b) DFF com Ferramenta de Face Polida; (c) Face Rugosa e; (d) DFF com Ferramenta de Face Rugosa.

Utilizando um rugosímetro Mahr GD 25 com ponteira MFW 250, foram obtidas as seguintes rugosidades para cada face da ferramenta, que se apresentam na Tabela 1.

Tabela 1 - Rugosidades das Faces da Pastilha de Corte

	$R_a$	$R_z$	$R_{Máx}$
Face Rugosa	0,426 $\mu m$	0,551 $\mu m$	2,92 $\mu m$
Face Polida	0,209 $\mu m$	0,287 $\mu m$	1,46 $\mu m$

Devido à geometria da face rugosa, os ensaios apenas podem se realizados numa pequena região (Figura 10 (a)). No entanto, após testes preliminares, foi verificada a existência de uma dependência crescente entre os eixos, quanto mais perto do vértice se efectuavam os ensaios. Como tal os ensaios foram efectuados o mais próximo possível do centro da ferramenta (Figura 10 (b)). As Figura 10 (c) e (d) mostram as marcas resultantes dos ensaios.

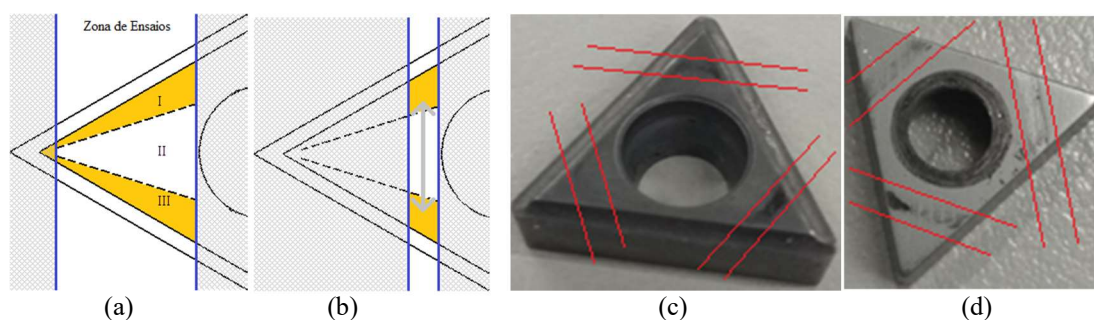


Figura 10 - Zona de ensaio: (a) regiões da zona de ensaio: I e III regiões transiente; e II região estacionária; (b) zona ideal de ensaio; marcas de ensaios na (c) face rugosa e (d) face polida

### 3.2. Calibração Célula de Carga Bidimensional

Nesta Secção são apresentados o Sistema de Calibração, desenvolvido pelo autor para a calibração da célula de carga, a Metodologia de Calibração implementada na calibração da mesma e as Curvas de Calibração obtidas.

#### 3.2.1. Sistema de Calibração

Foi desenvolvido um mecanismo de calibração, que permite a aplicação simultânea de cargas normais e tangencias, necessárias à determinação da curva de calibração. Este mecanismo é constituído pelo subsistema horizontal e pelos componentes de calibração do eixo vertical (CEV) e de aplicação pontual das forças (CAPF).

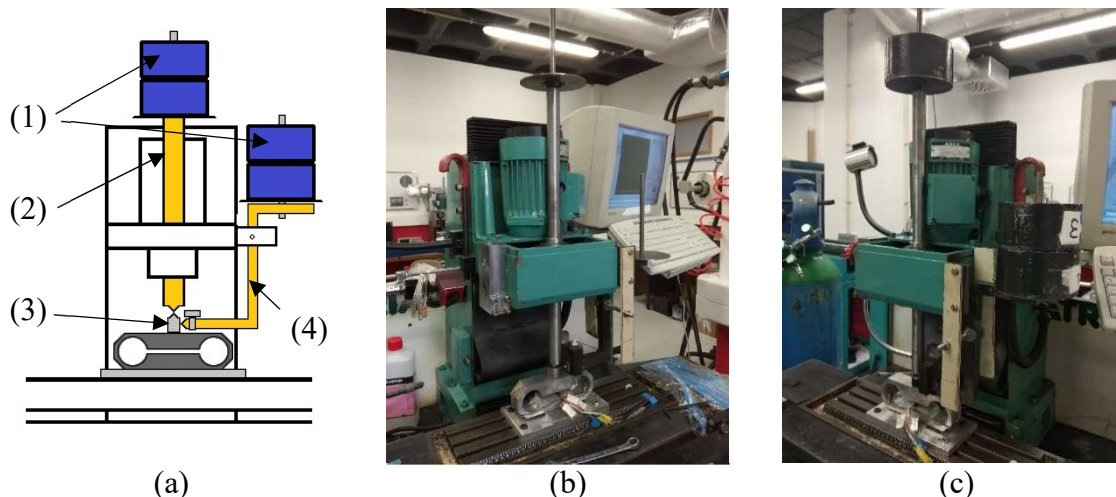


Figura 11 – Sistema de Calibração; (a) esquema: (1) Massas Calibradas, (2) Calibração Vertical, (3) CAPF e (4) Calibração Horizontal; (b) sistema sem carga e; (c) sistema em carga.

O Componente de Calibração do Eixo Vertical ou CEV é o mais simples, sendo constituído por dois varões e um disco, que se encontram soldados tal como se verifica na Figura 12 (a). O disco serve de plataforma de suporte para as massas a serem utilizadas no processo de calibração. O varão de maiores dimensões foi maquinado de modo a entrar solidário com o eixo Z da cadeia cinemática, através do furo do spindle, garantindo um correcto alinhamento. O de menores dimensões tem como principal função garantir o posicionamento das massas colocadas no disco.

O subsistema de Calibração Horizontal (Figura 12 (b) e (c)) é um mecanismo do tipo alavanca consistindo numa estrutura móvel e noutra fixa. A estrutura móvel é constituída por três segmentos de varão de secção quadrangular, soldados entre si de modo a obter uma forma de S, com um disco e um varão circular colocados na zona horizontal superior (tal como no *CEV*, mas não soldados e com o mesmo objectivo), um conjunto de contrapesos e uma esfera no topo da zona horizontal inferior, que efectua o contacto com o componente de calibração do eixo vertical. Os contrapesos garantem o equilíbrio da estrutura móvel e asseguram que a direcção de aplicação da força é horizontal (no referencial da célula de carga). A estrutura fixa encontra-se aparafusada à estrutura da cadeia cinemática por meio de 2 parafusos M4 e dois M5 (fazendo uso de furos já existentes na estrutura) e consiste em dois apoios e um varão, que é o eixo de rotação da estrutura móvel.

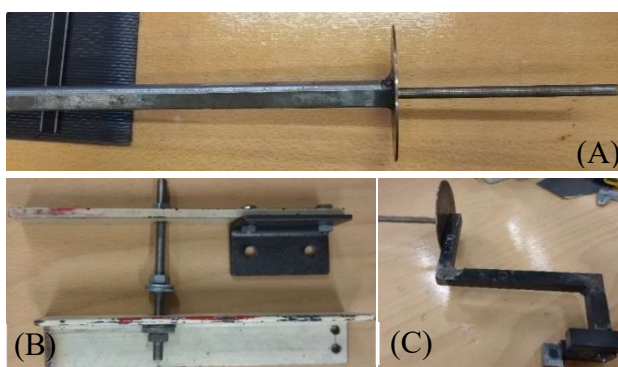


Figura 12 - Componentes do Sistema de Calibração: (A) Vertical; Horizontal: (B) Estrutura Fixa; e (C) Estrutura Móvel



Figura 13 - Componente para aplicação pontual das forças (CAPF)

Por último, o componente para aplicação pontual das forças (Figura 13), é um simples cilindro com uma esfera no topo, aparafusado, na extremidade oposta à anterior, à célula de carga, por meio de um parafuso M5. Este efectua contacto pontual com o subsistema horizontal e o *CEV*, através das esferas presentes, de tal forma a que as cargas aplicadas sejam de natureza pontual (evitando cargas distribuídas).

### 3.2.2. Metodologia de Calibração

Procurou-se optar por uma metodologia simples de calibração da célula de carga que consiste em sucessivos incrementos da carga aplicada no eixo a calibrar, mantendo o outro eixo sem qualquer carga aplicada. Este método foi selecionado após ter sido validado, em testes preliminares, a não dependência entre os valores dos eixos e que a histerese é desprezável. Ao aplicar-se carga apenas numa direcção, o valor observado na outra era nulo. Existindo disponíveis massas calibradas de 50 g, 100 g, 200 g e 4500 g, estas foram combinadas para se obter a sequência final de calibração: 50 g, 100 g, 200 g, 400 g, 500 g, 4500 g, 9000 g e 13500 g. Note-se que foi contabilizado para a calibração do eixo vertical o peso próprio da *CEV* (2016 g) e para ambos eixos foi contabilizado o peso próprio do *CAPF* (108 g). Devido a limitações do subsistema de calibração horizontal, apenas foi possível a utilização de massas de 4500g para a calibração deste, no entanto deve-se notar que as forças desenvolvidas nos ensaios a efectuar são, pelo menos, da mesma ordem de grandeza do peso das massas calibradas utilizadas nesta calibração. A sequência de calibração para este eixo foi 4500 g, 9000 g e 13500 g.

O procedimento de calibração encontra-se exposto em maior detalhe no Anexo A.1.

### 3.2.3. Curvas de Calibração

Após a realização das sequências de calibração, anteriormente apresentadas, foram obtidas as seguintes curvas de calibração.

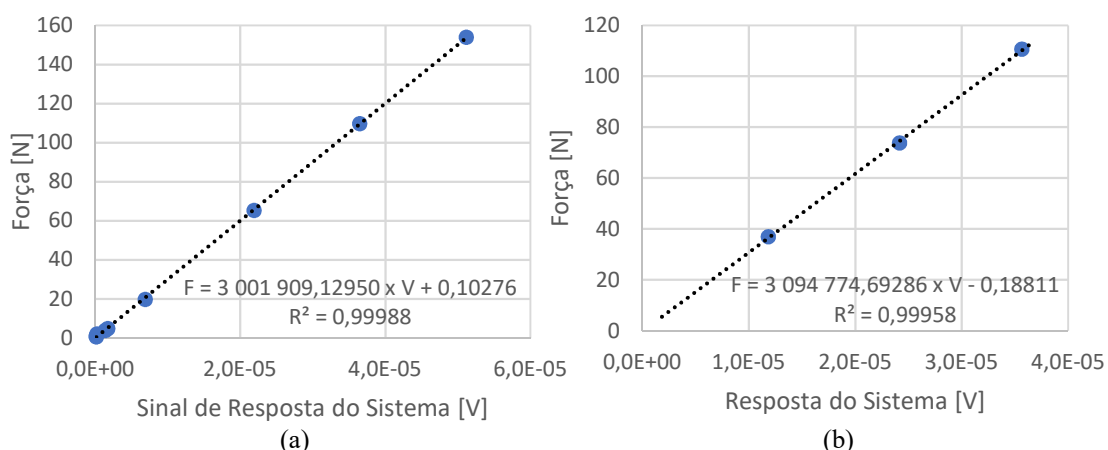


Figura 14 - Gráficos de Calibração dos Eixos: (a) Vertical e (b) Horizontal

Obtemos assim as seguintes equações:

$$F_H = 3094774.69286 \times V_H - 0.18811 \quad (6)$$

$$F_V = 3001909.12950 \times V_V + 0.10276 \quad (7)$$

### 3.3. Materiais e Atmosferas Utilizadas

O critério de escolha dos materiais foi extremamente limitado pelas reduzidas dimensões da ferramenta e pela dependência entre os valores dos eixos, observada nos testes preliminares efectuados na vizinhança dos vértices da mesma, consequência da geração de um momento flector em torno do parafuso. Foi então determinado que o provete deveria ter uma espessura máxima de 2 mm. Esta espessura garante que o provete é espesso o suficiente para minimizar vibrações, enquanto ao mesmo tempo que é fino o suficiente para minimizar os efeitos do referido momento flector. Outra restrição identificada foi imposta pela altura da cabeça do parafuso de fixação da ferramenta, que se o provete não fosse alto o suficiente, poderia colidir com o *DFP*. Dos materiais disponíveis, foram seleccionados alumínio AA 5080, cobre, liga de titânio Ti6Al4V e aço DC 04 e DP 980 (Figura 15). Estes materiais são uma amostra representativa dos materiais utilizados em diversas aplicações da indústria portuguesa, como por exemplo na aeroespacial, ferroviária, automóvel, construção de moldes, cablagens, equipamentos eléctricos e eletromecânicos, cutelaria e cunhos e cortantes.

Os critérios de selecção para os gases foram mais simples de estabelecer. Decorrente do objectivo do presente trabalho a selecção do oxigénio foi mandatária. Foram igualmente seleccionados o argón (0% de  $O_2$ ) e a atmosfera laboratorial (20% de  $O_2$ ), de modo a no final serem obtidos três conjuntos de pontos, cada um com uma percentagem diferente de oxigénio. O argón foi seleccionado dado ser o gás inerte engarrafado que se encontrava disponível para utilização.

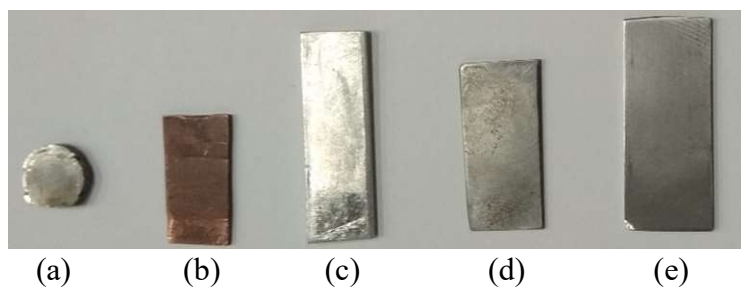


Figura 15 – Amostras dos materiais utilizados no fabrico de Provetes:  
(a) Ti6Al4V; (b) Cobre; (c) AA 5080; (d) DC 04; e (e) DP 980

Foi igualmente decidido a utilização de lubrificantes não gasosos, com o objectivo de verificar a efectividade dos gases seleccionados como lubrificantes. Recorreu-se assim à Pasta de Lítio, como representante dos lubrificantes em pasta, e à Glicerina Líquida, em representação dos líquidos. Os ensaios com os lubrificantes apenas foram efectuados para a face rugosa da ferramenta.

### 3.4. Procedimento Experimental e Plano de Ensaio

De seguida são descritos os principais passos do Procedimento Experimental para o Ensaio Tipo Pino na Placa. A versão completa e detalhada encontra-se disponível no Anexo A.1.

Tirando partido do facto da cadeia cinemática ser programável (em Código G), foi elaborado um programa para a realização dos ensaios. Neste constam as coordenadas no plano XY (plano da superfície da pastilha) onde o ensaio ocorre, bem como a velocidade a que este se procede.

A instalação dos vários componentes (*DFE*, ferramenta e provete) é o passo seguinte a efectuar. De seguida, deve ser verificado no programa de aquisição de dados o zero do sistema, corrigindo-o se necessário. Deve-se igualmente verificar a localização do ficheiro a gravar e se a opção *Aquisição Contínua* se encontra seleccionada. Findos estes passos, deve-se efectuar o contacto entre o provete e a ferramenta, procedendo com máxima cautela para não danificar qualquer deles, afim de definir o plano de trabalho e garantir o paralelismo da face inferior do mesmo com a superfície superior da ferramenta. Em seguida é aplicada uma pré-carga (para os ensaios com alumínio esta teve de ser reduzida) e verificando uma última vez se os sistemas se encontram prontos para efectuar o ensaio. Após este passo, iniciar a aquisição de dados e o programa de ensaios.

Com o objectivo de garantir um conjunto de resultados significativos, foi decidido efectuar 3 ensaios por face da pastilha, com 25 passagens válidas cada. No fim de cada ensaio procede-se ao acondicionamento das superfícies ensaiadas, de modo repor as condições iniciais garantindo assim a repetibilidade dos ensaios. As lixas utilizadas neste processo foram sempre da mesma granulometria.

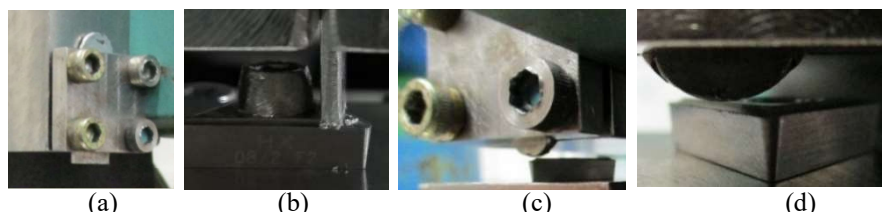


Figura 16 – Montagem de Provetes (ilustrativo) e Ensaio com provetes de AA5080 ((a) e (b)) e Ti6Al4V ((c) e (d)).

A versão final do Plano de Ensaio encontra-se apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Plano de Ensaio

<i>Materiais</i>	<i>Velocidade de Avanço</i>	<i>Face da Ferramenta</i>	<i>Atmosfera / Lubrificante</i>	<i>Número de Ensaio</i>	<i>Número de Passagens</i>
Ti6Al4V	500 mm/min	Rugosa	Árgon	3	25
Cobre			Ar		
AA 5080			Ar e Pasta de Lítio		
Aço DC04			Ar e Glicerina Líquida		
Aço DP 980			Oxigénio		
		Polido	Árgon		
			Ar		
			Oxigénio		
<i>Total de Passagens</i>					



### 3.5. Rugosímetro Mahr

Procedeu-se à instalação no Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico de uma estação de medição de rugosidades constituída pelos elementos fixos Coluna e Mesa Mahr ST 500, Unidade de Comando do Eixo Vertical da Coluna e Unidade de Controlo de Rugosímetros Mahr Perthometer S2.



(a)

(b)

Figura 17 – Aparato Medição Rugosidades: (a) Mesa e Coluna; Perthometer S2 (esq) e Unidade Comando Eixo Vertical (dta); (b) PKS Ball Joint Vice (esq) e Mesa de Coord.X/Y Mahr PKT (dta)

Podem ser instalados na mesa Mahr ST 500, a mesa de coordenadas X/Y Mahr PKT e o PKS Ball Joint Vice. Já na coluna ST 500 podem ser instalados as unidades de avanço Mahr GD 25 e Mahr PGK. Nestas últimas são montadas as sondas Mahr MFW 250, onde são instaladas as ponteiras e as guardas.



(a)

(b)

Figura 18 – Rugosímetros: (a) Unidade de Avanço Mahr GD 25 e PGK com conjunto de acessórios para sonda MFW 250 (Chaves, Ponteiras e Guardas)

Associada a esta montagem está um computador com software MarSurf XR 20, capaz de controlar (tal como o Perthometer S2) a realização de medições de rugosidades e um conjunto de padrões de calibração PGN-3, PEN-10 e PGN-10.



Figura 19 - Padrões de Calibração do Rugosímetro (esquerda para a direita): PGN-3; PEN-10 e PGN-10

Os procedimentos de instalação e utilização deste aparato encontram-se descritos nos documentos presentes no Anexo A.7.

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## 4. Análise e Discussão de Resultados

No presente capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos para o coeficiente de atrito nos vários ensaios efetuados para os materiais em estudo. São abordados os temas referentes à influência da rugosidade e da deposição de material na interface de contacto (Secção 4.1), da percentagem de oxigénio (Secção 4.2) e da pressão de contacto (Secção 4.3), através da análise da evolução do coeficiente de atrito em função da pressão que se desenvolve na interface de contacto.

### 4.1. Influência da Rugosidade e da Deposição de Material na Interface de Contacto

Na presente Secção é abordada a influência da rugosidade e da deposição de material na interface de contacto no coeficiente de atrito, para os vários materiais em estudo.

#### 4.1.1. Liga de Titânio Ti6Al4V

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Ti6Al4V.

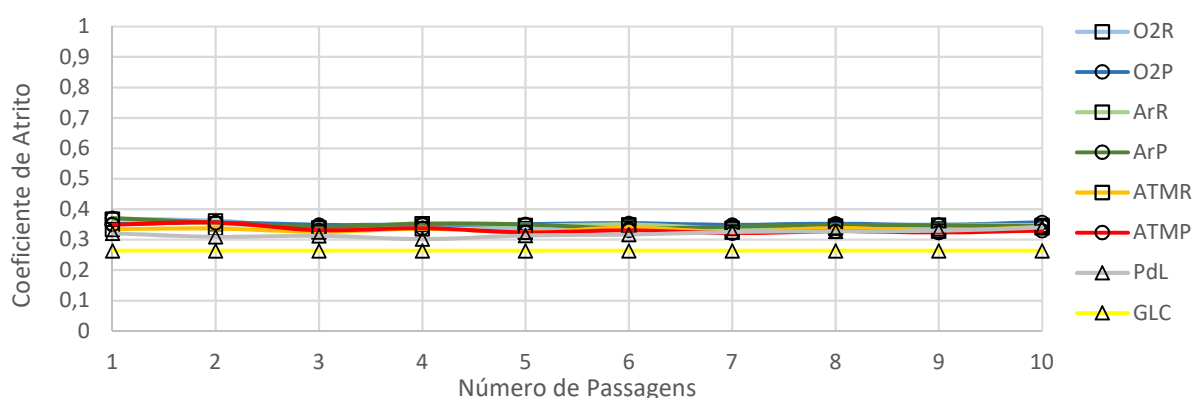


Figura 20 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ )

Tabela 3 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ )

	Oxigénio	Árgon	Atmosfera	Pasta de Lítio	Glicerina
Face Rugosa	0.352	0.349	0.333	0.320	0.264
Face Polida	0.348	0.349	0.333	-	-

O gráfico da Figura 20, mostra que os resultados obtidos se restringem a uma banda estreita de valores do coeficiente de atrito entre os 0,25 e 0,37 em que as curvas têm uma tendência muito semelhante e estabilizada ao longo dos ensaios.

Em detalhe, podemos diferenciar três conjuntos de resultados, os do ensaio *GLC* (Ensaio com Glicerina e Face Rugosa), que apresentam o valor do coeficiente de atrito mais baixo, os do ensaio *PdL* (Ensaio com Pasta de Lítio e Face Rugosa), com uma evolução intermédia e uma tendência diferente dos demais, e um bloco formado pelos restantes ensaios, árgon, oxigénio e atmosfera.

A curva *GLC* é a de menor valor médio e apresenta uma tendência constante ao longo das várias passagens. Segue-se a *PdL*, cuja evolução é diferente das restantes. Tal como as curvas relativas aos gases, esta apresenta uma evolução decrescente nas primeiras passagens, porém, ao contrário das



anteriores, esta não converge, sendo estritamente crescente após a quarta passagem. Para as restantes curvas, os valores médios mais elevados de atrito foram registados para o ensaio *O2R* (Ensaio com Oxigénio e Face Rugosa), seguidos dos *ArP* (Ensaio com Árgon e Face Polida), *ArR* (Ensaio com Árgon e Face Rugosa) e *O2P* (Ensaio com Oxigénio e Face Polida). Note-se que a maior diferença de valores médios de entre estes quatro é da ordem de 0.05. Seguem-se os ensaios *ATMP* (Ensaio com Atmosfera e Face Polida) e *ATMR* (Ensaio com Atmosfera e Face Rugosa), com o mesmo valor médio (em metade das passagens os valores de *ATMP* são mais elevados, enquanto que na outra são os de *ATMR*), que distam 0.015 do *O2P*. Tal como referido anteriormente, estas curvas apresentam, inicialmente, uma evolução decrescente que tende para um valor aproximadamente constante a partir da quinta passagem.

Esta tendência decrescente apresentada pelas curvas, denota a diminuição dos fenómenos relativos à deformação plástica das asperezas (nomeadamente *ploughing* e interpenetração) e a baixa influência da deposição de material, à medida que aumentam o número de passagens. Para o caso da tendência final da curva do ensaio *PdL*, o contributo destes fenómenos é contrariado pela diminuição do filme de lubrificante na interface de contacto.

Quanto à influência da rugosidade, podemos observar que a sua influência no coeficiente de atrito é nula, para os casos de árgon e atmosfera, e quase nula, para o caso do oxigénio ( $\approx 1\%$ ). Podemos igualmente verificar que as posições médias relativas entre as várias curvas se encontram aproximadamente constantes, quando comparados os resultados obtidos em superfície rugosa e polida.

Podemos então concluir que para o Ti6Al4V, a variação da rugosidade tem um impacto nada significativo no coeficiente de atrito, e que as variações, a haver, são demasiado pequenas para serem consideradas. Apesar de se ter observado a formação de um ligeiro depósito de material na superfície da ferramenta, este não produziu uma influência suficiente para que fosse observado nos resultados obtidos.

#### 4.1.2. Cobre

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Cobre.

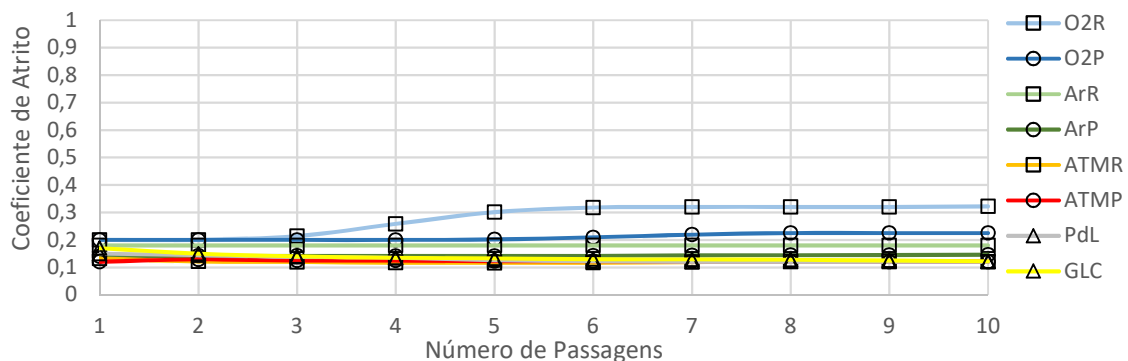


Figura 21 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu m$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu m$ )

Tabela 4 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

	Oxigénio	Árgon	Atmosfera	Pasta de Lítio	Glicerina
Face Rugosa	0.279	0.175	0.123	0.128	0.140
Face Polida	0.211	0.142	0.121	-	-

O gráfico da Figura 21 mostra que a maioria dos resultados se encontra restrito a uma banda entre os 0.1 e os 0.15. Fora desta banda encontram-se os valores relativos a ambos os ensaios com oxigénio e o *ArR*. Os limites da banda são definidos pelas curvas dos ensaios em atmosfera (limite inferior) e o *ArP* (limite superior). As curvas *GLC* e *PdL* povoam o interior da banda, cujo limite inferior pontualmente ultrapassam devido à ligeira tendência decrescente que apresentam.

As curvas que se encontram na referida banda apresentam aproximadamente a mesma tendência, convergindo logo após as primeiras passagens, apenas com algumas variações pontuais. As curvas *GLC*, *PdL* e *ArR* apresentam uma tendência ligeiramente decrescente. As curvas dos ensaios com oxigénio apresentam evoluções crescentes que tendem para um patamar, mas com diferentes graus de intensidade. A evolução de *O2P* apresenta, após a quinta passagem, um ligeiro aumento, enquanto que a evolução de *O2R* é bem mais acentuada. Após a segunda passagem, a curva aumenta rapidamente de valor até à sexta passagem, onde estabiliza.

O valor médio mais elevado é registado para o ensaio *O2R*, seguido do *O2P* e do *ArR*, sendo a variação entre os primeiros sensivelmente o dobro da dos segundos, que é aproximadamente a mesma entre os ensaios *ArR* e *ArP*. Após este último, as variações entre ensaios são bastante curtas e tendem a diminuir, com *GLC* e *PdL* separados por apenas 0.1, *PdL* e *ATMR* por 0.05 e *ATMR* e *ATMP* por 0.02.

A influência da rugosidade no coeficiente de atrito é diferente para as três misturas gasosas. Enquanto que se observam variações de 24 e 19% para oxigénio e árgon (respectivamente), os ensaios com atmosfera apenas apresentam variações de 1.5%. No entanto observa-se a mesma tendência para as três.

Podemos então concluir que para o cobre, a variação da rugosidade apenas tem um impacto significativo no coeficiente de atrito na presença de oxigénio. Quando comparados os resultados para a mesma mistura, verifica-se que o coeficiente de atrito é proporcional à rugosidade. Contudo, ao se compararem estas variações, entre as diferentes misturas, observa-se que são distintas. Apesar de se ter observado a formação de um ligeiro depósito de material na superfície da ferramenta, este não produziu uma influência suficiente para que fosse observado nos resultados obtidos.

### 4.1.3. Alumínio AA 5080

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de AA 5080.

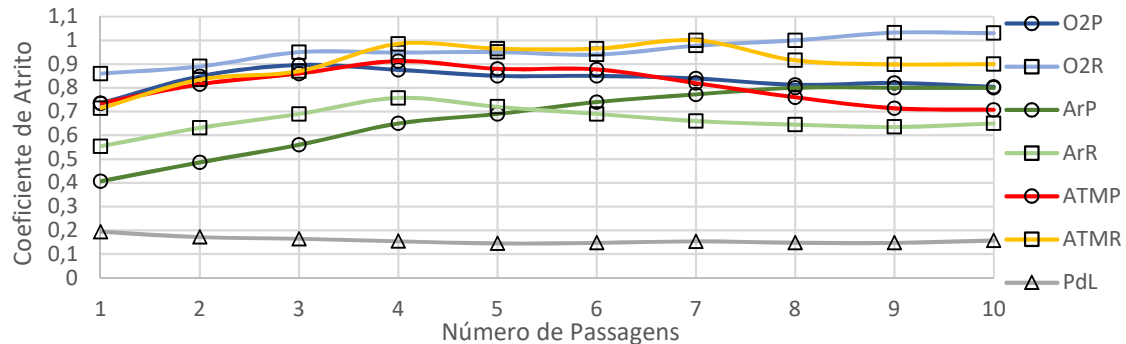


Figura 22 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de AA5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu m$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu m$ )

Tabela 5 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de AA 5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu m$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu m$ )

	Oxigénio	Árgon	Atmosfera	Pasta de Lítio	Glicerina
Face Rugosa	0.956	0.663	0.905	0.158	-
Face Polida	0.840	0.657	0.802	-	-

O gráfico da Figura 22, mostra quatro grupos distintos de resultados: um primeiro onde se insere o ensaio *PdL*, que é o ensaio com de valor médio mais baixo; um segundo onde se encontram os ensaios com árgon, com valores iniciais intermédios entre o grupo anterior e o seguinte e com tendência inicial crescente; um terceiro, onde sem encontram os ensaios para superfície polida de atmosfera e oxigénio, cujas curvas apresentam uma evolução em arco, com um máximo pela terceira passagem; e finalmente um quarto, onde sem encontram os ensaios em superfície rugosa de atmosfera e oxigénio, com evoluções geralmente crescentes mas com intensidades diferentes. Note-se que para este material não foi realizado o ensaio *GLC*.

Quanto à influência da rugosidade no coeficiente de atrito, podemos observar que se verifica a mesma tendência nas três misturas gasosas, mas que a intensidade da sua influência é desigual. Enquanto que se observam variações da ordem dos 15% para atmosfera e oxigénio, para o ensaio com árgon a sua influência é menor que 1%.

Para o AA 5080 foram observadas variadas tendências de evolução para as curvas obtidas, que se podem resumir (exceptuando as *PdL* e *O2R*) a crescente seguido de decrescente, com patamares mais ou menos bem definidos ao meio ou no fim. A curva *PdL* apresenta uma ligeira tendência decrescente, que rapidamente tende para constante. Este resultado é explicado pela correcta acção do lubrificante, impedindo um maior desgaste do provete e conseqüente deposição de material na superfície da ferramenta. A curva *O2R* apresenta-se com uma tendência estritamente crescente. Durante todos os ensaios (excepto o *PdL*), realizados com AA 5080, observou-se uma elevada deposição de material do provete na superfície da ferramenta, bem como a formação de material desagregado do provete. Estes factores contribuem para o aumento da influência das parcelas da adesão, dada a maior afinidade do par de superfícies Al-Al quando comparado com o Al-WC, e das partículas (material desagregado contamina a região de interface) no coeficiente de atrito.

Podemos então concluir que para o AA 5080, a variação da rugosidade tem um impacto significativo no coeficiente de atrito para todas as misturas gasosas. Quando comparados os resultados para a mesma mistura, verifica-se que o coeficiente de atrito é proporcional à rugosidade. Contudo, esta tendência não tem a mesma intensidade para as três misturas gasosas em estudo. Observou-se para todos os ensaios (excepto no PdL) a formação de depósitos de material na superfície da ferramenta, cuja influência foi verificada nos resultados obtidos.

#### 4.1.4. Aço DC 04

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de DC 04.

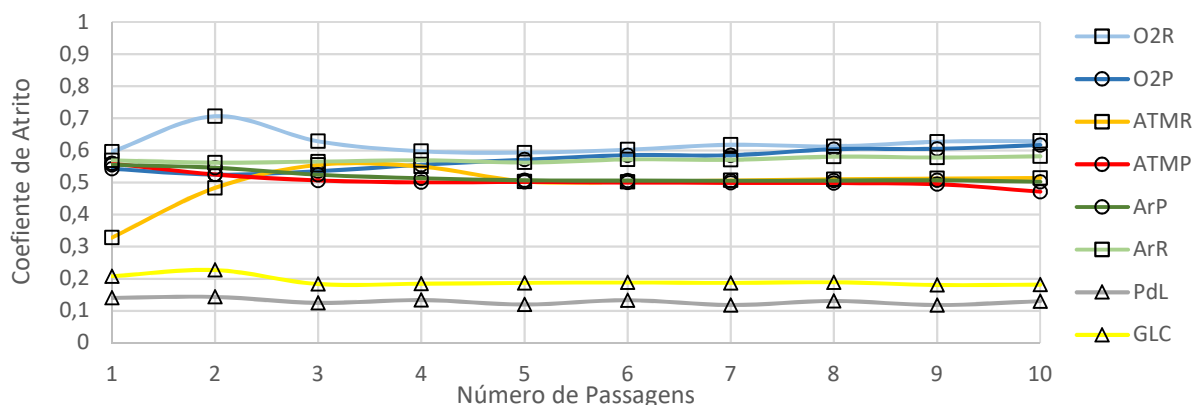


Figura 23 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de aço DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

Tabela 6 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de aço DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

	Oxigénio	Árgon	Atmosfera	Pasta de Lítio	Glicerina
Face Rugosa	0.621	0.571	0.506	0.129	0.191
Face Polida	0.573	0.517	0.497	-	-

No gráfico da Figura 23 podemos verificar que todos os resultados obtidos, à excepção dos GLC e PdL, se encontram limitados a uma banda entre os 0.5 e os 0.7. Podemos igualmente identificar três grupos de resultados, o dos lubrificantes GLC e PdL, com os menores valores e a uma distância considerável dos restantes, o das Atmosferas e ArP, em redor de 0.5, e o dos oxigénios e ArR, com os maiores valores e em torno de 0.6. Quanto a tendências, os lubrificantes apresentam-se com os valores mais constantes. De notar ainda que, na maioria dos ensaios, os resultados convergem logo após a terceira passagem, sendo o ATMP o único em que a convergência se inicia mais tarde (após a quinta passagem).

Os valores mais baixos do coeficiente de atrito foram registados para o ensaio PdL, seguidos dos do GLC. Tal como a maioria das restantes, a convergência é atingida logo após a terceira passagem, mantendo-se a distância entre ambas aproximadamente constante até à última passagem. Em seguida aparecem os resultados de ATMR, ATMP e ArP, com valores médios aproximados de 0.5. Os últimos dois apresentam uma tendência ligeiramente decrescente até à quinta passagem, convergindo depois. A tendência do ATMR é bastante diferente. Começando de uma posição intermédia, entre os lubrificantes e os ATMP e ArP, a curva descreve uma parábola, com um máximo à terceira passagem,

convergindo tal como as anteriores após a quinta passagem. Os valores mais elevados foram registados para os casos O2P, O2R e ArR. Destes, o O2P apresenta um máximo absoluto à segunda passagem, mas logo após a terceira converge; o ArR apresenta-se aproximadamente constante ao longo das dez passagens, enquanto que o O2R apresenta uma evolução crescente com uma diferença máxima de 0.1.

Quanto à tendência, a maioria das curvas apresenta uma tendência constante. No entanto, as curvas ArP e as dos oxigénios apresentam uma tendência ligeiramente crescente. As curvas GLC, ATMR e O2P apresentam uma fase obviamente transiente até à segunda, quarta e quinta passagens, respectivamente.

Quanto à influência da rugosidade no coeficiente de atrito, podemos observar que se verifica a mesma tendência nas três misturas gasosas, mas que a intensidade da sua influência é desigual. Enquanto que se observam variações da ordem dos 8 a 9% para o oxigénio e árgon, a atmosfera apenas regista uma variação de aproximadamente 2%.

Podemos então concluir que para o DC 04, a variação da rugosidade só tem um impacto significativo no coeficiente de atrito para o árgon. Quando comparados os resultados para a mesma mistura, verifica-se que os resultados obtidos para o coeficiente de atrito são proporcionais à rugosidade. Contudo, esta tendência não tem a mesma intensidade para as três misturas gasosas em estudo. Observou-se para todos os ensaios (excepto para os lubrificantes) a formação de ligeiros depósitos de material na superfície da ferramenta, cuja influência foi verificada nos resultados obtidos.

#### 4.1.5. Aço DP 980

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de DP 980.

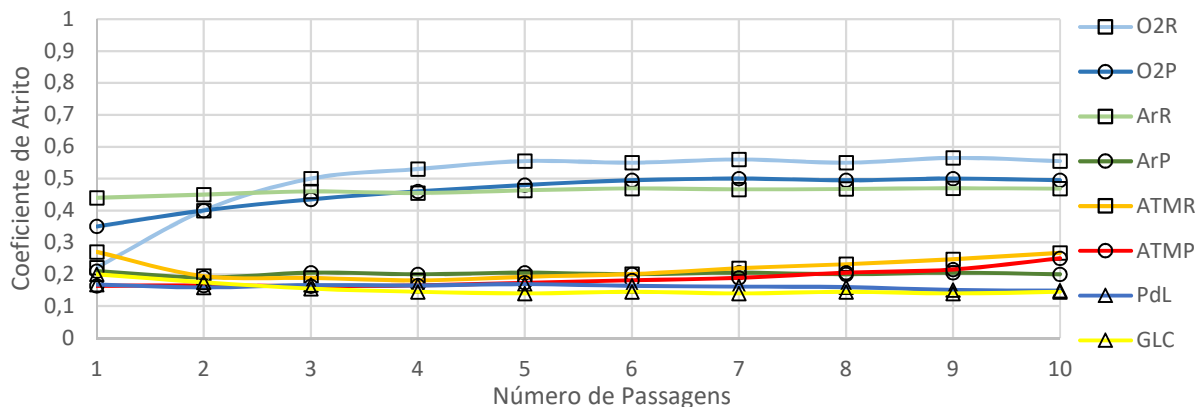


Figura 24 - Gráfico do coeficiente de atrito em função do número de passagens para ensaios de aço DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ )

Tabela 7 - Coeficiente de atrito médio em função da atmosfera envolvente e lubrificante para ensaios de aço DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $R_a=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $R_a=0.209 \mu\text{m}$ )

	Oxigénio	Árgon	Atmosfera	Pasta de Lítio	Glicerina
Face Rugosa	0.498	0.460	0.219	0.161	0.154
Face Polida	0.460	0.207	0.189	-	-

No gráfico da Figura 24, podemos observar duas regiões de resultados: a primeira, engloba os cinco ensaios de menor valor, é caracterizada pelo baixo valor de atrito (sempre inferior a 0.3) e uma tendência maioritariamente constante (sendo em alguns casos ligeiramente crescente); e uma segunda, onde se englobam as três curvas restantes, caracterizada por valores de atrito mais elevados. Neste último caso encontramos dois casos bastante distintos em termos de tendência. Enquanto que para o caso do *ArR* observamos uma tendência aproximadamente constante (especialmente após a quinta passagem), para o caso dos ensaios com oxigénio observa-se uma tendência crescente (aproximadamente da mesma ordem de grandeza que algumas das curvas na região inferior do gráfico).

Os valores mais baixos do coeficiente de atrito foram registados para o ensaio *GLC* ( $\bar{\mu}_{GLC} \approx 0.155$ ), seguidos dos do *PdL* ( $\bar{\mu}_{PdL} \approx 0.16$ ). Ao contrário das restantes curvas que se localizam nesta região do gráfico, as anteriores apresentam um comportamento ligeiramente decrescente. Seguidamente observam-se, por ordem crescente de atrito, as curvas *ATMP*, *ArP* e *ATMR*. As duas curvas da Atmosfera apresentam uma evolução inicialmente constante, entre a segunda e a quinta passagem, mas após esta última apresentam uma tendência crescente. De seguida, com aproximadamente o mesmo valor médio de atrito, observamos as curvas *O2P* e *ArR*. Esta última apresenta uma tendência ligeiramente crescente até à quinta passagem, convergindo de seguida. Já a evolução de *O2P* é bastante semelhante à de *O2R*, que regista o valor mais elevado de atrito. Ambas as curvas dos ensaios com oxigénio apresentam uma evolução crescente bastante acentuada até à terceira passagem (por exemplo *O2R* duplica de valor nesse intervalo).

Quanto à influência da rugosidade no coeficiente de atrito, podemos observar que se verifica a mesma tendência nas três misturas gasosas, mas que a intensidade da sua influência é desigual. Enquanto que se observam variações da ordem 8 e 13% para oxigénio e atmosfera (respectivamente), para os ensaios de árgon a sua influência bastante notória rondando os 55%.

Podemos então concluir que para o DP 980, a variação da rugosidade só tem um impacto significativo no coeficiente de atrito para o árgon. Quando comparados os resultados para a mesma mistura, verifica-se que os resultados para o coeficiente de atrito são proporcionais à rugosidade. Contudo, esta tendência não tem a mesma intensidade para as três misturas gasosas em estudo. Observou-se para todos os ensaios (excepto para os lubrificantes) a formação de ligeiros depósitos de material na superfície da ferramenta, cuja influência foi verificada nos resultados obtidos.

## 4.2. Influência da Percentagem de Oxigénio

Na presente secção é abordada a influência da percentagem de oxigénio no coeficiente de atrito, para os vários materiais em estudo. De seguida são apresentados os resultados obtidos para o coeficiente de atrito médio em função da percentagem de oxigénio presente durante os vários ensaios para cada um dos materiais em estudo.

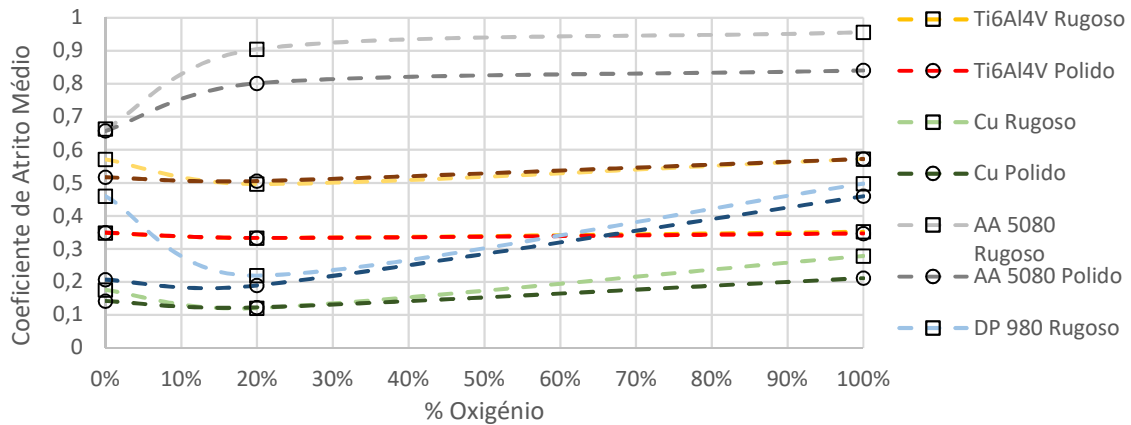


Figura 25 - Gráfico do coeficiente de atrito médio em função da percentagem de oxigénio para ensaios de atrito tipo pino na placa para os vários materiais em estudo em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu m$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu m$ )

O gráfico da Figura 25, mostra que todas as curvas, à excepção das do AA 5080, têm exactamente o mesmo perfil em forma de  $v$ , com o mínimo absoluto para os valores dos ensaios em atmosfera. No entanto, comparando as evoluções das várias curvas, notam-se diferentes declives, por exemplo, as curvas relativas aos ensaios em Ti6Al4V apresentam-se quase como rectas de valor constante, enquanto que a evolução da curva do ensaio de aço DP 980 em superfície rugosa apresenta os maiores declives tanto para valores inferiores como superiores ao ponto relativo ao ensaio em atmosfera. Para o caso das curvas dos ensaios em AA 5080, observa-se que estas têm uma evolução estritamente crescente, de perfil logarítmico, com um mínimo para 0% e um máximo para 100% de oxigénio.

Podemos observar que o material que é menos influenciado pela variação da percentagem de oxigénio é o Ti6Al4V. Seguem-se o DC 04, o cobre e AA 5080. Por fim, a maior diferença é registada para o DP 980, com uma diferença de 0.3 entre o valor de atmosfera e o de oxigénio. Nota-se igualmente que, para este material e para o ensaio em superfície polida, o resultado para o ensaio com argón tem um valor muito semelhante ao de oxigénio.

Porventura, o resultado obtido que menos se encontra em linha com as expectativas foi o conjunto dos resultados obtidos para os ensaios em atmosfera (excepto os de AA 5080). Os valores esperados seriam intermédios aos obtidos em ensaios com argón e com oxigénio, sendo estes últimos os mais elevados, tal como os observados no ensaio de AA 5080. Todavia, a realidade observada foi outra: os valores de atmosfera foram (em média) os mais baixos das três misturas. Após reflexão, foi determinado que um dos pressupostos para o ensaio com atmosfera tinha sido mal interpretado. Ao assumir-se que a mistura tinha uma proporção na casa dos 80% de azoto e 20% de oxigénio, o impacto das contribuições dos restantes elementos presentes na mistura, nomeadamente o vapor de água e de partículas em suspensão, foi negligenciado. A presença de, em especial, vapor de água na interface

de contacto aumenta as capacidades lubrificantes do meio, baixando assim o atrito gerado entre o provete e a ferramenta. No entanto, os valores obtidos são uma amostra que espelha fielmente a realidade observada no dia a dia, quer em laboratório quer na indústria, pois é esta a mistura gasosa que nos envolve e em que se processam a esmagadora maioria das acções relacionadas com o atrito/fricção/desgaste. Quanto aos resultados observados nos ensaios com AA 5080, que não estão em linha com as restantes observações, tal como referido na Secção 4.1.3, a forte influência do material depositado na interface e as partículas desagregadas fizeram aumentar os fenómenos relacionados com a adesão e partículas presas.

Os resultados observados mostram que os valores médios do coeficiente de atrito são mais elevados para o oxigénio (gás activo) do que para o argon (gás inerte). Estes são consequência da acção do oxigénio, na interface de contacto, aumentando os fenómenos relacionados com a adesão.

### 4.3. Influência da Pressão de Contacto

Na presente secção é abordada a influência da pressão aparente de contacto no coeficiente de atrito médio, para os vários materiais em estudo.

Para a determinação da pressão aparente de contacto foi necessário identificar a área aparente de contacto, cujo comprimento é definido pelo comprimento de contacto entre o provete e a ferramenta, e cuja largura é definida pela espessura dos provetes (ver Figura 10).

$$A_A = e_p \times l_c = b \times l_c \quad (8)$$

$$P_{CA} = F_V/A_A \quad (9)$$

Estes dados encontram-se apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Área Aparente de Contacto

	<i>Ti6Al4V</i>	<i>Cobre</i>	<i>AA 5080</i>	<i>DC04</i>	<i>DP980</i>
<i>b [mm]</i>	2,00	1,00	1,60	0,70	1,00
<i>l<sub>c</sub> [mm]</i>	3,85	3,85	3,85	3,85	3,85
<i>A<sub>A</sub> [mm<sup>2</sup>]</i>	7,70	3,85	6,16	2,70	3,85

Tanto os dados relativos à pressão aparente de contacto como os referentes ao coeficiente de atrito, apresentados nas subsecções seguintes, são referentes aos valores médios de cada variável para cada uma das passagens consideradas nas secções anteriores.

Para a análise da Pressão de Contacto Aparente são utilizados todos os pontos experimentais considerados nas análises anteriores, com a excepção dos relativos aos lubrificantes. De modo a melhor analisar os resultados, é efectuada uma regressão linear à nuvem de pontos obtida para cada material. É com base no valor do declive de cada uma dessas regressões que se irá efectuar a comparação. Note-se que tal valor não tem um óbvio significado físico, sendo apenas um parâmetro que permite comparar as várias nuvens de pontos.



### 4.3.1. Liga de Titânio Ti6Al4V

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Ti6Al4V.

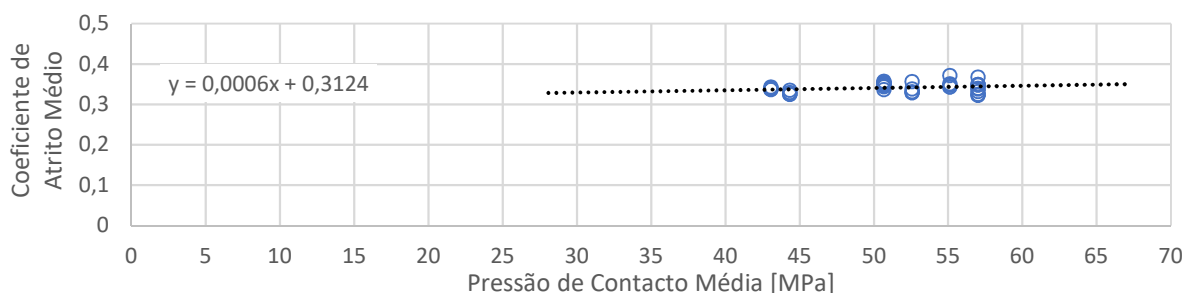


Figura 26 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com Ti6Al4V em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

O gráfico da Figura 26 mostra que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores médios do coeficiente de atrito e os da pressão de contacto, ou seja, o aumento da pressão de contacto leva a um consequente aumento do coeficiente de atrito. Para esta relação foi verificado um declive da linha de tendência de 0.0006.

### 4.3.2. Cobre

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Cobre.

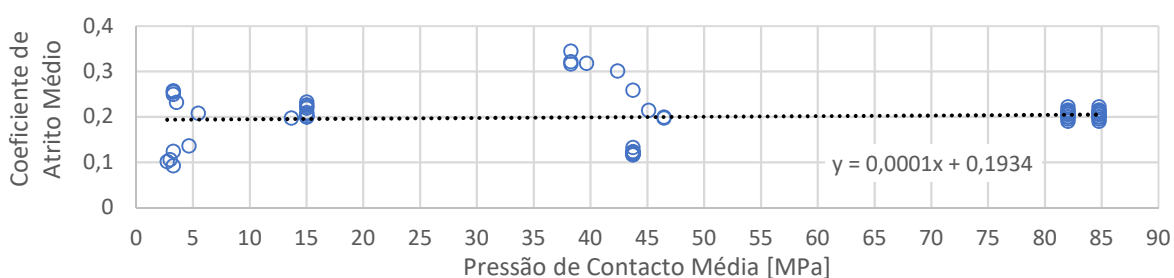


Figura 27 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com Cobre em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

O gráfico da Figura 27 mostra que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores médios do coeficiente de atrito e os da pressão de contacto, ou seja, o aumento da pressão de contacto leva a um consequente aumento do coeficiente de atrito. Para esta relação foi verificado um declive da linha de tendência de 0.0001.

### 4.3.3. Alumínio AA 5080

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de AA 5080.

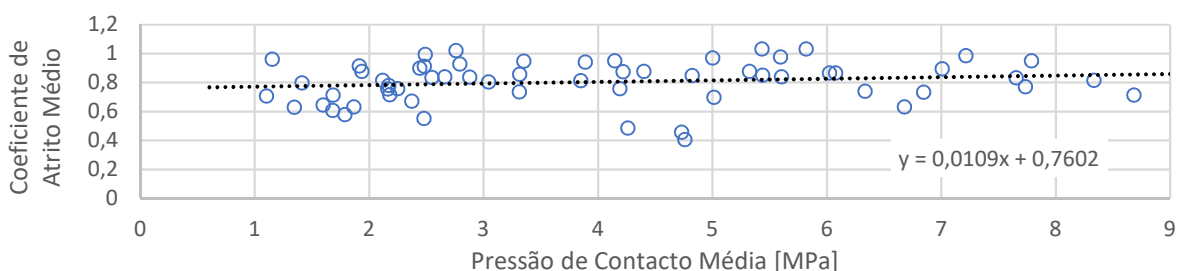


Figura 28 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com AA5080 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

O gráfico da Figura 28 mostra que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores médios do coeficiente de atrito e os da pressão de contacto, ou seja, o aumento da pressão de contacto leva a um consequente aumento do coeficiente de atrito. Para esta relação foi verificado um declive da linha de tendência de 0.0109.

#### 4.3.4. Aço DC04

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Aço DC04.

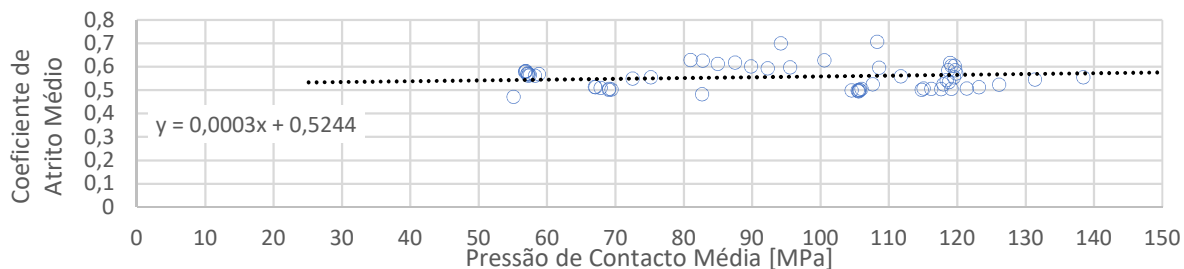


Figura 29 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com DC04 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

O gráfico da Figura 29 mostra que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores médios do coeficiente de atrito e os da pressão de contacto, ou seja, o aumento da pressão de contacto leva a um consequente aumento do coeficiente de atrito. Para esta relação foi verificado um declive da linha de tendência de 0.0003.

#### 4.3.5. Aço DP 980

De seguida são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com provetes de Aço DP 980.

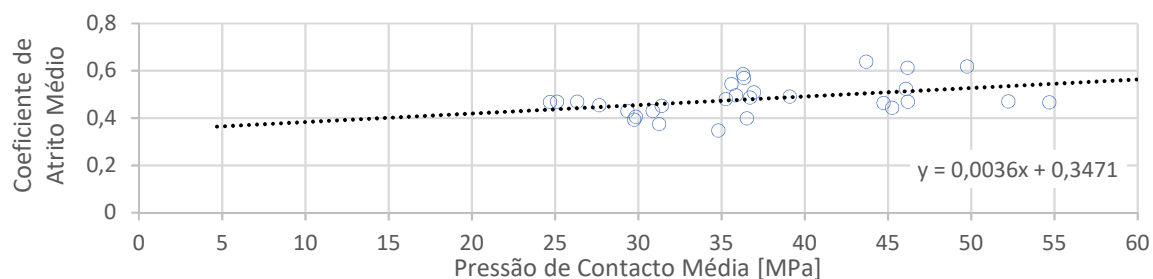


Figura 30 - Gráfico do coeficiente de atrito em função da pressão de contacto aparente para ensaios com DP980 em ferramenta de WC de Faces Rugosa ( $Ra=0.426 \mu\text{m}$ ) e Polida ( $Ra=0.209 \mu\text{m}$ )

O gráfico da Figura 30 mostra que existe uma relação de proporcionalidade entre os valores médios do coeficiente de atrito e os da pressão de contacto, ou seja, o aumento da pressão de contacto leva a um consequente aumento do coeficiente de atrito. Para esta relação foi verificado um declive da linha de tendência de 00036.

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## 5. Conclusões e Trabalho Futuro

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões e contribuições da investigação e as sugestões para trabalhos futuros. As perspectivas de trabalhos futuros devem ser consideradas por outros alunos que pretendam visitar o tema da presente investigação.

### 5.1. Conclusões

Na presente secção serão apresentadas as conclusões gerais da presente investigação.

Quanto ao efeito da rugosidade, observou-se a mesma tendência para todos os materiais em estudo: o coeficiente de atrito é proporcional à rugosidade. No entanto, foi constatado que variando apenas a rugosidade da superfície da ferramenta, as variações para os valores do coeficiente de atrito não são iguais, ou seja, verificou-se que para se obter o *padrão* de curvas para uma dada rugosidade não se trata apenas de efectuar uma simples translação de um outro *padrão* obtido para uma outra rugosidade, nem aplicar um factor multiplicativo constante a cada uma das curvas obtidas. Estes dados estão em consonância com a existência de vários factores influenciadores do atrito, tomando cada um preponderância diferente em cada circunstância. Foi igualmente identificado que em alguns casos as diferenças entre os valores do coeficiente de atrito para superfícies rugosas e polidas são bastante reduzidas. Verificou-se também que em alguns dos ensaios com a face polida da ferramenta foi utilizada uma pressão de contacto aparente mais elevada do que a utilizada nos ensaios em superfície rugosa. Este aumento de pressão implicou igualmente o aumento do peso dos fenómenos relacionados com a adesão, aumentando desta forma o atrito.

Para os ensaios de Ti6Al4V e Cobre foi notado um ligeiríssimo depósito de material na superfície da ferramenta, o qual não teve qualquer impacto significativo nos resultados. Para os ensaios de DC 04 e DP 980 foi observável a formação de um pequeno depósito de material do provete na superfície da ferramenta ao longo das passagens, tendo tido um impacto muito ligeiro no global dos resultados. O extremo oposto foi verificado no ensaio de AA 5080, onde a formação de um grande depósito de material do provete na superfície da ferramenta, bem como a desagregação de material que acabaria por ir parar à interface de contacto, foi observada ao longo das passagens e a sua influência foi constatada no gráfico da Figura 22.

Para os materiais em estudo, em média e excluindo os lubrificantes, o coeficiente de atrito mais elevado foi registado para o AA 5080, com valores entre os 0.6 e 1.1. Segue-se o DC 04 com valores entre os 0.5 e os 0.6. Os valores observados para o DP 980 são os que registam a segunda maior amplitude de resultados, com o coeficiente de atrito a variar entre os 0.2 e os 0.5. O Ti6Al4V registou a menor amplitude de resultados, com os valores observados em torno de 0.35. O material com menor coeficiente de atrito registado foi o cobre, onde se observaram valores entre os 0.1 e os 0.3.

Verificou-se que a utilização dos lubrificantes produziu a esperada diminuição do coeficiente de atrito. A maior diferença para os restantes valores foi registada para o ensaio com AA 5080, onde em média os valores registados para a pasta de lítio são 80% inferiores aos restantes. Para os aços DC 04 e DP

980 foram registadas diferenças moderadas, enquanto que o impacto dos lubrificantes no cobre e Ti6Al4V foi menor.

Quando se compara os resultados obtidos para as três misturas gasosas, observa-se que apenas os resultados para o AA 5080 não seguem o mesmo padrão. Em geral os perfis das curvas observados têm uma forma em  $v$ , onde os valores mínimos são registados para os ensaios em atmosfera ambiente e os valores de oxigénio são superiores aos de árgon. No caso dos ensaios de AA5080, o perfil que se regista tem uma morfologia logarítmica, onde os valores mínimos são registados para os ensaios de árgon, os intermédios para os de atmosfera e os superiores para os de oxigénio. Todavia, estes resultados são consequência da elevada deposição de material na superfície da ferramenta, bem como da acção de partículas que se desagregaram durante o ensaio, que aumentaram as parcelas da adesão e das partículas presas. Além disso deve-se notar que à medida que se depositava mais material, os ensaios já não se realizavam com um par Alumínio-Carboneto, mas sim em algo intermédio. Tal como referido anteriormente, devido à influência do vapor de água e partículas em suspensão, os resultados referentes aos ensaios em atmosfera são menores do que o espectável. Os valores para os ensaios com oxigénio são mais elevados do que os com árgon, pois o oxigénio é um gás activo (em contraste o árgon é inerte) e altera a natureza das relações físico-químicas entre as superfícies em contacto, promovendo um aumento da parcela do coeficiente de atrito associada à adesão.

Quanto à influência da pressão de contacto aparente (Tabela 9) esta é avaliada pelo valor do declive da regressão linear presente nos gráficos ( $D_{PCA}$ ). Foi observado que o material mais suscetível a esta é o AA 5080. Aproximadamente duas ordens de grandeza abaixo do AA5080 encontra-se o DP 980. Por sua vez, uma ordem de grandeza a baixo do inferior encontram-se (por ordem decrescente de susceptibilidade) os materiais Ti6AL4V, DC04 e Cobre.

Tabela 9 - Influência da pressão de contacto aparente nos materiais em estudo

	<i>Ti6Al4V</i>	<i>Cobre</i>	<i>AA 5080</i>	<i>DC 04</i>	<i>DP 980</i>
$D_{PCA}$	0.0006	0.0001	0.0109	0.0003	0.0036

Em conclusão, podemos afirmar que o coeficiente de atrito é função de vários parâmetros, como os estudados no presente trabalho, e que a sua correcta modelação necessita de ter em conta todos eles.

Foi propositadamente utilizado um modelo mais simples (Coulomb) de modo a ser mais perceptível a influência de cada parâmetro. Caso fosse utilizado um modelo mais complexo, este poderia mascarar a real influência do parâmetro em estudo. Assim, com um modelo mais simples e efectuando alterações em apenas uma variável, de ensaio para ensaio, podemos observar a magnitude (mais próxima da realidade) da influência de cada variável em estudo no coeficiente de atrito.

Quanto ao principal estudo do presente trabalho, podemos concluir que a acção do oxigénio na interface de contacto vem potenciar o aumento da espessura da camada superficial de óxido, facto este que aumenta a probabilidade de desagregação de troços desta camada, que ocorrem de forma irregular

e podem expor material virgem. São nestas regiões de metal virgem que podem vir a ocorrer pontos de soldadura instantâneos, que é um factor contributivo para a parcela da adesão. Por outro lado, a desagregação da camada de óxido aumenta a micro rugosidade superficial, que fazem aumentar o peso da parcela das interações mecânicas. Pode igualmente ser contabilizado o impacto das partículas destas desagregadas, especialmente se o material que se desagrega for de grandes dimensões, no entanto este factor é o de menor impacto. Todos estes factores contribuem para o aumento do coeficiente de atrito para os ensaios com um meio circundante de 100% de oxigénio.

## 5.2. Sugestões e Trabalho Futuro

Nesta Secção abordam-se os aspectos do presente trabalho que podem ser melhorados e complementados em trabalhos futuros. Estes encontram-se condensados em duas áreas: Aparato Experimental e Plano de Ensaios.

Quanto ao Aparato Experimental, sugerem-se alterações ao nível dos dispositivos de fixação da ferramenta, do formato dos provetes, do subsistema de calibração horizontal e do sistema de aplicação de gases. No dispositivo de fixação da ferramenta são necessárias alterações para garantir com 100% de certeza que não existe rotação da ferramenta durante o ensaio. Igualmente sugerem-se alterações que permitam que, ao recolocar a ferramenta no dispositivo, esta fique sempre na mesma posição. Estas alterações irão possibilitar a diminuição do tempo de reposição da ferramenta e diminuir a possibilidade de um ensaio falhado. A forma dos provetes deverá ser repensada de modo a tirar partido do dispositivo de fixação de provetes. Sugere-se que estes sejam em forma de cogumelo (cabeça quadrangular com quatro furos onde passariam os parafusos do DFF e pescoço rectangular), de modo a minimizar perdas de tempo relacionadas com eventuais quedas e reposicionamentos do provete. O subsistema de calibração horizontal deve ser melhorado de modo a minimizar folgas e movimentos laterais, mas também de modo a aumentar a capacidade de calibração do eixo horizontal para cargas de menor valor. Sugere-se a criação de um sistema de aplicação de gases que seja fixo à presente montagem, de modo a libertar o utilizador desta tarefa para se focar noutras situações que possam ocorrer durante o ensaio. Além disso, a implementação desta funcionalidade proporcionaria a possibilidade de efectuar ensaios com diferentes percentagens de oxigénio, devidamente controladas pelo utilizador (sem contaminantes, ao contrário do que foi observado nos ensaios em atmosfera ambiente).

Quanto ao Plano de Ensaios, sugerem-se alterações ao nível das rugosidades, misturas gasosas, lubrificantes e pressões de contacto. O novo Plano de Ensaios deve contemplar ensaios efectuados com ferramentas de diferentes rugosidades (pelo menos quatro), ensaios com misturas gasosas com diferentes percentagens de oxigénio (pelo menos de 10 em 10% de Oxigénio), ensaios com diferentes lubrificantes (por exemplo: líquidos, pastas, sólidos e aerossóis), e ensaios a diferentes pressões de contacto.

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## 6. Referências

- Ali M.K, "A sensor for measuring surface shear stresses in metal forming", MSc Thesis, Queen's University, Canada, 2001.
- Andrade E. N. D. C, Randall R. F. Y., Makin M. J., "The Rehbinder Effect", Proceedings of the Physical Society, Section B, pp 990, 1950.
- Anthony J.W., Bideaux R.A, Bladh K.W., Nichols M.C., "Handbook of Mineralogy", Mineralogical Society of America, Chantilly, Virginia, USA, 1997.
- Armarego E.J., Brown R.H., "The Machining of Metals", Prentice Hall, New Jersey, USA, 1969.
- Astakhov, V.P.; "On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation", International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 47, Issue 11, pp 1649-1672, 2005.
- Astakhov V.P, "Tribology of Metal Cutting", Elsevier, London, UK, 2006.
- Barlow P.L., "Influence of Free Surface Environment on the Shear Zone in Metal Cutting", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol 181, Issue 1, pp. 687 – 705, 1966.
- Bay N., Wanheim T., "Real area of contact and friction stress at high pressure sliding contact", Wear, Vol. 38, Issue 2, pp 201-209, 1976.
- Bay N., "Friction and adhesion in metal forming and cold welding", DSc Thesis, Institute of Manufacturing Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1985.
- Bhushan B., "Introduction to Tribology", John Wiley & Sons, Ltd, New York, USA, 2013.
- Boston O.W., "What Happens when Metal is Cut", ASME Transactions, Vol. 52, No.2, pp 119, 1930.
- Bowden F.P., Rowe G.W., "The adhesion of clean metals" Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Vol. 233. No. 1195, 1956.
- Bowden F.P., Tabor D., "Mechanism of Friction and Lubrication in Metalworking", Journal Institute of Petroleum, Vol. 40, pp 243-253, 1954.
- Bowden F.P., Tabor D., "Friction and Lubrication of Solids", Oxford University Press, London, UK, 1964.
- Brown E.D., Owens R.S., Booser E.R., "Friction of Dry Surfaces", Boundary Lubrication- An Appraisal of World Literature, Chapter 2, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 1969.
- Burakowski T., Wierzchon T, "Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment", Technologies, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1999.
- Carilho J.A.C., "Avaliação experimental da força de atrito durante o processo de corte por arranque de aparas", MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2007.
- Childs T. H. C., "Friction modelling in metal cutting", Wear, Vol. 260.3, pp. 310-318, 2006.



- Cristino V.A.M., "*Experimental Assessment of Analytical Solutions for Orthogonal Metal Cutting*", MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2007.
- Cristino V.A.M., "*Revisiting the calibration of friction on metal cutting*", PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2011.
- Cristino V.A.M., Rosa P.A.R.C., Martins P.A.F., "*Tribology in metal cutting*", Tribology for Scientists and Engineers: From Basics to Advanced Concepts, Chapter 21, 677-728, Springer, 2013.
- Denford Machine Tools Limited, "*TRIAC PNC3 Programming and Maintenance Manual*", Datareward Ltd, Huddersfield, UK, 1986
- Dieter G., "*Mechanical Metallurgy*", McGraw-Hill, New York, USA, 1976.
- Fernandes J.A.S., "*A importância do oxigénio no comportamento tribológico do Corte por Arranque de Apara*", MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 2017.
- Finnie I., Shaw M.C., "*The friction process in metal cutting*", American Society of Mechanical Engineers Transactions, Vol.77, 1956.
- Grzesik W., Zalisk Z., Nieslony P., "*Friction and wear testing of multilayer coatings on carbide substrates for dry machining applications*", Surface and Coatings Technology, Vol. 155, pp 37-45, 2002.
- Zhang S., Guo Y.B., "*An experimental and analytical analysis on chip morphology, phase transformation, oxidation, and their relationships in finish hard milling*", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 49, Issue 11, pp 805-813, 2009.
- Hedenquist P., Olsson M., "*Sliding wear testing of coated cutting tool materials*", Tribology International, Vol. 23, Issue 3, pp 143-150, 1991.
- Herbert E.G., "*Work-hardening Properties of Metals*", American Society of Mechanical Engineers Transactions, Vol.48, pp 705, 1926.
- Jamari J., Schipper D.J., "*Criterion of surface contact deformation of metals*", TriboTest Journal, Vol. 13, Issue 1, pp 1-11, Wiley InterScience, Netherlands, 2006.
- Jost H.P., "*Lubrication (Tribology) - A report on the present position and industry's needs*", Department of Education and Science, H. M. Stationery Office, London, UK, 1966.
- Jost H.P.; "*Tribology: How a word was coined 40 years ago*", Tribology and Lubrication Technology, Vol. 62, Issue 3, pp 24-29, 2006.
- Loveday M.S., Brooks M.R., "*High Temperature Friction: A simplified Approach for Estimating Uncertainty of Measurement*", NPL Report, CMMT, pp 305, 2000.
- Lozano D.E. et al., "*Wear mechanisms experienced by an automotive grade Al-Si-Cu alloy under sliding conditions*", Revista Ingeniería Mecánica Tecnología y Desarrollo, Vol. 5, pp 339-345, 2015.

Martins P.A.F.; Rodrigues J. M. C., “*Tecnologia Mecânica – Tecnologia da Deformação Plástica*”, Vol. I, Cap. 11, Escolar Editora, Lisboa, Portugal, 2005.

Mills T.N., Cameron A., “*Basic studies on boundary, E.P. and piston ring lubrication using a special apparatus*”, ASLE Transactions, Vol. 25, Issue 1, pp. 117-124, 1982.

Myers D., “*Surfaces, Interfaces, and Colloids, Principles and Applications*”, Willey, New York, USA, 1999.

Olsson M., Soderberg S., Jacobson S., Hogmark S., “*Simulation of cutting pin-on-disc test*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 29, pp 377–390, 1989.

Özel T., “*The influence of friction models on finite element simulations of machining*”, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, Issue 5, pp 518-530, 2006.

Petersen S.B., Martins P.A.F, Bay N., “*Friction in bulk metal forming: a general friction model vs the law of constant friction*”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 66, Issues 1-3, pp 186-194, 1997.

Rabinowicz E., “*The Nature of the Static and Kinetic Coefficients of Friction*”, Journal of Applied Physics, Vol. 22, Issue 11, pp 1373-1379, 1951.

Rowe G.W., Smart E.F., “*The importance of oxygen in dry machining of metal on a lathe*” British Journal of Applied Physics, Vol. 14, No. 12, pp 924-926, 1963.

Rowe G.W., Smart E.F., “*Vapour Lubrication in Friction and Low-Speed Metal Cutting*” Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, Vol. 181, Issue 15, pp 48-57, 1966.

Schey J.A., “*Tribology in metalworking: Friction, Lubrication and Wear*”, ASM International, 1983.

Stachowiak G.W., Batchelor A.W., Stachowiak G.B., “*Experimental Methods in Tribology*”, Tribology Series, Vol. 42, Elsevier Science, 2004.

Thomas T.R., “*Rough Surfaces*”, Imperial College Press, London, UK, 1999.

Wakabayashi T., Williams J.A., Hutchings I.M., “*The action of gaseous lubricants in the orthogonal machining of an aluminium alloy by titanium nitride coated tools*”, Surface and Coatings Technology, Vol. 57, pp 183-189, 1993.

Wakabayashi T., Williams J.A., Hutchings I.M., “*The kinetics of gas-phase lubrication in the orthogonal machining of an aluminium alloy*”, Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers - Part J - Journal of Engineering Tribology, Vol. 209, pp 131-136, 1995.

Williams J.A, Stobbs W.M., “*Changes in mode of chip formation as function of presence of oxygen*”, Metals Technology, Vol. 6, No. 1, pp 424-432, 1978.

Zemzemi F., Rech J., Ben Salem W., Dogui A., Kapsa P., “*Identification of a friction model at tool/chip/workpiece interfaces in dry machining of AISI4142 treated steels*”, Journal of Materials Processing Technology, 2008.

Esta página foi propositadamente deixada em branco

## Anexos

A.1 - Aparato Experimental - Manual do Utilizador

A.2 - Características Técnicas da Cadeia Cinemática

A.3 - Graus de Liberdade Sistema de Calibração

A.4 - Código G

A.5 - Desenhos Técnicos

A.5.1 - Base Célula de Carga

A.5.2 - Dispositivo de Fixação da Ferramenta

A.5.2 - Apoio Direito

A.5.3 - Apoio Esquerdo

A.5.4 - Componente de Calibração do Eixo Vertical (*CEV*)

A.5.5 - Estrutura Móvel

A.6 - Notas sobre o Desenvolvimento Experimental

A.7 - Rugosímetros Mahr - Guia Rápido do Utilizador

Esta página foi propositadamente deixada em branco



**TÉCNICO**  
LISBOA



Machining and Micro  
Manufacturing

# Aparato Experimental de Atrito

## Manual do Utilizador

Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico  
(LM3)

Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LM3)

Pavilhão de Física Piso 01 Porta 01-7.2 Ext. 3615, 1559 e 1315

Instituto Superior Técnico

Manual escrito por Paulo SF Farinha durante o desenvolvimento da sua Dissertação de Tese de Mestrado “*Influência do Meio Envolvente no Coeficiente de Atrito*”.

Versão 1.0 Lisboa, Novembro de 2018

**A. Preparação: Instalação da Célula de Carga e Funcionamento da Cadeia Cinemática**

1. Leia devidamente o seguinte Procedimento Experimental. Identifique os materiais necessários e as acções a realizar. Defina, de antemão, a sequência dos ensaios de calibração a realizar;

***Em caso de dúvida não hesite em questionar o Professor ou o Técnico de Laboratório***

2. Remova todo o material não essencial a este procedimento de cima da mesa e da sua envolvente. Coloque o material necessário à realização desta experiência em cima da Bancada 5;
3. Instale a Célula de Carga na mesa de trabalho, tal como se mostra na Figura 1 (a), e proceda à ligação dos cabos de dados: Normal na Porta 0 e Tangencial na Porta 1 (Figura 1 (b));
4. Verifique se a Célula de Carga se encontra devidamente fixada à mesa, com quatro parafusos MX;

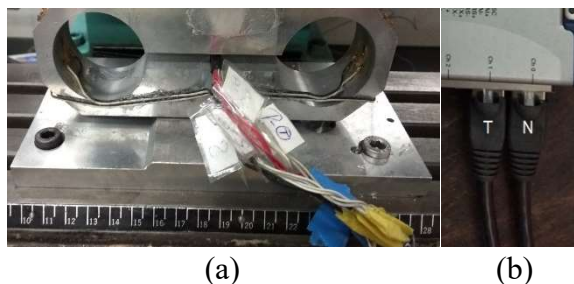


Figura 1 - Instalação Célula de Carga: (a) Posicionamento da Célula de Carga na Mesa; (b) Ligação dos cabos de dados à placa NI 9237

5. Ligue a Cadeia Cinemática do Aparato Experimental (Figura 2):
  - a. Carregue no Botão **ON/OFF**, na parte posterior da Cadeia Cinemática (ilumina-se se ligado);
  - b. Verifique se no Painel de Comando, no Menu **POWER**, a luz **ON** está iluminada;
  - c. Ao lado, no Menu **DRIVE**, desligue o Botão de Emergência (rodar sentido horário);
  - d. Ainda em **DRIVE**, carregue em **ON** para ligar os motores dos eixos (a luz **ON**, deverá iluminar-se);
  - e. No Menu **FUNCTION**, carregue em **ABS DATUM** (canto inferior direito) para efectuar o zero;
  - f. Após efectuado o zero, por segurança, pressione o Botão de Emergência.

Se em algum momento a máquina emitir um som agudo, verifique se no ecrã existe alguma mensagem de erro. Em caso afirmativo, deve identifica-lo e proceder à sua correcção. Resolvido este, sob **FUNCTION**, carregue em **RESET** (canto superior direito), seguido de **ABS DATUM**. Após efectuar o zero, pode retomar o seu trabalho.



Figura 2 - Preparação da Cadeia Cinemática: Face Posterior do Aparato (Figura Inferior Esquerda); Pormenores do Painel Controlo da Cadeia Cinemática (Figuras Direita e Superior Esquerda)



## B. Preparação e Instalação do Mecanismo para Calibração da Célula de Carga

1. Efectue os passos indicados na Secção A. Não inicie os passos seguintes sem verificar se os anteriores foram correctamente efectuados.
2. Leia devidamente o seguinte Procedimento Experimental. Identifique os materiais necessários e as acções a realizar. Defina, de antemão, a sequência dos ensaios de calibração a realizar;

**Em caso de dúvida não hesite em questionar o Professor ou o Técnico de Laboratório**

3. Proceda à instalação do Subsistema Tangencial (Figura 3), tal como se ilustra na Figura 3. Execute este procedimento com a Célula de Carga longe da zona de instalação de modo a evitar que esta possa vir a ser danificada durante o processo;

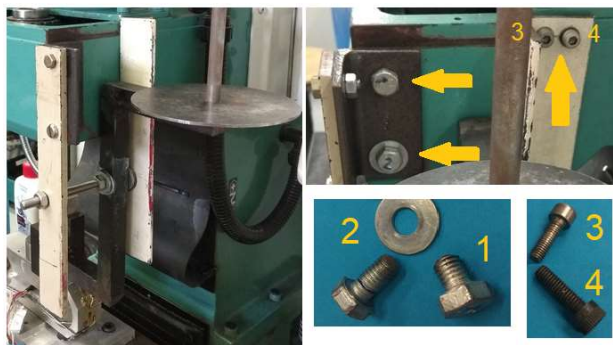


Figura 3 - Instalação Subsistema Tangencial

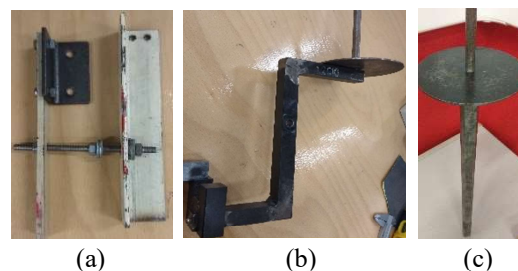


Figura 5 - Sistema de Calibração: Subsistema Tangencial (a) Estrutura Fixa; e (b) Estrutura Móvel; e (c) Dispositivo de Calibração Normal ou *Espada*

4. Confirme que a Célula de Carga se encontra posicionada como indicado **A.3**, repita os passos **A.5c** e **A.5d**. **Com especial atenção e precaução para evitar colisões** entre os vários elementos presentes, comande a cadeia cinemática para as posições X 244 e Y 119. Repita **A.5f**;
5. Confirme que a Célula de Carga se encontra sem qualquer carga aplicada;
6. No Computador, execute programa *TRIAC FRICTION V2.vi*. Aguarde a abertura do *Labview*;

**Nota: As figuras relativas aos passos 5 (a) a 5 (f) encontram-se no Anexo IV.**

7. No canto superior esquerdo, carregue em *Run Continuously* e verifique a evolução dos sinais das duas componentes. Verifique a sensibilidade da Célula de Carga, aplicando, manualmente, força em ambas as direcções. Para parar, carregue em **STOP**. Caso qualquer um destes sinais apresente valores absolutos superiores a 0,0000001, deverá seguir o seguinte procedimento:
  - a. Na Barra de Opções, selecione *Window* e depois *Show Block Diagram (CTRL+E)*;
  - b. Na janela *Block Diagram*, duplo *click* no *icon* do Bloco *DAQ Assistant*;
  - c. Na janela *DAQ Assistant*, selecione o sinal (Normal ou Tangencial), consoante a necessidade, e altere o valor do campo *Initial Voltage*. Carregue *OK* e aguarde que o programa faça *rebuild*;
  - d. Regresse á janela *Front Panel*. Volte a carregar em *Run Continuously*. Verifique a evolução dos sinais das componentes e a sensibilidade da Célula de Carga fazendo força em ambas as direcções. Após verificar a evolução, carregue em **STOP** e mude para a janela *Block Diagram*;
  - e. Repita os passos (b) a (d) até obter um sinal satisfatório. Anote os valores finais de *Initial Voltage*;

- f. Na janela *Front Panel*, verifique que o botão **ON/OFF** se encontra na posição **ON** (verde);
  - g. Em *Gravado em*, indique a localização e o nome do ficheiro (ex: C:\NovaPasta\NovoFicheiro.txt);
8. Acabada a configuração do programa de aquisição de dados, deve instalar o *Batente* na Célula de Carga e proceder aos ajustes necessários, para que a esfera na ponta do Subsistema Tangencial se encontre em contacto, mas sem estar em esforço, com o *Batente*. Garanta igualmente que esta se encontra alinhada com o centro do *Batente* (Figura 5.1). Quando acabar, volte a pressionar o Botão de Emergência;



Figura 5.1 - Alinhamento *Batente*/Esfera

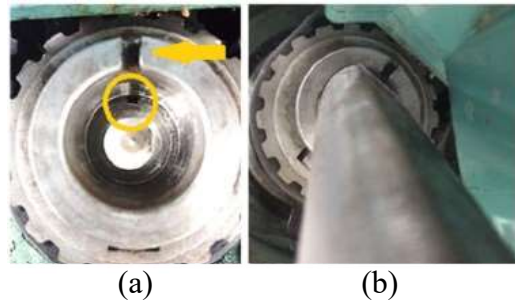


Figura 5.2 – Instalação da *Espada*: (a) Pormenor Spindle; (b) Correcto posicionamento da *Espada*

9. Instale a *Espada*. Note que a parte facejada da mesma deve ser colocada do lado da ranhura visível no topo do *spindle* (Figura 5.2). Ao fazer descer a *Espada* pelo *spindle*, tenha atenção para evitar que esta colida com a célula de carga. O contacto entre a *Espada* e o *Batente* deve de ser efectuado com a maior suavidade possível. A esfera do *Batente* e a *Espada* não devem contactar na depressão esférica da base da *Espada*;
10. Acabadas as instalações de todos os componentes necessários, deve verificar os seus graus de liberdade, de modo a garantir que ambos os sistemas se encontram em condições de funcionamento;
11. No Labview, carregue em *Run Continuously* e volte a verificar a sensibilidade da Célula de Carga, desta vez usando, manualmente, os Subsistemas Normal e Tangencial. Se o contacto entre o *Batente* e a *Espada* for demasiado próximo da depressão esférica na base da *Espada*, deve de colocar a *Chapinha* (Figura 6) entre o *Batente* e a *Espada*. Carregue em STOP;
12. Acabados estes passos, encontra-se em condições de efectuar os Ensaios de Calibração (ver Secção B).

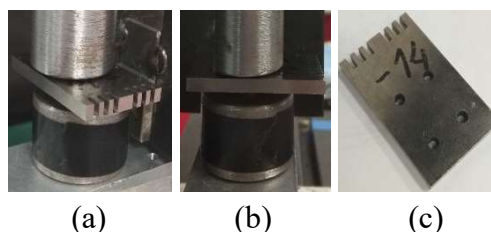


Figura 6 – Interface *Batente*/*Espada* com *Chapinha*: (a) Vista Frontal; (b) Vista Lateral; (c) *Chapinha*



## C. Calibração da Célula de Carga

**Nota:** Para efectuar este procedimento deve ligar o computador antecipadamente. Recomenda-se que o deixe ligado de um dia para o outro de modo a que este procedimento seja realizado na manhã seguinte.

- Efectue os passos indicados nas Secções A e B. Não inicie os passos seguintes sem verificar se os anteriores foram correctamente efectuados, pois pode estar a recolher dados incorrectos;
- Quando efectuar uma medição, lembre-se de que deve de recolher informação relativa tanto ao *zero* como ao *step*, ou seja, antes de colocar a primeira massa, numa medição, deve deixar o programa recolher um a dois segundos de dados. Deve aguardar aproximadamente o mesmo intervalo de tempo para colocar a massa seguinte. E assim sucessivamente;
- Recomenda-se que inicie o processo de calibração efectuando a Calibração do Eixo Normal ou Vertical;

### C-1. Calibração Eixo Normal (ou Vertical)

Calibração usando Massas Calibradas de 50, 100 e 200 gramas

1. Coloque as Massas Calibradas de menor valor (Figura A.III.1 a), de maneira ordenada na Bancada 5;
2. Caso instalados, remova a *Espada* e o *Batente*;
3. Caso a Célula de Carga se encontre debaixo da cabeça do Eixo Z, deve executar:
  - a. Desligue o Botão de Emergência e pressione **ON** (imediatamente à esquerda do último);
  - b. Movimente a mesa de modo a que esta fique na coordenada máxima em X;
  - c. **Por segurança**, pressione o Botão de Emergência;
4. Limpe a face superior da Célula de Carga, removendo sujidades e impurezas;
5. Execute com o Labview o programa TRIAC FRICTON V2.vi;
6. Verifique se o botão **ON/OFF** está na posição **ON**. Em caso afirmativo, carregue em *Run Continuously*;
7. Manualmente, teste a sensibilidade da Célula de Carga exercendo força em cada uma das direcções;
8. De seguida encontra-se apresentado o ciclo de calibração:
  - a. Defina a localização e o nome do ficheiro que irá conter os dados das calibrações;
  - b. Carregue no Botão de Aquisição: Início da gravação de dados no ficheiro;
  - c. Aguarde 1 a 2 segundos. Coloque a/as massas calibradas pretendidas;
  - d. Aguarde 1 a 2 segundos. Remova a/as massas calibradas;
  - e. Carregue no Botão de Aquisição: Fim da gravação de dados no ficheiro;
9. Repita o passo **8** para as calibrações de 50, 100, 200, 400 e 500 gramas (Figura 7), ou qualquer outro valor possível com a combinação das massas calibradas que tiver disponíveis. Nos ensaios em que é necessária a colocação de mais do que uma massa calibrada, deve coloca-las todas de uma vez;
10. Guarde as Massas Calibradas no estojo e arrume-o em local próprio;

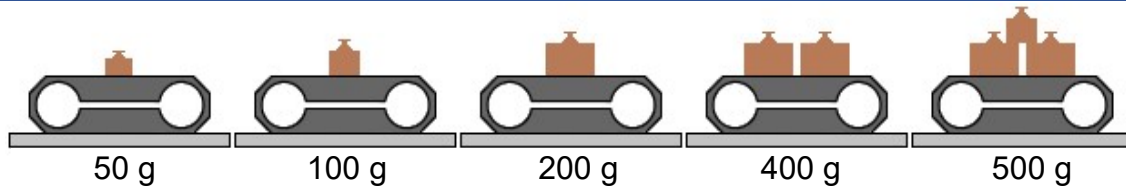


Figura 7 - Esquema de Ensaios de Calibração de 50g, 100g, 200g, 400g e 500g

### Calibração usando Massas Calibradas de 3135 e 4500 gramas

1. Coloque as Massas Calibradas de maior valor (Figura A.III.1 a), de maneira ordenada na Bancada 5;
2. Instale, se necessário, o *Batente* na Célula de Carga;
3. Verificar se a cadeia cinemática se encontra na posição X 244 Y 119. Caso contrário deverá executar:
  - a. Remova a *Espada*, caso instalada;
  - b. Desligue o Botão de Emergência e pressione **ON** (imediatamente à esquerda do último);
  - c. **Com especial atenção e precaução redobrada para evitar colisões** entre os vários elementos presentes, comande a cadeia cinemática para a posição X 244 Y 119;
  - d. Instale a *Espada*. Se verificar que o contacto entre o *Batente* e a *Espada* é demasiado próximo da depressão esférica na base da *Espada*, deve de colocar a *Chapinha* entre o *Batente* e a *Espada* (Figura 6 (c)). Caso ache necessário, proceda a ajustes nas coordenadas da mesa;
  - e. **Por segurança**, pressione o Botão de Emergência;
4. Execute com o Labview o programa TRIAC FRICTON V2.vi;
5. Verifique se o botão **ON/OFF** está na posição **ON**. Em caso afirmativo, carregue em *Run Continuously*;
6. Manualmente, teste a sensibilidade da Célula de Carga exercendo força em cada uma das direcções;
7. Inicie a calibração usando apenas a *Espada*:
  - a. Defina a localização e nome do ficheiro de dados. Sugere-se o nome de *espada.txt*;
  - b. Levante a *Espada*, de maneira a que esta não contacte com a Célula de Carga. Caso tenha colocado a *Chapinha*, esta deve de seguir sempre solidária com o movimento da *Espada*;
  - c. Carregue no Botão de Aquisição: Início da gravação de dados no ficheiro;
  - d. Aguarde 1 a 2 segundos. Desça a *Espada* fazendo-a contactar suavemente com a Célula de Carga;
  - e. Aguarde 1 a 2 segundos. Levante novamente a *Espada*;
  - f. Carregue no Botão de Aquisição: Fim da gravação de dados no ficheiro;
  - g. Desça novamente a *Espada* fazendo-a contactar suavemente com a Célula de Carga;
8. De seguida encontra-se apresentado o ciclo de calibração:
  - a. Defina a localização e o nome do ficheiro que irá conter os dados das calibrações;
  - b. Coloque as massas necessárias no *Prato* da *Espada*;
  - c. Levante a *Espada*, de maneira a que esta não contacte com a Célula de Carga. Caso tenha colocado a *Chapinha*, esta deve de seguir sempre solidária com o movimento da *Espada*;
  - d. Carregue no Botão de Aquisição: Início da gravação de dados no ficheiro;



- e. Aguarde 1 a 2 segundos. Desça a *Espada* fazendo-a contactar suavemente com a Célula de Carga;
  - f. Aguarde 1 a 2 segundos. Levante novamente a *Espada*;
  - g. Carregue no Botão de Aquisição: Fim da gravação de dados no ficheiro;
  - h. Desça novamente a *Espada* fazendo-a contactar suavemente com a Célula de Carga;
  - i. Remova as massas não necessárias do *Prato da Espada*;
9. Repita o passo 7 para as calibrações de 4500, 9000 e 13500 gramas, ou qualquer outro valor possível com a combinação das massas calibradas que tiver disponíveis. Nos ensaios em que é necessária a colocação de mais do que uma massa calibrada, deve de coloca-las todas de uma vez. Note que por motivos de segurança, aconselha-se a que não sejam colocadas mais do que 3 massas ao mesmo tempo no *Prato da Espada*;
10. Arrume as Massas Calibradas em lugar próprio.



Figura A.III.1 - Massas Calibradas: (a) Estojo com Massas de 200, 100 e 50 gramas; (b) de 4500 (1, 2, 3, 4) e 3135 gramas (no topo)

### C-2 Calibração Eixo Tangencial (ou Horizontal)

O seguinte procedimento refere-se à Calibração do Eixo Tangencial (ou Horizontal) da Célula de Carga. Devido a limitações com o Subsistema Tangencial, as calibrações usando as massas calibradas de menor valor não são efectuadas. Apresenta-se assim apenas o procedimento para a calibração usando as massas calibradas de 3135 e 4500 gramas.

#### Calibração usando Massas Calibradas de 3135 e 4500 gramas

1. Coloque as Massas Calibradas de maior valor (Figura A.III.1 b), de maneira ordenada, em cima da Bancada 5. Se necessário, instale o *Batente* na Célula de Carga e remova a *Espada*;
2. Verifique se a posição da cadeia cinemática é a seguinte: X 244 Y 119. Caso contrário deverá executar os seguintes passos:
  - a. Desligue o Botão de Emergência e pressione **ON** (imediatamente à esquerda do último);
  - b. Com especial atenção e precaução redobrada para evitar colisões entre os vários elementos presentes, comande a cadeia cinemática para a posição X 244 Y 119;

- c. Proceda a ajustes nas coordenadas da mesa, de modo a que a esfera na ponta do Subsistema Tangencial se encontre em contacto, mas sem estar em esforço, com o *Batente*. Garanta igualmente que esta se encontra alinhada com o centro do *Batente* (ver Figura 5.1).;
  - d. ***Por segurança***, pressione o *Botão de Emergência*;
3. No *Labview*, verifique se o botão **ON/OFF** está na posição **ON**;
  4. Carregue em *Run Continuously*;
  5. Manualmente, teste a sensibilidade da Célula de Carga exercendo força em cada uma das direcções;
  6. Execute o ciclo de calibração:
    - a. Defina a localização e o nome do ficheiro que irá conter os dados das calibrações;
    - b. Carregue no Botão de Aquisição: Início da gravação de dados no ficheiro;
    - c. Aguarde 1 a 2 segundos. Coloque, com cuidado, as massas calibradas pretendidas no *Prato*.
    - d. Aguarde 1 a 2 segundos. Remova, com cuidado, todas as massas calibradas do *Prato*;
    - e. Carregue no Botão de Aquisição: Fim da gravação de dados no ficheiro;
  7. Repita o passo **6** para as calibrações de 4500, 9000 e 13500 gramas, ou qualquer outro valor possível com a combinação das massas calibradas que tiver disponíveis. Nos ensaios em que é necessária a colocação de mais do que uma massa calibrada, deve de coloca-las uma de cada vez. Note que por motivos de segurança, aconselha-se a que não sejam colocados mais do que 3 massas ao mesmo tempo no *Prato da Espada*;
  8. Arrume as Massas Calibradas em lugar próprio.

## D. Processamento de Dados

Na presente secção é apresentada uma metodologia para o processamento dos dados recolhidos durante os ensaios de calibração.

1. Crie um novo ficheiro de *Excel*, com o nome, por exemplo, Calibrações Simples;
2. Um de cada vez, abra os ficheiros de texto com os dados das calibrações, com o *Excel*. Apenas devem conter dados as colunas A (tempo), B (sinal eixo Normal) e C (sinal eixo Tangencial). Utilizando as funcionalidades do *Excel*, crie uma cópia de cada uma das folhas de cálculo e mova-a para o ficheiro Calibrações Simples;
3. Ao fechar os ficheiros de texto, caso o programa lhe perguntar se deseja gravar as alterações efectuadas selecione a opção **NÃO**;
4. Aconselha-se a ordenar as folhas de cálculo por ordem crescente de valores de massa e agrupa-las em dois blocos: Calibrações Eixo Normal e Calibrações Eixo Tangencial;
5. Procedimento genérico para o processamento de dados em cada folha de cálculo:
  - a. Por defeito, nos ficheiros de texto gerados pelo *Labview*, o separador entre as casas das unidades e das décimas é um ponto. Dependendo das configurações do *Excel* que esteja a utilizar, poderá ser necessário proceder à sua substituição por vírgulas. Verifique igualmente se este procedimento não alterou nenhum valor dos dados presentes;
  - b. Insira na célula D1 a Equação (1) e na célula E1 a Equação (2). Estas equações efectuam uma média local dos valores instantâneos numa vizinhança de 100 valores.

$$= \text{Média}(B1: B101) \tag{1}$$

$$= \text{Média}(C1: C101) \tag{2}$$

Aplique cada fórmula ao resto da respectiva coluna;

- c. Crie um Gráfico com duas séries, tal como se ilustra na Figura 8. No campo Valores X, selecione em ambos os casos, a coluna A. Para o campo Valores Y, selecione, respectivamente, a coluna B e C (Figura 9). Nomeie cada série de acordo com os respectivos dados;

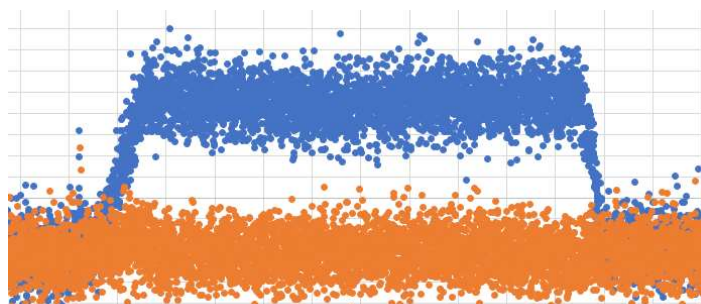


Figura 8 - Exemplo de gráfico de duas séries

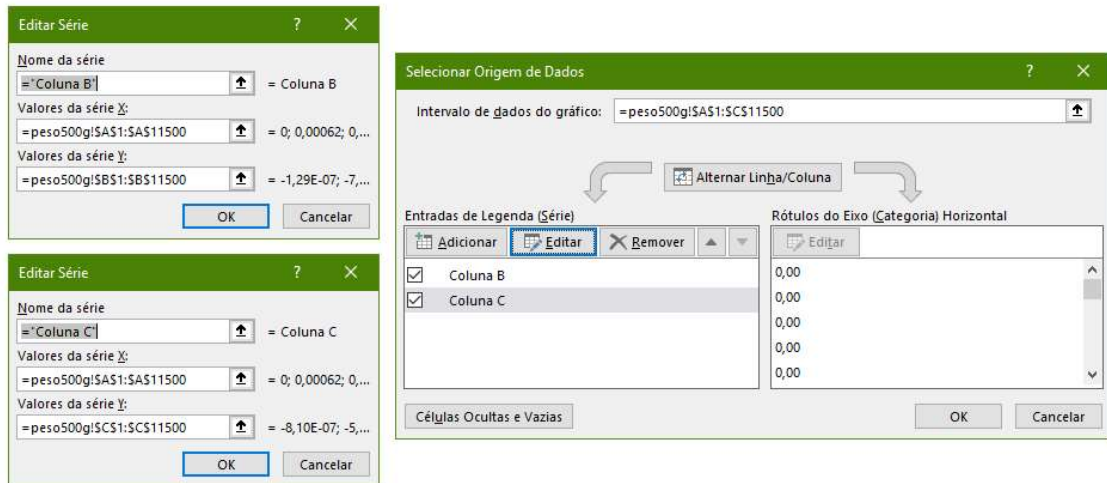


Figura 9 - Exemplo de introdução de dados para o gráfico de duas séries

- d. Ajuste a escala e o tamanho do gráfico de modo a claramente identificar as duas nuvens de pontos;
- e. Crie dois Gráficos, tal como se ilustra na Figura 10. No campo Valores X, selecione em ambos os casos, a coluna A. Para o campo Valores Y, selecione, respectivamente, a coluna D e E;

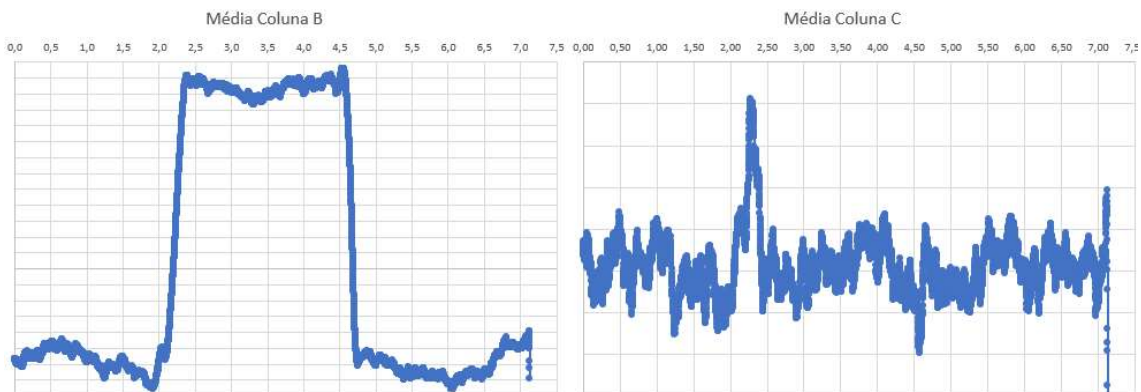


Figura 10 – Exemplo de gráficos representativos das evoluções da média local de cada sinal

- f. Ajuste a escala e o tamanho dos gráficos de modo a identificar, em pelo menos um dos gráficos:
  - i. Um primeiro patamar (carga nula);
  - ii. Uma primeira região de transição (a colocar carga);
  - iii. Um segundo patamar (em carga);
  - iv. Uma segunda região de transição (a remover carga);
  - v. E por último um terceiro patamar (carga nula);

Note que para os casos da calibração do eixo tangencial, como as massas são adicionadas durante o ensaio existem múltiplos patamares e regiões de transição, consoante o número de massas usadas.

- g. No gráfico, dos gerados em 5e, em que melhor consiga visualizar patamares, identifique os valores (do Eixo X) dos extremos do primeiro patamar (sem carga) e do de maior valor (com a maior carga), tal como ilustrado na Figura 11. Proceda de modo conservativo evitando colocar os extremos suficientemente próximos das regiões de transição;



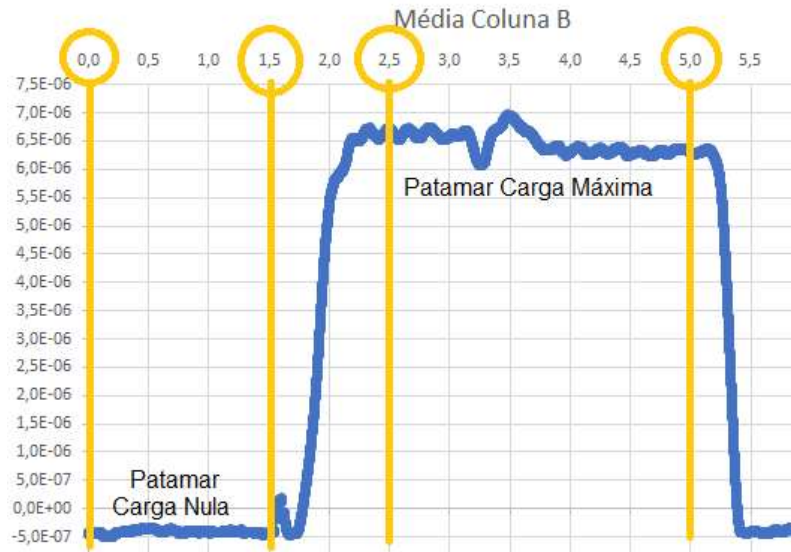


Figura 11 - Identificação valores dos extremos dos patamares

- h. Em ambos os gráficos gerados em 5e, calcule a média dos valores de: (i) Patamar de Carga Nula e (ii) Patamar de Carga Máxima. Em (iii) calcule a diferença entre esses valores (Figura 12);

	Zero	(i)	Patamar	(ii)	Diferença	(iii)
Intervalo	De [] a []		De [] a []			

Figura 12 - Cálculo do valor do step

Note-se que como se tratam de cargas não cruzadas deverá obter um dos gráficos

6. No mesmo Excel, crie uma nova folha de cálculo com o nome de Curvas de Calibração;
7. Nessa folha deve de criar:
  - a. Tabela 1;

Tabela 1 - Pesos das Massas calibradas e outros componentes utilizados na calibração

Nome	Peso [N]	Nome	Peso [N]	Nome	Peso [N]
m50g	0,491	M1	44,28234	Espada	19,78677
m100g	0.981	M2	44,29215	Batente	1,05948
m200g	1.962	M3	44,27253	Chapinha	0,23544
M5	30,75435	M4	44,26272		

- b. Tabela 2, onde:

- i. Identificação da carga aplicada;
- ii. Peso (em Newtons) *efectivo* aplicado (se necessário aplicar *Factor de Correção*);

**Tenha em atenção que deve contabilizar o peso da Espada e Chapinha, nos casos em que as usou.**

- iii. Valor da resposta (em Volts) ao peso aplicado (valores (iii) do passo 5h);

Tabela 2 - Valores Médios do step para Eixo Normal e Tangencial

Eixo Normal (ou Vertical)			Eixo Tangencial (ou Horizontal)		
Carga	Peso [N]	Resposta [V]	Carga	Peso [N]	Resposta [V]
(i)	(ii)	(iii)	(i)	(ii)	(iii)

Esta tabela deverá ter um número de linhas, com dados, igual ao número de ensaios realizados

- c. Crie dois gráficos, um para cada eixo, de Newtons em função Volts, ou seja, do peso em função da resposta do sistema. Use apenas valores para os quais o peso aplicado no eixo não é nulo;
- d. Para ambos os gráficos, crie uma linha de tendência linear, obtendo a sua equação e  $R^2$ ;

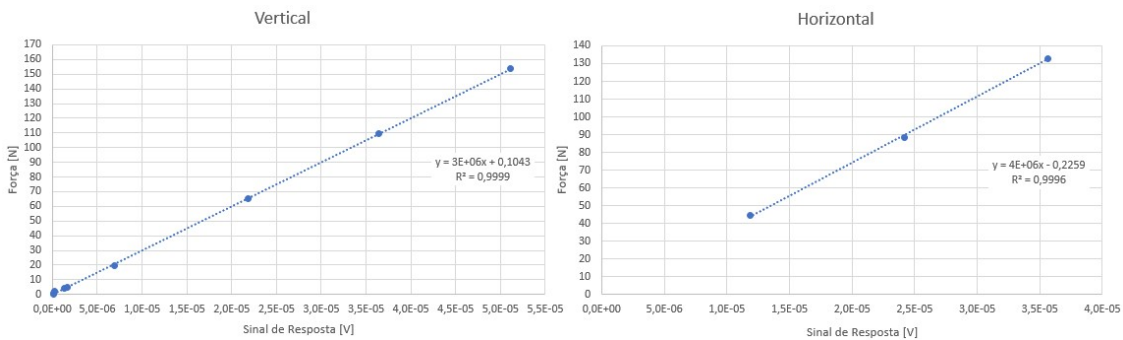


Figura 13 - Exemplo de Gráfico com Curva de Calibração para as Calibrações Simples

8. Obteve assim as curvas de calibração dos dois eixos para o caso das Calibrações Simples.

**Processamento de Dados: Factor de Correção do Eixo Tangencial (ou Horizontal)**

O Subsistema Tangencial (ou Horizontal) não apresenta uma taxa de transmissão de força de 1:1, pelo que deve de proceder à determinação do respetivo fator de correção. Para tal deve aplicar uma carga conhecida na direcção do eixo, sugerindo-se a utilização de um dinamómetro. Proceda à realização deste ensaio usando o procedimento anterior. Aconselha-se a escolher um valor para a carga aplicada com dinamómetro que coincida com pelo menos com um dos valores utilizados nas calibrações anteriores. Efectue este ensaio o número de vezes que considerar necessário. Note que como está a aplicar a carga manualmente existem vários erros induzidos, como: (i) a sua incapacidade de manter o valor de força exactamente constante; (ii) o associado à leitura do valor; e (iii) o do próprio instrumento.

Determine a média dos valores obtidos e calcule o erro entre estas calibrações e as anteriores.

$$Factor\ Calibração = 1 - \left( \frac{Med\_Val\_Cal_{Dinamo} - Med\_Val\_Cal_{Anterior}}{Med\_Val\_Cal_{Dinamo}} \right) \quad (3)$$

E. Anexos

Anexo I - Constituição do Subsistema Tangencial

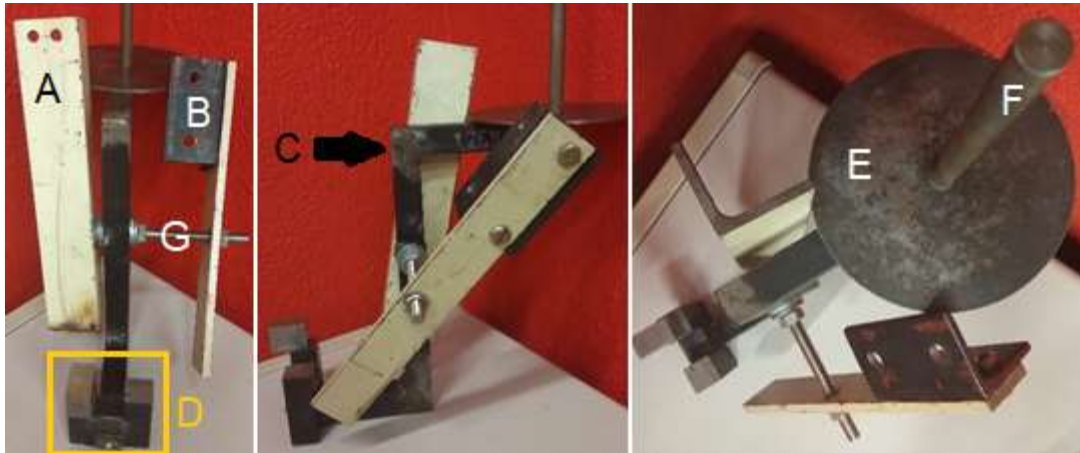


Figura A.I.1 – Vistas Frontal (à esquerda), Lateral Esquerda (ao centro) e Superior (à direita)

Na Figura A.I.1 encontram-se identificados os seguintes elementos:

- A Apoio Direito;
- B Apoio Esquerdo;
- C Corpo em S;
- D Contrapesos de equilíbrio e Esfera de contacto (não removíveis);
- E Prato (onde são colocadas as massas de calibração);
- F Pino Guia;
- G Eixo de Rotação.

Após efectuar a calibração, o Subsistema Tangencial deve ser guardado, tal como se ilustra na Figura A.I.1, na quarta gaveta do armário da Bancada 5 Os parafusos e anilhas usados na fixação deste à estrutura da cadeia cinemática devem ser colocados numa caixa na mesma gaveta. Caso, não exista espaço suficiente para arrumar o Subsistema montado, remova o Pino Guia (F) e a Plataforma (E), desmonte o Eixo de Rotação (G) e o Apoio Esquerdo (B). Guarde parafusos, porcas e anilhas na mesma caixa que os demais.

Anexo II - Constituição do Subsistema Normal



Figura A.II.1 – Constituição do Subsistema Normal (*Espada*)

Na Figura A.II.1 encontram-se identificados os seguintes elementos:

- A Corpo Principal;
- B Prato (onde são colocadas as massas de calibração);
- C Pino Guia.



Anexo IV – Janelas LabView

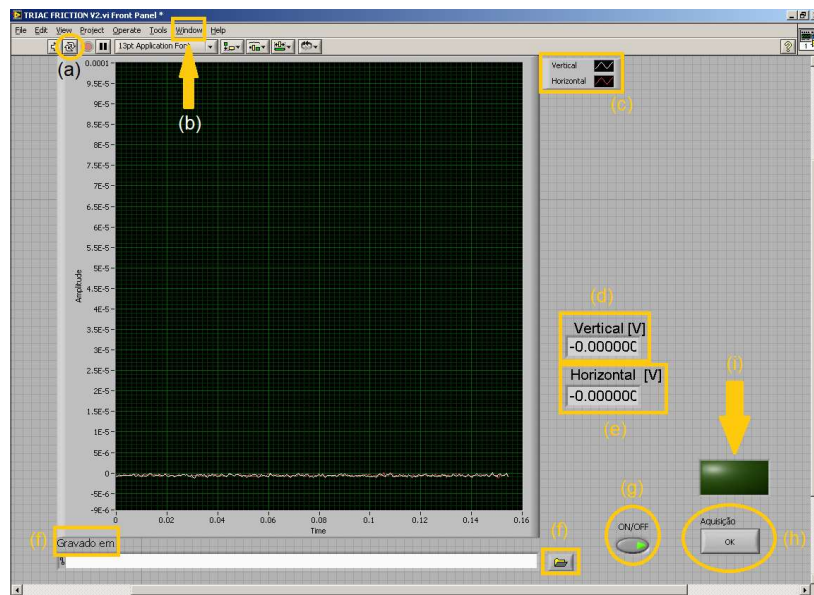


Figura A.IV.1 - Janela Front Panel

Na Figura A.IV.1, encontram-se identificados os seguintes elementos:

- (a) Botão de Comando *Run Continuously*. À direita encontra-se o Botão de Comando **STOP**;
- (b) Barra de Opções: Menu *Window*, cuja primeira opção é *Show Block Diagram*;
- (c) Identificação por código de cores dos sinais presentes no gráfico;
- (d) Valor instantâneo do sinal do Eixo Normal (ou Vertical). Valor em Volts;
- (e) Valor instantâneo do sinal do Eixo Tangencial (ou Horizontal). Valor em Volts;
- (f) Localização do ficheiro de dados a gravar (exemplo: C:\New Folder\New File.txt);
- (g) Botão de Aquisição Continua de Dados. Se **OFF**, apenas são gravados no ficheiro os últimos X números de dados adquiridos, sendo  $X = \text{Samples to Read @ Janela DAQ Assistant}$ . Note-se que na Figura A.IV.1, encontra-se representado o estado ON.
- (h) Botão de Gravação de Dados. Se a gravar, Luz de Gravação em Curso (i) iluminada;
- (i) Luz de Gravação em Curso: **Luz**: Gravação em curso; **Sem Luz**: Não está a gravar.

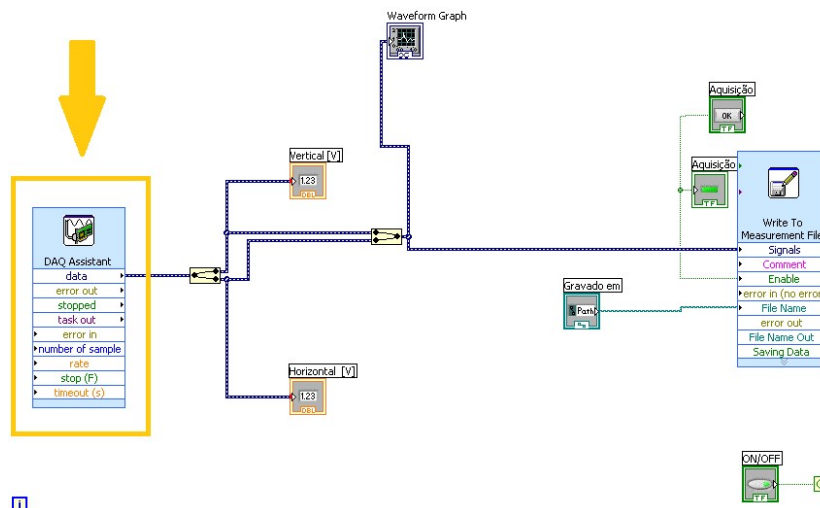


Figura A.IV.2 - Janela *Block Diagram*. Pormenor da localização do Bloco *DAQ Assistant*

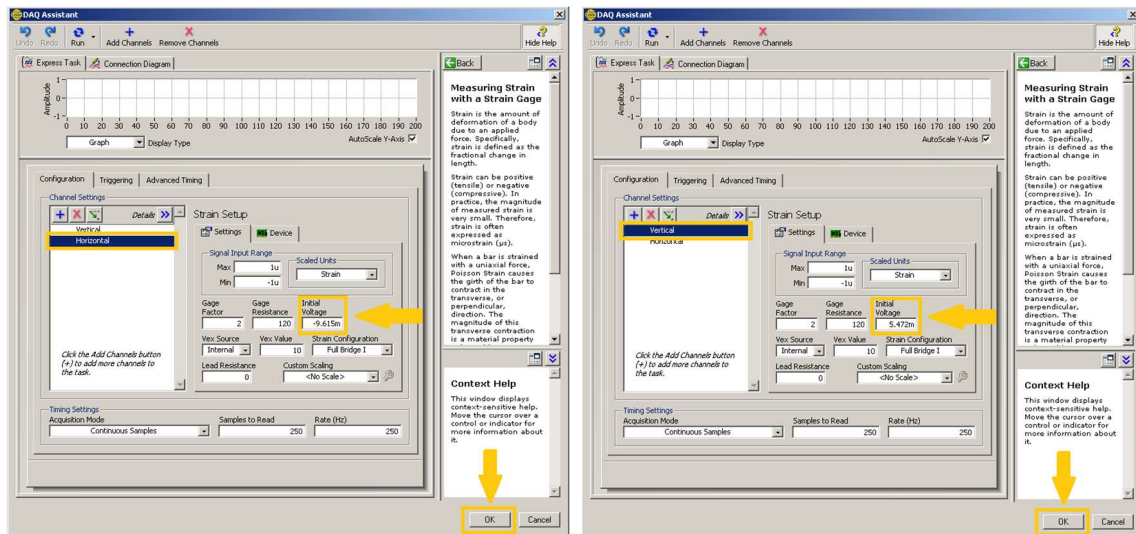


Figura A.IV.3 - Janela *DAQ Assistant*: Eixos Tangencial (ou Horizontal) e Normal (ou Vertical).

Pormenor da localização da caixa de introdução de valor para o parâmetro *Initial Voltage*

Notas sobre a *Nomenclatura* a utilizar para identificação dos ficheiros de calibração:

Aconselha-se que os nomes dos ficheiros a gravar sejam estruturados de maneira a que a sua identificação, à posteriori, seja fácil de efectuar. No entanto não deve colocar nomes demasiado extensos, use abreviaturas. Caso a calibração seja efectuada com recurso às 5 massas calibradas disponíveis, aconselha-se a seguinte nomenclatura: *VMx\_Hy.txt*, onde *V* e *H* identificam os eixos Vertical e Horizontal, *M* indica que se usam as massas calibradas (Figura A.III.1 b) e *x* e *y* identificam as massas aplicadas em cada um dos eixos como se segue: *1* para Massa 1, *12* para Massas 1 e 2, *123* para Massas 1, 2 e 3, e assim sucessivamente (exemplo: *VM1\_H24.txt* é o ensaio em que a Massa 1 está aplicada no Eixo Vertical e as Massas 2 e 4 no Horizontal). Caso não haja carga aplicada num dos eixos colocar o valor zero. Quando usar as massas de 50, 100 e 200 gramas, por simplicidade use o valor da massa como nome do ficheiro (exemplo: *V50g.txt*). Podem igualmente ser utilizadas as letras *N* e *T* (Normal e Tangencial) para identificar os eixos.

## A.2 - Características Técnicas da Cadeia Cinemática

Tabela A.X.1 - Características Técnicas da Cadeia Cinemática TRIAC Denford

Movimento		X: 290 mm	Y: 170 mm	Z: 235 mm
Spindle	Bore	R8 Taper com easychage holder		
	Potência	371W @ 240 V AC		
	Rotação	100 a 2500 rpm		
Motores Eixos X, Y e Z		Motores de Passo 200 passos/rotação		
Velocidade de Avanço		0 a 1000 mm/min		
Precisão		0.01 mm		
Interpolação	Linear	X, Y e Z (com correcção vectorial de avanço)		
	Circular	X e Y		
Zeros	X	Extremo à direita do Spindle		
	Y	Extremo Próximo		
	Z	Extremo Inferior		
Mesa de Trabalho		500x160 mm		
Distância Spindle/Mesa		Máxima: 280 mm		

### A.3 – Graus de Liberdade do Sistema de Calibração

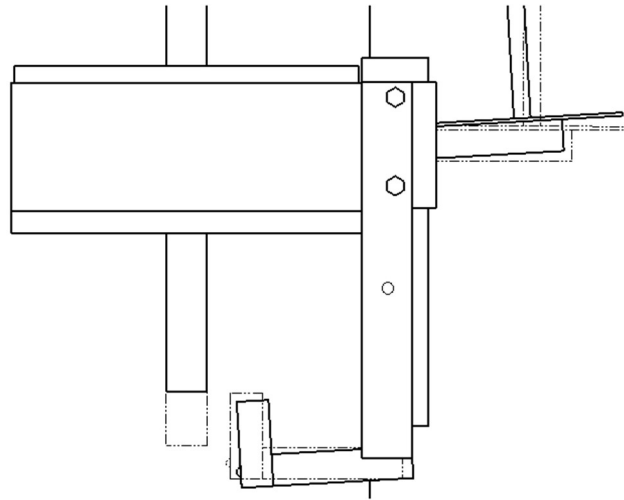


Figura A.3.1 – Graus de Liberdade do Sistema de Calibração (Célula de Carga e *CAPF* não visíveis)

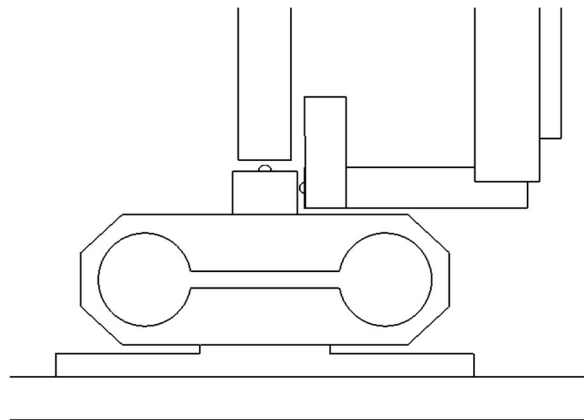


Figura A.3.2 – Pormenor da zona de contacto entre o Sistema de Calibração e o *CAPF*

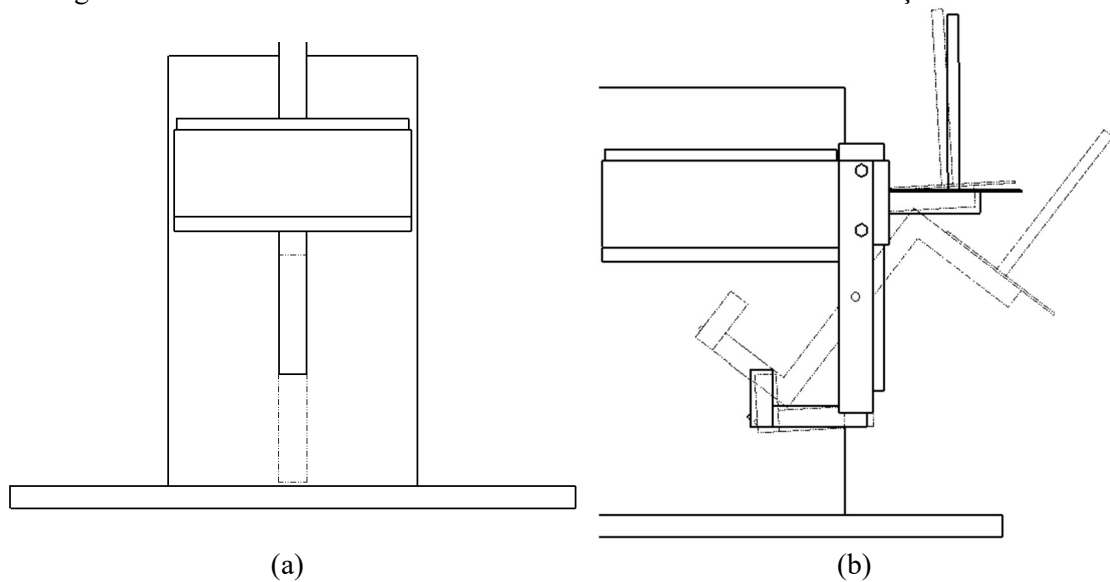


Figura A.3.3 – Graus de Liberdade: (a) CEN e (b) Subsistema de Tangencial



## A.4 - Código G <sup>(1)</sup>

O01

N01 G01 X230 F500

N02 G01 X250 F500

N03 G01 X230 F500

N04 G01 X250 F500

N05 G01 X230 F500

N06 G01 X250 F500

N07 G01 X230 F500

N08 G01 X250 F500

N09 G01 X230 F500

N10 G01 X250 F500

N11 G01 X230 F500

N12 G01 X250 F500

N13 G01 X230 F500

N14 G01 X250 F500

N15 G01 X230 F500

N16 G01 X250 F500

N17 G01 X230 F500

N18 G01 X250 F500

N19 G01 X230 F500

N20 G01 X250 F500

N21 G01 X230 F500

N22 G01 X250 F500

N23 G01 X230 F500

N24 G01 X250 F500

N25 G01 X230 F500

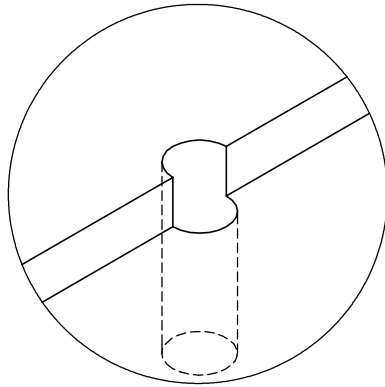
N26 G01 X250 F500

N27 M30

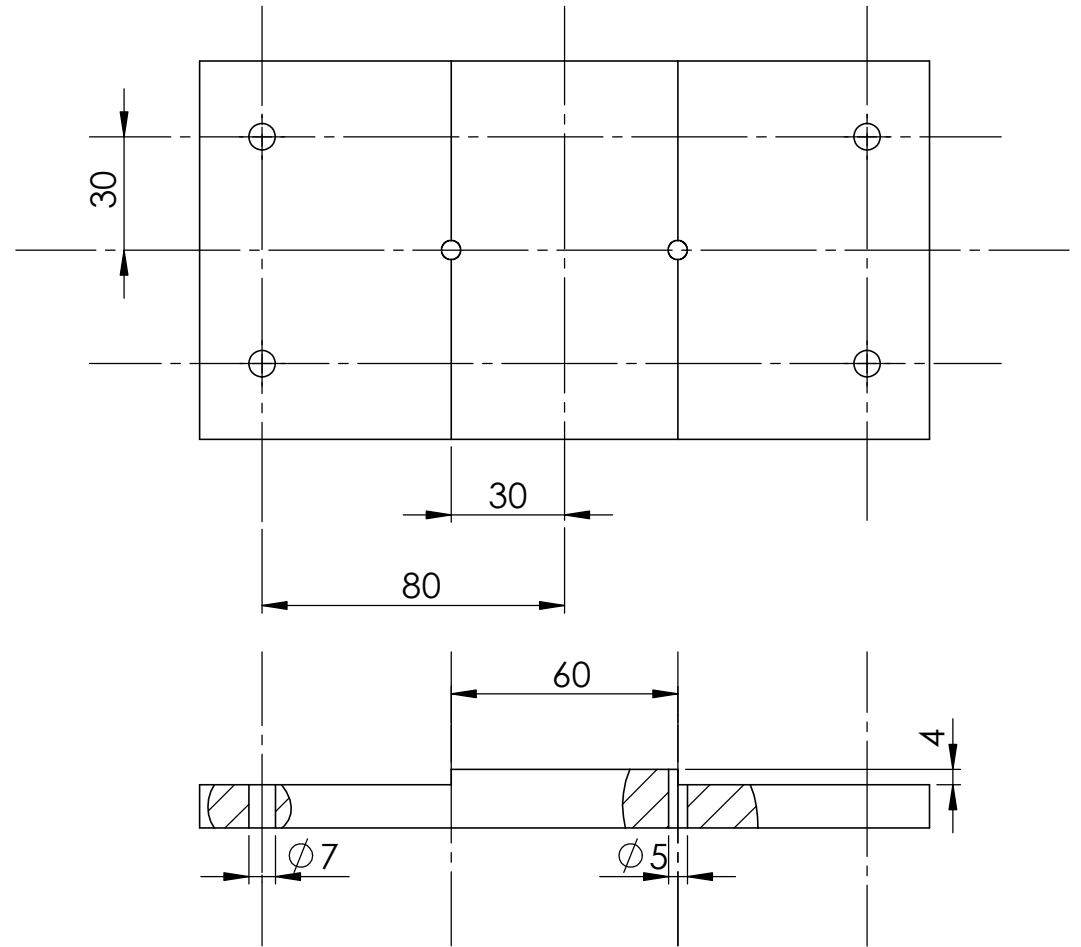
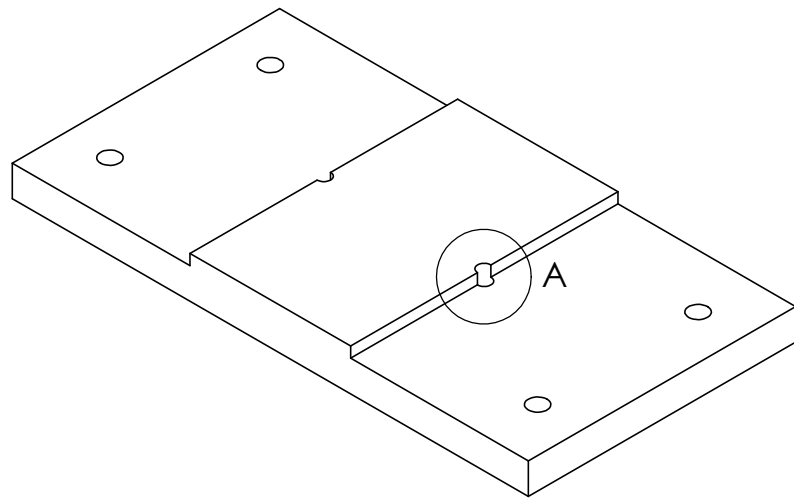
---

<sup>(1)</sup> A aproximação e contacto do provete com a ferramenta é efectuada manualmente, ao centro do comprimento de contacto na ferramenta. Este programa apenas executa automaticamente os ensaios, que são translacções no eixo X, a velocidade constante de 500 mm/min e com total descontacto do provete e ferramenta nos extremos de cada passagens, de modo a se obter o valor de sem carga.

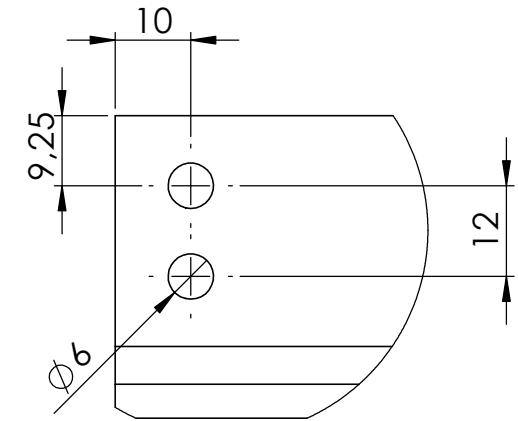
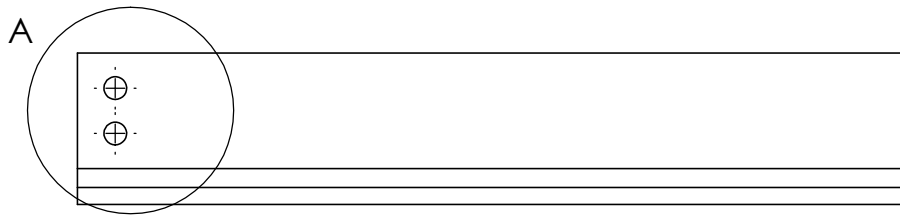




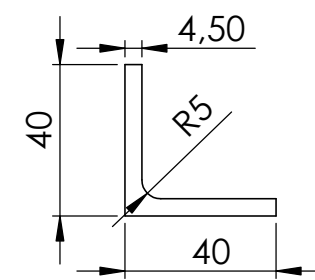
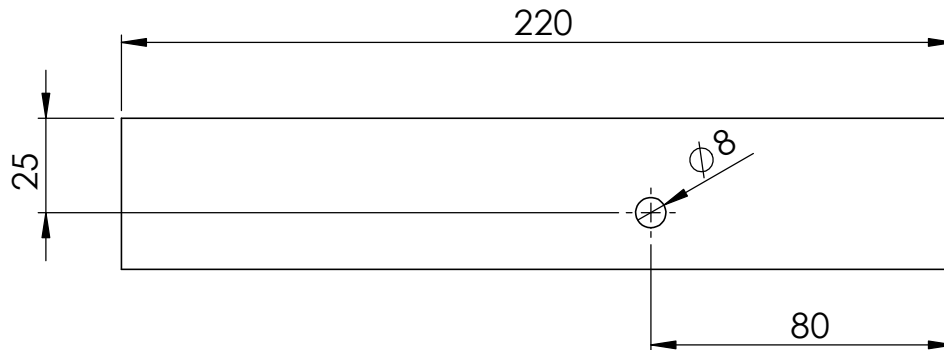
Detalhe A  
Escala 2 : 1



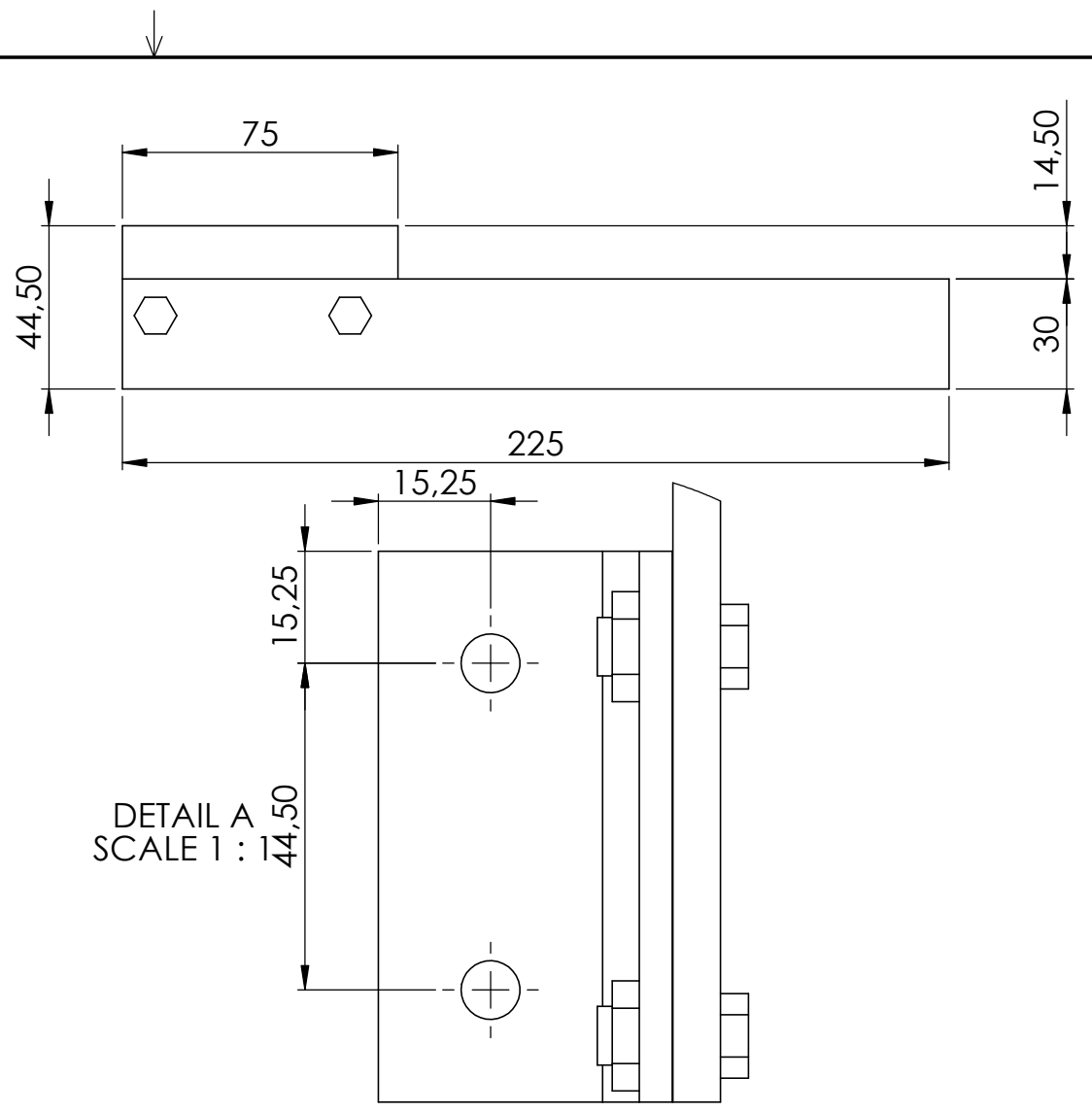
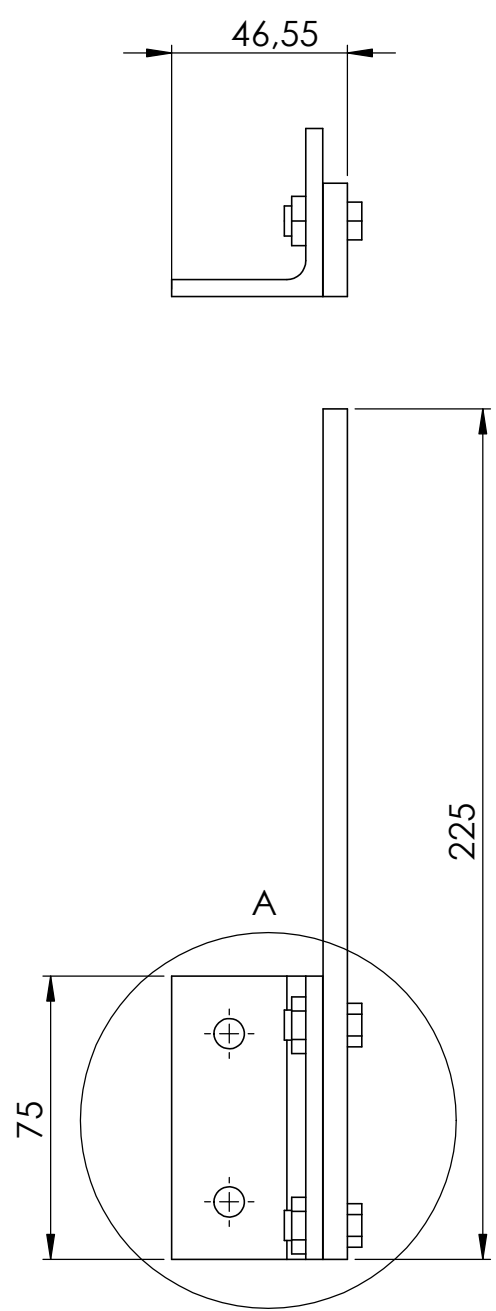
		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Paulo SF Farinha Aluno Nº 70011 Curso: MEMec		
	Desenhou					
	Verificou			<b>Base Célula de Carga</b>		
	Projectou					
Material: Aço	Notas:			Folha	Desenho Nº: 001	Rev.
Tolerâncias Gerais:				A4		
Acabamentos				Escala: 1:1	Peso:	



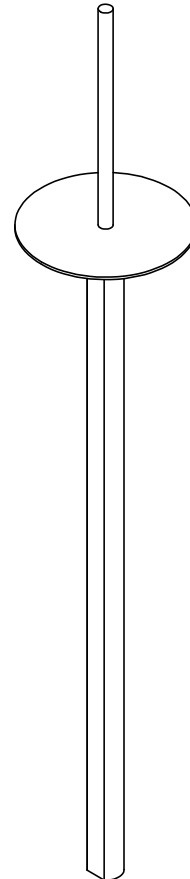
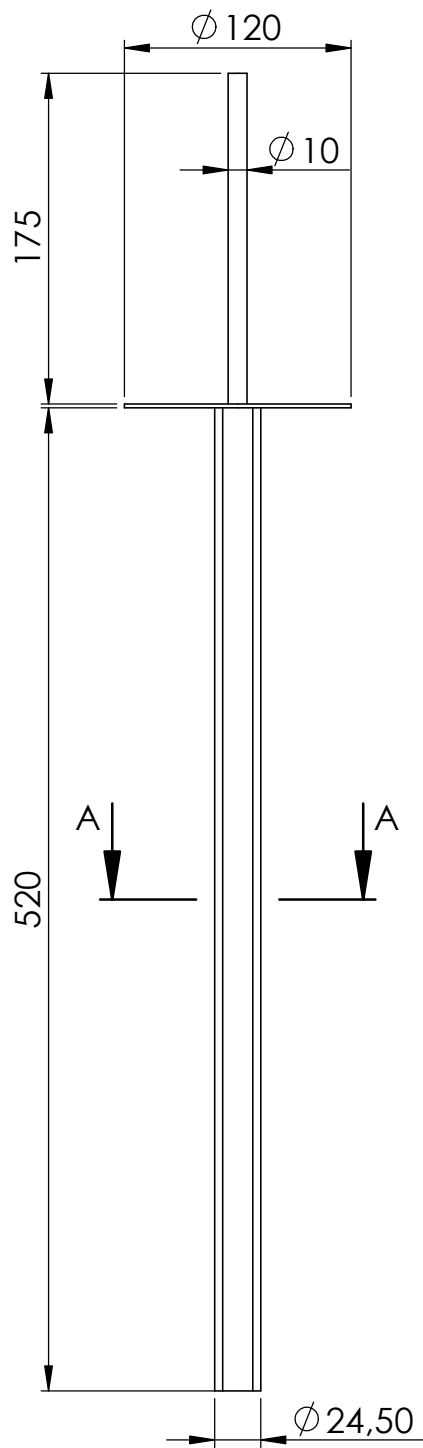
DETALHE A  
ESCALA 1 : 1



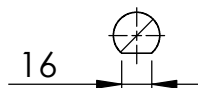
		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Paulo SF Farinha Aluno Nº 70011 Curso MEMec		
	Desenhou					
	Verificou			<b>Apoio Direito</b>		
	Projectou					
	Fabricou					
Material: Aço	Notas:			Folha A4 Desenho Nº: 002 Rev. Escala 1:2 Peso: Folha 1		
Tolerâncias Gerais:						
Acabamentos						

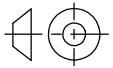



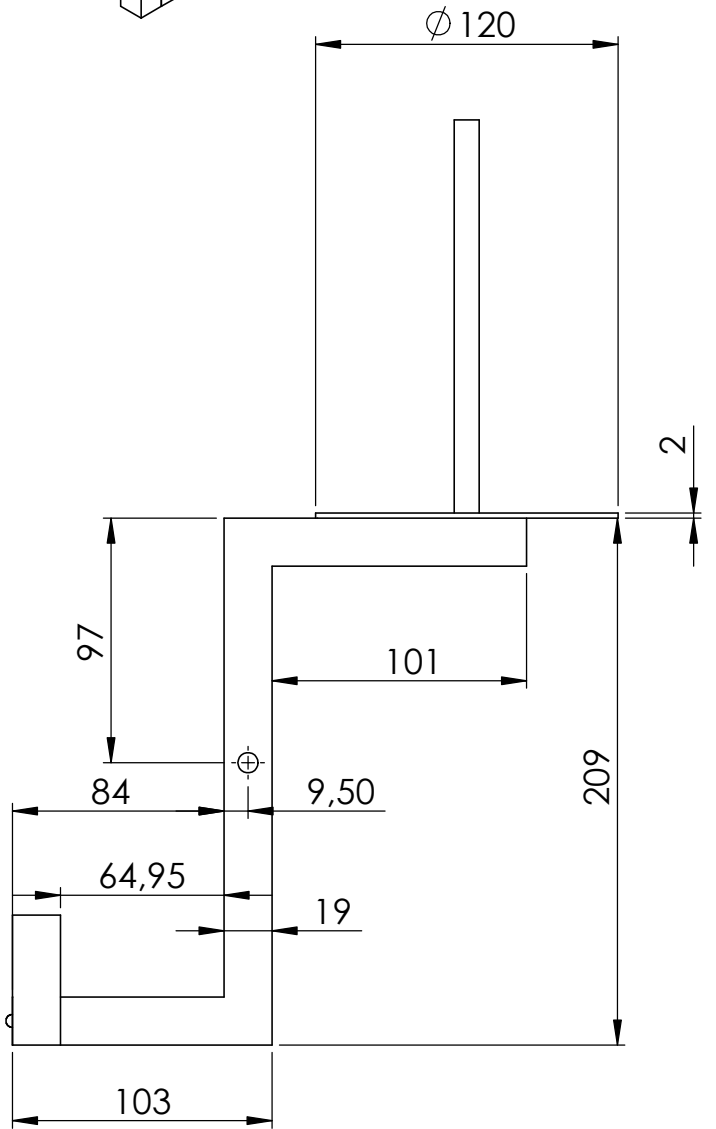
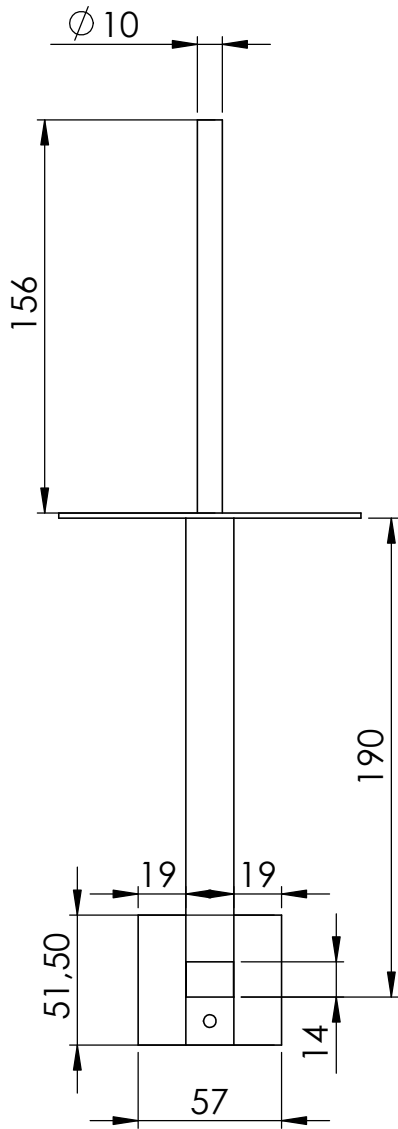
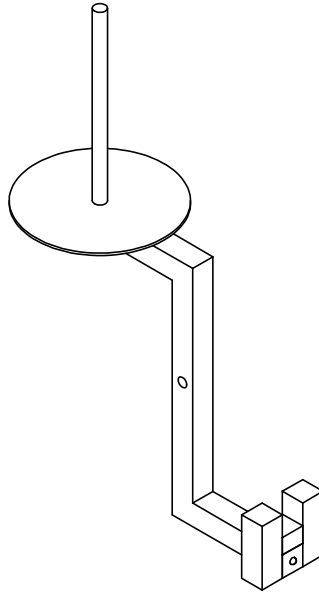
		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Paulo SF Farinha Aluno Nº 70011 Curso MEMec  <b>Apoio Esquerdo Assembly</b>	
	Desenhou				
	Verificou				
	Projectou				
	Fabricou				
Material: Aço	Notas:			Folha	Desenho Nº: 003
Tolerâncias Gerais:				A4	Rev.
Acabamentos				Escala 1:2	Peso:
				Folha 1	



SECÇÃO A-A  
ESCALA 1 : 4



		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b> Nome: Paulo SF Farinha Aluno Nº 70011 Curso MEMec		
	Desenhou					
	Verificou			<b>Componente de Calibração do Eixo Normal</b>		
	Projectou					
	Fabricou					
Material	Notas:			Folha	Desenho Nº: 004	Rev.
Tolerâncias Gerais:				<b>A4</b>		
Acabamentos				Escala 1:4	Peso:	Folha 1



		Rúbrica	Data	<b>Instituto Superior Técnico</b>		
	Desenhou					
	Verificou					
	Projectou					
	Fabricou					
Material	Notas:			<b>Estrutura Móvel</b>		
Tolerâncias Gerais:				Folha <b>A4</b> Desenho Nº: 005 Rev.		
Acabamentos				Escala 1:4 Peso: Folha 1		

## A.6 - Notas sobre o Desenvolvimento Experimental

A primeira intervenção realizada foi refazer toda a cablagem que sai da célula de carga e o processo de ligação dos mesmos. Os fios que saem desta foram ligados por soldadura a dois cabos de dados (um para cada eixo) que ligam à placa de aquisição de dados, para reduzir risco de maus contactos e interferências parasitas.

Foram efetuados testes preliminares a toda a montagem, em que se encontraram vários problemas e foram desenhadas soluções compatíveis:

- a) A influência que o aquecimento do Sistema de Aquisição de Dados tem nos resultados obtidos. Entre o ligar do sistema e a estabilização do valor do sinal recebido, foi notada uma elevada variação dos valores do mesmo. Este teste foi efectuado sem cargas aplicadas à célula de carga. Como tal foi determinado que o sistema deve de ser ligado pelo menos 2 horas antes de realizar ensaios, de modo a garantir que os mesmos são realizados no regime estacionário do sistema.
- b) A influência eletromagnética dos cabos uns nos outros; foram enrolados em folha de alumínio para melhorar a respetiva blindagem;
- c) A possibilidade de dependência entre os eixos da célula de carga e de Histerese. Testes efectuados com uma versão inicial do sistema de calibração, mostraram que ambos os cenários eram hipóteses suficientemente realistas. No entanto, os testes efectuados com o sistema de calibração na sua versão final, demonstraram que, a existir, ambas as influências são da ordem de grandeza dos erros associados ao sistema, pelo que foram consideradas de menor interesse;
- d) O sistema de calibração horizontal não tem uma taxa de transmissão de 100%. Este facto foi constatado após verificação dos valores obtidos no programa de DAQ, quando a força tangencial foi aplicada com recurso a um dinamómetro. Determinou-se o Coeficiente de Correção do Eixo Horizontal, que foi tido em conta na elaboração da curva de calibração horizontal.

Um problema associado à ferramenta foi o tempo gasto no seu reposicionamento sempre que era necessário efetuar uma montagem/desmontagem. Não existindo um bloqueio posicional na montagem, requereu um esforço adicional significativo a replicação da sua posição de montagem. Caso não existisse este procedimento, o seu posicionamento seria quase sempre diferente de ensaio para ensaio com o por simples aperto com um parafuso.



**TÉCNICO**  
LISBOA



Machining and Micro  
Manufacturing

# Rugosímetros Mahr

## Guias Rápidos do Utilizador

Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico  
(LM3)

Laboratório de Maquinagem e Micro-Fabrico (LM3)

Pavilhão de Física Piso 01 Porta 01-7.2 Ext. 3615, 1559 e 1315

Instituto Superior Técnico

Manual escrito por Paulo SF Farinha durante o desenvolvimento da sua Dissertação de Tese de Mestrado “*Influência do Meio Envolvente no Coeficiente de Atrito*”.

Versão 3.0 Lisboa, Novembro de 2018



## A. Procedimento de Preparação para Utilização

1. Retirar todo e qualquer objecto da Zona de Trabalho;
2. Verificar se os seguintes equipamentos se encontram ligados à electricidade:
  - Perthometer S2;
  - Unidade de Controlo da Coluna (*apenas necessário para a “Mesa Grande”*);
  - Computador (*caso necessário*);
3. Verificar as ligações de dados do Perthometer S2:
  - Rugosímetro: Porta X1;
  - Computador: Porta V.24 (*caso necessário*);
4. Ligar a Unidade de Controlo da Coluna (*se necessário Desligar a Emergência*);
5. Movimentar o Rugosímetro, na vertical e com velocidade moderada, para uma posição de segurança;
6. Colocar o Objecto na Mesa de Coordenadas;
7. Ligar o Perthometer S2 e carregar em **M**;
8. Garantir que o braço móvel do Rugosímetro se encontram nas seguintes posições:
  - Vertical Superior (**Tecla 1**);
  - Horizontal Esquerda (**Tecla 3**);
9. Efectuar Procedimento de Aproximação e Contacto.

## B. Procedimento de Aproximação e Contacto

1. Efectuar o Procedimento de Preparação para Utilização;
2. No Perthometer S2, carregar em **M** e verificar:

	Contacto Automático	Contacto Manual
Elevação Apalpador	Ligar	Desligar
Reposição a Zero	Motor	Desligar

*Recomendação:* Use as definições de Contacto Automático

3. Movimentar o Rugosímetro até este estar aproximadamente 2 ou 3 mm a cima da superfície a medir. Aconselha-se que este procedimento seja realizado por incrementos, diminuindo sucessivamente a velocidade à medida que o Rugosímetro vai descendo, sendo a aproximação final realizada à velocidade mínima. **PARAR** imediactamente caso exista contacto entre a ponteira e a superfície.
4. [*Apenas para Contacto Manual*] No Perthometer S2, usar as **Teclas 1 e 2** para movimentar o braço móvel até obter um valor próximo de 0  $\mu\text{m}$ , (barra a negro quase que desaparece). Um bom intervalo de valores é  $[-20,+0] \mu\text{m}$ . Por razões de segurança, evitar se possível valores muito positivos;
5. Efectuar o Procedimento de Medição.

### C. Procedimento de Medição (Interface de Comando: Perthomter S2)

1. Efectuar os Procedimento de Preparação para Utilização e de Aproximação e Contacto;
2. Carregar em **MENU** seguido de **Lt / Lc** para definir o comprimento a percorrer;
3. Selecionar o Submenu Condições de Medição (**Tecla 1**);
4. Verificar se a Norma pretendida está selecionada: *ISO/ASME/JIS* ou *MOTIF* (**Tecla 1**);
5. Retroceder (**Tecla 5**) e seleccionar o Submenu Parâmetros (**Tecla 2**);
6. Verificar se a Norma pretendida está selecionada (**Tecla 1**). Por definição, para a Norma *ISO/ASME/JIS*, a opção **TODOS**, relativo ao número de parâmetros a registar, encontra-se por defeito já selecionada: Tal já não acontece no caso da Norma *MOTIF*, pelo que se aconselha a seleccionar esta opção (**Tecla 2**);
7. Retroceder (**Tecla 5**) e seleccionar o Submenu Protocolo (**Tecla 3**);
8. Verificar o tipo de Perfil pretendido (**Tecla 8**);
9. Retroceder (**Tecla 5**) e verificar se:
  - Todos os parâmetros que se pretendem obter foram selecionados;
  - Existe alguma obstrução ao curso do braço móvel do Rugosímetro;
  - Existe algum equipamento ligado, no laboratório, que produza vibrações capazes de interferir com o correcto funcionamento do Rugosímetro;
10. Carregar em **START** para iniciar a medição e aguarde que a medição seja efectuada.
11. Caso exista algum erro, chamar o Professor ou Técnico de Laboratório. Caso não tal seja possível, recomenda-se a consulta do Manual do Perthometer S2 e/ou do Manual de Utilização do Rugosímetro, que contêm listas de erros e algumas soluções para apenas certos e determinados erros.  
**Em caso de dúvida, por favor ESPERAR pelo Professor ou Técnico de Laboratório;**
12. Após efectuar a medição, os resultados são apresentados no ecrã;
13. Os resultados, perfis e parâmetros, podem ser impressos. Carregar na tecla **PRINT** para abrir o Submenu Impressão. Para imprimir basta carregar no botão correspondente ao que se deseja imprimir.

## D. Procedimento de Medição (Interface de Comando: Computador)

1. Efectuar o Procedimento de Preparação para Utilização;
2. Executar o Programa MahrSurf XR 20;
3. Selecionar o Menu Estação de Medição;
4. No separador Estação de Medição, carregar em **RESET** e verificar:
  - a. Em Posição do Apalpador:
    - Contacto: Automático;
    - Elevação: Posição Superior;
    - Avanço: Ligado;
    - Retrocesso: Ligado;
  - b. Campo de Medição: 2;
  - c. Valor Normal para o Contacto Automático: 0
5. No Separador Parâmetros de Medição, seleccionar a Norma pretendida e o comprimento a medir; Caso pretenda obter várias medições para a mesma passagem, seleccionar Medição Multipla e especificar o número de medições a efectuar. Carregar em Aplicar;
6. No Separador Configuração, verificar:
  - Perthometer: Perthometer S2
  - Unidade de Avanço: PGK ou GD 25 (Verificar equipamento montado);
  - Apalpador: MFW 250 (Verificar equipamento montado);
  - Coluna de Medição e Mesa de Coordenadas:[De momento não necessário];
  - Interface: COM1 9600 bps;
7. Carregar **OK** e de seguida em Transferir Parâmetros;
8. Efectuar o Procedimento de Aproximação e Contacto;
9. Carregar em **Início**;
10. Caso exista algum erro, chamar o Professor ou Técnico de Laboratório. Caso não tal seja possível, recomenda-se a consulta do Manual de Utilização do MahrSurf XR 20 e/ou do Manual de Utilização do Rugosímetro, que contêm listas de erros e algumas soluções para apenas certos e determinados erros. **Em caso de dúvida, por favor ESPERAR pelo Professor ou Técnico de Laboratório;**
11. Após efectuar a medição, os resultados são apresentados no ecrã;
12. Os resultados podem ser exportados para ficheiros .txt usando as opções Exportar Resultados e Exportar Perfil.

## E. Calibração com Perthometer S2 e Padrão PGN 3

1. Efectuar o Procedimento de Preparação para Utilização;
2. Efectuar o Procedimento de Aproximação e Contacto;
3. Carregar em **MENU** seguido de **Lt / Lc** para definir o comprimento a percorrer.  
Por norma usar 5.600 mm;
4. Selecionar o Submenu Apalpador (**Tecla 8**);
5. Com a **Tecla 1** seleccionar o tipo de Apalpador;
6. Com a **Tecla 3** seleccionar a Calibração usando um Padrão tipo PGN-3
7. Com a **Tecla 6** corrigir, se necessário, o valor do Rz do Padrão.
8. Carregar em **START**, para iniciar os testes de calibração.

Após este passo o Perthometer S2 irá controlar automaticamente o Rugosímetro durante 3 testes. Os resultados destes testes irão sendo apresentados no ecrã. No final, o equipamento calcula o desvio, entre os valores medidos e o introduzido. Após este processo estar concluído, Perthometer S2 regressa ao submenu do Apalpador e aparecerá o valor da correcção efectuada ao Rugosímetro.

O Rugosímetro está pronto para ser utilizado.

## Terminar Utilização

Ao terminar, certifique-se de **retirar o objecto da Mesa de Coordenadas**, de colocar o Rugosímetro na **Posição de Segurança** e de **desligar TODOS os Equipamentos** anteriormente ligados.

## Mahr Roughness Meters

### Preparation Procedure

1. Remove all objects from the Work Area;
2. Verify if the following equipments are plugged in:
  - Perthometer S2;
  - Column Control Unit (*only applies if using the “Big Table”*);
  - Computer (*only if needed*);
3. Check the data connections of the Perthometer S2:
  - Roughness Meter: Port X1;
  - Computer: Port V.24 (*only if needed*);
4. Turn on the Column Control Unit;
5. Move the Roughnessmeter, vertically, to a safe position;
6. Place the Object in the Coordinates Table;
7. Turn on the Perthometer S2 and then press **M**;
8. Ensure that the movable arm of the Roughness Meter is in the following positions:
  - Top Vertical (**Key 1**);
  - Horizontal Left (**Key 3**);
9. Carry out Approach and Contact Procedure.

### Approach & Contact Procedure

1. Carry out the Preparation Procedure;
2. On the Perthometer S2, press M and verify:

	Automatic Contact	Manual Contact
Lifting	On	Off
Zero Setting	Motor	Off

*Recomendation:* Use Automatic Contact defenitions

3. Move the Drive Unit until it is about 2 or 3 mm over the surface. **Advice:** Please do carry out this procedure in increments, decreasing the speed successively as the Driving Unit descends, with the final approach being done at the minimum speed. **STOP** immediately if there is minimal contact between the tip and the surface;
4. [*Only if Manual Contact selected*] On the Perthometer S2, use **Keys 1** and **2** to move the Pick-Up to a value close to 0  $\mu\text{m}$  (the black bar almost disappears). A good range of values is  $[-20, + 0] \mu\text{m}$ . For safety reasons, please avoid very positive values, if possible. Please do not exceed OF +;
5. Perform the Measurement Procedure.

## Mahr Roughness Meters

### Measurement Procedure (Comand Interface: Perthomter S2)

1. Carry out the Preparation and Approach & Contact Procedure;
2. Press **MENU**, then **Lt / Lc** to set the measuring length;
3. Select the Measurement Conditions Menu (**Key 1**);
4. Check if the desired Norm is selected: *ISO / ASME / JIS* or *MOTIF* (**Key 1**);
5. Return (**Key 5**) and select the Parameters Menu (**Key 2**);
6. Check if the desired Norm is selected: *ISO / ASME / JIS* or *MOTIF* (**Key 1**).
7. By definition, for the *ISO / ASME / JIS* Norm, the option **ALL**, relative to the number of parameters to be registered, is selected. This does not apply for the *MOTIF* Norm, but it is advisable to select this option (**Key 2**);
8. Return (**Key 5**) and select the Protocol Menu (**Key 3**);
9. Verify if the desired Profile type is selected (**Key 8**);
10. Return (**Key 5**) and check if:
  - All desired parameters have previously been selected;
  - There are no obstructions to the path of the movable arm of the Roughness Meter;
  - There is any equipment that is currently working, in the laboratory, that produces vibrations capable of interfering with the correct operation of the Roughness Meter;
11. Press **START** to start the measurement and wait for the measurement to take place;
12. If there is an error, call the Professor or Laboratory Technician. If this is not possible, it is recommended to consult the Perthometer S2 Manual and/or the Roughnessmeter User Manual, which contain lists of errors and some solutions for only certain and certain errors.  
**In case of doubt, please WAIT for the Professor or Laboratory Technician;**
13. After performing the measurement, the results are displayed on the screen.
14. The results, profiles and parameters can be printed. Press the **PRINT** key to open the Print submenu. To print, simply press the button corresponding to the one you want to print.

## Mahr Roughness Meters

### Measurement Procedure (Comand Interface: Computer)

1. Carry out the Preparation Procedure;
2. Run the MahrSurf XR 20 Software;
3. Select Measurement Station Menu;
4. On the Measurement Station Tab, press **RESET** and verify:
  - a. In Pick Up Position:
    - Contacting: Automatic;
    - Lifting: Upper Position;
    - Transverse: On;
    - Return Travel: On;
  - b. Measuring Range: 2;
  - c. Norminal Value for Automatic Contacting: 0;
5. On the Measurement Parameters tab, select the desired **Standard** and **Lt** (measuring length);
6. If you want to obtain several measurements for the same pass, select **Multi-Measurement** and specify the number of measurements to take. Click **APPLY**;
7. On the Configuration Tab, verify:
  - Perthometer: Perthometer S2;
  - Drive Unit: PGK or GD 25 (check which equipment is mounted);
  - Pick-Up: MFW 250 (check which equipment is mounted);
  - Measurement Stand and XY Table: [Not yet required];
  - Interface: COM1 9600 bps;
8. Press **OK**, then **Transfer Measuring Parameters** to transfer the parameters to the Perthometer S2;
9. Perform the Approach and Contact Procedure;
10. Press **START**;
11. If there is an error, call the Professor or Laboratory Technician. If this is not possible, it is recommended to consult the Perthometer S2 Manual and/or the Roughnessmeter User Manual, which contain lists of errors and some solutions for only certain and certain errors.  
**In case of doubt, please WAIT for the Professor or Laboratory Technician;**
12. After performing the measurement, the results are displayed on the screen;
13. The results can be exported to *.txt* files using the Export Results and Export Profile options.

## Mahr Roughness Meters

### Calibração com Perthometer S2 e Padrão PGN 3

1. Carry out the Preparation Procedur;
2. Perform the Approach and Contact Procedure;
3. Press **MENU**, then **Lt / Lc** to select the measuring length. By default use 5,600 mm.
4. Press **8** to select the Probe Menu;
5. Press **1** to select Pick-Up type;
6. Press **3** to select PGN-3 Calibration;
7. If necessary, press **6** to correct the Rz value to the one written on the pattern;
8. Press the **START** key.

After this step the Perthometer S2 will automatically control the Driving Unit for 3 tests. The results of these tests will be displayed on the screen. At the end, the device calculates the deviation between the measured values and the preset value. After this process is completed, the Perthometer S2 returns to the Pick-Up Menu and the updated correction value will appear.

The Roughness Meter is now ready for use.

### After Use

When you are finished, be sure to **remove the object from the Coordinate Table**, place the Roughness Meters in the **Safety Position**, and **turn OFF ALL Equipment** previously connected.